

Журнал включен в «Перечень периодических научных и научно-технических изданий РФ, рекомендованных для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук»

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Известия высших учебных заведений

ПРИКЛАДНАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА

научно-технический журнал

издается с 1993 года

Выходит 6 раз в год

Том 17, № 3(97), 2009, Саратов

СО Д Е Р Ж А Н И Е

ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ

К 100-летию Саратовского государственного университета

*Материалы XIV международной зимней школы-семинара
по электронике сверхвысоких частот и радиофизике
Россия, Саратов, 3–8 февраля 2009*

<i>Сапарина Д.О., Сухоруков А.П.</i> Уникальные свойства открытых резонаторов и волноводов из слоистого метаматериала	3
<i>Соминский Г.Г., Тумарева Т.А.</i> Разработка и совершенствование полевых эмиттеров на основе содержащих углерод материалов	17
<i>Солнцев В.А.</i> Теория возбуждения волноводов	55

КОНФЕРЕНЦИИ. СЕМИНАРЫ. СИМПОЗИУМЫ. ШКОЛЫ

XIV международная зимняя школа-семинар по электронике СВЧ и радиофизике. Россия, Саратов, 3–8 февраля 2009	90
--	----

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА В ДЕЙСТВИИ

<i>Неймарк Ю.И., Левин А.Я.</i> Играет ли Бог в кости? Человеческое общество как коллективная игра людей: Опыт еще одного монистического взгляда на общество	98
--	----

НАУКА – ОБРАЗОВАНИЮ

<i>Аникин В.М., Пойзнер Б.Н., Усанов Д.А.</i> Схема поаспектной характеристики диссертации: правила, рекомендации, примеры	137
Правила для авторов	151

DEPARTMENT OF EDUCATION AND SCIENCE OF RUSSIAN FEDERATION

Izvestiya VUZ

APPLIED NONLINEAR DYNAMICS

scientific-technical journal

published since 1993

Published 6 times a year

Vol. 17, № 3(97), 2009, Saratov

C O N T E N T S

REVIEWS OF ACTUAL PROBLEMS OF NONLINEAR DYNAMICS

To the 100th Anniversary of the Saratov State University

*Transactions of the XIV international wintry
school-seminar on microwave electronics and radiophysics*

Russia, Saratov, February 3–8, 2009

<i>Saparina D.O., Sukhorukov A.P.</i> Unique properties of open cavities and waveguides containing layered metamaterial	3
<i>Sominski G.G., Tumareva T.A.</i> Development and improvement of field emitters containing carbon materials	17
<i>Solntsev V.A.</i> Theory of waveguides excitation	55

CONFERENCES. MEETINGS. SYMPOSIA. SCIENTIFIC SCHOOLS

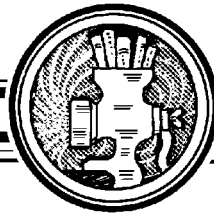
XIV international wintry school-seminar on microwave electronics and radiophysics. Russia, Saratov, February 3–8, 2009	90
--	----

NONLINEAR DYNAMICS IN ACTION

<i>Neimark Yu.I., Levin A.Ya.</i> Does God dice?	98
--	----

SCIENCE FOR EDUCATION

<i>Anikin V.M., Poizner B.N., Usanov D.A.</i> Outline of thesis general characteristics: rules, recommendations, samples	137
Author's rules	151



УНИКАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ОТКРЫТЫХ РЕЗОНАТОРОВ И ВОЛНОВОДОВ ИЗ СЛОИСТОГО МЕТАМАТЕРИАЛА

Д.О. Сапарина, А.П. Сухоруков

Дан обзор работ, посвященных исследованию свойств искусственных сред с отрицательным показателем преломления и их уникальным применениям. Особое внимание уделено описанию отрицательной рефракции и линзовых эффектов в плоскопараллельных слоях из таких метаматериалов. Исследованы свойства и устойчивость волноводных мод в открытых резонаторах и слоистых структурах, которые характеризуются эффективными дифракционными и дисперсионными длинами.

Ключевые слова: Открытый резонатор, метаматериал, отрицательная рефракция, волноводные моды, устойчивость.

Введение

В течение долгого времени считалось, что показатель преломления может принимать только положительные значения, и только в 2000 году были изготовлены первые образцы метаматериалов с отрицательным показателем преломления. Они открывают возможности создания принципиально новых оптических и микроволновых устройств, таких как «суперлинза» с разрешающей способностью меньше длины волны [1] или «плащ-невидимка» [2], позволяющий электромагнитному полю огибать находящиеся внутри него объекты.

Обсуждение явления отрицательного преломления, или связанного с ним явления отрицательной групповой скорости (противоположной фазовой), началось сравнительно давно. Оно упоминалось ещё в работах А. Шустера (1909) [3] и Л.И. Мандельштама (1944) [4]. Теория распространения плоских электромагнитных волн в средах с отрицательной рефракцией была впервые развита в работе В. Веселаго (1967) [5]. В ней показано, что, если и диэлектрическая проницаемость ϵ и магнитная проницаемость μ одновременно имеют отрицательную величину, то из уравнений Максвелла следует, что показатель преломления тоже имеет отрицательный знак. Часто такие среды называют «левыми», так как в них векторы \vec{E} , \vec{H} , \vec{k} составляют левую тройку в отличие от обычных сред, где тройка векторов имеет правую ориентацию. В обеих средах направление вектора Пойнтинга $\vec{S} = c/(4\pi)[\vec{E} \times \vec{H}]$ одинаково, а направление волнового вектора совпадает с направлением вектора Пойнтинга в «правой» среде и противоположно ему в «левой» (рис. 1). Иными словами, в «левых» средах векторы групповой и фазовой скоростей направлены противоположно.

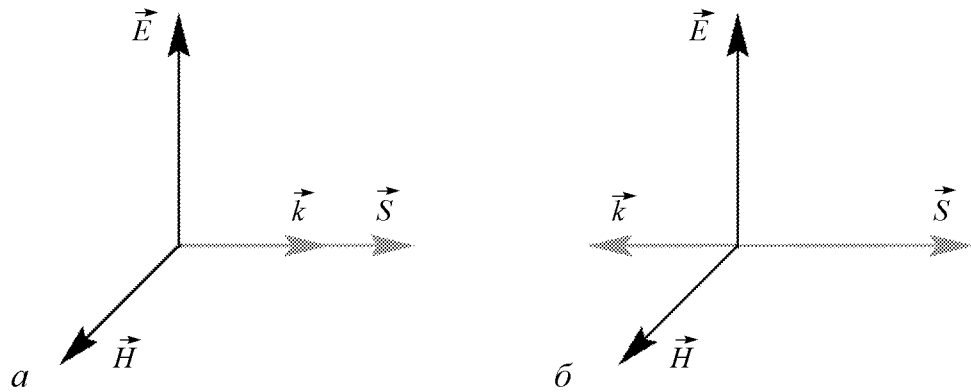


Рис. 1. Векторы \vec{E} , \vec{H} , \vec{k} , \vec{S} в обычной, «правой» (а) и «левой» (б) среде

В природе не встречаются вещества с отрицательным показателем преломления, однако в радиофизике известны устройства и вещества с отрицательной групповой скоростью или отрицательным преломлением. Например, в лампах обратной волны [6] групповая и фазовая скорости противоположно направлены. Такой же эффект может происходить в линиях передачи с инвертированными реактивностями. Принципиальное отличие «левых» сред заключается в том, что они представляют собой двух- или трехмерные структуры, в которых волны могут испытывать преломление и дифракцию.

В оптическом диапазоне явление отрицательного преломления может быть реализовано экспериментально несколькими принципиально различающимися способами [7]. При определенных углах падения света на анизотропную среду может наблюдаться отрицательное преломление, однако другие эффекты, например противонаправленность фазовой и групповой скоростей, не обнаруживаются.

В диспергирующей среде показатель преломления зависит от длины волны $n(\lambda)$ и групповая скорость не совпадает с фазовой скоростью: $v_{gr} = v_{ph} - \lambda(dv_{ph}/d\lambda) = c(n - \lambda(dn/d\lambda))$. Из анализа этого простого выражения следует, что вследствие дисперсии среды даже при положительном показателе преломления групповая и фазовая скорости могут быть противоположно направлены. Именно такую среду, примером которой могут служить пары натрия, рассматривал Шустер [3]. Отрицательное преломление также может возникнуть в результате интерференции волн, отраженных от фотонного кристалла с периодической структурой [8].

Наибольший же интерес представляет создание искусственных квазиоднородных сред, у которых одновременно диэлектрическая и магнитная проницаемости отрицательны, за счет чего отрицателен и показатель преломления. Такой средой является метаматериал, представляющий собой периодическую структуру из особых резонансных элементов с размерами меньше длины волны, которые выполняют ту же роль, что атомы и молекулы в обычных средах. В простейшем случае метаматериал напоминает двумерную линию передач, то есть состоит из емкостей и индуктивностей [9]. Другим вариантом получения метаматериала является использование (1) металлических стержней для создания отрицательной диэлектрической проницаемости за счет плазмонного эффекта и (2) разрезных металлических колец, реагирующих на электромагнитное поле аналогично LC -контурам и обеспечивающих отрицательную магнитную проницаемость. Впервые метаматериал с отрицательным показателем преломления в сантиметровом диапазоне волн был изготовлен в 2000

году Д. Смитом и его коллегами из Калифорнийского университета [10, 11]. Впоследствии были изготовлены метаматериалы и фотонные кристаллы, обладавшие отрицательным преломлением и на других частотах. Оптические метаматериалы [12–15] представляют собой периодически расположенные резонансные элементы (размер около 100 нм), аналогичные тем, которые используются в сантиметровом диапазоне, или периодически расположенные в диэлектрике полости – так называемая сетчатая структура. Минимальная длина волны, для которой был создан метаматериал с отрицательным преломлением [14], равна 780 нм.

Широкое применение метаматериалов сдерживается достаточно большими потерями на резонансных элементах, обеспечивающих нужную дисперсию. Для компенсации потерь предложен механизм, суть которого заключается в помещении резонансных элементов метаматериала в активную среду. Таким образом, при наличии накачки возможна как полная компенсация потерь, так и усиление сигнала [16, 17].

При описании распространения электромагнитных волн в метаматериалах с $\varepsilon < 0$ и $\mu < 0$ из уравнений Максвелла следует, что показатель преломления таких сред имеет отрицательную величину $n = \sqrt{\varepsilon\mu} < 0$, а волновое сопротивление – положительную величину $z = \sqrt{\varepsilon/\mu} > 0$. Это обуславливает качественное отличие протекания многих волновых эффектов в «левых» средах. Так, эффект Доплера в «левых» средах приводит к сдвигу частоты в синюю, а не в красную область спектра; конус черенковского излучения обращен назад, а падающий и преломленный лучи лежат по одну сторону от нормали к границе раздела воздух–метаматериал, как изображено на рис. 2, б. Важно также отметить, что в формулы Френеля для коэффициента отражения входят величины волнового сопротивления $z_j = \sqrt{\varepsilon_j/\mu_j}$; поэтому можно согласовать обычную и «левую» среды так, чтобы не было отражения от их границы: $R = 0$ при $z_1 = z_2$.

Одним из самых замечательных применений метаматериалов является возможность создания «суперлинзы» с субволновым разрешением. В работе Веселаго [5] было показано, как вследствие отрицательного преломления пластина из метаматериала может фокусировать лучи от точечного источника, то есть ведет себя аналогично линзе. В отличие от обычных линз пластина из метаматериала не имеет фиксированного фокусного расстояния, и параллельный пучок лучей такой пластиной не фокусируется. Волновая теория суперлинзы позднее была развита в работе Пендри [1].

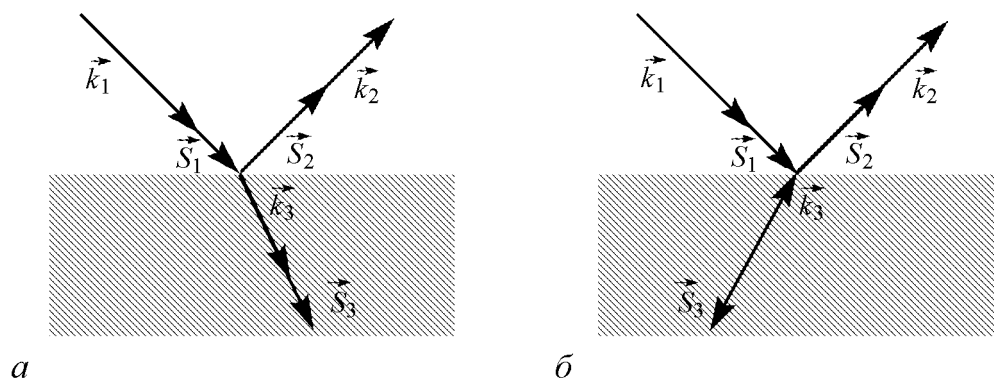


Рис. 2. Преломление волн на границе двух «правых» (а) и «правой» и «левой» (б) сред. Изображены волновые векторы и векторы Пойнтинга $\vec{k}_1, \vec{S}_1, \vec{k}_2, \vec{S}_2, \vec{k}_3, \vec{S}_3$, соответствующие падающей, отраженной и преломленной волне

Напомним, что при использовании разложения поля в угловой спектр субволновым деталям источника или предмета ($d < \lambda$, $k_{\perp} = 2\pi/d > \omega/c$) в обычной среде соответствуют фурье-компоненты с мнимой величиной продольной составляющей волнового вектора $k_{\parallel} = i\sqrt{k_{\perp}^2 - \omega^2/c^2}$. Они экспоненциально затухают в ближней зоне при распространении вдоль оси z : $A \sim \exp(ik_{\parallel}z) = \exp(-|k_{\parallel}|z)$. Поэтому обычные линзы компенсируют дифракционное расплывание, фокусируя только компоненты дальнего поля источника, в то время как информация о субволновых деталях источника, содержащаяся в компонентах ближнего поля, пропадает. Этот дифракционный предел разрешения изображения можно преодолеть при помощи «суперлинзы» из метаматериала: в среде с отрицательным показателем преломления амплитуда фурье-компонент ближнего поля изменяется как $A \sim \exp(-ik_{\parallel}z) = \exp(|k_{\parallel}|z)$, то есть экспоненциально нарастает. В идеальном случае при отсутствии потерь поле на выходе из метаматериала в точности будет повторять поле источника во всех деталях.

1. Волноводы из слоистого метаматериала

Известно, что в линзовой линии может быть осуществлено квазиволноводное распространение пучков [18]. В результате прохождения через линзы радиус кривизны пучка изменяет знак, и происходит периодическая фокусировка пучка, препятствующая его дифракционному уширению. Основной модой такой линзовой линии является гауссов пучок

$$A(r) = A_0 \exp\left(\frac{-r^2}{a_0^2}\right), \quad (1)$$

собственные моды высших порядков находятся из интегрального уравнения

$$\frac{k}{2\pi i L} e^{ikL} e^{i\Psi(\vec{r})} \iint_S A(\vec{R}, 0) \cdot \exp\left[\frac{ik}{2L} (\vec{r} - \vec{R})^2\right] d\vec{R} = \chi A(\vec{r}, 0), \quad (2)$$

где k – волновой вектор; L – расстояние между линзами; $\Psi(\vec{r})$ – функция, описывающая коррекцию фазового фронта, вносимую линзой; χ – постоянный множитель.

Как было отмечено выше, пластина метаматериала аналогично линзе может фокусировать расходящийся пучок лучей. Периодическая последовательность таких пластин в некотором смысле является аналогом открытой линзовой линии, в которой можно осуществить волноводное распространение пучков [19].

Рассмотрим распространение параксиального волнового пучка через периодическую структуру, состоящую из чередующихся слоев с положительными и отрицательными показателями преломления. Считаем, что импедансы сред согласованы и френелевское отражение от границ раздела отсутствует; поглощением пренебрежем. Представляя поле монохроматической квазиплоской волны в слоистой структуре как

$$E(x, y, z) = A(x, y, z) \exp(i\omega t - ik_0 \int_0^z n(z) dz), \quad (3)$$

получим уравнение дифракции для огибающей волнового пучка $A(x, y, z)$ в виде

$$\frac{\partial A(x, y, z)}{\partial z} + i D(z) \Delta_{\perp} A(x, y, z) = 0, \quad (4)$$

где $D(z) = D_0/n_j(z)$ – коэффициент дифракции в j -м слое с показателем преломления n_j , $D_0 = 1/2k_0$ – коэффициент дифракции в вакууме.

Для поперечных фурье-компонент пучка из параболического уравнения (4) получаем обыкновенное дифференциальное уравнение с переменным коэффициентом дифракции

$$\frac{\partial S_{k_x, k_y}(z)}{\partial z} - i D(z) (k_x^2 + k_y^2) S_{k_x, k_y}(z) = 0. \quad (5)$$

Решая его, получим, что после прохождения структуры, состоящей из слоев длиной a_j с общей длиной $L = \sum_j a_j$, амплитуда фурье-компонент огибающей пучка описывается выражением

$$\begin{aligned} S_{k_x, k_y}(z = L) &= S_{k_x, k_y}(z = 0) \exp[i D_0 (k_x^2 + k_y^2) \sum a_j / n_j] = \\ &= S_{k_x, k_y}(z = 0) \exp[i D_0 (k_x^2 + k_y^2) L_{\text{dif}}]. \end{aligned} \quad (6)$$

Из этого выражения следует, что распределение амплитуды после прохождения пучком одного периода слоистой структуры, равного $L_p = a_1 + a_2$, зависит от эффективной дифракционной длины этого периода

$$L_{\text{dif}} = \frac{a_1}{n_1} + \frac{a_2}{n_2}, \quad (7)$$

где a_1 и a_2 – толщины слоев, а $n_1 > 0$ и $n_2 < 0$ – их показатели преломления, соответственно. Принципиальное отличие от слоистой структуры из обычных диэлектрических слоев состоит в том, что эффективная дифракционная длина (7) может быть не только положительной, но и отрицательной или равной нулю величиной.

Если толщины слоев и их показатели преломления подобраны так, что эффективная дифракционная длина равна нулю, $L_{\text{dif}} = 0$, то поперечный профиль пучка на выходе каждого пространственного периода будет в точности повторять начальное распределение амплитуды и фазы. Следовательно, после прохождения всего волновода из слоистого метаматериала огибающая пучка совпадает с начальным профилем. На рис. 3 представлены результаты численного моделирования распространения пучка в слоистом метаматериале; видно, что периодическая фокусировка пучка приводит к его квазиволноводному распространению.

Как отмечено выше, распространение пучков в описанной периодической слоистой структуре во многом сходно с их распространением в открытой линзовой линии [18], так как на границах раздела сред происходит периодическая фокусировка пучка. Тем не менее, имеется ряд существенных отличий. В случае открытой линзовой линии собственные волны имеют дискретный спектр, а основной модой является гауссов пучок. В рассмотренном выше слоистом волноводе с нулевой дифракцией собственной модой служит пучок с любым заданным профилем.

При распространении вдоль линзовой линии происходит набег фазы. Он может быть полностью скомпенсирован при условии равенства нулю оптической длины каждого периода структуры

$$L_{\text{opt}} = n_1 a_1 + n_2 a_2 = 0. \quad (8)$$

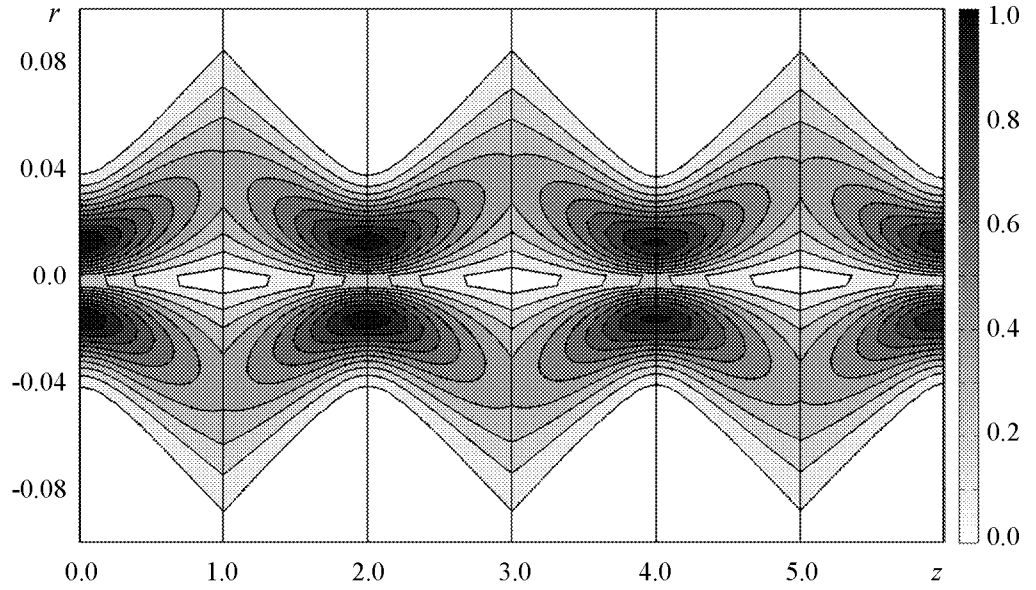


Рис. 3. Распространение пучка с начальным профилем $A(x, y) = (x + iy) \exp(-x^2 - y^2)$ в периодической слоистой структуре, $n_1 = -n_2 = 1$, $l_1 = l_2 = 1$ (в единицах дифракционной длины)

Это свойство может быть использовано в открытых линиях задержки. Отметим важное преимущество слоистого метаматериала. В линии из пластин метаматериала не требуется строгая поперечная юстировка элементов системы: допускается относительное смещение слоев и пучка в перпендикулярном направлении.

В работе [20] рассматривается зонная структура одномерного фотонного кристалла, содержащего слои метаматериала. Дисперсионное соотношение для E -поляризованных волн выражается формулой:

$$\cos q(a_1 + a_2) = \cos k_1 a_1 \cos k_2 a_2 - \frac{\mu^2 + n^2}{2n\mu} \sin k_1 a_1 \sin k_2 a_2, \quad (9)$$

где q – волновое число волны, распространяющейся в периодической структуре; $\mu = \mu_2/\mu_1$ – отношение магнитных проницаемостей; n – относительный показатель преломления; $k_j = n_j k_0$ – волновой вектор в слое j . В числе особенностей зонной структуры фотонного кристалла с метаматериалом можно отметить существование дискретного спектра пропускания, причем дискретные разрешенные частоты находятся внутри запрещенных зон. В работе [19] развита теория распространения гауссовых пучков в фотонном кристалле с метаматериалом.

2. Резонатор, содержащий слои метаматериала

2.1. Резонатор Фабри–Перо. В работе [21] исследовано распространение плоских волн в резонаторе Фабри–Перо, содержащем между плоскими зеркалами слой среды с отрицательным показателем преломления. Набег фазы, приобретаемый плоской волной при полном обходе резонатора, определяется выражением

$$\varphi = k_0 L_{\text{opt}} \quad (10)$$

и должен быть кратным 2π . В обычном резонаторе это выполняется, если длина резонатора кратна половине длины волны, то есть минимальная длина резонатора $L_{\min} = \lambda/2$. Отличие резонатора с метаматериалом состоит в том, что после прохождения через два слоя с положительным и отрицательным показателем преломления оптическая длина может быть равна нулю, $L_{\text{opt}} = a_1 n_1 + a_2 n_2 = 0$. Следовательно, условие кратности длины резонатора половине длины волны снимается, она может быть произвольной, в том числе и меньше половины длины волны. Для такого резонатора, в отличие от обычного, существенно соотношение длин слоев, а не их сумма.

Таким образом, возможно изготовление компактного резонатора размером меньше половины длины волны. Например, для частоты 2 ГГц длина резонатора может составить всего 2.0 см при длине каждого слоя $\lambda/10$ вместо минимальной длины 7.5 см, требуемой в обычном случае [21]. В другой лаборатории был проведен эксперимент [22] с аналогами обычных и «левых» сред. Суммарная длина этих сред оказалась меньше половины длины волны. При этом экспериментально была подтверждена зависимость резонансной частоты от соотношения длин слоев.

2.2. Собственные моды резонатора. В работе [23] рассмотрены собственные моды резонатора с метаматериалом – волны, которые при каждом последующем циклическом проходе восстанавливают свое начальное пространственное распределение амплитуды. При этом набег фазы, приобретаемый в результате прохода резонатора, кратен 2π . Для получения профилей волноводных мод и условий их существования воспользуемся параболическим уравнением дифракции (4) для огибающей пучка и условиями повторяемости амплитудного профиля A после одного полного прохода резонатора

$$A(0) = A(0 + 2L). \quad (11)$$

Основной модой такого резонатора является гауссов пучок с огибающей

$$A(r) = A_{0j} \exp\left(-\frac{r^2}{w_j^2} - \frac{ikn_j r^2}{2R_j}\right), \quad (12)$$

где R_j – радиус кривизны зеркала; w_j – радиус пучка на зеркале; n_j – показатель преломления прилегающего к зеркалу слоя; индекс $j = 1, 2$ означает номер зеркала. Собственные частоты резонатора рассчитываются из условия равенства нулю на зеркалах поля \vec{E}

$$\vec{E}(0) = \vec{E}(L) = 0, \quad (13)$$

приводящего к требованию кратности 2π набегу фаз, приобретаемого пучком при полном обходе резонатора. Собственные частоты гауссовых мод для различных значений индекса продольных мод q определяются выражением

$$2L_{\text{opt}} \frac{\nu_q}{c} = q + \pi^{-1} \arccos \sqrt{\left(1 - \frac{L_{\text{dif}}}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L_{\text{dif}}}{R_2}\right)}, \quad (14)$$

где $L_{\text{opt}} = \sum_j a_j n_j$, $L_{\text{dif}} = \sum_j a_j / n_j$. Расчеты показывают, что ширина гауссовых мод w_j на зеркалах с радиусами кривизны R_j определяется выражениями

$$\frac{w_2^2}{w_1^2} = \left(1 - \frac{L_{\text{dif}}}{R_1}\right) / \left(1 - \frac{L_{\text{dif}}}{R_2}\right), \quad (15)$$

$$\frac{4L_{\text{dif}}^2}{k_0^2 w_1^2 w_2^2} = \frac{L_{\text{dif}}}{R_1} + \frac{L_{\text{dif}}}{R_2} - \frac{L_{\text{dif}}}{R_1} \frac{L_{\text{dif}}}{R_2}, \quad (16)$$

аналогичными полученным для случая пустого резонатора [20], длина которого равна $L_0 = L_{\text{dif}}$.

Как и в случае пустого резонатора [24] собственными модами высших порядков метарезонатора являются обобщенные гауссовы пучки. Собственные частоты резонатора ν_{nmq} , соответствующие собственным модам в виде пучков Эрмита–Гаусса

$$A(z_j) = H_{mn}(x, y) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{a_j^2} - \frac{ik_j r^2}{2R_j}\right) \quad (17)$$

могут быть рассчитаны из условия кратности 2π набегу фаз, приобретаемого при полном проходе резонатора:

$$2L_{\text{opt}} \frac{\nu_{nmq}}{c} = q + (n + m + 1) \pi^{-1} \arccos \sqrt{\left(1 - \frac{L_{\text{dif}}}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L_{\text{dif}}}{R_2}\right)}, \quad (18)$$

где $q = 1, 2, 3, \dots$ – индекс продольной моды, n и m – индексы поперечных мод ($n, m = 0, 1, 2, \dots$).

Таким образом, условия существования волноводных мод резонатора определяются двумя характеристиками слоистой структуры: её эффективной дифракционной длиной

$$L_{\text{dif}} = \sum_j \frac{a_j}{n_j} \quad (19)$$

и эффективной дисперсионной (оптической) длиной

$$L_{\text{opt}} = \sum_j a_j n_j \quad (20)$$

которые, в отличие от обычных резонаторов, в метарезонаторе могут принимать положительные, отрицательные и равные нулю значения.

Отметим, что при $L_{\text{dif}} = 0$ происходит вырождение спектра, и все поперечные моды имеют одинаковую частоту

$$\nu_q = \frac{qc}{2L_{\text{opt}}}. \quad (21)$$

Частотный спектр для пучков Эрмита–Гаусса в резонаторе с двумя выпуклыми зеркалами изображен на рис. 4. Видно, что с приближением величины эффективной дифракционной длины к нулю спектр поперечных мод сужается.

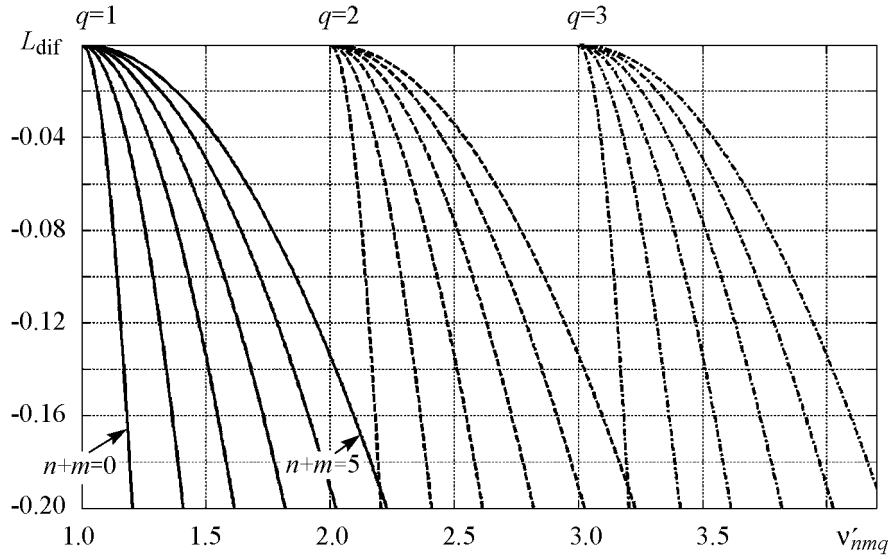


Рис. 4. Зависимость нормированной собственной частоты $v'_{nmq} = 2L_{\text{opt}}v_{nmq}/c$ от эффективной дифракционной длины метарезонатора L_{dif} (сплошная, пунктирная и штрихпунктирная линии отвечают продольным модам с индексами $q = 1, 2, 3$, соответственно, индексы поперечных мод пробегают значения $n, m = 0, 1, 2, \dots$). При нулевой дифракции $L_{\text{dif}} = 0$ все поперечные моды имеют одинаковую собственную частоту. График представлен для резонатора с двумя выпуклыми зеркалами $R_1 = R_2 = -1$

Особым образом следует рассматривать резонатор, эффективная дифракционная длина которого равна нулю

$$L_{\text{dif}} = \sum_j a_j/n_j = 0. \quad (22)$$

В данном случае внутри метарезонатора происходит компенсация дифракционного расплывания аналогично тому, как это было описано выше для случая слоистого волновода с метаматериалом. Рассмотрим один полный обход резонатора. Пусть на выходе первого зеркала задан некоторый произвольный амплитудный профиль $A(x, y)$. Согласно (6), при равной нулю эффективной дифракционной длине (22) после прохождения слоистой структуры перед вторым зеркалом амплитудный профиль пучка равен начальному. Для того чтобы амплитудный профиль совпал с первоначальным после полного обхода резонатора, включающего в себя отражения от зеркал, необходимо также выполнение условия согласования радиусов кривизны зеркал

$$\frac{n_1}{R_1} + \frac{n_N}{R_2} = 0, \quad (23)$$

где n_N – показатель преломления последнего, прилегающего ко второму зеркалу слоя. Таким образом, при выполнении условия (22), (23) собственные волноводные моды метарезонатора имеют произвольное поперечное распределение амплитуды. Интересным является то, что волноводные моды произвольного профиля существуют даже в резонаторе Фабри–Перо, в отличие от пустого открытого резонатора, не имеющего собственных волноводных мод вовсе. Собственные частоты для пучков с произвольным профилем в резонаторе, удовлетворяющем условиям (22), (23), определяются формулой

$$v_q = \frac{qc}{2L_{\text{opt}}}. \quad (24)$$

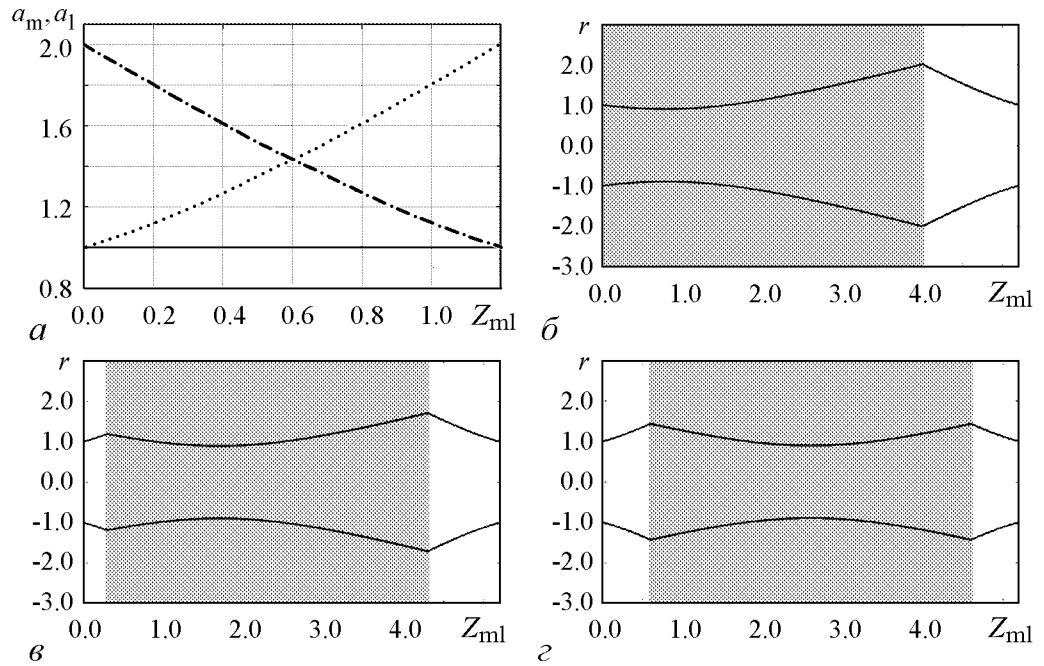


Рис. 5. Зависимость радиусов пучка на левой и правой границах метаслоя a_1 (пунктирная и штрихпунктирная линии, соответственно) от расстояния между левой границей слоя и левым зеркалом Z_{ml} ; при этом радиус пучка на зеркалах не зависит от положения слоя (сплошная линия), $a_m = 1$ (а). Распределение поля в резонаторе при разном положении слоя относительно левого зеркала: $Z_{ml} = 0$ (б), 0.3 (в), 0.6 (г). График представлен для резонатора с двумя выпуклыми зеркалами $R_1 = R_2 = -2$, геометрической длиной $L = 5.2$, толщиной метаслоя $d = 4$, показатель преломления метаслоя $n = -2$

Поскольку в резонаторе с нулевой эффективной дифракционной длиной волноводные моды имеют произвольное поперечное распределение амплитуды, то небольшие изменения амплитудного профиля моды будут сохраняться при многократном прохождении резонатора.

Отметим, что из формулы (6) следует, что радиусы пучка на зеркалах зависят от эффективной дифракционной длины, представляющей собой суммарную характеристику среды. Таким образом, при перемещении слоя метаматериала внутри резонатора профили пучка на зеркалах изменяться не будут, а внутри резонатора структура моды изменится. Пример зависимости ширины моды внутри метарезонатора с двумя выпуклыми зеркалами от положения метаслоя изображен на рис. 5. Видно, что существует некоторое оптимальное положение слоя метаматериала, при котором ширина моды внутри резонатора минимальна и, следовательно, минимальны дифракционные потери. Для симметричных резонаторов с $R_1 = R_2$ предпочтительнее располагать метаматериал в центре резонатора.

2.3. Устойчивость резонатора. Для определения устойчивости волноводных мод резонатора можно воспользоваться как геометрическим, так и волновым подходом. С точки зрения геометрической оптики, устойчивость резонатора означает, что после большого числа проходов резонатора отклоненный от оси резонатора луч не выйдет за его пределы.

Для расчета траекторий лучей может быть использован метод лучевых матриц. Каждому элементу оптической системы ставится в соответствие матрица M , такая

что

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} = \hat{M} \begin{pmatrix} x_1 \\ \varphi_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \varphi_1 \end{pmatrix}, \quad (25)$$

где $x_{1,2}$, $\varphi_{1,2}$ – координаты и углы наклона лучей до и после прохождения оптической системы. Лучевая матрица \hat{M} обладает инвариантом

$$I = \frac{1}{2} \text{Trace}(\hat{M}), \quad (26)$$

во многом определяющим характер прохождения луча через оптическую систему. Как это следует из теории матричного исчисления, для того чтобы после большого числа проходов резонатора отклоненный от оси резонатора луч не вышел за его пределы, необходимо выполнить условие $-1 < I < 1$. В случае, когда внутри резонатора находятся плоскопараллельные слои сред толщиной a_j с показателями преломления n_j , условия устойчивости резонатора имеют вид

$$0 < \left(1 - \frac{L_{\text{dif}}}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L_{\text{dif}}}{R_2}\right) < 1 \quad (27)$$

или

$$0 < g_1 g_2 < 1, \quad (28)$$

совпадающий с условиями устойчивости пустого резонатора, в которые вместо эффективной дифракционной входит геометрическая длина. Отметим, что данные условия в точности совпадают с условиями существования обобщенных гауссовых мод, то есть с условиями, при которых частоты имеют действительную величину в выражении (18). Важно, что в (27) входит не геометрическая, а эффективная дифракционная длина. Главное отличие метареzonатора от резонатора с заполнением обычной средой состоит в том, что при фиксированной геометрической длине оптическая длина может принимать практически любые значения в зависимости от толщины и показателей преломления слоев.

Таким образом, при внесении метаслоя внутрь резонатора изменяется его устойчивость, что может быть использовано для того, чтобы неустойчивый пустой резонатор стал устойчивым. Внесение слоя метаматериала можно рассматривать как изменение положения точки, соответствующей резонатору, на диаграмме устойчивости (рис. 6).

Например, известно, что конфокальный резонатор (ему соответствует точка 1 на рис. 6) с $R_1 = R_2 = L$ является неустойчивым. При внесении в резонатор слоя метаматериала толщиной $\delta/2$ с показателем преломления $n = -1$ произведение $g_1 g_2 = (\delta/L)^2$ удовлетворяет условиям устойчивости (28) и, таким образом, резонатор становится устойчивым (точка 1').

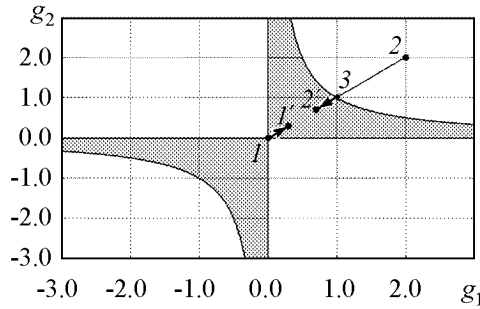


Рис. 6. Области устойчивости резонатора (серая заливка) с метаматериалом. Точки 1, 2 и 3 соответствуют неустойчивым резонаторам: 1 – конфокальному, 2 – с двумя выпуклыми зеркалами, 3 – резонатору Фабри–Перо. Точки 1' и 2' соответствуют конфокальному и резонатору с двумя выпуклыми зеркалами, внутрь которых был внесен слой метаматериала

с двумя выпуклыми зеркалами (точка 2) (например, $L = -R_1 = -R_2$) метаслоя толщиной $(L + \delta)/2$ произведение $g_1 g_2 = (1 - \delta/L)^2$ также удовлетворяет условиям устойчивости (точка 2').

Пустой резонатор Фабри–Перо (точка 3) также является неустойчивым, и остается неустойчивым даже при внесении в него метаслоя, так как за счет плоских зеркал произведение $g_1 g_2 \equiv 1$.

Заключение

Метаматериалы с отрицательным преломлением открывают возможности создания принципиально новых оптических и микроволновых устройств. Плоскопараллельная пластина из метаматериала работает как линза со сверхразрешением. Периодическая последовательность таких пластин образует открытую линию, в которой можно осуществить волноводное распространение пучков благодаря фокусировке пучка на границе раздела сред с разным знаком показателя преломления. Такой волновод из слоистого метаматериала имеет ряд преимуществ по сравнению с линзовой линией, в частности, его собственными модами являются пучки произвольного профиля.

Волновые свойства слоистого метаматериала характеризуются оптической длиной всех слоев $L_{\text{opt}} = \sum n_j a_j$ и эффективной дифракционной длиной $L_{\text{dif}} = \sum a_j/n_j$, где a_j – толщина отдельного слоя. Эти длины могут принимать как положительные, так отрицательные и нулевые значения. Они играют важную роль при описании мод открытого резонатора.

При нулевой оптической длине геометрические размеры метарезонатора Фабри–Перо могут быть существенно меньше длины волны. В резонаторе с нулевой дифракцией волноводные моды имеют произвольный профиль, а собственные частоты не зависят от поперечного распределения амплитуды и определяются только оптической длиной резонатора. Таким образом, дискретный набор собственных волноводных мод резонатора становится сплошным. Ширина моды внутри резонатора зависит от положения слоя метаматериала внутри резонатора и может быть минимизирована.

Введение внутрь резонатора метаматериала существенно изменяет его области устойчивости. В частности, приведены примеры того, как неустойчивый пустой резонатор можно сделать устойчивым.

Работа выполнена при поддержке проектов НШ-671.2008.2, РФФИ 08-02-00717-а, 09-02-01028-а. Работа Д.О. Сапариной поддержана также фондом некоммерческих программ «Династия».

Библиографический список

1. Pendry J.B. Negative refraction makes a perfect lens // Physical Review Letters. 2000. Vol. 85, № 18. P. 3966.
2. Schurig D., Mock J.J., Justice B.J. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies // Science. 2006. Vol. 314. P. 977.
3. Schuster A. An introduction to the Theory of Optics. London: E. Arnold, 1909.

4. *Мандельштам Л.И.* Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. Москва: Наука, 1972.
5. *Веселаго В.Г.* Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ // Успехи физических наук. 1967. Т. 92, № 3. С. 517.
6. *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков в 2 т. Т. 1. Москва: Изд-во Физматлит, 2003.
7. *Krowne C.M., Zhang Y.* Physics of Negative Refraction and Negative Index Materials // Berlin: Springer-Verlag, Berlin; Heidelberg, 2007.
8. *Белотелов В.И., Звездин А.К.* Фотонные кристаллы и другие метаматериалы. Москва: Бюро Квантум, 2006.
9. *Feng Y., Teng X., Chen Y. et al.* Electromagnetic wave propagation in anisotropic metamaterials created by a set of periodic inductor-capacitor circuit networks // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 72. P. 245107(9).
10. *Shelby R.A., Smith D.R., Schultz S.* Experimental verification of a negative index of refraction // Science. 2001. Vol. 292, №6 . P.77-79.
11. *Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C. et al.* Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity // Physical Review Letters. 2000. Vol. 84, № 18. P. 4184.
12. *Shalaev V.M., Cai W., Chattiari U.K. et al.* Negative index of refraction in optical metamaterials // Optics Letters. 2005. Vol. 30, № 24. P. 3356.
13. *Shalaev V.M.* Optical negative-index metamaterials // Nature Photonics. 2007. Vol. 1. P. 41.
14. *Dolling G., Wegener M., Soukoulis C. M., et al.* Negative-index metamaterial at 780 nm wavelength // Optics Letters. 2007. Vol. 32, № 1. P. 53.
15. *Soukoulis C.M., Linden S., Wegener M.* Negative refractive index at optical wavelengths // Science. 2007. Vol. 315. P. 47.
16. *Zheludev N.I., Prosvirnin S.L., Papasimakis N., Fedotov V.A.* Lasing spaser // Nature Photonics. 2008. Vol. 2. P. 351.
17. *Dong Z.-G., Liu H., Li T.* Resonance amplification of left-handed transmission at optical frequencies by stimulated emission of radiation in active metamaterials // Optics Express. 2008. Vol. 16, № 25. P. 20974.
18. *Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П.* Теория волн. Москва: Наука, 1990.
19. *Панфилова Н.О., Сапарина Д.О., Сухоруков А.П.* Распространение волновых пучков в структурах, составленных из слоев с положительными и отрицательными показателями преломления // Известия РАН. Серия физическая. 2006. Т. 70, № 12. С. 1722.
20. *Wu L., He S., Shen L.* Band structure for a one-dimensional photonic crystal containing left-handed materials // Physical review B. 2003. Vol. 67. P. 235103 (6).
21. *Engheta N.* An idea for thin subwavelength cavity resonators using metamaterials with negative permittivity and permeability // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2002. Vol. 1, № 1. P. 10-13.

22. *Jiang T., Feng Y.* Transmission line realization of subwavelength resonator formed by a pair of conventional and LHM slabs // *Journal of Zhejiang University Science A.* 2006. Vol. 7, № 1. P. 76.
23. *Сапарина Д.О., Сухоруков А.П.* Свойства гауссовых волноводных мод оптического резонатора с метаматериалом // *Известия РАН. Серия физическая.* 2008. Т. 72, № 12. С. 1701.
24. *Быков В. П., Силичев О.О.* Лазерные резонаторы. М.: Физматлит, 2004.

Поступила в редакцию 4.03.2009

UNIQUE PROPERTIES OF OPEN CAVITIES AND WAVEGUIDES CONTAINING LAYERED METAMATERIAL

D.O. Saparina, A.P. Sukhorukov

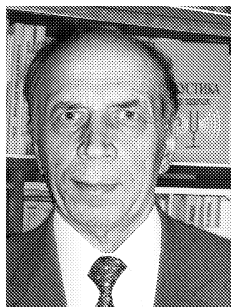
The review of works on studying artificial media with negative refractive index and their unique application is given. We make a point of negative refraction and lens effects in plan-parallel layers of such metamaterials. The properties and stability conditions of waveguide modes in layered structures and open cavities are considered in terms of the effective diffraction and dispersion lengths.

Keywords: Open cavities, metamaterial, negative refraction, waveguide modes, stability.



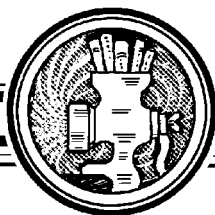
Сапарина Дарья Олеговна – родилась в Саратове (1987). Студентка 5 курса кафедры фотоники и физики микроволн физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. В 2007/2008 году ей была присуждена стипендия Ректора МГУ и Президента РФ. Область научных интересов – волновая оптика, распространение волн в метаматериалах. Является автором 5 статей.

119899, Москва, ГСП В-234, Воробьевы горы,
МГУ, физический факультет
E-mail: saparyna@gmail.com



Сухоруков Анатолий Петрович – родился в Москве (1935). Окончил физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (1961). Доктор физико-математических наук (1974), профессор (1977), зав. кафедрой фотоники и физики микроволн (ранее радиофизики) (с 1988 по настоящее время), декан (1989–1992) физического факультета. Лауреат Ленинской премии (1988), Государственной премии СССР (1984) и Ломоносовской премии (2006). Заслуженный деятель науки РФ (1996), заслуженный профессор Московского университета (2003). Область научных интересов: волновые процессы, нелинейная оптика и акустика, физика солитонов, лазерная физика, физика микроволн. Читает курс лекций «Теория волн» для студентов отделения радиофизики и электроники. Опубликовал более 300 научных работ, в том числе 2 учебных пособия и 3 монографии.

119899, Москва, ГСП В-234, Воробьевы горы,
МГУ, физический факультет
E-mail: apsmsu@gmail.com



РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОЛЕВЫХ ЭМИТТЕРОВ НА ОСНОВЕ СОДЕРЖАЩИХ УГЛЕРОД МАТЕРИАЛОВ

Г.Г. Соминский, Т.А. Тумарева

Описаны достижения и проблемы в создании полевых эмиттеров для вакуумных СВЧ-устройств. Основное внимание уделено эмиттерам на основе содержащих углерод материалов для высоковольтных электронных устройств, работающих в техническом вакууме $10^{-6} - 10^{-8}$ Торр. Приведен краткий обзор существующих разработок и описаны результаты исследований, выполненных в СПбГПУ.

Ключевые слова: Полевые эмиттеры, углеродные и содержащие углерод материалы, фуллереновые покрытия, вакуумная СВЧ-электроника, технический вакуум, сильные электрические поля, большие токи, долговечность, активировка, ионная обработка.

Пока человек думает, что не может сделать что-нибудь, он не может это сделать.

Б. Спиноза

Введение

Использование полевых эмиттеров представляется привлекательным при построении широкого класса электронных устройств, в том числе и устройств СВЧ-электроники. Однако эмиттеры такого сорта до сих пор с успехом используются лишь в сверхвысоковакуумных, низковольтных и слаботочных системах, где можно свести к минимуму вредное воздействие ионной бомбардировки и газовой среды. Влияние указанных факторов особенно велико в высоковольтных устройствах, работающих в условиях технического вакуума. В них не удастся, как правило, обеспечить высокую долговечность полевых эмиттеров. Ограничивают применение полевых эмиттеров также трудности получения с их помощью достаточно больших токов, необходимых для функционирования многих электронных устройств.

Распространена точка зрения, что повышенной устойчивостью к газовой среде и к воздействию ионной бомбардировки должны обладать углеродные и содержащие углерод эмиттеры, а также эмиттеры со специальными защитными покрытиями из этих материалов (см., например, [1–3]). В данной статье основное внимание уделено рассмотрению достижений и проблем по созданию полевых эмиттеров на основе

содержащих углерод материалов для высоковольтных электронных устройств, работающих в техническом вакууме 10^{-6} – 10^{-8} Торр. Приведен краткий обзор существующих разработок и рассмотрены результаты исследований, выполненных в СПбГПУ. В разделах 1 и 2 проанализированы имеющиеся в литературе данные об основных факторах, влияющих на работу полевых эмиттеров, и сформулированы требования к эмиттерам для СВЧ-устройств. Далее, в разделе 3 указаны важнейшие достижения в разработке полевых эмиттеров на основе углеродных и содержащих углерод материалов, анализируются трудности создания на их основе катодов для СВЧ-устройств. Наконец, в Заключение подводятся итоги, сформулированы основные выводы, указаны возможные планы и перспективы дальнейших исследований.

1. Основные факторы, влияющие на работу полевых эмиттеров

Полевая эмиссия имеет место в условиях, когда у поверхности твердого тела созданы достаточно сильные электрические поля, более 10^7 В/см. Теория полевой эмиссии, связанной с туннелированием электронов из твердого тела в вакуум, хорошо развита практически только для химически однородных проводящих материалов при низкой температуре. В этом случае для оценки плотности тока эмиссии можно воспользоваться соотношением Фаулера–Нордгейма [4–6]:

$$J = \frac{e^3 E^2}{8\pi h \varphi t^2(y)} \exp \left\{ -\frac{8\pi \sqrt{2m} \varphi^{2/3}}{3heE} v(y) \right\}, \quad (1)$$

где φ – работа выхода, m и e – соответственно масса и заряд электрона, E – электрическое поле у поверхности эмиттера, h – постоянная Планка, ε_0 – электрическая постоянная,

$$y = \frac{1}{\varphi} \sqrt{\frac{e^2 E}{4\pi \varepsilon_0}}, \quad (2)$$

$$t(y) = 1 + 0.1107y^{1.33}, \quad (3)$$

$$v(y) = 1 - y^{1.69}. \quad (4)$$

В случае треугольного потенциального барьера на границе твердое тело – вакуум формула Фаулера–Нордгейма приближенно описывается выражением

$$J = 1.54 \cdot 10^{-6} \frac{E^2}{\varphi} \exp \left\{ -6.83 \cdot 10^9 \frac{\varphi^{3/2}}{E} \right\}, \quad (5)$$

в котором работа выхода φ выражена в эВ, плотность тока J – в А/м², а напряженность поля E – в В/м.

Чтобы рассчитать плотность тока эмиссии, необходимо знать величину поля E . К сожалению, однако, поле удастся определить лишь в некоторых простейших ситуациях (см., например, [7]). Так, для одиночного острия на длинной цилиндрической ножке с полусферической вершиной радиуса r поле у вершины острия в первом

приближении определяется соотношением

$$E \approx \frac{U}{kr}, \quad (6)$$

где U – напряжение между катодом и анодом, а $k \approx 5$ – эмпирически определенный коэффициент формы. Величина поля зависит, конечно, от расстояния между катодом и анодом. Однако изменение поля с расстоянием невелико. Сильнее могут повлиять на величину эмиссионного тока даже малые выступы на вершине острия, дополнительно усиливающие поле.

Для одиночного выступа на плоской поверхности катода в диоде с протяженными параллельными электродами электрическое поле у вершины выступа можно рассчитать с помощью формулы

$$E = \gamma \frac{U}{d}, \quad (7)$$

где коэффициент γ для выступа со сферической поверхностью определяется соотношением

$$\gamma \approx 1.2 \left(2.15 + \frac{l}{R} \right)^{0.90}, \quad (8)$$

в котором l – высота выступа, а R – радиус его вершины. И здесь, как и в предыдущем случае, поле может быть дополнительно усилено, даже на малых неровностях поверхности.

Если на эмитирующей поверхности существует структура выступов, при расчете поля у каждого из них необходимо учитывать явление «экранировки» поля (см., например, [7–9]). В связи с экранировкой эмиссионные свойства структуры выступов зависят от плотности и морфологии этой структуры. Проведенные расчеты свидетельствуют, что для одинаковых выступов, диаметр вершины которых существенно меньше их высоты l , можно в первом приближении пренебречь экранировкой поля, если расстояние между выступами больше $2l$. Таким образом, соотношения (7, 8) могут быть использованы для оценки поля у вершины выступа только для системы достаточно редко расположенных выступов. Зависят поля на вершинах выступов также от формы и взаимного расположения катода и анода [10].

Подытоживая, можно сказать, что для эмиттеров со сложным рельефом поверхности, как правило, трудно определить истинное значение электрического поля при заданном напряжении U между катодом и анодом. Не всегда просто определить и площадь эмитирующей поверхности. Но уравнение (5) можно преобразовать в зависимость тока I от напряжения U , введя одновременно фактор усиления поля β , определяющий связь поля с напряжением

$$E = \beta U. \quad (9)$$

С учетом соотношения (9) выражение (5) можно записать в виде

$$I = A \frac{(\beta U)^2}{\varphi} \exp \left\{ -B \frac{\varphi^{3/2}}{\beta U} \right\}, \quad (10)$$

где A и B – коэффициенты, не зависящие ни от распределения поля, ни от работы выхода эмиттера. При полевой эмиссии зависимость $\ln I$ от величины $1/U$ – прямая

линия, наклон которой определяется отношением $\varphi^{3/2}/\beta$. Определив наклон этой характеристики и зная величину работы выхода, можно найти коэффициент β .

Таким образом, на величину тока полевой эмиссии могут сильно влиять даже малые изменения работы выхода и рельефа поверхности полевого эмиттера.

Уже в 1950-х годах при изучении работы острых полевых эмиттеров из тугоплавких металлов было выявлено влияние ионной бомбардировки и газовой среды на функционирование таких эмиттеров. Подробно анализируется влияние указанных факторов, например, в работе [10]. Ее авторы объясняют изменения тока полевой эмиссии, наблюдаемые во время работы диода с острым катодом, изменением работы выхода и рельефа поверхности острия. Первое они связывают с попаданием на острие различного рода «загрязнений» (молекул остаточного газа или частиц вещества, десорбированных с деталей и внутренней поверхности оболочки вакуумного прибора). Второе же, по их мнению, обусловлено распылением (как правило, неоднородным) острия ионами, образованными в результате ионизации частиц остаточного газа или в результате электронной бомбардировки анода и стенок вакуумного прибора. Авторы [10] свели к минимуму вредное влияние указанных факторов, обеспечив сверхнизкое давление в работающем приборе (по их оценкам, это давление было порядка 10^{-13} мм рт. ст.) и предельно уменьшив влияние на работу катода потоков частиц со стенок прибора. В результате они добились выдающихся результатов, которые, возможно, недооценены в полной мере до сих пор. В их работе с одиночного вольфрамового острия диаметром 0.3 мкм при высоких рабочих напряжениях (больше 10 кВ) получен в статическом режиме ток 7.5 мА, а в режиме коротких (1 мкс) импульсов с частотой следования 120 Гц достигнут ток около 100 мА. При отборе таких токов обеспечена долговечность катодов, измеряемая тысячами часов. Иллюстрируют изменения тока эмиссии во времени рис. 1, 2. В условиях, когда ток эмиссии не ограничен полем пространственного заряда, как правило, наряду с «медленными» изменениями токов, наблюдаются «быстрые» их флуктуации (см., например, рис. 2). Причины нестабильностей тока и флуктуаций многообразны и не всегда ясны. Изменения токов могут быть обусловлены, например, адсорбцией разных веществ на поверхности эмиттера или их десорбцией, изменением рельефа поверхности под действием ионной бомбардировки. Иногда флуктуации могут быть

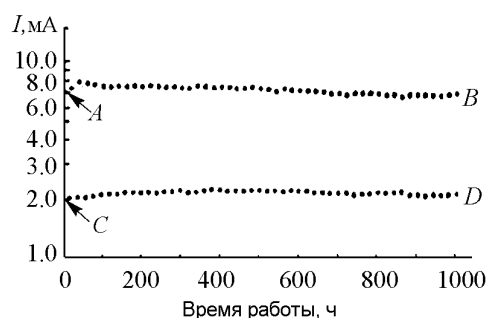


Рис. 1. Зависимости тока эмиссии острейного эмиттера из вольфрама от времени работы, измеренные в статическом режиме при двух значениях напряжения

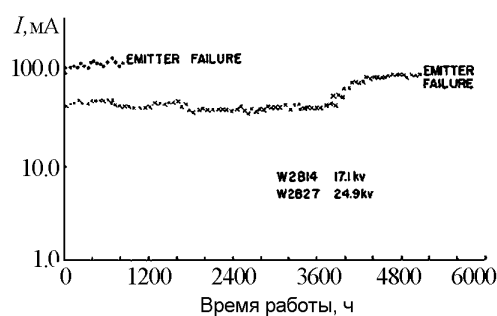


Рис. 2. Зависимости тока эмиссии острейного эмиттера из вольфрама от времени работы, измеренные в импульсном режиме (1 мкс, 120 Гц) при двух значениях напряжения [10]

вызваны изменениями питающего напряжения, и в таких случаях их можно устранить или свести к минимуму радиотехническими методами.

