

О СОВРЕМЕННОМ СОСТОЯНИИ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВАКУУМНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ И МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ С УПРАВЛЯЕМОЙ ЭМИССИЕЙ

Д. И. Трубецков, Г. М. Краснова

В работе кратко изложены некоторые результаты исследований и разработок приборов с управляемой эмиссией (ЛБВ, ЛОВ, карсинотрод, клистроны, а также рентгеновские лампы, полевые эмиссионные дисплеи и др.), которые проводились в течение последних двух десятилетий. Обозначен ряд направлений развития теории приборов с модуляцией эмиссии на поверхности катода. Также рассмотрены созданные в Европе и США программы по вакуумной СВЧ-электронике, направленные на использование новых технологий при освоении терагерцового диапазона и отражающие тенденции последних лет.

Ключевые слова: Автоэмиссионные катоды, ЛБВ, ЛОВ, клистрон, карсинотрод.

Введение

Начиная с 1988 года, ежегодно проводятся конференции, посвященные вопросам СВЧ-электроники приборов с управляемой эмиссией с акцентом на вакуумную микроэлектронику. За последние два десятилетия количество работ в этой области настолько возросло, что на данный момент проходят отдельно международные конференции по вакуумной электронике (International Vacuum Electronics Conference, IVEC), на которых также обсуждаются вакуумные электронные приборы СВЧ с управляемой эмиссией, включая и микроэлектронные, по микроэлектронике (International Vacuum Microelectronics Conference, IVMC) и по наноэлектронике (International Vacuum Nanoelectronics Conference, IVNC). Более того, проводились конференции, тематика которых полностью сводилась к изложению результатов исследования и анализу процессов эмиссии электронов с поверхности катода, а также поиску наиболее подходящих материалов для создания автоэмиссионных катодов (International Vacuum Electron Sources Conference, IVESC).

Одной из первых книг, посвященных СВЧ-микроэлектронике, явилась монография 1996 года [1]. В монографии были изложены основы теории автоэлектронной

эмиссии, известные на тот момент методы изготовления матричных автоэмиссионных катодов и основные математические модели для описания их параметров. Подробно была рассмотрена теория различных вариантов СВЧ-усилителей, генераторов и умножителей частоты, использующих принцип модуляции эмиссии СВЧ-полей (приборов с управляемой эмиссией). Большинство изложенных материалов сохранило свою значимость и сегодня, однако с момента выхода книги прошло 15 лет. Естественно задать вопрос: «Что произошло и изменилось в данной области электроники?»

К важным событиям следует отнести выход в свет монографии [2], в которой рассмотрены физико-химические основы процесса создания нового класса автоэмиссионных наноструктур на базе нанопористого анодного оксида алюминия. Описана принципиально новая интегральная технология создания наноструктурных автоэлектронных микроприборов и систем их межсоединений на основе тонких пленок вентильных металлов и их анодных оксидов. Изложены основы моделирования и расчета характеристик диодных структур, катодно-сеточных элементов, триодных структур. Нет смысла пересказывать монографию [2], остановимся лишь на моментах, важных для дальнейшего изложения, и некоторых, носящих характер напоминаний¹.

Необходимость применения катодов, с которых можно получить большую плотность тока, имеющих длительное время жизни, работающих при температуре окружающей среды и требующих небольшие значения приложенного напряжения, послужила в свое время основой для развития матричных автоэмиссионных катодов (МАЭК). Наиболее характерными их особенностями являются следующие [2]:

- высокая экономичность, обусловленная отсутствием накала;
- устойчивость эмиссии к колебаниям температуры в широком диапазоне ее изменения;
- высокая плотность тока эмиссии, достигающая 10^9 А/см²;
- устойчивость эмиссии к радиационному облучению вплоть до уровня, вызывающего разрушение материала автокатаода;
- высокая крутизна вольт-амперной характеристики, обусловленная экспоненциальной зависимостью тока от напряжения;
- безынерционность отклика тока на изменение внешнего напряжения.

Со временем стали проводиться исследования не только с решетками автокатодов с молибденовыми остриями, метод создания которых был предложен более тридцати лет назад [4], но и с углеродными волокнами и углеродными нанотрубками (УНТ, CNT), карбидом гафния (HfC), арсенидом галлия (GaAs) и многими другими материалами, которые могут быть использованы для создания полевого катода. Также было произведено сравнение их характеристик между собой [5].

После открытия (1991) Иидзимой углеродных нанотрубок было опубликовано огромное количество работ, посвященных вопросам их применения. Результаты исследований по автоэмиссионным свойствам углеродных материалов наиболее полно обобщены и изложены в работе [6]. К настоящему времени предложено множество методов выращивания углеродных нанотрубок, в том числе синтез УНТ с помощью

¹Представляет интерес также книга [3], состоящая из двух глав. Как пишет автор, «первая из них содержит рассеянную по многочисленным журнальным публикациям информацию о строении, свойствах и возможных применениях нанотрубок... Предлагаемый к книге CD-ROM содержит пакет авторских программ на языке ФОРТРАН по расчету электронной структуры нанотрубок и нанопроводов.»

дугового разряда, каталитического химического осаждения и др. Диаметр выращиваемых УНТ обычно колеблется в диапазоне от 20 до 80 нм. Отношение длины и диаметра в зависимости от их изменения может варьироваться от 100 до 5000. Достоинством является получение автоэлектронной эмиссии с их поверхности при низких электрических полях, менее 10 В/мкм. Это в большой степени обусловлено высоким значением коэффициента усиления электрического поля из-за существенной шероховатости вершин УНТ. Одним из недостатков является то, что выращенным УНТ не хватает вертикально-параллельной ориентации, в результате чего они дают ограниченную тепловую и механическую стабильность, что приводит к неоднородной автоэлектронной эмиссии и продолжительному падению тока.

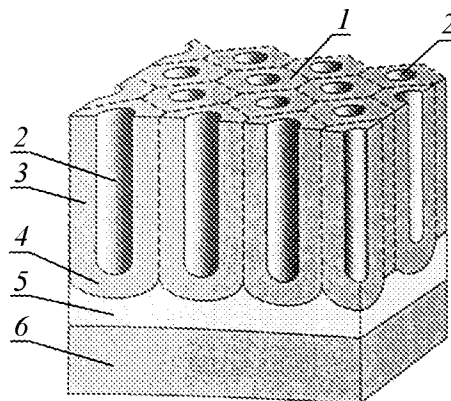


Рис. 1. Идеализированная структура пористого анодного оксида алюминия, сформированного из части слоя алюминия, осажденного на подложку в вакууме: 1 – окисная ячейка; 2 – пора; 3 – стенка окисной ячейки; 4 – барьерный окисный слой; 5 – слой алюминия; 6 – подложка [2]

Ключевым элементом интенсивно развивающейся в настоящее время вакуумной нанoeлектроники является наноструктурная автоэмиссионная матрица [2]. Пористый анодный оксид алюминия (АОА) с регулярной нанопористой структурой (рис. 1), образующейся естественным путем, представляет собой дешевый и уникальный строительный материал для создания наноразмерных автоэмиссионных приборов. Пористый АОА состоит из плотной упаковки окисных ячеек в виде гексагональных регулярных призм, направленных по нормали к поверхности пленки и спаянных по боковым граням. Каждая окисная ячейка состоит из центрально расположенной поры, окисных стенок и барьерного окисного слоя (основания окисной ячейки), имеющего вид полусферы, выпячивающейся в нижележащий слой алюминия. В силу того, что пористый АОА представляет собой практически идеальную наноструктурированную диэлектрическую матрицу с вертикально ориентированными цилиндрическими наноканалами (порами), было проведено большое количество работ по разработке технологии выращивания углеродных нанотрубок в порах АОА [2].

Использование полевой эмиссии представляет определенный интерес в СВЧ-диапазоне. При применении автоэмиссионных катодов модуляция эмиссии оказывается эффективной из-за сильной зависимости тока эмиссии от поля на катоде, что позволяет управлять электронным потоком. Также это позволяет обеспечить практически мгновенную готовность прибора к работе и избавиться от необходимости источника питания катода. Кроме того, становится принципиально возможным создание устройств компактных размеров и сравнительно легкого веса.

О новых программах и новых нерешенных задачах

Заметим, что авторов работы [2] интересуют, главным образом, преимущества автоэлектронных приборов перед полупроводниковыми. Что касается работ по СВЧ вакуумным приборам с управляемой эмиссией, то они хаотически разбросаны в ма-

териалах различных конференций, поэтому одна из целей обзора собрать известные результаты, появившиеся после 1996 года. Но главная причина написания обзора связана с тем, что в последнее десятилетие в Европе и США созданы программы по вакуумной СВЧ-электронике, направленные на использование новых технологий при освоении миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн и отражающие тенденции последних лет.

В США Агентством по перспективным исследованиям Министерства обороны (DARPA) была предложена программа под названием «СВЧ-интегральная вакуумная электроника» (High Frequency Integrated Vacuum Electronics, HiFIVE) [7,8]. Программа находится в работе уже около трех лет. Аналогичный проект разрабатывается и в Европе (Optically Driven THz Amplifiers, OPTHER) [8]. Следует отметить, что значительное количество разработок проводятся в рамках именно этих программ [5, 9–14].

Выбор высокочастотного участка миллиметрового диапазона авторы проекта обосновали необходимостью расширения рабочей полосы частот, которая определяет пропускную способность каналов связи, используемых для обмена данными между военными системами различного назначения. Основное препятствие к использованию верхнего участка миллиметрового диапазона – отсутствие мощных широкополосных усилителей на такие частоты. Традиционные вакуумные приборы имеют удовлетворительные параметры, но на более низких частотах этого диапазона. В центре программ – создание компактного вакуумного усилителя на основе ЛБВ с центральной частотой 220 ГГц и полосой рабочих частот свыше 5 ГГц, коэффициент усиления которого составит 30 дБ, а выходная мощность – более 50 Вт. Производство выходной мощности на ширину полосы частот должно быть не менее 500 Вт-ГГц. В качестве возможных источников эмиссии рассматриваются холодные катоды с полевой эмиссией, на углеродных нанотрубках и др.

Одной из причин уменьшения мощности вакуумных приборов в короткой части миллиметрового диапазона является снижение эффективности взаимодействия электронного потока с полем замедляющей системы. Мощность взаимодействия напрямую зависит от величины $\tilde{N} f^{-8/3}$, где \tilde{N} – коэффициент формы пучка, то есть отношение ширины пучка к его толщине или отношение длины окружности к толщине, если речь идет о кольцевых пучках. Однако при увеличении ширины пучка, а соответственно, и коэффициента формы \tilde{N} , в замедляющей системе могут возникать высшие моды колебаний, требующие дополнительных методов подавления. Возможны и другие причины нестабильности (рассогласования в замедляющей системе, генерация на обратной волне и т.д.).

В американской программе HiFIVE указывается [7], что обязательным элементом создаваемого прибора должен быть многоступенчатый коллектор с КПД не менее 80 % (и с электронным КПД, не превышающим 5 %). Программа хорошо структурирована и разделена на три этапа.

Первый этап предполагает создание электронного потока с $\tilde{N} = 25$ при магнитном поле $B_{\text{макс}} < 11$ кГс и токопрохождении 95 %. Этот этап включает «холодные» испытания замедляющей системы (в настоящее время выбран «петляющий волновод»), изготовленный с помощью методов микрообработки. В испытания входят изучение дисперсии системы, возможных отражений, резонансов, паразитных мод.

Второй этап предполагает проверку работы собранного мощного усилителя и испытаний перспективных катодов, которые обеспечивали бы полный ток в 250 мА

при реальных значениях вакуума и напряжения со сроком службы более 1000 часов. В частности, планируются испытания катода на углеродных трубках.

На третьем этапе должен быть испытан мощный СВЧ-модуль, содержащий созданную ЛБВ.

В целях снижения тепловой нагрузки обсуждается также вариант сложной замедляющей системы, состоящей из параллельных единичных замедляющих систем со своим электронным потоком. В этом случае в систему на входе вводится делитель сигнала, а на выходе – сумматор [7].

В европейском проекте ORTHER одним из направлений предполагается создание вакуумного терагерцового усилителя с помощью технологии микрообработки и с использованием холодных катодов на основе автоэмиссии из углеродных нанотрубок [8]. В предлагаемой модели инфракрасный лазер, излучение которого модулировано на частоте ТГц диапазона, управляет эмиссией с холодного катода. Таким образом, имеет место возвращение к идее фото-ЛБВ на ином технологическом уровне и для иных целей.

Пример одной из возникающих задач

Определенное внимание следует уделить взаимодействию плоского электронного пучка и бегущей электромагнитной волны в продольном магнитном поле конечной величины, так как в некоторых случаях влияние полей пространственного заряда может привести к появлению и развитию пучковой неустойчивости, влияющей на процесс взаимодействия [15, 16]. В известных работах [17, 18] приведены результаты экспериментов по распаду ленточного и кольцевого электронных пучков на отдельные структуры вследствие неустойчивости. Оказалось, что при увеличении тока пучка исходный кольцевой контур теряет круговую симметрию формы. Это приводит к «скручиванию» пучка в нескольких местах, после чего пучок распадается на несколько структур, количество которых зависит от плотности тока и величины магнитного поля. Аналогичная неустойчивость возникает и в ленточном потоке.

Ниже в качестве примера приводится элементарная теория взаимодействия бесконечно тонкого ленточного электронного потока, движущегося в продольном магнитном поле, с бегущей электромагнитной волной [15–16]. В линейном приближении основные уравнения для такой модели имеют вид

$$\frac{d^2\tilde{x}}{dx^2} + 2j\beta_e \frac{d\tilde{x}}{dx} - \tilde{x} \left(\beta_e^2 - \eta B \frac{\omega_p}{v_0^2} \operatorname{th}(\beta_0 y_0) \right) = \frac{E_0}{2V_0} \operatorname{sh}(\beta_0 y_0) e^{-j\beta_0 x}, \quad (1)$$

$$\frac{d^2\tilde{y}}{dx^2} + 2j\beta_e \frac{d\tilde{y}}{dx} - \tilde{y} \left((\beta_e^2 - \beta_c^2) + \eta B \frac{\omega_p}{v_0^2} \frac{1}{\operatorname{th}(\beta_0 y_0)} \right) = j \frac{E_0}{2V_0} \operatorname{ch}(\beta_0 y_0) e^{-j\beta_0 x}, \quad (2)$$

$$E_x = -\frac{\beta_0^2 K_0 I_0}{2 \operatorname{sh}(\beta_0 d)} \operatorname{sh}(\beta_0 y_0) e^{-j\beta_0 x} \int_0^x [j\beta_e \operatorname{sh}(\beta_0 y_0) \tilde{x}(\xi) + \beta_e \operatorname{ch}(\beta_0 y_0) \tilde{y}(\xi)] e^{j\beta_0 \xi} d\xi, \quad (3)$$

$$E_y = j \operatorname{cth}(\beta_0 y_0) E_x, \quad (4)$$

где V_0 – ускоряющее напряжение, E_0 – постоянная амплитуда волны, K_0 – сопротивление связи, β_0 – фазовая постоянная волны в системе без пучка, $\beta_c = \omega_c/v_0$ – фазовая постоянная циклотронной волны, $\omega_c = \eta B$ – циклотронная частота, $\eta = e/m$, e и m – заряд и нерелятивистская масса электрона, B – постоянная индукция магнитного поля, v_0 – постоянная продольная скорость потока, $\tilde{x}(x)$ и $\tilde{y}(x)$ – продольные и поперечные ВЧ-смещения электронов, соответственно, l – длина системы, y_0 – координата влета пучка. Вывод выражений для компонент поля пространственного заряда подробно приведен в [19].

Если замедляющей системы нет, и она заменена гладким металлическим электродом, то тонкий электронный пучок в магнитном поле подвержен влиянию лишь ВЧ-полей пространственного заряда, что соответствует нулевым правым частям в (1) и (2). Предполагая, что функции $\tilde{x}(x)$ и $\tilde{y}(x)$ изменяются как $\exp(-j\beta x)$, приходим к дисперсионным уравнениям и соответствующим им решениям

$$(\beta - \beta_e)^2 - \beta_p^2 = 0 \rightarrow \beta_{1,2} = \beta_e \pm \beta_p, \quad (5)$$

$$[(\beta - \beta_e)^2 - \beta_c^2] + \beta_p^2 \operatorname{cth}^2(\beta_0 y_0) = 0 \rightarrow \beta_{3,4} = \beta_e \pm \sqrt{\beta_c^2 - \beta_p^2 \operatorname{cth}^2(\beta_0 y_0)}, \quad (6)$$

здесь $\beta_p^2 = \eta B \omega_p / v_0^2 \operatorname{th}(\beta_0 y_0)$. Условием неустойчивости, как следует из (6), является выполнение неравенства

$$\beta_c^2 - \beta_p^2 \operatorname{cth}^2(\beta_0 y_0) < 0. \quad (7)$$

Применяя преобразования Лапласа к уравнениям (1), (2) в приближении заданного поля бегущей волны при начальных условиях $\tilde{x}(0) = \tilde{x}'(0) = \tilde{y}(0) = \tilde{y}'(0) = 0$ (здесь «'» означает производную по координате x) и используя уравнение (3), можно получить выражение для продольной составляющей напряженности электрического поля в первом приближении

$$E_x(l) = E_x(0) e^{-j\beta_0 l} \left[1 - (2\pi_0 N)^3 \left(\hat{F}(\Phi_0, \theta_p) + \hat{F}(\Phi_0, \phi_c, \theta_p) \right) \right], \quad (8)$$

где $\Phi_0 = (\beta_e - \beta_0)l$ – невозмущенный относительный угол пролета электронов и волны, $\theta_p = \beta_p l$, $\phi_c = \beta_c l$ – циклотронный угол пролета, $2\pi N = \beta_e l$, N – длина пространства взаимодействия в электронных длинах волн, $C_0^3 = (I_0 K_0)/(4V_0)$. Функции относительного угла пролета имеют вид

$$\begin{aligned} \hat{F}(\Phi_0, \theta_p) = & \frac{2\Phi_0 - \frac{1}{2\theta_p} \left[(\theta_p + \Phi_0)^2 \cos(\Phi_0 - \theta_p) - (\theta_p - \Phi_0)^2 \cos(\Phi_0 + \theta_p) \right]}{(\Phi_0 + \theta_p)^2 (\Phi_0 - \theta_p)^2} + \\ & + j \frac{\theta_p^2 - \Phi_0^2 + \frac{1}{2\theta_p} \left[(\theta_p + \Phi_0)^2 \sin(\Phi_0 - \theta_p) - (\theta_p - \Phi_0)^2 \sin(\Phi_0 + \theta_p) \right]}{(\Phi_0 + \theta_p)^2 (\Phi_0 - \theta_p)^2}, \quad (9) \end{aligned}$$

$$\hat{F}(\Phi_0, \phi_c, \theta_p) = \frac{\exp[-j(\Phi_0 + q)] - 1}{2q(\Phi_0 + q)^2} - \frac{\exp[-j(\Phi_0 - q)] - 1}{2q(\Phi_0 - q)^2} - \frac{j}{\Phi_0^2 - q^2}, \quad (10)$$

где $q = j\sqrt{\theta_p^2 \operatorname{cth}^2(\beta_0 y_0) - \phi_c^2}$, $\theta_p^2 \operatorname{cth}^2(\beta_0 y_0) \geq \phi_c^2$. На рис. 2 приведены зависимости реальной и мнимой частей $\hat{F}(\Phi_0, \phi_c, \theta_p)$ при различных параметрах пространственного заряда для нескольких фиксированных значений циклотронного угла пролета ϕ_c . Видно, что на поведение кривых в этом случае оказывает влияние

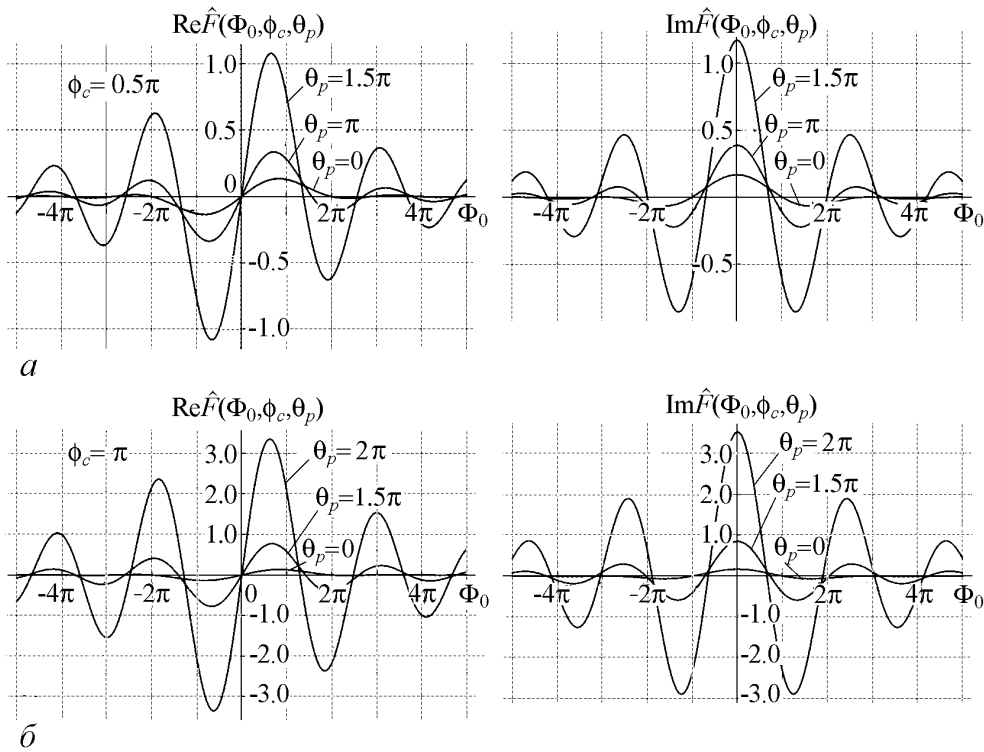


Рис. 2. Зависимости реальной и мнимой частей функции $\hat{F}(\Phi_0, \phi_c, \theta_p)$ от невозмущенного относительного угла пролета при различных значениях параметра пространственного заряда θ_p и циклотронного угла пролета ϕ_c [15,16]

как магнитное поле, так и поля пространственного заряда. Именно их соотношение определяет введенный параметр q . И чем выше его значение, тем больше амплитуда максимумов кривых активной и реактивной мощностей взаимодействия. Причем максимум активной составляющей по мере увеличения q смещается в сторону меньших значений Φ_0 . Условием передачи энергии электромагнитной волне является выполнение неравенства $\text{Re}\hat{F}(\Phi_0, \phi_c, \theta_p) < 0$.

Из анализа следует, что при наличии неустойчивости улучшается эффективность взаимодействия электронного потока и электромагнитной волны. Конечно, это лишь оценки, но уже они указывают на необходимость развития более полной теории взаимодействия ленточного или кольцевого неустойчивого пучка с электромагнитной волной. Задача еще более усложнится, если в качестве источников эмиссии будут использованы катоды с полевой эмиссией и сжатием электронного потока с помощью сходящейся оптики.

Остановимся далее на результатах исследования (в основном экспериментального) различных приборов с управляемой эмиссией.