Работа [10] – одно из немногочисленных исследований, в котором оценено влияние ионной бомбардировки и газовой среды на величину предельных токов эмиссии и долговечность катодов, когда они работают при отборе токов, близких к предельным. В принципе, известно, что разрушение полевых эмиттеров может быть обусловлено действием пондеромоторных сил электрического поля (см., например, [11]) и/или перегревом эмиттеров в процессе отбора больших токов [10]. В работе [10] наблюдалось разрушение остриевых эмиттеров из вольфрама в условиях, когда сведено к минимуму влияние ионной бомбардировки и газовой среды. Авторы считают, что в созданных ими условиях разрушение эмиттеров было вызвано их перегревом при предельно достигнутых плотностях тока, больше 10^7 А/см².

Пондеромоторные силы $F_{\text{п}}$, действующие на единицу площади поверхности эмиттера, определяются соотношением вида

$$F_{\text{п}} = \varepsilon_0 \frac{E^2}{2}, \quad (11)$$

то есть эти силы пропорциональны квадрату электрического поля E у поверхности эмиттера. В связи с этим нужно учитывать, что при отборе фиксированных токов требуется тем меньшее электрическое поле, чем меньше работа выхода поверхности эмиттера, а значит при тех же токах действующая на эмиттер пондеромоторная сила будет меньше.

Учитывая перечисленные выше факторы, которые могут приводить к разрушению полевых эмиттеров можно предположить, что достижимые с их помощью предельные токи, а также долговечность эмиттеров, зависят от материала, из которого они изготовлены и/или от материала их покрытия, от прочности крепления эмиттера и прочности крепления покрытия на подложке. Как правило, практически невозможно теоретически определить достижимые предельные токи и долговечность полевых эмиттеров.

2. Требования, предъявляемые к полевым эмиттерам для СВЧ-устройств

Уже довольно давно делаются попытки создания вакуумных СВЧ-устройств с холодными полевыми эмиттерами (см., например, [12–14]). Впервые, видимо, полевые эмиттеры были применены для формирования потока электронов в СВЧ-системах с сеточным управлением (фемитрон), описанных в [12, 14] и рассчитанных на работу при сравнительно невысоких частотах до 10 ГГц. Здесь были использованы наработки авторов [10]. Ток электронов в 25 А в работе [12] создавался в импульсах длительностью 1 мкс двухрядной катодной системой из 160 расположенных на расстоянии 0.254 мм друг от друга остриевых катодов. Первенец созданной эмиссионной системы имел величину $9 \text{ мкА/В}^{3/2}$. Ток с одного острия достигал значений 150–160 мА, то есть был больше, чем с одиночного острия в работе [10]. Можно предположить, что это стало возможным, так как при сверхнизком давлении использовались более толстые острия. В предположении о том, что максимально

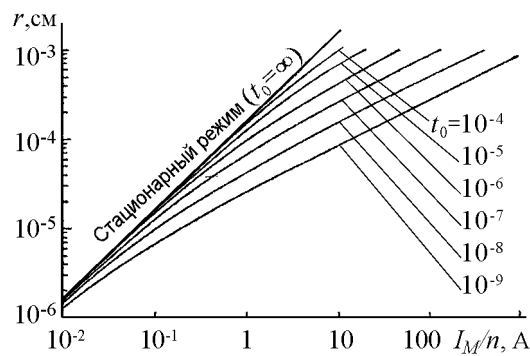


Рис. 3. Предельные токи вольфрамового острья с радиусом вершины r при разных длительностях импульсов t_0

волн (конкретную частоту авторы не называют) была получена выходная мощность свыше 1 кВт при КПД около 30% и коэффициенте усиления примерно 9 дБ. Выходная мощность и КПД, а также ток эмиссии, полученные в фемитроне с автоэмиссионным катодом, до сих пор являются рекордными для вакуумных СВЧ-устройств с полевыми эмиттерами. Трудность реализации такого устройства сопряжена с необходимостью обеспечения сверхвысокого вакуума в приборе (см. [10]).

Для получения больших токов, необходимых для работы не только СВЧ-устройств, но, например, для создания источников рентгеновского излучения, как и в работе [12], делались попытки создания эмиттеров большей, чем у одиночного острья, площади. При создании таких распределенных эмиттеров важно научиться «складывать» токи с большого числа источников эмиссии. Оригинальное решение проблемы было предложено Спиндтом (см., например, [15, 16]). В диодных системах Спиндта на 1 см^2 площади размещалось до 10^6 – 10^7 ячеек с острийными эмиттерами из тугоплавкого металла или полупроводника. С помощью таких систем удавалось получать в импульсном режиме при давлении 10^{-9} мм рт. ст. токи ориентировочно до 100 мА с 5000 острий, причем при чрезвычайно малых напряжениях на управляющем электроде, порядка 100–300 В. Технически осуществимо и дополнительное уменьшение напряжений при дополнительной миниатюризации элементов спиндтовской структуры. Низковольтные спиндтовские системы принципиально могут эксплуатироваться в условиях технического вакуума. Действительно, формируемый ими поток электронов малой энергии не может вызвать существенной десорбции вещества с бомбардируемых электродов, а ионы малой энергии практически не распыляют поверхности эмиттеров.

Разработка спиндтовских катодных систем стимулировала развитие идей вакуумной микроэлектроники СВЧ. В короткие сроки было предложено много заманчивых идей создания на основе таких систем преимущественно коротковолновых СВЧ-устройств. Довольно подробный анализ этих идей содержится в работе [14]. К сожалению, однако, трудности в реализации этих идей оказались очень велики и не все идеи были даже опробованы. В данной статье мы ограничимся описанием только тех СВЧ-устройств с автоэмиссионными катодами, которые были созданы и исследованы. Эти данные, с нашей точки зрения, позволяют оценить те требования, которые должны предъявляться к полевым эмиттерам СВЧ-устройств.

достижимые токи с вольфрамового острья ограничиваются его перегревом, авторами была рассчитана связь предельных токов эмиссии I_M/n с одиночного острья с радиусом вершины r в импульсе длительностью t_0 . На рис. 3 приведены расчетные зависимости I_M/n от r при разных значениях t_0 . Полученные в работе [12] токи по порядку величины близки к предельным.

В фемитроне [12] с катодной системой из вольфрамовых острий при токе 25 А в сантиметровом диапазоне длин

В 1990-х годах несколькими научными группами были начаты исследования разных типов СВЧ-устройств с автоэмиссионными катодами на основе систем спиндтовского типа [17–23]. Все исследования были нацелены на создание СВЧ-приборов, которые могли бы работать в условиях технического вакуума.

В Стретчклайдском университете в Англии была сделана попытка осуществить работу гиротрона миллиметрового диапазона длин волн с автоэмиссионным источником электронов [17]. Магнетронно-инжекторная пушка (МИП), которая ранее функционировала с термокатодом, была модифицирована и приспособлена для работы с автоэмиссионными системами спиндтовского типа. МИП, рассчитанная на формирование пучка электронов с энергиями 40–50 кэВ, была оснащена десятью однородными спиндтовскими катодными системами (чипами) площадью $2.25 \times 2.25 \text{ мм}^2$, каждая из которых включала 6000 ячеек с кремниевыми эмиттерами, имеющими радиус вершины 10 нм, и с управляющим электродом из ниобия. При напряжении на управляющем электроде около 100 В каждый чип обеспечивал ток эмиссии ориентировочно до 9 мА. В проведенных экспериментах авторы испытали работу созданного прибора с включенными в параллель тремя чипами при суммарных токах эмиссии, не превышающих несколько миллиампер. Даже при столь малых токах им удалось зафиксировать на выходе гиротрона излучение мощностью около 1 Вт на частоте, близкой к циклотронной. Вряд ли можно считать проведенные эксперименты свидетельством работоспособности созданного гиротрона при токах в несколько миллиампер. Основным достижением работы является, видимо, доказательство возможности создания высоковольтных магнетронно-инжекторных пушек с полевыми эмиттерами. К сожалению, однако, выполненные кратковременные измерения не позволяют оценить долговечность таких МИП. Представляло бы интерес продолжение начатых в [17] исследований при существенно больших токах электронного пучка. Однако, насколько нам известно, исследования гиротронов с автоэмиссионными катодами не были продолжены.

В СРІ разрабатывались устройства типа клистронов [18, 19], но и эти исследования, судя по всему, как и работы с гиротронами, не получили дальнейшего развития.

Практически одновременно с исследованиями [18, 19] в NEC Corporation разрабатывались ЛБВ с автоэмиссионными катодами. В работе [20], вероятно, впервые сообщалось об испытании ЛБВ со спиндтовской эмиссионной системой. В этой лампе на рабочей частоте 10.5 ГГц при токе в пучке 58 мА была получена выходная мощность 27.5 Вт при КПД 14% и коэффициенте усиления 22 дБ. Параллельно и независимо в Northrop Grumman была разработана электронная пушка для ЛБВ с удержанием пучка с помощью магнитно-периодической фокусирующей системы (МПФС) [21]. О последних достижениях в разработке ЛБВ со спиндтовскими катодными системами сообщается в работах [22–24].

В работе [22] подробно анализируются особенности и возможности ЛБВ со спиндтовской эмиссионной системой. Здесь показано, что в ЛБВ с полевым эмиссионным источником малых размеров не следует использовать стандартную пушку Пирса, так как она не позволяет обеспечить хорошую транспортировку интенсивного потока электронов в протяженном канале с замедляющей системой. Авторами опробована электронная пушка, в которой для формирования ламинарного электронного пучка применена система из электростатических линз. Пушка удобна при формировании потока электронов с полевого эмиттера не только потому, что позволяет

регулировать в широких пределах ток пучка, не ухудшая его качества. В приборе с такой пушкой, установив потенциал удаленного от катода электрода выше потенциала входа в канал транспортировки пучка, можно было защитить катодную систему от потока ионов из этого канала, образованных электронным ударом из частиц остаточного газа. Авторы надеялись, что таким образом увеличат срок службы катода. В работе [22] со спиндтовской катодной системы диаметром 1 мм с 50000 острых полевых эмиттеров из молибдена в режиме одиночных импульсов длительностью в несколько десятков миллисекунд был получен ток эмиссии 91.4 мА при энергии электронов 3.5 кэВ. При таком токе на частоте входного сигнала 4.5 ГГц коэффициент усиления имел величину примерно 23 дБ, а максимальная выходная мощность была равна 55 Вт. Пока результаты, описанные в работе двухтысячного года [22], насколько нам известно, являются лучшими для СВЧ-устройств, созданных с использованием спиндтовских катодных систем с металлическими катодами.

Полученные в [22] результаты заметно скромнее достигнутых ранее в фемитроне [12]. ЛБВ с выходной мощностью менее 100 Вт в сантиметровом диапазоне длин волн вряд ли могут конкурировать со стандартными СВЧ-устройствами, в которых для формирования электронного потока используются термокатоды, да и с твердотельными СВЧ-источниками того же диапазона. Очевидно, что для того, чтобы вакуумные СВЧ-приборы сантиметрового диапазона длин волн с полевыми эмиттерами стали конкурентоспособны, необходимо обеспечить с их помощью большие СВЧ-мощности. Казалось, что после капитальной проработки конструкции ЛБВ и экспериментального ее испытания в работе [22] довольно быстро будут получены большие токи эмиссии и существенно лучшие выходные параметры ЛБВ. Однако ожидания не оправдались. В работе [24], доложенной представителями той же научной группы на последней конференции ICOPS-2008 в г. Карлсруэ (Германия), не удается заметить какой-либо прогресс.

На основании той информации, которая содержится в работах [22–24], трудно понять проблемы, мешающие развитию этих исследований. Возможно, главной причиной является то, что созданные эмиссионные источники не обеспечивают необходимой долговечности приборов в условиях технического вакуума. Высокая долговечность использованных в [22–24] катодных систем авторами не доказана. Кажется маловероятным, чтобы использованные в этих работах стандартные молибденовые катоды длительное время выдерживали, не разрушаясь, бомбардировку быстрыми (с энергиями порядка нескольких кэВ) ионами остаточного газа. Созданная в работе [22] защита катодов от потока ионов из канала транспортировки пучка не защищает катоды от бомбардировки их ионами из самой пушки и, скорее всего, малоэффективна. С увеличением токов и энергии электронов, которые необходимы для повышения выходной мощности, вредное воздействие ионной бомбардировки должно только возрастать.

Вакуумные СВЧ-устройства даже сравнительно малой мощности могли бы найти свою нишу на рынке, если бы их удалось использовать в качестве малогабаритных источников терагерцовых излучений (см., например, [14]). Такие источники представляли бы большой интерес, так как столь коротковолновые излучения трудно создать с помощью конкурирующих с вакуумными твердотельных приборов. К сожалению, однако, попытки создания источников терагерцового излучения на основе спиндтовских эмиссионных систем, управляемых СВЧ-сигналами, пока

не увенчались успехом, в частности, из-за большой емкости зазора катодная система – управляющий электрод, а также из-за больших СВЧ-потерь на столь высоких частотах.

На основании анализа приведенных выше данных можно сделать следующие выводы.

1. Описанные острийные катодные системы с металлическими катодами [10] могут обеспечить высокую долговечность СВЧ-приборов только в условиях сверх-высокого вакуума. Но для их успешного использования необходимо провести целую «революцию» в технологии изготовления, обработки и откачки СВЧ-устройств.

2. Использование спиндтовских катодных систем с металлическими и полупроводниковыми катодами пока не позволяет получать в СВЧ-приборах токи свыше 100 мА [17–24]. Поэтому не удастся получить с их помощью мощность больше 100 Вт. Пока не доказана высокая долговечность такого типа катодных систем в условиях технического вакуума, так что проблематично их практическое использование даже при достигнутом уровне малых мощностей.

3. Созданные источники полевой эмиссии спиндтовского типа можно было бы попытаться использовать в существующих вакуумных приборах миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн (например, в современных ЛОВ и оротронах), но и там требуются токи, в несколько раз превышающие достигнутый к настоящему времени предел (100 мА).

Есть несколько путей решения указанных проблем. Возможно, например, как говорилось выше, исключить вредное влияние ионной бомбардировки, обеспечивая сверхнизкое давление в приборах или создавая такие распределения полей в них, при которых исключается или сводится к минимуму ионная бомбардировка катодов. Оба эти пути трудны в реализации. Поэтому хотелось бы рассмотреть другой путь – создание эмиттеров из материалов, стойких к ионной бомбардировке и к воздействию газовой среды.

В течение уже достаточно продолжительного времени делаются попытки создания долговечных и эффективных полевых эмиттеров для работы в условиях технического вакуума. В следующем разделе мы постараемся осветить положение дел с созданием и исследованием перспективных с этой точки зрения полевых эмиттеров из углеродных и содержащих углерод материалов. Основное внимание будет уделено наиболее изученным эмиссионным системам из углеродных волокон и из графита, нанотрубным системам, а также эмиттерам с разного типа углеродными и содержащими углерод покрытиями. Кроме того, кратко будут изложены результаты, полученные авторами при исследовании композитного эмиттера.

3. Разработка и исследование полевых эмиттеров из углеродных и содержащих углерод материалов

3.1. Полевые эмиттеры из углеродных волокон. Уже ранние исследования (см., например, [25, 26]), в которых была изучена возможность применения углеродного волокна в качестве катодов для растровых электронных микроскопов, показали, что в условиях технического вакуума такие эмиттеры имеют существенно большую долговечность, чем вольфрамовые, во всяком случае, при необходимых в таких

устройствах малых отбираемых токах. Привлекали к себе внимание такие эмиттеры и тем, что к тому времени была уже хорошо отработана технология изготовления волокон. По указанным причинам с 1970-х годов начато всестороннее изучение эмиссионных характеристик полевых эмиттеров из углеродного волокна. Большой вклад в эти исследования внесла научная группа Б.В. Бондаренко, Е.П. Шешина и др. (Московский физико-математический институт). В связи с этим опишем важнейшие характеристики катодов из углеродного волокна на основе книги Е.П. Шешина [3].

Наиболее подробно исследованы волокна из полиакрилонитрильного волокна (ПАН), стеклоуглеродные и пироуглеродные волокна. Диаметр указанных типов волокон может варьироваться в широких пределах от единиц до десятков микрон. На поверхности всех типов волокон существуют усиливающие электрическое поле выступы малого размера. Рельеф поверхности, а также токовые характеристики волокон сильно меняются в зависимости от условий их изготовления (в частности, от температуры) и от режима тренировки (формовки) отбором тока. При отборе тока в условиях технического вакуума поверхность волоконного эмиттера подвергается интенсивной бомбардировке ионами, возникшими в результате ионизации остаточного газа эмитированными с катода электронами. В результате катодного распыления вершины волокна и уноса с его поверхности под действием пондеромоторных сил электрического поля наиболее слабо связанных с нею частиц сглаживается рельеф поверхности, но достигается более устойчивая ее конфигурация. При этом ток с катода равномернее распределяется по большому числу микровыступов и в результате уменьшается нагрузка на каждый из них. В начале формовки происходит значительное уменьшение тока эмиссии и резко падают (от десятков до единиц процентов) флуктуации тока. Далее падение тока продолжается, но происходит гораздо медленнее. При давлениях порядка 10^{-7} мм рт. ст. формовка обычно проводится в течение 50–100 часов. На рис. 4 показана полученная после окончания формовки

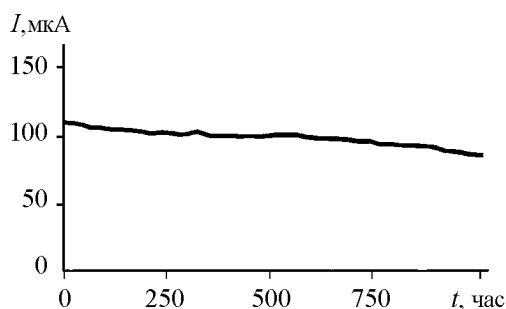


Рис. 4. Зависимость тока эмиссии от времени работы, измеренная в диодной системе с катодом из одиночного ПАН-волокна

типичная зависимость тока эмиссии одиночного ПАН-волокна от времени его работы при постоянном напряжении. Предельные токи с хорошо тренированного одиночного волокна диаметром в несколько микрон достигают несколько сотен микроампер. Долговечность одноволоконных катодов, измеренная при токах, существенно меньших предельного (по промежутку времени между моментом окончания формовки и моментом, когда ток падает в $\sqrt{2}$ раз), превышает 5000 часов.

Токи свыше 1 мА удается получить только с достаточно толстых пучков, включающих более 50 волокон. Без длительной формовки такие катоды разрушаются при токах 1–2 мА. В результате же формовки становится возможным отбор с пучка волокон тока величиной 10–15 мА. Дальнейшее увеличение толщины пучка не приводит к возрастанию предельного тока, так как не удается его однородно отформовать. Решение проблемы было найдено в создании единой катодной системы из электрически изолированных друг от друга пучковых катодов. В этом случае каждый из

фрагментов катодной системы подвергался индивидуальной формовке. В процессе формовки авторы добивались того, чтобы пучки обеспечивали приблизительно одинаковые токи при одном напряжении. С помощью отформованной таким образом катодной системы из 9 пучковых катодов диаметром 70 мкм был получен в непрерывном режиме ток 100 мА [27]. Такой ток, в принципе, достаточен для обеспечения работы некоторых типов СВЧ-приборов (см. раздел 2). Однако катоды из пучков углеродных волокон более громоздки, чем спиндтовские катодные системы и требуют сложной и длительной формовки. Поэтому этого сорта катоды явно уступают спиндтовским в приложении к СВЧ-электронике.

Оценивая возможности использования пучковых катодов из углеродных волокон, следует обратить внимание еще на два обстоятельства.

1. Измерения в работе [27] проводились в диодной системе, где торцы катодов устанавливались на малом расстоянии от анода 0.2–0.5 мм. Ток величиной 100 мА достигался при анодном напряжении 3.8 кВ. При отборе тока 100 мА давление в приборе за 10 секунд увеличивалось от начального, порядка 10^{-7} мм рт. ст., приблизительно до 10^{-4} мм рт. ст., после чего происходил пробой. Таким образом, очевидно, что при отборе больших токов происходило сильное газовыделение с анода, а также, возможно, и с углеродных волокон. В таких условиях трудно исключить явление газового усиления в зазоре катод – анод, а значит, трудно определить истинные значения тока автоэмиссии.

2. Совершенно не очевидна и не доказана высокая долговечность пучковых катодов в условиях технического вакуума. Для ее определения требуются дополнительные исследования.

3.2. Полевые эмиттеры из графита и эмиттеры с пленочными углеродными покрытиями. Делались попытки создания полевых эмиттеров на основе разных марок графита, в том числе, высокопрочного графита типа МПГ-6, пироуглерода, стеклографита и их производных [3], пористых углеродных материалов [28, 29]. Учитывая большую работу выхода углеродных материалов, заметную автоэмиссию, как правило, удается получать с усиливающих электрическое поле участков их поверхности.

У пористых катодов из разных наночастиц [28, 29] усиление поля может быть достигнуто на неровностях поверхности эмиттера. Такие катоды обеспечивают малые токи при низких пороговых напряжениях, но не позволяют получать токи более нескольких сотен микроампер, даже с макроповерхности площадью порядка 1 см^2 . Видимо, из-за малой связи частиц в такого типа катодах они быстро разрушаются пондеромоторными силами в сильных электрических полях.

Заметное усиление поля получается на кромке лезвийных катодов [30] из тонких пластин графита малой толщины (5–150 мкм). Для достижения усиления поля на поверхности катодов из графита с развитой поверхностью усиливающие поле неоднородности обычно создаются с помощью специальной их обработки. Испытаны разные методы обработки, включая механическую и эрозионную обработку, обработку потоком ионов большой (100–200 кэВ) энергии [31], а также термохимическое травление [32, 33]. Методами термохимического травления были созданы матричные катоды из стеклографита с упорядоченно распределенными по поверхности выступами высотой 10–15 мкм и с периодом решетки 20 мкм.

Как и в случае волоконных катодов, для стабилизации работы лезвийных катодов и других катодов из графита, а также для уменьшения уровня флуктуаций отбираемого с их поверхности тока автоэмиссии использовалась формовка катодов отбором тока с их поверхности. С лезвийных катодов длиной 2 мм и с толщиной кромки 30 мкм после формовки удавалось получать в статическом режиме токи эмиссии ориентировочно до 6–8 мА [30], что недостаточно для эффективной работы существующих СВЧ-устройств.

Матричные катоды были испытаны [33] в импульсном режиме при длительности импульсов 20 мкс и скважности 1000. Была получена средняя плотность тока 0.3 А/см^2 . Однако, видимо, авторам не удалось запустить никаких СВЧ-приборов. В работе [33] сообщается о возможностях увеличения средней плотности тока до $(1-5) \text{ А/см}^2$, а также о ведущейся авторами разработке принципов конструирования электронных пушек для СВЧ-устройств на основе матричных стеклоуглеродных катодов.

Большой интерес для СВЧ-электроники представляют пленочные углеродные покрытия, исследованные в работах [34–36].

Пленочные углеродные покрытия в работе [34] создавались на разных подложках в результате высокотемпературного разложения (пиролиза) гептана. Исследования, выполненные методом туннельной микроскопии, показали, что разработанная авторами технология обеспечивает формирование на поверхности пленки сложных нанокластерных структур из углерода. Измерение тока автоэмиссии производилось в диоде с плоским анодом из пирографита диаметром 1 мм. Расстояние между анодом и поверхностью эмиттера было мало и варьировалось в пределах от 5 до 60 мкм. Давление в приборе поддерживалось на уровне $2 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. Малые автоэмиссионные токи ($< 10 \text{ мкА}$) начинали регистрироваться при чрезвычайно низких поперечных напряженностях электрического поля (около 0.2 В/мкм). В процессе измерения вольт-амперных характеристик уже при токах порядка 10 мкА и полях в несколько единиц В/мкм происходил унос с поверхности слабо связанных с нею наименьших по размерам углеродных кластеров. В результате вольт-амперная характеристика смещалась в область больших напряжений. Далее, в интервале полей от 6 до 30 В/мкм и при токах до 400 мкА с поверхности улетучивались образования большего размера. Для достижения еще больших токов измерения проводились в импульсном режиме при длительности импульсов 30 мкс и скважности импульсов 570. В таком режиме были достигнуты плотности тока эмиссии свыше 1 А/см^2 при напряженности поля до 170 В/мкм . В импульсном режиме не было отмечено изменений рельефа поверхности. Из приведенных в работе [34] данных следует, что ее авторы получали в импульсном режиме полные токи до 10 мА с площади поверхности эмиттера около 10^{-2} см^2 . Большие токи электронов, видимо, можно было бы получить, увеличивая площадь эмитирующей поверхности. Казалось бы в связи с этим, авторы работы [34] близки к созданию устойчивых в условиях технического вакуума полевых эмиссионных систем для СВЧ-устройств. Однако приведенной в [34] информации недостаточно для того, чтобы надежно прогнозировать перспективы этих разработок. Недостаточно, в частности, информации о влиянии вторичных процессов в узких диодных зазорах использованных измерительных систем, а также о долговечности созданных катодов. Кроме того, авторами [34], видимо, не созданы еще электронные пушки, которые обеспечили бы формирование потока электронов с достаточно больших площадей.

В работах [35, 36] описаны углеродные пленки большой площади ($25 \times 25 \text{ мм}^2$), полученные с помощью двух модификаций плазменной CVD-техники. Созданные авторами [35, 36] пленки, видимо, имеют большую прочность по сравнению с описанными в работе [34]. На пленках формировались усиливающие электрическое поле неупорядоченные многоострийные или ребристые структуры. С нашей точки зрения, наибольший интерес представляют более однородные ребристые структуры. Судя по результатам наблюдения с помощью сканирующего электронного микроскопа (рис. 5), ребра, ориентированные преимущественно перпендикулярно поверхности подложки, имели длину, которая варьировалась в пределах $0.01\text{--}1 \text{ мкм}$. Их толщина у вершины измерялась десятками нанометров. Как показали измерения в диодной системе с люминесцирующим под действием электронной бомбардировки анодом, созданные катодные системы обеспечивали приблизительно однородную эмиссию со всей поверхности (рис. 6). Для практического использования пленочных катодных систем авторами [36] разработана оригинальная конструкция триодной электронной пушки с сеточным управлением эмиссией катода. Созданная ими тонкая (толщиной до 5 мкм) легированная бором алмазная сетка площадью 0.04 см^2 имела прозрачность 50% и располагалась на расстоянии 40 мкм от катода. При напряжении на сетке около 250 В относительно катода удавалось получать ток эмиссии приблизительно до 6 мА , причем не только в импульсном, но и в статическом режиме. Даже кратковременная стабильность работы созданной пушки испытана только при токах около 0.6 мА .

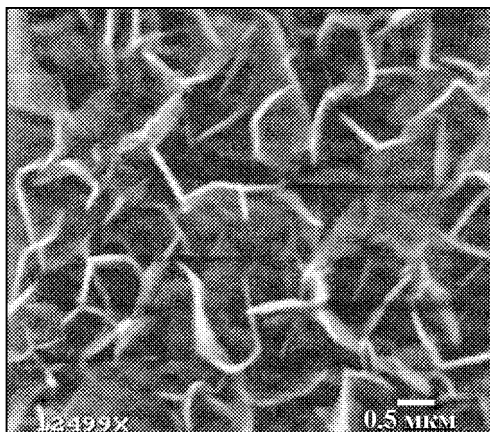


Рис. 5. Типичное изображение углеродного пленочного покрытия, полученное с помощью растрового электронного микроскопа

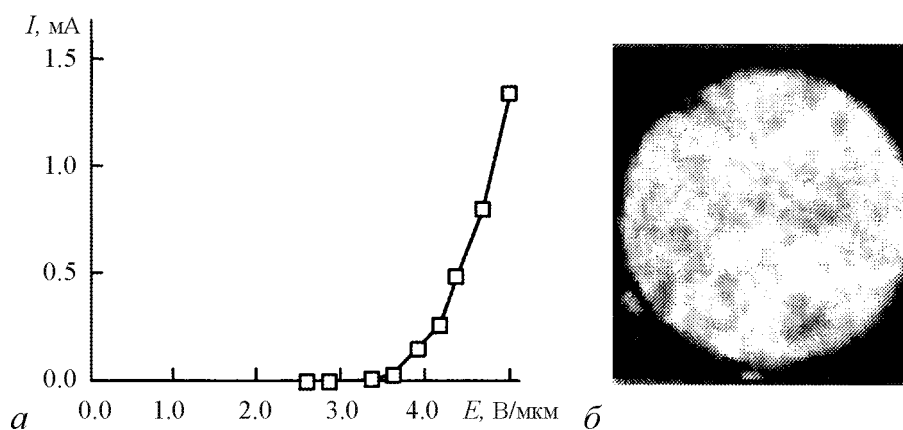


Рис. 6. Характеристики диода с люминесцирующим анодом: вольт-амперная кривая (слева) и эмиссионное изображение на аноде (справа)

Очевидно, что разработанные авторами [35, 36] катодные системы целесообразно будет использовать в СВЧ-устройствах, если удастся увеличить хотя бы в десятки раз обеспечиваемые ими токи эмиссии. К сожалению, для обеспечения столь большого увеличения токов требуется, видимо, значительно увеличить площадь управляющего сеточного электрода, что вряд ли возможно при малом расстоянии катод–сетка. Кроме того, если планировать использование разработанных авторами [35, 36] электронных пушек для формирования электронных потоков с энергиями более 1–3 кэВ в СВЧ-устройствах, работающих в техническом вакууме, надо будет доказать высокую долговечность созданных катодов и сеток в таких условиях.

3.3. Нанотрубные полевые эмиттеры. В последние годы большие усилия исследователей и конструкторов холодных катодов были направлены на изучение возможностей создания эффективных источников эмиссии на основе углеродных нанотруб.

К настоящему времени уже общепризнано, что углеродные нанотрубки, отличающиеся большим аспектным отношением (отношение длины к диаметру), малым радиусом вершины, высокой прочностью, высокими показателями тепло- и электропроводности, химической инертностью, являются хорошим материалом для создания полевых эмиттеров (см., например, [7]). Они идеально подходят в качестве источников эмиссии, например, для растровых микроскопов, где позволяют создать электронный поток высокой плотности и малого сечения и в связи с этим добиться высоких показателей пространственного разрешения.

Наиболее качественные одиночные многослойные нанотрубки могут стабильно работать при отборе тока полевой эмиссии в единицы микроампер и катастрофически быстро разрушаются лишь при токах порядка десятых долей миллиампера [37]. Однако, если требуются существенно большие токи, приходится создавать распределенные структуры из большого количества нанотруб, установленных приблизительно перпендикулярно к подложке. При изготовлении таких структур должен быть решен ряд сложных задач, связанных с необходимостью обеспечить высокую однородность тока эмиссии, прочное соединение нанотруб с подложкой и достаточно большое электрическое поле у их вершины.

Наилучшие по характеристикам нанотрубные структуры удается построить, используя отработанную к настоящему времени, но технологически сложную и дорогую плазменную CVD (plasma enhanced chemical vapour deposition) технику. При использовании этой техники нанотрубки выращиваются на созданной заранее матрице малых по размеру пятнышек («точек») из катализатора (например, железа или никеля) [38, 39]. Для создания пятен катализатора обычно применяется электронно-пучковая литография, при которой с высокой точностью задается расположение и размеры пятен. Меняя расстояния между пятнами и высоту нанотруб, можно регулировать эффект экранировки в созданной структуре и величину плотности тока эмиссии, отбираемого с каждой трубки. Удастся создавать структуры практически одинаковых по диаметру и высоте нанотруб. В типичной структуре такого типа, показанной на рис. 7, максимальные относительные изменения высоты нанотруб имеют величину около 4% (49 ± 2 нм), а относительные изменения их диаметра несколько больше, но не превосходят 7% (5.9 ± 0.4 мкм). В такой структуре, как показывают измерения, выполненные с помощью тонкого штыревого анода, получается практически одинаковая эмиссия с разных нанотруб.

К сожалению, нанотрубки в структуре, выращенной по описанной выше методике, хуже по качеству (обладают большим количеством дефектов), чем нанотрубки, полученные в дуговом разряде или при лазерном распылении графита. Поэтому зачастую они могут быть разрушены при аномально малых токах. Длительное время они могут функционировать при токах менее 1 мкА через каждую нанотрубку. Распределение тока эмиссии по структуре становится неоднородным даже при малых изменениях работы выхода поверхности нанотруб или в случае, когда неодинаково меняется под действием ионной бомбардировки форма их вершины. По указанным причинам в процессе функционирования описанной структуры ее эмиссия может стать существенно неоднородной, например, из-за неоднородного оседания газов и паров, из-за неоднородной ионной бомбардировки или из-за разных дефектов материала нанотрубок. По указанным причинам для обеспечения высокой долговечности упорядоченной структуры типа приведенной на рис. 7, видимо, необходимо обеспечить достаточно хорошие вакуумные условия и, по возможности, исключить электронную бомбардировку окружающих электродов, а также пробой между катодом и анодом. Эти требования становятся особо жесткими в условиях, когда требуется формировать поток электронов высокой энергии (см. раздел 2).

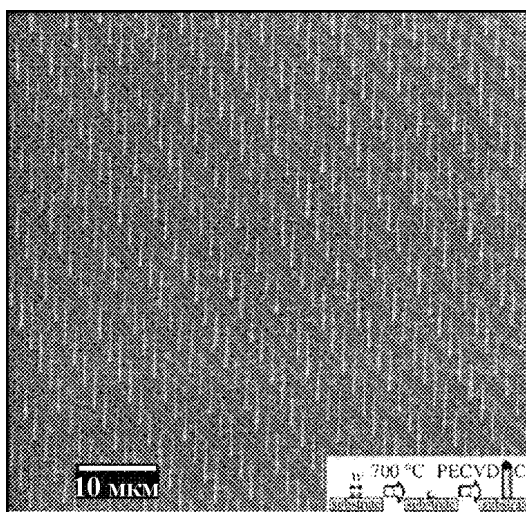


Рис. 7. Структура нанотрубок, созданная с использованием плазменной CVD-техники. Нанотрубки выращивались на пятнах катализатора из никеля шириной 100 нм и толщиной 7 нм

Нанотрубки нагреваются в процессе работы при отборе даже сравнительно небольшого тока. Так, по данным [40, 41], при отборе с многослойной нанотрубки тока в 1 мкА она нагревается до температуры 2000 К. Как следует из выполненных в работе [42] расчетов, когда ток через нанотрубку превышает некоторое предельное значение, может развиваться тепловая неустойчивость, приводящая к самопроизвольному нарастанию температуры кончика трубки и к ее термическому разрушению. По оценкам Г.С. Бочарова и А.В. Елецкого [42], тепловая неустойчивость развивается при токах через трубку порядка десятков микроампер, когда вследствие разогрева трубки, наряду с полевой, становится заметной термоэмиссия с ее кончика. Чтобы свести к минимуму нагрев нанотрубок при отборе больших токов, они могут эксплуатироваться в импульсном режиме. Импульсный режим полезен и с той точки зрения, что позволяет уменьшить продолжительность бомбардировки нанотрубок ионами остаточного газа.

Нанотрубки нагреваются в процессе работы при отборе даже сравнительно небольшого тока. Так, по данным [40, 41], при отборе с многослойной нанотрубки тока в 1 мкА она нагревается до температуры 2000 К. Как следует из выполненных в работе [42] расчетов, когда ток через нанотрубку превышает некоторое предельное значение, может развиваться тепловая неустойчивость, приводящая к самопроизвольному нарастанию температуры кончика трубки и к ее термическому разрушению. По оценкам Г.С. Бочарова и А.В. Елецкого [42], тепловая неустойчивость развивается при токах через трубку порядка десятков микроампер, когда вследствие разогрева трубки, наряду с полевой, становится заметной термоэмиссия с ее кончика. Чтобы свести к минимуму нагрев нанотрубок при отборе больших токов, они могут эксплуатироваться в импульсном режиме. Импульсный режим полезен и с той точки зрения, что позволяет уменьшить продолжительность бомбардировки нанотрубок ионами остаточного газа.

В работе [43] указаны, видимо, рекордные показатели токоотбора с описанного типа структур с однослойными нанотрубками. В работе [43] на основе нанотрубной структуры создан рентгеновский источник. Поток электронов формировался триодной системой, где управляющая полевой эмиссией сетка с большой прозрачностью (80%) располагалась на расстоянии 50–200 мкм от поверхности структуры. Разность потенциалов между автоэмиссионным катодом и сеткой варьировалась в

пределах 450–610 В. Прошедшие сквозь сетку электроны ускорялись до энергии 14 кэВ и бомбардировали медный анод, вызывая тормозное излучение с его поверхности. В импульсном режиме (2 мс, 100 Гц) авторами получен ток эмиссии 28 мА с площади 0.2 см², что соответствует плотности тока эмиссии 140 мА/см². Видимо, это не предельный ток. Но надежно оценить на основании опубликованных данных максимально достижимые с помощью нанотрубных структур токи не представляется возможным. Для использования в СВЧ-устройствах нужны эмиттеры, обеспечивающие большие токи. Как и в работе [36], существенно повысить ток эмитированных электронов можно, увеличивая поперечные размеры всей системы, в том числе катода и сетки. Однако существенный рост поперечных размеров вряд ли возможен в условиях, когда необходимо обеспечить прецизионное крепление бомбардируемой электронами сетки на малом расстоянии от катода. Вероятно, именно трудности с созданием подходящего управляющего электрода препятствовали в работе [43] увеличению площади эмиттера.

Нужно сказать, что конструкции электронных пушек для описанного типа нанотрубных катодов либо слабо отработаны, либо недостаточно описаны в литературе. Кажется, что наиболее органично подходят для формирования электронных потоков с нанотрубных катодов спиндтовские системы. Для реализации этой достаточно отработанной идеологии необходимо только научиться создавать нанотрубные

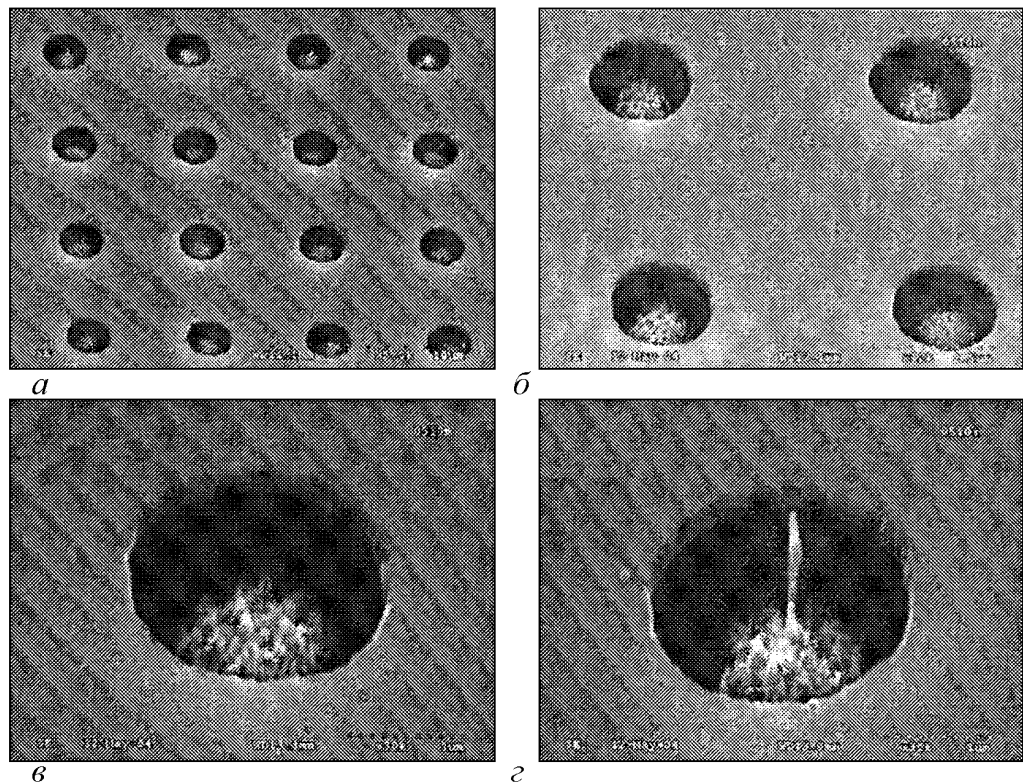


Рис. 8. Изображение катодной системы спиндтовского типа с нанотрубными эмиттерами, выращенными на дне ячеек микронных размеров: *а-в* – изображения, полученные при разном увеличении; *г* – пучок нанотруб с одной выделяющейся по высоте нанотрубкой

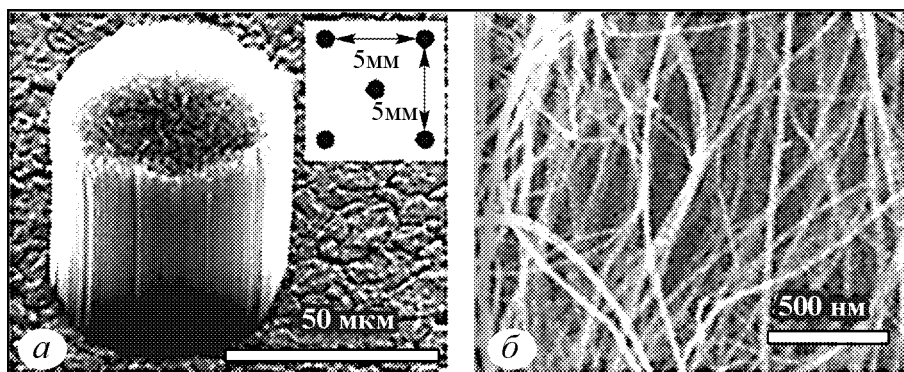


Рис. 9. *a* – пучок углеродных нанотруб (НТ) и расположение пяти пучков НТ на подложке (на вставке). *б* – увеличенное изображение боковой поверхности пучка

эмиттеры в ячейках спиндтовских систем. В последние годы появились работы, в которых продемонстрирована такая возможность. Так, например, в работе [44] создана спиндтовская катодная система, в каждой ячейке которой выращены углеродные нанотрубки. Изображения этой системы, полученные с помощью растрового электронного микроскопа, показаны на рис. 8. При избранных размерах ячеек и использованной технологии создания спиндтовской структуры в каждой ячейке формировался пучок близко расположенных нанотруб (рис. 8, *a*, *б*, *в*). Количество нанотруб в ячейке, по мнению авторов, можно менять, меняя размеры ячейки. Близкое расположение нанотруб в ячейке при полученной в эксперименте сглаженной границе пучка нанотруб уменьшает усиление электрического поля у поверхности пучка, и для отбора тока в таких системах требуются большие напряжения на управляющем электроде. Однако эмиттеры из пучка нанотруб могут обеспечить и преимущества при их использовании в высоковольтных электронных устройствах, где электроны ускоряются по выходе из катода напряжениями, существенно превышающими напряжение на управляющем электроде. В этом случае все равно энергия ионов, бомбардирующих катод, определяется полной пройденной разностью потенциалов. Существование же большого количества нанотруб в каждой ячейке обеспечивает потенциальную возможность «резервирования» эмиттеров. При неоднородной выработке нанотруб после разрушения одних нанотруб может усилиться эмиссия с других. Таким образом может быть повышена долговечность всей катодной системы. Возможность такого резервирования рассматривается в работе [45]. Ее авторы создавали упорядоченно расположенные по поверхности подложки «колонны» из пучков нанотруб (рис. 9). Они обращают внимание на то, что при приблизительно плоской вершине колонны эмиссия должна преимущественно идти с края ее верхней границы, где электрическое поле существенно (почти в 4 раза) превышает поле в центре плоской вершины пучка нанотруб. В связи с этим в максимально напряженном режиме работают нанотрубки, расположенные по краю пучка. Если же они разрушаются, основной вклад в эмиссию начинают вносить цилиндрические слои нанотруб меньшего радиуса.

3.4. Полевые эмиттеры с алмазными, алмазоподобными и некоторыми другими типами неупорядоченных наноуглеродных покрытий. В любых углеродных образованиях возможны три основных типа связей между электронами, которые характеризуются типами гибридизации sp^3 , sp^2 и sp [3]. Гибридизация sp^3 соответствует идеальной структуре алмаза, гибридизация sp^2 имеет место у сло-

стых углеродных структур, гибридизация sp характерна для карбидов. К настоящему времени разработаны методы создания алмазных пленок, практически свободных от других углеродных фаз, а также алмазоподобных пленок, где присутствуют алмазная (sp^3) и неалмазная (sp^2) фазы. Пленки из крупных алмазных кристаллов не используются для получения полевой эмиссии из-за малой их проводимости, поскольку алмаз – полупроводник с большой запрещенной зоной. Мелкодисперсные алмазные пленки обладают существенно большей проводимостью, которая определяется, видимо, проводимостью по границам алмазов малого размера [46]. Проводимость алмазоподобной пленки определяется соотношением sp^3 и sp^2 фаз, концентрацией в пленке разного сорта дефектов и примесей, а также ее микроструктурой. Алмазоподобные пленки, которые используют для создания автоэммиттеров, обычно обладают высокой проводимостью.

Как следует из литературных данных (см., например, [3, 46–49]), автоэмиссия алмазных и алмазоподобных пленок существенно зависит от способа их нанесения и обработки. Эмиссия неоднородна по поверхности и идет из ограниченного количества эмиссионных центров малой площади. Специальные измерения, выполненные методом сканирующей туннельной микроскопии [47–49], свидетельствуют, что в этих центрах достигаются большие по величине плотности тока эмиссии – до единиц ампер с квадратного сантиметра.

Существуют данные [3], свидетельствующие о том, что эмиссионные характеристики алмазоподобных пленок улучшаются при уменьшении размеров алмазных зерен. Принципиально можно ожидать, что эмиссия с мелкодисперсных пленок будет более однородной. В связи с этим в последние годы исследуются ультрананодисперсные пленки [46, 50]. В работе [46] алмазные пленки с кристалликами алмаза размером 2–5 нм создавались на острых эмиттерах из кремния. Покрытия наносились с использованием высокочастотной CVD плазменной технологии на острие с радиусом вершины 25 нм. На рис. 10 показаны изображения эмиттеров с покрытиями разной толщины. Толщина покрытий определялась на основании этих изображений. Эмиссия с острия измерялась в диодной системе, где торец молибденового анода, изготовленного в виде стержня диаметром 1.89 мм со скругленной вершиной, располагался на расстояниях 50–200 мкм от катода. На основании измерений при малых токах ($\leq 10^{-7}$ А) было установлено, что для получения фиксированного

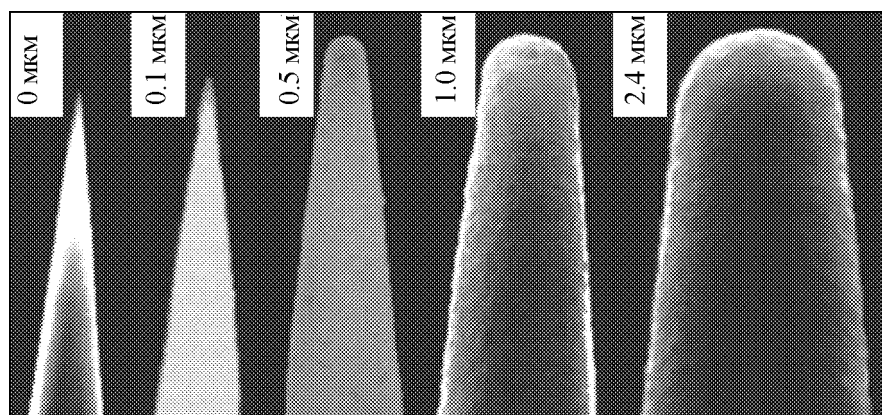


Рис. 10. Изображения эмиттеров из кремния с ультрананодисперсными алмазными покрытиями разной толщины. Диаметр вершины кремниевого острия 25 нм

тока полевой эмиссии требуются минимальные напряжения при оптимальной толщине покрытия около 0.5 мкм. На рис. 11 показаны вольт-амперные характеристики острия, полученные в этих измерениях при разных толщинах покрытия. Предельные токи эмиссии в этой работе не определялись, но измерения проводились в широком интервале токов. На рис. 12 показаны вольт-амперные характеристики, измеренные при токах с одиночного острия до 100 мкА и покрытиях от 0.5 до 2.4 мкм. При меньших толщинах покрытия кремниевое острие «выгорало» уже при токах менее 1 мкА. В измерениях с большими токами эмиссии было установлено, что при толщинах покрытия больше 0.5 мкм с увеличением толщины покрытия увеличивалось напряжение, требующееся для отбора фиксированного тока. Это явление авторы объясняют ростом с толщиной покрытия падения напряжения на нем и уменьшением в связи с этим величины электрического поля на границе острие – вакуум. Авторы полагают, что в проведенных измерениях ток на анод собирался не только с вершины, но и с боковой поверхности острия. Они считают, что иначе практически невозможно объяснить, как может выдержать острый эмиттер огромную (порядка 10^6 Вт/см²) величину отбираемой мощности. Желание авторов объяснить явление понятно. Но кажется неправдоподобным, чтобы при избранной конфигурации электродов диода ток эмиссии с боковой поверхности катода существенно превышал ток с его вершины.

Выполненные при начальном токе 100 мкА измерения временной стабильности эмиссии (рис. 13) показали, что ток сначала быстро уменьшается примерно

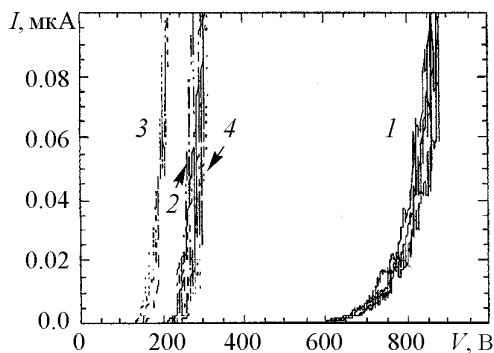


Рис. 11. Вольт-амперные характеристики кремниевое острейного эмиттера с алмазными покрытиями разной толщины, мкм: 1 – 0; 2 – 0.1; 3 – 0.5; 4 – 2.4. При каждой толщине покрытия характеристики измерялись 4 раза (два раза в одну сторону и два раза в другую)

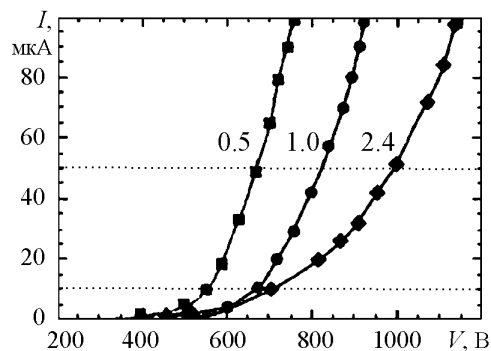
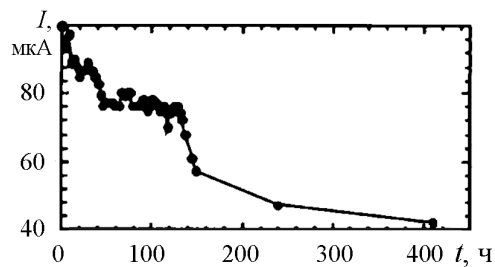


Рис. 12. Вольт-амперные характеристики кремниевое острейного эмиттера с алмазными покрытиями толщиной 0.5, 1.0 и 2.4 мкм, измеренные при токах эмиссии до 100 мкА

Рис. 13. Изменение во времени тока эмиссии с кремниевое острия с алмазным покрытием толщиной 1 мкм. Характеристика измерена при постоянном напряжении 1200 В. Расстояние между катодом и анодом 60 мкм



до 55 мкА, а затем его падение становится более медленным. Механизм падения эмиссии в работе не определен. Временные измерения проводились для острия длиной 60 мкм с покрытием толщиной 1 мкм при фиксированном анодном напряжении 1200 В. Анод располагался на расстоянии 60 мкм от вершины острия.

Хотелось бы обратить внимание, что в этой работе, как и в большинстве других исследований полевой эмиссии с углеродных материалов, используются очень малые зазоры между катодом и анодом. В связи с этим, во всяком случае при отборе больших по величине токов с острия, трудно избежать развития ряда паразитных явлений в этом зазоре, которые могут помешать выявлению закономерностей собственно полевой эмиссии. В описанных временных измерениях при начальном токе 100 мкА среднее поле между катодом и анодом (не усиленное на неоднородностях поверхности этих электродов) превышало 10^5 В/см. При этом, даже если принять данное авторами объяснение того, почему острие выдерживает отбор большого тока эмиссии, следует учесть, что плотность мощности, выделяемой на аноде, тоже очень велика и имеет величину порядка 10^9 Вт/см². В таких напряженных условиях трудно избежать сильного нагрева катода и анода, десорбции вещества с поверхности анода, локального увеличения давления в диодном зазоре, газового усиления потока электронов с катода и т.п. В связи со сказанным, не умаляя значимости очень интересной работы [46], хотелось бы иметь данные об эмиссионных характеристиках катодов с алмазными покрытиями, полученные в условиях, когда паразитные явления исключены или хотя бы минимизированы.

Несмотря на уже довольно длительную историю исследований, потенциальные возможности совершенствования катодов с алмазными и алмазоподобными пленочными покрытиями еще, видимо, не исчерпаны. Насколько нам известно, пока не удавалось получать большие токи эмиссии даже с алмазных или алмазоподобных пленок большой площади. Однако покрытия исследованных систем такого типа, возможно, не оптимальны. Одиночные острийные катоды с наилучшими по качеству покрытиями, описанные в работе [46], обеспечивают токи порядка десятков микроампер, недостаточные для пуска СВЧ-приборов. Тем не менее, очевидно, что они представляют значительный интерес для СВЧ-электроники. Действительно, если, например, будут созданы структуры спиндтовского типа с катодами, описанными в работе [46], можно ожидать, что с помощью таких структур удастся получать большие токи, чем со стандартных молибденовых катодов спиндтовской структуры, которую пытались использовать при создании ЛБВ в работе [22]. Пока непонятно, могут ли быть достаточно долговечными катоды на основе спиндтовских структур при их использовании в условиях технического вакуума в высоковольтных устройствах, причем при отборе с них больших токов. Кажется, однако, что катоды с защитными покрытиями должны быть более долговечны в таких условиях, чем металлические.

Алмазные и алмазоподобные пленки, как и многие другие углеродные эмиттеры, отличаются низкими порогами появления автоэмиссии (см., например, [3, 46, 50]). Возможно, это не очень важно в приложении к высоковольтной СВЧ-электронике. Тем не менее остановимся кратко на этой характеристике пленочных катодов, поскольку это необходимо для понимания физики происходящих в них процессов. Экспериментальные исследования свидетельствуют, что пороговые напряжения, необходимые для получения фиксированных и достаточно малых токов, уменьшаются при увеличении шероховатости поверхности пленки и при уменьшении размера образу-

ющих пленку зерен. Первое, очевидно, связано с усилением поля на неоднородностях поверхности, а второе требует специального объяснения.

Пороговые напряжения бывают малы не только у сильно шероховатых, но и у достаточно гладких пленок. Казалось возможным объяснить низкие пороги полевой эмиссии алмазных и алмазоподобных пленок тем, что алмазная фаза пленок может иметь в силу отрицательного электронного сродства чрезвычайно малую работу выхода [3]. Однако такое объяснение представляется не вполне убедительным. Этому противоречит, в частности, тот факт, что пленки, характеризующиеся низким порогом автоэмиссии, не позволяют получить заметную термоэмиссию при низких температурах. Кроме того, аномально низкие пороги автоэмиссии регистрировались и у других типов полевых эмиттеров из углеродных материалов, в которых практически отсутствует алмазная фаза. Так, например, многими авторами, исследовавшими катоды с неупорядоченными пленочными покрытиями из углеродных нанотрубок (см., например, [3, 51, 52]), тоже отмечались низкие пороги появления автоэмиссии. Существует множество способов нанесения таких покрытий, например, в каком-либо биндере или осаждением непосредственно на подложку из дугового разряда с графитовым электродом. Но независимо от способа нанесения нанотрубных покрытий и независимо от того, как ориентированы нанотрубки, а также от того, нанесены ли однослойные, многослойные нанотрубки или их смесь, все покрытия такого сорта неизменно демонстрируют низкие пороги автоэмиссии, в том числе и в условиях, когда невелик фактор усиления поля. Таким образом, ясно, что нужно искать объяснение низких порогов автоэмиссии, не связанное с существованием алмазной фазы в покрытии.

В работах [53, 54] было предложено другое и более правдоподобное объяснение, во всяком случае, для покрытий с полупроводниковым типом проводимости. Авторы этих работ связывали низкие пороги полевой эмиссии с возникновением в приповерхностном слое покрытия сильных электрических полей, обусловленных накоплением отрицательного заряда в глубоких ловушках и на дефектах покрытия, а также связанных с поляризацией адсорбированных на поверхности дипольных молекул.

Завершая данный параграф, хотелось бы сказать несколько слов о временной стабильности эмиссионных характеристик рассмотренных пленочных покрытий. К сожалению, данных о временной стабильности эмиссии такого сорта покрытий мало. Воспользуемся для оценки временной стабильности наиболее современными данными [50], полученными для хорошо зарекомендовавших себя (см. [46]) ультрананодисперсных алмазных и алмазоподобных пленок.