Лампа бегущей волны

В [20] представлены результаты исследования мощного ЛБВ-усилителя в диапазоне 8...12 ГГц. На частоте 8.76 ГГц коэффициент усиления изменялся от 13 до 35 дБ, а выходная мощность – от 3 до 100 МВт. Для формирования релятивистского электронного пучка использовался полевой автоэмиссионный катод, погруженный в

магнитное поле. Энергия пучка составляла 850 кэВ, ток порядка 1 кА, а длительность импульса – 100 нс. Усилитель был задуман как узкополосный прибор.

Были созданы две ЛБВ с автоэмиссионными катодами в диапазоне 8...12 ГГц (рис. 3) [21]. Для первого экспериментального прибора разработан спиндтовский катод из молибдена с 14350 острями на площади диаметром 0.84 мм. У данной ЛБВ с автоэмиссионным катодом высокочастотная выходная мощность составила 27.5 Вт, коэффициент усиления – 19.5 дБ на частоте 10.5 ГГц в полосе более, чем 3 ГГц. В режиме насыщения ток достигал 58 мА, а плотность тока – 10 А/см². На рис. 4, а показаны катодный ток, коллекторный ток, ток на спиральной замедляющей системе как функции от напряжения на управляющем электроде. Как видно из графика (рис. 4, а) основной недостаток первой ЛБВ с МАЭК связан с низким токопрохождением 82 %.

В целях улучшения токопрохождения и повышения эффективности работы в конструкцию ЛБВ были внесены некоторые преобразования. В частности, во втором экспериментальном приборе изменены фокусирующие электроды, уменьшен диаметр эмиссионной поверхности до 0.6 мм, введен ограничитель поперечного тока МАЭК. Были получены статические и ВЧ характеристики ЛБВ. На частоте 11.5 ГГц выходная мощность достигла 8 Вт, коэффициент усиления по мощности – 22 дБ, а ток на коллекторе – 29 мА. На рис. 4, б показано, как в зависимости от напряжения на управляющем электроде и анодного напряжения изменяются катодный ток и ток на спиральной замедляющей системе. Анализ экспериментальных данных показал, что существует максимально возможный ток, который можно было получить с электронной пушкой с МАЭК с учетом хорошего токопрохождения. Для второй ЛБВ удалось получить токопрохождение 98 % при токе меньшем 20 мА, что превосходит

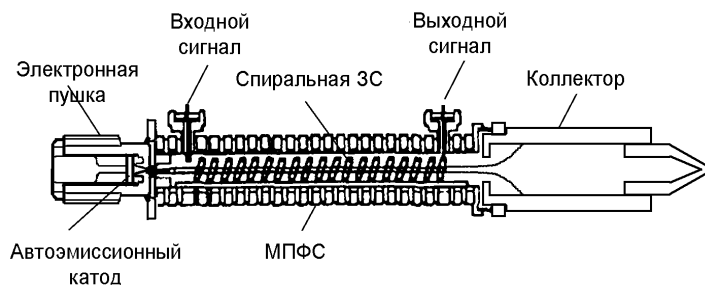


Рис. 3. Схематическое изображение ЛБВ с МАЭК [21]

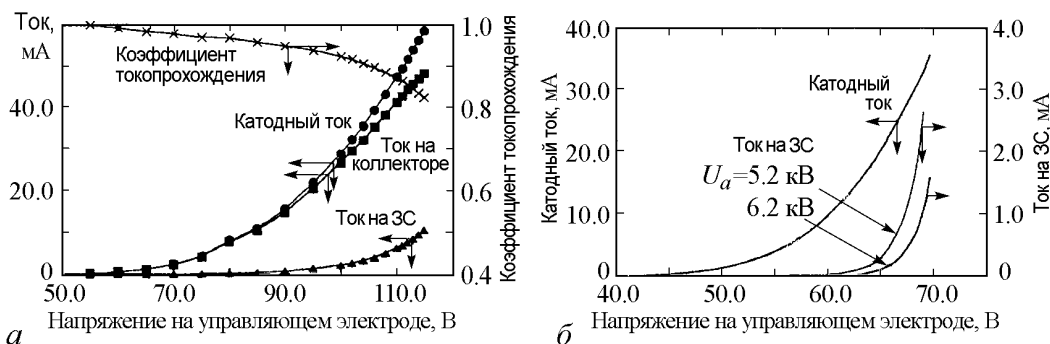


Рис. 4. Зависимость тока на катоде, тока коллектора, тока ЗС и токопрохождения от напряжения на управляющем электроде [21]

результаты для первой ЛБВ. Однако при большем значении тока становится существенным влияние пространственного заряда и токопрохождение резко снижается. Кроме того, оно сильно зависит от анодного напряжения.

Известна также ЛБВ с автоэмиссионным катодом и спиральной замедляющей системой [22,23], в которой использовался спиндтовский катод диаметром 1 мм. Экспериментальные данные хорошо согласовывались с предварительными теоретическими расчетами, результаты которых не приводятся. Наибольшее значение тока достигло 91.4 мА, выходная мощность составила 55.0 Вт на частоте 4.5 ГГц, коэффициент усиления в режиме насыщения – 23.4 дБ, а КПД – 17%. В течение всего времени работы прибора наблюдалась предельно устойчивая эмиссия с поверхности катода.

Новая разработанная геометрия электронной пушки позволила преодолеть сложности с фокусировкой расходящегося потока с высокой плотностью. Применение нескольких электростатических линз особой конфигурации дало возможность управлять электрическим полем на поверхности автоэмиссионного катода. Такая конструкция способствовала фокусировке пучков, ток которых изменялся в пределах от 0 до 0.150 А, а плотность потока на катоде от 0 до 19 А/см² и при напряжении пучка от 0 до 5000 В.

В дальнейшем был сконструирован ЛБВ-усилитель с управляемой эмиссией (рис. 5), частотный диапазон которого изменялся в пределах от 3.90 ГГц до 8 ГГц [24]. Хорошая фокусировка и управление электронным потоком позволили достичь тока 5.03 мА с учетом токооседания 1.5% от полной величины тока. При максимальном токе его плотность была немного больше 7 А/см², причем диаметр эмиссионной поверхности составил 300 мкм. ЛБВ была разработана с расчетом на то, что модуляция тока составит 1%, однако оказалось, что в частотном диапазоне от 4 до 8 ГГц с таких катодов можно получить модуляцию до 30%. На частоте 6.8 ГГц выходная мощность составила 280 мВт. Данные параметры получены при исследовании работы прибора в импульсном режиме с периодом следования импульса 100 мкс.

Также было проведено экспериментальное исследование возможности использования матричного автоэмиссионного катода в качестве источника электронов в ЛБВ средней мощности в диапазоне 4...8 ГГц [9,10]. Холодный катод в ЛБВ работал свыше 150 часов при коэффициенте заполнения вплоть до 10%, токе пучка – до 120 мА, и ВЧ мощности – до 100 Вт на частоте 5 ГГц. С помощью хорошего управления потоком удалось достичь высокой плотности тока в 15.4 А/см².

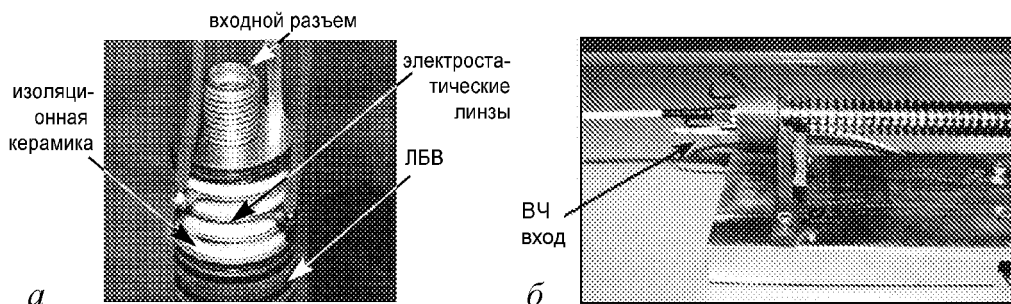


Рис. 5. Фотография электронной пушки и готовой ЛБВ [24]

Таблица 1 [9]

Напряжение	3500 В
Ток	100 мА
Мощность насыщения	100 Вт
Коэффициент усиления в режиме малого сигнала	32 дБ
Коэффициент усиления в режиме насыщения	25 дБ
Центральная частота	5 ГГц

Таблица 2 [9]

Напряжение пучка	3500 В
Ток пучка	121 мА
Мощность насыщения	100 Вт
Коэффициент усиления в режиме малого сигнала	32.7 дБ
Коэффициент усиления в режиме насыщения	22.1 дБ
КПД	24 %
Частота	5 ГГц

оптимизированных приборов, объединивших твердотельную и вакуумную технологии и получивших название «мощные СВЧ-модули» [25]. Эти модули заняли промежуточную по мощности область между твердотельными и вакуумными приборами и при этом заимствовали лучшее у тех и других.

В состав мощного СВЧ-модуля входят миниатюрная ЛБВ, твердотельный предусилитель (ТТУ) и интегральный источник питания (рис. 8). ТТУ – стандартные приборы, основное назначение которых усиление входного СВЧ-сигнала до уровня, достаточного для насыщения ЛБВ. ЛБВ в таком модуле представляет собой спиральную мини-ЛБВ с многоступенчатым понижением потенциала коллектора.

В таблице 1 приведены значения параметров, которых необходимо было добиться, а в таблице 2 представлены параметры, полученные уже при исследовании холодного катода в ЛБВ. Низковольтный полевой автоэмиссионный катод разработан SRI International. Катод состоит из кремниевой подложки с молибденовыми эмиттерами.

На рис. 6 приведены экспериментальные зависимости ВЧ выходной мощности и КПД от тока пучка. Видно, что выходная мощность достигает 100 Вт, когда ток равен 121 мА, а соответствующий КПД равен 24 %. Благодаря использованию низковольтного катода уменьшается величина требуемого приложенного напряжения на сетке (рис. 7).

Данная ЛБВ в диапазоне 4...8 ГГц входит в состав мощного СВЧ-модуля (microwave power module, MPM). Концепция мощных СВЧ-модулей была изложена в 1988 году в докладе Министерства обороны США по вакуумным СВЧ-приборам. Так сформировалось направление новых

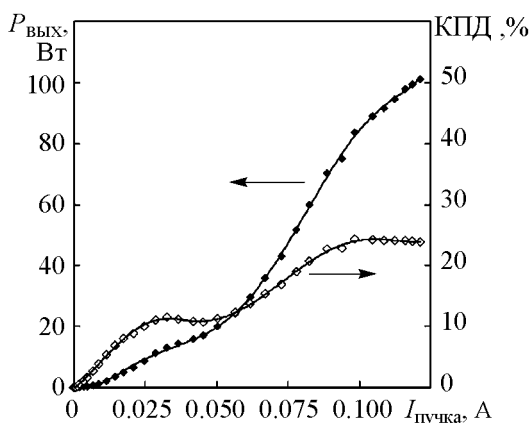


Рис. 6. Зависимость выходной мощности и КПД от тока [9]

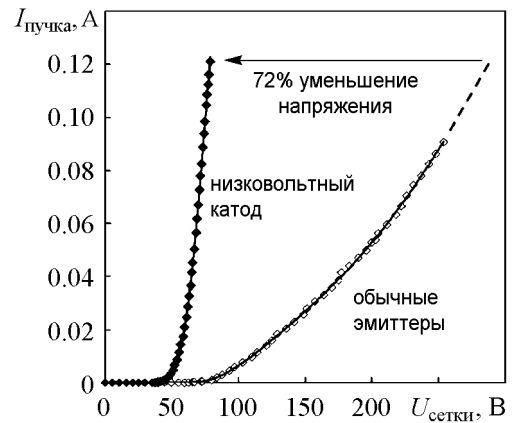


Рис. 7. Зависимость тока пучка от приложенного напряжения для разных катодов [9]

Источник питания модуля, преобразуя исходное напряжение, вырабатывает напряжение питания для ТТУ и ЛБВ.

В работе [26] описаны структура, процесс изготовления и исследование электронной пушки с МАЭК для ЛБВ. При проектировании электронной пушки с МАЭК была использована трехмерная программа моделирования MAFIA. Расчет траекторий электронного потока производился при условии, что половина угла, под которым вылетают эмиттированные электроны, составляет 30° . К сожалению, результаты расчета не приводятся.

Разработанная электронная пушка включает в себя матричный автоэмиссионный катод, электрод Венельта, фокусирующий электрод и анод. Электрод Венельта, воздействуя на МАЭК, вытягивает электроны. Электронный поток фокусируется цилиндрическим фокусирующим электродом и проходит через отверстие в аноде. Созданная электронная пушка была исследована в вакуумной камере при давлении $5 \cdot 10^{-6}$ Па. С такого матричного катода (17500 острий диаметром 0.6 мм) предполагалось получить ток в 30 мА. Однако после встраивания МАЭК в электронную пушку эмиссионный ток на коллекторе составил лишь 4.2 мА. Это является свидетельством того, что эмиссионная способность матричного катода резко снижается после встраивания в пушку и требуется предельная осторожность при их соединении.

В работе [27] исследованы два различных вида электронных ламп, в конструкцию которых входит холодный автоэмиссионный катод в качестве источника электронов. Катоды представляют собой массив вертикально ориентированных углеродных волокон. При рассмотрении триода получили коэффициент модуляции 82 % на частоте 32 ГГц с наибольшей плотностью тока 1.4 А/см^2 . В нем расстояния катод-сетка и сетка-анод равны 100 мкм и 500 мкм, соответственно. При исследовании лампы бегущей волны целью было протестировать катод и выяснить, возможно ли с него получить плотность тока 2 А/см^2 .

В работе [28] приведены результаты теоретического и экспериментального исследования маломощной ЛБВ с катодом УНТ в диапазоне 3.5...4.2 ГГц. Предшествующие испытания микротриода с углеродным автокатодом на частоте 32 ГГц (проект CANVAD [27]) подтвердили, что наиболее подходящим в качестве источника электронов для ЛБВ является массив УНТ. Но несмотря на это, имеются определенные трудности. Во-первых, эмиттированные электроны обладают большой поперечной скоростью. Во-вторых, плотность тока с массива УНТ все же мала. На данный момент управляющий электрод в приборе находится на довольно большом расстоянии от эмиттеров (100 мкм). Диаметр катода в два раза меньше внутреннего диаметра спиральной замедляющей системы. В импульсном режиме ток доходил до 4 мА, а наибольший ток на коллекторе составил 2.1 мА. Коэффициент усиления прибора достиг 2.8 дБ на частоте 3.3 ГГц, а токопрохождение – 92 %. Улучшению полученных параметров устройства может содействовать уменьшение расстояния между сетки и катодом, а также увеличение плотности тока катода.

С применением метода крупных частиц в работах [29,30] представлена математическая модель ЛБВ с катодной модуляцией эмиссии. Авторы проводили теоретическое исследование с учетом возбуждения высших гармоник в нерегулярной замедляющей системе. Расчеты были выполнены при значении ускоряющего напряжения равном 5086 В на частоте $f = 3 \text{ ГГц}$. Наряду с усилением основного сиг-

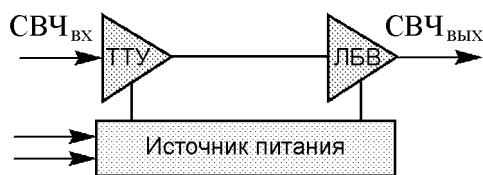


Рис. 8. Блок-схема мощного СВЧ-модуля [25]

нала, в рассмотрение входили высшие гармоники, возбуждающиеся на частотах $2f$, $3f$ и $4f$. Интенсивность их возбуждения была оценена по коэффициенту нелинейных искажений. Численное моделирование показало, что использование модуляции эмиссии снижает значение этого коэффициента при сохранении полосы усиления. Более того, использование нерегулярной ЗС позволило снизить коэффициент нелинейных искажений в 3...6 раз по сравнению с регулярной ЗС, и примерно в 1.5...2 раза – с обычной ЛБВ. Результаты, полученные при компьютерном моделировании, указывают на явные преимущества ЛБВ с катодной модуляцией по сравнению с обычной ЛБВ.

В [31] проведено моделирование траекторий электронов в электронно-оптических системах ЛБВ О-типа с матричными углеродными автоэмиссионными катодами, которые могут работать в вакууме $10^{-7} \dots 10^{-6}$ мм рт. ст. Основным недостатком подобной системы является то, что эмиссия идет в основном с периферийных острий, если несколько десятков эмитирующих острий размещены в пределах одной ячейки крупноячеистой управляющей сетки. Траектории электронов, эмитированных периферийными остриями, возмущаются электростатической линзой ячейки сетки, что вызывает появление поперечных скоростей электронов. Это, в свою очередь, приводит к проблемам фокусировки пучка магнитным полем. Основной целью работы стало исследование возможности уменьшения поперечных скоростей электронов в электронно-оптической системе матричным углеродным автоэмиссионным катодом. В результате моделирования было выяснено, что уменьшение диаметра частичного автоэмиссионного катода (была исследована пушка с семью АЭК) уменьшает углы наклона электронных траекторий, вызванные влиянием крупноячеистой управляющей сетки. Погружение пушки в постоянное магнитное поле уменьшает эти углы, если величина магнитного поля достигает нескольких тесла.

В силу того, что ЛБВ подходит в качестве компактного мощного усилителя в терагерцовом диапазоне, на основании компьютерного моделирования (программа Improved Concurrent Electromagnetic Particle-In-Cell, ICEPIC), применения катодов с полевой эмиссией и современных технологий микрообработки была разработана компактная мощная ЛБВ, работающая на 0.22 ТГц [5]. Если в ЛБВ ТГц диапазона использовать традиционные термокатоды, то требование большой плотности тока и малого радиуса потока приведет к тому, что при фокусировке электронного потока вследствие поперечных движений электронов потребуются большее магнитное поле. Кроме того, фокусировка электронного пучка до достаточно малого диаметра влечет

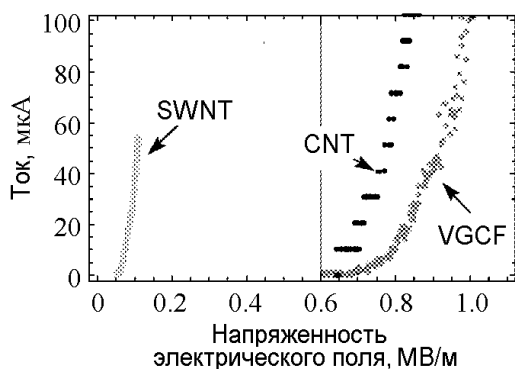


Рис. 9. Эмиссионный ток. Здесь: VGCF – углеродное волокно диаметром 20 мкм; CNT – массив углеродных нанотрубок диаметром 1 мм; SWNT – одностенные нанотрубки диаметром 100 мкм [5]

за собой определенные трудности, связанные с колебаниями на поверхности пучка. Использование АЭК, погруженного в ограничивающее магнитное поле, позволяет получить электронный поток, диаметр которого намного меньше диаметра пространства взаимодействия в ЛБВ.

Ключевой задачей при применении АЭК микронных размеров становится получение высокой плотности тока в течение длительного времени жизни. Тестировались различные материалы (рис. 9) (углеродные волокна, УНТ,

карбид гафния), пригодные для автоэмиссионного катода и способные работать 1000 часов. Углеродные волокна и УНТ характеризуются высокой проводимостью вдоль оси катода, в 1000 раз превышающей этот параметр для меди. Преимущество карбида гафния заключается в том, что он продемонстрировал около 2200 часов непрерывной работы при токе в 0.25 мА. С массива углеродных нанотрубок ток 3.6 мА был получен при 5180 В, но диаметр эмиссионной поверхности составил 1 мм, что в 10 раз превышает предельно возможный. Для одностенных нанотрубок (single-walled nanotube, SWNT) с поверхности диаметром в 100 мкм получены ток 3 мА и высокая стабильность эмиссии в течение около 1000 часов работы.

Следует заметить, что во всех работах есть лишь упоминания об особенностях теоретических расчетов, хотя имеются, например, указания на колебания поверхности пучка, что влечет за собой определенные трудности (на некоторые особенности взаимодействия ленточного потока с бегущей волной указывалось выше на основе элементарной теории).

Отметим, что, с точки зрения развития теории, представляют интерес следующие задачи:

- построение трехмерной нелинейной нестационарной теории СВЧ-приборов с управляемой эмиссией с длительным взаимодействием электронов и волны с учетом влияния сил пространственного заряда и фокусирующих полей;
- анализ побочных эффектов в СВЧ-приборах с модуляцией эмиссии из-за неустойчивости ленточных и полых электронных потоков (оценочный пример приведен выше);
- исследование паразитных явлений в усилителях с управляемой эмиссией (отражения, резонансы, паразитные виды колебаний, возбуждение на обратной волне) в рамках нестационарной теории;
- исследование возможности использования связанных замедляющих систем с электронными потоками вместо суммирования сигналов однопоточковых приборов;
- возвращение к теории приборов с фотокатодом;
- построение нестационарной теории мощных СВЧ-модулей, содержащих ЛБВ с управляемой эмиссией, с учетом возможных паразитных эффектов;
- построение теории новых приборов с управляемой эмиссией (в качестве примера ниже приведена теория карсинотрода).

Лампы обратной волны, клистроны и клистроды

Весьма впечатляющие экспериментальные результаты были получены для генераторов обратной волны в субмиллиметровом диапазоне длин волн. В данном разделе внимание уделено не только приборам и устройствам, но и технологиям изготовления. Кроме того, представлена развитая группой Солнцева одномерная теория карсинотрода, а так же двумерная теория карсинотрода, в которой учтено влияние магнитного поля.

Экспериментальные разработки. С использованием новых бипланарных встречно-штыревых замедляющих систем и запатентованной GENVAC технологии сложного химического вакуумного алмазного напыления CVD созданы ЛОВ на частоте 300 ГГц (рис. 10) и на 650 ГГц [11, 12, 32].

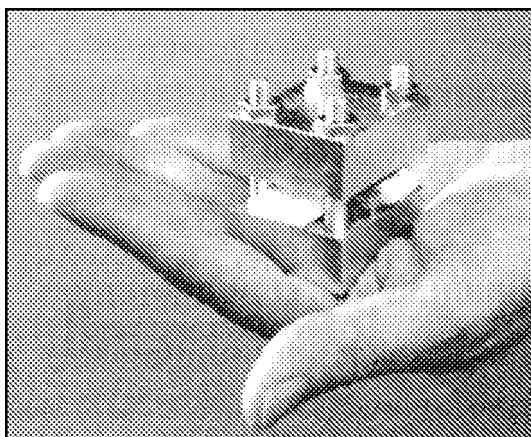


Рис. 10. Лампа обратной волны [10]

По предварительным расчетам выходная мощность и КПД ЛОВ на частоте 300 ГГц будут варьировать от 28.5 мВт и 4.5% на 285 ГГц до 35.2 мВт и 3.1% на 315 ГГц. Масса составит около 326 г. Для ЛОВ на частоте 650 ГГц выходная мощность составит 23.8 мВт, а КПД 1.6%.

В бипланарной встречно-штыревой системе противостоящие штыри расположены на параллельных пластинах. Плоский электронный пучок движется между этими пластинами в области высокого импеданса взаимодействия. В результате получается компактный относительно мощный субмиллиметровый источник сигнала.