В работе [50] исследовалась временная стабильность пленок, нанесенных с использованием высокочастотной плазменной CVD-методики на полированную подложку из молибдена, обработанную предварительно алмазным порошком. Изменение содержания аргона в плазме позволяло изменять соотношение алмазной (sp^3) и неалмазной (sp^2) фаз в покрытии. Изменялись как высокочастотные (мегагерцового диапазона частот), так и медленные флуктуации тока эмиссии. Измерения проводились в диодной системе с молибденовым анодом диаметром 3 мм, расположенным на расстоянии 100 ± 2 мкм от поверхности катода, и обычно продолжались в течение 2 часов при анодном напряжении, обеспечивающем начальный ток эмиссии порядка 16 мкА. Как показали измерения, относительные высокочастотные изменения

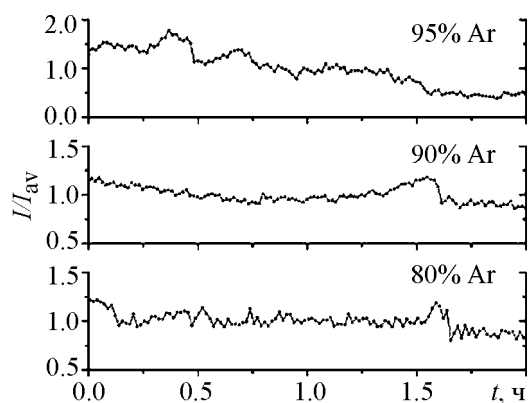


Рис. 14. Изменение во времени отношения I/I_{av} тока с катода к среднему его значению. Характеристики получены в разряде с разным содержанием аргона

тока с алмазоподобной пленки (95% Ar) достигали 45%. Таким образом, проведенные измерения флуктуаций тока исследованных мелкодисперсных пленок свидетельствуют о лучшем качестве алмазных пленок, хотя для всех пленок флуктуации тока довольно велики.

Учитывая сильное влияние на качество эмиттеров условий формирования покрытий, трудно оценить, насколько общи выводы, следующие из работы [50], даже применительно только к ультрамелкодисперсным алмазным и алмазоподобным покрытиям. К тому же, из измерения временных изменений токов для другого типа углеродных эмиттеров [3, 46] следует, что временная стабильность эмиссии практически любых углеродных и содержащих углерод катодов может быть существенно улучшена в результате длительной их тренировки с отбором тока. В данном же случае длительная тренировка, видимо, не проводилась.

3.5. Активировка углеродных и содержащих углерод покрытий. Рассмотренные нами ранее покрытия имеют большую работу выхода, которая меняется для разных углеродных материалов приблизительно от 4.6 до 5 эВ или даже более. Именно поэтому, чтобы работать с созданными на их основе полевыми эмиттерами при умеренных значениях рабочего напряжения, приходится создавать на поверхности углеродных эмиттеров усиливающие электрическое поле структуры. По этой же причине во многих исследованиях предельно уменьшают расстояние между катодом и анодом.

Понизить напряжения, необходимые для получения фиксированных токов эмиссии с углеродных и содержащих углерод материалов, можно и другим методом, понижая их работу выхода с помощью каких-либо активаторов. В этом случае, если сохранится прочность материала, из которого изготовлен катод, следует ожидать не только повышения долговечности создаваемых полевых эмиттеров, но и достижения больших предельных токов эмиссии с их поверхности. Действительно, пондеромоторные силы, «срывающие» с катода наиболее эффективно эмитирующие выступы, пропорциональны квадрату электрического поля у их поверхности. Снижая же работу выхода поверхности эмиссионной структуры, принципиально можно получить большие токи при электрических полях меньше предельного, ведущего к ее разрушению.

Уже довольно давно делаются попытки использовать разные методы активировки углеродных и содержащих углерод эмиттеров. К сожалению, пока не выработаны достаточно общие принципы активировки. К тому же, подобные исследования немногочисленны, а сделанные на их основе выводы не всегда достаточно обоснованы. Тем не менее, опишем кратко некоторые методы, представляющие практический интерес.

В работе [55] сообщается о многочисленных попытках допирования нанотрубных и других нанокластерных пленок атомами бария, свинца, цинка и других элементов и приведены свидетельства того, что допирование пленок, например свинцом, снижает их работу выхода.

В середине 1990-х годов проводились исследования воздействия бомбардировки ионами калия на проводимость твердого тела из молекул C_{60} (фуллерита) [56] и фуллереновых пленок на разных подложках [57]. Бомбардировка осуществлялась ионами с энергией 30 кэВ. Была выявлена возможность заметного изменения проводимости при внедрении калия в твердое тело. Эти исследования не имеют прямого отношения к полевой эмиссии, но косвенно свидетельствуют о влиянии внедренных атомов калия на электронную структуру обработанных образцов.

В работе [58] впервые, насколько нам известно, было изучено влияние интеркаляции атомами Cs на работу выхода нанотрубных покрытий. Пленки толщиной около 0.5 мкм из однослойных углеродных нанотруб, созданные в результате лазерного облучения графита, наносились с помощью пульверизатора на подложку из GaAs. После этого на поверхность пленки напылялся цезий. С помощью фотоэмиссионной спектроскопии измерялась работа выхода чистой пленки и пленки, обработанной потоком атомов цезия. Прежде всего, было установлено, что работа выхода однослойных нанотруб имеет величину 4.8 эВ, то есть больше, чем у графита (4.6–4.7 эВ). Напыление атомов цезия приводило к падению работы выхода до 2.4 эВ.

Влияние бомбардировки медленными ионами Cs на эмиссионные характеристики графита и углеродных волокон исследовалось в работе [59]. Относительное изменение работы выхода определялось по изменению наклона измеренных характеристик Фаулера–Нордгейма. Было обнаружено падение работы выхода углеродных волокон в 1.5 раза и графита в 2.0 раза в результате обработки их поверхности ионами цезия с энергией 25 эВ. Однако в процессе отбора тока автоэмиссии работа выхода увеличивалась. В связи с этим авторы делают вывод, что для достижения долговременного снижения работы выхода необходима многоступенчатая обработка ионами разных энергий, обеспечивающая «относительно равномерное распределение Cs по объему материала».

Описанные в [58, 59] способы активировки, как нам кажется, вряд ли могут привести к долговременному снижению работы выхода полевых эмиттеров. Действительно, активирующее вещество должно сильно влиять на работу выхода поверхности только до тех пор, пока оно находится на поверхности. На самом деле атомы цезия, проникшие вглубь нанотрубной пленки или вглубь графитовых образцов любой природы, практически не должны влиять на эмиссию электронов. На поверхности же такого сорта цезиевые покрытия не могут держаться длительное время из-за слабой связи с поверхностью, а также потому, что должны разрушаться под действием ионной бомбардировки. Неудивительно поэтому, что в последнее время ведется поиск более стойких активирующих покрытий и методов активировки.

Заслуживают внимания выявленные возможности изменения электронной структуры углеродных нанотрубок при внедрении в них калия [60], а также внедрения атомов калия в молекулы фуллерена [61]. Представляют также интерес предложения формировать на поверхности углеродных эмиттеров слои карбида молибдена Mo_2C [62] и иодида цезия (CsI) [63]. Возможность использовать в качестве покрытия слоев карбида молибдена, имеющего меньшую работу выхода (3.5–3.8 эВ), чем у углерода, продемонстрирована экспериментально [62]. Свойства же иодида цезия авторы [63] пока оценили на основании проведенных численных расчетов. Они пришли к выводу, что покрытие слоем иодида цезия должно снижать работу выхода до 1.2–1.4 эВ. К сожалению, однако, надежность выполненных расчетов на основе краткой публикации оценить трудно.

Уже проведенное рассмотрение говорит о больших потенциальных возможностях улучшения качества углеродных полевых эмиттеров за счет снижения их работы выхода, но имеющейся информации пока мало для реализации хотя бы одного из методов. В существующих публикациях практически отсутствуют данные, которые позволили бы оценить, например, долговечность активированных эмиттеров, их прочность и устойчивость к отбору больших автоэмиссионных токов, а также их химическую стойкость в условиях технического вакуума. Все это требует дальнейшего изучения. Мы ограничимся уже сделанным рассмотрением и продемонстрируем возможности одного из перспективных методов активировки в следующем разделе, рассказывая о разработке и исследовании эмиттеров с фуллереновыми покрытиями в СПбГПУ.

3.6. Эмиттеры с фуллереновыми покрытиями. Разработка методов создания и исследование защитных покрытий из молекул фуллерена C_{60} начато на кафедре физической электроники СПбГПУ авторами данной статьи с сотрудниками в 1997 г. Первые результаты этих исследований были доложены на международной межвузовской конференции UNF-99 в Санкт-Петербурге в 1999 г. К тому времени во всем мире уже широким фронтом шли исследования, нацеленные на создание

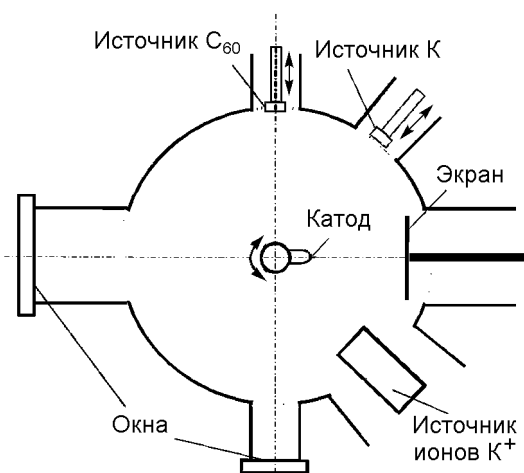


Рис. 15. Схематическое изображение сечения экспериментального прибора

эффективных полевых эмиттеров из углеродных и содержащих углерод материалов, но эмиссионные характеристики фуллереновых пленок изучены не были.

В наших работах были изучены закономерности формирования и эмиссионные свойства фуллереновых покрытий острийных полевых эмиттеров из чистого вольфрама и из вольфрама со слоем карбида вольфрама на поверхности. Кроме того, были изучены возможности активировки фуллереновых покрытий потоками атомов и ионов калия. Диаметр вершины острия варьировался в пределах 0.1–2 мкм. Исследования проводились с использованием многофункциональной вакуумной установки с полевым

эмиссионным микроскопом, который позволяет оперативно и с высоким разрешением ($\sim 1.5\text{--}2$ нм) контролировать рельеф поверхности катода и пространственное распределение потока электронов, эмитированных с этой поверхности. На рис. 15 схематически показано сечение вакуумной камеры, в которой проводились основные эксперименты. Изображены катод на подвижной подвеске, люминесцирующий экран, а также источники фуллереновых молекул, атомов калия и ионов калия. Были предусмотрены возможности поворота катода к источникам фуллереновых молекул, атомов калия и ионов калия, а также к экрану.

Фуллереновые покрытия напылялись на поверхность катода из ячейки Кнудсена. Экран микроскопа, выполнявший роль анода, обычно располагался на расстоянии около 3 см от катода. Тем не менее, в связи с большим усилением поля на острие основные измерения удавалось проводить при умеренных анодных напряжениях, менее 10 кВ. Давление в вакуумной камере можно было оперативно варьировать в широких пределах, приблизительно от 10^{-5} до 10^{-10} мм рт. ст. Основные измерения выполнялись при давлении 10^{-9} мм рт. ст. Чтобы выявить влияние на работу созданных покрытий ионной бомбардировки и газовой среды, часть измерений проводилась при повышенных давлениях остаточного газа вплоть до 10^{-5} мм рт. ст.

Исследования показали, что работа выхода фуллереновых пленок имеет величину около 5 эВ, то есть превышает работу выхода вольфрама. Поэтому нанесение фуллереновых покрытий толщиной более 1 монослоя (мс) неизбежно ведет к увеличению напряжений U_I , необходимых для получения фиксированного тока эмиссии I . Однако эти напряжения можно существенно понизить, создавая на поверхности покрытия усиливающие электрическое поле выступы.

Была разработана методика термической и полевой обработки покрытий, которая позволяла создавать одиночные выступы и распределенные структуры из нескольких десятков выступов, приблизительно одинаковых по поперечным размерам и высоте [64–67]. На рис. 16 показаны исходные эмиссионные изображения монокристалла вольфрама на вершине вольфрамового острия и так называемого ребристого кристалла для острия со слоем карбида вольфрама на поверхности. На рис. 17 приведены изображения ребристого кристалла с разным рельефом фуллеренового (C_{60}) покрытия, в том числе, с одиночным ярко эмитирующим выступом (рис. 17, б) и с распределенной структурой выступов (рис. 17, в). При формировании структур использовалось перемещение поляризованных молекул C_{60} в неоднородных электрических полях. Обычно такая формовка покрытий становится возможной в довольно сильных полях, порядка $(1\text{--}2)\cdot 10^7$ В/см. В измерениях с одиночными выступами были определены предельные плотности токов эмиссии, которые выдерживает

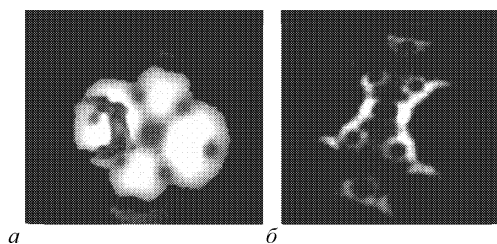


Рис. 16. Эмиссионные изображения монокристалла вольфрама на вершине острия (а) и ребристого кристалла со слоем карбида вольфрама на поверхности (б)

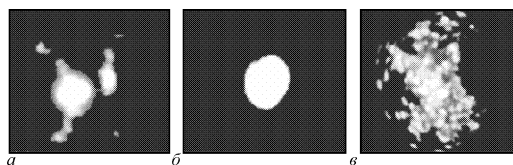


Рис. 17. Эмиссионные изображения ребристого кристалла с фуллереновыми структурами: а – микровыступы на ребрах; б – одиночный центр, обеспечивающий плотности токов до 10^7 А/см²; в – распределенная микрокластерная структура, позволяющая получать в статическом режиме токи до 100–150 мкА

фуллереновый выступ с характерным поперечным размером 1–1.5 нм до своего разрушения. Оказалось, что предельные плотности токов эмиссии достигают значений $5 \cdot 10^6$ А/см², то есть приблизительно на порядок меньше предельных плотностей тока эмиссии, характерных для вольфрамовых острий [10]. Наибольшие предельные токи получались с распределенных фуллереновых структур, созданных на острие со слоем карбида вольфрама на поверхности. С острия диаметром 0.3–0.5 мкм удавалось получать токи до 100–150 мкА в статическом и до 1–2 мА в импульсном режиме (2 мкс, 100 Гц).

Для понижения рабочих напряжений фуллереновые покрытия обрабатывались потоками атомов и ионов калия [68–70]. Напыление атомов калия приводит к падению характерных напряжений, необходимых для отбора фиксированных значений тока эмиссии. Иллюстрирует процесс активировки рис. 18, *а*, на котором показано типичное изменение величины напряжения, необходимого для получения тока 0.002 мкА, от времени нанесения покрытия. Скорость падения этого напряжения зависит от скорости напыления (характеристика 1 рис. 18, *а* измерена при большей скорости напыления, чем характеристика 2). Падение напряжения зависит от температуры эмиттера во время напыления. Напряжение может уменьшаться в 4–5 раз. Однако после окончания процесса напыления, даже при комнатной температуре, напряжение увеличивается (кривая 2 рис. 18, *б*) и через 25–50 часов падение напряжения по сравнению с исходным, характерным для фуллеренового покрытия, уже не превышает 20–25%. Такая дезактивировка связана с уходом калия с поверхности покрытия. Перераспределение калия обусловлено его миграцией и существенно ускоряется с ростом температуры эмиттера. Например, при температуре 650 К перераспределение калия успевают происходить уже в процессе его напыления (кривая 3 рис. 18, *б*).

Гораздо лучшие результаты достигаются при обработке фуллереновых покрытий потоком ионов калия. В специальных экспериментах были оптимизированы режимы активировки покрытий потоком ионов калия. Наибольшее, причем долговременное, снижение рабочих напряжений достигается в результате многоступенчатого процесса, в котором чередуются напыления фуллереновых покрытий и их обработка потоком ионов калия. Оказывают также влияние на качество обработки энергия

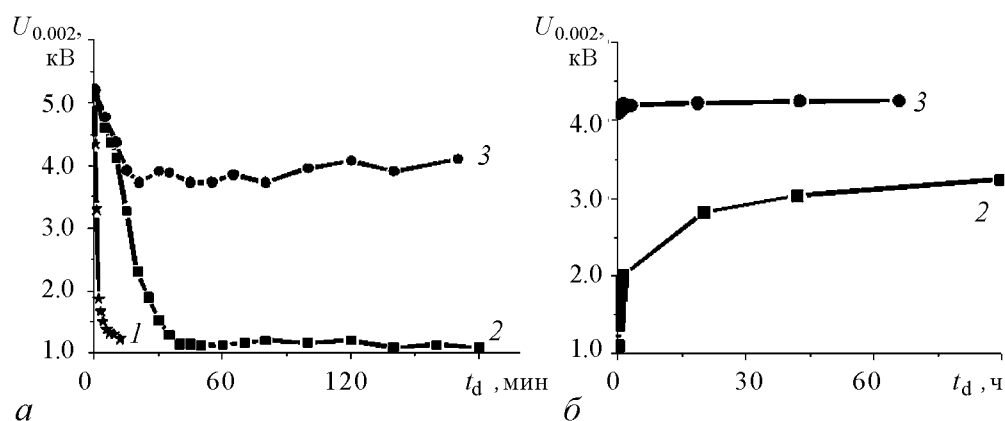


Рис. 18. *а* – Кривые напыления $U_{0.002}(t_d)$ калия на ребристый кристалл, покрытый слоем C_{60} толщиной $\theta = 2$ мс. Характеристики 1 и 2 измерены при разных скоростях напыления на катод при комнатной его температуре. Характеристика 3 измерена при температуре катода 650 К. *б* – 2 и 3 – характеристики дезактивировки $U_{0.002}(t)$ покрытий 2 и 3 рис. *а*

ионов $W_{\text{и}}$ и продолжительность ионной обработки τ при фиксированной плотности потока ионов на катод ($5 \cdot 10^{-8}$ А/см²), а также температура T катода во время нанесения фуллеренового покрытия. При оптимальных значениях $W_{\text{и}} = 40\text{--}90$ эВ, $\tau = 1$ час и $T = 500\text{--}600$ К снижение характерного напряжения было более чем в два раза. При отборе малых токов менее 1 мкА достигнутая активировка практически не менялась в течение длительного времени.

Полученная устойчивая активировка фуллереновых покрытий связывается нами с формированием в покрытии образований типа эндо- ($\text{K}@C_{60}$) и экзоэдралов ($C_{60}@K$), снижающих работу выхода покрытия. Возможность образования таких соединений при бомбардировке молекул C_{60} ионами калия с энергией в несколько десятков электрон-вольт отмечалась ранее в работе [61]. Такие образования имеют гораздо меньшую подвижность, чем атомы калия, и при низких температурах практически не перемещаются по покрытию.

Была испытана работа эмиттеров с активированными потоком ионов калия фуллереновыми покрытиями при отборе больших токов и в сильных электрических полях [71]. Проведенные эксперименты показали, что предельные токи с активированным потоком медленных ионов фуллереновых покрытий меньше, чем для покрытий, необработанных ионами калия. Эмиттеры с обработанными потоком медленных ионов покрытиями могут работать при токах порядка 20–30 мкА. При больших токах в существовавшей до этого распределенной структуре выступов происходит формирование небольшого количества (1–3) ярко эмитирующих центров, ток при фиксированном напряжении увеличивается, а затем происходит срыв покрытия или кончика острия. Уменьшение предельных токов мы связываем с внедрением атомов калия в покрытие, с уменьшением прочности покрытия и/или с ухудшением связи покрытия с подложкой.

Была испытана возможность повышения сцепления покрытия с подложкой за счет ионной обработки поверхности подложки перед нанесением покрытия. Измерения показали, что бомбардировка ионами калия с энергией 1500–5000 эВ заметно модифицирует поверхность ребристого кристалла. На рис. 19 можно сравнить изображения ребристого кристалла до бомбардировки ионами калия с энергией 1500 эВ (рис. 19, а) и после ее завершения (рис. 19, б). Эмиссионные изображения острия остаются существенно отличными от исходного после длительной (40 часов) выдержки в остаточном газе (рис. 19, в), а также после прогрева при температуре 850 К (рис. 19, г). Поэтому можно думать, что отмеченные изменения эмиссионных изображений обусловлены, в основном, изменением рельефа поверхности, а не изменением ее эмиссионных характеристик из-за осаждения калия в процессе ионной бомбардировки. Проведенные к настоящему времени эксперименты свидетельствуют, с нашей точки зрения, что проведенная обработка подложки потоком ионов дает положительный результат. После обработки удастся увеличивать токи эмиссии ориентировочно до 50–60 мкА.

Как показали измерения, бомбардировка быстрыми ионами может быть использована и для улучшения структуры поверхности уже созданных и активированных фуллереновых покрытий. Так, после образования на поверхности эмиттера в процессе отбора больших токов выделенных по эмиссионной способности центров, бомбардировка этой поверхности потоком ионов калия с энергией 1500–5000 эВ позволяет повысить однородность распределенной структуры.

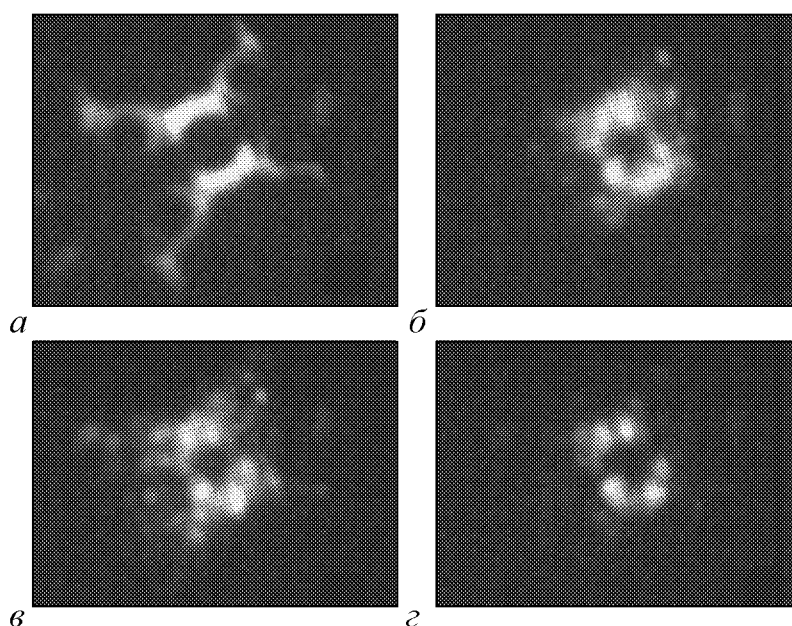


Рис. 19. Ребристый кристалл до (а) и сразу после обработки потоком ионов (б), после выдержки в остаточном газе в течение 40 часов (в), а затем после прогрева при температуре 850 К. Энергия ионов 1500 эВ. Продолжительность обработки 2 часа

Повышается однородность структуры эмиссионных центров на поверхности активированной фуллереновой пленки и в процессе ее работы с отбором тока эмиссии при повышенных давлениях газа, порядка 10^{-7} – 10^{-6} мм рт. ст. Такое изменение структуры поверхности эмиттера мы связываем с бомбардировкой поверхности ионами остаточных газов. Созданная при повышенном давлении однородная структура сохраняется после откачки до давления 10^{-9} мм рт. ст.

Завершая описание результатов исследования полевых эмиттеров с фуллереновыми покрытиями, хотелось бы обратить внимание на их существенное отличие от других известных нам углеродных и содержащих углерод полевых эмиттеров. Фуллереновая молекула отличается прочными связями атомов углерода в ней [72]. Энергия связи атомов углерода в молекуле C_{60} равна 6.99 эВ/атом. С другой стороны, связи этих молекул с твердотельной подложкой значительно слабее [73]. Например, энергия связи термически нанесенной пленки C_{60} с графитовой подложкой всего 1.69 эВ. Связи между молекулами тоже слабые (Ван-дер-Ваальсовские). По этой причине фуллереновым пленкам свойственна своеобразная саморегулировка, которая делает ее устойчивой к ионной бомбардировке. Как следует из наших данных, ионная бомбардировка практически не приводит к разложению фуллереновых молекул и образованию аморфного углерода на поверхности. Об этом говорят как эксперименты, связанные с обработкой фуллереновых покрытий потоками ионов калия, так и эксперименты при повышенных давлениях остаточного газа. Быстрые ионы, падающие на катод, видимо, выделяют большую часть своей энергии в подложке. По дороге ионы могут разрушать созданные на фуллереновой пленке выступы. Однако «освободившиеся» из данного выступа поляризованные молекулы C_{60} тут же, перемещаясь под действием неоднородных полей, захватываются соседними вы-

ступами или создают новый выступ. Таким образом, распределенная структура выступов самовоспроизводится. Возможно, именно эти процессы являются причиной мерцающего характера изображений эмиттера с фуллереновым покрытием на экране полевого эмиссионного микроскопа. Проведенные измерения показали, что при повышенных давлениях порядка 10^{-7} – 10^{-6} мм рт. ст. при мерцаниях изображения ток эмиссии фуллереновых покрытий практически не меняется во время наблюдений, во всяком случае, при токах менее 10^{-7} – 10^{-6} А.

Указанное свойство фуллереновых покрытий дает им преимущество по сравнению с любыми невоспроизводящимися «жесткими» покрытиями. С другой стороны, слабая связь фуллереновых молекул с подложкой может ограничить величину максимальных полей, которые можно создавать у поверхности фуллереновой пленки, не разрушая ее пондеромоторными силами.

3.7. Эмиттеры из композитных материалов. Композиты могут представлять большой интерес в качестве перспективных источников полевой эмиссии, так как позволяют объединять мелкоструктурированные материалы разной природы. На данном этапе нам хотелось разобраться с влиянием на автоэмиссию близкого соседства материалов, сильно отличающихся работой выхода. Поэтому было решено опробовать возможности использования для получения полевой эмиссии композита, созданного из гранул гексаборида лантана в матрице из пирографита.

Гексаборид лантана, судя по литературным данным, имеет работу выхода около 2.8 эВ, работа же выхода пирографита примерно на 2 эВ выше. Гранулы LaB_6 имели неправильную форму и их характерные размеры не превышали 40 мкм. Обволакивал эти гранулы и соединял их между собой слой пироуглерода толщиной около 100 нм. На рис. 20, 21 показаны в разном масштабе участки поверхности композитного образца, полученные с помощью растрового электронного микроскопа JEOL FESEM. Рассмотрение этих рисунков позволяет на основе анализа размеров неоднородностей поверхности оценить значения «геометрического» фактора усиления поля β_r . Определенный таким образом фактор усиления поля имеет величину не более 50.

С помощью созданной триодной системы, включающей кроме катода сетку и люминесцентный экран, были проведены измерения тока эмиссии с катода. Поле у заземленного катода создавалось напряжением U положительной полярности, приложенным к расположенной на расстоянии $d = 2.5$ мм от катода сетке с прозрачностью около 75%. Эмитированные с катода электроны, пройдя сетку, доускорялись в зазоре между сеткой и экраном напряжением $U_{c3} \approx 0.1U$, попадали на экран и формировали на нем эмиссионные картины, отражающие распределение потока электронов с катода.

Типичная измеренная вольт-амперная характеристика (зависимость тока I с катода от напряжения U) и построенная на ее основе характеристика Фаулера–Нордгейма показаны, соответственно, на рис. 22 и рис. 23. Из этих измерений следует, что макроскопические поля $E_{\text{п}} = U/d$ в пределах вольт-амперной характеристики имеют величину не более $4 \cdot 10^4$ В/см. Автоэмиссию при столь малых полях не удается оправдать только с учетом выявленного выше геометрического фактора усиления поля. Поэтому приходится искать другие источники сильных полей.

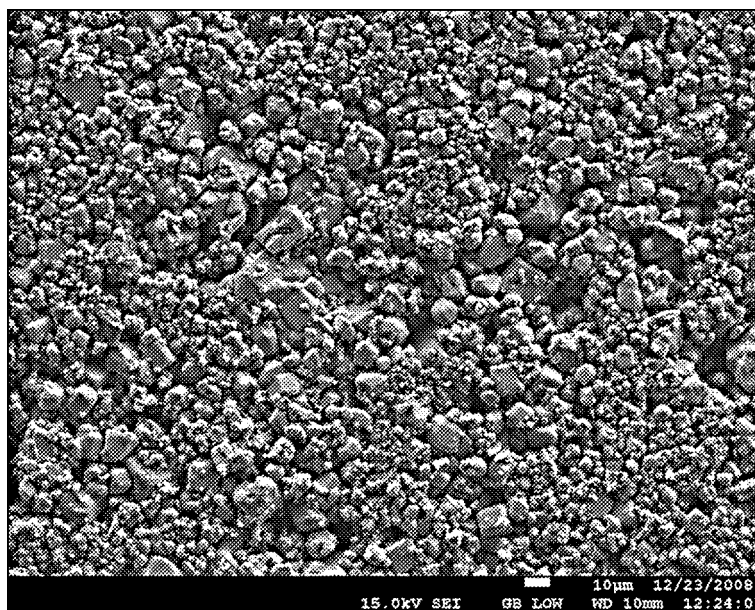


Рис. 20. FESEM изображение поверхности эмиттера из композита LaB₆-C

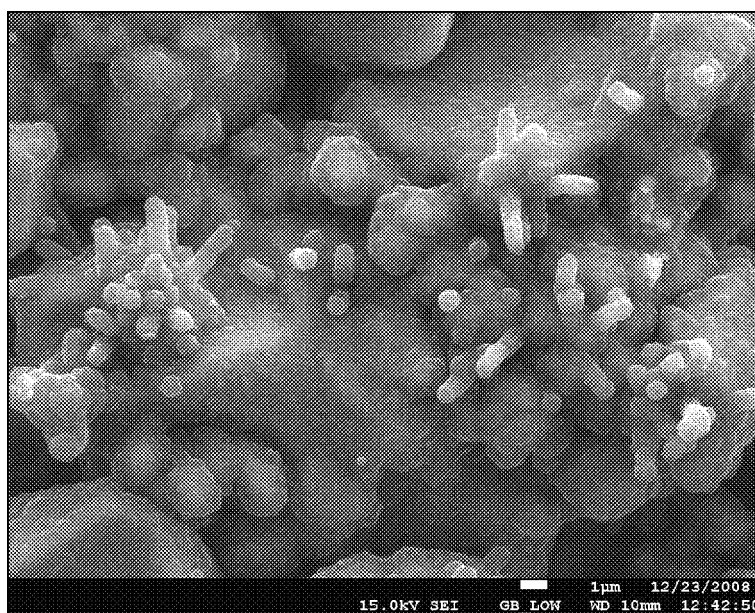


Рис. 21. Увеличенное FESEM изображение малого участка поверхности эмиттера из композита LaB₆-C

Судя по изображениям на экране, поток электронов с катода неоднороден и формируется небольшим количеством эмиссионных центров. Нам кажется, что в качестве источников эмиссии могут выступать не только области заряженных глубоких ловушек и разнообразных дефектов в соответствии с моделью, описанной в работах [51, 52]. Наряду с этим, вклад в эмиссию в случае обследованного нами катода могут дать также такие его участки, где возможен выход в вакуум электронов с областей близкого контакта пироуглерода с гексаборидом лантана. На таких участках поля пятен определяются величиной $\Delta U/\Delta l$, где $\Delta U \approx 2$ В – контактная разность по-

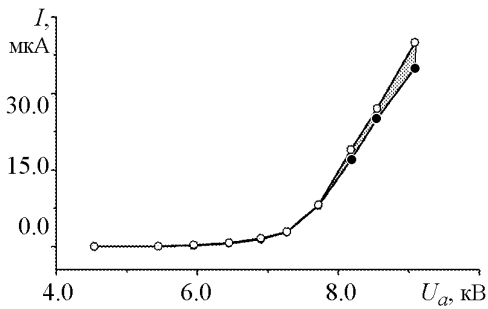


Рис. 22. Вольт-амперная характеристика эмиттера из композита LaB₆-С. Заштрихованная область отражает размах флуктуаций тока

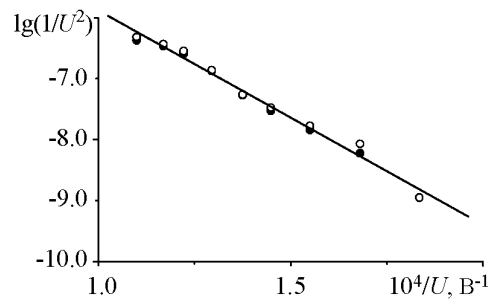


Рис. 23. Характеристика Фаулера-Нордгейма эмиттера из композита LaB₆-С. Точки разного типа отражают разброс значений тока эмиссии при фиксированном напряжении, связанный с флуктуациями тока

тенциалов, равная разности работ выхода указанных материалов, а Δl – расстояние между границами этих материалов у поверхности. При значениях $\Delta l \leq 1$ нм поля пятен могут иметь величину более $2 \cdot 10^7$ В/см и в таком случае эти участки станут источником интенсивной полевой эмиссии.

Предложенное объяснение эмиссии исследованного композитного образца нельзя пока считать полностью обоснованным. Необходимы, видимо, дополнительные доказательства природы этой эмиссии.

Заключение

Пончики в мечтах – это не пончики, а мечта.

Шолом Алейхем

Завершая лекцию, приходится констатировать, что мечта о создании конкурентоспособных СВЧ-устройств с полевыми эмиттерами как была мечтой, так пока и осталась ею. Однако нам кажется, что реализация этой мечты все же возможна.

Перечислим направления в разработке полевых эмиттеров, где, с нашей точки зрения, возможен в недалеком будущем успех в создании достаточно сильноточных, стабильных и долговечных автоэмиссионных источников электронов для вакуумной СВЧ-электроники.

Наиболее реальным представляется создание СВЧ-устройств с источниками электронов на основе небольшого количества тугоплавких острых металлических катодов в системах с сеточным управлением эмиссией, предложенных еще в 1950-е годы классиками полевой эмиссии [10]. Технология создания таких катодов достаточно проста. Правда, для долговечной работы указанного сорта эмиттеров необходимо обеспечить сверхвысокий вакуум в приборах. Но это достижимо в СВЧ-устройствах небольшого размера при использовании, например, современных методов криогенной откачки.

Вероятен успех в создании катодов на основе острых эмиттеров с ультрананокристаллическим алмазным покрытием [46]. В разработке такого типа эмиттеров

объединили усилия исследователи из России, США, Китая и Израиля. Они создали эмиттеры очень высокого качества, но пока не отработали подходящих устройств формирования электронных пучков. Недостатком таких эмиттеров является чрезвычайно сложная технология приготовления покрытий. Эти эмиттеры, как нам кажется, лучше всего подходят для систем спиндтовского типа, поскольку для достижения больших токов необходимо формировать электронный поток большим количеством включенных параллельно острийных эмиттеров. Однако успех в создании таких катодных систем возможен только в том случае, если технология нанесения ультрананодисперсных алмазных покрытий совместима с технологией изготовления спиндтовских структур.

Представляют интерес и спиндтовские структуры с пучками углеродных нанотрубок в ячейках [44]. Не очевидно, что такие системы будут достаточно долговечны в условиях технического вакуума. Но все же есть надежда, что использование именно пучков углеродных волокон позволит обеспечить приемлемую долговечность такого сорта катодов, поскольку в них предусмотрено определенное «резервирование» нанотрубок. Технологии изготовления катодов с пучками углеродных нанотрубок и описанных выше катодов с острийными эмиттерами, имеющими ультрананодисперсное алмазное покрытие, сложны. Поэтому катоды указанных типов будут достаточно дороги.

Спиндтовские эмиссионные системы до недавнего времени рассматривались, преимущественно, как источники малых токов для низковольтных устройств типа плоских дисплеев. В работе [22] было показано, что даже со спиндтовских структур малого поперечного размера (диаметром 1 мм) с молибденовыми острийными эмиттерами удается получать токи около 100 мА. Видимо, эти структуры могут быть изготовлены большего размера и обеспечить большие токи. Однако проблемы в их использовании возникают в достаточно высоковольтных устройствах, где ионная бомбардировка разрушает металлические эмиттеры. Проблема может быть решена при условии создания в приборах сверхвысокого вакуума. Но нам представляется, что дешевле и проще можно решить задачу и обеспечить долговечную работу спиндтовских катодных систем в условиях технического вакуума, если на поверхность острийных эмиттеров нанести стойкие по отношению к ионной бомбардировке и к воздействию газовой среды защитные покрытия. Мы можем быть пристрастны, но, видимо, лучшими из существующих являются исследованные нами саморегулирующиеся пленочные фуллереновые покрытия. Технология нанесения таких покрытий достаточно проста и возможность ее применения к спиндтовским системам частично нами уже испытана.

Могут быть перспективны матричные катоды из графита с упорядоченной структурой выступов. Но пока не отработаны пушки, позволяющие на их основе формировать электронные потоки необходимой интенсивности. Кроме того, должна быть еще доказана высокая долговечность пушек с такими катодами в условиях технического вакуума.

По-прежнему актуальны и представляют большой интерес работы, нацеленные на создание разного типа нанокластерных и других типов полевых углеродных и содержащих углерод эмиттеров с развитой поверхностью. Они имеют большую область применения, но пока вряд ли годятся для использования в вакуумной СВЧ-электронике.

Представляется целесообразным продолжить все основные направления исследований. Для ускорения процесса разработки полевых эмиттеров необходимо существенно улучшить финансирование исследовательских лабораторий, а также их обеспечение современным технологическим и исследовательским оборудованием.

Авторы благодарны аспиранту И.А. Светлову за участие в экспериментах, разработчикам и изготовителям исследованного композитного образца С.К. Гордееву и С.Б. Корчагиной (ЦНИИМ, Санкт-Петербург), а также Центру коллективного пользования С.Г. Конникова при ФТИ РАН им. А.Ф. Иоффе и лично Д.А. Саксееву за анализ поверхности композитного образца методом растровой электронной микроскопии.

Исследования полевых эмиттеров с углеродными и содержащими углерод покрытиями выполнены при поддержке РФФИ (гранты №№02-02-16211, 05-02-16936, 08-02-00332).

Библиографический список

1. *Бондаренко Б.В., Селиверстов В.А., Шаховской А.Г., Шешин Е.П.* //Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32, № 1. С. 199.
2. *Гуляев Ю.В., Григорьев Ю.А., Синицын Н.И. и др.* //Материалы Всероссийской межвузовской конференции «Современные проблемы электроники и радиофизики СВЧ». Саратов: Изд. ГосУНЦ «Колледж». 1997. С. 90.
3. *Шешин Е.П.* Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. М.: Изд. МФТИ, 2001. 288 с.
4. *Fowler R.H., Nordheim L.* Electron emission in intense electric fields //Proc. R. Soc. 1928. A 119. P. 173.
5. *Good R.H., Mueller E.W.* Field Emission //Handbuch der Physik. 1956. Vol. 21 / Ed. S. Fluegge (Berlin: Springer). P. 176.
6. *Hawkes P.W., Kasper E.* Applied geometrical optics //Principles of Electron Optics. 1996. Vol. II (New York: Academic).
7. *Shakir M.I., Nadeem M., Shahid S.A., Mohamed N.M.* Carbon nanotube electric field emitters and applications //Nanotechnology. 2006. Vol. 17, R41-R56.
8. *Nilsson L., Groening O., Emmenegger C. et al.* Scanning field emission from patterned carbon nanotube films //Appl. Phys. Lett. 2000. Vol. 76, № 15. P. 2071.
9. *Бочаров Г.С., Елецкий А.В.* Влияние экранировки на эмиссионные характеристики холодных полевых катодов на основе углеродных нанотрубок //ЖТФ. 2005. Т. 75, № 7. С. 126.
10. *Martin E.E., Trolan J.K., Dyke W.P.* Stable, high density field emission cold cathode //J. Appl. Phys. 1960. Vol. 31, № 5. P. 782.
11. *Тамм И.Е.* Основы теории электричества. М.: «Наука», 1989. С. 69.
12. *Шарбонье Ф.М., Барбур Дж.Р., Гаррет Л.Ф., Дайк В.П.* Исследование природы и прикладных свойств холодной эмиссии на СВЧ //ТИИЭР. 1963. Т. 51, № 7. С. 989.

13. *Афанасов С.Г. и др.* О некоторых результатах экспериментального исследования низковольтных электронно-вакуумных приборов СВЧ //Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 11. С. 1773.
14. *Трубецков Д.И., Рожнев А.Г., Соколов Д.В.* Лекции по сверхвысокочастотной вакуумной микроэлектронике //Саратов: Изд. ГосУНЦ «Колледж», 1996. 238 с.
15. *Spindt C.A., Brodie I., Humphrey L., Westerberg E.R.* Physical properties of thin-film field emission cathodes with molybdenum cones //J. of Appl. Phys. 1976. Vol. 47, № 12. P. 5248.
16. *Brodie I., Spindt C.A.* //Microelectronics. Advances in Electronics and Electron Physics. 1992, Vol. 83. P. 1.
17. *Spindt C.A., Holland C.E., Rosengreen A., Brodee I.* Field-emitter arrays for vacuum microelectronics //IEEE Trans. on ED. 1991. Vol. ED-38, № 10. P. 2355.
18. *Garven M., Spark S.N., Cross A.W., Cooke S.J., Phelps A.D.R.* Gyrotron experiments employing a field emission array cathode //Phys. Rev. Lett. 1996. Vol. 77, № 11. P. 2320.
19. *Spindt C.A., Holland C.E., Schwoebel P.R., Brodie I.* Field emitter array development for microwave applications //J. Vac. Sci. Technol. B. 1996. Vol. 14. P. 1986.
20. *Spindt C.A., Holland C.E., Schwoebel P.R., Brodie I.* Field emitter array development for microwave applications // J. Vac. Sci. Technol. B. 1998. Vol. 16. P. 758.
21. *Makishimia H., Imura H., Takahashi M. et al.* Remarkable improvements of microwave electron tubes through the development of cathode materials //In Tech. Dig. Of the 10th Int. Vacuum Microelectronics Conf. (Aug. 17-21 1997, Kyonggiu, Korea), EDIRAK, Seoul, 1997, p. 194.
22. *Whaley D.R., Armstrong C.M., Gannon B. et al.* PPM focused TWT using a field emitter array cold cathode //In Proc. IEEE Int. Conf. Plasma Sci. (Piscataway, NJ), 1998.
23. *Whaley D.R., Gannon B.M., Smith C.R. et al.* Application of field emitter arrays to microwave power amplifiers //IEEE Trans. on Plasma Sci. 2000. Vol. 28, № 3. P. 727.
24. *Whaley D.R. et al.* Experimental demonstration of an emission-gated travelling wave tube amplifier //IEEE Trans. on Plasma Sci. 2002. Vol. 30, № 3. P. 998.
25. *Whaley D.R., Duggal R., Armstrong C.M. et al.* Operation of a low-voltage high transconductance field emitter array TWT //Conference Abstracts of The 35th IEEE International Conference on Plasma Science (June 15-19, 2008, Karlsruhe, Germany), p. 310.
26. *Baker F.S., Osborn A.R., Williams J.* The carbon fibre field emitter //J. Phys. D: Appl. Phys. 1974. Vol. 7, № 15. P. 2105.
27. *Braun E., Smith J.E., Sykest D.E.* Carbon fibers as field emitter //Vacuum. 1975. Vol. 25, № 9/10. P. 425.
28. *Бондаренко Б.В., Черепанов А.Ю., Шахбазов С.Ю. и др.* Сильноточный автокатод на основе углеродных волокон //Электронная техника, сер.1, Электроника СВЧ. 1987, № 10. С. 45.
29. *Бондаренко В.Б., Габдулин П.Г., Гнучев Н.М. и др.* Эмиссионные характеристики порошков из нанопористого углерода //ЖТФ. 2004. Т. 74, № 10. С. 113.

30. *Бондаренко В.Б., Габдуллин П.Г., Гнучев Н.М., Давыдов С.Н.* Эмиссионная способность углеродных наноструктур, полученных из карбидов //Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2008. № 3(59). С. 165.
31. *Бондаренко В.В., Ильин В.Н., Шешин Е.П. и др.* Эмиссионные характеристики автокатодов из пластин пирографита //Электронная техника, сер.1, Электроника СВЧ. 1988. № 1. С. 34.
32. *Суворов А.Л., Шешин Е.П., Протасенко В.В. и др.* Микрошероховатые плоские автоэмиссионные катоды из графита, полученные радиационным способом //ЖТФ. 1996. Т. 66, № 7. С. 156.
33. *Grigoriev Y.A., Petrosyan A.J., Penzyakov V.V. et al.* Experimental study of matrix carbon field-emission cathodes and computer aided design of electron guns for microwave power devices, exploring these cathodes //J. Vac. Sci. Technol. B 15(2), War/Apr. 1997. P. 503.
34. *Андреев К.В., Григорьев Ю.А., Милютин Д.Д. и др.* Импульсные автоэмиссионные источники электронов на основе углеродных микро и наноструктур для лучевых СВЧ-приборов: численное и экспериментальное исследование //В сборнике: Материалы 13 зимней школы-семинара по СВЧ электронике и радиофизике (Саратов, 31 января – 5 февраля 2006). Саратов. 2006. Изд. ГосУНЦ «Колледж». С. 64.
35. *Савельев С.Г., Синицын Н.И., Торгашов Г.В., Григорьев Ю.А.* Исследование пленочных углеродных катодов, полученных методом пиролиза гептана //В сб. Материалы международной межвузовской конференции «Современные проблемы электроники и радиофизики СВЧ» (20–24 марта 2001, Саратов), с. 138.
36. *Dzbanovsky N.N., Pilevsky A.A., Suetin N.V., Rakhimov A.T., Timofeev M.A.* Cold cathode and methods for producing the same //United States Patent № 6,593,681 B1. Date of Patent: Jul. 15, 2003.
37. *Дзбановский Н.Н., Минаков П.В., Пилевский А.А., Рахимов А.Т. и др.* Сильноточная электронная пушка на основе автоэмиссионного катода и алмазной сетки //ЖТФ. 2005. Т. 75, № 10. с. 111.
38. *Bonard J.M., Maier F., Stokli T. et al.* Field emission properties of multiwalled carbon nanotubes //Ultramicroscopy. 1998. Vol. 73(7).
39. *Teo K.B. et al.* Plasma enhanced chemical vapour deposition carbon nanotubes/nano fibers: how uniform do they grow? //Nanotechnology. 2003. Vol. 14, 204.
40. *Milne W.I., Teo K.B.K., Amaratunga G.A.J. et al.* Carbon nanotubes as field emission sources //J. Mater. Chem. 2004. № 14. P. 933.
41. *Purcell S.T., Vincent P., Journet C., Binh V.T.* Hot nanotubes: stable heating of individual multiwall carbon nanotubes to 2000 K induced by the field emission current //Phys. Rev. Lett. 2002. Vol. 88. P. 105502.
42. *Vincent P., Purcell S.T., Journet C., Binh V.T.* Modelization of resistive heating of carbon nanotubes during field emission //Phys. Rev. 2002. Vol.B 66. P. 075406.
43. *Бочаров Г.С., Елецкий А.В.* Тепловая неустойчивость холодной полевой эмиссии углеродных нанотрубок //ЖТФ. 2007. Т. 77, № 4. С. 107.
44. *Yue G.Z., Qiu Q., Gao Bo et al.* Generation of continuous and pulsed diagnostic imagine X-ray radiation using a carbon-nanotube-based field-emission cathode // Appl. Phys. Lett. 2002. Vol. 81, № 2. P. 355.

45. *Ding Ming Q., Li Xinghui, Bai Guodong et al.* Fabrication of Spindt-type cathodes with aligned carbon nanotube emitters // *Appl. Surf. Sci.* 2005. Vol. 251. P. 201.
46. *Fujii Shunjiro, Honda Shin-ichi, Machida Hironobu et al.* Efficient field emission from an individual aligned carbon nanotube bundle enhanced by edge effect // *Appl. Phys. Lett.* 2007. Vol. 90. 153108-1.
47. *Krauss A.R., Auciello O., Ding M.Q. et al.* Electron field emission for ultrananocrystalline diamond films // *J. of Appl. Phys.* 2001. Vol. 89, № 5. P. 2958.
48. *Рахимов А.Т., Самородов В.А., Солдатов Е.С. и др.* Исследование полевой эмиссии нанокристаллических алмазных пленок методом сканирующей туннельной микроскопии // *Поверхность.* 1999. № 7. С. 43.
49. *Рахимов А.Т., Самородов В.А., Солдатов Е.С. и др.* Исследование корреляции эмиссионных и структурных характеристик алмазных пленок методом сканирующей туннельной микроскопии // *Поверхность.* 1999. №7. С. 47
50. *Rakhimov A.T., Suetin N.V., Soldatov E.S.* Scanning tunneling microscope study of diamond films for electron field emission // *Vacuum Science Technology.* 2000. Vol. B18. P. 76.
51. *Uppireddi Kishore, Weiner Brad R., Moreli Gerardo.* Studi of the temporal current stability of field-emitted electrons from ultrananocrystalline films // *J. of Appl. Phys.* 2008. Vol. 103. 104315(1-5).
52. *Sinitsyn N.I., Gulyaev Y.V., Torgashov G.V. et al.* Thing films consisting of carbon nanotubes as a new material for emission electronics // *Appl, Surf. Sci.* 1997. Vol. 111. P. 145.
53. *Fursey G.N., Novikov D.V., Dyuzhev G.A. et al.* The field emission from carbon nanotubes // *Appl. Surf. Sci.* 2003. Vol. 215. P. 135.
54. *Фурсей Г.Н., Баскин Л.М.* Особенности полевой эмиссии полупроводников // *Микроэлектроника.* 1997. Т. 26, № 2. С. 117.
55. *Baskin L.M., Fursey G.N.* Decisive role of dip trap states in initiating of vacuum breakdone in presence of dielectric insertions // *Proc. of the 13th ISDEIV (Paris, 1988), Part 1.* P. 31.
56. *Синицын Н.И., Гуляев Ю.В., Девятков Н.Д. и др.* Углеродные нанокластерные структуры – один из материалов эмиссионной электроники будущего // *Радиотехника.* 2000. № 2. С. 9.
57. *Troillas P., Moliton A., Ratier B.* Doping effects induced by potassium ion implantation in solid C₆₀ // *Synthetic Metals?* 1995. Vol. 73. P. 145.
58. *Troillas P., Ratier B., Moliton A. at all.* Field-effect studies of C₆₀ thin films before and after implantation with potassium // *Synthetic Metals?* 1996. Vol. 81. P. 259.
59. *Suzuki Satoru, Bower Chris, Zhou Otto.* Work functions and valence band states of pristine and Cs-intercalated single-walled carbon nanotube bundles // *Appl. Phys. Lett.* 2000. Vol. 76. P. 4007.
60. *Бобков А.Ф., Давыдов Е.В., Зайцев С.В. и др.* Некоторые аспекты использования углеродных материалов в автоэлектронных эмиссионных катодах // *ЖТФ.* 2001. Т. 71, № 6. С. 95.
61. *Suzuki Satoru, Maeda Fumihiko, Watanabe Yoshio, Ogino Toshio.* Electronic struc-

- ture of single-walled carbon nanotubes encapsulating potassium // *Phys. Rev.* 2003. Vol. B 67. 115418(1-6).
62. *Campbell E.E.B., Tellgmann R., Krawez N., Hertel I.V.* Production LDMS characterization of endohedral alkali-fullerene films // *J. Phys. Chem. Solids.* 1997. Vol. 58, № 11. P. 1763.
 63. *Bagge-Hansen M., Outlaw R.A., Miraldo P. et al.* Field emission from Mo₂C coated carbon nanosheets // *J. of Appl. Phys.* 2008. Vol. 103. 014311-(1-9).
 64. *Vlahos Vasilios, Morgan Dane, Booske John H.* Material analysis and characterization of cesium iodide (CsI) coated C fibers for field emission applications // *Conference Abstracts of The 35th IEEE International Conference on Plasma Science* (June 15–19, 2008, Karlsruhe, Germany), p. 126.
 65. *Sominski G.G., Tumareva T.A., Polyakov A.S., Zabello K.K.* Field Emitters with Carbon Containing Coverages and Based on Carbon Fibers: Possibilities of Creation and Use in Microwave Electronics // *Proc. of Int Univ. Conf. «Electronics and Radiophysics of Ultra-High Frequences».* St.Petersburg State Technical University, St.Petersburg, Russia. May 24–28, 1999. P. 327.
 66. *Tumareva T.A., Sominski G.G., Polyakov A.S.* Fullerene Coverages Formation on Tungsten Tip Surface at High Electric Fields // *ITG-Fachbericht Proceedings «Displays and Vacuum Electronics»* (May 2-3, 2001, Garmisch-Partenkirchen, Germany). 2001, VDE Verlag GMBH, Berlin, Offenbach, N165, p. 269.
 67. *Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Ефремов А.А., Поляков А.С.* Острийные полевые эмиттеры с фуллереновым покрытием // *ЖТФ.* 2002. Т. 72, № 2. С. 105.
 68. *Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Поляков А.С.* Формирование микрообразований с упорядоченной структурой в фуллереновых покрытиях полевых эмиттеров // *ЖТФ.* 2002. Т. 72, № 2. С. 111.
 69. *Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Веселов А.А.* Активировка калием полевых эмиттеров с фуллереновыми покрытиями // *ЖТФ.* 2004. Т. 74, № 7. С. 110.
 70. *Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Бондаренко А.К., Веселов А.А., Светлов И.А.* Активирование фуллереновых покрытий полевых эмиттеров потоками атомов и ионов калия // *ЖТФ.* 2006. Т. 76, № 7. С. 81.
 71. *Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Бондаренко А.К., Морозов А.Н., Светлов И.А.* Полевые эмиттеры с фуллереновыми покрытиями и их активировка // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика.* 2006, № 3. С. 51.
 72. *Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Светлов И.А., Морозов А.Н.* Активированные потоком ионов калия полевые эмиттеры с фуллереновыми покрытиями в сильных электрических полях // *ЖТФ.* 2008. Т. 78, № 11. С. 119.
 73. *Соколов В.И., Станкевич И.В.* Фуллерены – новые аллотропные формы углерода: структура, электронное строение и химические свойства // *Успехи химии.* 1993. Т. 62, № 5. С. 455.
 74. *Ходорковский М.А., Мурашов С.В., Артамонова Т.О. и др.* Исследование энергии связи между молекулами фуллерена в тонких пленках // *Письма в ЖТФ.* 2004. Т. 30, № 4. С. 1.

Поступила в редакцию 26.02.2009

DEVELOPMENT AND IMPROVEMENT OF FIELD EMITTERS CONTAINING CARBON MATERIALS

G.G. Sominski, T.A. Tumareva

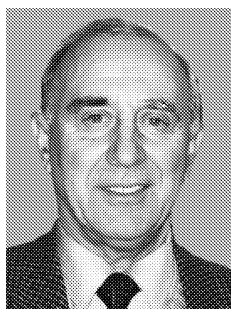
Achievements and problems in creation of field emitters for vacuum microwave devices are described. The main attention is devoted to the emitters made of containing carbon materials for high-voltage devices operating at technical vacuum conditions 10^{-6} – 10^{-8} Torr. The brief review of existing works is presented. Results of investigations performed in SPbSPU are described.

Keywords: Field emitters, carbon and containing carbon materials, fullerene coatings, vacuum microwave electronics, technical vacuum, strong electric fields, high currents, durability, activation, ion treatment.



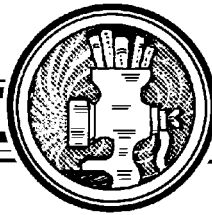
Тумарева Татьяна Алексеевна – родилась в Ленинграде (1937), окончила (1960) Ленинградский политехнический институт (ныне Санкт-Петербургский государственный политехнический университет – СПбГПУ). После окончания работала в Государственном оптическом институте, а с 1964 года – в ЛПИ. Защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (ЛПИ, 1972), посвященную созданию и исследованию полевых эмиттеров с разнообразными активирующими покрытиями. В настоящее время – старший научный сотрудник кафедры физической электроники СПбГПУ. Научные интересы связаны с разработкой и исследованием полевых эмиттеров. Разработала оригинальные методы диагностики полевых эмиттеров и формируемых ими электронных потоков. Разработала перспективные полевые эмиттеры с фуллереновыми покрытиями. Автор более 100 печатных работ и 3 изобретений.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
E-mail:sominski@rphf.spbstu.ru



Соминский Геннадий Гиршевич – родился (1935) в Ленинграде. Окончил Ленинградский политехнический институт (1960). Защитил кандидатскую диссертацию (1967) и диссертацию на соискание ученой степени д. ф.-м. н. (1984). Докторская диссертация была посвящена исследованию мощных СВЧ устройств со скрещенными полями. С 1960 года по настоящее время работает на кафедре физической электроники СПбГПУ, профессор (с 1991). В 1968 году организовал на кафедре лабораторию сильноточной и СВЧ электроники и руководит ею по настоящее время. Область основных научных интересов – процессы в пространственном заряде и их влияние на работу сильноточных электронных устройств. Кроме того, занимается исследованием и разработкой полевых эмиттеров для формирования интенсивных электронных потоков. Автор более 200 печатных работ и 17 изобретений.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
E-mail:sominski@rphf.spbstu.ru



ТЕОРИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ВОЛНОВОДОВ

В.А. Солнцев

Изложена теория возбуждения волноводов заданными сторонними источниками, основанная на разложениях возбуждаемого электромагнитного поля по собственным волнам волновода. Приведены необходимые свойства собственных волн гладких и периодических волноводов, в том числе условия ортогональности волн по сечению и объёму волновода. Кратко описаны основные свойства псевдопериодических волноводов, представляющих новый класс волноводящих систем. Рассмотрены различные формы теории возбуждения волноводов. Волноводная форма теории использует представление возбуждаемого электромагнитного поля рядами по собственным волнам на частоте возбуждения с выделением неразлагаемой части поля, которая может быть обусловлена продольным током (Л.А. Вайнштейн), квазистатическим полем (В.А. Солнцев) и др. Приведено доказательство существенного улучшения сходимости рядов при выделении квазистатического поля. Другая, резонаторная форма теории возбуждения использует разложение поля в ряды по собственным волнам с фиксированным волновым числом и разными частотами; при этом, как и в теории возбуждения резонаторов, сразу выделяется квазистатическое электрическое поле. Доказана эквивалентность волноводной и резонаторной форм теории возбуждения. На основании общих уравнений теории возбуждения проведен анализ свойств полного возбуждаемого поля, его разделение на резонансную часть, включающую синхронные волны, и поле пространственного заряда, включающее квазистатическое поле и динамические поправки. Приведено разностное уравнение возбуждения собственных волн, не имеющее особенностей и применимое внутри, на границах и вне полос пропускания волноводов. Отмечена возможность существенного влияния динамических поправок в поле пространственного заряда на законы взаимодействия электронов.

Ключевые слова: Волновод, замедляющая система, псевдопериодическая структура, теория возбуждения, собственные волны, пространственный заряд.

Введение

Статья написана на основе двух лекций по теории волноводов, прочитанных автором на XIV международной зимней школе-семинаре по электронике сверхвысоких частот и радиофизике [1]. Изложена теория возбуждения волноводов заданными сторонними источниками, основанная на разложениях возбуждаемого электромагнитного поля по собственным волнам волновода. В настоящее время наиболее широко применяется разложение по собственным волнам, взятым на частоте возбуждения. Такая волноводная форма теории возбуждения волноводов первоначально разрабатывалась многими авторами [2–6] для конкретных видов возбудителей (точечных источников, диполей, линейных токов и др.). Общие уравнения для коэффициентов

возбуждения собственных волн произвольными источниками были получены в [7, 8] отдельно для ТЕ, ТМ, ТЕМ-волн гладких регулярных волноводов с односвязным и многосвязным сечением. В [9] теория возбуждения гладких волноводов была построена через определение функций источников, которые также представлялись рядами по собственным волнам, взятым на частоте возбуждения. Для частного случая возбуждения ТМ-волн в замедляющих системах в [10] было показано, что в области, занятой источниками, полное возбуждаемое поле помимо ряда по собственным волнам включает слагаемое, пропорциональное продольному току. В [11–13] дана наиболее простая компактная волноводная форма теории возбуждения, учитывающая потери и поперечную неоднородность заполнения волновода, основанная на использовании ортогональности собственных волн по сечению при разложении возбуждаемого поля по собственным волнам, взятым на частоте возбуждения, и выделении слагаемого, обусловленного продольным током. Во всех указанных работах в ряды по собственным волнам, электромагнитное поле которых является вихревым, разлагается полное возбуждаемое поле, имеющее как вихревую, так и потенциальную части. Поэтому полученные ряды сходятся медленно и практически непригодны для решения задач, где необходимо знание полного возбуждаемого поля, например в задачах электроники СВЧ. Существенно улучшить сходимость представляющих поле рядов и провести анализ его физических свойств удастся при выделении квазистатического поля, не разлагаемого в ряды [14]. В общем случае возможно выделение различных неразлагаемых частей поля для решения задач электроники СВЧ или других систем, где необходимо знание полного возбуждаемого поля, а не только отдельных собственных волн [15].

Другая, резонаторная форма теории возбуждения использует разложение поля в ряды по собственным волнам с фиксированным волновым числом и разными частотами; при этом, как и в теории возбуждения резонаторов [12, 16], сразу выделяется квазистатическое электрическое поле. Эта форма теории возбуждения применялась в [17] и сформулирована в наиболее общем виде в [14, 18]. Вычисление определяющих амплитуды собственных волн интегралов с помощью теории вычетов приводит точно к волноводной форме теории возбуждения с выделенным квазистатическим полем (Приложение).

Помимо систематического анализа и изложения известных результатов теории возбуждения волноводов в статье приведены также некоторые неопубликованные ранее результаты – вывод соотношения между резонаторной и волноводной нормами собственных волн за пределами волноводов и волн с учетом потерь, данный в [19] и обобщающий соотношение между запасенной энергией и ее потоком для распространяющихся волн; доказательство эквивалентности волноводной и резонаторной форм теории возбуждения, данное в [18]; основанный на теории цепочек четырехполосников вывод уравнения возбуждения псевдопериодических волноводов, представляющих новый класс волноводных систем [20–23].

Обоснование полноты системы собственных волн и другие математические вопросы теории возбуждения исследовались в работах [9] и при последующем развитии идей в этом направлении в работах [24–27]. Эти вопросы здесь не рассматриваются.

Изложенная в данной статье теория возбуждения волноводов использует некоторые общие соотношения электродинамики и свойства собственных волн волноводов, которые приведены в разделах 1, 2 статьи.

1. Исходные уравнения и двухчастотная лемма Лоренца

Электромагнитное поле, возбуждаемое на частоте ω заданными сторонними токами и зарядами, определяется уравнениями Максвелла

$$\operatorname{rot} \vec{H} = -i\omega\epsilon\vec{E} + \vec{j}, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = i\omega\mu\vec{H}, \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \epsilon\vec{E} = \rho, \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \mu\vec{H} = 0, \quad (4)$$

где \vec{E} и \vec{H} – комплексные амплитуды напряженности электрического и магнитного полей; \vec{j} , ρ – комплексные амплитуды плотности тока и заряда; ϵ , μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости, взятые на частоте возбуждения. Временной множитель $e^{-i\omega t}$ везде опущен. Если не рассматривать процессы эмиссии и оседания электронов на поверхности, то величины \vec{j} и ρ удовлетворяют отдельному уравнению непрерывности

$$-i\omega\rho + \operatorname{div}\vec{j} = 0. \quad (5)$$

В теории возбуждения волноводов полезны полученные из уравнений Максвелла квадратичные формы [28] и вытекающая из них двухчастотная лемма Лоренца и ее следствия, выведенные в [8, 19] и приведенные в [29]. Рассмотрим электромагнитные поля, возбуждаемые на частотах ω_1 , ω_2 токами с плотностью \vec{j}_1 , \vec{j}_2 . Они удовлетворяют уравнениям Максвелла (1)–(4) на этих частотах при соответствующих значениях ϵ_1 , ϵ_2 , μ_1 , μ_2 , учитывающих дисперсию диэлектрической и магнитной проницаемости. Умножим скалярно на \vec{H} уравнение (2), взятое на частоте ω_1 , и на \vec{E} уравнение (1), взятое на частоте ω_2 , и вычтем их друг из друга. Тогда, применяя формулу векторного анализа

$$\vec{H} \operatorname{rot} \vec{E} - \vec{E} \operatorname{rot} \vec{H} = \operatorname{div}[\vec{E}\vec{H}], \quad (6)$$

получим

$$\operatorname{div}[\vec{E}_1\vec{H}_2] = i\omega_1\mu_1\vec{H}_1\vec{H}_2 + i\omega_2\epsilon_2\vec{E}_1\vec{E}_2 - \vec{j}_2\vec{E}_1. \quad (7)$$

Аналогично из другой пары уравнений Максвелла можно получить

$$\operatorname{div}[\vec{E}_2\vec{H}_1] = i\omega_2\mu_2\vec{H}_1\vec{H}_2 + i\omega_1\epsilon_1\vec{E}_1\vec{E}_2 - \vec{j}_1\vec{E}_2. \quad (8)$$

Складывая и вычитая формулы (7) и (8), придем к дифференциальной форме двухчастотной леммы Лоренца. Интегрируя полученное соотношение по объему V , ограниченному поверхностью S , и учитывая теорему Гаусса–Остроградского

$$\int_V \operatorname{div}\vec{A}dV = \oint_S \vec{A}d\vec{S}, \quad (9)$$

получим интегральную формулу двухчастотной леммы Лоренца

$$\begin{aligned} \oint_S \{[\vec{E}_1\vec{H}_2] \pm [\vec{E}_2\vec{H}_1]\}d\vec{S} = & i \int_V (\omega_2\epsilon_2 \pm \omega_1\epsilon_1)\vec{E}_1\vec{E}_2dV - \\ & - i \int_V (\omega_1\mu_1 \pm \omega_2\mu_2)\vec{H}_1\vec{H}_2dV - \int_V (\vec{j}_2\vec{E}_1 \pm \vec{j}_1\vec{E}_2)dV. \end{aligned} \quad (10)$$

2. Свойства собственных волн

Рассматриваем закрытые волноводы с ограниченным поперечным сечением S . Приведем некоторые свойства их собственных волн, полезные в теории возбуждения.

Однородные волноводы характеризуются независимостью всех параметров от продольной координаты z , но возможно изменение диэлектрической и магнитной проницаемости в сечении волновода: $S = \text{const}$, $\varepsilon = \varepsilon(x, y)$, $\mu = \mu(x, y)$ (рис. 1). Поля прямой (+s) и встречной (-s) собственных волн имеют вид

$$\vec{E}_{\pm s}(x, y, z) = \vec{E}_{\pm s}^p(x, y) \cdot e^{ih_{\pm s}z}, \quad \vec{H}_{\pm s}(x, y, z) = \vec{H}_{\pm s}^p(x, y) \cdot e^{ih_{\pm s}z}, \quad (11)$$

причем в изотропных волноводах $h_{-s} = -h_s$. Дисперсия волн, то есть зависимость $h_s(\omega)$, определяется характером заполнения волновода и граничными условиями. Для гладких металлических волноводов

$$h_s = \sqrt{k^2 - k_s^2}, \quad (12)$$

где $k = \omega/c$ – волновое число в свободном пространстве, $k_s = \omega_s/c$ – критическое волновое число s -й волны (рис. 2).

Периодические волноводы характеризуются периодической зависимостью параметров от продольной координаты z : $S(z + L) = S(z)$, $\varepsilon(x, y, z + L) = \varepsilon(x, y, z)$, $\mu = \mu(x, y, z + L) = \mu(x, y, z)$ (рис. 3). Для них справедлива теорема Флоке, согласно которой при сдвиге координаты z на период L поля собственных волн умножаются на постоянную величину, которую записывают в виде $e^{\pm ih_s L}$:

$$\begin{aligned} \vec{E}_{\pm s}(x, y, z + L) &= \vec{E}_{\pm s}(x, y, z) \cdot e^{\pm ih_s L}, \\ \vec{H}_{\pm s}(x, y, z + L) &= \vec{H}_{\pm s}(x, y, z) \cdot e^{\pm ih_s L}. \end{aligned} \quad (13)$$

Из теоремы Флоке следует

$$\vec{E}_{\pm s}(x, y, z) = \vec{E}_{\pm s}^p(x, y, z) \cdot e^{\pm ih_s z}, \quad \vec{H}_{\pm s}(x, y, z) = \vec{H}_{\pm s}^p(x, y, z) \cdot e^{\pm ih_s z}, \quad (14)$$

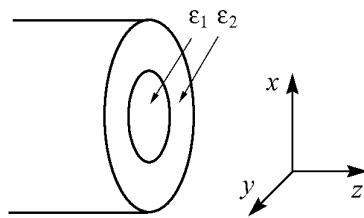


Рис. 1. Гладкий волновод с поперечно-неоднородным заполнением

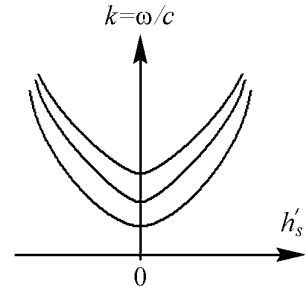


Рис. 2. Дисперсионные характеристики собственных волн гладкого волновода

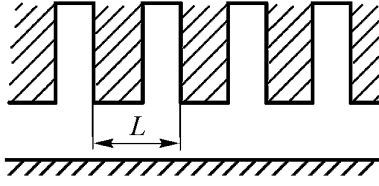


Рис. 3. Схематическое изображение периодического волновода с периодом L

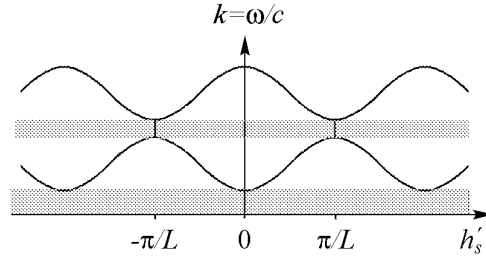


Рис. 4. Диаграмма Бриллюэна для периодического волновода

где $\vec{E}_{\pm s}^p$, $\vec{H}_{\pm s}^p$ – периодические функции z с периодом L . Разлагая эти функции в ряды Фурье по z , получим представление поля в виде суммы пространственных гармоник. Для электрического поля

$$\vec{E}_{\pm s}(x, y, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \vec{E}_{\pm s, m}^p(x, y) \cdot e^{\pm i h_{s, m} z}, \quad (15)$$

где $\vec{E}_{\pm s, m}^p(x, y) = (1/L) \int_0^L \vec{E}_{\pm s}(x, y, z) \cdot e^{\mp i h_{s, m} z} dz$, $h_{s, m} = h_s + (2\pi m)/L$ – амплитуда и волновое число m -й пространственной гармоники $\pm s$ -й волны. Аналогично записывается разложение для магнитного поля. В периодическом волноводе имеется ряд чередующихся полос пропускания и непропускания по частоте; характерный вид дисперсии в них представлен на рис. 4 в виде диаграммы Бриллюэна. В полосах пропускания без учета потерь в волноводе поля прямой и встречной волны связаны соотношением

$$\vec{E}_{-s}(x, y, z) = \pm \vec{E}_s^*(x, y, z), \quad \vec{H}_{-s}(x, y, z) = \mp \vec{H}_s^*(x, y, z). \quad (16)$$

Применим лемму Лоренца (10) при $\vec{j}_1 = \vec{j}_2 = 0$ к s -й и r -й собственным волнам периодического волновода на частотах ω_s , ω_r , рассматривая объем одного периода $V = V_L$. Этот объем ограничен двумя одинаковыми торцевыми поверхностями $S(z)$, $S(z + L)$ и боковой поверхностью S_6 , лежащей на достаточной глубине внутри металла, так что поля на ней можно считать равными нулю. Тогда в левой части (10) интеграл по S_6 равен нулю, а интегралы по $S(z)$ и $S(z + L)$ отличаются, согласно (13), множителями $e^{i(h_s + h_r)L}$. В результате получаем следующее соотношение для собственных волн периодического волновода

$$\begin{aligned} & (e^{i(h_s + h_r)L} - 1) \int_{S(z)} \{[\vec{E}_s \vec{H}_r] - [\vec{E}_r \vec{H}_s]\} d\vec{S} = \\ & = i \int_{V_L} (\omega_r \epsilon_r \pm \omega_s \epsilon_s) \vec{E}_s \vec{E}_r dV + \int_{V_L} (\omega_r \mu_r \pm \omega_s \mu_s) \vec{H}_s \vec{H}_r dV. \end{aligned} \quad (17)$$

Условия ортогональности собственных волн по сечению волновода получаются, если рассматривать эти волны на одной частоте $\omega_r = \omega_s = \omega$ и, соответственно,

$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_s(\omega) = \varepsilon(\omega)$, $\mu_r = \mu_s = \mu$ (рис. 5, *a*). Тогда правая часть (17) при нижнем знаке обращается в ноль, и находим

$$\int_S \{[\vec{E}_s \vec{H}_r] - [\vec{E}_r \vec{H}_s]\} d\vec{S} = \begin{cases} 0 & \text{при } h_s + h_r \neq \frac{2\pi n}{L}, \\ N_s & \text{при } h_s + h_r = \frac{2\pi n}{L}. \end{cases} \quad (18)$$

В полосе пропускания периодических волноводов без учета потерь норма s -й волны N_s связана с потоком энергии через поперечное сечение волновода

$$P_{\pm s} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_S [\vec{E}_{\pm s} \vec{H}_{\pm s}^*] d\vec{S} \quad (19)$$

соотношением

$$N_s = \int_S \{[\vec{E}_s \vec{H}_{-s}] - [\vec{E}_{-s} \vec{H}_s]\} d\vec{S} = \mp 4P_s = \pm 4P_{-s}, \quad (20)$$

получающимся при учете (16).

Условия ортогональности по объему одного периода волновода получаются для собственных волн при $h_s + h_r = (2\pi n)/L$ (рис. 5, *б*) на, вообще говоря, различных собственных частотах колебаний, берущихся на частоте возбуждения ω . Тогда левая часть (17) обращается в ноль, и получаем при нижнем знаке правой части

$$\int_{V_L} (\varepsilon \vec{E}_s \vec{E}_r - \mu \vec{H}_s \vec{H}_r) dV = \begin{cases} 0 & \text{при } \omega_s \neq \omega_r, \text{ то есть при } r \neq -s, \\ M_s & \text{при } \omega_s = \omega_r, \text{ то есть при } r = -s. \end{cases} \quad (21)$$

В полосе пропускания периодических волноводов без учета потерь объемная норма s -й волны связана с запасенной на одном периоде волновода энергией

$$W_s = \frac{1}{4} \int_{V_L} (\varepsilon \vec{E}_s \vec{E}_s^* + \mu \vec{H}_s \vec{H}_s^*) dV \quad (22)$$

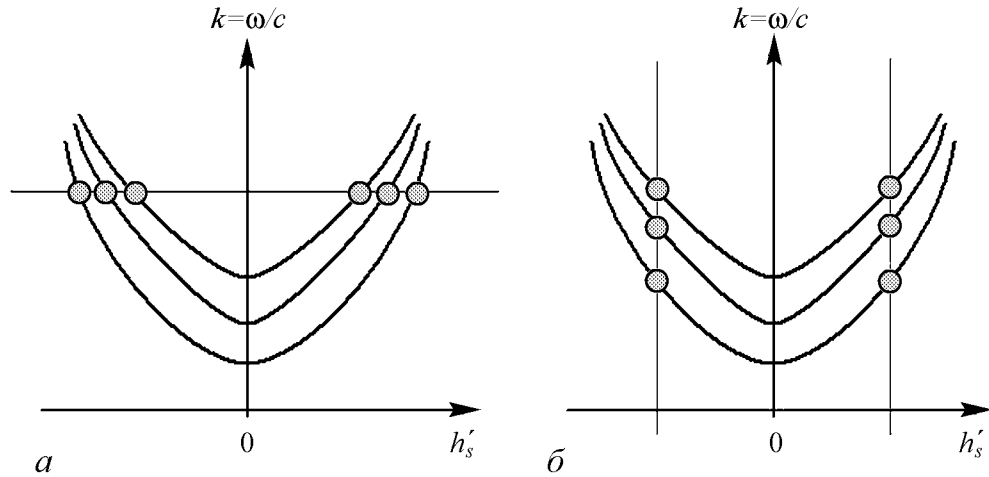


Рис. 5. К ортогональности собственных волн: *a* – по сечению (при заданной частоте); *б* – по объему волновода (при заданном волновом числе)

соотношением

$$M_s = \int_{V_L} (\epsilon \vec{E}_s \vec{E}_{-s} - \mu \vec{H}_s \vec{H}_{-s}) dV = \pm 4W_s, \quad (23)$$

получающимся при учете (16). Если $h_s + h_r = 2\pi n/L$, то при выборе верхнего знака в (17) получим соотношение

$$\int_{V_L} (\epsilon \vec{E}_s \vec{E}_r - \mu \vec{H}_s \vec{H}_r) dV = 0. \quad (24)$$

В полосе пропускания волновода без потерь при $r = -s$ с учетом (16) оно устанавливает равенство электрической и магнитной энергии, запасенной на одном периоде волновода

$$W_{sE} = \frac{1}{4} \int_{V_L} \epsilon \vec{E}_s \vec{E}_s^* dV, \quad W_{sH} = \frac{1}{4} \int_{V_L} \mu \vec{H}_s \vec{H}_s^* dV, \quad W_{sH} = W_{sE}. \quad (25)$$

Связь между нормами N_s и M_s , а следовательно, между потоком энергии и запасенной энергией, можно найти, если положить в (17) $r = -s$ и считать, что частоты ω_r и ω_s мало отличаются друг от друга, $\omega_{-s} = \omega_s + \Delta\omega$. Тогда

$$h_r = h_r(\omega_r) = h_{-s}(\omega_s + \Delta\omega) \approx h_{-s}(\omega_s) + \left. \frac{dh_{-s}}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_s} \cdot \Delta\omega = -h_s(\omega_s) - \left. \frac{dh_s}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_s} \cdot \Delta\omega,$$

$$\omega_r \epsilon_r - \omega_s \epsilon_s \approx \left. \frac{d\omega \epsilon}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_s} \cdot \Delta\omega, \quad \omega_r \mu_r - \omega_s \mu_s \approx \left. \frac{d\omega \mu}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_s} \cdot \Delta\omega$$

и при $\Delta\omega \rightarrow 0$ получаем

$$\left. \frac{dh_s}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_s} \cdot N_s L = -M_s. \quad (26)$$

В этом соотношении объемная норма

$$M_s = \int_{V_L} \left\{ \left. \frac{d(\omega \epsilon)}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_s} \cdot \vec{E}_s \vec{E}_{-s} - \left. \frac{d(\omega \mu)}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_s} \cdot \vec{H}_s \vec{H}_{-s} \right\} dV \quad (27)$$

учитывает зависимость ϵ и μ от частоты собственных колебаний и поэтому отличается от объемной нормы (23), использованной в условиях ортогональности. Там ϵ и μ брались на заданной частоте возбуждения ω , то есть рассматривался некоторый вспомогательный волновод, по собственным волнам которого и разлагается в дальнейшем возбуждаемое поле. Если ϵ и μ не зависят от частоты, то (27) совпадает с (23).

Полученное в [19] соотношение (26) является обобщением на волноводы с потерями и заперделные волноводы известного для распространяющихся волн [30] соотношения между потоком энергии и запасенной энергией

$$P_s = u_s \frac{W_s}{L}, \quad (28)$$

где $u_s = d\omega/dh$ – групповая скорость.

Псевдопериодические волноводы и среды являются особым классом электродинамических структур [20–23], где вдоль структуры изменяются как шаг расположения, так и параметры входящих в нее элементов (щелей в гребенчатой структуре, диафрагм в круглом волноводе, резонаторов в цепочках связанных резонаторов, диэлектрической проницаемости слоев среды и др., рис. 6). Согласованным выбором

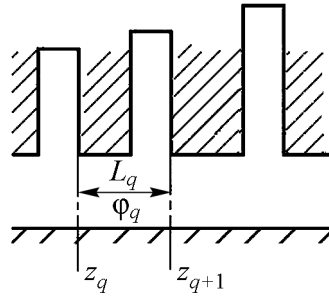


Рис. 6. Схематическое изображение псевдопериодического волновода; L_q , φ_q – величина q -го шага и сдвига фазы на нем

законов изменения шага и параметров элементов можно получить новые свойства волн по сравнению с периодическими структурами – пространственную селекцию, то есть подавление всех пространственных гармоник волн, кроме рабочей (что аналогично подавлению побочных главных максимумов излучения в неэквидистантных антенных решетках), и частотную селекцию, то есть изменение расположения и ширины частотных полос пропускания структуры (что аналогично свойствам неоднородных СВЧ-фильтров). Известным примером псевдопериодической системы может служить плоская логарифмическая спираль, возбуждаемая бегущей вдоль витков волной тока. Длина витка в ней, так же как и набег фазы на шаге, прямопропорциональны изменяющемуся шагу намотки спирали, так что фазовая скорость основной пространственной гармоники радиальной волны постоянна вдоль радиуса, а другие пространственные гармоники подавлены. Основанные на этом свойстве электродинамические системы используются как логопериодические сверхширокополосные антенны. В работе [31] найден другой класс плоских спиральных систем, в которых существует только одна из высших пространственных гармоник. Такие «синхронные» спирали существенно отличаются по форме и электродинамическим свойствам от логарифмической спирали.

Аналогом псевдопериодических волноводных систем являются неэквидистантные антенные решетки с неравномерным распределением шага и фаз излучателей по решетке, позволяющим устранить побочные главные максимумы излучения. Однако, в отличие от антенн, распределение фаз по элементам псевдопериодического волновода не задано внешними источниками, а определяется формой и размерами его элементов, которые должны выбираться из условий пространственной и частотной селекции волн. Совместное выполнение условий по селекции пространственных гармоник и формированию необходимой амплитудно-частотной характеристики фильтра открывает возможность создания новых типов широкополосных одноволновых замедляющих систем.

В общем случае можно рассматривать целый класс псевдопериодических систем разных типов – по существу, каждая периодическая система может быть преобразована в псевдопериодическую, отличающуюся сочетанием указанных выше свойств.

В псевдопериодическом волноводе вместо теоремы Флоке (13) запишем следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \vec{E}_{\pm s}(x, y, z_q + L_q) &= \vec{E}_{\pm s}(x, y, z_q) \cdot e^{\pm i\varphi_{s,q}}, \\ \vec{H}_{\pm s}(x, y, z_q + L_q) &= \vec{H}_{\pm s}(x, y, z_q) \cdot e^{\pm i\varphi_{s,q}}, \end{aligned} \quad (29)$$

где z_q и L_q – начальная координата и величина q -го шага волновода (см. рис. 6), а сдвиг фазы поля на q -м шаге $\varphi_{s,q} = h_{s,q}L_q$ удовлетворяет условию

$$\varphi_{s,q} + 2\pi m = h_{s,m,q}L_q \quad \text{при} \quad h_{s,m,q} \equiv h_{s,m} \quad (30)$$

для одного выбранного значения m из $m = 0, \pm 1, \dots$. Для этого значения m волновое число $h_{s,m} = h'_{s,m} + ih''_{s,m}$ и фазовая скорость $v_{s,m} = \omega/h'_{s,m}$ не меняются вдоль волновода. Для других m волновые числа меняются на каждом шаге и соответствующие им пространственные гармоники разрушаются, происходит селекция пространственных гармоник, их спектр становится непрерывным с преобладанием m -й гармоники. Поэтому вместо ряда Фурье (15) следует применять преобразование Фурье для комплексной амплитуды поля на заданной частоте ω

$$\vec{E}_s(x, y, z, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{E}_s(x, y, h, \omega) \cdot e^{+ihz} dh, \quad (31)$$

$$\vec{E}_s(x, y, h, \omega) = \frac{1}{l} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{E}_s(x, y, z, \omega) \cdot e^{-ihz} dz, \quad (32)$$

и аналогично для $\vec{H}_s(x, y, h, \omega)$. Функция $\vec{E}_s(x, y, h, \omega)$ отличается от пространственной спектральной плотности лишь делением на полную длину l выбранного отрезка волновода из Q шагов

$$l = \sum_{q=1}^Q L_q.$$

Она может быть представлена как амплитудная поверхность дисперсии над плоскостью переменных h, ω . Для периодического волновода эта поверхность вырождается в систему гребней, проекции которых на плоскость h, ω являются диаграммой Бриллюэна. Пример такой поверхности, рассчитанной для компоненты поля E_z в периодическом и псевдопериодическом волноводе типа петляющей длинной линии [32], приведен на рис. 7.

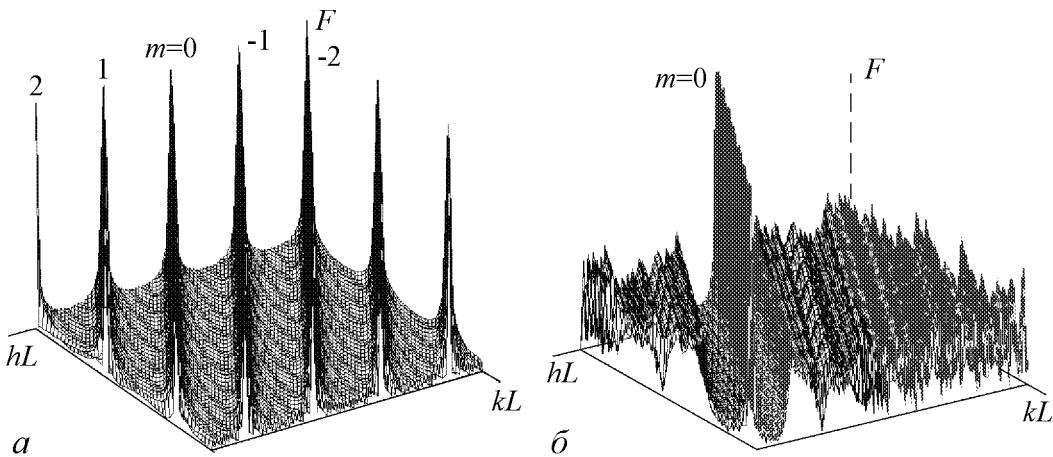


Рис. 7. Амплитудные поверхности дисперсии: a – для периодического волновода; b – для псевдопериодического волновода [32]

3. Волноводная форма теории возбуждения

Рассматриваем разложение возбуждаемого поля по собственным волнам одной частоты.

Пусть возбуждающие токи и заряды сосредоточены на отрезке волновода $z_1 < z < z_2$. Рассмотрим сначала поле, возбуждаемое вне отрезка, занятого токами. Справа от токов должны быть прямые волны, переносящие энергию направо, слева – встречные волны, переносящие энергию налево. Поэтому

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \sum_s C_s \vec{E}_s, & \vec{H} &= \sum_s C_s \vec{H}_s & \text{при } z > z_2, \\ \vec{E} &= \sum_s C_{-s} \vec{E}_{-s}, & \vec{H} &= \sum_s C_{-s} \vec{H}_{-s} & \text{при } z < z_1, \end{aligned} \quad (33)$$

причем C_s и C_{-s} постоянны. Применим лемму Лоренца (10) при нижнем знаке к полям \vec{E} , \vec{H} и \vec{E}_s , \vec{H}_s (или \vec{E}_{-s} , \vec{H}_{-s}), взятым на частоте возбуждения ω , в объеме волновода V , заключенном между сечениями z_1 и z_2 . Тогда, учитывая, что $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, $\epsilon_1 = \epsilon_2$, $\mu_1 = \mu_2$, а интеграл по боковой поверхности равен нулю, и применяя условие ортогональности (18), найдем

$$C_{\pm s} = \frac{1}{N_s} \int_V \vec{j} \vec{E}_{\mp s} dV. \quad (34)$$

Рассмотрим теперь электромагнитное поле в объеме, занятом током, следуя [12, 33]. Если мысленно удалить токи в бесконечно тонком слое ($z - \delta, z + \delta$) в окрестности сечения z при малом δ , то в этом слое справедливы формулы (33), (34), если для прямых волн под V подразумевать объем слева от z , а для встречных – справа от z . Однако поле такой «препарированной» системы отличается от поля реальной системы, так как при вырезании слоя возникает плоский конденсатор, на плоскостях которого имеется некоторая поверхностная плотность заряда σ . Она связана с продольной компонентой плотности тока уравнением непрерывности (5), дающим

$$\sigma = \frac{1}{i\omega} j_z,$$

что приводит к различию полей реальной и «препарированной» системы на величину поля плоского конденсатора

$$E_z = \frac{1}{i\omega\epsilon} j_z. \quad (35)$$

Учитывая это различие, в итоге получаем следующее выражение для полного возбуждаемого поля в любом сечении волновода:

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \sum_s (C_s \vec{E}_s + C_{-s} \vec{E}_{-s}) + \frac{1}{i\omega\epsilon} j_z \vec{z}_0, \\ \vec{H} &= \sum_s (C_s \vec{H}_s + C_{-s} \vec{H}_{-s}). \end{aligned} \quad (36)$$

Для коэффициентов возбуждения $C_{\pm s}$ нетрудно получить из (34) дифференциальные уравнения

$$\frac{dC_{\pm s}}{dz} = \pm \frac{1}{N_s} \int_S \vec{j} \vec{E}_{\mp s} dV, \quad (37)$$

если учесть, что в области, занятой током, объем V слева и справа от сечения z изменяется при изменении z . Уравнения (36), (37) можно получить более строго методом вариации постоянной [12, 33].

4. Выделение квазистатического поля и улучшение сходимости рядов

Ряды (36) в общем случае при произвольном распределении стороннего тока в волноводе сходятся весьма медленно, что приводит к значительным трудностям в тех задачах, где требуется знание полного возбуждаемого поля, например в задачах электроники СВЧ. Если выделять из полного возбуждаемого поля \vec{E}, \vec{H} неразлагаемую квазистатическую часть поля, а в ряды по собственным волнам разлагать только вихревую часть поля, то можно существенно улучшить сходимость рядов и ограничиться небольшим количеством их членов.

Покажем это, следуя [14, 33]. Для выделения квазистатической части поля введем формально переменную частоту $\tilde{\omega}$ и устремим эту частоту к нулю, сохраняя распределение плотности стороннего тока \vec{j} , а также ϵ и μ такими же, как и на частоте возбуждения ω . Тогда из уравнения непрерывности получим, что плотность пространственного заряда должна изменяться вместе с частотой $\tilde{\omega}$ следующим образом:

$$\rho(x, y, z, \tilde{\omega}) = \frac{\text{div } \vec{j}(x, y, z)}{i\tilde{\omega}} = \frac{\omega}{\tilde{\omega}} \tilde{\rho}(x, y, z, \tilde{\omega}). \quad (38)$$

Обозначая все переменные величины на частоте $\tilde{\omega}$ знаком « \sim », например $\tilde{\rho} = \rho(x, y, z, \tilde{\omega})$, запишем уравнения поля на этой частоте

$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{H} &= -i\tilde{\omega}\epsilon\vec{E} + \vec{j}, & \text{div } \mu\vec{H} &= 0, \\ \text{rot } \vec{E} &= i\tilde{\omega}\mu\vec{H}, & \text{div } \epsilon\vec{E} &= \tilde{\rho}. \end{aligned} \quad (39)$$

При $\tilde{\omega} \rightarrow 0$ поле становится статическим, однако его величина неограниченно возрастает вместе с $\tilde{\rho}$ как $1/\tilde{\omega}$. Поэтому, совершая в уравнениях (39) предельный переход $\tilde{\omega} \rightarrow 0$, с учетом соотношения (38) получим уравнения квазистатики для полей

$$\hat{E} = \lim_{\tilde{\omega} \rightarrow 0} \frac{\tilde{\omega}}{\omega} \vec{E}, \quad \hat{H} = \lim_{\tilde{\omega} \rightarrow 0} \vec{H}$$

на частоте ω

$$\begin{aligned} \text{rot } \hat{H} &= -i\omega\epsilon\hat{E} + \vec{j}, & \text{div } \mu\hat{H} &= 0, \\ \text{rot } \hat{E} &= 0, & \text{div } \epsilon\hat{E} &= \rho. \end{aligned} \quad (40)$$

Записывая теперь выражения (36) на частоте $\tilde{\omega}$, умножая после этого (35) на $\tilde{\omega}/\omega$ и совершая такой же предельный переход $\tilde{\omega} \rightarrow 0$, найдем разложение квазистатиче-

ского поля $\hat{\vec{E}}, \hat{\vec{H}}$ по собственным волнам периодической системы

$$\hat{\vec{E}} = \sum_s \lim_{\tilde{\omega} \rightarrow 0} \frac{\tilde{\omega}}{\omega} (\tilde{C}_s \tilde{\vec{E}}_s + \tilde{C}_{-s} \tilde{\vec{E}}_{-s}) + \frac{1}{i\omega\epsilon} j_z \vec{z}_0, \quad (41)$$

$$\hat{\vec{H}} = \sum_s \lim_{\tilde{\omega} \rightarrow 0} (\tilde{C}_s \tilde{\vec{H}}_s + \tilde{C}_{-s} \tilde{\vec{H}}_{-s}). \quad (42)$$

Вычитая эти соотношения из (36), получим следующие выражения для полного поля, возбуждаемого заданным током в периодической системе

$$\vec{E} = \sum_{s=1}^{\infty} [(C_s \vec{E}_s + C_{-s} \vec{E}_{-s}) - \lim_{\tilde{\omega} \rightarrow 0} \frac{\tilde{\omega}}{\omega} (\tilde{C}_s \tilde{\vec{E}}_s + \tilde{C}_{-s} \tilde{\vec{E}}_{-s})] + \hat{\vec{E}}, \quad (43)$$

$$\vec{H} = \sum_{s=1}^{\infty} [(C_s \vec{H}_s + C_{-s} \vec{H}_{-s}) - \lim_{\tilde{\omega} \rightarrow 0} \frac{\tilde{\omega}}{\omega} (\tilde{C}_s \tilde{\vec{H}}_s + \tilde{C}_{-s} \tilde{\vec{H}}_{-s})] + \hat{\vec{H}}. \quad (44)$$

Члены полученных рядов представляют собой разности соответствующих членов рядов (36), (41), (42), взятых на частотах ω и $\tilde{\omega} \rightarrow 0$, а структура поля собственных волн высших порядков мало отличается на этих частотах. Поэтому разностные члены полученных рядов (43), (44) убывают с ростом s быстрее, чем члены исходных рядов.

Для исследования сходимости рядов, входящих в выражения поля (43), (44), рассмотрим поведение собственных волн системы в нуле частоты и при больших номерах s . Поля этих волн при $\tilde{\omega} = 0$ удовлетворяют уравнениям (39) с нулевыми правыми частями, то есть однородным уравнениям статики. Однако и в этом случае они имеют вид (41), причем волновые числа $h_s|_{\tilde{\omega}=0} = h_s^0$ возрастают по абсолютной величине с увеличением номера s . Например, для гладких волноводов

$$h_s^0 = ik_s = i\sqrt{\epsilon\mu}\omega_s,$$

где k_s, ω_s – критическое волновое число и критическая частота s -й волны, возрастающие с ростом s . Введем для каждой волны свой параметр

$$\delta_s = \frac{\sqrt{\epsilon\mu}\omega}{ih_s^0} = \frac{k}{ih_s^0}. \quad (45)$$

Этот параметр убывает с уменьшением частоты и возрастанием номера волны s . Поэтому поля этих волн можно представить в виде разложения по степеням δ_s . Неважно, чем обусловлена малость δ_s – малостью частоты ω или большим номером s , в обоих случаях разложение будет одинаковым. Для записи разложения укажем некоторые свойства собственных волн. Запишем уравнения поля, деля их на h_s^0 ,

$$\frac{\text{rot } \vec{H}_s}{ih_s^0} = -i\delta_s \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \vec{E}_s, \quad \frac{\text{rot } \vec{E}_s}{ih_s^0} = -i\delta_s \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \vec{H}_s. \quad (46)$$

Из уравнений видно, что при перемене знака частоты (то есть δ_s) возможны два варианта поведения полей.

$$1) \vec{E}_{\pm s}(-\omega) = \vec{E}_{\pm s}(\omega), \quad \vec{H}_{\pm s}(-\omega) = -\vec{H}_{\pm s}(\omega), \quad (47)$$

$$2) \vec{E}_{\pm s}(-\omega) = -\vec{E}_{\pm s}(\omega), \quad \vec{H}_{\pm s}(-\omega) = \vec{H}_{\pm s}(\omega). \quad (48)$$

Как известно из теории гладких волноводов (см. например, [12]), поле электрических волн удовлетворяет соотношениям (47), а поле магнитных волн – соотношениям (21). Соответственно и в периодических системах можно разделить собственные волны на два типа – квазиэлектрические (QE), удовлетворяющие соотношениям (47), и квазимагнитные (QH), удовлетворяющие соотношениям (48). Эти типы волн, вообще говоря, могут иметь все компоненты электрического и магнитного полей, но характер их поведения на малой частоте существенно различный [14].

Ограничимся исследованием разложений для волн типа E в гладком волноводе [33]. Учитывая (47), можем написать

$$\begin{aligned}\vec{E}_s &= \vec{E}_s^{(0)} + \vec{E}_s^{(2)}\delta_s^2 + \vec{E}_s^{(4)}\delta_s^4 + \dots, \\ \vec{H}_s &= \vec{H}_s^{(1)}\delta_s + \vec{H}_s^{(3)}\delta_s^3 + \dots,\end{aligned}\tag{49}$$

где векторные коэффициенты $\vec{E}_s^{(n)}, \vec{H}_s^{(n)}$ от частоты не зависят. Используя эти разложения, при больших значениях s получим

$$C_s \vec{E}_s = \frac{1}{\delta_s} (\vec{F}_s^{(0)} + \vec{F}_s^{(2)}\delta_s^2 + \dots)$$

и аналогично

$$\tilde{C}_s \tilde{\vec{E}}_s = \frac{1}{\tilde{\delta}_s} (\vec{F}_s^{(0)} + \vec{F}_s^{(2)}\tilde{\delta}_s^2 + \dots),$$

где $\vec{F}_s^{(0)}, \vec{F}_s^{(2)}$ также не зависят от частоты. Следовательно,

$$C_s \vec{E}_s - \lim_{\tilde{\omega} \rightarrow 0} \frac{\tilde{\omega}}{\omega} \tilde{C}_s \tilde{\vec{E}}_s = \vec{F}_s^{(2)}\delta_s^2 + \dots,$$

то есть члены ряда (43), соответствующие волнам типа E , по порядку величины равны членам исходного ряда (36), умноженным на δ_s^2 , то есть убывают с ростом номера s значительно быстрее. Аналогичный результат можно получить для слагаемых, соответствующих волнам типа H , и для магнитного поля (44). Исследование периодических волноводов [14] показывает, что для них ряды (43) и (44) сходятся также быстрее исходных рядов (36).

Рассмотрим подробнее смысл квазистатических полей $\hat{\vec{E}}$ и $\hat{\vec{H}}$. Прежде всего, мы получили не совсем то, что в резонаторах, где было только квазистатическое электрическое поле, определяемое зарядами, а теперь мы имеем также магнитное поле $\hat{\vec{H}}$, которое определяется плотностью электронного тока \vec{j} и, кроме того, электрическим полем $\hat{\vec{E}}$, то есть током проводимости и током смещения. Чтобы понять, почему так получилось, нужно иметь в виду, что из общих уравнений электромагнитного поля можно вывести две различные системы уравнений квазистатического поля. Обычно пренебрегают токами смещения, но учитывают закон электромагнитной индукции

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \neq 0\tag{50}$$

и таким образом приходят к уравнениям низкочастотных электрических цепей, в которых токами смещения пренебрегают всюду, за исключением небольшой части

пространства внутри конденсаторов. В задачах, которые нас интересуют, пространство внутри волноводной системы на низких частотах можно рассматривать как конденсатор (или как электронную лампу) и токами смещения пренебрегать нельзя. Поэтому мы пришли к другим уравнениям квазистатики, которые вытекают из уравнений поля, если пренебречь в них электромагнитной индукцией, но сохранить токи смещения

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \neq 0. \quad (51)$$

На возможность такого вида уравнений квазистатики указывалось в [34]. Таким образом, квазистатическое электрическое поле определяется переменной плотностью заряда по тем же законам, что и в резонаторах. Квазистатическое магнитное поле, которое можно назвать «магнитным полем пространственного заряда», как правило, не имеет значения, поскольку магнитное взаимодействие электронов, движущихся со скоростью v , по порядку величины равно их электрическому взаимодействию, умноженному на v^2/c^2 , то есть при обычных нерелятивистских скоростях пренебрежимо мало (по крайней мере, в свободном пространстве).

5. Выделение произвольных неразлагаемых электрического и магнитного полей

Следуя [15], полное возбуждаемое поле представим в виде суммы полей \vec{E}, \vec{H} , разлагаемых по собственным волнам системы, и выделенных неразлагаемых полей \vec{E}_0 и \vec{H}_0 .

$$\vec{E} = \vec{\tilde{E}} + \vec{E}_0, \quad \vec{H} = \vec{\tilde{H}} + \vec{H}_0. \quad (52)$$

Значком « \sim » обозначено здесь, в отличие от п. 4, разлагаемое электромагнитное поле. Тогда из уравнений Максвелла (1), (2) получим

$$\text{rot } \vec{\tilde{H}} = -i\omega\epsilon\vec{\tilde{E}} + (\vec{j} - i\omega\epsilon\vec{E}_0 - \text{rot } \vec{H}_0), \quad (53)$$

$$\text{rot } \vec{\tilde{E}} = -i\omega\mu\vec{\tilde{H}} - (\text{rot } \vec{E}_0 - i\omega\mu\vec{H}_0). \quad (54)$$

Будем поля \vec{E}_0, \vec{H}_0 считать заданными. Тогда задачу о нахождении полей $\vec{\tilde{E}}, \vec{\tilde{H}}$ можно рассматривать как задачу возбуждения волновода эквивалентными электрическими и магнитными сторонними токами, которые определяются следующими соотношениями:

$$\vec{j}_e = \vec{j} - i\omega\epsilon\vec{E}_0 - \text{rot } \vec{H}_0, \quad (55)$$

$$\vec{j}_m = -i\omega\mu\vec{H}_0 + \text{rot } \vec{E}_0. \quad (56)$$

Таким образом, система уравнений (1), (2) принимает вид

$$\text{rot } \vec{\tilde{E}} = i\omega\mu\vec{\tilde{H}} - \vec{j}_m, \quad (57)$$

$$\text{rot } \vec{\tilde{H}} = -i\omega\epsilon\vec{\tilde{E}} - \vec{j}_e, \quad (58)$$

причем знак эквивалентного магнитного тока \vec{j}_m выбирается так, чтобы система уравнений (57), (58) обладала свойством «перестановочной инвариантности» [35].

С учетом магнитных токов решение уравнений (57), (58) можно записать в виде разложения по полям $\vec{E}_{\pm s}$, $\vec{H}_{\pm s}$ прямых и встречных собственных волн аналогично (35), (36):

$$\vec{E} = \sum_s (C_s \vec{E}_s + C_{-s} \vec{E}_{-s}) + \frac{1}{i\omega\epsilon} \vec{j}_e^l, \quad (59)$$

$$\vec{H} = \sum_s (C_s \vec{H}_s + C_{-s} \vec{H}_{-s}) + \frac{1}{i\omega\epsilon} \vec{j}_m^l, \quad (60)$$

где коэффициенты возбуждения $C_{\pm s}(z)$ определяются следующим образом:

$$\frac{dC_{\pm s}}{dz} = \pm \frac{1}{N_s} \int_S (\vec{E}_{\mp s} \vec{j}_e - \vec{H}_{\mp s} \vec{j}_m) dS. \quad (61)$$

Как видно из выражений (59), (60), поля \vec{E} , \vec{H} оказались разложенными по собственным волнам не полностью, что противоречит исходной постановке задачи. Чтобы устранить это противоречие, на эквивалентный электрический и магнитный токи необходимо наложить следующие условия:

$$\vec{j}_e^l = 0, \quad \text{то есть } \vec{j}^l - \text{rot}^l \vec{H}_0 - i\omega\epsilon \vec{E}_0^l = 0, \quad (62)$$

$$\vec{j}_m^l = 0, \quad \text{то есть } -i\omega\mu \vec{H}_0 + \text{rot}^l \vec{E}_0 = 0, \quad (63)$$

которым должны удовлетворять выделяемые поля. Из формулы (61) получаем уравнение для коэффициентов возбуждения

$$\begin{aligned} \frac{dC_{\pm s}}{dz} = \pm \frac{1}{N_s} \int_S (\vec{E}_{\mp s} (\vec{j}^t - \text{rot}^t \vec{H}_0 - i\omega\epsilon \vec{E}_0^t) - \\ - \vec{H}_{\mp s} (-i\omega\mu \vec{H}_0^t + \text{rot}^t \vec{E}_0)) dS. \end{aligned} \quad (64)$$

В итоге для полного возбуждаемого поля имеем выражения с выделенными полями \vec{E}_0 , \vec{H}_0 :

$$\vec{E} = \sum_s (C_s \vec{E}_s + C_{-s} \vec{E}_{-s}) + \vec{E}_0, \quad (65)$$

$$\vec{H} = \sum_s (C_s \vec{H}_s + C_{-s} \vec{H}_{-s}) + \vec{H}_0, \quad (66)$$

при коэффициентах возбуждения $C_{\pm s}$, определяемых уравнениями (64). Для такого разложения необходимо выполнение условий связи (62), (63), налагаемых на заданные поля. Отметим, что такой же результат получается, если не вводить эквивалентные токи, а использовать исходную систему уравнений Максвелла, применяя для нахождения $C_{\pm s}$ метод вариации постоянных; при этом получаются те же условия связи (62), (63).

Рассмотрим подробнее выражение для коэффициентов возбуждения. Используя векторное соотношение

$$\text{div} [\vec{A}\vec{B}] = \vec{B} \text{rot} \vec{A} - \vec{A} \text{rot} \vec{B},$$

а также условия связи (62), (63) и уравнения Максвелла для полей собственных волн, вместо выражения (64) получим

$$\frac{dC_{\pm s}}{dz} = \pm \frac{1}{N_s} \int_S (\vec{j} \vec{E}_{\mp s}) dS \pm \frac{1}{N_s} \int_S ([\vec{E}_{\pm s}^t \vec{H}_0^t] - [\vec{E}_0^t \vec{H}_{\mp s}^t]) dS. \quad (67)$$

Введем скалярные функции $u_{\pm s}(x, y, z)$ и $U_{\pm s}(z)$ соотношениями

$$\begin{aligned} [\vec{E}_{\mp s}^t \vec{H}_0^t] - [\vec{E}_0^t \vec{H}_{\mp s}^t] &= \pm N_s u_{\pm s}(x, y, z) \vec{z}_0, \\ U_{\pm s}(z) &= \int_S u_{\pm s}(x, y, z) ds. \end{aligned} \quad (68)$$

С учетом этих соотношений формулу (67) можно записать следующим образом:

$$\frac{dC_{\pm s}}{dz} = \frac{dU_{\pm s}(z)}{dz} \pm \frac{1}{N_s} \int_S \vec{j} \vec{E}_{\mp s} dS. \quad (69)$$

При этом получаем

$$\begin{aligned} C_{+s} &= U_{+s}(z) + \frac{1}{N_s} \int_{-\infty}^z \int_S \vec{j} \vec{E}_{-s} dz, \\ C_{-s} &= U_{-s}(z) - \frac{1}{N_s} \int_z^{+\infty} \int_S \vec{j} \vec{E}_s dz. \end{aligned} \quad (70)$$

Полученные выражения позволяют четко разделить вклад заданного тока $\vec{j}(x, y, z)$ и выделенных полей \vec{E}_0 , \vec{H}_0 в коэффициенты возбуждения. Видно, что выделенные поля лишь локально влияют на коэффициенты $C_{\pm s}$ через функцию $U_{\pm s}(z)$ в данном сечении, в то время как интегральный вклад по объему волновода, как обычно, определяется заданным током \vec{j} .

Из изложенного следует, что в системах, в которых осуществляется синхронизм электронов или волн тока с собственными волнами (например, в электровакуумных приборах СВЧ) пространственно резонансная часть поля не зависит от выделенных полей. В частности, несмотря на различие правых частей уравнений для коэффициентов $C_{\pm s}$, уравнение для их резонансной части $C_{\pm s} - U_{\pm s}$ остается неизменным во всех формах теории возбуждения, что не учитывалось в ряде работ.

Выделяемые поля можно задавать в явном виде или с помощью уравнений. Рассмотрим несколько вариантов теории возбуждения, при выполнении условий связи (62), (63). При $\vec{E}_0^t = 0$, $\vec{H}_0^t = 0$ из условий связи имеем $\vec{H}_0^l = 0$, $\vec{E}_0^l = \vec{j}^l / i\omega\epsilon$ и получаем исходную теорию возбуждения (36).

Рассмотрим возможность выделения квазистатических полей, удовлетворяющих уравнениям (40).

Если полагать $\vec{E}_0 = \hat{\vec{E}}$, то для удовлетворения условий связи (62), (63) в качестве выделяемого магнитного поля надо брать $\vec{H}_0 = \hat{\vec{H}}^t$. Тогда уравнение возбуждения можно записать в виде

$$\frac{dC_{\pm s}}{dz} = \pm \frac{i\omega\mu}{N_s} \int_S \hat{\vec{H}} \vec{H}_{\mp s} dS. \quad (71)$$

В этой форме теории процесс возбуждения может рассматриваться последовательно как возбуждение токов смещения $-i\omega\epsilon\hat{E}$ переменным зарядом, далее возбуждение магнитного квазистатического поля \hat{H} заданным током и током смещения, а затем возбуждение вихревых полей «магнитным током смещения» $i\omega\mu\hat{H}$. Заметим, что для выделения полных квазистатических электрического и магнитного полей надо использовать метод, изложенный в предыдущем разделе. Для получения формы теории возбуждения, изложенной в работе [36], надо положить $\vec{E}_0 = 0$ и доопределить \vec{H}_0 из условий связи: $\text{rot } \vec{H}_0^t = \vec{j}^t$, $\hat{H}_0^t = 0$.

В работе [37] в качестве возбуждающего тока вводится «вихревой» ток \vec{j}_V при кулоновской калибровке потенциалов, когда квазистатическое потенциальное электрическое поле \hat{E} имеет потенциал, удовлетворяющий уравнению Пуассона, а магнитное квазистатическое поле не выделяется, $\hat{H} = 0$. Однако и в этом случае уравнения для коэффициентов возбуждения $C_{\pm s}$ принимают вид (69), то есть обмен энергией между электронами и полем определяется только заданным током \vec{j} , а не вихревым током \vec{j}_V .

6. Резонаторная форма теории возбуждения волноводов

При выделении квазистатической части поля в п. 4 исходили из выражений (36), полученных путем разложения возбуждаемого поля по собственным волнам системы на частоте ω . Здесь будет рассмотрен другой путь построения теории возбуждения волноводных систем [14, 18], позволяющий выделить квазистатическую часть электрического поля. Этот путь аналогичен тому, который используется в теории возбуждения резонаторов [12, 16], и основан на применении объемных условий ортогональности собственных волн (21).

Будем искать вихревую часть возбуждаемого током поля в виде интеграла Фурье по волновым числам h и разложим спектральную плотность этого поля в ряд по собственным волнам системы, взятым при постоянном значении h на частотах $\omega_s = \omega_s(h)$. Поскольку поле каждой собственной волны периодически зависит от h , то достаточно рассматривать изменение волнового числа в пределах $-\pi/L, \pi/L$; учитывая также, что $h_{-s}(\omega) = -h_s(\omega)$, будем искать полное возбуждаемое поле в виде

$$\vec{E} = \sum_{s=1}^{\infty} \int_0^{\pi/L} (A_s \vec{E}_s + A_{-s} \vec{E}_{-s}) dh + \hat{E}, \quad (72)$$

$$\vec{H} = \sum_{s=1}^{\infty} \int_0^{\pi/L} (B_s \vec{H}_s + B_{-s} \vec{H}_{-s}) dh, \quad (73)$$

сразу выделяя квазистатическую часть электрического поля.

Для определения коэффициентов $A_{\pm s}(h)$ и $B_{\pm s}(h)$ используем соотношения (10), принимая за V весь объем системы, и подставляя вместо первого поля искомое поле \vec{E}, \vec{H} в виде (72), (73), а вместо второго поля – поле r -й собственной волны

системы. Учитывая, что $\vec{E}, \vec{H} \rightarrow 0$ при $z \rightarrow \pm\infty$ (так как возбуждающие токи находятся в ограниченной области $z_1 < z < z_2$ и в системе всегда имеются малые потери), получим, что левая часть соотношений (10) обращается в нуль. В правой части изменим порядок интегрирования и суммирования. Тогда, учитывая условия ортогональности по всему объему V , найдем следующие выражения для коэффициентов $A_{\pm s}(h)$ и $B_{\pm s}(h)$:

$$A_{\pm s} = \frac{\omega}{i(\omega^2 - \omega_s^2)} \frac{1}{M_s^E} \frac{L}{2\pi} \int_V \vec{j} \vec{E}_{\mp s} dV, \quad (74)$$

$$B_{\pm s} = \frac{\omega}{i(\omega^2 - \omega_s^2)} \frac{1}{M_s^H} \frac{L}{2\pi} \int_V \vec{j} \vec{E}_{\mp s} dV. \quad (75)$$

С учетом (24) имеем:

$$B_{\pm s} = \frac{\omega_s}{\omega} A_{\pm s}.$$

В выражениях (74), (75) можно перейти от интегрирования по объему всей периодической системы V к интегрированию по объему одной ячейки V_L , если представить ток в виде

$$\vec{j} = \int_{-\pi/L}^{\pi/L} \vec{j}^p e^{ihz} dh, \quad (76)$$

где

$$\vec{j}^p = \vec{j}^p(x, y, z, h) = \frac{L}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \vec{j}(x, y, z - nL) e^{ih(z-nL)} \quad (77)$$

– периодическая функция z с периодом L . Используя (76), (77), записывая интеграл по объему V в виде бесконечной суммы интегралов по отдельным ячейкам и применяя формулу

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} e^{ikhL} = \frac{2\pi}{L} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(h - \frac{2\pi n}{L}\right),$$

получим

$$\frac{L}{2\pi} \int_V \vec{j} \vec{E}_{\mp s} dV = \int_{V_L} \vec{j}^p \vec{E}_{\mp s}^p dV. \quad (78)$$

С учетом этого соотношения формулы (74), (75) для коэффициентов возбуждения получаются точно такими же, как и в случае резонатора, представляющего одну ячейку системы с условиями периодичности на торцах и возбуждаемого «эквивалентным» током \vec{j}^p . Этот ток учитывает действие реальных токов, имеющих в других ячейках системы, согласно соотношению (77).

Полученные выражения для полей (72)–(75) приводят к формулам (43) и (44), если вычислять интегралы по h с помощью теории вычетов, принимая во внимание, что полюсы подынтегральной функции в плоскости комплексного переменного h определяются уравнениями $\omega_s(h) = \omega$, а также уравнениями $\omega_s(h) = 0$ для QE-волн в интегралах (72) (Приложение). Выражения (72)–(75) могут иметь также самостоятельное значение, например, при возбуждении системы током, близким по форме к бегущей волне.

7. Синхронные волны и поле пространственного заряда

Принцип действия многих электронных приборов и ряда других устройств СВЧ основан на синхронизме одной или нескольких собственных волн периодического волновода с возбуждающим его электронным потоком. Например, в лампе бегущей волны с резонаторной замедляющей системой (ЗС) при работе на частоте около границы полосы пропускания электроны эффективно взаимодействуют с прямой волной ЗС и обратной пространственной гармоникой встречной волны. Ограничиваясь случаем двух синхронных волн – прямой и встречной, представим полное возбуждаемое поле (43), (44) в виде

$$\vec{E} = C_s \vec{E}_s + C_{-s} \vec{E}_{-s} + \sum_{s' \neq \pm s} \{ \dots \} + \hat{\vec{E}}, \quad (79)$$

$$\vec{H} = C_s \vec{H}_s + C_{-s} \vec{H}_{-s} + \sum_{s' \neq \pm s} \{ \dots \} + \hat{\vec{H}}, \quad (80)$$

где в суммы по s' входят все распространяющиеся и запердельные волны, возбуждаемые на частоте ω и нулевой частоте, кроме синхронных на частоте ω . Эти суммы составляют нерезонансный фон, определяющий динамические поправки к квазистатическому полю $\hat{\vec{E}}$, $\hat{\vec{H}}$ и вместе с последним представляют поле пространственного заряда. Обычно динамические поправки к кулоновскому полю взаимодействия электронов невелики. Однако в некоторых случаях, например в гребенке [38], или тонкой спирали [33, 39], влияние этих поправок становится определяющим. При этом из-за того, что фаза нерезонансного поля зависит от вида ЗС, законы взаимодействия электронов могут сильно изменяться – например, вместо отталкивания получим притяжение, то есть неустойчивость электронного пучка. Наиболее просто описание этих явлений получается при использовании коэффициента депрессии сил пространственного заряда Γ , характеризующего изменение продольного поля пространственного заряда при переходе от бесконечно широкого электронного пучка к пучку конечного сечения. В бесконечно широком пучке при независимости от поперечных координат x , y поле пространственного заряда с точностью до константы сводится к одной компоненте (35). В пучке конечного сечения поле пространственного заряда изменяется из-за рассеяния на стенки волновода или ЗС, так что среднее по сечению пучка поле записывают в виде

$$E_z = \Gamma \frac{j_z}{i\omega\epsilon}. \quad (81)$$

Коэффициент депрессии для прямолинейного круглого потока радиуса « b » в цилиндрическом волноводе радиуса « a » приведен на рис. 8 [33]. При замене волновода спирально проводящим цилиндром, моделирующим спиральную ЗС, и учете связанных с этим динамических поправок коэффициент депрессии существенно изменяется при малом радиусе

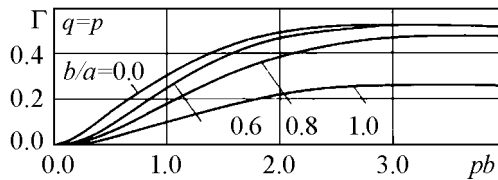


Рис. 8. Коэффициент депрессии Γ для круглого электронного пучка радиуса « b » в волноводе радиуса « a »

ЗС и принимает отрицательные значения (рис. 9) [33, 40]. Этот эффект проявляется и для электронных потоков в диафрагмированном волноводе [38, 41]. Возникающую при этом неустойчивость можно использовать для усиления волн в лампах с резистивной или индуктивной стенками [42].