Структура создана из алмаза, полученного на кремниевой основе с использованием глубокого реактивного ионного травления (DRIE). Во избежание проблем согласования двух секций электронная пушка выполнена как часть замедляющей системы. В качестве источника электронов взят спиндтовский катод, с которого можно получить ток в 1.8 мА. Управление электронным пучком осуществляется с помощью пары стержневых магнитов NdFeB (для ЛОВ на частоте 300 ГГц однородное магнитное поле 0.55 Тл).

ЛОВ на частоте 650 ГГц разрабатывается для работы с пучком, ток которого достигает 2 мА. Предполагается, что плотность тока с катода будет такая же, как и в ЛОВ на частоте 300 ГГц, но для обеспечения большей плотности тока в пространстве взаимодействия потребуется получить продольное магнитное поле величиной 0.8 Тл.

Разработки проводятся при поддержке NASA JPL и DARPA.

С применением двухэтапной технологии DRIE и пайки эвтектическим сплавом была создана ЛОВ на цепочке связанных резонаторов [33] для работы в терагерцовом диапазоне. В качестве источника электронов был использован матричный углеродный автоэмиссионный катод. На рис. 11 представлены эмиттеры, полученные при изготовлении катода с УНТ. Диаметр каждого точечного эмиттера составляет 4 мкм. В лампе использована обычная цепочка связанных резонаторов, расположенных вдоль оси.

Теоретическое исследование прибора и численное моделирование были основаны на методе конечных элементов и методе крупных частиц. Расчет проводился на частоте колебаний 0.1 ТГц. В результате оказалось, что прибор характеризуется довольно узкой полосой частот. Кроме того, центральная частота может быть точно настроена при изменении рабочего напряжения (рис. 12).

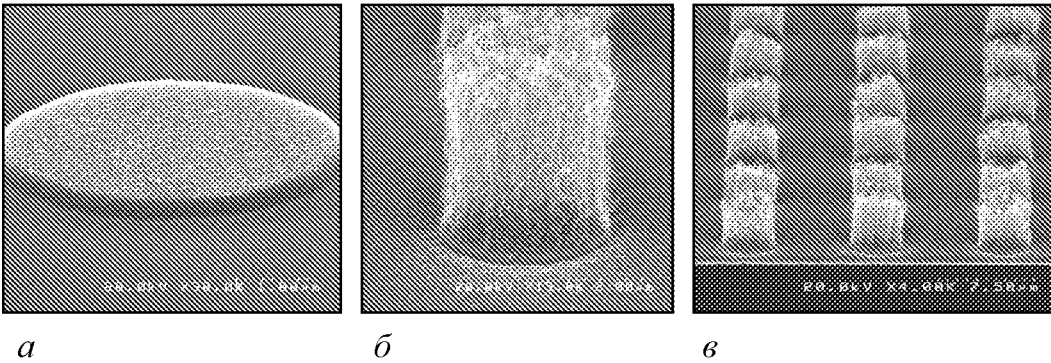


Рис. 11. *а* – пятно диаметром 4 мкм для образования эмиттера; *б* – «выращенный» точечный эмиттер; *в* – массив УНТ [33]

В рамках проекта OPTHER разрабатывается вакуумный усилитель обратной волны на частоте 1 ТГц [13]. Целью проекта является создание терагерцового вакуумного усилителя компактных размеров и легкого веса, коэффициент которого по мощности составит 10 дБ на частоте 1 ТГц. Ограничение наложено на предельно допустимое значение напряжения пучка (должно быть менее 12 кВ). В статье подробно изложены результаты компьютерного моделирования прибора и его узлов. В разрабатываемом усилителе используется замедляющая система – двойной гофрированный прямоугольный волновод (рис. 13), обеспечивающий эффективное взаимодействие электронного потока с полем обратной электромагнитной волны при минимальных потерях. Выбранная замедляющая система рассчитана для работы на частоте 1 ТГц при напряжении электронного потока 10 кВ. Потери составляют в среднем 0.15 дБ на секцию, а сопротивление на рабочей частоте – 2 Ом. Замедляющая система изготовлена из меди и имеет размеры 254 мкм × 80 мкм.

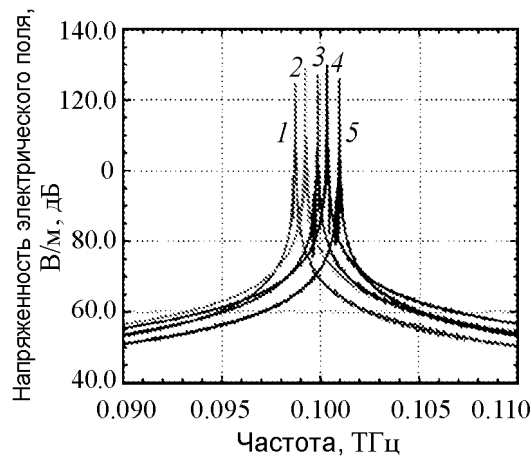


Рис. 12. Зависимость напряженности электрического поля от частоты при различных значениях напряжения электронного пучка, кВ: 1 – 11.0, 2 – 11.5, 3 – 12.0, 4 – 12.5, 5 – 13.0 [33]

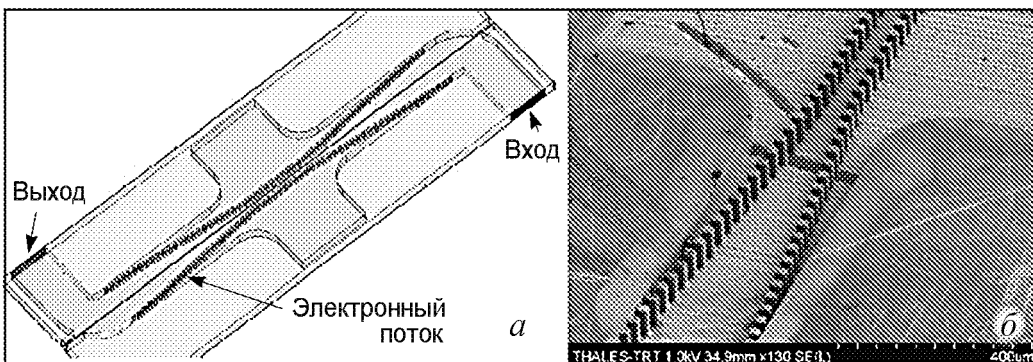


Рис. 13. *а* – структура ЗС с указанием входа и выхода сигнала; *б* – детализация конструкции ЗС [13]

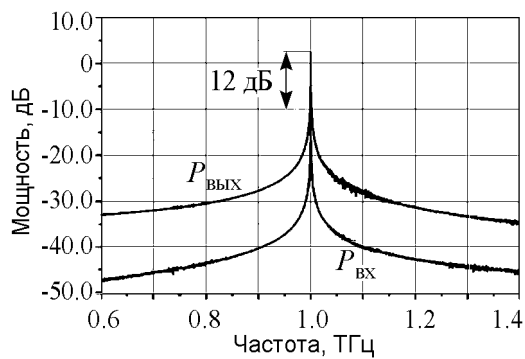


Рис. 14. Зависимость мощности от частоты сигнала [13]

В качестве холодного катода применяются УНТ. Они получены с применением химического осаждения. Катод состоит из матрицы эмиттеров микронных размеров с квадратным сечением и встроенной сетки. Отдельный эмиттер представляет собой вертикально ориентированную углеродную нанотрубку высотой 1 мкм. С полученных образцов плотность эмиссионного тока достигала 74 mA/cm^2 при управляющем напряжении 80 В. В системе формируется цилиндрический электронный поток с радиусом 20 мкм. Он проходит вблизи ЗС на расстоянии 5 мкм от нее. Для обеспечения соответствующего сжатия пучка приложено магнитное поле величиной 0.8 Тл. Для рассматриваемого прибора значение пускового тока составило 6.0 мА. При численном моделировании усилителя обратной волны ток пучка был выбран немного меньше полученного значения 5.0 мА. На частоте 1 ГГц на вход подали сигнал мощностью 100 мкВт. Коэффициент усиления по мощности достигал 12 дБ (рис. 14). Расчет продолжался в течение 500 часов.

В работах [34,35] предложен отражательный клистрон с фотонным кристаллом для применения в качестве миллиметрового и субмиллиметрового устройства. Для контрольно-проверочного эксперимента такого отражательного клистрона в диапазоне 8...12 ГГц использовался холодный катод Спиндта, изготовленный на кремниевой подложке. Плотность упаковки катода составила $6.25 \cdot 10^6$ острий/ cm^2 , причем площадь матричного катода оказалась равной 25 mm^2 ($5 \times 5 \text{ mm}^2$).

В статье [14] описана разработка многолучевого клистрона в диапазоне 2...4 ГГц с полевым эмиттером. За основу был взят 19-лучевой клистрон с термокатодом для телекоммуникаций. Его составляющие были подробно изучены, и учтены все моменты, которые могли бы оказаться полезными при использовании полевого катода. Для успешной работы клистрона необходимо было добиться снижения пульсаций на поверхности ленточного электронного потока. В данном случае для этого применяется плоская сетка, на которую подан положительный потенциал, расстояние от нее до катода 100 мкм. Диаметр канала на входе в резонатор 2.8 мм. Работает клистрон на частоте 3.3 ГГц; его пиковая мощность составляет 3 кВт, а средняя 50 Вт.

Теоретическое исследование и численный расчет параметров клистрона с автоэмиссионным катодом приведены в работах [1,36].

Математическое моделирование. В плане развития теории следует выделить работы группы В.А. Солнцева [37–43], в которых предложен новый вариант прибора О-типа – лампа обратной волны с автомодуляцией эмиссии (карсинотрод) (рис. 15). Прибор сочетает принципы работы ЛОВ и клистрона. Для создания карсинотрода могут быть использованы электронные пушки с модуляцией эмиссии, применяемые в клистродах, индуктивных выходных лампах телевизионных передатчиков (ИОТ), или многолучевые пушки с модуляцией эмиссии, применяемые в приборах типа «Истрод».

Для осуществления автомодуляции эмиссии в карсинотроде между замедляющей системой и электронной пушкой введена цепь обратной связи. В этом случае

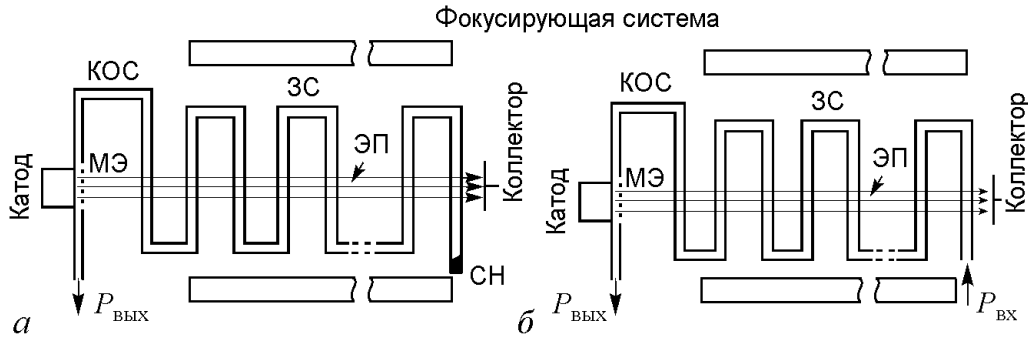


Рис. 15. Схема карсинотрода: *а* – генератор, *б* – усилитель (КОС – катодная обратная связь, МЭ – модулирующий электрод, ЗС – замедляющая система, ЭП – электронный поток, СН – согласованная нагрузка)

электромагнитное поле обратной волны с выхода замедляющей системы передается к электроду, обеспечивающему модуляцию эмиссии электронов с катода. Цепь катодной обратной связи (КОС) выполнена в виде отрезка замедляющей системы того же типа, который применяется в приборе. В этом случае сгустки электронов образуются непосредственно на катоде. Таким образом, вылетающий из электронной пушки модулированный электронный поток формируется фокусирующей системой и пролетает на коллектор через замедляющую систему. При влете в замедляющую систему электронные сгустки попадают в сильное ВЧ поле обратной волны, и при выполнении условий синхронизма они сразу начинают отдавать энергию полю, которое максимально у выхода замедляющей системы. Это обстоятельство приводит к увеличению КПД карсинотрода по сравнению с обычной ЛОВ. Таким образом, если в обычной ЛОВ КПД составляет 10–15 %, то в карсинотроде с АЭК можно получить 35 % при том же параметре усиления. В некоторых случаях, как было показано в [42,43], возможно более существенное увеличение КПД – до 70 % в режиме слабой автомодуляции колебаний при увеличении коэффициента обратной связи между выходом замедляющей системы и катодом и уменьшении статического поля в промежутке катод–сетка. Возможность значительного повышения КПД лампы обратной волны при введении автомодуляции подтвердило численное моделирование нелинейных процессов в приборе на основе метода крупных частиц [38–42]. Важным является тот факт, что посредством выбора КОС можно обеспечить широкую полосу электронной перестройки частоты. Для этого необходимо, чтобы цепь КОС обеспечивала модуляцию эмиссии на катоде в нужной фазе во всей полосе частот. Для конкретного варианта карсинотрода была показана возможность электронной перестройки частоты в полосе 50 % относительно центральной при сохранении постоянной выходной мощности [38–41].

В [42] на основе нестационарной нелинейной теории проведено моделирование процессов, происходящих в карсинотроде. Представлен один из способов вывода уравнения возбуждения поля в рамках нестационарной теории². Опуская подробности, приведем саму систему уравнений в безразмерных переменных.

Для численного моделирования карсинотрода на основе метода крупных частиц авторами было использовано уравнение возбуждения в виде

$$\frac{\partial F}{\partial \xi} - \frac{\partial F}{\partial \tau} = LI, \quad (11)$$

²Разные варианты вывода и применения такого уравнения в теории ЛОВ и ЛБВ можно найти в монографии [44].

где $F(\zeta, \tau)$, $I(\zeta, \tau)$ – безразмерные амплитуды поля и тока, которые медленно меняются как во времени $\tau = \frac{t-z/v_0}{l(1/|v_{гp}|+1/v_0)}$, так и по координате $\zeta = z/l$; $L = \varepsilon \frac{\omega_0 l}{v_0}$ – полная безразмерная длина; ε – параметр усиления на частоте ω_0 ($\varepsilon \approx C_0$); $v_{гp}(\omega_0) = (1/\frac{\partial h}{\partial \omega})|_{\omega=\omega_0}$ – групповая скорость волн на частоте ω_0 ; $h(\omega)$ – волновое число; v_0 , ω_0 – выбранные для нормировки значения постоянной составляющей скорости электронов и частоты; l – геометрическая длина замедляющей системы прибора. Уравнение возбуждения поля следует дополнить граничными и начальными условиями. Так на коллекторном конце лампы $F|_{\zeta=1} = 0$. Начальное условие $F(\zeta, \tau)|_{\tau=0} = F_0(\zeta)$ задается из линейной теории или в виде произвольной функции небольшой величины $F_0(\zeta) < 1$. Однако, в отличие от обычной ЛОВ, для карсинотрода учтена автомодуляция эмиссии на катоде за счет неравномерной расстановки крупных частиц-электронов, что находит отражение в уравнении возбуждения (11). Кроме того, в [42] был учтен фазовый сдвиг начальных значений фаз электронов, соответствующий стартовому синхронизму с полем, наличие запаздывания и параметрам обратной связи. В результате была получена следующая система уравнений:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \zeta^2} = -L \left(1 + \frac{\varepsilon}{L} \frac{\partial u}{\partial \zeta} \right)^3 \operatorname{Re} F \exp(-ju), \quad (12)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \zeta} - \frac{\partial F}{\partial \tau} = LI \frac{1}{(1-\mu)^{3/2}}, \quad (13)$$

$$I = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} (1-\mu + \mu \cos u_0)^{3/2} \exp(ju) du_0, \quad (14)$$

где $u = u(u_0, \zeta) = \omega_0(t-z/v_0)$ – фаза частицы, I – нормированная первая гармоника тока, μ – коэффициент модуляции по отношению к максимальному полю на катоде.

Таким образом, нелинейные уравнения нестационарных процессов в карсинотроде (12)–(14) содержат три существенных параметра – параметр взаимодействия электронного потока с обратной волной, параметр обратной катодной связи, а также фазу обратной связи.

Ниже приведена приближенная нелинейная теория карсинотрода. Нелинейное взаимодействие электронов и поля описывается такими же уравнениями, как и в обычной ЛОВ. Отличие, как было указано ранее, состоит в том, что на входе в замедляющую систему задан ВЧ-ток, амплитуда и фаза которого определяются законом эмиссии электронов с катода и цепью обратной связи. В случае использования автоэмиссионного катода входной ток определяется законом Фаулера–Нордгейма.

В [38,40] рассмотрена модель без учета пространственного заряда. Исходные уравнения одномерной нелинейной теории ЛОВ были использованы в безразмерных переменных

$$-\frac{d^2 u_m}{d\zeta^2} = \left(1 + \varepsilon \frac{du_m}{d\zeta} \right)^3 \operatorname{Re} F \exp(-ju_m), \quad (15)$$

$$\frac{dF}{d\zeta} - j\xi F = I, \quad (16)$$

$$I = \frac{2}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \exp(ju_m), \quad (17)$$

где $u_m(\zeta) = \omega t_m - \omega(z/v_0)$ – фаза m -й частицы в системе координат, движущейся со скоростью v_0 ; $\zeta = \varepsilon z(\omega/v_0)$ – безразмерная координата; I, F – нормированные амплитуды 1-й гармоники ВЧ-тока пучка и поля системы, соответственно; $\xi = b + jd$, где b – параметр расстройки скорости электронов v_0 и фазовой скорости волны ЗС v_ϕ , d – параметр потерь; $\varepsilon \approx C_0$ – параметр усиления.

Разработанная в [38] аналитическая нелинейная теория исходит из того, что при достаточно большом $\mu = E_1(0)/E_{\max} > 0.5$ в замедляющую систему влетают узкие сгустки электронов. И вследствие этого авторы рассматривали движение этих сгустков в замедляющей системе без учета деформации, что дало возможность определить аналитическое решение нелинейных уравнений карсинотрода (15)–(17) и найти КПД. Таким образом, вместо движения M отдельных электронов рассматривалось движение одного недеформируемого сгустка, описываемого одним усредненным по электронам уравнением движения,

$$1 - \frac{1}{[1 + Cd\vartheta_0/d\zeta]^2} = \frac{C F^2(0) - |F(\zeta)|^2}{\alpha_0 2}, \quad (18)$$

где $\vartheta_0(\zeta)$ – среднее смещение по фазе под воздействием ВЧ-поля $F(\zeta)$. Уравнение (18) было использовано в аналитической нелинейной теории вместо M уравнений движения отдельных частиц (15).

Пренебрежение изменением формы сгустка также позволило переписать выражения для тока (17)

$$I = |I| \exp(j\psi), \quad |I| \equiv |I(0)| = \alpha_1, \quad \psi = \psi(0) + \vartheta_0(\zeta) \quad (19)$$

и свести комплексное уравнение возбуждения (16) к двум вещественным

$$\frac{d|F|}{d\zeta} = |I| \cos \varphi, \quad \frac{d\varphi}{d\zeta} = -\xi + \frac{d\psi}{d\zeta} - \frac{|I|}{|F|} \sin \varphi, \quad (20)$$

где φ – разность фаз между током и полем. С использованием полученной системы уравнений (18)–(20) были исследованы электронная перестройка частоты карсинотрода и КПД прибора. На рис. 16 приведены зависимости генерируемой длины волны λ , выходной мощности P и КПД η карсинотрода от приложенного ускоряющего напряжения U_e .

Для исследования усилительного режима и пусковых условий генераторного режима прибора были использованы уравнения одномерной линейной теории ЛОВ [40], соответствующие случаю бесконечно большого продольного фокусирующего магнитного поля,

$$\frac{dF}{d\zeta} - j\xi F = I, \quad \frac{d^2 I}{d\zeta^2} + \sigma^2 I = -jF, \quad (21)$$

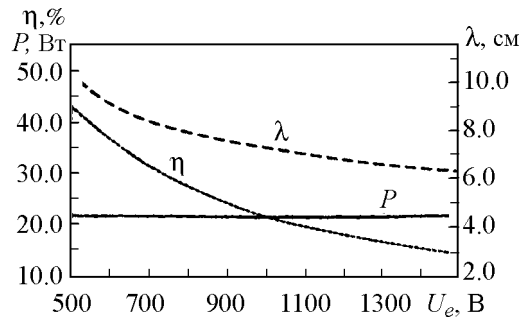


Рис. 16. Зависимости генерируемой длины волны, выходной мощности и КПД от ускоряющего напряжения [40]

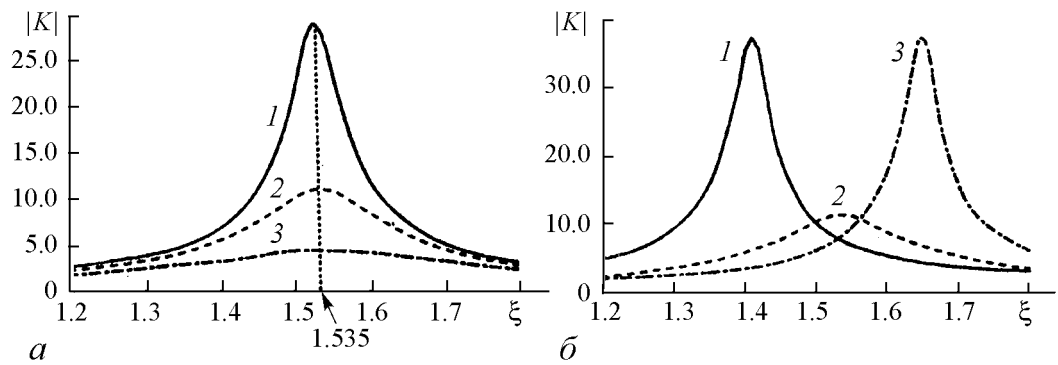


Рис. 17. Зависимость модуля коэффициента усиления $|K|$ от параметра расстройки ξ . *a* – при различных значениях модуля параметра КОС $|Y|$: 1 – 0, 2 – 0.1, 3 – 0.2; $\arg Y = 0$. *б* – при различных значениях фазы параметра КОС $\arg Y$: 1 – $(-90)^\circ$, 2 – $(0)^\circ$, 3 – $(+90)^\circ$; $|Y| = 0.1$, $L = 1.95$ [40]

где параметр пространственного заряда $\sigma^2 \approx 4QC_0 = \Gamma(\omega_{пл}/\omega C_0)^2$ определяется плазменной частотой $\omega_{пл}$, частотой ω , коэффициентом депрессии сил пространственного заряда Γ и параметром усиления $\varepsilon \approx C_0$.

Как уже было указано в карсинотроде в начале замедляющей системы имеется ВЧ-ток, обусловленный модуляцией эмиссии ВЧ-полем, передаваемым на катод по КОС. В этом случае граничные условия для усилителя принимают вид

$$F(L) \neq 0, \quad I(0) + YF(0) = 0, \quad dI/d\xi = 0, \quad (22)$$

где L – полная безразмерная длина системы; Y – параметр, определяемый КОС и эффективностью модуляции эмиссии на катоде. Рассмотрен случай малого пространственного заряда и отсутствия потерь в замедляющей системе.