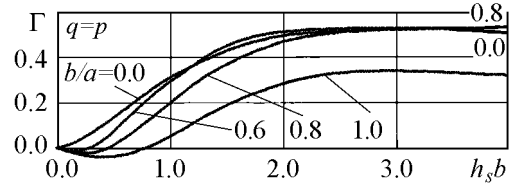


Рис. 9. Коэффициент депрессии Γ для круглого электронного пучка радиуса «а» в спирально проводящем цилиндре радиуса «b»

8. Разностная форма уравнений возбуждения

Уравнения (37) для коэффициентов возбуждения собственных волн $C_{\pm s}$ имеют особенность правой части вблизи частот отсечки периодического волновода, так как на этих частотах поток энергии и, соответственно, N_s близки к нулю. Устранение этой особенности имеет как принципиальное, так и практическое значение для расчета мощных ламп бегущей волны поскольку в них используются периодические замедляющие системы, работающие вблизи отсечки. Этому вопросу посвящено много работ [43–47 и др.], в которых рассматривались разные варианты устранения особенности. Наиболее общим является переход к уравнению возбуждения периодических волноводов в конечных разностях второго порядка для суммарного поля прямой и встречной волн, определяемого двумя первыми слагаемыми в соотношениях (79), (80). Здесь мы рассмотрим вывод этого уравнения, следуя [48, 49], сопоставим его с уравнением возбуждения периодических цепочек четырехполюсников [50], а также дадим обобщение этого уравнения на псевдопериодические цепочки четырехполюсников, моделирующие псевдопериодические волноводы. Обозначим через \vec{E} суммарное электрическое поле прямой и встречной волн s -го типа

$$\vec{E}(x, y, z) = C_s(z)\vec{E}_s(x, y, z) + C_{-s}(z)\vec{E}_{-s}(x, y, z). \quad (82)$$

Введем конечные разности первого и второго порядков для этого поля

$$\begin{aligned} \pm\Delta_{\pm}\vec{E} &= \vec{E}(x, y, z \pm L) - \vec{E}(x, y, z), \\ \Delta^2\vec{E} &= \Delta_+\vec{E} - \Delta_-\vec{E} = \vec{E}(x, y, z + L) - 2\vec{E}(x, y, z) + \vec{E}(x, y, z - L), \end{aligned} \quad (83)$$

а также и для коэффициентов возбуждения C_s

$$\pm\Delta_{\pm}C_s = C_s(z \pm L) - C_s(z) \quad (84)$$

на периоде системы; аналогично можно записать конечные разности для C_{-s} ; средние по двум соседним периодам системы приращения имеют вид

$$\overline{\Delta\vec{E}} = \frac{1}{2}(\Delta_+\vec{E} + \Delta_-\vec{E}), \quad \overline{\Delta C_{\pm s}} = \frac{1}{2}(\Delta_+C_{\pm s} + \Delta_-\overline{C_{\pm s}}). \quad (85)$$

Из выражения (82) с учетом соотношений (13), (84) имеем

$$\begin{aligned} \vec{E}(x, y, z \pm L) &= [C_s(z) \pm \Delta_{\pm}C_s]\vec{E}_s(x, y, z)e^{\pm i\varphi_s} + \\ &+ [C_{-s}(z) \pm \Delta_{\pm}C_{-s}]\vec{E}_{-s}(x, y, z)e^{\mp i\varphi_s}, \end{aligned}$$

где $\varphi_s = h_s L$.

Опуская для краткости аргументы x, y, z , отсюда получаем

$$\begin{aligned}\vec{E} + \Delta_+ \vec{E} &= (C_s + \Delta_+ C_s) \vec{E}_s e^{i\varphi_s} + (C_{-s} + \Delta_+ C_{-s}) \vec{E}_{-s} e^{-i\varphi_s}, \\ \vec{E} - \Delta_- \vec{E} &= (C_s - \Delta_- C_s) \vec{E}_s e^{-i\varphi_s} + (C_{-s} - \Delta_- C_{-s}) \vec{E}_{-s} e^{i\varphi_s}.\end{aligned}$$

Складывая эти соотношения, приходим к разностному уравнению для полного поля \vec{E}

$$\Delta^2 \vec{E} + 2\vec{E}(1 - \cos \varphi_s) = \vec{G}, \quad (86)$$

где правая часть уравнения

$$\vec{G} = (\Delta_+ C_s e^{i\varphi_s} - \Delta_- C_s e^{-i\varphi_s}) \vec{E}_s + (\Delta_+ C_{-s} e^{-i\varphi_s} - \Delta_- C_{-s} e^{i\varphi_s}) \vec{E}_{-s}$$

определяется возбуждающим током и с помощью соотношений (84), (85) может быть представлена в виде $\vec{G} = (2i\Delta C_s \sin \varphi_s + \Delta^2 C_s \cos \varphi_s) \vec{E}_s + (-2i\Delta C_{-s} \sin \varphi_s + \Delta^2 C_{-s} \cos \varphi_s) \vec{E}_{-s}$.

Согласно соотношениям (37) и (84), имеем также

$$\begin{aligned}\Delta_+ C_{\pm s} &= \pm \frac{1}{N_s} \int_{V_+} \vec{j} \vec{E}_{\mp s} dV, \\ \Delta_- C_{\pm s} &= \pm \frac{1}{N_s} \int_{V_-} \vec{j} \vec{E}_{\mp s} dV,\end{aligned} \quad (87)$$

где V_+, V_- – объемы одного периода системы соответственно справа и слева от данного сечения z .

Разностное уравнение (86) является точным следствием обычных формул возбуждения и справедливо при произвольном выборе сечения z . От выбора z зависит только вид ячеек, на которые разбивается система сечениями $z, z + L, \dots$, причем при наличии поперечных плоскостей симметрии целесообразно разбивать систему по этим плоскостям; в этом случае вычисление \vec{G} упрощается. Согласно определению (83), разностное уравнение (86) связывает значения возбуждаемого поля на трех соседних периодах системы и может быть записано в виде

$$\vec{E}(x, y, z + L) - 2\vec{E}(x, y, z) \cos \varphi_s + \vec{E}(x, y, z - L) = \vec{G}. \quad (88)$$

Его решение для конечного отрезка периодического волновода, состоящего из n периодов, можно свести к решению системы линейных алгебраических уравнений относительно n неизвестных значений возбуждаемого поля, причем на \vec{E} и $\Delta \vec{E}$ или их комбинацию налагаются краевые условия на границах отрезка.

9. Дискретное возбуждение периодических волноводов продольным током

Применим полученное общее разностное уравнение (86) или (88) к периодическим волноводам с дискретным взаимодействием электронов и поля в последовательности зазоров, расположенных около сечений $z_q, q = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, и будем рассматривать возбуждение такой системы продольным током вида

$$\vec{j}(x, y, z) = J(z) \psi(x, y) \vec{z}_0, \quad (89)$$

где функция распределения $\psi(x, y)$ в поперечном сечении пучка S_e задана и удовлетворяет соотношению

$$\int_{S_e} \psi(x, y) dS = 1. \quad (90)$$

Тогда $J(z)$ – ВЧ-ток пучка, а $S = 1/(\int_{S_e} \psi^2(x, y) dS)^{-1}$ – эффективная площадь его поперечного сечения [33].

В одномерной модели поле и другие величины усредняются с помощью соотношения

$$\bar{E}_z(z) = \int_{S_e} \psi(x, y) E_z(x, y, z) dS, \quad (91)$$

причем в пределах каждого периода поле, взаимодействующее с электронным пучком, можно считать синфазным вдоль оси ЗС. Усредняя поле (13), запишем на q -м периоде

$$\bar{E}_{\pm s, z}(z) = E_{\pm s}^0 \bar{e}_{\pm}(z) \exp(\pm i h_s z) = E_{\pm s}^0 \bar{e}(z) \exp(\pm i q \varphi_s), \quad (92)$$

где $\bar{e}(z)$ – вещественная усредненная по сечению функция распределения, одинаковая (например, из соображений симметрии) для прямой и встречной волн.

Усредняя так же (86), можно показать [49, 51], что усредненное полное продольное поле на q -м периоде будет иметь вид

$$\bar{E}_q(z) = \bar{e}(z) E_q, \quad (93)$$

где E_q удовлетворяет разностному уравнению

$$\Delta^2 E_q + 2E_q(1 - \cos \varphi_s) = -i R_s^0 \sin \varphi_s J_q d. \quad (94)$$

В этом уравнении

$$R_s^0 = -\frac{2E_{+s}^0 E_{-s}^0}{N_s} \quad (95)$$

– удельное сопротивление связи в точке (x^0, y^0, z^0) ,

$$d = \int_{z_q - L/2}^{z_q + L/2} \bar{e}(z) dz \quad (96)$$

– эффективная ширина эквивалентного плоского зазора, выбранная таким образом, чтобы напряжение на зазоре равнялось напряжению на шаге

$$U_q = -E_q d = -E_q \int_{z_q - L/2}^{z_q + L/2} \bar{e}(z) dz = - \int_{z_q - L/2}^{z_q + L/2} \bar{E}(z) dz, \quad (97)$$

где z_q – координата середины q -го зазора. Величина

$$J_q = \frac{1}{d} \int_{z_q - L/2}^{z_q + L/2} J(z) \bar{e}(z) dz \quad (98)$$

имеет смысл наведенного на q -м зазоре тока.

Разностное уравнение для напряжения получается из (94) простым умножением на $-d$

$$\Delta^2 U_q + 2U_q(1 - \cos \varphi_s) = iR_s^0 J_q d^2 \sin \varphi_s. \quad (99)$$

Локальный импеданс связи зазора вводится посредством соотношения

$$Z_s = R_s^0 d^2 \sin \varphi_s. \quad (100)$$

Он входит в правую часть разностного уравнения (99) и характеризует интенсивность возбуждения поля током. Подчеркнем также, что локальный импеданс не имеет особенностей на границе полосы прозрачности, так как $\sin \varphi_s \rightarrow 0$ при $R_s^0 \rightarrow \infty$ на границе [49, 51].

Представление ЗС цепочкой последовательно включенных четырехполюсников (рис. 10) широко используется во многих работах по теории и расчету ЛБВ. Для определения Z_s через параметры четырехполюсников выведем разностное уравнение возбуждения вида (99) непосредственно из эквивалентной схемы рис. 10. При решении задачи возбуждения заданным током ток электронного пучка $J(z)$ задан. При этом токи возбуждения цепочки четырехполюсников совпадают с заданными наведенными токами, что показано на схеме рис. 10. Тогда имеем следующую связь токов и напряжений на одном периоде:

$$\begin{aligned} U_k &= A_{11}U_{k+1} + A_{12}I_{k+1}, \\ U_{k-1} &= A_{11}U_k + A_{12}(I_k - J_k^-), \\ I_k + J_k^+ &= A_{21}U_{k+1} + A_{22}I_{k+1}, \\ I_{k-1} &= A_{11}U_k + A_{22}(I_k - J_k^+), \\ J_k &= J_k^+ + J_k^-. \end{aligned} \quad (101)$$

Отсюда, составляя конечные разности второго порядка $\Delta^2 U = U_{q+1} - 2U_q + U_{q-1}$, с учетом условий обратимости четырехполюсников $A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} = 1$ и уравнения дисперсии

$$\cos \varphi_s = \frac{A_{11} + A_{12}}{2}, \quad (102)$$

придем к уравнению, аналогичному (99)

$$\Delta^2 U_k + 2U_k(1 - \cos \varphi_s) = -A_{12}J_k. \quad (103)$$

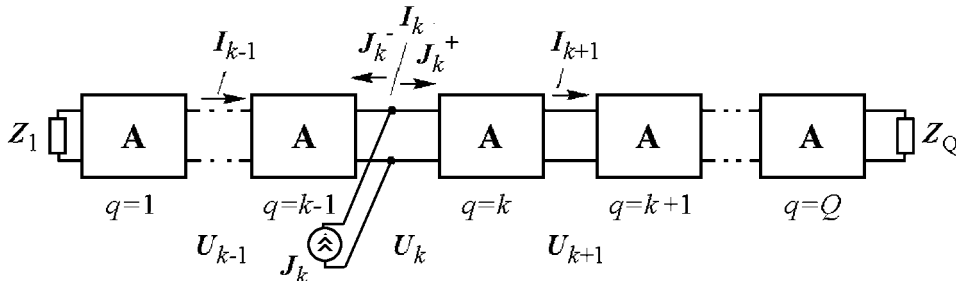


Рис. 10. Периодическая цепочка идентичных четырехполюсников с матрицами передачи A , возбуждаемая током J_k

Сравнивая (99) и (103), получим элементарное выражение

$$Z_s = iA_{12}. \quad (104)$$

Подчеркнем, что четырехполюсники, входящие в цепочку, могут описывать ячейки ЗС сложной формы, а соответствующие им матрицы передачи могут иметь сложные выражения для коэффициентов A_{ij} , удовлетворяющие, однако, условию обратимости.

Обычно используемое в теории ЛБВ сопротивление связи m -й пространственной гармоники s -й волны $K_{s,m}$ связано с Z_s следующим соотношением:

$$K_{s,m} = |Z_s| \frac{|e_{s,m}|^2}{\varphi_{s,m}^2 \sin \varphi_s}, \quad (105)$$

где $\varphi_{s,m} = \varphi_s + 2\pi m$ – сдвиг фазы поля m -й гармоники на полный период L , $|e_{s,m}|$ – амплитуды пространственных гармоник. Оно имеет особенности на границах полос пропускания, где φ_s кратно π .

В нелинейной теории ЛБВ при моделировании ЗС цепочкой четырехполюсников напряжение в q -м зазоре записывают часто в виде

$$U_q = U_1 \exp(i(q-1)\varphi_s) + U_Q \exp(-i(q-Q)\varphi_s) + \sum_{k=1}^Q Z_{qk} J_k, \quad (106)$$

где взаимные импедансы Z_{qk} определяют вклад тока k -го зазора в напряжение q -го зазора. Эти импедансы вычисляются через параметры четырехполюсников и импедансы входной и выходной нагрузок Z_1 , Z_Q с помощью рекуррентных формул пересчета. Используя эти формулы и образуя с помощью (106) конечную разность второго порядка $\Delta^2 U = U_{q+1} - 2U_q + U_{q-1}$, можно показать, что запись U_q в виде (106) через дискретную функцию источника (дискретную функцию Грина), определяемую совокупностью импедансов Z_{qk} , точно удовлетворяет разностному уравнению второго порядка (103). Возможны и другие методы решения системы линейных уравнений (103), в том числе методы прогонки. Выбор того или иного метода в нелинейной теории ЛБВ определяется возможностями минимизации времени расчетов и необходимых вычислительных ресурсов.

10. Дискретное возбуждение псевдопериодических волноводов продольным током

Для псевдопериодических систем с переменным шагом расположения зазоров взаимодействия L_q и меняющимися согласованно с шагом параметрами ячеек используем их представление цепочкой неидентичных четырехполюсников [32, 51]. Общие конечно-разностные соотношения, описывающие возбуждение заданным током цепочек неидентичных шестиполюсников, даны в [50]. Здесь мы приведем простой вывод конечно-разностного уравнения возбуждения второго порядка для цепочки неидентичных четырехполюсников, представленной на рис. 11 [52].

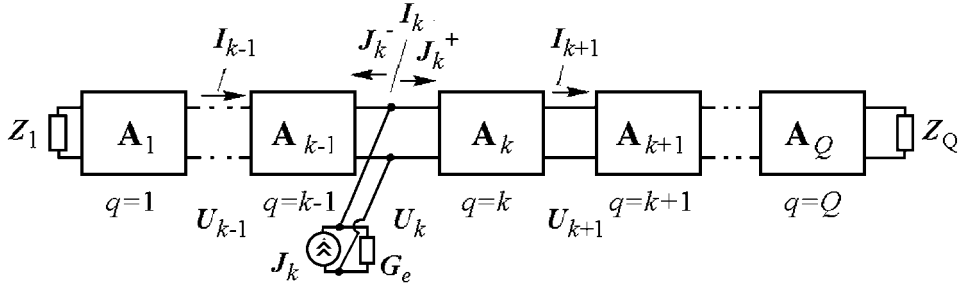


Рис. 11. Псевдопериодическая цепочка неидентичных четырехполюсников с матрицами передачи A_q , возбуждаемая током J_k , при учете электронной проводимости G_e .

Имеем следующую связь токов и напряжений на $(k-1)$ -м и k -м шагах при возбуждающем токе J_k

$$\begin{aligned} U_k &= A_{11}^k U_{k+1} + A_{12}^k I_{k+1}, & U_{k-1} &= A_{11}^{k-1} U_k + A_{12}^{k-1} (I_k - J_k^-), \\ I_k + J_k^+ &= A_{21}^k U_{k+1} + A_{22}^k I_{k+1}, & I_{k-1} &= A_{21}^{k-1} U_k + A_{22}^{k-1} (I_k - J_k^-). \end{aligned}$$

Исключая из этих соотношений токи I_k , I_{k+1} и учитывая условие обратимости четырехполюсника $A_{11}^k A_{22}^k - A_{12}^k A_{21}^k = 1$, получим разностное уравнение возбуждения цепочки неидентичных четырехполюсников, описывающих псевдопериодическую ЗС

$$U_{k+1} + \frac{A_{12}^k}{A_{12}^{k-1}} U_{k-1} - \left(A_{22}^k + A_{11}^{k-1} \frac{A_{12}^k}{A_{12}^{k-1}} \right) U_k = -A_{12}^k J_k. \quad (107)$$

Для периодической ЗС элементы матрицы передачи одинаковы для всех четырехполюсников и (107) совпадает с (103), так как $\cos \varphi_s = 1/2(A_{11} + A_{22})$.

При использовании известных соотношений между коэффициентами матриц передачи обратимых симметричных четырехполюсников, уравнение (107) можно представить в разных видах, в частности ввести сдвиг фазы на каждом шаге $\varphi_{s,q}$ с помощью (102) и использовать условия (30) на сдвиг фазы в псевдопериодическом волноводе.

Заключение

Рассмотрены различные формы теории возбуждения волноводов заданными сторонними источниками, основанные на представлении возбуждаемого электромагнитного поля рядами по собственным волнам с выделением неразлагаемой части поля. Коэффициенты этих рядов определяются сторонним током и полем собственных волн, которое может вычисляться с помощью различных методов, применяемых в теории электродинамических систем без источников. Укажем здесь использование эквивалентных схем, применение метода частичных областей и вариационных методов для расчета замедляющих систем и волноводов сложной формы [29, 53], метод отображения гофрированного волновода на гладкий [54–56], использованный в теории ламп бегущей волны [57]. В последние годы все большее применение находят методы прямого численного решения уравнений Максвелла без источников, реализованные в программах ISFEL-3D, HFSS и др.

Кроме изложенной здесь теории возбуждения волноводов, основанной на разложении электромагнитных полей по собственным волнам, возможны иные подходы к анализу и вычислению возбуждаемых полей. Так, при представлении гладких или периодических волноводов эквивалентными RLC-схемами для вывода уравнений возбуждения таких схем используют законы Ома и Кирхгофа. При этом, однако, необходимо тщательное обоснование величины и точек подключения возбуждающих наведенных токов на основании более строгой, в том числе изложенной в статье, теории. В противном случае можно получить ошибочные результаты, как например уравнения с возбуждающей второй производной тока, а не самим током [58].

В ряде частных случаев, например в линейной теории лампы бегущей волны для плоских или цилиндрических однородных замедляющих систем с электронными потоками удастся решить самосогласованную задачу возбуждения полей методом разделения переменных [39], сводя ее к решению трансцендентных уравнений дисперсии для электронных волн. Такие решения полезны при анализе физических явлений в ЛБВ и как тестовые примеры для более общей теории.

Как и для «холодных» систем без источников в последние годы все больше применяется прямое численное решение задачи возбуждения путем численного решения уравнений Максвелла с источниками с помощью метода конечных разностей или конечных элементов. На этой основе построены коды трехмерного моделирования взаимодействия электронных потоков с электромагнитным полем «Karat», «Mafla», «Magic», позволяющие исследовать тонкие эффекты взаимодействия. Однако применение таких кодов можно рассматривать, скорее, как численный эксперимент, требующий значительных вычислительных ресурсов и разработки специальных методов обработки результатов. Поэтому в настоящее время основным методом решения задачи возбуждения волноводов остается изложенная в данной статье теория возбуждения, основанная на разложении полей по собственным волнам, позволяющая с достаточной точностью рассчитать возбуждаемые поля и проанализировать их физические свойства.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 07-02-00947).

Приложение

Сравнение двух видов теории возбуждения волноводов

Покажем, что две разные формы теории возбуждения волноводов, данные в разделе 4 и разделе 6, приводят к одинаковым результатам.

Рассмотрим сначала преобразование интеграла Фурье к виду (72), (73). При представлении функции $f(z)$ в виде интеграла Фурье

$$f(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(h) e^{ihz} dh \quad (\text{П.1})$$

спектральная плотность

$$\varphi(h) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(z) e^{-ihz} dz \quad (\text{П.2})$$

зависит только от h и интегрирование производится по всем значениям h от $-\infty$ до ∞ . В периодических системах собственные волны, волновые числа которых отличаются на величину $(2\pi n)/L$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$), физически неразличимы. Поэтому при исследовании процессов в таких системах удобно представлять различные величины в следующем виде

$$f(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(h) e^{ihz} dh = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{\frac{\pi}{L}(2n-1)}^{\frac{\pi}{L}(2n+1)} \varphi(h) e^{ihz} dh = \int_{-\frac{\pi}{L}}^{\frac{\pi}{L}} \varphi^p(z, h) e^{ihz} dh, \quad (\text{П.3})$$

где $\varphi^p(z, h) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \varphi(h + \frac{2\pi n}{L}) e^{i(2\pi n)z/L}$ – периодическая функция z с периодом L .

Эту функцию можно выразить также непосредственно через $f(z)$, подставляя $\varphi(h + (2\pi n)/L)$ в виде интеграла (П.2), меняя порядок интегрирования и суммирования и используя формулу для δ -функции $\sum_{k=-\infty}^{\infty} e^{ikhL} = \frac{2\pi}{L} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(h - \frac{2\pi n}{L})$, получим

$$\varphi^p(z, h) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(z') e^{ihz'} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{i\frac{2\pi n}{L}(z-z')} dz' = \frac{L}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(z - nL) e^{-ih(z-nL)}. \quad (\text{П.4})$$

Заметим, что величину L можно выбирать произвольным образом. Таким образом, функция $\varphi^p(z, h)$ является изображением функции $f(z)$ в классе функций двух переменных z с периодом L .

Перепишем формулы (72), (73) в виде

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \sum_{s=1}^{\infty} \int_{-\pi/L}^{\pi/L} A_s \vec{E}_s dh + \widehat{\vec{E}}, \\ \vec{H} &= \sum_{s=1}^{\infty} \int_{-\pi/L}^{\pi/L} B_s \vec{H}_s dh. \end{aligned} \quad (\text{П.5})$$

Используя выражения (П.5) и (74), (75) и меняя порядок интегрирования по h и V , получим

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \sum_{s=1}^{\infty} \int_V dV' \int_{-\pi/L}^{\pi/L} P_s \vec{E}_s^p dh + \widehat{\vec{E}}, \\ \vec{H} &= \sum_{s=1}^{\infty} \int_V dV' \int_{-\pi/L}^{\pi/L} Q_s \vec{H}_s^p dh, \\ (dV' &= dx' dy' dz'), \end{aligned} \quad (\text{П.6})$$

где

$$\begin{aligned} P_s &= \frac{\omega}{i(\omega^2 - \omega_s^2(h))} \frac{L}{2\pi M_s^E(h)} \vec{j}(x', y', z') \vec{E}_s^p(x', y', z', -h) e^{ih(z-z')}, \\ Q_s &= \frac{\omega_s(h)}{\omega} P_s. \end{aligned} \quad (\text{П.7})$$

Для вычисления входящих в (П.6) интегралов по h проведем контуры интегрирования Γ_- , Γ_+ в верхней (при $z' < z$) или в нижней (при $z' > z$) полуплоскости комплексного переменного h (рис. 12). Так как $P_s \vec{E}_s^p$ и $Q_s \vec{H}_s^p$ – периодические функции h с периодом $2\pi/L$, то интегралы по боковым сторонам контура Γ_+ (или Γ_-) взаимно уничтожаются. Кроме того, при удалении верхней стороны контура Γ_+ (или нижней стороны Γ_-) в бесконечность имеем $P_s \rightarrow 0$, $Q_s \rightarrow 0$. При этом, согласно теореме о вычетах, получаем

$$\int_{-\pi/L}^{\pi/L} P_s \vec{E}_s^p dh = \begin{cases} 2\pi \sum_{\text{Im}h > 0} \text{Выч} P_s \vec{E}_s^p & \text{при } z' < z, \\ -2\pi \sum_{\text{Im}h < 0} \text{Выч} P_s \vec{E}_s^p & \text{при } z' > z, \end{cases} \quad (\text{П.8})$$

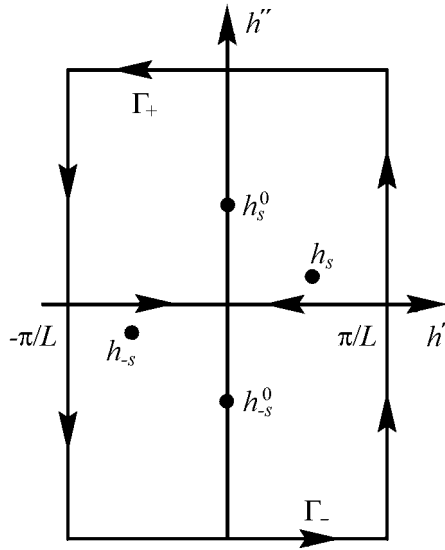


Рис. 12. Контур интегрирования при вычислении интегралов

где вычеты берутся в полюсах функции $P_s(h)$, лежащих в верхней ($\text{Im} h > 0$) или нижней ($\text{Im} h < 0$) части полосы $-\pi/L < \text{Re} h \leq \pi/L$. Аналогичные выражения получаются для интегралов функции $Q_s \vec{H}_s^p$.

Как видно из формулы (П.7), полюсы функций P_s можно разбить на две группы. Одна группа полюсов соответствует волновым числам $h = h_s$ собственных волн периодической системы на частоте ω , когда $\omega_s(h) = \omega$.

Разлагая функцию $\omega_s(h)$ в ряд Тейлора около полюса h_s

$$\omega_s(h) = \omega + \left. \frac{d\omega_s}{dh} \right|_{h=h_s} (h - h_s) + \dots, \quad (\text{П.9})$$

получим следующее выражение для вычета функции $P_s \vec{E}_s^p$ в этом полюсе первого порядка:

$$\text{Выч} P_s \vec{E}_s^p |_{h=h_s} = \lim_{h \rightarrow h_s} (h - h_s) P_s \vec{E}_s^p = \lim_{\omega_s \rightarrow \omega} \frac{dh}{d\omega_s} |_{\omega_s=\omega} (\omega_s - \omega) P_s \vec{E}_s^p. \quad (\text{П.10})$$

В последнем выражении h считается функцией переменной ω_s .

Другая группа полюсов определяется нулями нормы M_s^E . Согласно выражениям (45)–(49), имеем следующие разложения:

$$\begin{aligned} M_s^E &= M_s^{E(0)} + M_s^{E(1)} \delta_s + M_s^{E(2)} \delta_s^2 + \dots, \\ M_s^H &= M_s^{H(0)} + M_s^{H(1)} \delta_s + M_s^{H(2)} \delta_s^2 + \dots, \end{aligned} \quad (\text{П.11})$$

где

$$M_s^{E(0)} = \int_{V_L} \varepsilon \vec{E}_s^{(0)} \vec{E}_{-s}^{(0)} dV, \quad (\text{П.12})$$

$$M_s^{E(1)} = \int_{V_L} \varepsilon (\vec{E}_s^{(1)} \vec{E}_{-s}^{(0)} + \vec{E}_s^{(0)} \vec{E}_{-s}^{(1)}) dV, \quad (\text{П.13})$$

$$M_s^{E(2)} = \int_{V_L} \varepsilon (\vec{E}_s^{(0)} \vec{E}_{-s}^{(2)} + \vec{E}_s^{(1)} \vec{E}_{-s}^{(1)} + \vec{E}_s^{(2)} \vec{E}_{-s}^{(0)}) dV, \quad (\text{П.14})$$

а выражения для коэффициентов $M_s^{H(n)}$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) получаются, если в последних формулах заменить ε и \vec{E} на μ и \vec{H} , соответственно. Подставляя теперь разложения (П.11) в соотношение (24) и приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях δ_s , получим

$$M_s^{E(n)} = -M_s^{H(n)}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{П.15})$$

Учитывая условия (47), (48), получим, что как для QE -волн, так и для QH -волн имеют место соотношения

$$\begin{aligned} M_s^{E(0)} &= -M_s^{H(0)} = 0, \\ M_s^{E(1)} &= -M_s^{H(1)} = 0. \end{aligned}$$

Кроме того,

$$M_s^{E(2)} = -M_s^{H(2)} = - \int_{V_L} \mu \vec{H}_s^{(1)} \vec{H}_{-s}^{(1)} dV \quad (\text{П.17})$$

в случае QE -волн и

$$M_s^{H(2)} = -M_s^{E(2)} = - \int_{V_L} \mu \vec{E}_s^{(1)} \vec{E}_{-s}^{(1)} dV \quad (\text{П.18})$$

в случае QH -волн.

Таким образом, величины M_s^E, M_s^H обращаются в нуль при $\omega_s(h) = 0$, то есть при $h = h_s^0$. В частных случаях тот же результат можно получить и по-иному. Например, для металлической волноводной системы при отсутствии диэлектриков, вводя потенциал

$$\begin{aligned} \Phi_{\pm s}^{(0)} &= \Phi_{\pm s}^{(0)p} e^{\pm i h_s^{(0)} z}, \\ \vec{E}_{\pm s}^{(0)} &= -\text{grad} \Phi_{\pm s}^{(0)}, \end{aligned}$$

имеем

$$\begin{aligned} M_s^{E(0)} &= \varepsilon_0 \int_{V_L} \text{grad} \Phi_s^{(0)} \cdot \text{grad} \Phi_{-s}^{(0)} dV = \varepsilon_0 \int_{V_L} \text{div} (\Phi_s^{(0)} \text{grad} \Phi_{-s}^{(0)}) dV = \\ &= \varepsilon_0 \int_{S_L} \Phi_s^{(0)} \cdot \text{grad} \Phi_{-s}^{(0)} \vec{n} dS = \varepsilon_0 \int_{S_L} (\Phi_s^{(0)p} \text{grad} \Phi_{-s}^{(0)p} - i h_s^{(0)} \Phi_s^{(0)p} \Phi_{-s}^{(0)p} \vec{z}_0) \vec{n} dS, \end{aligned}$$

где S_L – поверхность, ограничивающая одну ячейку системы, \vec{n} – внешняя нормаль к ней. Поскольку на боковых металлических поверхностях $\Phi_s^{(0)} = 0$, а $\Phi_{\pm s}^{(0)p}$ периодически зависит от z с периодом L , то последний интеграл обращается в нуль и $M_s^{E(0)} = 0$.

Чтобы найти вычеты функции $P_s \vec{E}_s^p$ в точках $h = h_s^{(0)}$, надо записать для M_s^E разложение по степеням $h - h_s^{(0)}$, для чего, как видно из (П.11), достаточно найти выражение δ_s через $h - h_s^{(0)}$. При $\omega_s = \tilde{\omega} \rightarrow 0$ имеем

$$h_s(\tilde{\omega}) = h_s(0) + \frac{dh_s}{d\tilde{\omega}}(0)\tilde{\omega} + \frac{1}{2} \frac{d^2 h_s}{d\tilde{\omega}^2}(0)\tilde{\omega}^2 + \dots, \quad (\text{П.19})$$

$$\frac{dh_s}{d\tilde{\omega}}(\tilde{\omega}) = \frac{dh_s}{d\tilde{\omega}}(0) + \frac{d^2 h_s}{d\tilde{\omega}^2}(0)\tilde{\omega} = \frac{dh_s}{d\tilde{\omega}}(0) + \frac{d^2 h_s}{d\tilde{\omega}^2}(0) \frac{h_s^{(0)}}{i\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} \tilde{\delta}_s + \dots. \quad (\text{П.20})$$

Подставляя последнее разложение, а также ряды $N_s = N_s^{(1)}\delta_s + N_s^{(3)}\delta_s^3 + \dots$ и (П.11) при учете (П.15) в соотношение (26) и приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях $\tilde{\delta}_s$, получаем

$$\frac{dh_s}{d\tilde{\omega}}(0)N_s^{(1)} = 0, \quad \frac{d^2 h_s}{d\tilde{\omega}^2}(0) \frac{h_s^{(0)}}{i\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} N_s^{(1)} = -\frac{M_s^{(2)}}{L}, \quad (\text{П.21})$$

откуда видно, что $dh_s/d\tilde{\omega}(0) = 0$. В результате из (П.11), (П.19) получаем следующее разложение M_s^E по $h = h_s(\tilde{\omega})$:

$$M_s^E = M_s^{E(2)}\tilde{\delta}_s^2 + \dots = -\frac{\epsilon_0\mu_0}{(h_s^{(0)})^2} M_s^{E(2)}\tilde{\omega}^2 + \dots = -\frac{\epsilon_0\mu_0 M_s^{E(2)}}{(h_s^{(0)})^2 \frac{1}{2} \frac{d^2 h_s}{d\tilde{\omega}^2}(0)} (h - h_s^{(0)}) + \dots \quad (\text{П.22})$$

Таким образом, при $\omega_s \rightarrow 0$, то есть $h - h_s^{(0)} \rightarrow 0$, функция $P_s(h)$ имеет полюс первого порядка, и соответствующий вычет можно определить по формуле

$$\text{Выч} P_s \vec{E}_s^p|_{h=h_s^{(0)}} = \lim_{h \rightarrow h_s^{(0)}} (h - h_s^{(0)}) P_s \vec{E}_s^p. \quad (\text{П.23})$$

Учитывая, что, согласно (П.19), (П.20), (26),

$$h - h_s^{(0)} = h_s(\tilde{\omega}) - h_s^{(0)} = \frac{1}{2} \frac{d^2 h_s}{d\tilde{\omega}^2}(0)\tilde{\omega}^2 = \frac{1}{2} \frac{dh_s}{d\tilde{\omega}}(\tilde{\omega})\tilde{\omega} = -\frac{M_s(\tilde{\omega})\tilde{\omega}}{2LN_s(\tilde{\omega})}, \quad (\text{П.24})$$

запишем выражение для вычета следующим образом:

$$\text{Выч} P_s \vec{E}_s^p|_{h=h_s^{(0)}} = \lim_{\tilde{\omega}=\omega_s \rightarrow 0} \frac{-M_s(\tilde{\omega})\tilde{\omega}}{2LN_s(\tilde{\omega})} P_s \vec{E}_s^p. \quad (\text{П.25})$$

Подставляя выражение (П.7) для P_s в (П.10), (П.24) и учитывая соотношение (26), из формулы (П.8) получим при $z > z'$

$$\begin{aligned} \int_{-\pi/L}^{\pi/L} P_s \vec{E}_s^p dh &= \sum_s \frac{\vec{j}(x', y', z') \vec{E}_{\mp s}(x', y', z')}{N_s} \vec{E}_{\pm s}(x, y, z) - \\ &- \lim_{\tilde{\omega} \rightarrow 0} \frac{\tilde{\omega}\tilde{\omega}}{\omega^2 - \tilde{\omega}^2} \frac{\vec{j}(x', y', z') \vec{E}_{\mp s}(x', y', z')}{\tilde{N}_s} \vec{E}_{\pm s}(x, y, z), \end{aligned} \quad (\text{П.26})$$

где верхние знаки соответствуют области $z > z'$, нижние – области $z < z'$; значком \sim обозначены все величины на частоте $\omega_s = \tilde{\omega} \rightarrow 0$.

Интегралы от функций $Q_s \vec{H}_s^p$ вычисляются аналогично, однако, как видно из (П.7), эти функции не имеют полюсов при $\omega_s = \tilde{\omega} \rightarrow 0$; поэтому получаем

$$\int_{-\pi/L}^{\pi/L} Q_s \vec{H}_s^p dh = \sum_s \frac{\vec{j}(x', y', z') \vec{E}_{\mp s}(x', y', z')}{N_s} \vec{H}_{\pm s}(x, y, z). \quad (\text{П.26})$$

Подставляя выражения (П.25), (П.26) в (П.6) и учитывая, что

$$\lim_{\tilde{\omega} \rightarrow 0} \frac{\omega \tilde{\omega}}{\omega^2 - \tilde{\omega}^2} \frac{\omega}{\tilde{\omega}} = 1, \quad (\text{П.27})$$

получим следующее выражение для поля

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \sum_s [(C_s \vec{E}_s + C_{-s} \vec{E}_{-s}) - \lim_{\tilde{\omega} \rightarrow 0} \frac{\tilde{\omega}}{\omega} (\tilde{C}_s \tilde{E}_s + \tilde{C}_{-s} \tilde{E}_{-s})] + \hat{E}, \\ \vec{H} &= \sum_s [(C_s \vec{E}_s + C_{-s} \vec{E}_{-s}), \end{aligned} \quad (\text{П.28})$$

причем для коэффициентов $C_{\pm s}$ получаются формулы (34). Выражения (П.28) полностью совпадают с выражениями (43), (36), полученными выше совершенно иным путем, что и доказывает эквивалентность двух видов теории возбуждения волноводов – резонаторной и волноводной.

Библиографический список

1. Солнцев В.А. Теория возбуждения волноводов // Материалы школы-семинара. XIV Международная зимняя школа-семинар по электронике сверхвысоких частот и радиофизике. Саратов, 3–8 февраля 2009. Саратов: Издательский центр «РАТА», 2009. С. 89.
2. Shelkunoff S.A. Electromagnetic Waves. New York, 1944.
3. Мандельштам Л.И. Некоторые вопросы, связанные с возбуждением и распространением электромагнитных волн в трубах // ЖТФ. 1945. Т. 15, № 9. С. 461.
4. Вольман И.И. Возбуждение электромагнитных волн линейным вибратором в прямоугольном волноводе // Радиотехника. 1946. Т. 1, № 9. С. 18.
5. Слэтер Дж. Передача ультракоротких радиоволн. М.;Л.: ОГИЗ, Гос. изд-во техн.-теор. лит-ры, 1946.
6. Фельд Я.Б. Об одном методе расчета возбуждения волноводов, экзо-и эндовибраторов // ЖТФ. 1947. Т. 17, № 12. С. 1471.
7. Кисунько Г.В. К теории возбуждения радиоволноводов // ЖТФ. 1946. Т. 51, № 3. С. 195.
8. Кисунько Г.В. Электродинамика полых систем. Ленинград, ВКАС, 1949.
9. Самарский А.А., Тихонов А.Н. О возбуждении радиоволноводов // Ч. I – ЖТФ. 1947. Т. 17, вып. 11. С. 1283; Ч. II – ЖТФ. 1947. Т. 17, вып. 12. С. 1431; Ч. 4. – III ЖТФ. Т. 18, вып. 7. С. 971.

10. *Пирс Дж.Р.* Лампа с бегущей волной / Пер. с англ. под ред. В.Т. Овчарова М.: «Советское радио», 1952.
11. *Вайнштейн Л.А.* Возбуждение волноводов // ЖТФ. 1953, Т. 23. С. 654.
12. *Вайнштейн Л.А.* Электромагнитные волны. М.: Радио и связь, 1988.
13. *Вайнштейн Л.А.* Электронные волны в периодических структурах // ЖТФ. 1957. Т. 27, № 10. С. 2340.
14. *Солнцев В.А.* Возбуждение однородных и периодических волноводов сторонними токами // ЖТФ. 1968. Т. 38, № 1. С. 100.
15. *Солнцев В.А., Ромашии Н.Л.* К построению разных форм теории возбуждения периодических волноводов // Радиотехника и электроника. 1983. Т. 28, № 9. С. 1811.
16. *Слэтер Дж.* Электроника сверхвысоких частот. М.: «Советское радио», 1948.
17. *Ахизер А.И., Любарский Г.Я., Фейнберг Я.Б.* Об эффекте Черенкова и сложном эффекте Допплера // ДАН СССР. 1950. Т. LXXIII, № 1. С. 55.
18. *Солнцев В.А.* Нелинейные явления и пространственный заряд в электронных приборах СВЧ типа О. Диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. Центральный ордена Ленина научно-исследовательский радиотехнический институт. Москва, 1972 г.
19. *Солнцев В.А.* Распространение волн в периодических электронных потоках и их взаимодействие с электромагнитным полем волноводных систем. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. Московский ордена Ленина и ордена Трудового красного знамени государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 1960 г.
20. *Solntsev V.A.* Mode selection in pseudoperiodical waveguides and slow-wave structures // Proc. SPIE, v. 2250. Conference Digest. International Conference on Millimeter and Submillimeter waves and Application. 10–14 January 1994, San Diego, California. P. 399–400.
21. *Солнцев В.А.* Неоднородные замедляющие системы с селекцией волн // Междунар. конф. 100-летие начала использования электромагнитных волн для передачи сообщений и зарождение радиотехники. 50-я научная сессия, посвященная дню Радио. Май 1995. Тезисы докл. Ч. II, Москва, 1995. С. 136.
22. *Solntsev V.A., Solntseva K.P.* Mode selection in pseudoperiodical waveguides and slow-wave structures // Trans. Black Sea region Symposium on Applied Electromagnetism, Metsovo, Epirus-Hellas, N.T.U.A. Press, Athens, 1996, MMWS, p. 13.
23. *Солнцев В.А.* Псевдопериодические волноводы с селекцией пространственных гармоник и мод // Радиотехника и электроника. 1998. Т. 43, № 11. С. 1285.
24. *Краснушкин П.Е., Моисеев Е.И.* О возбуждении вынужденных колебаний в слоистом радиоволноводе // ДАН СССР. 1982. Т. 264, № 5. С. 1123.
25. *Боголюбов А.Н., Делицын А.А., Свершиников А.Г.* О полноте системы собственных и присоединенных функций волновода // Журн. выч. мат-ки и математич. физики. 1998. Т. 38, № 11. С. 1891.
26. *Боголюбов А.Н., Делицын А.А., Свершиников А.Г.* О задаче возбуждения волновода с неоднородным заполнением // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 1999. Т. 39, № 11. С. 1869.

27. *Боголюбов А.Н., Делицын А.А., Свершников А.Г.* О задаче возбуждения бегущих волн в радиоволноводе локальным током // Радиотехника и электроника. 2000. Т. 45, № 9. С. 1084.
28. *Фельд Я.Б.* Теорема взаимности для неустановившихся процессов в электродинамике // ДАН СССР. 1943. Т. 41, № 7. С. 7.
29. *Силин Р.А.* Периодические волноводы. М.: Фазис, 2002.
30. *Рапопорт Г.Н.* О соответствии энергетических и фазовых характеристик электрических фильтров // ЖТФ. 1954. Т. 24, № 8. С. 1496.
31. *Солнцев В.А.* Плоские спиральные системы с постоянной радиальной фазовой скоростью волн // Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39, № 4. С. 552.
32. *Солнцев В.А., Никонов Д.Ю.* Пространственная и частотная селекция волн в псевдопериодических замедляющих системах // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51, № 8. С. 1008.
33. *Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М.: Сов. Радио, 1973
34. *Власов А.А.* Макроскопическая электродинамика. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955.
35. *Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В.* Электромагнитные поля и волны. М.: Сов. Радио, 1971.
36. *Гайдук В.И., Палатов К.И., Петров Д.М.* Физические основы электроники СВЧ. М.: Сов. Радио, 1971.
37. *Канавец В.И.* Кулоновская калибровка потенциалов и уравнения нелинейной теории мощных приборов с электронными пучками // Вестник МГУ. Серия III, Физика и астрономия. 1975. Т. 16, № 2. С. 159.
38. *Нечаев В.Е.* Неустойчивость пучка релятивистских электронов в диафрагмированном волноводе. II // Известия вузов. Радиофизика. 1977. Т. 5. С. 744.
39. *Лошаков Л.Н., Пчельников Ю.Н.* Теория и расчет усиления лампы с бегущей волной. М.: Сов.Радио, 1964.
40. *Лошаков Л.Н., Ольдерогге Е.Б., Пчельников Ю.Н.* // Радиотехника и электроника. 1965. Т. 10, № 4. С. 681
41. *Ромашин Н.Л., Солнцев В.А.* Исследование нерезонансных полей в электронно-волновых системах О-типа // Радиотехника и электроника. 1988. Т. 33, № 3. С. 569.
42. *Клеен В., Пёшль К.* Введение в электронику сверхвысоких частот. Ч. II / Перевод с немецкого под ред. В.А. Солнцева. М.: Сов. Радио, 1963.
43. *Аркадакский С.С., Цикин Б.Г.* Уравнения возбуждения однородных волноведущих систем на частоте отсечки // Радиотехника и электроника. 1976. Т. 21, № 3. С. 608.
44. *Солнцев В.А., Кравченко Н.П.* Волновая линейная теория ЛБВ вблизи границы полосы пропускания // Радиотехника и электроника. 1978. Т. 23, № 5. С. 1103.
45. *Осин А.В., Солнцев В.А.* Электронные волны в запредельных периодических структурах // Радиотехника и электроника. 1978. Т. 24, № 7. с. 1380.
46. *Кузнецов А.П., Кузнецов С.П.* О характере неустойчивости в ЛБВ вблизи границы полосы пропускания // Изв. вузов. Радиофизика. 1980. Т. 23, № 9. С. 1104.

47. Кузнецов А.П., Кузнецов С.П., Рожнев А.Г., Блохина Е.В., Булгакова Л.В. Волновая теория ЛБВ вблизи границы полосы пропускания // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 6. С. 399.
48. Солнцев В.А., Мухин С.В. Разностная форма теории возбуждения периодических волноводов // Радиотехника и электроника. 1991. Т. 36, № 11. С. 2161.
49. Солнцев В.А. Три лекции по теории лампы с бегущей волной // Лекции по СВЧ электронике и радиофизике. 10-я зимняя школа-семинар, кн. 1(1). Саратов: ГосУНЦ «Колледж», 1996. С. 76.
50. Гаврилов М.В., Трубецков Д.И., Фишер В.Л. Теория цепочек активных многополосников с электронным возбуждением (модель взаимодействия электронного пучка с полями связанных резонаторов) // Лекции по электронике СВЧ и радиофизике (5-я зимняя школа-семинар инженеров), кн. 1. Саратов: Изд-во Саратовского университета. 1981. С. 173.
51. Солнцев В.А., Колтунов Р.П. Анализ уравнений дискретного электронно-волнового взаимодействия и группировки электронных потоков в периодических и псевдопериодических замедляющих системах // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53, № 6. С. 738.
52. Koltunov R.P., Solntsev V.A. The theory of electron-wave interaction in the TWT with pseudoperiodic slow-wave systems // Book of Abstract and Conference Program. 10-th International Vacuum Electronic Conference, 28–30 April 2009 (IVEC-2009), Rome.
53. Никольский В.В. Вариационные методы для внутренних задач электродинамики. М.: «Наука», 1967.
54. Свешников А.Г. // Научные доклады высшей школы. Физ.-мат. науки. 1959. № 2.
55. Свешников А.Г. // Изв. вузов. Радиофизика. № 2, 5.
56. Ильинский А.С., Свешников А.Г. // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 1968. Т. 8, № 2.
57. Кураев А.А. Теория и оптимизация электронных приборов СВЧ. Минск: Наука и техника, 1979.
58. Дж. Е. Роу. Теория нелинейных явлений в приборах СВЧ. М.: Сов. Радио. 1969.

Поступила в редакцию 28.05.2009

THEORY OF WAVEGUIDES EXCITATION

V.A. Solntsev

The theory of waveguide excitation is presented, based on expansions of the electromagnetic field by proper waves of waveguide. Necessary properties of smooth and periodic waveguides, including the conditions of orthogonality of plane and the volume of the waveguide are given. Main properties of pseudo-periodic waveguides are described. This

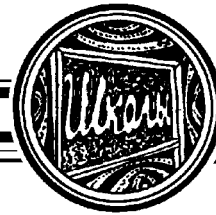
is a new class of waveguide systems. Different forms of the waveguides-excitation theory are considered. The waveguide form of the theory uses the expansion of the excited electromagnetic field by series of proper waves at a frequency of excitation, and with unexpandable part of the field, which may be caused by the longitudinal current (L. Weinstein), or by quasi-static field (V. Solntsev), etc. Essential improvement of series convergent at quasi-static field separation is proved. Another, waveguide-resonator form of the waveguide-excitation theory uses the expansion of a field by series of proper waves with fixed wave-numbers and different frequencies. In this case the quasi-static electric field is separated also. The equivalence of waveguide form and resonator form of excitation theory is proved. The analyze of total excited electromagnetic field is carried out. A finite-difference equation of excitation of modes is given with no singularities and applicable inside, outside, and on the boundary of waveguides bandwidth. The possibility is notes of dynamic correction influence on electrons interaction laws in the charge space.

Keywords: Waveguide, slow-wave structure, pseudoperiodic structure, theory of excitation, modes, field of space charge.

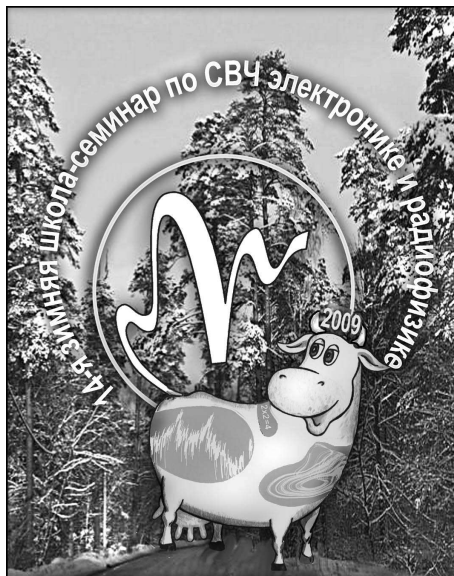
Солнцев Виктор Анатольевич – родился в Москве (1931). Окончил физический факультет МГУ (1953) и аспирантуру МГУ (1957). Кандидат физико-математических наук (1960), доктор физико-математических наук (1973), профессор (1979). Зав. кафедрой, профессор Московского государственного института электроники и математики. Область научных интересов – электроника и радиопизика СВЧ. Автор более 200 научных трудов и 15 изобретений по усилению и генерации СВЧ-колебаний, теории, методам и программам проектирования электронных приборов СВЧ, вакуумной микро- и наноэлектронике, в их числе изобретение и разработка многолучевых ламп обратной волны (1956, с А.С. Тагером, А.А. Негиревым и др.), явившихся основой для создания первой в мире серии генераторов, перекрывающих миллиметровые и субмиллиметровые волны. Автор книги «Лекции по сверхвысокочастотной электронике» (1973, с Л.А. Вайнштейном). Организатор постоянно действующего с 1973 года Международного семинара «Проблемы электроники». В разные годы член 4-х диссертационных советов, редколлегий журналов «Радиотехника и электроника» и др., член 2-х научных советов РАН, консультант «Физической энциклопедии» (1988–1998) и энциклопедического словаря «Электроника» (1990). Заслуженный деятель науки РФ (1999), почетный член Российского НТО РЭС им. А.С. Попова (1999).



Московский государственный институт электроники и математики
109028, Москва, Бол. Трёхсвятительский пер., д. 3/12
E-mail:soln05@miem.edu.ru



Изв. вузов «ПНД», т. 17, № 3, 2009



XIV МЕЖДУНАРОДНАЯ ЗИМНЯЯ ШКОЛА-СЕМИНАР ПО ЭЛЕКТРОНИКЕ-СВЧ И РАДИОФИЗИКЕ

*К столетию Саратовского
государственного университета*

Саратов, пансионат «Сокол»,
3–8 февраля 2009

Организаторы

- Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, факультет нелинейных процессов
- Саратовский филиал ИРЭ РАН

При поддержке

- Российского фонда фундаментальных исследований
- Фонда некоммерческих программ «Династия»
- IEEE Saratov/Penza AP/ED/MTT/CPMT/NPS Chapter

Программный комитет: *Д.И. Трубецков*, чл.-корр. РАН, проф., СГУ, Саратов – председатель; *Ю.П. Блюх*, д.ф.-м.н., «Технион», Хайфа, Израиль; *В.Л. Братман*, д.ф.-м.н., профессор, ИПФ РАН, Нижний Новгород; *Н.А. Бушуев*, д.э.н., директор ФГУП НПП «Алмаз», Саратов; *А.В. Гапонов-Грехов*, академик РАН, ИПФ РАН, Нижний Новгород; *Ю.В. Гуляев*, академик РАН, ИРЭ РАН, Москва; *А.В. Галдецкий*, к.ф.-м.н., ФГУП НПП «Исток», Фрязино; *Ю.А. Калинин*, д.т.н., профессор, СГУ, Саратов; *С.П. Кузнецов*, д.ф.-м.н., профессор, СФ ИРЭ РАН, Саратов; *А.А. Кураев*, д.ф.-м.н., профессор, БГУИР, Минск, Белоруссия; *А.Г. Литвак*, академик РАН, ИПФ РАН, Нижний Новгород; *И.И. Магда*, д.ф.-м.н., ХФТИ, Харьков, Украина; *А.Б. Маненков*, д.ф.-м.н., ИФП РАН, Москва; *С.П. Морев*, д.ф.-м.н., ФГУП НПП «Торий», Москва; *Г.С. Нусинович*, д.ф.-м.н., профессор, Мэрилендский университет, США; *В.И. Некоркин*, д.ф.-м.н., профессор, ИПФ РАН, Нижний Новгород; *М.И. Петелин*, профессор, ИПФ РАН, Нижний Новгород; *А.А. Рухадзе*, д.ф.-м.н., профессор, ИОФ РАН, Москва;

Н.М. Рыскин, д.ф.-м.н., профессор, СГУ, Саратов. *В.К. Семенов*, к.т.н., профессор, ФГУП ГНПП «Контакт», Саратов; *В.А. Солнцев*, д.ф.-м.н., профессор, МИЭМ, Москва; *Г.Г. Соминский*, д.ф.-м.н., профессор, СПбГПУ, Санкт-Петербург; *М.Н. Стриханов*, д.ф.-м.н., профессор, ректор МИФИ, Москва; *А.П. Сухоруков*, д.ф.-м.н., профессор, МГУ, Москва; *Дж. Фелитейнер*, профессор, «Технион», Хайфа, Израиль; *Ю.А. Филимонов*, д.ф.-м.н., директор СФ ИРЭ РАН, Саратов; *А.Е. Храмов*, д.ф.-м.н., профессор, СГУ, Саратов; *В.Д. Шалфеев*, д.ф.-м.н., профессор, ННГУ, Нижний Новгород; *Ю.П. Шараевский*, д.ф.-м.н., профессор, СГУ, Саратов.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

Вторник, 3 февраля 2009

Открытие школы-семинара

Лекции

Негирев А.А. (ФГУП НПП «Исток», Фрязино), *Солнцев В.А.* (МИЭМ, Москва) Изобретение и развитие мм и субмм ЛОВ с многорядными замедляющими системами

Трубецков Д.И. (СГУ, Саратов) Некоторые физические даты 2008 и 2009 годов

Поляков П.А. (МГУ, Москва) Кинетическая теория Власова систем многих заряженных частиц и ее современное развитие

Круглый стол «К столетию СГУ. Школы, учителя, ученики»

Среда, 4 февраля 2009

Лекции

Петров Д.М. (ИРЭ РАН, Москва) Эвристика, математическое моделирование, КПД и полоса пролетных клистронов, клистронов, резотродов

Солнцев В.А. (МИЭМ, Москва) Теория возбуждения волноводов. Часть 1

Запезалов В.Е. (ИПФ РАН, Н. Новгород) Проблемы современных гиротронов

Мануилов В.Н. (ИПФ РАН, Н. Новгород) Численное моделирование процесса захвата электронов в адиабатическую ловушку гиротрона

Лукиа О.И. (СПбГПУ, Санкт-Петербург) Низкочастотные коллективные процессы в электронных потоках гиротронов: эксперимент и численное моделирование

Рыскин Н.М., Титов В.Н. (СГУ, Саратов) Нестационарная дискретная теория ЛБВ ЦСР

Царев В.А., Мирошниченко А.Ю. (СГТУ, Саратов) Оценка предельных значений электронного КПД СВЧ-приборов с клистронным типом взаимодействия в выходном резонаторе

Устные доклады

Комаров Д.А., Морев С.П. (ФГУП НПП ББ «Торий», Москва) Теоретические ограничения полосы усиления ЛБВ на ЦСР и методы их преодоления

Коннов А.В. (ФГУП НПП «Торий», Москва) Синтез многополосников, моделирующих нерегулярные секции ЦСР

Колтунов Р.П., Солнцев В.А. (МИЭМ, Москва) Разностные уравнения линейной теории дискретного электронно-волнового взаимодействия в замедляющих системах

Дармаев А.Н., Коротков А.Ф., Морев С.П., Якушкин Е.П. (ФГУП НПП «Торий», Москва) Фокусировка интенсивных электронных потоков «реверсоподобными» магнитными полями с высшими гармоническими составляющими магнитного поля в мощных многолучевых клистронах

Семенов С.О. (ФГУП НПП «Алмаз», Саратов) Некоторые особенности расчета траекторий заряженных частиц на сетке конечных элементов

Лукин К.А., Хуторян Э.М. (ИРЭ НАН Украины, Харьков) Моделирование многочастотных режимов резонансных автогенераторов и самосинхронизация мод открытого резонатора ГДИ

Корниенко В.Н. (ИРЭ РАН, Москва), *Привезенцев А.П.* (ЧелГУ, Челябинск) Возбуждение мод круглой мембраны с большим азимутальным числом ансамблем автогенераторов

Корниенко В.Н. (ИРЭ РАН, Москва) Динамика процесса генерации в многоволновых черенковских устройствах при использовании электронных пучков малой длительности

Галдецкий А.В. (ФГУП НПП «Исток», Фрязино). Об одной возможности создания окон вывода энергии для мощных приборов миллиметрового диапазона

Иляков Е.В., Кулагин И.С., Нечаев В.Е. (ИПФ РАН, Н. Новгород) Экспериментальное исследование насыщенного мультипактора в скрещенных полях

Романченко И.В., Кутенков В.О., Ростов В.В. (ИСЭ СО РАН, Томск) Эффективная трансформация энергии высоковольтных импульсов в высокочастотные колебания на основе передающей линии с насыщенным ферритом

Абубакиров Э.Б., Коношков А.П., Сергеев А.С. (ИПФ РАН, Н. Новгород) Жесткий режим возбуждения колебаний в релятивистских генераторах черенковского типа

Четверг, 5 февраля 2009

Лекции

Солнцев В.А. (МИЭМ, Москва) Теория возбуждения волноводов. Часть 2

Ковалев Н.Ф. (ИПФ РАН, Н. Новгород) Формирование трубчатых электронных пучков

Петелин М.И. (ИПФ РАН, Н. Новгород) Квазиоптическое управление мощными микроволновыми потоками

Морев С.П. (ФГУП НПП «Торий», Москва) Фокусировка интенсивных электронных потоков в знакопеременных магнитных полях с высшими гармоническими составляющими

Лукин К.А. (ИРЭ НАН Украины, Харьков) Интегрирование нелинейных уравнений электроники без применения разностных методов

Новожилова Ю.В. (ИПФ РАН, Н. Новгород) Параметрическая неустойчивость в генераторе с удаленной нагрузкой

Короновский А.А., Храмов А.Е. (СГУ, Саратов) Синхронизация и управление хаотическими колебаниями в электронике СВЧ

Стендовые доклады

Пятница, 6 февраля 2009

Лекции

Братман В.Л. (ИПФ РАН, Н. Новгород). Гиросприборы терагерцового диапазона

Гинзбург Н.С. (ИПФ РАН, Н. Новгород). Мазеры и лазеры с двумерной распределенной обратной связью

Кураев А.А., Сеницын А.К., Рак А.О., Цырельчук И.Н. (БГУИР, Минск) Удвоители частоты с поперечной модуляцией и фазовой селекцией электронов в неоднородном магнитном поле

Мясин Е.А., Евдокимов В.В., Ильин А.Ю. (ИРЭ РАН, Москва) Перспективы продвижения оротрона с двухрядной периодической структурой в коротковолновую часть миллиметрового и субмиллиметрового диапазона волн

Галдецкий А.В., Соколова И.М. (ФГУП НПП «Исток», Фрязино) О характеристиках усиления СВЧ-сигналов в приборе с вторичной эмиссией

Кузнецов С.П. (СФ ИРЭ РАН, Саратов) Настоящий хаос: как реализовать аттракторы Плыкина и Смейла–Вильямса в электронных устройствах?