На величину максимума коэффициента усиления $K = F(0)/F(L)$ влияет модуль параметра КОС $|Y|$ (рис. 17, *a*), а смещение этого максимума от частоты точного синхронизма электронов и волны замедляющей системы зависит от фазы Y (рис. 17, *б*). С увеличением модуля параметра КОС $|Y|$ полная безразмерная длина системы уменьшается, при этом снижается коэффициент усиления K , но полоса усиливаемых частот расширяется в 2–4 раза. Все эти эффекты сохраняются при изменении ускоряющего напряжения и, соответственно, частоты синхронизма. Поэтому в карсинотроде возможно регенеративное усиление с электронной перестройкой центральной частоты и расширенной по сравнению с обычной ЛОВ полосой усиливаемых частот.

Для режима генерации граничные условия примут вид

$$F(L) = 0, \quad I(0) + YF(0) = 0, \quad dI/d\xi = 0, \quad K = \infty. \quad (23)$$

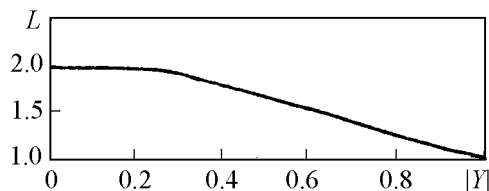


Рис. 18. Зависимость безразмерной длины системы L в пусковом режиме от модуля параметра КОС $|Y|$ при $\arg Y = 0$ [40]

Исследования пускового режима карсинотрода показали возможность уменьшения безразмерной длины системы в 2 раза по сравнению с обычной ЛОВ (рис. 18). При этом пусковой ток уменьшается в 8 раз (либо геометрическая длина замедляющей системы может быть уменьшена в 2 раза).

В упомянутых работах модель построена без учета влияния конечной величины фокусирующего магнитного поля на процессы взаимодействия электронов и поля обратной электромагнитной волны. Ниже приводятся результаты учета этого влияния на пусковые условия карсинотрода.

При решении задачи методом последовательных приближений исходные выражения для напряженности ВЧ электрического поля в линии передачи и сгруппированного тока использовались в виде

$$E_x(l) = E_x(0) e^{-j\beta_0 l} + \frac{\beta_0^2 K_0}{2} \int_0^l i(\bar{x}) e^{-j\beta_0(l-\bar{x})} d\bar{x}, \quad (24)$$

$$i(x) = \tilde{i}(0) e^{-j\beta_e x} + \beta_e I_0 \frac{\text{sh}(\beta_0 y_0)}{\text{sh}(\beta_0 d)} [j \text{sh}(\beta_0 y_0) \tilde{x}(x) + \text{ch}(\beta_0 y_0) \tilde{y}(x)], \quad (25)$$

$$\tilde{x}(x) = \int_0^x \frac{E_0}{2V_0} \text{sh}(\beta_0 y_0) e^{-j\beta_0 \xi} (x - \xi) e^{-j\beta_e(x-\xi)} d\xi, \quad (26)$$

$$\tilde{y}(x) = \int_0^x j \frac{E_0}{2V_0} \text{sh}(\beta_0 y_0) e^{-j\beta_0 \xi} \frac{\sin[\beta_c(x-\xi)]}{\beta_c} e^{-j\beta_e(x-\xi)} d\xi, \quad (27)$$

где $i(0) = Y E_x(0)$ – ток в начале системы в предположении, что возникает только его продольная составляющая; Y – проводимость на единицу длины.

С использованием уравнений (24)–(27) можно получить выражение для продольной составляющей напряженности электрического поля

$$E_x(l) = E_x(0) e^{-j\beta_0 l} \left[1 + (2\pi_0 N)^3 \left(\hat{F}(\Phi_0) + \hat{F}(\Phi_0, \phi_c) \right) + X \hat{F}_X(\Phi_0) \right], \quad (28)$$

где $X = \frac{\beta_0^2 K l}{2} Y$, а функции от относительного угла пролета $\Phi_0 = (\beta_e - \beta_0) l$ и циклотронного угла пролета $\phi_c = \beta_c l$ имеют вид

$$\hat{F}(\Phi_0) = \frac{2(1 - \cos \Phi_0) - \Phi_0 \sin \Phi_0}{\Phi_0^3} + j \frac{2 \sin \Phi_0 - \Phi_0 (\cos \Phi_0 + 1)}{\Phi_0^3}, \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \hat{F}(\Phi_0, \phi_c) = & \frac{4\Phi_0 \phi_c - (\Phi_0 + \phi_c)^2 \cos(\Phi_0 - \phi_c) + (\Phi_0 - \phi_c)^2 \cos(\Phi_0 + \phi_c)}{2\phi_c (\Phi_0^2 - \phi_c^2)^2} + \\ & + j \frac{-2\phi_c (\Phi_0^2 - \phi_c^2) + (\Phi_0 + \phi_c)^2 \sin(\Phi_0 - \phi_c) - (\Phi_0 - \phi_c)^2 \sin(\Phi_0 + \phi_c)}{2\phi_c (\Phi_0^2 - \phi_c^2)^2}, \quad (30) \end{aligned}$$

$$\hat{F}_X(\Phi_0) = \frac{\sin \Phi_0}{\Phi_0} + j \frac{\cos \Phi_0 - 1}{\Phi_0}. \quad (31)$$

Выражения для мощности взаимодействия примут вид

$$P_{eI} = \frac{1}{4} P_0 \xi_x^2 \bar{\varphi}_0 \left[\hat{F}(\Phi_0) + \hat{F}_X(\Phi_0) \right], \quad (32)$$

$$P_{eII} = \frac{1}{4} P_0 \xi_y^2 \bar{\varphi}_0 \hat{F}(\Phi_0, \phi_c). \quad (33)$$

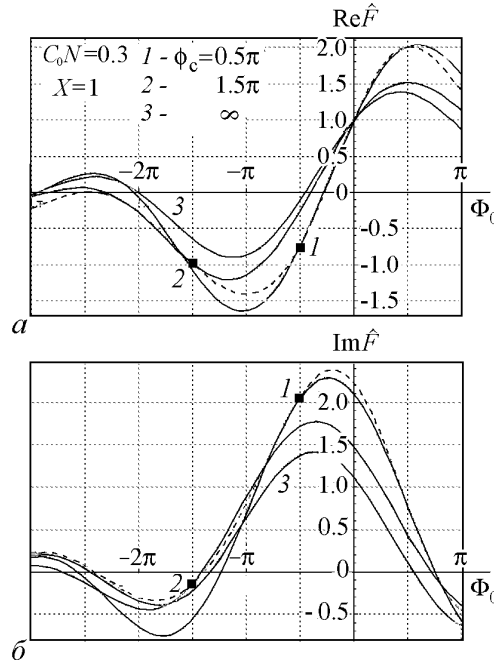


Рис. 19. Зависимость функции \hat{F} от относительного угла пролета

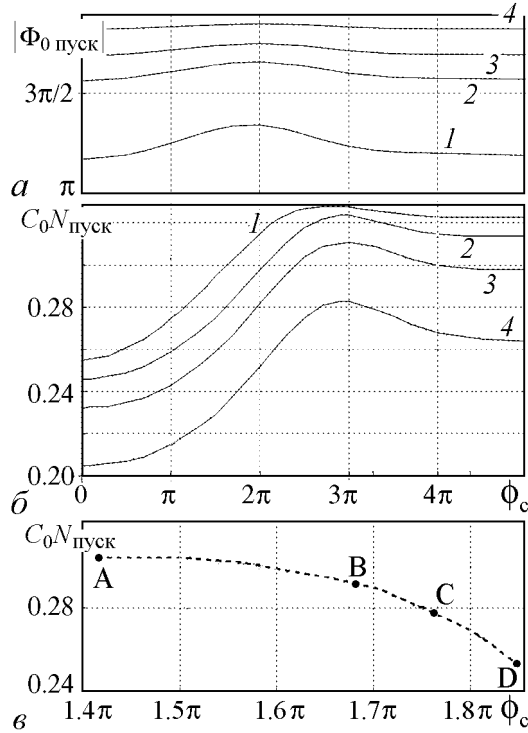


Рис. 20. *a* – пусковое значение относительного угла пролета $|\Phi_{0\text{пуск}}|$ и *б* – пусковые значения величины $C_0 N_{\text{пуск}}$ как функции циклотронного угла пролета ϕ_c для различных значений X : 1 - 0.5, 2 - 3.3, 3 - 5.4, 4 - 10.5; *в* – зависимость $C_0 N_{\text{пуск}}$ от ϕ_c при синхронизме с МЦВ ($\phi_c = \Phi_{0\text{пуск}}$) для значений X в точках: А - 1.0, В - 3.0, С - 5.0, D - 10.0

где $\xi_x = E_0 l \text{sh}(\beta_0 y_0)/V_0$, $\xi_y = E_0 l \text{ch}(\beta_0 y_0)/V_0$, $\bar{\Phi}_0 = \beta_e l$ – абсолютный невозмущенный угол пролета электронов, $P_0 = I_0 V_0$. Из выражения (30) видно, что при выполнении условия $\phi_c = -\Phi_0$ (или $\beta_0 = \beta_e + \beta_c$) имеют место резонансные эффекты, связанные с точным синхронизмом электромагнитной волны с медленной циклотронной волной и обусловленные учетом конечности фокусирующего магнитного поля. Так как существуют области с отрицательной активной мощностью при синхронизме волны в линии с медленной циклотронной волной, то появляется возможность описать ранее неисследованный режим работы карсинотрода, используя двухволновое приближение. Тогда выражение (30) заметно упростится

$$\hat{F}(\Phi_0 = -\phi_c) = -\frac{2\phi_c^2 + \cos(2\phi_c) - 1}{8\phi_c^3} + j\frac{2\phi_c - \sin(2\phi_c)}{8\phi_c^3}. \quad (34)$$

На рис. 19 приведены зависимости действительной и мнимой части функции $\hat{F} = (2\pi C_0 N)^3 \times (\hat{F}(\Phi_0) + \hat{F}(\Phi_0, \phi_c)) + X \hat{F}_X(\Phi_0)$ от относительного угла пролета для $C_0 N = 0.3$ и $X = 1$. Пунктирная кривая соответствует двухволновому приближению, когда вместо (30) используется упрощенное выражение (34). Видно, что результаты, полученные в общем случае и в двухволновом приближении, хорошо согласуются между собой (соответствующие пересечения отмечены точками «1» и «2»).

Пусковые условия определяются равенством нулю электрического поля на конце системы $E(l) = 0$. На рис. 20 приведены зависимости пусковых значений от величины магнитного поля.

При большом постоянном магнитном поле (большие ϕ_c) пусковые значения относительного угла пролета Φ_0 и $C_0 N_{\text{пуск}}$ стремятся к конкретным значениям, и увеличение магнитного поля уже не влечет за собой их изменения. При $\phi_c > 4\pi$ результаты совпадают с результатами одномерной теории. Так, в случае бесконечно большого фокусирующего магнитного поля при $X = 0$ пусковые величины Φ_0 и $C_0 N_{\text{пуск}}$ стремятся к значениям $-\pi$ и 0.315, соответственно; при $X = 3$ $\Phi_0 \rightarrow -1.56\pi$ и $C_0 N_{\text{пуск}} \rightarrow 0.310$; при $X = 10$ $\Phi_0 \rightarrow -1.82\pi$ и $C_0 N_{\text{пуск}} \rightarrow 0.258$. При уменьшении ϕ_c зависимость пусковых величин от продольного магнитного поля становится заметной.