Сухоруков А.П., Сапарина Д.О. (МГУ, Москва) Уникальные свойства открытых резонаторов и волноводов из слоистого метаматериала

Стендовые доклады

Суббота, 7 февраля 2009

Лекции

Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Светлов И.А. (СПбГПУ, С.-Петербург) Разработка и совершенствование в СПбГПУ полевых эмиттеров на основе содержащих углерод материалов

Лучинин А.Г. (ИПФ РАН, Н. Новгород) Современные проблемы оптики океана

Трубецков Д.И., Калинин Ю.А., Храмов А.Е. (СГУ, Саратов) Генераторы на виртуальном катоде – источники сверхширокополосных хаотических СВЧ-колебаний: эксперимент и теория

Кураев А.А., Попкова Т.А. (БГУИР, Минск) Принцип неопределенности в дискретном вычислительном процессе. Четные и нечетные алгоритмы

Нечаев В.Е., Сазонтов А.Г. (ИПФ РАН, Н. Новгород) Статистический анализ мультипакторного СВЧ-разряда на диэлектрической поверхности

Лукин К.А. (ИРЭ НАН Украины, Харьков) Вакуумные и полупроводниковые генераторы хаоса для шумовых радаров

Розанов Н.Н. (ФГУП Научно-производственная корпорация «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург) Релятивистские эффекты при распространении электромагнитного излучения в неоднородной среде

Устные доклады

Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Малыгин О.В., Моисеев М.А., Седов А.С. (ИПФ РАН, Н. Новгород) Численное моделирование непрерывного терагерцового гиросприбора на второй гармонике циклотронной частоты

Глявин М.Ю., Лучинин А.Г., Мануилов В.Н., Морозкин М.В. (ИПФ РАН, Н. Новгород) Мощные субмиллиметровые гиротроны на основе импульсных соленоидов

Глявин М.Ю., Морозкин М.В. (ИПФ РАН, Н. Новгород) Влияние продольной структуры высокочастотного поля гироприборов на эффективность рекуперации остаточной энергии электронного пучка

Сытова С.Н. (ИЯП БГУ, Минск) Нелинейные эффекты генерации в объемных лазерах на свободных электронах (ОЛСЭ)

Ильенко К., Яценко Т. (ИРЭ НАН Украины, Харьков) Использование квазистатических приближений при расчете динамики заряженных пучков

Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. (СГУ, Саратов) Особенности нелинейной динамики виртуального катода в периодическом магнитном поле

Астафьева Н.М. (ИКИ РАН, Москва) Спутниковая СВЧ-радиометрия атмосферы земли: вихри и волны по данным мониторинга в микроволновом диапазоне

Балагур А.А. (МИРЭА, Москва) Нелинейная модель для описания возникновения шаровой молнии

Бегинин Е.Н., Гришин С.В., Шараевский Ю.П. (СГУ, Саратов) Генерация стационарной последовательности хаотических солитоноподобных СВЧ импульсов в кольцевых автоколебательных системах с ферромагнитными пленками

Дмитриев Б.С. (СГУ, Саратов) Экспериментальное исследование воздействия периодических, хаотических и шумовых сигналов на сложную динамику клистронного автогенератора

Бровка А.В. (СГТУ, Саратов), *Е.К. Murphy, V.V. Yakovlev* (Worcester Polytechnic Institute, USA) Reconstruction of complex permittivity profiles of materials in waveguide systems

Давидович М.В., Стефюк Ю.В. (СГУ, Саратов) Итерационные методы и алгоритмы для интегральных уравнений диэлектрических резонаторов и волноводов

Воскресенье, 8 февраля 2009

Лекции

Филимонов Ю.А. (СФ ИРЭ РАН, Саратов) Магнитные наноструктуры: технология, спиновая динамика, применение

Шараевский Ю.П. (СГУ, Саратов) Нелинейная динамика в магнитоэлектронике

Заккрытие школы-семинара

Аналитический обзор. XIV Международная зимняя школа-семинар по СВЧ-электронике и радиофизике продолжает традицию Саратовских зимних школ, которые проводятся раз в три года, начиная с 1970 года, и уже вписали самостоятельную страницу в историю отечественной сверхвысокочастотной электроники. Исследования и разработки в этой области активно ведутся во многих научных организациях России, и их результаты были широко представлены на XIV Зимней школе. Состав участников школы включал представителей вузовской (Московский, Саратовский, Нижегородский, Пензенский, Челябинский, Томский, Южный федеральный университеты, Саратовский и Уральский технические университеты, С.-Петербургский политехнический университет, Московский институт электроники и математики), академической (Институт радиотехники и электроники РАН и его Фрязинский и Саратовский филиалы, Институт прикладной физики РАН (Н. Новгород), Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск) и отраслевой науки (ФГУП НПП «Торий», Москва,

ФГУП НПП «Алмаз», Саратов, ФГУП «НПК ГОИ», Санкт-Петербург, ГНЦ ТРИНИТИ, Троицк). Этот список дает представление о том, насколько широко ведутся подобные исследования в России. Хотя основной контингент участников составляют российские ученые, и рабочий язык школы – русский, присутствовали и зарубежные гости, представлявшие Институт радиофизики и электроники НАН Украины (Харьков), Белорусский госуниверситет (Минск) и Worcester Polytechnic Institute (США). Кроме того, в работе школы участвовали представители фирм – производителей электронного оборудования (ООО «Роде и Шварц Рус» и Spellman High Voltage Electronics Corporation), познакомившие участников конференции со своей продукцией.

Всего на школе были представлены 27 пленарных лекций с обзорами современного состояния исследований в различных актуальных областях СВЧ-электроники и радиофизики, 20 устных и 36 стендовых докладов с результатами оригинальных исследований. В них нашли отражение, по сути, все основные направления исследований по тематике конференции, которые выполняются в России и других странах.

Важное место в программе Школы занимают лекции и доклады, посвященные гиротронам и другим приборам на циклотронном резонансе. Так, в лекции В.Е. Запевалова (ИПФ РАН) был сделан обзор современного состояния отечественных и зарубежных разработок гиротронов, проанализированы различные факторы, определяющие его предельные характеристики, указаны возможные пути преодоления возникающих проблем. В лекциях В.Н. Мануйлова (ИПФ РАН и ННГУ) и О.И. Лукши (СПбГПУ) обсуждались вопросы численного моделирования и экспериментального исследования процессов в винтовых электронных пучках гиротронов, и описаны способы улучшения качества (повышение однородности эмиссии, подавление низкочастотных колебаний пространственного заряда, уменьшение скоростного разброса), приводящие к повышению его выходной мощности и КПД. Лекция В.Л. Братмана (ИПФ РАН) была посвящена проблеме освоения терагерцового диапазона с помощью гироприборов, что является одной из наиболее актуальных задач. На сегодняшний день в ИПФ РАН созданы гиротроны, реализующие достаточно мощную генерацию в терагерцовом диапазоне. Пожалуй, это наиболее впечатляющее достижение в области гироприборов за последние годы. Однако для генерации на столь высоких частотах требуются чрезвычайно высокие магнитные поля (примерно 36 Тл). Обсуждаются альтернативные пути: гиротроны, работающие на высших гармониках и гироумножители, однако их разработка пока не увенчалась успехом. Еще несколько докладов были посвящены различным конкретным вопросам субмиллиметровых гиротронов, в частности, доклад М.Ю. Глявина с соавторами.

Традиционно важным направлением СВЧ-электроники, активно развиваемым во многих странах, являются мощные и сверхмощные приборы релятивистской и плазменной СВЧ-электроники. Эта тематика была широко представлена в программе школы. Так, в лекции М.И. Петелина (ИПФ РАН) было рассказано о разработке квазиоптических конверторов микроволнового излучения и об использовании мощных короткоимпульсных микроволновых генераторов в радиолокации. Н.С. Гинзбург (ИПФ РАН) рассказал о работах по созданию лазеров и мазеров на свободных электронах с двумерными брэгговскими резонаторами, ведущихся в ИПФ РАН совместно с Институтом электрофизики УрО РАН (Екатеринбург) и ИЯФ СО РАН (Новосибирск). Использование брэгговских резонаторов позволяет осуществить селекцию мод при больших поперечных размерах электронного пучка и получить спектр генерации близкий к монохроматическому при высокой выходной мощности. Аналогичные исследования ведутся и в Институте ядерных проблем БГУ (Минск), о чем было рассказано в докладе С.Н. Сытовой. Еще одна лекция Н.С. Гинзбурга была посвящена использованию эффекта сверхизлучения для генерации коротких мощных импульсов. В последние несколько лет был достигнут значительный прогресс в области повышения частоты повторения и стабильности формы импульса. Доклад В.Н. Корниенко (ИРЭ РАН) был посвящен численному моделированию сверхразмерного черенковского генератора с сильноточным электронным пучком, рассмотрена возможность улучшения характеристик генератора за счет использования многосекционной конструкции. Еще целый ряд устных и стендовых

докладов был посвящен различным мощным СВЧ-приборам: релятивистским ЛОВ и ЛБВ, виркаторам и др.

Значительное количество докладов было посвящено «классическим» приборам нерелятивистской СВЧ-электроники, причем большинство из них было сделано представителями предприятий электронной промышленности. Так, в серии устных и стендовых докладов, сделанных сотрудниками ФГУП НПП «Торий», был подведен итог большой работы по совершенствованию ламп бегущей волны с цепочками связанных резонаторов (ЛБВ ЦСР), выполненной в последнее время на этом предприятии. В частности, большой интерес вызвала лекция С.П. Морева, в которой была описана оригинальная методика синтеза магнитной периодической фокусирующей системы ЛБВ, использующая высшие гармонические составляющие магнитного поля с правильно подобранными амплитудами. Лекция В.А. Царева (СГТУ) содержала обзор последних разработок в области приборов, в которых энергоотбор осуществляется в выходном резонаторе (клистроны, клистроды, тристроды), найдены универсальные закономерности, позволяющие оценить предельные мощность и КПД данного класса приборов, сделаны выводы о перспективности приборов с двухзачерными выходными резонаторами. В представленных докладах затрагивались также вопросы теоретического и экспериментального исследования клистронов, ЛБВ, приборов со скрещенными полями, и других приборов.

Одним из наиболее интенсивно развивающихся в последние годы направлений является создание средств компьютерного моделирования приборов СВЧ. Подобные программы существенно экономят усилия экспериментаторов и разработчиков приборов, так как позволяют избежать трудоемкого и дорогостоящего изготовления серии макетов-прототипов. В программу Школы-семинара вошел целый ряд лекций и докладов по этому направлению. Так, в цикле лекций и докладов В.А. Солнцева и соавторов (МИЭМ) был дан обзор различных форм теории возбуждения периодических волноводов, в частности, было рассказано о дискретной теории возбуждения, представляющей весьма перспективной для моделирования ЛБВ ЦСР. Лекция Н.М. Рыскина (СГУ) была посвящена обобщению дискретной теории на случай нестационарных процессов, описаны программы численного моделирования, разрабатываемые в СГУ, изложены результаты моделирования процессов усиления и генерации сигналов с различным спектральным составом, паразитного самовозбуждения и т.д. Методы синтеза эквивалентных схем четырехполюсников, моделирующих нерегулярные секции ЦСР, были рассмотрены в докладе А.В. Коннова (ФГУП НПП «Торий»). Методам и программам численного моделирования был посвящен и целый ряд устных и стендовых докладов (СГУ, ФГУП НПП «Алмаз», ФГУП НПП «Торий» и др.).

В области вакуумной микроэлектроники основной интерес вызвала лекция Г.Г. Соминаского, в которой был дан обзор современного состояния исследований и разработок автоэмиссионных катодов, а также были изложены результаты оригинальных исследований, ведущихся в СПбГПУ. В программу школы вошли несколько докладов, посвященных задачам магнитоэлектроники СВЧ. В частности, в лекции Ю.А. Филимонова (СФ ИРЭ РАН) были описаны современные технологии создания магнитных наноструктур и различные перспективы их применения для создания элементов памяти на основе упорядоченных массивов магнитных наночастиц, перестраиваемых полосно-заграждающих фильтров, фазовращателей, корректоров отношения сигнал-шум, ограничителей мощности и т.д.

Традиционно для Саратовских зимних школ, в программе были представлены доклады, посвященные общим вопросам нелинейной динамики, теории колебаний и волн с акцентом на приложения к задачам электроники СВЧ. В лекции С.П. Кузнецова (СФ ИРЭ РАН) были описаны новые подходы к созданию электронных генераторов грубого гиперболического хаоса. В лекции Ю.В. Новожиловой (ИПФ РАН) проанализированы особенности захвата частоты генератора при работе на резонансную нагрузку. Лекция Н.Н. Розанова (ФГУП «НПК ГОИ», С.-Петербург) была посвящена обзору слабо- и сильнорелятивистских эффектов при движении заряженных частиц в неоднородных средах. Лекция Ю.П. Шаравского (СГУ) познакомила с оригинальными результатами исследований нелинейных явлений

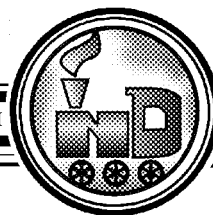
в системах, содержащих ферромагнитные пленки. На основе подобных систем могут быть созданы кольцевые генераторы различных сложных сигналов: хаотических, солитоноподобных импульсов, и др. Проблеме нелинейной динамики было также посвящено большое количество устных и стендовых докладов.

Образовательная составляющая всегда была одной из главных на Саратовских зимних школах. Многие лекции, объединенные в тематические курсы, традиционно носят учебный характер, содержат обзоры истории и современного состояния исследований в различных приоритетных областях. В частности, следует упомянуть лекции Д.И. Трубецкого (СГУ) и П.А. Полякова (МГУ), посвященных кинетической теории Власова, которая играет важную роль в современной СВЧ-электронике и физике плазмы, доклад В.А. Солнцева, посвященный истории создания в НИИ «Исток» (Фрязино) в 1950-е годы уникальных ламп обратной волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, многие из которых и по сей день не имеют аналогов.

Среди участников школы было довольно много аспирантов, молодых ученых и инженеров, представлявших, в основном, СГУ и СФ ИРЭ РАН. Молодых участников делегировали также ФГУП НИИ «Торий», ИСЭ СО РАН, ИПФ РАН, МГУ, ТГУ, среди них целый ряд молодых кандидатов наук. Однако среди участников практически отсутствовали молодые представители ведущих саратовских предприятий, таких как ФГУП НИИ «Алмаз» и НИИ «Контакт», которые ранее традиционно оказывали Школе-семинару финансовую поддержку и делегировали большое количество своих сотрудников. Видимо, это связано с ухудшением их финансового положения. Вообще, число представителей отраслевой науки по сравнению с предыдущими школами сократилось, хотя число участников в целом выросло. Можно заключить, что наметившаяся в последние несколько лет тенденция притока молодежи в науку, в том числе отраслевую, сохраняется. По-прежнему продолжают активную работу представители старшего поколения, и среди них – ряд выдающихся ученых и инженеров, традиционно составляющих основу коллектива лекторов на Саратовских школах (в том числе, принимавших участие во всех Школах, начиная с 1970-го года). Однако, безусловно, справедливо и опасения насчет «разрыва поколений», вызванного дефицитом ученых среднего возраста (30–50 лет).

Тематика лекций и докладов в целом соответствует наиболее актуальным проблемам вакуумной СВЧ-электроники, с точки зрения мировой науки, в чем можно убедиться, сопоставив программу Школы с программами ведущих международных конференций, например, ежегодных Международных конференций по вакуумной электронике (IVEC). По основным направлениям исследования, выполняемые российскими учеными, находятся на мировом уровне.

Анализ опубликованных материалов Школы-семинара показывает, что подавляющее большинство исследований, которые проводились в вузах и институтах РАН, получали финансовую поддержку РФФИ. Кроме инициативных научных проектов, на которые приходится основная доля (всего более 25 проектов), встречается проект ориентированных фундаментальных исследований, а также международные проекты: российско-германский и российско-израильский. Поддерживаемые проекты равномерно распределены по областям исследований, упомянутым выше. По сравнению с предыдущей Школой-семинаром 2006 года число ссылок на проекты РФФИ значительно увеличилось. В то же время, число проектов ориентированных фундаментальных исследований сократилось до одного. Среди работ, выполненных на промышленных предприятиях, ссылок на поддержку РФФИ (так же как и других фондов) нет. Спектр других фондов, финансирующих исследования, довольно широк: CRDF, фонд «Династия», гранты Президента РФ для молодых кандидатов и докторов наук, гранты ведущих научных школ и др., однако их поддержка носит эпизодический характер, причем речь, как правило, идет об индивидуальных грантах поддержки молодых ученых, а не о коллективных проектах. Таким образом, РФФИ, безусловно, принадлежит ведущая роль в поддержке исследований в области сверхвысокочастотной электроники в вузовском и академическом секторе российской науки.



ИГРАЕТ ЛИ БОГ В КОСТИ?

Человеческое общество как коллективная игра людей: Опыт еще одного монистического взгляда на общество

Ю.И. Неймарк, А.Я. Левин

На основе математических моделей и истории функционирования человеческого общества обсуждаются перспективы его эволюции.

Ключевые слова: Человеческое общество, математические модели, игра, история, эволюция, кризис.

Введение

С того момента, когда люди стали задумываться о прошлом и будущем общества, друг другу противостоят зафиксированные уже в учении Заратустры два противоположных взгляда на перспективы человеческого рода: оптимистический и пессимистический. Сторонники первого исходят из того, что в самой природе человеческого общества заложены механизмы его совершенствования, что прогресс также закономерен и неотвратим как общая эволюция живой природы. Их оппоненты, продолжая традицию Апокалипсиса, предрекают неизбежность катастрофы, неотвратимость в обозримом будущем кризиса, деградации и гибели человечества. При этом основания такой тенденции также усматриваются либо в природе человека, либо в природе общества.

Обычно на каждом историческом отрезке времени преобладающей оказывается одна из этих позиций. Века XVIII и XIX, в основном, были периодом исторического оптимизма, представленного такими именами, как Кант, Гегель, Маркс, Спенсер. Первая половина XX века – время Уэллса, Шпенглера, Хаксли, Замятина, Ортеги-и-Гассета, Оруэлла, предрекавших потомкам исключительно мрачные перспективы. Рубеж XX и XXI веков оказался временем метаний между крайностями – между верой в близость золотого века и ужасом перед неминуемой катастрофой. С одной стороны, Френсис Фукиама, объявляющий о наступлении «конца истории», то есть завершения пути человечества к совершенствованию, а с другой – Конрад Лоренц, обвиняющий то же человечество в смертных грехах, расплатой за которые будет не

условный, а подлинный конец истории, и Хаттингтон, предрекающий неминуемое столкновение цивилизаций¹.

Уже сама многовековая продолжительность диспута подсказывает, что обе точки зрения не лишены оснований, что надежда и страх не случайно сменяют друг друга. Двум людям, родившимся еще в первой четверти прошлого века и успевшим заглянуть в нынешний, пережившим и время веры, и время отчаяния, естественно в качестве итога своих размышлений попытаться выяснить, каковы же эти основания и возможно ли что-либо сделать для увеличения вероятности того, что жизнь наших правнуков будет более благополучной, чем наших современников.

Авторы – единомышленники, но каждый из них рассматривает тему с позиций своих знаний и своего опыта. Поэтому предлагаемая вниманию читателей публикация сохраняет ту форму, в которой она сложилась – в виде диалога математика, выступившего инициатором обсуждения, с гуманитарием. Все началось с математических моделей. Однако, чтобы не отпугнуть тех, кому формулы покажутся трудными, мы отступим от реальной истории обсуждения проблемы и начнем с реплики гуманитария.

1. Человеческое общество как этап в процессе эволюции жизни

1.1. Гуманитарий: Парадоксы Homo sapiens. Фундаментальность поставленной задачи требует глобального подхода к ее решению. Такой подход предполагает, что общество является одной из форм живой материи и история общества рассматривается как этап процесса эволюции жизни. Наибольшая теоретическая трудность в этом случае возникает при попытке объяснить специфическую агрессивность homo sapiens, благодаря которой войны, взаимное истребление людей людьми на протяжении всей истории человечества составляют главное содержание исторических хроник. Такое поведение противоречит общему закону эволюции, в соответствии с которым поведение каждой особи вида и взаимодействие между особями согласуются с интересами вида в целом, способствуют его выживанию. Хищные животные в столкновениях с другими особями своего вида, как правило, лишь демонстрируют агрессивность. После чего один из участников капитулирует, выражая это бегством или другими символическими действиями. Совершенно иначе ведут себя люди, истребляя в войнах себе подобных. З. Фрейд, К. Лоренц, Э. Фромм и многие другие исследователи давали различные объяснения этому парадоксу. Нам представляется, что наиболее плодотворно для объяснения крайней степени внутривидовой агрессивности человека отправляться от отмеченного Конрадом Лоренцом эффекта «свой–чужой» в поведении животных. В частности, Лоренц отмечает, что у крыс биологический запрет на убийство действует только в пределах своей стаи. Особь – чужак, оказавшаяся на территории стаи, безжалостно уничтожается. Инстинкт работает не на сохранение вида, а только своей стаи, занимающей свою охраняемую от чужаков территорию.

¹ Именно о такой контрастности возможных перспектив пишет Алвин Тоффлер во второй книге своей нашумевшей трилогии: «Многие из тех самых условий, которые порождают сегодняшние величайшие опасности, в то же время открывают фантастические новые потенциальные возможности». A. Toffler. The Third Wave. NY, Bantam Books, 1981, p. 3.

Люди наследуют этот выработанный эволюцией инстинкт, но в его проявлении существует значительная специфика. Численность видов животных в определенном ареале обитания в ходе эволюции уравнивается с экологической средой, образуя биоценоз. Численность каждого вида естественно регулируется возможностью пропитания. Иначе складываются отношения со средой у людей. Благодаря развивающемуся интеллекту человек создает орудия, приручает животных, то есть уже на раннем периоде своей истории меньше зависит от среды. И в этом вторая особенность, отличающая человечество от других форм жизни. Численность любой другой популяции не может превышать возможностей, предоставляемых природной средой, человек же способен изменять среду. Это позволяет ему снять начальные ограничения численности популяции, но, вместе с тем, приводит к вытеснению других видов и, в конечном счете, создает угрозу разрушения условий его собственного существования.

Первым самым простым способом изменения среды было простое перемещение. Людям легче приспосабливаться к новой среде. Поэтому уже на стадии неолита человеческие группы мигрируют в поисках новых пастбищ для скота, новых еще не истощенных подсечным земледелием почв. При этом они приходят в столкновение с другими человеческими группами, которые рассматриваются в качестве чужих, на которых не распространяется инстинкт сохранения, то есть запрет на убийство в борьбе за территорию. У некоторых племен входят в обычай человеческие жертвоприношения. До наших дней у некоторых примитивных племен сохраняется ритуальное людоедство. В этом проявляется уже регулирующая роль сознания, которое на начальном этапе носит магический характер и усматривает в столкновениях с врагом мистический смысл, а расправу над ним как угодное богам символическое действие. Важнейшим фактором, через который сознание влияет на оправдание убийства, является хорошо изученный механизм индоктринации, то есть опирающиеся на свойства человеческой психики приемы манипуляции сознанием и поведением. Эти приемы используются правителями, жрецами, групповыми лидерами для формирования стайных эмоций, пробуждающих жажду убийства и санкционирующих ее. В индоктринации манипулятор, эксплуатируя опосредование сознанием сложных инстинктов, направляет их энергию на цели далекие, а часто и противоположные их биологическому предназначению. Приемы манипуляции опираются на существование у человека так называемой «второй сигнальной системы». Искусственно созданный образ, знак заменяет реальные объекты и вызывает те же, а иногда и более сильные эмоции. Это относится, прежде всего, к словесным символам. В частности, сигналом для разделения «свой – чужой» служит не запах, как у крыс, а словесный ярлык. Механизм этот действует безотказно на протяжении всей человеческой истории. Разные эпохи различаются только ярлыками. «Мы ирокезы – они делава-ры», «Мы христиане – они язычники (или мусульмане)», «Мы православные – они католики», «Мы пролетарии – они буржуи», «Мы арийцы – они не арийцы». Коротко говоря, мир делится на «наших» и «не наших». Ярлык, повешенный на «не наших», создает так называемую стигму. Он выводит «не наших» за пределы рода человеческого, лишая их права на сочувствие и сопереживание, освящая расправу над ними волей «высшей силы» или «законов истории». В этом же направлении действуют изученные социальными психологами эффекты группового мышления, конформизма и подчинения авторитету. В частности, в знаменитых опытах Стенли Милграма было наглядно продемонстрировано, что по приказу личности, признава-

емой авторитетной, большинство людей готовы на самое жестокое обращение с себе подобными.

Эффект «мы и они» («мы люди – они не люди») действует и внутри одного общества. Правящая каста (знать), властвующая элита рассматривает в качестве подлинных людей только тех, кто входит в эту привилегированную группу. Остальные воспринимаются как существа низшего порядка, любое обращение с которыми, включая убийство, санкционируется и эмоционально, и морально. Особенно ярко это проявляется в обществах, в которых правящая элита формируется из завоевателей или приглашенных дружинников. Таким образом, уже на ранней стадии существования человеческого общества выявляются те главные особенности, которые, с одной стороны, являются преимуществами человечества над другими формами жизни, а с другой – превращают людей в источник величайшей опасности для существования жизни, в том числе и для него самого.

Преимуществом является интеллект, то есть способность на основе опыта и информации, получаемой из внешнего мира, строить в мозгу абстрактные модели наблюдаемых природных процессов, что позволяет людям, в отличие от других видов живого, не только адаптироваться к окружающей природной среде в процессе биологической эволюции или в актах поведения, но и сознательно, целенаправленно преобразовывать природную среду, приспособлявая ее к своим потребностям. Преимуществом человечества является также способность обучаться, передавать, накапливать знания, опыт, так что каждое поколение стоит на плечах всех предшествующих. Таким образом, мы можем утверждать, что общество обладает коллективной памятью и коллективным разумом. В результате вырабатываются технологии, многократно увеличивающие производительные силы общества. Однако, специфика человеческой психики имеет и обратную – опасную – сторону: рационализации инстинктивных побуждений. Это открывает возможность манипулирования поведением, направления эмоциональной энергии огромных масс людей на взаимное истребление. Достижения человеческого интеллекта при этом колоссально увеличивают возможности убийства и разрушений, а в наши дни даже истребления человечества и всего живого на нашей планете

Многие исследователи уже рассматривали эту двойственность специфики человечества и природу его агрессивности. Философы, социологи, психологи тщательно изучали различные аспекты механизма манипулирования. Однако гораздо менее исследована и понятна мотивация самих манипуляторов. Кто они? Почему они столь агрессивны?

При рассмотрении человеческого общества как формы жизни возникает, по крайней мере, еще одна проблема: как объяснить не характерное для других видов стремление к сверхпотреблению. При умеренном расходе продовольственных, энергетических и прочих материальных ресурсов в странах Запада можно было осуществить программы, направленные на форсирование развития стран, население которых вымирает от голода и болезней, а главное, принять экстренные меры для предотвращения необратимых изменений среды обитания, грозящих уничтожением всего живого. Почему обладающие разумом люди не способны к такому самоограничению? Где ключ к разрешению этой проблемы? Ответы на эти вопросы мы попытаемся извлечь из математических моделей и сжатого обзора важнейших исторических фактов.

1.2. Математик: Простая модель общества: производители, продукт, управленцы. Прежде всего, я хочу пояснить, почему выступаю со столь необычной темой и как понимаю проблему человеческого общества, социальных отношений и их историй.

Историю человеческого общества я воспринимаю как продолжение эволюции жизни на Земле, проблему эволюции общества людей – как задачу составления математических моделей, способных объяснить наблюдаемую реальность и подсказать возможные пути дальнейшего совершенствования.

Представляется, что человеческое общество настолько сложно и многообразно, а адекватная математическая модель настолько сложна и необозрима, что такой подход безнадежен. В какой-то мере это подтверждается, поскольку пока никаких результатов на этом пути получить не удалось: всё, что я читал об обществе людей и его истории, носит описательно-объяснительный гуманитарный характер.

В последние годы я увлёкся идеей простых математических моделей достаточно сложных объектов и понял, что иногда с их помощью на очень сложные вопросы возможно просто ответить. Таковы модели кризисов сердца, двуногой ходьбы, инфекционных заболеваний, игры в отгадывание, загадок Каспийского моря и др. (Неймарк Ю.И. Математическое моделирование как наука и искусство и роль простых моделей в познании мира // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Математическое моделирование и оптимальное управление. Вып. 1(27). 2004. С. 5-13).

Человеческое общество можно описать простой моделью

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (a - bx - ly + cz)x, \\ \dot{y} &= (-d - mx - ey + fz)y, \\ \dot{z} &= \begin{cases} F = g \frac{1 + \varepsilon_1 y}{1 + \varepsilon_2 y} \cdot \frac{ux}{1 + \delta z} - hx - ky & \text{при } z > 0 \text{ или } z = 0 \text{ и } F > 0, \\ 0 & \text{при } z = 0 \text{ и } F \leq 0, \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

отражающей факт объединения конкурирующих людей в общество для более эффективного производства необходимого для жизни продукта. Эту модель можно назвать «Производители – продукт – управленцы». Производители – это x , управленцы – y , продукт – z . Она трёхмерна и содержит 15 параметров. В первоначальной модели подчеркнутые члены отсутствовали и последующее относится к упрощенной модели, до введения управления.

Удалось обнаружить, что с ростом уровня технологии g помимо производителей x возникает сначала продукт z , а затем управленцы y , и что возникновение управленцев происходит вне зависимости от параметра их полезности $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ (Неймарк Ю.И. Математические модели в естествознании и технике. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2004).

При низком уровне технологии, $g < h$, имеется единственное устойчивое состояние равновесия $x = x^*$, $y = z = 0$, то есть общество одних производителей. При среднем уровне технологии, $h < g < h(1 + (\delta d)/f)$, появляется накопленный

продукт $z = z^*$. При высоком уровне технологии, $g > h(1 + (\delta d)/f)$, появляются ещё и управленцы. При этом глобально устойчивое равновесие $x = x^*$, $y = y^*$, $z = z^*$ может стать неустойчивым, и могут возникнуть автоколебания. Из сказанного видно, что возникновение управленцев не зависит от ϵ_1 и ϵ_2 , то есть они возникают просто потому, что общество может их прокормить.

Я с удовлетворением воспринял выявленную зависимость состава и динамики общества от уровня технологии, но не сразу оценил значимость второго вывода. А с ним связана, на мой взгляд, многовековая трагичность истории человечества, как проявление кризиса эволюции жизни с его приходом.

До появления человека вожака стаи – самый сильный, умный и полезный, и как только появляется более достойный, он его сменяет. В человеческом обществе с некоторых пор это не так. Согласно модели (1) это тоже не так: управленцы – аналог вожака – могут быть не только не полезными, но и вредными, и это не мешает их появлению и не ведёт к исчезновению, если, конечно, уровень технологии g высок, $g > h(1 + (\delta d)/f)$. Это, естественно, ведёт к конфликту между управленцами и производителями и, возможно, внутри управленцев. Конфликт не нашёл отражения в модели, но это наблюдается в течение всей истории человечества и ведёт, как правило, к действиям управленцев, способствующим их укреплению и неотстранению. Добиться этого удаётся одурачиванием и подавлением силой, имитацией своей нужности, присвоением властных полномочий и их злоупотреблением. При этом используются любые средства, вплоть до уничтожения конкурентов, активизации агрессии, раздоров, ненависти, войн, террора на национальной, религиозной, классовой и других основах, изобретением внешних и внутренних врагов, территориальных и других претензий. Остановить этот процесс очень трудно, поскольку он охватывает весь мир и сам себя поддерживает. В прошлом веке он привёл к двум мировым всеокрушающим ужасным войнам, сегодня – к расцвету терроризма и гигантскому отставанию социального совершенствования от фантастических успехов промышленной и информационной революций. Это, по существу, кризис эволюции жизни с появлением человека. Многие видят выход, причём окончательный, в либерально-демократическом обществе. А К. Лоренц, напротив, увидел в этом обществе «устрашающие десять смертных грехов человечества», могущих привести человечество к катастрофе.

Прежде чем продолжить обсуждение современных последствий этого дефекта организации общества, обратим внимание на решающую его роль в истории человечества. Дело не только в конфликте и его локальных последствиях, а в извращенном формировании общества и взглядов людей на него, в трансформации способствующего обществу управления в неограниченную власть, выделении в обществе особой главенствующей части, живущей своей привилегированной жизнью, использующей народ для ее осуществления и лишь отчасти заботящийся о нем в плане своих интересов и целей. Причина кризиса обнаруживается моделью (1), но может ли она объяснить то, что предпринимает человечество для его преодоления? В целом – нет, отчасти – да. Точнее, в той её части, которая вызвана стремлением к материальному благополучию и достатку. При этом деятельность людей направлена на управление параметрами модели.

Это управление, в частности, можно осуществить через давление производителей на управленцев (член txy во втором уравнении модели (1)). Увеличивая m , можно устранить неприемлемых управленцев или принудить их повысить свою эффективность. Этого же можно добиться, увеличивая h . Желание увеличить потребление h производителями требует увеличения эффективности как производителей (увеличение μ), так и управленцев (увеличение $\varepsilon_1/\varepsilon_2$). Сказанное следует из условия $mg > h(1 + (\delta(d + tab^{-1}))/f - mcb^{-1})$ наличия глобально устойчивого равновесия и надлежащей зависимости m от $\varepsilon_1/\varepsilon_2$.

Таким образом, кризис – дефект объекта, описываемого моделью (1), – может быть преодолен с появлением у общества возможности его управления (параметрами и непосредственным воздействием) и способности им воспользоваться. Эти возможности могут быть в двух планах: описанным давлением на управленцев, что требует соответствующих прав, и выборностью управленцев при условии достоверных сведений о них и зрелости общества. Либерально-демократические общества по своей идее такие возможности предоставляют. Отсутствие возможности эффективности управления приводит к революционному пути его реализации.

Расширенная модель (1) – это описываемый ею динамический процесс под многообразием хаотических и случайных воздействий природы и людей (государственные, общественные и неформальные объединения; образ жизни, обычаи и нравы, потребности и интересы, инстинкты; верования и мировоззрение, средства массовой информации; науки и искусства, сельское хозяйство и промышленность; выборы и назначения; войны, стихийные бедствия, эпидемии и др.). Это хаотическое случайное воздействие предсказуемо только на небольших участках времени и то далеко не всегда. Но, наверное, можно говорить о его общих тенденциях.

В частности, можно указать мотивы и цели управления и известные пути его реализации. Управленцы заинтересованы в эффективности производителей, совершенствовании технологии, уменьшении доли производителей в производимом продукте и увеличении своей доли. Производители, напротив, – в увеличении своей доли и увеличении эффективности управленцев. Реализация желаний управленцев ими исторически узурпирована: они власть. Производители реализации своих желаний и ограничения желаний управленцев должны добиваться. Это сделать можно через профсоюзы, другие общественные организации, через оппозицию, через контроль за деятельностью управленцев, опирающийся на независимые средства массовой информации и правоохранительные органы, выборность власти и досрочное ее отстранение. Ослабление узурпации власти, коррупции и сговора возможно путем разумного разделения ее полномочий.

1.3. Гуманитарий: Математическая модель и историческая реальность.

Из приведенных в предыдущем параграфе математических зависимостей с очевидностью следует, что тип общества, скорость и направленность его изменений определяется, прежде всего, наиболее динамичными членами уравнений (1): y (управленцы), g (уровень технологии) и $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ (характеристика эффективности деятельности управленцев). Компьютерное моделирование показывает, что именно от изменения первого из них, главным образом, зависит сохранение устойчивого равновесия или

переход в режим автоколебаний. Попытаемся интерпретировать эти выводы применительно к социально-экономическим и политическим реалиям.

Прежде всего, необходимо верифицировать используемые символы, выявить их социальное содержание. Это довольно просто сделать на уровне традиционного общества, не вступившего в фазу модернизации, то есть того типа общества, которое существовало от перехода к оседлому земледелию и, если говорить о Западной Европе, до начала XIX века. В этом обществе производители (x) (крестьяне-земледельцы) – это те, кто непосредственно своим трудом преобразует материал природы в потребительские ценности, а управленцы (y) – те, кто, не принимая непосредственного участия в производительном труде, участвует в потреблении созданного производителями продукта (z). В традиционном земледельческом обществе технология меняется чрезвычайно медленно, и именно фактор управленцев оказывается решающим. Превышение размеров произведенного продукта уровня, необходимого для прокормления самих производителей, создает возможность появления управленцев. Предполагается, что их выделение из первоначальных общин вызывается необходимостью организации жизни земледельцев и их защиты. Однако, так как социальные позиции управленцев с самого начала связаны с обладанием властью, опирающейся на вооруженное принуждение, то их доля в потреблении не зависит от их полезности. Верхней границей этой доли, при которой общество сохраняется, служит размер прибавочного продукта (z^*), то есть всего произведенного продукта за вычетом того, что необходимо для воспроизводства жизненных сил производителя, содержания его потомства и нового производственного цикла. Если управленцы выходят за предел естественных ограничений и присваивают часть необходимого продукта, неизбежны упадок и, если такое положение сохраняется достаточно долго, распад социальной системы. Обычно это происходит в обществе, где управленцы не находятся в длительных отношениях с производителями и не заинтересованы в сохранении их дееспособности.

Реальная граница присвоения прибавочного продукта управленцами в конкретных исторических обстоятельствах зависит от соотношения сил в их отношениях с производителями, от способности производителей сопротивляться домогательствам управленцев, от способности управленцев преодолевать это сопротивление. Это соотношение сил в математической модели выражается символами b , l , m , e , которыми обозначаются внутренние и взаимные конкуренции производителей и управленцев (x и y). Тип общества, его динамика определяется, прежде всего, именно этим соотношением сил. При полном доминировании управленцев производители не имеют ни возможности, ни мотивации расширять производство, совершенствовать используемые ими орудия и методы (μ), общество оказывается равновесно застойным. В связи с тем, что в традиционном обществе только совершенствование орудий и методов земледелия может компенсировать истощение почв и трудность введения в оборот новых земель (знаменатель $1 + \delta z$), неизбежна медленная деградация. Тем не менее равновесно застойное состояние может (если принимать во внимание только внутренние факторы) сохраняться неопределенно долго. Но, когда данное общество оказывается в меняющейся внешней среде, когда у него появляются агрессивные соседи, оно либо становится их добычей, либо вынуждено искать другую структуру, которая обеспечивает динамическую устойчивость.

Условие возникновения и существования общества в состоянии динамической устойчивости – ограничение доли управленцев и сохранение в распоряжении производителей доли прибавочного продукта (z^*), достаточной для вознаграждения за дополнительные усилия и расширенного воспроизводства. Чем больше эта доля, тем динамичнее общество, тем быстрее растет его богатство (z) или, выражаясь современным экономическим языком, ВВП (валовой внутренний продукт). Нарушение равновесия, кризисные состояния возникают тогда, когда в результате изменения соотношения сил в пользу управленцев и появления у них дополнительных потребностей начинается борьба за передел прибавочного продукта. Наступление одной из сторон наталкивается на сопротивление, порождает контратаку другой стороны. Чем дальше заходит одна из сторон конфликта, тем обычно сильнее ответный удар и дольше период автоколебаний, тем глубже социальная дезорганизация и тем труднее и с большими потерями происходит возвращение к устойчивому равновесию. Наибольшая степень устойчивости, которая в этом случае носит, как правило, динамический характер, достигается в результате компромисса борющихся сторон. В случае, если полностью побеждает одна из сторон, ответный удар только откладывается, либо для закрепления своего торжества победители уничтожают в обществе всякую активность и возможность адаптивных перемен. Достигнутое равновесное состояние не является прочным и в любом случае ведет к деградации общества. Еще чаще нарушения равновесия возникают в результате конфликтов между различными группами управленцев (элиты), которые порождаются борьбой за передел прибавочного продукта и/или за престиж, связанный с объемом власти. При совпадении конфликта внутри правящей элиты с конфликтом между производителями и управленцами возникает особенно глубокое нарушение равновесной устойчивости с длительным периодом кризиса.

В традиционном обществе положительное влияние управленцев на благосостояние общества (z) ограничивается поддержанием внутреннего порядка, охраняющего производителя и его имущество от грабителя и защиты от внешнего агрессора. В соотношении $(1+\varepsilon_1y)/(1+\varepsilon_2y)$, где числитель – положительное влияние управленцев на ВВП, а знаменатель – их отрицательное влияние, при равновесном состоянии рост числителя не может быть источником развития, то есть само это выражение в обществе традиционного типа не может быть больше 1. По точной мысли М.О. Ключевского, власть надо благодарить не за то, что она создает порядок, а за то, что она не разрушает его. Уменьшение частного за счет роста знаменателя при росте аппетита управленцев ведет к падению ВВП (z). Уменьшение числителя, означающее, что управленцы в результате внутреннего конфликта (εy) не способны выполнять свои упорядочивающие и защитные функции, ведет к потере равновесной устойчивости и, в конечном счете, к такому же результату.

* * *

Приведенная схема, непосредственно иллюстрирующая математическую модель, адекватно облекается живой плотью исторического материала. В ранней истории народов Евразийского континента и Магриба решающую роль играло длившееся на протяжении тысячелетий противостояние оседлых земледельческих обществ

окружавшим их племенам, не имевших достаточных возобновляемых источников пропитания и сделавших своим промыслом грабеж богатых соседей. Аравия, Северное Причерноморье, просторы Центральной Азии выбрасывали волну за волной воинственные племенные союзы скотоводов кочевников, атаковавших Древний Египет и Месопотамию, восточные границы Римской империи, Византию, земледельцев восточно-европейской равнины, Китай, Индию, острова земледельческой цивилизации в Средней Азии, Ирана. С севера Европы из своих лесов на протяжении многих веков наступали на Рим германские племена. За военной добычей спускались со своих вершин в долины горцы Альп и Кавказа. Пиратством на морских торговых путях и набегами на приморские земледельческие общества с глубокой древности занимались племена, жившие на берегах Средиземного моря, на островах и азиатских берегах Индийского и Тихого океанов, в Скандинавии. Защита от таких набегов требовала военной организации, поэтому появляются военные дружины со своими предводителями. Эти предводители и их приближенные принимают на себя также функции поддержания порядка, регулирования отношений внутри общины, а иногда и суда. Складывается привилегированная группа знати, существующая за счет дани, которой обкладываются землепашцы. В некоторых случаях такой знатью становятся завоеватели кочевники, подчинившие себе земледельческие общины или приглашенные ими для защиты. Военные правители стремятся распространить свою власть на большее число данников и ведут постоянные войны друг с другом. Опираясь на централизованную бюрократическую систему управления, свободную от контроля общества, на постоянные армии, правители обременяют производителей устанавливаемыми по собственному произволу налогами и повинностями.

Время от времени удачливые честолюбивые правители завоевывают огромные территории, подчиняют себе жителей, захватывают добычу и рабов, создают империи. Однако, как правило, тяготы, лежащие на подданных таких завоевателей, приводят к восстаниям, длительным периодам нестабильности, распаду государства на части, отбрасывают общество далеко назад. Нередко в эти моменты на ослабевшие аграрные государства и набрасываются воинственные кочевники.

Выше речь шла о некоторых основных общих чертах формирования ранних цивилизаций. Однако в разной географической и геополитической среде в различное историческое время типы их развития, экономические, социальные и политические черты, идеология, общественная психология, а следовательно, и оставленное ими наследие были совершенно различны.

Две древнейшие цивилизации: в долине Нила и в Междуречье Тигра и Евфрата основывались на поливном земледелии, требовавшем проведения гидротехнических работ, привлечения большого количества рабочих рук и централизованной координации. Возникшие здесь государства принимают характер деспотий с огромной степенью централизации, неограниченной властью обожествленного верховного правителя, разработанной системой налогообложения, чиновничьим аппаратом для сбора налогов и управления общественными работами. Особой привилегированной группой, существовавшей за счет земледельцев, становятся жрецы, передающие богам просьбы соплеменников и сообщающие людям в своих предсказаниях волю и намерения богов. Жрецы оказываются первыми систематическими наблюдателями за природными явлениями, прежде всего за звездным небом, хранителями знаний, по-

лезных для ведения сельскохозяйственных работ. В деспотиях Египта и Междуречья, как в и некоторых более поздних централизованных государствах, жрецы укрепляют власть верховного правителя, обожествляя его и поддерживая его культ. Мощное государство, в котором управленцы представляют единую иерархическую, организованную структуру, позволяет безгранично подчинять себе производителей и изымать весь или почти весь прибавочный продукт.

Особенно поучительна история Китая, в котором заложенные три тысячелетия назад экономические, социальные, политические, идеологические и психологические черты общества сохранялись в мало измененном виде до начала прошлого столетия, да в какой-то степени существуют и поныне.

Не раз периоды раздробленности сменялись объединением большей части территории, занятой современным Китаем, в могучие империи с мощными армиями, изощренной бюрократической системой управления, сбора налогов, трудовых повинностей, поощрений и наказаний, возводившие грандиозные оборонительные сооружения, строившие оросительные сооружения, дороги и дворцы. И, как правило, непомерные налоги и повинности, на которых строилось все это величие, приводили к взрывам народных мятежей, империи рушились, и никакие укрепления не могли спасти от вторжения воинственных кочевников с севера.

Знаменитый Цинь Ши-хуанди в III веке до н.э. впервые создал империю, объединившую не только области в междуречье Хуанхе и Яньцзы, но и южные территории, включая и север Индокитая. При нем была построена Великая Китайская стена, сооружались дороги и транспортные каналы, были уничтожены традиционные границы между покоренными царствами, создано новое административное деление, выстроена ставшая позднее классической чиновничья вертикаль власти во главе с самим императором (Сыном Неба). Все действия бюрократии и подданных регламентировались единой системой законов. Нарушения карались страшными наказаниями, среди которых отсечение головы считалось самым легким. Была реформирована письменность, введены единые системы мер и денег. Но крестьянам пришлось за все это величие расплачиваться увеличением в десятки раз налогов и повинностей. Непомерные подати вынуждали земледельцев закладывать земли ростовщикам, продавать в рабство членов своей семьи и, в конце концов, самих себя. Не удивительно, что империя не пережила своего создателя. Сразу после смерти Цинь Ши-хуанди восстания охватили страну. Начались кровавые междоусобные войны. Как повествует источник: «...люди ели человеческое мясо, больше половины населения вымерло». Великая стена не смогла остановить гуннов, которые переправлялись через Хуанхе, грабили и уводили в рабство незащищенное население. Такова расплата за величие.

Пришедший к власти один из вождей повстанцев Лю Бан, основавший новую династию, освобождает государственных рабов, снижает налоги, смягчает наказания, к управлению в деревнях и уездах, наряду с чиновниками, привлекаются представители народа. Восстанавливается хозяйственная жизнь, возрождается торговля и ремесла. Параллельно идет укрепление государственной власти, восстанавливается бюрократическая система управления, начинаются военные походы. И снова возросшие государственные тяготы, усиленные имущественным расслоением, в конце I века до н.э. вызывают социальный взрыв – знаменитое восстание «красных бровей». После пяти веков раздробленности, междоусобных войн, не прекращающихся набегов кочевников с севера, Чжоу Янцзяню, основателю династии Суй в 581 году снова удается объединить Северный и Южный Китай, его сын Ян-ди ведет войны с Кореей и Вьетнамом, строит Великий канал соединяющий Хуанхэ и Янцзы, воздвигает в столице дворцы, восстанавливает Великую

Стену. И снова обремененные чрезмерными налогами и повинностями крестьяне восстают и в 618 году сметают династию. Крестьянская война 847–901 годов приводит к падению и следующей династии Тан. После трех столетий расцвета экономики и культуры при династии Сун (980–1279) терзаемый воинственными северными соседями и внутренними волнениями Китай оказывается под властью монголов, а потом манчжуров. Власть богдыханов манчжурской династии Цин, правившая с 1644 по 1911 год, опиравшихся на всевластную и разветвленную бюрократию, на столетия заморозила общество. Изолированный от внешнего мира Китай, некогда опережавший Европу на многие века, к XX веку отстал от нее на целую эпоху.

В приведенных примерах из истории крупнейших аграрных государств древности наглядно иллюстрируется характерная для традиционного общества такого типа ограниченность положительного влияния правителей (управленцев) на устойчивость общества и его продуктивность. Вместе с тем, очевидна неограниченность их негативного влияния.

Очень важная сторона дела, подтверждающая такой вывод, открывается из эпизода всемирной истории, получившего название античности и оказавшего громадное влияние на ход последующей истории человечества. На побережье и островах Эгейского моря, в центральной Италии к середине первого тысячелетия до нашей эры складывается цивилизация совершенно иного типа, не имевшая аналогов. Земледельческие поселения в районах, удаленных от кочевий воинственных скотоводов, защищенные с севера горами, а с юга морем, не нуждаются в особой военной организации. В случае нужды сами крестьяне вооружаются и отражают нападение врага или атакуют соседей. Военные предводители и правители (архонты в Афинах, консулы в Римской республике) выбираются гражданами и лишены возможности применять против них насилие. Здесь нет нужды в постоянных налогах. Их отсутствие, использование дешевого рабского труда в земледелии и в домашнем хозяйстве, доходы от торговли оставляют у производителей долю продукта, позволяющую повышать продуктивность хозяйства, создают спрос на изделия ремесленников, дают возможность расходовать общественное богатство не на содержание армий и чиновников, а на развитие искусства и науки. Вряд ли есть какое-либо направление человеческой мысли, истоки которого не восходили бы к Античной Греции. Греческая скульптура, храмы и гражданские сооружения, созданные древними греками и римлянами, и в наши дни остаются эталонами прекрасного. Однако особенно важным для последующей гражданской истории оказались три наследия античности: правовое государство в форме демократической или, по терминологии Аристотеля, конституционной политической организации, специфическое понимание сущности и предназначения закона и новое содержание права собственности. Греческий город-государство, образцами которого, конечно, служат Афины, Рим периода республики, были государственными образованиями, не навязанными сверху военными вождями или завоевателями, а результатом самоорганизации в процессе эволюции родоплеменной структуры. В ходе этой эволюции возникающие кризисы и конфликты разрешались не восстаниями и вооруженным подавлением мятежников, а реформами, формирующими и совершенствующими государство. Реформы Солона и Клисфена в Афинах, Сервия Туллия в Риме снимали препятствия на пути естественного процесса перехода от родового общества, основанного на кровных связях, к политическому, основанному на территории и собственности. Эти реформы определяли

институционные основы и структуру государства, отвечающие вызову времени. Член рода превращался в гражданина, связанного с государством не по происхождению, а в соответствии с местом проживания и размером собственности. Государство было тождественно с военной самоорганизацией, где каждая группа в зависимости от уровня богатства образовывала определенный род войск. В древнегреческих полисах, в Римской республике впервые появились зачатки разделения властей. Высшими органами самоуправления (предтечей законодательной власти нового времени) были Сенат и Народное собрание. Исполнительная власть находилась в руках уже упоминавшихся выше архонтов и консулов, должности которых не наследовались и не захватывались, а были выборными с ограниченным строго установленным сроком пребывания на них. При Солоне был создан и независимый судебный орган – Ареопаг, состоявший из бывших архонтов. Отступления от этого порядка к диктатуре правителя (тирана) или власти немногих богатых (олигархии) рассматривались как исключение из правила и осуждались. Политический опыт греческих полисов был обобщен Аристотелем в его знаменитой Политике, где говорится о правильных и неправильных типах государства. Различие между ними не в том, правит ли один, немногие или весь народ, а в верховенстве закона над властью или власти над законом.

Само понятие закона и его предназначения здесь прямо противоположно тому, которое господствовало как в Восточных деспотиях, так и в абсолютистских государствах Европы. Закон, по мысли Аристотеля и Цицерона, призван в равной степени защищать граждан и их имущество от посягательств как грабителей, так и правителей. Противоположное понимание наиболее отчетливо было сформулировано китайскими легистами эпохи Цинь: закон – орудие в руках императора и его чиновников, позволяющее держать подданных в повиновении.

Правовое государство, то есть такое, где закон выше правителя, и античное понимание предназначения закона создают предпосылки для третьего важнейшего институционного вклада античности в положительный опыт человечества – частной собственности. Отношения собственности возникли задолго до основания Афин и Рима. О собственности как праве упоминается в древнейших сводах законов. О собственности говорится и в Саллической, и в Лонгобардской, и в Русской, и в других «Правдах», отражающих отношения на стадии разложения родо-племенного строя. Однако терминология не должна вводить в заблуждение. Под собственностью во всех этих случаях понимается пользование и владение. Наследование, купля и продажа имущества, в том числе и главного богатства – земли, которые регулируются этими сводами законов и обычаев, не отменяют высшего права верховного правителя, выступающего в качестве собственника всей земли, а если говорить о варварских «Правдах», права рода, за пределы которого земля не может отчуждаться. Только реформы Солона, разрешившие произвольно завещать имущество, положили начало становлению подлинного права собственности как неограниченного и произвольного распоряжения, сформулированного в Римском праве как «*uti et abuti*» (использовать и уничтожать).

Правовое государство, легитимность которого опирается не на веру в божественное происхождение власти, а на волеизъявление народа, закон, защищающий в равной степени личность и имущество каждого члена общества, право частной

собственности – эти три изобретенные и реализованные в Афинах и Римской республике института – главное наследство, оставленное античностью человечеству. Последующие два тысячелетия убедительно показали, что именно эти институты создают каркас для возникновения общественного устройства, благоприятного для существования людей и реализации их созидательного потенциала. Можно понять Френсиса Фукияду, рассматривающего торжество этих институтов во всечеловеческом масштабе как некий идеальный вариант завершения истории.

В данном случае для нас особенно важно то, что именно в условиях ограничения власти управленцев не только возникло общество, которое на тысячелетия остается образцом процветания, но и созданы и осмыслены принципы, конструирования институтов, защищающих общество от их разрушительного влияния.

Перерождение Римской республики в Империю, включившую в свой состав Грецию, и разгром этой империи германцами, зашедшая в исторический тупик Византия все же не стерли из исторической памяти народов Западной Европы античного наследия. Эпоха Возрождения воскресила из небытия античное искусство. Когда же исторические условия в ряде государств Западной Европы привели к ограничению власти королей и феодальной знати, не умиравшая память об античных институтах оказалась одной из предпосылок формирования современной рыночной экономики и правового демократического государства.

События последнего десятилетия оживили интерес к обсуждению проблемы Восток–Запад. В частности, опять всплыл старый вопрос: почему Запад богат, а Восток беден. Идеологи и политики Востока усматривают в этом последствия колониализма. Западные левые вполне согласны с таким объяснением. Не вдаваясь пока в обсуждение далеко не простого сюжета о последствиях колониализма, мы вправе поставить вопрос более существенный: «Почему Запад колонизировал страны, явившиеся родиной древнейших на земле цивилизаций, хотя в разрезе тысячелетий следовало бы скорее ожидать обратного?» Можно полагать, что, в конечном счете, ответ следует искать в разной наследственности: Восток унаследовал психологические, политические и правовые традиции аграрных деспотий, а Запад стал восприимчивым к институтам античности.

* * *

Интерпретация модели (1) применительно к условиям современного общества ставит проблемы более сложные, чем те, которые возникали при рассмотрении общества традиционного. Речь пойдет о периоде, который начался на рубеже XVIII и XIX веков и одними авторами называется временем современного экономического роста, другими – индустриальным обществом, третьими – обществом второй волны, а четвертыми – капитализмом. Специального внимания заслуживают последние полвека, когда лидирующие в экономике страны вступили в фазу, обычно называемую постиндустриальной.

Выше уже говорилось о двух преимуществах, выделивших человечество из животного мира: разум (способность строить абстрактные модели природных процессов) и коллективная память общества (способность передавать и накапливать знания и опыт).

Современная эпоха отличается от всей предшествующей истории именно тем, что два названные выше преимущества проявляются с небывалой прежде интенсивностью. С XVI–XVII веков в некоторых странах Западной Европы нарастают быстрые процессы перемен. В результате уже в первой четверти XIX века благосостояние, а говоря шире, качество жизни людей в каждом конкретном обществе определяются уровнем активизации интеллектуального потенциала людей, использованием его для развития естественных наук, совершенствования технологии, ее применения в производстве и обслуживании. Степень проникновения в технологию достижений естествознания теперь в значительно большей мере определяет объем ВВП, чем число непосредственных производителей. Китай, имевший до конца XVIII века наибольший в мире размер ВВП, в XIX веке оказывается позади Англии, а потом колоссально отстает и от других индустриальных стран Запада.

Почему рубежом является конец XVIII века, ведь познание законов природы восходит еще к временам античности, и развитие технологии имело место уже со времени использования простейших рычагов и изобретения колеса? Ответ прост: на протяжении тысячелетий оба эти процесса шли, почти не пересекаясь. Технологические усовершенствования происходили за счет накапливания опыта в самой практике производственной деятельности и отдельных случайных изобретений. Как раз с рубежа XVIII и XIX веков начинается системный рывок – происходит переворот в технологии за счет использования естественнонаучных открытий.

Для понимания специфики интерпретации математической модели (1) применительно к новой эпохе особенно важно отметить, что и сами естественнонаучные открытия появляются в это время не случайно. На них возник спрос, созданный развитием рыночной экономики. В XVII веке сначала в Нидерландах, а потом в Англии сложились условия, в которых возродились и получили дальнейшее развитие институты, некогда возникшие в античных республиках: законы как инструмент защиты личности и ее имущества, правовое государство, гарантирующее соблюдение этих законов, и, как результат, неприкосновенность частной собственности. Впервые со времен античности возникла политическая система, в которой общество и государство уравнивали друг друга. Государство было достаточно сильным, чтобы защитить подданных (граждан) и их имущество от грабителей и внешних завоевателей, поддерживать правовую инфраструктуру рыночной экономики. Общество, со своей стороны, благодаря представительным учреждениям, гражданским организациям и независимым судам, стало достаточно сильным, чтобы защитить граждан и их имущество от посягательств самого государства². Такое равновесие (правовое государство) создает условия для стимулирования инвестиций и развития предпринимательской активности. Центральной фигурой в обществе оказывается теперь управленец совершенно иного типа – предприниматель, превращающий деньги и материальные средства производства – в промышленный капитал. Предприниматель, стремящийся к увеличению своей прибыли и победе над конкурентами, сначала совершенствует производство за счет лучшего использования традиционных техно-

² Несомненно, возникновение политических систем нового типа явилось результатом различных факторов (появлением мирового рынка после толчка данного Великими географическими открытиями, реформации, особенностями внутренних условий в странах лидерах), но все это остается за рамками данной статьи.

логий, а потом активно ищет пути технологических усовершенствований, создавая спрос на достижения науки. Иными словами, активизация интеллектуальных усилий предпринимателей порождает мотивацию интеллектуальной активности ученых и инженеров.

Таким образом, в отличие от традиционного общества, в индустриальном и постиндустриальном обществе активно действуют две категории управленцев. Сохраняется политическая верхушка, выполняющая властные и регулирующие функции. Однако роль мотора, движущего современное общество, играет его экономическая элита – предприниматели. Как и раньше, позитивное влияние политических управленцев ограничено. Рост числителя в отношении (ϵ_1/ϵ_2) за счет активности политических управленцев происходит до тех пор, пока они совершенствуют конституционные основы общества и выполнение функций пресечения действий лиц и групп, нарушающих закон, то есть ущемляющих законные интересы других лиц и групп, общества в целом. Всякая активность политических управленцев, выходящая за эти границы, увеличивает знаменатель. Причем такой рост не имеет естественных ограничений и может привести к разрушению социального организма. Как показывает исторический опыт, только контроль общества через независимые институты, создаваемые разделением властей, может заставить политических управленцев поддерживать необходимый уровень полезности и воспрепятствовать их разрушительной активности.

Экономические управленцы – предприниматели своей активностью неограниченно способствуют росту ϵ_1 . Вместе с тем, некоторые виды их активности: создание монополий, разрушение экологической среды, ущемление законных интересов потребителей приводят к росту ϵ_2 . Как раз полезная функция политических управленцев состоит в создании условий для активности первого типа и пресечения активности второго типа.

В дальнейшем, чем больше за счет технологии растет производительность общественного труда, тем большая относительно и абсолютно доля человеческого и материального ресурса высвобождается для непроизводственной сферы. Если эти ресурсы используются для развития науки, образования, технологии, инвестиций непосредственно в производство и обслуживание, траектория экономического движения общества становится экспоненциальной. В том случае, когда ресурсы поглощаются для целей политических управленцев (содержания бюрократического аппарата, военных расходов, популистских затрат для сохранения власти) развитие замедляется и траектория становится плоской и даже нисходящей. Особенно пагубные последствия имеет нарушение первоначальных условий технологического скачка – ослабление гарантий частной собственности. Это может быть результатом либо ослабления государственной (исполнительной) власти, которая утрачивает монополию на применение вооруженной силы, когда собственник становится жертвой грабителя, либо ослабления общества перед лицом государства, любой чиновник которого в этом случае может в любое время экспроприировать собственность или ограничить возможность ее целесообразного использования. Последний вариант удачно назван А. Тоффлером «режимом излишнего порядка», который он противопоставляет «социально необходимому порядку».

История России на протяжении последних 15 лет наглядно демонстрирует последствия обеих этих крайностей. Предшествовавшие 70 лет российской истории

показали бесплодность попытки исключить из экономики предпринимателя и заменить его государственным управлением. Не следует представлять себе государство в виде некой абстрактной мистической силы, которая по определению призвана заботиться о благе общества в целом. Государство (если понимать под ним исполнительную власть) – это организация чиновников, каждый из которых озабочен, прежде всего, реализацией своих собственных интересов. Как уже отмечалось выше, интересы общества они обеспечивают лишь в той мере, в какой общество через свои независимые от исполнительной власти институты осуществляет контроль над ними. Государственное управление экономикой означает, главным образом, то, что целеполагание осуществляется не предпринимателями-собственниками, заинтересованными в эффективности предприятия в долговременной перспективе, а назначенными сверху чиновниками. Такие чиновники ориентированы на личную кратковременную выгоду и благорасположение вышестоящих в пирамиде власти³. Поэтому их интеллектуальная энергия направлена не на абсолютную максимизацию долговременных результатов, а лишь на некоторый относительный рост для достижения показателей, по которым оценивается их деятельность. Сами эти показатели, как показывает опыт, отбираются по простоте их численного выражения (просто потому, что их легче считать) и основаны на экстраполяции траектории прошлого движения. Впрочем, никакие исчисляемые одномоментные критерии не могут отражать потенциальные возможности, открываемые теми или иными решениями руководителей, так как они могут быть выявлены лишь в результате рыночной конкуренции⁴. Об этом необходимо еще раз напомнить, так как Россия опять пытается плыть против течения. Во всех странах с вменяемыми правительствами завершается процесс приватизации последних отраслей и предприятий, находившихся в руках государства. В России начался обратный процесс ренационализации ведущих отраслей, то есть перехода их под управление чиновников. Это одно из проявлений усиления давления на общество правительственной бюрократии (политических управленцев).

В условиях распада старых социальных институтов и структур и полной утраты обществом после 70 лет подавления малейшей инициативы всякой способности к самоорганизации чиновники оказались единственной способной к организации и сплочению социальной группой. Как и всегда было в истории, неограниченный госу-

³Сказанное не означает, что государственные органы должны быть полностью отстранены от экономики. Но как показывает опыт стран-лидеров, их вмешательство эффективно лишь когда оно либо носит консультативный характер, либо использует для регулирующего воздействия не административные, а финансовые рычаги в виде налоговых льгот и субсидирования общественно необходимой, но коммерчески бездоходной деятельности (фундаментальные исследования, охрана окружающей среды и пр.).

⁴Нечто подобное наблюдается и в современных корпорациях в США, которые управляются не собственниками, а наемными менеджерами. Недавние громкие скандалы в компаниях Энрон, Уорлд Ком и других наглядно продемонстрировали опасную тенденцию появления того же «показательного фетишизма», который разрушил плановую государственную экономику СССР и его спутников. Поставив вознаграждение высших менеджеров в зависимость от капитализации стоимости компании (курса ее акций), советы директоров, представляющие интересы собственников часто лишь номинально, создали условия, при которых для этих менеджеров сиюминутный рост капитализации превращается в самоцель. Поэтому некоторые из них поддаются соблазну добиваться увеличения стоимости акций не реальным повышением конкурентоспособности компании, а фальсификацией ее отчетности. Любопытно, что сразу же после введения оценки школ Соединенных Штатов по показателям тестов, здесь возникли те же следствия, которые в Советском союзе получили название проценомании (отчисление неуспевающих перед началом последнего учебного года, искажение результатов тестов и пр.).

дарственный контроль ведет к застою и деградации. Единственное, что может противостоять такой тенденции, – возрождение институтов общества, способных ограничивать государственную бюрократию – самоорганизация граждан для защиты своих интересов на всех уровнях от населенного пункта до федерального. В условиях современной глобализации повторение китайского многовекового застоя невозможно. Поэтому без достаточно быстрого появления необходимых демократических институтов неизбежен социальный взрыв и окончательный распад страны.

Конечно, во все предшествующие рассуждения нужно внести важный корректив. Сам по себе экономический рост не может быть сознательной целью общества. Такой оправданной целью может служить лишь упомянутое выше качество жизни, которое не сводится к экономическому благополучию, хотя последнее является его важнейшей составляющей. Образование, здравоохранение, бытовые условия, политическая и духовная свобода, возможность творческого самовыражения – все это либо зависит от экономики, либо, как свободы и гарантии прав, является условиями ее роста. Правда, ссылаясь на опыт гитлеровской и сталинской диктатур, современного Китая, других стран Азии, иногда утверждают, что между демократией и экономическими успехами нет прямой связи. В действительности, весь исторический опыт показывает, что в условиях диктатуры возможно лишь догоняющее развитие, копирующее то, что уже сделано в передовых странах. Нормальный экономический рост осуществляется за счет творческой энергии людей (достижений науки и техники), инвестиций в производство части ВВП. В странах с авторитарным или тоталитарным режимом догоняющий рост, как правило, осуществляется за счет эксплуатации какого-либо не восполняемого ресурса, доставшегося от прошлого или подаренного природой. Если к тому времени, когда этот ресурс оказывается исчерпанным, в стране не создаются рассмотренные выше политические и правовые условия для нормального функционирования рыночной экономики, то есть равновесия между государственной властью и обществом, наступает крах. Так произошло с Советской экономикой, созданной за счет ограбления крестьянства и потом получившей нефтегазовую подпитку. Когда доходы от нефти временно упали, рухнула экономика, а вместе с ней общественный и государственный строй, распалась страна. С другой стороны, в Японии, Южной Корее, на Тайване к тому времени, когда, в основном, оказался исчерпанным конкурентный ресурс дешевой рабочей силы, были созданы политические и правовые предпосылки для перехода в новую фазу развития. Это необходимо учитывать, рассматривая будущие проблемы таких стран, как Россия, по-прежнему сидящая на нефтегазовой игле, и Китай, экономический взлет которого обязан дешевой рабочей силой.

Выше шла речь об экономических и политических основаниях экономического роста. Однако ими, несомненно, проблема не исчерпывается. Начиная с Макса Вебера и кончая Робертом Нортон, виднейшие экономисты последнего столетия указывали на фундаментальную роль ценностного, или, иными словами, психологического фактора. Никто, видимо, не ставит под сомнение его значение. Однако ряд аспектов его влияния остается невыясненным. Во-первых, являются ли психологические особенности различных обществ (цивилизаций или культур) более или менее постоянными или они могут трансформироваться. Странники первой точки зрения склонны объяснять такой культурной составляющей сохранение на протяжении столетий почти неизменного разрыва в уровне экономики между группами стран с постоян-

ством состава этих групп, каждая из которых движется по своей колее. В частности, отмечается, что за последние десятилетия ряд стран Азии совершили гигантский скачок, реализуя ранее зажатый политическими условиями психологический потенциал, между тем, страны Латинской Америки, еще четверть века назад значительно опережавшие азиатов, теперь остались далеко позади. Сторонники второй позиции как раз используют этот пример для обоснования своей правоты, утверждая, что в Японии, Южной Корее, Китае, Индии, Сингапуре изменения политических и правовых институтов повлекли за собой и ценностную переориентацию общества. Однако и среди тех, кто считает, что психологический фактор в данном обществе (культуре) способен трансформироваться, также существуют разногласия. Последователи марксизма утверждают, что изменения в психологии общества определяются изменением базиса, то есть экономикой, экономическими отношениями. В частности, с их точки зрения, Реформация с ее новой протестантской этикой была подготовлена складывающимися капиталистическими отношениями. Однако, с точки зрения Макса Вебера, именно протестантская этика с ее новой системой ценностей оказалась первичным фактором в возникновении капитализма. Трудно надеяться, что удастся найти окончательное решение в этих затянувшихся спорах. В отличие от естественных наук, здесь невозможно прибегнуть к дифференцирующему эксперименту. Однако естественный эксперимент, поставленный историей, позволяет усомниться в полной неизменности психологического аргумента экономического развития. Как известно, Западная и Восточная Германия, Северная и Южная Корея к моменту разделения находились на одном и том же исходном экономическом уровне. Обе Германии и обе Кореи были населены одними и теми же народами с одинаковым психологическим наследием. В результате различия политических условий к 1990 году Западная Германия и Южная Корея стали процветающими экономическими гигантами, а Восточная Германия и Северная Корея безнадежно отстали и по уровню душевого ВВП, и по качеству жизни населения. Интересно отметить, что неблагоприятные политические факторы очень быстро меняют психологию в неблагоприятном для экономического развития направлении. Однако изменения политической ситуации к лучшему далеко не так быстро трансформируют психологический фактор. Через 15 лет после объединения Германии Восток остается ее отсталой окраиной.

Ниже мы вернемся к этой проблеме и попытаемся показать, что суть психологического фактора составляет тип смыслообразующей игры, доминирующей в данном обществе, и готовность членов этого общества принять ее правила.

Комментарий Математика. Выше были приведены исторические данные об эволюции и устройстве человеческого общества разных стран и народов на достаточно большом промежутке времени. При внимательном анализе этих сведений можно выделить в каждом из них группы людей, которые относятся к производителям, управленцам и указать продукт, используемый для поддержания жизни народа. Это означает, что математическая модель (1) «производитель – продукт – управленцы» применима для описываемых выше стран.

Естественно, что 15 параметров, входящих в (1), для каждой страны имеют свои определенные значения, они могут быть постоянными или меняющимися со временем. Решение системы дифференциальных уравнений (1) позволяет получить число x производителей, число y управленцев и количество z производимого продукта, а также данные о разделении продукта между производителями и управленцами

и эффективности его добычи. Эти сведения в некоторой мере определяют судьбу общества в каждой стране, его благополучие, достаток, расцвет, стабильность и, наоборот, кризисы, катастрофы, распад, обнищание, смуты и революции вследствие несправедливого распределения продукта или даже его полного отсутствия ($z = 0$), а также все промежуточные стадии.

Таким образом, математическая модель (1) применима в исторически обозримый период времени для описания развития человеческих обществ, каждое из которых характеризуется своими, только ему присущими параметрами, содержащимися в модели «производитель – продукт – управленцы».

2. Человеческое общество как коллективная игра людей

2.1. Математик: Математическая модель игрового взаимодействия. Как уже отмечалось, либерально-демократическое общество позволяет реализовать более или менее эффективное обоюдостороннее управление жизнью людей, но оно в недостаточной мере удовлетворяет многогранным потребностям человека, более того, оно ведёт к десяти смертным грехам человечества, указанным К. Лоренцем. Кроме того, равновесное противостояние в таком обществе склонно к потере устойчивости.

Что же можно предложить человечеству, желанное, удовлетворяющее его страстям, его врождённым наклонностям и устремлениям? Что больше всего любит и ценит человек, что сделает возможным преодолеть кризис и создать устойчивую и одновременно морально и этически приемлемую организацию социальной жизни? Какой должна быть организация общества, которое сможет обуздать неумеренное потребление и расточительство, обеспечить жизненно необходимые соблюдения требований экологии и уважения ко всем людям, победить необузданную тягу к власти и деньгам и создать устойчивую и одновременно морально и этически приемлемую организацию социальной жизни? Подсказка пришла не от математики, а от великих провидцев человеческого духа и жизни.

Обратимся к Достоевскому: он лучше всех понимал глубинную природу человека. Обратимся к великим поэтам и писателям Пушкину и Лермонтову. Прислушаемся, что сказал один из величайших физиков Эйнштейн и многие другие. **Они сказали: «Игра!»** Точнее и полнее – игровое восприятие жизни. Игра – это борьба, состязание, стремление к победе, величайшей радости и ощущениям полноты жизни. Подчеркнём, честная игра, игра в рамках нерушимых, соблюдаемых и уважаемых правил. Игра, в которой, даже проигрывая, человек ощущает полноту жизни. Но игра не только это. Игровое восприятие жизни лежит в основе успеха в ней. Я позволю себе две маленьких цитаты:

«Жизнь желанная – это игра...» *Пришвин.*

«Успех – это неустанный труд плюс умение относиться к жизни как к игре...»
Эйнштейн.

Естественно, о жизни как игре может идти речь, когда материально человек достаточно обеспечен. Элементы игрового отношения к жизни присутствуют в современном обществе, поэтому следует говорить не о какой-то ломке, а о сознательном укреплении и расширении имеющихся тенденций, как о механизме дальнейшего

продолжения и ускорения эволюции жизни на основе удовлетворения интеллектуальных и эмоциональных потребностей человека. Точнее, только о базовом уровне игрового общества, принципах его функционирования и организации, как продолжении либерально-демократического или близких к нему. Об этом игровом обществе написано на русском и английском языках в книгах «Математическое моделирование в естествознании и технике» (Springer, 2003; Изд-во ННГУ, 2004). Так что я буду предельно краток, только попытаюсь вас заинтересовать.

В основу игрового общества положены следующие принципы:

- стремление к возможно большему удовлетворению материальных и духовных потребностей людей;
- желание объединения с целью реализации первого принципа, несмотря на естественность конкуренции;
- стремление отдельных людей к максимальному удовлетворению своих потребностей, которое, в конечном счете, должно привести к возможно большему удовлетворению потребностей всех членов общества и так, чтобы успех каждого был одновременно и успехом всех.

Первые два принципа почти не отличаются от тех, на которых основана модель (1), только кроме материального удовлетворения необходимо и духовное, третий принцип.

Устройство общества должно соответствовать этим трём требованиям. Оказывается, что для этого игра должна быть близкой к идеальной, а общество должно быть основано на принципах открытости, наименьшего принуждения и соблюдении прав человека. Функции власти должны быть разделены без возможности содействия себе, сговора и коррупции, на основе включения их в общее игровое взаимодействие.

Напомним, что эти требования относятся к базовому уровню игрового общества, всё остальное создаётся в силу способности самоорганизации общества, обеспечиваемой этим базовым уровнем.

Перейдем к моделированию принципов игрового взаимодействия, причем ограничимся учетом результатов деятельности людей на ограниченном отрезке времени.

Каждый человек I_s или их группа, которую можно рассматривать как отдельную единицу, располагает возможностями действий Ω_s , которые он использует, выбрав тот или иной из видов действий O^k из множества O . Выбрав O^k , он получает возможность обладания $f_s^k(x_1, \dots, x_s, \dots)$ продуктов, услуг, денег и материальных ценностей. Естественно, что каждый стремится выбрать образ действий O^k и само действие x_s так, чтобы получить наиболее желаемый результат $f_s^k(x_1, \dots, x_s, \dots)$, зависящий как от его действий x_s , так и от всех остальных x_i ($i \neq s$).

Таким образом, моделирование возможно как некоторая игра многих лиц, и при этом стратегия каждого игрока состоит в выборе игры $O^k \subset O$, в которой он решил участвовать, и последующем выборе хода $x_s \subset \Omega_s$. Наборы возможных игр O^1, O^2, \dots и стратегий $\Omega_1, \Omega_2, \dots$ определяются устройством, традициями, законодательством и сложившейся к данному моменту s -й ситуацией. Для этой ситуации предполагается наличие описания, являющегося состоянием, то есть такое, что, если оно известно в начале ходов игры и известны ходы, то можно найти такое же описание новой ситуации \bar{s} после ходов. Пусть $w(t)$ такое описание – состояние, тогда мы приходим к заданной в дискретной форме дифференциальной игре. Ее математической моделью является динамический управляемый объект с состоянием w , управлениями

которого являются ходы x_s игроков, так что $\bar{w} = F(w, x_1, x_2, \dots)$. При заданных стратегиях игроков, когда $x_s = G_s(w)$ ($s = 1, 2, \dots$), приходим к замкнутой (обычной) динамической системе $\bar{w} = F(w, G_1(w), G_2(w), \dots, G_s(w), \dots)$. Такая динамическая система в виде потоковой дифференциальной экономической пятимерной модели была предложена и отчасти исследована в работе (Неймарк Ю.И., Островский А.В. Потоковая модель экономической динамики // Вестник ННГУ им. Н.И.Лобачевского. Математическое моделирование и оптимальное управление. Вып. 1(18). Н.Новгород: Изд-во ННГУ, 1998. С. 105–115.).

Вернемся к игре и попытаемся сформулировать, что мы от нее хотим. Будем исходить из желания, чтобы совокупные достижения индивидуальных целей каждым игроком в виде

$$\max_{k, x_s} f_s^k(x_1, x_2, \dots, x_s, \dots) \quad (2)$$

примерно соответствовали достижению цели обществом в целом, чтобы реализация индивидуальных целей не очень отличалась от цели всего общества или была приемлемой для него. Если исходить из принципа, что богатство общества – это богатство его членов, благоденствие общества состоит в благоденствии его членов, то грубо цель общества – это

$$\max \sum f_s^k(x_1, x_2, \dots, x_s, \dots). \quad (3)$$

В соответствии с этим в идеале требуется, чтобы глобальному максимуму (3) соответствовали индивидуальные стратегии, устойчивые по Нэшу высокого порядка или даже оптимальные по Парето.

Попробуем понять, что это значит для основных категорий людей современного общества: производителей материального продукта, торговцев товарами и услугами, управленцев и власти. Выбираемая стратегия x_s – это труд, деньги, материальные ценности и назначаемые или желаемые цены. В разных сферах общества цели могут быть разными: в производственной сфере – это возможно большее производство, в сфере торговли – установление цен, компромиссно приемлемых для покупателей и продавцов. Расшифровать последнее можно как то, что цена уже настолько низкая, что в условиях свободной конкуренции ее понижать охотников нет. Примерное совпадение целей индивидуумов и общества в производящей сфере требует соответствующей организации функций выигрышей и допустимых стратегий, что составляет одну из основных функций управленцев. В случае торговцев это происходит почти автоматически, роль управления здесь значительно уже, так как именно продавцы назначают и меняют цены, исходя из своих личных интересов, и нужно лишь, чтобы отчисления от их прибылей были выбраны согласованно с ней и не настолько большими, чтобы торговля этим товаром, а затем и его производство, прекратились или стали существенно меньше естественной потребности. Такой подход означает, что наряду с налогами может быть и субсидирование.

В чем же, согласно изложенному, состоит роль управленцев, какие проблемы и задачи они должны решать? Этим основным функций две:

- правильная (сформулировано выше) организация правил игры, то есть функций выигрыша и допустимых стратегий;
- способствование эффективному поиску оптимальных личных стратегий всем игрокам (производителям и торговцам).

Таким образом, при правильной организации функций выигрыша и допустимых стратегий рыночная экономика способна обеспечить эффективное функционирование общества: в результате игр в своих интересах члены общества могут обеспечивать ему процветание и развитие. При этом то, что индивидуумам предлагает общество, одновременно является для них и наиболее желанным. Ведь игра – это то, что, как магнит, притягивает, активизирует и удовлетворяет человека. Тем самым, управление обществом в плане рыночной экономики соответствует склонностям и устремлениям людей. Эта игра будет тем более привлекательной, а ее результаты эффективнее, чем в меньшей мере ее правила ограничивают свободу и широту выбора. Это означает, что при управлении обществом следует соблюдать принципы наименьшего принуждения и соответствия с его коренными желаниями и стремлениями. Кроме того, необходимо обеспечить членам общества эффективность поиска оптимальных наиболее выгодных ему стратегий, а это требует открытости: открытости целей управления, используемых средств и доступности конкретных данных о функционировании общества. Ясно, что при этом правила игры должны соблюдаться всеми или почти всеми. В противном случае игра полностью теряет свою привлекательность и эффективность.

В итоге сказанного видно, что сегодня в обществе можно хорошо организовать функционирование производителей и торговцев (производителей материальных ценностей и благ, торговцев товарами и услугами, а также медиков, учителей, ученых, артистов, деятелей культуры, искусства и других), и в ряде стран это в той или иной мере имеет место. Осталось вернуться к содержанию раздела 1.2 и еще раз обсудить функционирование управленцев.

Особое положение управленцев. Их основные проблемы и задачи были указаны, помимо них есть еще очень много более мелких задач фактического текущего управления. Однако управленцев, решающих последнего типа задачи, можно отнести к производителям и торговцам. Во всяком случае, они тоже могут быть включены в общую игру. Но не так обстоит с управленцами, определяющими функции выигрыша и допустимые стратегии поведения и действий, определяющими правила игры, поскольку они это делают и для себя. Отметим, что правовые вопросы, гражданский и уголовный кодексы являются ограничителями стратегий игры.

Особое положение управленцев отмечалось уже при описании модели «производители – продукт – управленцы». Уже там указывалось, что они возникли независимо от того, нужны они или нет, полезны или вредны. Сейчас, с другой стороны, обнаруживается их особый статус, их невключенность в общую игру. Именно этой невключенностью объясняется то, что человечество достигло колоссальных успехов в материальном производстве, науке, познании мира, культуре и искусстве, и столь несовершенно в своей общественной организации. Именно этот особый статус привел к тому, что только управленцы не проходят обязательного обучения, только среди них нет конкуренции на профессиональную пригодность, и их деятельность, названная политикой, состоящей в основном в том, как у народа создать о себе хорошее представление и как вклиниться во власть и противостоять напору других, жаждущих власти и ее непомерных благ и возможностей.

В чем же причина особого статуса управленцев – власти? Она в том, что они ни в коей мере не участвуют в общей игре, они не включены в нее, потому что сами ее формируют, и поэтому их игра совсем другая: как сформировать функцию выигрыша, чтобы побольше можно было выиграть. Конечно, и в этом случае нужно уметь играть, но это умение не имеет прямого отношения к пользе обще-

ства, их выигрыш не всегда совпадает с выигрышем общества, он может быть даже вреден ему.

Таким образом, исправление этой неблагоприятной ситуации должно состоять в том, что управленцы не должны определять сами для себя функцию выигрыша, или поставить их в такие условия, когда они формируют ее, только исходя из интересов общества. Отчасти к последнему стимулу у управленцев имеется, так как построение функции выигрыша в интересах общества повышает политический рейтинг, но, как показывает практика, этот стимул недостаточен, подчас фальсифицируется и ничуть не мешает одновременно не забывать и о себе. Конечно, управленцы тоже играют, и в не меньшей мере, чем производители и торговцы, но это не та игра, выигрыш в которой в нужной мере способствует прогрессу и процветанию общества. Общество должно изменить это ненормальное и вредное положение. Как это сделать?

Мне кажется, что в какой-то мере человечество уже нащупало выход: он в ужесточении зависимости политиков от общественного мнения, он в открытости и гласности деятельности власти и всего происходящего, он в повышении уровня грамотности и сознательности народа и, особенно, средств массовой информации. Это с одной стороны, а с другой – в разделении властей и создании элитарных независимых управленцев, жестко отбираемых по принципу наличия у них врожденного и вскормленного непоколебимого стремления к общему благу и справедливости. По-видимому, надлежит осуществлять и совершенствовать оба пути. Первый – это построение функции выигрыша и допустимых стратегий одной части управленцев другой, независимой от нее, и образование элитарных групп, контролирующих процесс и результаты формирования правил игры и их исполнения и соблюдения.

Вместо заключения. Выше были сформулированы основные стремления людей, положенные в основу последующих рассуждений. Сейчас, как итог, кратко сформулируем, как их реализовать и осуществить, как это сделать, чтобы было всем приемлемо и достаточно хорошо.

Все люди должны быть включены в желанные ими игры. Выигрыш в игре означает удовлетворение своих природных индивидуальных многогранных потребностей. Чем больше выигрыш, тем более полное и всестороннее удовлетворение. Ограничения, следующие из правил игры, должны быть минимальными из возможных и понятными в своей необходимости и целесообразности, быть в соответствии с традициями, моралью и верой. Функции выигрыша, как и правила игры, должны быть открыты для всех. Нарушение правил игры должно вести к проигрышу или значительному уменьшению выигрыша. Правила игры для всех категорий членов общества должны быть такими, чтобы индивидуальный выигрыш был одновременно и выигрышем коллективным.

Для людей, по разным причинам не могущих участвовать в общей игре, должны быть сформированы другие игры, в которых они могли бы принять участие. Наконец, общество должно быть открытым, и необходимо заботиться о том, чтобы все его члены понимали и признавали правила игры, понимали, что они в их интересах и практически наилучшие на данный момент.

В заключение скажу: знаю, что, в основном, господствуют два мнения.

1. Эволюция жизни, как и ранее, будет проходить в хаосе борьбы за существование.
2. Либерально-демократическое общество – вершина и завершающий итог эволюции человека.

Я отрицаю первое (хотя в принципе это возможно), отчасти согласен со вторым, но думаю, что двигателем человечества после «прибыли, дохода, богатства и денег» будет интеллектуальное и эмоциональное удовлетворение, стремление к полноте и богатству жизни, к ощущению единства людей и природы.

Сейчас происходит в целом оскудение общества и людей, что отметил Лоренц и многие другие. Тем более притягательным может стать противоположная возможность духовного и эмоционального обогащения жизни.

В заключение подчеркнем, что формализация общественного и личного функционирования людей допускает игровое описание в силу широты его понимания математиками. Но понятие игровой модели общества предполагает еще и игровое восприятие людьми своей жизни. Это некоторое обогащенное отношение к своему «Я», заинтересованное и отчасти отстраненное участие в своей жизни, делающее человека пронизательным, свободным, активным, с более широким взглядом на себя и мир, делающего человека частицей этого мира.

2.2. Гуманитарий: Игра как форма человеческой активности. Прочитав работу математика, я не мог не согласиться с ним, что игровые модели наиболее адекватны для понимания механизмов, действующих в обществе. Они применимы и к традиционному обществу, но именно на индустриальной и постиндустриальной стадиях в условиях современной высокоразвитой рыночной экономики они отражают не периферийные, а сущностные и массовые процессы. Естественно, появилось желание рассмотреть вопрос о роли игры в жизни людей со своей колокольни, понять самому и объяснить другим, какие социально-психологические, экономические и политические реалии скрываются за абстрактным математическим языком.

В знаменитом словаре Вебстера предлагается 28 значений, в которых используется термин «игра». Для нас важны два из них. Первый применяется для обозначения вида человеческой активности, специфического с точки зрения ее мотивации. Британская энциклопедия понимает под игрой в широком смысле слова (play) «добровольную (то есть не вызванную какой-либо необходимостью) активность, совершаемую ради удовольствия». Игра во втором интересующем нас смысле – это действия ради выигрыша (получения чего-то обладающего ценностью), предпринимаемые в условиях неопределенности и риска, так как результат зависит от случайных для субъекта обстоятельств (в английском языке в этом случае используются термины gambling и game). В определенном аспекте второе значение понятия игра может рассматриваться как частный случай первого, так как часто именно переживание риска, азарт являются тем источником удовольствия, ради которого игра затевается. Причем, в этом втором понимании следует выделить в качестве специальной области игру как состязательное взаимодействие, в котором неопределенность создается невозможностью однозначно предвидеть ответные действия других участников.

Игровое, состязательное взаимодействие со средой или с конкурентами давно стало предметом исследования особой математической дисциплины – «Теории игр», которая дает возможность предсказать вероятность тех или иных событий и предлагает рекомендации по выбору оптимальной стратегии. Насколько важны эти предвидения и рекомендации, можно судить по решениям Нобелевского комитета, дважды за последние 11 лет присудившего премии по экономике за работы такого рода.

Анализу экономических и политических отношений в современном обществе методами теории игр был посвящен предыдущий раздел. В дальнейшем мы еще раз вернемся к этой теме. Здесь необходимо остановиться на содержательной стороне более широкого – мотивационного подхода. Формальная теория игр рассматривает поведение людей в соперничестве за достижение цели (получение выигрыша). Но она оставляет в стороне проблему выбора цели, которая еще более важна, и не может быть решена в рамках формальной, а следовательно, и математической логики. Выбор стратегии достижения цели можно рассматривать как систему рациональных действий. Между тем сами цели определяются ценностями, представлениями о желаемом, которые только в ограниченной сфере, лежащей за пределами игры, могут рассматриваться в качестве рациональных. Априорная посылка экономической теории, которая лежит в основании ее математического аппарата, что целью всех членов общества является максимизация своей доли общественного продукта, справедлива только в отношении группы людей, активно играющих на рынке, и не в состоянии объяснить, почему они ставят такую цель. Еще в первой половине прошлого века в работах Э. Мэйо, А. Маслоу и других авторов было показано, что материальный интерес остается доминирующим лишь до тех пор, пока доход не обеспечивает удовлетворение потребностей, связанных с достижением и сохранением некоторого уровня жизни, признанного нормальным в данной социальной среде. При этом само представление о норме лежит за пределами рационального расчета и может определяться только эмпирически. Активность человека, выходящая за пределы этого минимального уровня, уже носит произвольный характер и может рассматриваться как игровая в широком смысле этого слова. Фактически только психоанализ выдвигает гипотезу, объясняющую энергетическое обеспечение поведения и деятельности. Однако связь между либидо и высшими мотивами, побуждающими к творчеству, к достижению успеха в видах деятельности, максимально отдаленных от сексуальной чисто физиологической потребности, проследить невозможно. Между тем, именно здесь наблюдается максимальная эмоциональная вовлеченность, целиком захватывающая личность. Только игра способна создать такую интенсивную мотивацию.

Игровая активность – одна из фундаментальных потребностей человека. Эту потребность он разделяет с другими представителями животного мира. Но у других видов эта потребность реализуется только у детенышей, еще свободных от борьбы за выживание. У людей, которые с некоторого момента своей истории получают возможность тратить все меньшую часть своей энергии для добывания необходимых для жизни ресурсов, игровая активность не ограничивается периодом детства, а продолжается в тех или иных формах на протяжении всей жизни. Люди как сознательные существа не имеют predetermined целевой функции. Собственно уже понимание человеком неизбежности смерти неизбежно превращает все действия, выходящие за рамки борьбы за выживание, в игру, порождаемую потребностью не только на эмоциональном, но и на сознательном уровне.

Неверно было бы ограничивать представление об игре спортом и азартными увлечениями, относить игру лишь к сфере досуга, противостоящей «делу» или играм в межличностных отношениях, описанным Э. Берном. В действительности вся человеческая активность, которая не носит вынужденного характера и не является внешне регламентированной, субъективно индивидом переживается как игра и порождается игровыми мотивами. Только пока цели деятельности человека остаются

в пределах нижних ярусов потребностно-мотивационной пирамиды Абрахама Маслоу, то есть ограничиваются необходимым для поддержания жизни и безопасности, ее нельзя считать игровой. Как только поведение и деятельность выходит на верхние ярусы, где на первый план выдвигаются стремления к социальному престижу и творческой самореализации, активность приобретает все признаки игры. Только тогда, когда индивид втягивается в действия, цель которых – переживание эмоционального состояния успеха, а содержание притягивает сочетанием необходимости и возможности творческого поиска с преодолением внешних и внутренних вызовов, он чувствует и сознает себя личностью и его существование обретает смысл. Именно такие смыслообразующие игры, выбор которых взаимосвязан с системой ценностей, лежат в основе взаимодействия людей в обществе. Смыслообразующая игра часто оказывается в сложном взаимодействии с различными ситуативными играми, в которые втягивается личность, и это служит одним из источников внутриличностных конфликтов, состояния фрустрации.

Возникает законный вопрос, не является ли введение категории игры в объяснение человеческого поведения излишним умножением сущностей, то есть нарушением правила бритвы Оккама. Может быть, проще и эффективнее в соответствии с традиционными представлениями классиков рассматривать стремление к богатству, престижу, власти, творческой самореализации, также как и поведение уголовного преступника, реализацией независимых друг от друга потребностей, заложенных в природе человека? Преимущество игровой парадигмы состоит в том, что она объединяет в единую систему личности различные грани ее проявления, дает фундамент для понимания поступков, которые никоим образом не поддаются рациональному объяснению. При таком подходе мы находим единый ответ и для объяснения поведения экономического человека Дэвида Рикардо, смысл жизни которого в увеличении прибыли, и для человека из подполья Достоевского, который «из одной только неблагодарности... мерзость сделает...» и «нарочно пожелает ... самой экономической бессмыслицы». Миссионер, несущий божье слово в джунгли Амазонки, и террорист, подрывающий себя вместе с детьми в ресторане Иерусалима, с психологической точки зрения отличаются тем, что реализуют свое представление о смысле жизни в разных психологических играх. Игровой подход позволяет преодолеть веру в фатальную неискоренимость зла. Человек выбирает смыслообразующую деструктивную игру, в основном, потому, что не нашел поля для реализации своего творческого потенциала и потому, что воспитатели и социальное окружение внушили ему, что именно в уничтожении «неверных», или разоблачении «врагов народа» он обретет радость исполнения своей божественной или исторической миссии, ощутит превосходство над своими жертвами. Без индоктринирующего воздействия ваххабитских вероучителей и атмосферы ненависти в социальном окружении, не было бы команды смертников, уничтоживших 11 сентября 2001 года небоскребы Торгового центра⁵.

Психологическая однородность смыслообразующих игр отнюдь не означает их однородности с позиций общества. Моральные нормы, противопоставляющие добро и зло, возведенные в степень божественных заповедей, как раз и отражают такую

⁵Здесь не рассматриваются деструктивные (агрессивные) поступки как непосредственная эмоциональная реакция на возникшую провоцирующую ситуацию, или связанные с личностными психологическими свойствами индивида.

неоднородность. Они созданы в ходе социальной эволюции в качестве инструмента не только оценки, но и защиты от деструктивных смыслов.

Несомненно, доля людей, вовлеченных в активный поиск смыслообразующей игры, различна в различные эпохи и в различных районах мира. Проблема смыслообразующей игры не возникает у тех людей, которые просто борются за выживание. Они пассивно воспринимают то, что слышат в ходе социализации от родителей и вероучителей. Также обстоит дело с большинством из тех, кто напрягает все усилия для поддержания уровня жизни своей семьи на уровне, приемлемом в данном обществе в данное время. Это характерно для социальной группы, традиционно относящейся к так называемым средним слоям. Однако именно в этой последней группе чаще всего формируются личности, которые выходят за рамки стандартных ценностей и установок (установок) и вовлекаются в ту или иную индивидуальную смыслообразующую игру. Их ценности и жизненные установки, выбираемые социальные роли, поступки диктуются уже именно этой игрой.

Какая именно игра выбирается индивидом, зависит от типа общества, конкретной жизненной ситуации, личностных свойств, сформировавшихся к моменту ролевой идентификации, из сочетания генетических задатков и среды раннего становления. Нельзя игнорировать влияния на этот выбор психологических комплексов и механизмов психологической защиты, введенных в научный оборот психоанализом. Без этого невозможно объяснить неудачи нормальной социализации и выбор деструктивных игр. Особенно в этом смысле интересен вывод Эрика Эриксона о значении ролевой идентификации в период между детством и взрослостью. В большинстве случаев именно на этом жизненном этапе и определяется, какая именно игра становится доминирующей на всю оставшуюся жизнь или, по крайней мере, на значительную ее часть. Ролевая диффузия, то есть неудача идентификации, выражается вовлечением в одну из разновидностей компенсирующих игр, часто в составе деструктивных антисоциальных групп.

Те, в ком в силу способностей проявляется интерес к творчеству в сферах науки, техники, искусства, предпринимательства, втягиваются в соответствующие креативные игры. Амбициозные или, по терминологии Гумилева, пассионарные индивиды, осознавшие свою неспособность к реализации в той или иной творческой игре, ищут выход в престижном самоутверждении, выбирая игру, которая ведет к власти над другими людьми. Естественно, такова только общая схема. Жизненная реальность гораздо богаче. Смыслообразующей игрой может быть успех у противоположного пола или, как у героя рассказа Шукшина «Срезал», компенсирующим стремлением поставить в тупик кого-либо из обладающих высоким социальным статусом (того, кто «много о себе понимает»). Иногда сочетается несколько смыслообразующих игр. Например, даже для гениального ученого, испытывающего глубокое и длительное удовлетворение от раскрытия тайн природы, чрезвычайно важен престиж в научном сообществе, признание его приоритета.

Концентрация внимания общества на предотвращающем невроз благополучном детстве для каждого ребенка, на том, чтобы для каждого период юности завершился ролевой идентификацией и принятием игры, открывающей путь к творческой созидательной самореализации – одно из важнейших условий совершенствования и выживания человечества. Не моральные нравоучения могут быть инструментом для предотвращения деструктивности вступающего в социальную жизнь поколе-

ния, а вовлечение каждого в индивидуально подобранную игру, позволяющую сочетать личностную вовлечённость с общественной пользой или хотя бы безопасностью. Можно полагать, что алкоголизм, наркомания, суицид, – в основном, результат неспособности индивида найти свою смыслообразующую игру, разочарования в ней или в своей способности добиться желаемого результата. Однако все это предметы, требующие специального изучения.

В данном случае, в соответствии с рассматриваемой проблемой, для нас первостепенное значение имеют те смыслообразующие игры, которые оказывают положительное и отрицательное влияние на благосостояние общества, прежде всего, через воздействие на создание общественного продукта.

В исследованиях экономистов выявляется множество факторов, влияющих на рост ВВП. Однако при всей их значимости они, тем не менее, вторичны, так как выступают лишь в качестве условий и, вместе с тем, являются следствиями степени активизации и реализации главного ресурса общества – человеческого интеллекта. В конечном счете, наибольший успех достигается там и тогда, где и когда этот интеллектуальный потенциал максимально реализован в интересах общества. Удастся этого добиться лишь в игровой форме поведения. Говоря о деятельности ученого, Эйнштейн заметил, что она «сродни религиозному или любовному служению. Побуждают к ней не обдуманые намерения или планы. Она исходит непосредственно из сердца».

Математик уже приводил высказывания об игровом характере деятельности как условия удовлетворенности ею. Можно напомнить, что и Карл Маркс главным условием достижения высшей фазы развития человеческого общества считал превращение труда, выполняемого не ради вознаграждения, а из интереса к его содержанию, в жизненную потребность всех членов общества. Здесь важно сослаться не только на мнения авторитетов, но и на исследования, проведенные Фредериком Герцбергом в 50–60 годы прошлого века. Исследования эти убедительно доказали, что устойчивое и наиболее высокое удовлетворение человек получает от деятельности, привлекающей его своим содержанием и позволяющей пережить радость успеха. В этих исследованиях также было показано, что только в этом случае активность индивида ориентирована на достижение максимальных результатов, на проявление инициативы, на творчество. Но ведь именно такая деятельность, которая совершается не для получения внешнего вознаграждения, не по необходимости, а ради удовлетворенности, доставляемой самим ее содержанием, и радости успеха, является, как мы уже видели, игрой в самом широком смысле этого термина. В большинстве случаев игровая мотивация профессиональной и предпринимательской деятельности сочетается и с материальным побуждением – стремлением обеспечить своей семье уровень достатка, соответствующий некоему стандарту. Однако чем выше уровень игровой составляющей, тем больше удовлетворение, получаемое в ходе и в результате этой деятельности, и тем выше ее эффективность.

Потенциал общества максимально реализуется, во-первых, при условии, что в жизнедеятельности возможно большего числа его членов, занятых общественно-полезной деятельностью, возможно большая доля приходится на игровую активность. Во-вторых, интеллектуальный ресурс приносит тем большую пользу, чем в большей степени игры, в которые вовлечены люди, являются с позиций общества играми с положительным результатом. В них, в отличие от имеющих нулевой итог

азартных игр, где сумма выигрыша одних равна сумме проигрыша других, общество в целом оказывается в выигрыше.

Всегда и во всех типах общества чрезвычайно полезна деятельность по моральным, гуманным побуждениям. Врач, воспитатель, социальный работник, люди других общественно-полезных занятий в той мере, в какой они получают удовольствие от самого содержания своего труда и его человечности, выходят за рамки оплачиваемых обязанностей, действуют по игровым мотивам. Однако специфическими для современного общества являются два вида игр, в которых реализуется в интересах общества интеллектуальный потенциал его членов. Прежде всего, это деятельность изобретателей и ученых, которые ведут игру непосредственно с природой, вырывая у нее свой успех. Второй, наиболее массовой игрой с положительным результатом в современном обществе является участие в рыночных отношениях. В той или иной степени в ней участвует почти все взрослое население. Однако решающее значение имеет игра на рынке, которую ведут наиболее активные его участники – предприниматели и высшие менеджеры. Именно они в конкурентной борьбе за кошелек потребителя принимают творческие решения, направленные на отыскание ниши неудовлетворенного спроса, на достижение на рынке равновесия между спросом и предложением, на выпуск более совершенной продукции с наименьшими затратами и использование более совершенной технологии. Чем большая доля населения вовлечена в самостоятельную предпринимательскую деятельность, чем выше доля мелкого и среднего бизнеса, тем выше степень мобилизации интеллектуального потенциала. По данным, относящимся ко второй половине XX века, в США 75% важных технических идей возникли именно в небольших компаниях. С другой стороны, плановая государственная экономика, уничтожив предпринимателей как класс, оказалась способной в лучшем случае лишь на догоняющее развитие.

Целью предпринимателя является извлечение экономической выгоды. Но нельзя упускать из виду принципиального различия между экономическими мотивами любого члена общества, который стремится получить средства, необходимые для жизни, и экономическими мотивами предпринимателя, для которого участие в рыночной конкуренции – интеллектуальная игра, а извлечение прибыли большей, чем у конкурентов, – награда за победу в игре и фактор повышения самооценки. Обычно удачливый предприниматель или игрок на финансовом рынке тратит часть своего выигрыша на приобретение материальных ценностей: дворцов, драгоценностей и пр. Но приобретения эти важны не для удовлетворения собственно материальных нужд, а для престижа как внешнее доказательство успеха в игре.

Каждая эпоха характеризуется своими специфическими играми. При этом решающее значение имеет ведущая игра управленческой элиты. Начиная с XVII века, когда, как показал Макс Вебер, протестантизм благословляет богатство и успех в делах как данный богом знак избранности, рыночная игра приобретает все больший престиж. Ее созидательная направленность заставляет потесниться разрушительную военную игру политической элиты, хотя и ставит ее себе на службу. Именно за счет того, что мобилизация интеллекта каждого участника этой игры для увеличения собственного богатства приводит к росту богатства общества, и достигнут небывалый экономический прогресс нашего времени.

При всех преимуществах индустриального и тем более постиндустриального общества над предшествующими эпохами тезис Френсиса Фукиды о завершенности истории человечества, достигшего якобы полного благополучия, не случайно

вызывает скептическую усмешку. Кроме созидательных игр с положительным итогом сохраняются и игры с отрицательным для общества результатом. Прежде всего, это смыслообразующие игры, связанные с насилием и разрушением. Даже в самых экономически преуспевших обществах сохранились люди и группы, извлекающие удовлетворение из убийства себе подобных, уничтожения имущества. Не исчезли, а еще больше активизировались террористические организации, ужасные игры которых получают санкцию ультранационалистической и религиозной идеологии. Однако, если взять человечество в целом, то, как уже отметил математик, наибольшей опасностью остаются честолюбивые игры политических управленцев.

2.3. Гуманитарий: Политика и политики. В предыдущем разделе речь преимущественно велась об игре в самом широком смысле как активности, привлекающей самим своим содержанием, вносящей в психику индивида чувство и сознание смысла его жизнедеятельности. Однако, как уже отмечалось выше, слово игра имеет и другие значения. В разделе 2.1 математик рассматривает игру как взаимодействие людей, где каждый участник стремится к достижению желаемого им результата. Успех при этом зависит от создающих ситуацию неопределенности действий других участников. Макс Вебер конечным элементом социальных отношений называет социальное действие, исходя из того, что любой поступок совершается с расчетом на определенную желаемую реакцию партнера. Поэтому почти каждый акт общения в той или иной степени носит характер игры. Эрик Берн предложил целую типологию межличностных игр, участники которых манипулируют партнерами ради достижения своих скрытых психологических целей. В значительной степени такие игры-взаимодействия на микроуровне оказываются тактическими элементами стратегических игр, которую ведут члены общества ради реализации своих смыслов.

Как было показано математиком, из игровой модели рыночных отношений, господствующих в современном обществе, вытекает, что при соблюдении определенных правил всеми участниками игры возможно согласование интересов каждого ее участника как с интересами других игроков, так и с интересами общества в целом. Иными словами, эта игра может иметь положительный результат, когда выигрыш каждого участника рынка сопровождается ростом общественного продукта. Положительный результат может принимать и не материальный вид, проявляясь в созданиях ценностей духовной культуры, сохранения и укрепления здоровья людей, предотвращения техногенных катастроф и пр. Правила игры задаются и поддерживаются сложной системой интегрирующих социум институтов. На социально-психологическом уровне – это системы ролевых норм-ожиданий и нравственных привычек. На уровне сознания – это системы моральных норм. На формальном уровне правила игры задаются правовыми нормами и поддерживаются государственной организацией.

Как уже отмечалось выше, государство само по себе не способно создавать что-либо положительное, но именно оно может создать условия для роста. Политические и правовые институты оказываются теми рычагами, реформирование которых позволяет сознательно реализовать плодотворную теоретическую модель, запустить систему охватывающей все общество эффективной игры с положительным результатом. Чтобы убедиться в этом, достаточно примера влияния реформ Ден Сяопина на последующий за ними рывок Китая. Как показывает весь опыт новой истории,

ключевую роль играет судебная составляющая государственной системы: существование независимого от политической власти, беспристрастного, строго следующего закону суда. Не случайно пионерами и индустриальной и постиндустриальной цивилизационных волн оказались страны англосаксонского корня, судебная система которых соединила идущую от «варварских правд» верность общинному праву, сохранение роли присяжных в судебной процедуре с наследием античности в понимании верховенства закона над властью. Нарушение королем принципа независимости суда сыграло важную роль в развязывание в Англии революции 1642 года и оказалось одним из главных обвинений, стоивших Карлу I головы. Без независимой от власти и неподкупной судебной системы невозможна ни преуспевающая рыночная экономика, ни либеральная демократия. Напоминание об этом особенно актуально для государств, возникших на постсоветском пространстве, где власть требует от судей послушания, расплачиваясь с ними попустительством к их мздоимству. Несомненно, что в ближайшем будущем проблема независимого и неподкупного суда выявится и в Китае как условие сохранения тенденции экономического роста. Рыночная игра, принесшая благополучие развитым странам, не может вовлечь участников без института, гарантирующего выполнение ее правил.

Развертывающаяся перед нами картина вовлечения все новых стран в процесс динамического развития наглядно демонстрирует роль политических и правовых предпосылок такого скачка. Однако не следует поддаваться иллюзиям: и в рыночном, либеральном обществе сохраняются отношения, отраженные в модели (1), то есть опасности, связанные с нарушением норм общественного поведения (правил игры ее участниками) и с деструктивным влиянием политических управленцев. В этих двух последних утверждениях отражено противоречие, следствия которого с разной степенью негативности проявляются в различных странах и грозят привести человечество к трагическому концу. Трагическое противоречие человеческого общества состоит в том, что государство, при всех своих опасных свойствах, было и остается необходимым институтом.

Без государства, то есть института вооруженного принуждения невозможно защитить членов общества и их имущество от вооруженных бандитов и внешней агрессии. Показательно, что Макс Вебер, наиболее авторитетный в XX веке оппонент марксизма, для определения сущности государства использует формулу Льва Троцкого о государстве как о монополии на применение вооруженного насилия. Начало 1990-х годов в России, современная ситуация на Северном Кавказе, в Ираке наглядно демонстрируют, что происходит, когда эта монополия оказывается утраченной. Хаос и беспредел, порожденный ослаблением государственной власти, порождает тоску по сильной руке, отбрасывает к другой крайности. Так неоднократно происходило в истории, так развиваются события в современной России. Неспособность слабой российской государственности противостоять бандитизму и террору кавказских сепаратистов привела к переводу стрелки ее развития с едва намечившегося демократического пути в тупик авторитаризма. Террор, которым ответило мусульманское духовенство на наступление подрывающей его позиции западной цивилизации, провоцирует усиление государственного насилия и нарушение гражданских свобод даже в странах устоявшейся демократии.

На протяжении последнего столетия в странах с рыночной экономикой резко усиливаются регулирующие функции государства. Выше уже отмечалось, что ры-

ночная система эффективна, только если существуют и соблюдаются обязательные нормы экономических взаимоотношений, соблюдаются права потребителей. Необходимы условия для укрепления среднего и мелкого бизнеса, так как только при сохранении достаточно большого числа независимых производителей сохраняется динамизм рыночной экономики. Без контроля со стороны надзирающих органов сама по себе рыночная игра порождает тенденцию к монополии, усиливает опасность разрушения среды обитания. Современные государства в различной степени сохраняют за собой создание и поддержание транспортных и информационных коммуникаций, различные социальные функции. Они собирают через систему налогов и перераспределяют огромную часть валового внутреннего продукта.

В XIX веке и на протяжении большей части XX века были популярны представления, что расширение функций государства в экономике и увеличение доли перераспределяемого им ВВП является движением по пути прогресса. В середине XIX века возникла и позже была претворена в жизнь в Советском Союзе и в его сателлитах марксистская идея замены рынка государственной плановой экономикой. Если, в соответствии с классическими представлениями, рассматривать государственные институты в качестве выразителей интересов общества в целом или передового класса, то такая точка зрения кажется логически обоснованной. О доказанной историей экономической несостоятельности государственной плановой экономики уже говорилось выше. Здесь следует добавить, что концентрация собственности в руках государства создает возможности для беспредельной концентрации власти, неограниченного своеволия правителя и его окружения. Однако и в странах с рыночной экономикой усиление роли государства имеет оборотную сторону. На поверхности – проблема коррупции. При условии, что депутат или чиновник со скромной зарплатой оказывает влияние на распределение многомиллионных ассигнований, трудно гарантировать их независимость от влияния отдельных корпораций, тех или иных существующих в обществе «перераспределительных» групп. В странах с авторитарными режимами правящая клика обычно прибирает к рукам значительную долю государственной казны и имущества подданных. Потеря власти грозит утратой украденного. Это многократно усиливает стремление любой ценой сохранить у государственного руля своего предводителя, а когда это оказывается невозможным, заменить его преемником из своих рядов. Центральное направление внутренней политики – устранять политические группы и личности, грозящие монопольному господству клики. В демократических странах проблема мздоимства, прямых или косвенных взяток, смазывающих колеса государственной машины, существует, главным образом, на средних и низших уровнях управления. Все это общеизвестно, но ускользает от внимания опасность, создаваемая политиками в собственном смысле этого слова, располагающимися на высших этажах государственной машины.

В любом типе общества, при любом государственном строе сферу политики, как правило, выбирают люди одного и того же типа. Их всех привлекает игра, где призом является власть, чувство превосходства, связанное с ней. Чаще всего это люди, не рассчитывающие на успех в творческой игре с природой, которую ведут ученые, на удовлетворенность, испытываемую предпринимателем от победы над конкурентами, или на радость творчества, доступную людям искусства. Можно припомнить вывод уже упоминавшегося выше А. Маслоу: люди, не способные подняться на следующий этаж потребностей, стремятся к сверхкомпенсации на том этаже,

который им доступен. У тех, кто не способен к игре ради творческой реализации своего «Я», гиперболизировано стремление к самоутверждению, к престижу, к власти над другими. Самым подходящим местом для реализации такого рода стремлений является сфера политики.

Наиболее ярко это проявляется в периоды революционных потрясений. Знаменитое ленинское определение революционной ситуации как совпадения нежелания низов «жить по старому» с неспособностью верхов «по старому управлять» нуждается в дополнении. Массы, даже доведенные до отчаяния, способны лишь на стихийный, разрушительный бунт. Они ломают машины, как луддиты, или жгут помещичьи усадьбы, как русские мужики. Бунт перерастает в революцию лишь тогда, когда стихийное движение оседлывают вожди, предлагающие определенные политические программы, использующие возмущение масс для реализации своих целей. Об этом откровенно писал Владимир Ленин, призывая вносить идеи социализма в стихийное движение. Вожди эти, чаще всего, приходят из слоя, который в России получил название интеллигенции. Именно в этом выдвинувшемся из низов слое образование развивает честолюбивые престижные устремления, наталкивающиеся на ограниченность возможностей их реализации. Несомненно, часть таких лидеров искренне сочувствует страданиям низов и одушевлена их интересами. Однако ведущее положение, в конечном счете, оказывается в руках «революционных карьеристов», для которых участие в революции лишь средство реализации обуревающей их жажды власти. Эта жажда власти создает мотивацию революционной карьеры, отсутствующей у революционеров-идеалистов. Поэтому революция поднимает к власти не людей типа Мирабо, Плеханова или Мартова, а Робеспьеров, Талейранов, Бонапартов, Лениных, Троцких и Сталиных. Потом неизбежно следуют кровавые разборки между самими властолюбцами. Побеждают в них самые «отмороженные», самые беспощадные игроки, «сверхчеловеки» типа Сталина и Гитлера, свободные не только от моральных правил, но и нравственных чувств⁶.

⁶Исключительно карьеристская мотивация политиков, оказывающихся у власти в результате революционных переворотов, особенно наглядно демонстрируется опытом Российской истории на протяжении последнего столетия. Большевицкая верхушка, захватившая власть от имени рабочих и крестьян, сразу же разогнала независимые рабочие профессиональные союзы и приступила к систематическому истреблению крестьянства как класса и физически. Процесс этот, начавшийся с продразверстки, завершился коллективизацией и голодомором начала 1930-х годов. Вся семидесятилетняя история Советской власти – это история установленного властвующей бюрократией оккупационного режима, озабоченного исключительно укреплением и сохранением своего господства. Это же относится и к маоистскому Китаю, к другим странам «реального социализма». Если же оценивать Октябрьскую революцию и порожденные ей события с более широких исторических позиций, можно утверждать, что замаскированная под борьбу за прорыв в будущее она в действительности была возглавлена и осуществлена силами враждебными наступающему прогрессу, стремившимися остановить модернизацию, то есть связанные с наступлением индустриальной волны (по Тоффлеру) или капитализма (по Марксу) социальные, политические и культурные перемены. Последовавшее за революцией возрождение крепостного права в социально-экономической сфере, возвращение к самодержавию в политике, к формуле «самодержавие, православие (марксизм-ленинизм) и народность» в идеологии, к цензуре, далеко оставившей по своей жестокости времена Николая I, – наглядная демонстрация подлинной природы этих сил. Октябрьская революция в действительности, чтобы о себе ни думали ее вожди, была столь же реакционной, как и сравнительно недавняя революция мулл в Иране, попыткой остановить прогресс. Руководимое из Москвы так называемое «Мировое коммунистическое движение», опять же, чтобы о себе ни думали его вожди и рядовые, объективно играло в XX веке ту же по своей направленности роль, что и террористическая сеть Аль Каиды в наше время.

Специфические свойства, присущие типу людей, устремляющихся в политику, сказываются не только в периоды революций. Они характерны для большинства политиков в любом обществе, в самых обычных условиях. В этом одна из причин низкой эффективности и опасности институтов власти. Дело не только в том, что их чаще всего заполняют люди посредственные, но и в том, что главный личный мотив для них не успех института в его социальной функции, не достижение реального результата в интересах общества, а постоянная жажда расширения личной власти, престижа и популярности. Занимаемая ими позиция предоставляет огромные возможности для достижения этих целей. Самым безобидным проявлением такой мотивации могут стать уже упоминавшиеся выше привилегии в виде преимущественного доступа к тем или иным благам или исключительным правам. При этом главным для них являются не сами потребительские ценности получаемых благ и прав, а престиж, сознание и демонстрация своей значительности. Куда опасней упоение от возможности унижать и даже уничтожать беззащитных перед ними подданных. Не даром Иосиф Бродский написал строчку: «...Ворюга мне милей, чем кровопийца». Опыт прошлого и разворачивающиеся на наших глазах события показывают, что в той или иной степени кровопийцами становится большинство самовластных и бесконтрольных правителей. Однако самой разрушительной игрой политиков, обураваемых жаждой престижа и власти, была и остается игра в «войну». Многие тома посвящены исследованию причин многочисленных войн, составляющих главное содержание исторических хроник. Все, что в них говорится, как правило, имеет отношение к делу. Однако многих из самых разрушительных военных столкновений не было бы, если бы не всепоглощающая страсть людей, стоящих у власти, доказать свое превосходство не только над реальными соперниками, но и над историческими предшественниками, раздвинуть границы своего господства. Игнорируя личные мотивы политиков и полководцев, их стремление к выигрышу в игре за величие, не понять ни походов Александра Македонского и Ганнибала, ни эпохи Наполеоновских завоеваний, ни последних двух мировых войн.

Раньше уже отмечалось, что единственный известный до сих пор эффективный способ разрешения конфликта между необходимостью государства и его опасностью был найден в XVII веке голландским, а потом и английским третьим сословием, навязавшим аристократии контроль избранного парламента и независимого суда над деятельностью исполнительной власти. Здесь впервые со времен античности было осуществлено сформулированное еще Аристотелем требование к «правильной» форме государства: закон был поставлен выше правителя. В дальнейшем форма правового государства, развившаяся в современную либеральную демократию, распространилась на другие страны Западной Европы, на заселенные европейскими переселенцами бывшие заморские колонии Англии, на послевоенную Японию, она пустила корни во второй по численности населения стране мира – Индии. В самое последнее время в этом же направлении движутся освобожденная от коммунистов Восточная Европа, некоторые страны Азии и Латинской Америки. Выше уже упоминалось, что распространение либеральной демократии на планете воодушевило Френсису Фукияду на провозглашение конца истории. Он при этом имеет в виду не прекращение существования человеческого общества, а завершение эволюции. После торжества либеральной демократии и рыночной экономики в мире, по его утверждению, общество будет только функционировать, но не меняться. События, последовавшие за выходом книги Фукияды, прежде всего эпидемия террора, несколько снизили энтузиазм автора. Однако дело даже не в этом. Современная

либеральная демократия, несомненно, лучшая из всех других бывших и настоящих форм государственности. Однако не следует упускать из виду ее главный порок – формирование органов исполнительной и законодательной власти, главным образом, из политически ориентированных, посредственных личностей, посвящающих свою жизнь честолюбивой игре ради престижа. Последствия широко известны. Сплошь и рядом красноречивый демагог побеждает на выборах честного и умного кандидата. Обычное явление – «конфликт интересов», когда политик в поисках необходимых ему для победы на выборах ресурсов поддерживает решения, противоречащие интересам общества. Особо опасно пренебрежение решением долговременных проблем, таящих в себе опаснейшие угрозы для общества, ради сиюминутной популярности, победы на ближайших выборах. Лауреат Нобелевской премии 1986 года Джордж Бьюкенен предложил в качестве критерия при оценке того или иного политического решения степень согласия различных групп общества с этим решением. Однако он предупредил, что всегда сохраняется опасность достижения такого согласия за счет будущих поколений, которые не имеют права голоса в политическом торге. В наше время, когда пренебрежение будущим грозит неотвратимыми катастрофическими последствиями для всего человечества, предупреждение Бьюкенена звучит как голос Кассандры.

Возможно ли найти выход из этой ситуации? Действительно ли принятый во всех странах либеральной демократии путь формирования органов власти путем прямых, тайных и равных выборов при предоставлении всем совершеннолетним активного и пассивного избирательного права является лучшим из всех возможных? В свое время он был огромным шагом вперед и важнейшим завоеванием нового времени. Для стран, где сохраняются авторитарные и диктаторские режимы, честные всеобщие выборы – главный лозунг борьбы за демократические преобразования. Историческое значение нынешнего механизма формирования власти, жертвы, понесенные для его установления, придают ему непререкаемую легитимность и исключают даже саму мысль о его возможном усовершенствовании. Всем критикам демократии вполне резонно напоминают о знаменитой формуле Уинстона Черчилля, которая в приблизительном переводе гласит: «Демократия – самая отвратительная форма правительства, но все другие еще хуже». Однако законно поставить вопрос: как же сделать демократию менее отвратительной? Следуя логике всего предыдущего изложения, ответ можно сформулировать так: очистить политику от политиков⁷.

Возможно, принцип Афинской республики – назначение ряда должностных лиц по жребию, и тот был бы более приемлемым. Используется же этот способ при формировании коллегии присяжных. Представляется, однако, что более оптимальным было бы формировать законодательные органы и выдвигать на посты высших лиц исполнительной власти лиц из числа граждан, добившихся выдающихся результатов и заслуживших доверие своей деятельностью в неполитической сфере. Активное избирательное право остается всеобщим, а пассивное ограничивается теми, кто доказал свою успешность на том или ином профессиональном поприще. Можно при этом использовать корпоративный принцип выдвижения кандидатов.

⁷ Актуальность такого решения начинает осознаваться. Джордж Ф. Уилл в связи со скандалом, последовавшим за разоблачением махинаций Джека Абрамова – лоббиста, «скупившего Вашингтон» («Тайм») – писал в газете «Вашингтон Пост» о необходимости поправки к Конституции США, которая бы ограничила срок пребывания законодателей в Конгрессе. Соответствующие предложения уже выдвигались на уровне штатов, но в 1995 году Верховный Суд пятью голосами против четырех признал их противоречащими Конституции. Washington Post. 10.01.2006, p. A.15

Исполнение возложенных обязанностей является обязательным и должно ограничиваться одним сроком. Можно полагать, что использование такого механизма исключило бы принятие популистских решений за счет будущего и резко повысило интеллектуальный уровень тех, кому общество доверяет свою судьбу.

Еще более важным направлением совершенствования демократии могло бы стать обращение к старой идее Руссо о непосредственной демократии. Во времена Жан Жака такая демократия могла осуществляться только в пределах одной деревни гражданами, собравшимися под деревом. Теперь ситуация изменилась. В ближайшее время, благодаря современным информационным системам, роль представительной демократии может свестись к обсуждению предлагаемых решений перед глазами всего общества, примерно так, как это происходит в суде в прениях сторон. Принятие решений останется непосредственно за самими гражданами, которые будут голосовать, используя домашние компьютеры. В вышедшей в 2004 году книге Джемса Суrowецки «Мудрость масс» (James Surowiecki. *Wisdom of Crowds*. Doubleday, 2004. P. 296.) приводятся многочисленные факты, демонстрирующие удивительную точность вывода, сделанного на основании усреднения оценок, предлагаемых множеством людей, в том случае, когда они высказывают их независимо друг от друга на основании достаточно полной и объективной информации. Простейшим объяснением такой точности является соображение, что при множестве независимых мнений отклонения от правильного решения в одну сторону уравниваются отклонениями в другую. Однако, математическое моделирование уже задолго до появления книги Д. Суrowецки показало, что во взаимодействии независимых автоматов удается прийти к оптимальным решениям без какой-нибудь внешней координации. Условиями при этом являются реальная независимость и достаточное число участников. Численность, при которой автоматически достигается необходимое разнообразие и репрезентативность интересов в такой непосредственной демократии, очевидна. Сложнее обстоит дело с достижением независимости. Обеспечить защиту людей от индоктринации, от ловкого манипулирования демагогов, использующих психологические эффекты, можно только открытыми дискуссиями в средствах массовой информации. В этих дискуссиях для снижения опасности воздействия на аудиторию чисто внешних личностных свойств участников, возможно, следует, чтобы доводы сторон оглашались не ими самими, а нейтральными посредниками. Такие дискуссии могут быть дополнены работой согласительных комиссий, достигающих компромиссных решений, максимально учитывающих различные интересы. Так можно реализовать предложенный Бьюкененом критерий максимального согласия. Вместе с тем, важно учесть и его предупреждение: при любом механизме демократии очевидна необходимость создания органа – типа Верховного суда США – с тем отличием, чтобы он проверял не только соответствие законов и судебных решений конституции, но и их влияние на будущее общества. Он должен препятствовать реализации решений, принимаемых любыми институтами, и любой практике, которые могут отрицательно повлиять на жизнь следующих поколений.

Заключение

Задача, поставленная в этой работе, предельно широка – попытаться взглянуть на человеческое общество как на специфическую форму жизни. Человечество вышло за пределы родной планеты и начало освоение космоса, оно на пороге вмешательства

в свою биологическую природу с целью ее совершенствования. Вместе с тем, люди оказались не способны изменить к лучшему свою социальную природу. В результате достижения человеческого разума никоим образом не улучшили уровень и качество жизни жителей многих стран, лишенных продовольствия и питьевой воды, мало того, люди создают угрозу самим условиям своего существования и сохранению живого на планете. Таким образом, круг замыкается: именно высшая форма жизни и готовит ее уничтожение.

Можно ли предотвратить такой исход, и если да, то каким образом? Мы попытались показать, что и высшие достижения человечества, и его трагедия определяются тем, что общество трансформировало такую форму активности, как игра.

Творческая игра ученых, изобретателей и предпринимателей – источник всех достижений современной цивилизации. Вместе с тем, престижные игры людей, для которых в современной потребительской цивилизации обладание избыточными материальными ценностями превратилось в символ ступени в престижной иерархии, мешает разумному использованию ресурсов и создает смертельную угрозу жизни. Еще опаснее престижные игры политиков с их военными играми. Собственно и расизм, и террор, и все другие отвратительные вещи на Земле ни что иное, как поиски смысла в не знающих насыщения разновидностях той же престижной игры. По существу, тщетное стремление компенсировать отсутствие творческой самореализации – единственной игры, способной дать неиссякаемое чувство удовлетворенности и самоуважение – источник как личных, так и общественных трагедий. В этом и кроется источник нашего оптимизма. Если корни проблем не во врожденных качествах людей, а в избираемых ими смыслообразующих играх, то будущее не выглядит безнадежным. Игры взаимозаменяемы и, в конечном счете, выход в том, чтобы найти для каждого индивида путь, на котором он сможет самореализоваться в игре с положительным для общества результатом.

В конечном счете, будущее определяется тем, сможет ли человечество создать на планете общественное устройство, которое, с одной стороны, способствовало бы реализации во благо его творческого потенциала, а с другой – воспрепятствовало бы проявлению таящихся в нем саморазрушительных свойств.

Как нам кажется, содержание работы дает ответ на вопрос, вынесенный в ее название. В том, что касается общества, Бог (судьба) действительно играет в кости. Будущее человечества, само его дальнейшее существование на нынешнем этапе цивилизации зависит от случайных непредсказуемых обстоятельств: от того, хватит ли у общества коллективного разума и коллективной воли, чтобы ответить на вызов истории, удержаться на краю пропасти, использовать во благо наследие культуры и мощь своего интеллекта.

Поступила в редакцию 12.03.2009

DOES GOD DICE?

Yu.I. Neimark, A.Ya. Levin

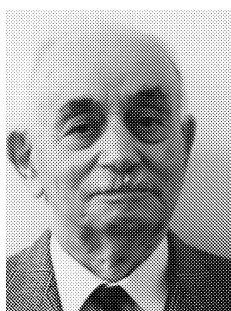
Authors used the simple mathematical models as a base for the discussion of the evolution of human society.

Keywords: Human society, mathematical models, play, game, history, evolution, crisis.



Неймарк Юрий Исаакович – доктор технических наук, профессор ННГУ, академик РАЕН, Соросовский профессор, член Национального комитета по теоретической и прикладной механики, лауреат премий А.А. Андропова и Н. Винера. Автор 8 монографий и более 400 работ по теории колебаний, теоретической механике, теории управления и др.

603005, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 10, НИИПМК
Нижегородский государственный университет им. Н.Г. Лобачевского
E-mail: neymark@pmk.unn.ru



Левин Авраам Яковлевич – родился в 1922 году в городе Екатеринославе (Днепропетровск), участник войны, закончил Горьковский (Нижегородский) университет в 1951 году, кандидат исторических наук. До 1999 года работал доцентом и заведующим кафедрой психологии ННГУ. Имеет работы по истории международных отношений, социологии и психологии управления, теории организации. Автор 70 научных статей, монографии «Социологические и социально-психологические проблемы управления» (Горький: Изд-во ГГУ, 1975), учебника «Управление трудовым коллективом» (1989, в соавторстве), учебного пособия «Введение в теорию организации. Курс лекций» (Н.Новгород: Высшая школа экономики, 1999, в соавторстве). С 1999 года живет в США.

E-mail: avlevin@yahoo.com



СХЕМА ПОАСПЕКТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИССЕРТАЦИИ: ПРАВИЛА, РЕКОМЕНДАЦИИ, ПРИМЕРЫ

В.М. Аникин, Б.Н. Поизнер, Д.А. Усанов

Излагаются рекомендации по структуре и изложению основных аспектных характеристик диссертации и автореферата.

Ключевые слова: Диссертация, автореферат, структура, рубрики автореферата.

*Est innatus in nobis cognitionis
amor et scientiae¹.*

Введение

Органичным этапом профессионального роста и своего рода «инициации» новых поколений ученых является оформление диссертации и сопутствующего ей автореферата. В некотором смысле об инициации здесь можно говорить и без кавычек. Ведь процедура защиты (при её благоприятном исходе) маркирует *переход* соискателя в сословие «сертифицированных» учёных. Защита вместе с её атрибутами символизирует признание его научно-технических достижений экспертами, действующими от имени всего этого сословия. Каким же исключительным правом наделено – почти 400 лет – сословие естествоиспытателей? Если у диссертанта возникает повод задуматься над этим вопросом, то, возможно, ему окажутся полезными наблюдения опытного социолога С.Г. Кордонского. В своей последней книге он разъясняет: «Современные сословия, сохраняя в какой-то степени корпоративность и замкнутость, вписаны в классовую структуру национальных государств и демократическое общественное устройство, они обеспечивают себе преференции на чуждом им рынке за счёт традиционного или узаконенного права на монопольное использование специфического для сословия источника ресурсов. Эти ресурсы достаются членам сословий «по наследству», по закону, в результате обучения или по стечению обстоятельств. Так, современные медики "по закону" монополизировали право на лечение, а учёные – право на получение нового знания. Капитализируя эти ресурсы, члены сословий выходят на современные рынки, становясь богатыми, бедными или принадлежа к среднему классу»². Естественно, злоупотребление (даже отдельными немногочисленными членами, допустим, новичками, вступающими в научное сообщество) этим монопольным правом было бы

¹Мы рождены со страстью к исследованию и знанию. – *Перевод авторов.*

²*Кордонский С.Г.* Сословная структура постсоветской России. М.: Ин-т Фонда «Общественное мнение», 2008. С. 31.

губительно для репутации сословия и его будущего. Вот почему столько внимания уделяют (не)формальной экспертизе диссертации!

Диссертация и автореферат как научные произведения отличаются по своему жанру от статей, докладов и монографий, и перевод итогов научно-исследовательской работы в формат диссертации и тем паче – автореферата требует знания определенной методологической схемы изложения, прежде всего, таких характеристик работы, как актуальность, объект, метод и предмет исследования, научные утверждения (положения) как предмет защиты, доказательные моменты истинности полученных положений и результатов, их научной и прикладной значимости, апробированности и т.п. Данные характеристики, называемые аспектными, предшествуют изложению собственно содержания диссертации и признаны наиболее целесообразными при ее реферировании [1].

Как корректно и семантически точно в рамках поаспектной характеристики работы отразить содержание диссертации во введении к диссертации и в автореферате, наиболее читаемом и обсуждаемом экспертами и специалистами документе? Естественно, прежде всего, необходимо следовать рекомендациям обязательного для всех соискателей «Положения о порядке присуждения ученых степеней» [2]. Трудность для соискателей ученых степеней состоит в том, что эти рекомендации сформулированы весьма лаконично (основное содержание документа [2] составляет описание процедурных правил, связанных с представлением и защитой диссертации). Что же касается требований к *содержанию* диссертационных работ, то для работ физико-математического профиля они, по существу, сводятся к следующему:

1) «диссертация должна... содержать совокупность *новых научных результатов и положений*, выдвигаемых автором для публичной защиты...» [2, п. 9];

2) в диссертации на соискание ученой степени доктора наук автором должны быть «... разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как *новое крупное научное достижение*, либо решена *крупная научная проблема*, имеющая важное социально-культурное или хозяйственное значение, либо изложены *научно обоснованные технические, экономические или технологические решения*, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие экономики страны и повышение ее обороноспособности» [2, п. 8];

3) диссертация на соискание ученой степени кандидата наук как научно-квалификационная работа должна содержать «... *решение задачи*, имеющей существенное значение для соответствующей отрасли знаний, либо изложены научно обоснованные технические, экономические или технологические разработки, имеющие существенное значение для экономики или обеспечения обороноспособности страны» [2, п. 8];

4) в автореферате должны быть отражены «основные идеи и выводы диссертации, показаны вклад автора в проведенное исследование, степень новизны и практическая значимость результатов исследований» [2, п. 20].

Очевидно, приводимые формулировки являются предельно общими, и только эксперт с определенным опытом (отнюдь не «начинающий» соискатель) понимает существо вопроса. Естественно, в течение многих лет формировались определенные правила написания и порядка расположения аспектных характеристик диссертационной работы, что находило свое отражение и в объемных (в противовес к формулировкам [2]) руководствах «по написанию диссертаций», правда, без должного, на наш взгляд, методологического обоснования логики (порядка) представления и существа рубрик поаспектной (общей) характеристики диссертации). И что нередко

происходит на практике? Научный руководитель вручает своему подопечному пачку разномастных авторефератов предыдущих лет и советует ориентироваться на них. Это совсем не гарантирует необходимого реферативного и методического качества работы, от которой существенно зависит ее восприятие и научная оценка. При таком «эмпирическом» подходе возможно тиражирование ошибок, нелепостей, а то и существенных отклонений от духа и буквы «Положения» [2].

Поэтому разъяснение соискателям вопросов, связанных с представлением результатов диссертации остается актуальным не только для соискателей, но и для научных руководителей и экспертов – членов диссертационных советов. Для соискателей полезны методические материалы, истолковывающие формальные нормы действующего «Положения о порядке присуждения ученых степеней», методологию изложения нового знания и, наконец, снимающие психологические барьеры перед «бюрократическим» аспектом защиты диссертации. Для научных руководителей (консультантов) и экспертов целесообразны согласованные обоснованные подходы к оценке диссертационных работ, базирующейся на их поаспектной характеристике.

Основываясь на некоторых общих закономерностях представления результатов научного творчества и сложившихся в научной среде нормах, в статье мы описываем логически обоснованную структуру общей характеристики диссертационной работы и некоторые отдельные ее составляющие, наиболее часто вызывающие у авторов трудности при формулировке.

1. Структура общей (поаспектной) характеристики диссертации

Структуру изложения поаспектной характеристики диссертации, диктуемую как самим жанром диссертационной работы³, так и общей методологией получения и представления результатов научного творчества⁴, можно составить из трех укрупненных блоков, отражающих «триединство» процессов: а) выявления актуальной научной проблемы, б) рафинированной формулировки достижений при ее решении и в) доказательства истинности полученных результатов (рис.).

Формулировка и актуализация научной проблемы включают изучение содержания вопроса, актуализацию объекта исследования, формулировку целей и задач исследования, выбор и обоснование метода исследования, определение предмета исследования.

Квинтэссенция достижений соискателя – положения (утверждения) и результаты, выносимые на защиту.

Верификация положений и результатов диссертации состоит из обоснования достоверности, научного приоритета, теоретической и прикладной значимости выдвинутых на защиту положений и результатов.

Главный элемент данной схемы – это выдвигаемые на защиту положения и результаты; именно они становятся «центром», вокруг которого происходит «движение» мысли: научным положениям должна предшествовать актуализация научной проблемы, а на завершающем этапе проводится верификация сформулированных научных утверждений и результатов.

³См. выдержки из [2], приводившиеся выше.

⁴В этой связи можно сослаться, например, на методологические труды Г.П. Щедровицкого, Ю.А. Шрейдера, А.М. Пятигорского, В.И. Корогодина, В.В. Тарасенко.



Схема представления результатов научного исследования
при защите диссертации

Согласно логике разворачивающегося исследования и рефлексии над ним *post factum*, объект исследования резонно упомянуть первый раз, завершая анализ состояния вопроса и обосновывая актуальность темы диссертации. Далее формулируется цель работы. Целеполагание (с учётом научной конъюнктуры и природы объекта исследования), в свою очередь, развёртывает задачи, решение которых требует от исследователя грамотно выбрать (создать) адекватные методы исследования. В свете методов объект даёт свою «тень» – предмет исследования.

Чтобы самооценка диссертации во введении и автореферате диссертации была содержательной и конкретной, далее целесообразно «выложить козыри на стол» – предъявить научные положения, выносимые на защиту, и другие результаты творческой деятельности соискателя.

Если научные положения и другие результаты, выносимые на защиту, действительно составляют квинтэссенцию трудов соискателя, то дальнейшее обсуждение логично концентрировать именно на них, а не на «диссертации в целом и вообще». Имея перед глазами корректные «научные положения и другие результаты», соискателю легче характеризовать их в кардинальных аспектах (новизна, научная и практическая значимость, достоверность и обоснованность). В свою очередь, читателю при таком порядке изложения легче составить верное представление о конкретных достижениях диссертанта и их ценности.

Таким образом, с рассмотренных позиций порядок поаспектных рубрик автореферата/введения к диссертации должен быть примерно следующим: актуальность темы, объект исследования, цели и задачи исследования, научно-методическая база, предмет исследования, положения и результаты, выносимые на защиту, научная новизна, научная и прикладная (практическая) значимость, характеристика личного вклада соискателя, аргументированность и достоверность представляемых научных результатов, краткие сведения об апробации работы (в том числе о публикациях), структуре и объеме диссертации.

2. Объект, методы и предмет исследования

Содержание диссертации должно укладываться в «прокрустово ложе» определенной *специальности* в рамках выделенной *отрасли науки*. Именно отрасль науки и специальность определяют общую научную направленность работы и указываются на первых страницах диссертации и автореферата. Формальный перечень отраслей наук и специальностей утверждается государственными структурами, курирующими вопросы науки, и составляет содержание «Номенклатуры специальностей научных работников»⁵. «Номенклатуры специальностей» дополняются более конкретными «Паспортами специальностей научных работников», в которых определяются содержание (в разделах «Формула специальности»), области, объекты и предметы исследований (в разделах «Область исследования»), отрасли науки, отвечающие каждой научной специальности. Кроме того, в «Паспортах специальностей» указываются «родственные» (смежные) специальности, в рамках которых возможно согласованное и взаимодополняющее рассмотрение одного и того же объекта исследования.

Проблемная научная ситуация порождает, как уже говорилось, *объект исследования* – выделенный фрагмент объективной реальности. Направления его осмысленного изучения формулируются в форме конкретных *целей и задач*. Поставленные цели и задачи, в свою очередь, диктуют выбор *научно-методической базы, методологии* исследования. *Предметом исследования* становится обусловленная методологией *модель объекта*, воплощенная либо в знаках (словах, образах, формулах, уравнениях, программах для ЭВМ и пр.), либо в специальных устройствах (экспериментальных установках, макетах, аналогах и т.п.). Говоря несколько иначе, научно-методическая база играет роль своеобразного когнитивного фильтра, который формирует предмет исследования⁶. Смена научно-методической базы приводит и к эволюции предмета исследования⁷.

Приведем простой наглядный пример. Допустим, что в качестве *объекта* исследования выбрано оконное стекло нового поколения. *Цель* работы – оценка физических характеристик пропускания им солнечного света. Вполне приемлемой *научно-методической базой* здесь может служить теория, развитая в рамках геометрической оптики. Следовательно, *предметом* исследования в данном случае является модель распространения световых пучков через плоскопараллельную пластину (систему плоскопараллельных пластин, разделенных воздушной средой) в приближении геометрической оптики с учётом явлений поглощения и дисперсии света и т.д. и т.п.

Понятно, что один и тот же объект – в зависимости от цели исследования и релевантной ей методологии – может быть представлен множеством предметов исследования. Так, планета Земля (объект) предстаёт в различных ипостасях, будучи

⁵Номенклатура специальностей научных работников утверждена Министерством образования и науки РФ № 59 от 25 февраля 2009 г. Она была согласована с РАН, ВАК и некоторыми заинтересованными федеральными органами исполнительной власти.

⁶Иногда в качестве «рабочего» определения предмета исследования называют часть объекта исследования. Но если объект исследования – это фрагмент объективной реальности, то и любая его часть оказывается тоже объектом, а не предметом исследования.

⁷См., например, историю моделей феномена синхронизации в книге Трубецков Д.И. Синхронизация: Ученый и время. Лекции на школах «Нелинейные дни в Саратове для молодых». Саратов: ГосУНЦ «Колледж», 2006. 112 с.

предметом исследования в геофизике, геохимии, астрономии, геологии, географии, геодезии, сейсмологии, экологии и т.д.

Английский физик-теоретик Р.Э. Пайерлс в свое время предложил такую интересную градацию моделей физических явлений [3]⁸:

1. *Гипотеза* («Такое могло бы быть... »).
2. *Феноменологическая модель* («Ведем себя так, как если бы... »).
3. *Приближение* («Что-то считаем или очень малым, или очень большим»).
4. *Упрощение* («Опустим для ясности некоторые детали»).
5. *Эвристическая модель* («Количественного подтверждения нет, но модель способствует более глубокому проникновению в суть дела»).
6. *Аналогия* («Учтем только некоторые особенности»).
7. *Мысленный эксперимент* («Главное состоит в опровержении возможности»).

Когнитивные модели, которые систематизировал Р. Пайерлс, в нашем понимании есть предметы исследования – «проекции» объекта исследования «в свете» тех или иных *методов* исследования: метода гипотез, метода аналогий и т.д. Как замечал сам автор данной модельной иерархии, «общим элементом для всех этих разных типов моделей служит то, что они помогают нам более ясно представить существо физических проблем путем анализа упрощенных ситуаций, более доступных нашей интуиции. Эти модели служат ступеньками на пути рационального объяснения реальной действительности». Собственно, одной из главных задач и при теоретическом, и при экспериментальном исследовании является построение соответствующей модели (в частности, математической) изучаемого явления или процесса.

Издревле применяют два основных направления научного исследования – теоретическое и экспериментальное. В рамках того и другого существуют разнообразные инструментарии и методики исследования, которые, как уже говорилось, конституируют предмет исследования.

В последнее время широчайшее распространение получил так называемый «вычислительный эксперимент», который называют даже новой технологией научных исследований. На самом деле вычислительный эксперимент – это не эксперимент в обычном понимании, а просчет модельных уравнений на компьютере в «безнадежных» ситуациях, когда невозможно найти точные решения. Занимаясь компьютерным экспериментом, никогда не нужно забывать «принцип ИВМ»: «*Компьютер должен работать, а человек думать*».

Численные методы служат полезным расширением *аналитических методов*, которые всегда очень высоко ценились в физике по различным причинам. Аналитические модели отличаются математической элегантностью, дают возможность понять основные черты явления и указывают направление поиска методов, пригодных в более сложных (более реалистических) ситуациях. Аналитическое решение универсально, и очень многие математические модели, лишившись физической и технической оболочки, приобретают способность количественного описания различных по своей физической природе процессов или по техническому назначению объектов. Когда создается удачная модель физического явления, то есть модель, которая позволяет делать точные вычисления и предсказания, то уже сама математическая структура модели может открывать новые стороны этого явления. Наконец, анали-

⁸ Пайерлс Р. Построение физических моделей // УФН. 1983. Т. 140, вып. 3. С. 315–332.

тическое решение заведомо свободно от рассмотрения проблем, связанных с преодолением особенностей множества машинных чисел, являющего собой (в отличие от континуума чисел действительной оси) множество меры нуль.

Что же касается «настоящего», натурального эксперимента, то его роль в гиперболизированном виде выражается «законом» Букера: «*Даже самая маленькая практика стоит большой теории*». Определенным контрутверждением по отношению к «закону» Букера служит не менее популярное высказывание: «*Нет ничего более практического, чем хорошая теория*». Оно необыкновенно популярно среди представителей разнообразных отраслей науки. Так, физики приписывают его авторство Л. Больцману и Р. Кирхгофу, математики – А. Пуанкаре и С.А. Чаплыгину, специалисты в области социальной психологии – К. Левину... А однажды это изречение проникло и в политический документ⁹. Действительно, осмысленный эксперимент невозможен без теории, без продумывания и обобщения экспериментальных фактов, без нахождения путеводной нити в будущие исследования. Более того, существуют яркие примеры того, что эксперимент сам по себе не гарантирует правильного объяснения наблюдаемых явлений¹⁰!

«Хорошая теория» в определенных рамках своего применения удачно систематизирует факты, полученные из опытов, и обладает предсказательной силой, что позволяет переформулировать мысль о ее важности и в такой форме: «Нет ничего более ценного, чем приложения хорошей теории».

Иначе говоря, важен комплекс различных методов познания. Вот что, к примеру, писал Нобелевский лауреат Э. Сегре: «Различных физиков привлекают разные аспекты науки. Одни стремятся только к общим, фундаментальным принципам, другие охотятся за новыми явлениями, третьи любят точные измерения, четвертые разрабатывают новые приборы или методы. Эти стремления не исключают одно другое, они даже часто дополняют друг друга, и все они необходимы для развития физики».¹¹

В автореферате и диссертации, вслед за описанием объекта исследования, необходимо указывать на характер проведенного исследования (теоретическое, экспериментальное, комплексное) с обязательным добавлением четкой информации о примененных конкретных математических моделях и методах, об экспериментальном оборудовании и использованных экспериментальных методиках исследования, о степени соответствия полученных результатов возможностям современного эксперимента и т.п. Предмет же исследования, описываемый вслед за научно-методической базой работы, одновременно определяет тему диссертации (отражается в ее заглавии).

3. Формулировка научных положений, выдвигаемых на защиту

Согласно представленной выше схеме аспектной характеристики диссертации, научные положения (научные утверждения), выносимые на защиту, являются существенным ядром (квинтэссенцией) диссертации. Все остальные рубрики аспектной

⁹Материалы XXV съезда КПСС. М.: Политиздат, 1976. С. 48–49.

¹⁰См.: Ланда П.С., Трубецков Д.И., Гусев В.А. Заблуждения и реальность в некоторых задачах физики (теория и эксперимент) // УФН. 2009. Т. 179, вып. 3.

¹¹Сегре Э. Энрико Ферми – физик. М.: Мир. 1973. С. 37.

характеристики будут, выражаясь языком известного героя Д.И. Фонвизина, «прилагательными» к положениям.

Формулировка именно положений, выносимых на защиту, является камнем преткновения для многих соискателей. Спектр высказываний, провозглашаемых в качестве выдвигаемых на защиту положений, в авторефератах и диссертациях удивительно разнообразен и по форме, и содержанию, поскольку воззрения на то, что считать «положениями, выдвигаемыми на защиту», в научной среде имеют определенный разброс (в «Положении о порядке присуждения ученых степеней» строгого определения этого понятия не дается). Положения, прежде всего, не должны содержать общие и банальные утверждения¹². Они должны отражать существенные признаки новизны¹³. При этом, очевидно, положения не должны включать явные оценки, выражаемые эпитетами «новый», «важный», «фундаментальный» и т.п. (характеристика новизны и значимости исследования проводится в других аспектных рубриках работы).

Общая структура положений должна отвечать вполне определенным канонам. Как представляется, для их формулировки более всего подходят *открытые содержательные, семантически точные утверждения относительно изучаемого предмета, имеющие структуру логического суждения (логического высказывания, логического оператора импликации)*. Предметом положения может быть обнаруженная закономерность, фундаментальное свойство математической модели, методика измерения и т.д. и т.п.

Что это означает? Положение должно быть, во-первых, сформулировано в форме *открытого тезиса*, не содержащего *скрытой* информации и не требующего для своего понимания привлечения дополнительных разъяснений. Во-вторых, положение не должно содержать семантически неопределенные, «размытые» формулировки (термины). В-третьих, положение должно выражать *причинно-следственные связи, открытые закономерности, сущности*. Делается это в форме соответствующего высказывания, которое содержит утверждение и *одновременно* условия его справедливости (осуществимости).

Структурной моделью корректного защищаемого положения способен служить логический оператор *импликации* (от лат. *implicatio* – сплетение, *implico* – тесно связываю) – операция связки, соответствующая грамматической конструкции «если *A*, то *B*». Здесь *A* – *антецедент* (от лат. *antecedo* – предшествовать), выражающий условие, *B* – *консеквент* (от лат. *consequor* – непосредственно или логически следовать) – соответствующее следствие.

В составе защищаемого положения антецедент *A* формулирует условия (границы) применимости последующего утверждения *B*. Так, в работах физико-математического и технического профиля антецедент *A* может содержать указание:

а) на параметры объекта (прибор, его блок, узлы), материальной среды (состав, количественные характеристики значимых свойств, особенности и т.д.) и физического поля;

б) на физические (интенсивность, температура, давление, нелинейность, обратная связь и т.п.), геометрические (конфигурация, размеры, пропорция и пр.), вре-

¹²См. соответствующий комментарий на сайте ВАК.

¹³См.: Иванов В.А., Ощепков Г.С., Селетков С.Г. Подготовка диссертаций в системе послевузовского профессионального образования: Учеб. пособие. Йошкар-Ола: Изд-во МарГТУ, 2000. 195 с.

менные (опережения, задержки, синхронизм и т.д.), математические (приближения, классы отображений, функций, уравнений и пр.) условия;

в) на интервалы значений параметров, режимы протекания процесса или функционирования устройства и т.д. и т.п.

Консеквент B представляет обнаруженный соискателем феномен или установленную закономерность, имеющие место при истинности высказывания A .

Приведем некоторые «учебные» формулировки научных положений.

1. Системы, описываемые двух- и трёхпараметрическими отображениями с шумом, вблизи соответствующих критических точек перехода порядок–хаос демонстрируют свойство самоподобия (скейлинга) на бифуркационных деревьях, графиках и сечениях пространства параметров в виде карт характеристических показателей Ляпунова с константами $\mu_T = 8.2439$, $\mu_S = 10.0378$, $\mu_E = 11.5937$, ответственными за пересчёт амплитуды шума.

2. Возникновение и аннигиляция оптических вихрей в пространстве сопровождаются перестройкой системы критических точек поля вектора Умова–Пойнтинга. Предвестниками пары вихрей являются локальные фокусировка и дефокусировка световой энергии в окрестностях особых точек «устойчивый узел» и «неустойчивый узел».

3. В модели процессов в бихроматическом излучателе на основе уравнений Статца–Де Марса плавная положительная перекрёстная обратная связь в системе управления добротностью резонаторов лазеров позволяет синхронизовать импульсы их излучения с погрешностью, не превышающей 13% от их длительности (порядка 6 нс).

Типичными недостатками формулировки положений соискателями ученых степеней являются неполнота выдвигаемых утверждений в плане отражения выявленных в работе важных причинно-следственных связей и неконкретность описаний. Разберем некоторые неудачные формулировки положений.

Положение 1. Показана возможность выделения тремя различными методами основных колебательных процессов кардиореспираторной системы из временного ряда $R-R$ интервалов. Продемонстрирована возможность исследования синхронизации между колебательными процессами кардиореспираторной системы на основе анализа последовательности $R-R$ интервалов.

Данная формулировка, стилистически представленная в форме отчета, является расплывчатой и поэтому несколько обесценивает положение. Соискателю следовало бы строить положение в виде утверждений, констатирующих: 1) когда (при каких условиях, наборах параметров и т.д.) упомянутая возможность идентификации процессов осуществляется полностью или частично; 2) по каким характеристикам имеют преимущества упомянутые методы; 3) какие причины делают упомянутую возможность идентификации колебательных процессов неосуществимой.

Положение 2. Разработан алгоритм подсчета количественной оценки степени фазовой синхронизации между колебательными процессами и показано, что данная оценка может быть использована в качестве диагностического критерия при исследовании состояния кардиореспираторной системы человека и контроля эффективности лечебных мероприятий.

Упомянутый алгоритм, судя по описанию, заслуживает быть предметом защищаемого положения (его звеном), но он только *упомянут*, отнюдь не раскрыт.

Положение 3. Экспериментальная модель дискретной системы в виде двух связанных особым образом логистических отображений демонстрирует конфигурацию бассейнов притяжения в виде множества Мандельброта.

Данное утверждение есть контаминация (неудачное объединение) *научного положения* и формулировки *know-how*. Оборот «в виде связанных особым образом логистических отображений» вполне соответствует жанру *know-how*, когда необходимо *скрыть нечто* от читателя. Напротив, научное положение – *максимально открытый тезис*, чье содержание и формулировка ориентированы на воспроизведение читателем. Здесь же – «*закрытое*» положение: на нем «висит замок» в виде оборота «*особым образом*».

Тщательная формулировка положений, выносимых на защиту, позволяет автору лаконично и убедительно отразить сущность своей работы, сформировать у читателей адекватное впечатление о ее качестве. В дополнение к *положениям* соискатели, как правило, защищают и *результаты* – все то, что не укладывается в формат научного положения: экспериментальные установки, испытательные стенды, метрологические устройства и приспособления, технологические аппараты и приспособления, программные продукты, базы и банки данных, методические материалы, лабораторные установки, макеты и наглядные пособия для учебных или других целей, методические и терминологические новации и т.д.

4. Языковые особенности диссертации и автореферата

Написание как диссертации, так и автореферата требует определенного профессионального и литературного мастерства. Последнее качество предполагает, что соискатель владеет хотя бы элементами так называемого *формального образования*. Его, по мнению германского мыслителя Фр. Ницше, обеспечивает знакомство с античной культурой. Получая формальное образование, человек учился «ходить, танцевать, говорить, петь, вести себя, поддерживать беседу: примерно этому и учились у формальных воспитателей второго и третьего века». Раскрывая смысл этого непривычного нам понятия, Фр. Ницше подчёркивает: «Материал здесь – это знания, факты. Формален способ, каким думают, говорят, пишут, – словом, *каким* приобретают знания и распространяют их». Действительно, именно формальное, методическое начало, положенное в основу любого научного исследования, делает возможным обмен результатами, придавая общению учёных международный масштаб. «Но как только заходит речь о воспитании *научного человека*, – продолжает Фр. Ницше, – тогда "формальное" начинает означать: думать и писать, а умение говорить уже не важно». Итак, необходимо умение думать и писать...

Отметим главные особенности научного текста. Научное произведение должно складываться из аргументированных рассуждений, целью которых является доказательство истинности приводимых результатов. Научный текст, следовательно, должен *обладать логической стройностью, смысловой законченностью, целостностью и связностью*. Для стиля естественнонаучных текстов характерными также являются *объективность, строгость, использование специальной терминологии, смысловая точность*.

Очень четкие рекомендации на этот счет можно найти у Н.Г. Чернышевского: «...Лорд Брум сжато и ясно выразил требования научной терминологии следующими правилами: 1) всегда употребляйте самые ясные и недвусмысленные термины, 2) никогда не употребляйте слова, имеющие два смысла, не определив, в каком из них оно будет употребляться, 3) никогда не употребляйте одного слова в двух значениях, 4) никогда не употребляйте разных слов в одном значении».¹⁴

Таким образом, для однозначности восприятия в научном тексте (в отличие от чисто художественного произведения) нужно, как правило, исключать синонимы для обозначения рассматриваемого явления, процесса или предмета, точнее, не применять слова, кажущиеся синонимами. Во всяком случае, нужно специально заранее условиться, что некоторые понятия являются эквивалентными, иначе разницей в терминологии может создать ложное впечатление, что речь идет о разных вещах. Поскольку некоторые из терминов являются «перегруженными», то есть часто используемыми в различных контекстах, возможную неоднозначность толкований нужно сразу исключать. Сейчас в профессиональной среде часто пользуются жаргоном, несущим, безусловно, свой неповторимый колорит, но подменять им устоявшиеся научные или технические понятия не следует.

Бывает, некоторых авторов научных работ упрекают в излишнем «научообразии». Здесь необходимо четко разделить два момента: преднамеренное искусственное усиление «значимости» работы посредством использования усложненной и (или) откровенно псевдонаучной терминологии (субъективный фактор) или необходимость введения *новых* средств для отражения добытого знания, что диктуется уже фактором объективным.

Первый из отмеченных моментов не без ехидства прокомментировал американский писатель-фантаст Айзек (Исаак) Азимов в книге «Words of Science», посвященной этимологии научных терминов и истории связанных с ними открытий: «Кажется, учёные специально скрывают свои тайны от простых смертных, набрасывая на ... слова, с которыми никогда не встречаешься в обыденной жизни, ... покров таинственности»¹⁵.

Истинные причины генезиса новой научной терминологии поясняет цепочка высказываний выдающихся ученых.

Джон Фредерик Гершелл: «Нельзя внести точность в рассуждения, если она сначала не введена в определения».

Антуан Лоран Лавуазье: «Каждая физическая наука необходимо состоит из ряда фактов, образующих науку, представлений, их вызывающих, и слов, их выражающих. Слово должно рождать представление, представление должно изображать факт, это три оттиска одной и той же печати».

Давид Гильберт: «Иногда мы пользуемся некоторыми новыми и неслыханными словами не для того, чтобы с помощью словесных покровов окружить вещи туманом и мраком, а для того, чтобы ясно и полно выразить тайны, не имеющие названия и ни разу еще до сих пор не подмечавшиеся».

¹⁴Слово о науке: Афоризмы. Изречения. Литературные цитаты/ Сост. Е.С. Лихтенштейн. М.: Знание, 1981. С. 253.

¹⁵Азимов А. Язык науки. М.: Мир, 1985. С. 9.

Анри Пуанкаре: «Итак, все законы выводятся из опыта. Но для выражения их нужен специальный язык. Обиходный язык слишком беден; кроме того, он слишком неясен для выражения столь богатых содержанием точных и тонких соотношений».

Альберт Эйнштейн: «Что же отличает язык науки от языка в обычном смысле? Как объяснить, что язык науки в целом понятен каждому? Наука стремится к предельной точности и ясности понятий, их взаимосвязи и соответствия чувственным данным».

Действительно, специфика истинной научной работы заключается в том, что автор, представляя *новое знание*, «принуждается» к речи о том, о чем до него никто еще не говорил. Это требует не только демонстрации владения русским языком, но профессионального умения строить вербальные (логические, концептуальные, «физические», смысловые и т.п.), то есть **нематематические** модели. Эти словесные модели могут предшествовать математическим моделям, выражать их «смысл», обобщать результаты моделирования. Обобщенно говоря, в диссертации и автореферате соискатель призван демонстрировать свой уровень *лингво-дисциплинарной компетенции*. Новое знание требует порой и особой лексики, и непривычного синтаксиса, когда соискатель должен дать словесное описание изучаемого процесса (явления).

Автор научного достижения при передаче нового знания воспринимается и представляет себя с различных позиций. Во-первых, он невольно выражает свою эпоху, (суб)культуру, научную школу, творческий коллектив и т.д.¹⁶ Во-вторых, оформляя словами – небрежно либо продуманно, тускло либо выпукло – сущность своего достижения и его значение, автор использует шанс предъявить коллегам собственную неповторимую натуру. Читатель воспринимает её и как носителя интеллекта, и как содержательную «языковую личность»¹⁷. Далее, успешно *передавая смысл* своего достижения, соискатель способен совершить два фундаментальных действия по глаголу *to connect*: 1) выстраивать логическую цепочку, устанавливая связь (между словами, мыслями, частями высказывания и т.д.); 2) устанавливать отношения/взаимоотношения, налаживать контакты, например с потенциальными читателями, заинтересованными специалистами. Налаживанием подобных контактов – через текст автореферата – с профессиональным сообществом нередко определяется судьба творческой продукции (*fata libelli*, как говорили древние) диссертанта [3].

Отметим и такое обстоятельство. Нужно быть очень внимательным при формулировке и редактировании названия диссертации как с содержательной, так и с грамматической точек зрения. Как отмечается в одном из комментариев на сайте ВАК, ключевые слова формулировки названия должны указывать на предметную область исследования и суть проблемы. В названии диссертации не должно быть повторений однокоренных слов, цепочки (более двух!) родительных падежей, сокращений, аббревиатур, неоправданной фразеологии. Нужно помнить, что название, содержание и выводы диссертации должны находиться в органичном соответствии друг с другом.

Обратим также внимание на две типичные ошибки диссертантов, связанных с употреблением слова «исследование». Включение слова «исследование» в название диссертации приводит к тавтологии, ибо в переводе с латыни *dissertatio* и есть «ис-

¹⁶Маркова Л.А. Человек и мир в науке и искусстве. М.: «Канон +», РООИ «Реабилитация», 2008. С. 334.

¹⁷Термин лингвиста Ю.Н. Караулова (1987).

следование». Далее, нередко *целью* работы опять же объявляется «исследование», то есть *процесс*. На самом деле, исследование – отнюдь не цель, а *средство, способ* достижения цели.

Весьма странными кажутся и весьма часто используемые в отзывах на диссертацию и автореферат выражения относительно «законченности» представленной работы. Исследование по своему содержанию и структуре может отличаться комплексностью, цельностью, гармоничностью, широтой и т.п., но называть его «законченным» означает ставить «точку» на всем научном развитии. А. Эйнштейн, вторя древним, подчеркивал, что *наука никогда не является законченной книгой*.

Заключение

Поаспектная характеристика диссертации формирует у читателей диссертации и особенно автореферата представление о качестве диссертации как научного произведения. Она должна отличаться необходимой информативностью, достигаемой как насыщенностью содержания, так и логически обоснованным порядком следования рубрик и соответствием каждой из них соответствующему жанру. Корректно и грамотно (в грамматическом и профессиональном отношении) составленная поаспектная характеристика работы создает у читателей благоприятное впечатление о своевременности проведенного научного исследования, его теоретической и (или) экспериментальной основательности, методологической ценности, полезности для практических приложений, а также об уровне научной подготовки соискателя.

Библиографический список

1. ГОСТ 7.9-95. Реферат и аннотация. Общие требования. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. 7 с.
2. Положение о порядке присуждения ученых степеней. Утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 30 января 2002 г. № 74 //Собрание законодательства Российской Федерации. 2002, № 6, ст. 580; 2003, № 33, ст. 3278; 2006, № 18, ст. 1997.
3. *Пойзнер Б.Н.* Fata libelli как процесс репликации // Библиофилы России: Альманах. М.: Любимая Россия, 2008. Т. 5. С. 33.

Поступила в редакцию 10.03.2009

OUTLINE OF THESIS GENERAL CHARACTERISTICS: RULES, RECOMMENDATIONS, SAMPLES

V.M. Anikin, B.N. Poizner, D.A. Usanov

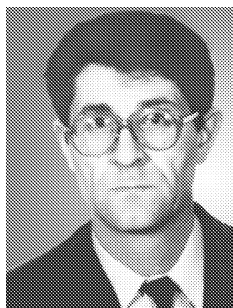
The presentment structure of general characteristics of dissertation and its abstract are discussed.

Keywords: Thesis, dissertation, abstract, abstract sections.



Аникин Валерий Михайлович – родился в Аткарске Саратовской области (1947). Окончил физический факультет СГУ (1970). Доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительной физики и автоматизации научных исследований, профессор кафедры электроники, колебаний и волн, зам. декана по научной работе физического факультета СГУ. Область научных интересов – хаотическая динамика, функциональный анализ, математическое моделирование стохастических и хаотических процессов в применении к задачам радиофизики и электроники, оптики, экологии. Автор 180 печатных работ, в том числе монографии «Аналитические модели детерминированного хаоса» (в соавторстве с А.Ф. Голубенцевым, М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 328 с.). Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.243.01 при СГУ с 1990 года.

410012, г.Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: AnikinVM@info.sgu.ru; ivesc@sgu.ru



Поизнер Борис Николаевич – родился в Томске (1941), окончил радиофизический факультет Томского государственного университета (ТГУ). Защитил кандидатскую диссертацию по теории колебаний и волн (1970), профессор кафедры квантовой электроники и фотоники ТГУ. Читает лекции по нелинейной оптике, лазерной технике, основам синергетики, социальной информатике. Автор и соавтор более 400 публикаций, 10 изобретений, 17 учебных пособий и монографий по физике лазеров, процессам самоорганизации и хаотизации в оптических, радиофизических, социокультурных системах, проблемам вузовской педагогики и (само)образования, науковедению и культурологии. Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации (2005). Действительный член Организации российских библиофилов. Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.267.04 при ТГУ.

634050, Томск, пр. Ленина, 36
Томский госуниверситет
E-mail: pznr@elefot.tsu.ru



Усанов Дмитрий Александрович – родился в Менделеевске (1943). Доктор физико-математических наук, профессор, академик МАН ВШ и РАЕН, проректор Саратовского государственного университета по научной работе, заведующий кафедрой физики твердого тела. Область научных интересов: твердотельная микро- и наноэлектроника, радиофизика, медицинская физика. Автор более 250 научных статей, обладатель 120 авторских свидетельств на изобретения и патентов, имеет награды международных выставок изобретений и инноваций. Приборы, созданные на основе разработок Д.А. Усанова, внедрены в промышленности, в том числе выпущены в виде серий. Заслуженный деятель науки РФ. Член учебно-методического объединения Министерства образования и науки РФ по направлению «Электроника и микроэлектроника» и специальности «Микроэлектроника и полупроводниковые приборы», эксперт по оценке качества образования Федеральной службы по надзору в сфере образования и науки. Председатель диссертационного совета Д 212.243.01 при СГУ с 1990 года.

410012, г.Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: UsanovDA@info.sgu.ru

ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

Рукописи, объемом не более 16 стр. и 8 рис. принимаются в редакцию в 2 вариантах: бумажном и электронном.

1. Бумажный вариант должен быть напечатан через 1,5 интервала и распечатан в **2-х экз.** Если рисунки (только черно-белые!) не вставлены в текст, то они выполняются на отдельных страницах также в 2-х экз. Под рисунком указывается его номер, фамилии авторов, название статьи; подрисуночные подписи печатаются на отдельном листе и не должны дублировать внутритекстовое описание рисунка.

Требования к оформлению текста. На первой странице перед текстом статьи должны быть напечатаны: индекс УДК, название статьи, инициалы и фамилии авторов, краткая аннотация статьи **с ключевыми словами**, составленная по форме удобной для непосредственного включения ее в РЖ, издаваемые ВИНТИ.

К статье прилагаются в 1 экз.:

- перевод на английский язык названия статьи, инициалов и фамилий авторов, аннотации, **ключевых слов.**

- краткие сведения об авторах с фотографиями в графических форматах JPG, GIF и т.д., или сканированные с разрешением не менее 300dpi без дополнительной компьютерной обработки, **e-mail каждого автора и почтовый адрес организации.**

- *Краткие сведения об авторах составляются по следующей форме:*

Сидоров Петр Иванович – родился в 1938 году в Москве, окончил Московский физико-технический институт в 1961 году. После окончания МФТИ работает в ФИАН заведующим отделом. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в МГУ (1964) и доктора физико-математических наук (1977) в области теории колебаний и волн. Автор монографии «Детерминированный хаос и экономика» и учебника «Волны в экологии» (в соавторстве с...). Опубликовал 120 научных статей по направлениям, указанным выше. Лауреат Государственной премии СССР. Редактор журнала International Journal of Chaos Theory и член редакционной коллегии журнала «Физика и жизнь».

В библиографическом списке нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте. В списке указываются:

а) для книг – фамилия автора, инициалы, название книги, город, издательство, год издания, том;

б) для журнальных статей – фамилия автора, инициалы, название статьи, название журнала, серия, год, том, номер, выпуск, первая страница статьи;

в) для депонированных статей – название статьи, инициалы, фамилия автора, название организации, в которой выполнена работа, город, год, объем статьи, название депонирующей организации, дата депонирования, регистрационный номер;

г) для препринта – фамилия автора, инициалы, название издания, полное название издающей организации, год, количество страниц;

д) для материалов конференций, школ, семинаров – фамилия автора, инициалы, название статьи, название издания, время и место проведения конференции, город, издательство, год, первая страница статьи.

В конце статьи авторы должны указать наименование программы, в рамках которой выполнена работа, или наименование фонда поддержки.

2. Электронный вариант. Статья оформляется с использованием макropакета $L^A_T E_X$ 2e. Рекомендуется пользоваться компилятором MiKTeX (MiKTeX2.4), так как именно им пользуются в редакции. В редакцию присылать только TEX-файл (с англ. аннотацией и ав. сведениями) без стилевых файлов и PDF статьи. Все иллюстрации, включенные в оригинал-макет, предоставляются в виде отдельных файлов, записанных в любом из форматов: TIFF, GIF, JPEG, EPS. **Название файла должно обязательно содержать номер рисунка.**

В виде исключения принимаются статьи, подготовленные с помощью текстового редактора Microsoft Word (все формулы должны быть набраны при помощи Equation или MathType).

Все публикации в журнале, в том числе и публикации аспирантов, бесплатные.

Зав. редакцией *Н.Н. Левина*
Редакторы *Л.А. Сидорова, Н.Н. Левина*
Оформление художника *Д.В. Соколова*
Оригинал-макет подготовлен
И.А. Пономаревой, О.Н. Строгановой
в пакете *L^AT_EX*

Подписка на 2009 год осуществляется
по каталогу Агентства Роспечать
«Газеты. Журналы», индекс 73498,
и по договору между Подписчиком
(юридическим или физическим лицом)
и Издателем (Саратовским государственным университетом)

Стоимость подписки на 2009 год 600 руб. (6 номеров)
Заявки на заключение договора принимаются
по почте, по телефону редакции, по эл. почте редакции
Адрес редакции: 410012, Саратов, Астраханская, 83
Тел./факс: (845-2) 52-38-64
E-mail: and@nonlin.sgu.ru

Распространение журнала осуществляется
редакцией журнала по адресной системе

Сдано в набор 1.06.09. Подписано к печати 17.07.09
Формат 70x108/16. Бумага «Балет». Печать трафаретная
Усл. печ. л. 13,3(9,5). Уч.-изд. л. 13,0. Тираж 200. Заказ 414

Отпечатано на ризографе GR 3750 редакции журнала

© Редакция журнала
«Известия вузов. ПНД», 2009
© Оформление художника
Д.В. Соколова, 2009