Диоды и триоды

Большое количество работ посвящено теоретическому и экспериментальному исследованию диодных и триодных структур с автоэмиссионными катодами [27, 38, 45–56]. В работах [45,46] приведены результаты компьютерного моделирования процессов генерации электромагнитных волн в диодных структурах. При моделировании исследовались структуры, содержащие автоэмиссионные катоды Спиндта. Были выполнены расчеты для треугольного и закругленного катодов. Расстояние от сетки до эмиттеров 1 мкм, толщина сетки 0.2 мкм. Радиус скругления каждого эмиттера достигал 500 Å, а плотность упаковки $6.4 \cdot 10^5$ острий/см². Если на управляющую сетку подать напряжение 50...100 В, то с тонкопленочных катодов при таких параметрах можно получить ток до 100 мА (плотность тока при этом 12 А/см²).

Анализ процессов генерации волн в диодных структурах показал эффективность использования схемы обычного монодрона [1]. Данная структура наиболее проста в микровакуумном исполнении. Более того, имеет реализуемые значения пусковых (128 мА для длины волны 3 см) и рабочих токов, а так же технологична в изготовлении. Согласно теоретическим расчетам, КПД = 18 % [45, 46].

С использованием матричного углеродного эмиссионного катода был создан вакуумный микротриод [47]. Триод был выбран в силу того, что несмотря на простую геометрию прибора определить его характеристики несложно, а его исследование может помочь при создании более сложных устройств. Здесь триод рассматривался как уменьшенная версия обычного триода, содержащего катод, управляющую сетку и анод. Все электроды были изготовлены в виде подвижных поликристаллических кремниевых пластин.

Диаметр УНТ варьировал от 20 до 50 нм. Длина нанотрубок связана со временем их роста, а соответствующая скорость роста при этом была равна 10 мкм/мин. Следует отметить, что именно высота УНТ определяет расстояние между катодом и управляющем электродом, а, следовательно, это влияет и на поле. По экспериментальным данным были получены анодно-сеточные характеристики (рис. 21). При работе прибора получена плотность тока более 16 А/см².

В работе [50] подробно описан процесс выращивания и формирования вертикально ориентированных углеродных нанотрубок. Диаметр выращенных УНТ составляет 50 нм, высота 5 мкм, расстояние 10 мкм, площадь всей матрицы 500×500 мкм². При этих значениях ток менялся в диапазоне 2.5...3 мА.

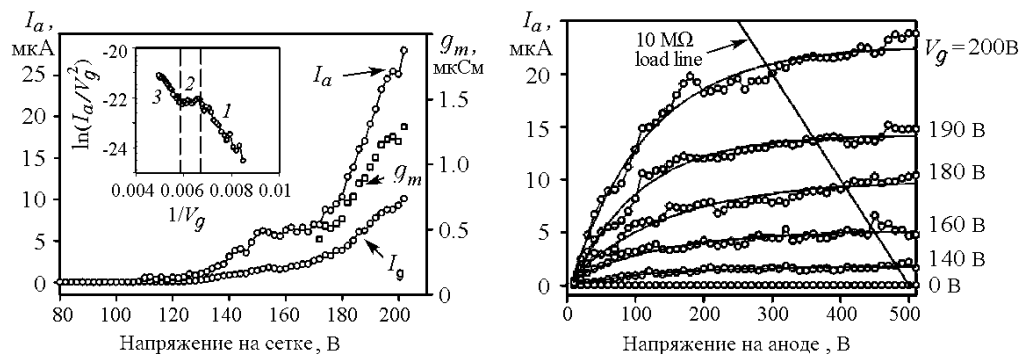


Рис. 21. Анодно-сеточные характеристики микротриода [47]

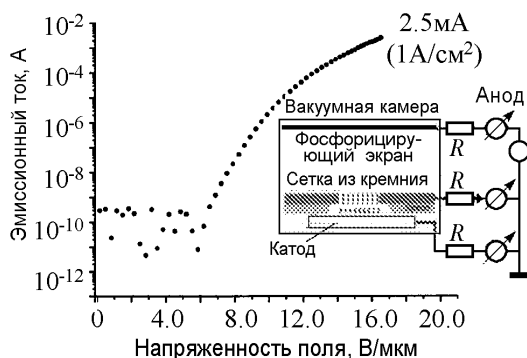


Рис. 22. Зависимость эмиссионного тока от напряженности электрического поля [5]

На рис. 22 приведена зависимость эмиссионного тока от приложенного напряжения, полученная экспериментально при исследовании триода. Большая плотность эмиссионного тока является результатом того, что массив УНТ обладал высокой степенью однородности и хорошим соотношением геометрических размеров отдельных эмиттеров. Также оказало свое влияние то, что до встраивания в прибор катод подвергся быстрому отжигу при температуре 850° .

Вместо заключения

Известно, что катоды с управляемой эмиссией находят применение не только в СВЧ-электронике (см., например, [3]). В частности, автоэмиссионные катоды используют и в рентгеновских трубках [57–65]. Компания «Oxford Instruments» производит катоды с углеродными волокнами для компактных рентгеновских источников (30 кВ , 16.4 см^3) [60]. Проводились исследования их эмиссионной стабильности, утечки тока и воспроизводимости рентгеновских трубок, а также углового отклонения для каждого из CNT катодов. Оказалось, что половина угла разлета электронов, эмитированных в однородное электрическое поле, составляет примерно 3° .

В [61] представлено описание конструкции и характеристик прототипа рентгеновской лампы с углеродными волокнами в качестве полевого эмиттера. Такая лампа представляет собой устройство длиной 40 мм и диаметром 16 мм.

Использование холодного катода обеспечивает стабильность рентгеновского источника для компьютерной томографии или цифровой томографической реконструкции [62]. Применение множественного источника позволяет упростить систему формирования и обработки изображения и обеспечивает возможность увеличения скорости обработки. Для получения пятна диаметром 250 мкм использовался электронный пучок, ток которого составил 25 мА при напряжении от 25 до 30 кВ.

Разработана многолучевая рентгеновская трубка на основе полевой эмиссии [63], которая работает при анодном напряжении 140 кВ.

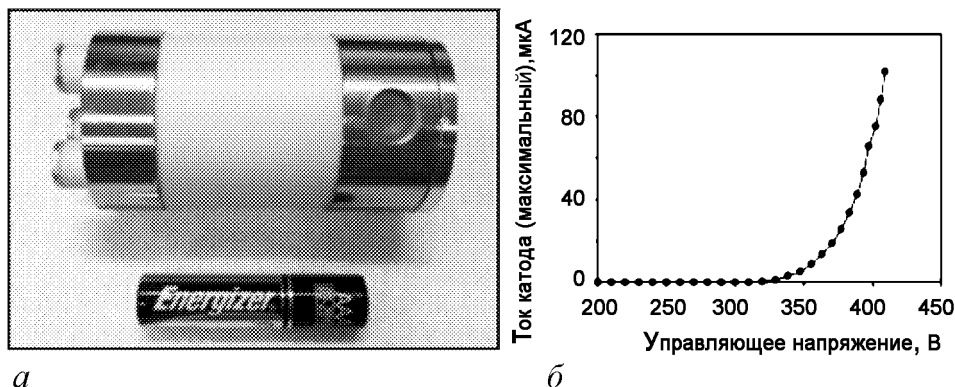


Рис. 23. *a* – рентгеновская лампа в сравнении с батареей «AAA»; *б* – ВАХ рентгеновской лампы [64, 65]

В [64,65] представлена рентгеновская лампа, в конструкцию которой входят катод, сетка, два фокусирующих электрода и анод (пентод). Наличие пары фокусирующих электродов приводит к тому, что диаметр фокального пятна становится меньше 0.3 мм при соответствующем значении напряжения. Лампа имеет довольно компактные размеры: длина 71 мм, диаметр 35 мм (рис. 23, *a*). Все металлические элементы данной рентгеновской лампы изготовлены из кобальт-никелевого сплава (ковар), в качестве изолирующего вещества выбрана окись алюминия. Эмиттер из УНТ встроен в катод из ковара методом трафаретной печати (screen printing method). Размер матрицы эмиттеров УНТ составляет около 20 мм², диаметр каждого эмиттера 0.2 мм, расстояние катод–сетка 0.2 мм. На рис. 23, *б* приведена ВАХ рентгеновской лампы. Как показали экспериментальные данные, для такого прибора характерна стабильность эмиссионного тока.

Продвижение в технологиях изготовления сделало возможным создание полевых эмиссионных дисплеев (Field emission display, FED) на основе матричных автоэмиссионных катодов [3, 66–77]. Полевые эмиссионные дисплеи имеют толщину панели, не превышающую нескольких миллиметров. В основном они предназначены для использования в устройствах отображения информации: плоские дисплеи для ПК, телевизионные приемники новых поколений, устройства отображения информации с высокой четкостью, бортовые автомобильные, авиационные и космические системы отображения информации.

На рис. 24 изображена упрощенная схема поперечного сечения полевого эмиссионного дисплея [67]. Автокатод состоит из матрицы полевых эмиттеров. Эмиттеры расположены на пересечении двух проводящих линий перпендикулярных друг к другу. Место их пересечения определяет пиксель – минимальный элемент изображения (элемент матрицы). Количество эмиттеров зависит от предъявляемых требований к разрешающей способности и яркости дисплея. Каждый пиксель содержит от 500 до 5000 острий. Для получения минимального элемента изображения (пикселя) необходимо, чтобы эмиссионный ток достиг значения в пределах от 0.1 до 10 мкА.

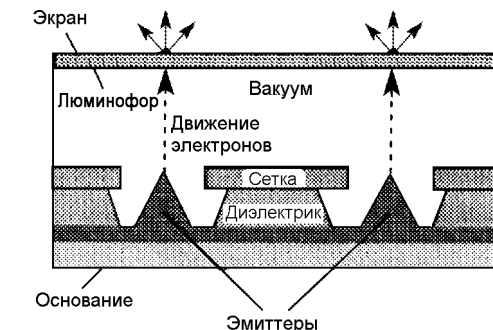


Рис. 24. Схема поперечного сечения полевого эмиссионного дисплея [67]

В работе [68] предложен полевой эмиссионный дисплей, размер которого составляет 4.5 дюйма (10.16 см), изготовленный на основе углеродных волокон. Напряженность электрического поля, при котором электроны начинали вылетать с катода, оказалась примерно равной 1 В/мкм. В том случае, когда величина напряженности поля достигла 3 В/мкм, удалось получить эмиссионный ток 1.5 мА; при этом плотность тока составила 90 мкА/см². При напряженности 3.7 В/мкм яркость такой панели составила 1800 кд/см².

В лаборатории вакуумной микроэлектроники Сибирского федерального университета был разработан, изготовлен и испытан плоский матричный автоэлектронный экран с катодами планарно-торцевого (лезвийного) типа, конструкция которого содержит высокоомный резистор на каждый эмитирующий элемент, что позволяет повысить яркость свечения экрана и его надежность [70, 71]. В последующие годы в этой лаборатории были созданы дисплеи, состоящие из матрицы микроминиатюрных катодных узлов острейного либо планарного типа и люминофорного экрана, размещенных в герметичном плоском корпусе при давлении не более 10⁻⁷ мм.рт.ст. Основные технические характеристики таких дисплеев: высокая разрешающая способность (до 100 лин/мм); высокое быстродействие (определяется параметрами применяемых люминофоров, время отклика катодов на управляющее напряжение порядка 10⁻¹² с); малые значения управляющего напряжения (менее 30 В); возможность воспроизведения стереоизображения и др.

В работах [73–76] представлены цветные полевые эмиссионные дисплеи с катодами Спиндта. Толщина катода и анода составляет 1.1 мм, а расстояние 0.6 мм. Таким образом, полная толщина панели оказывается равной 2.8 мм. Автокатод, управляющая сетка и фокусирующие электроды изготовлены из ниобия (Nb), разделитель диаметром 50 мкм – из стекловолокна, а сами эмиттеры – из молибдена (Mo). С целью предотвращения перекрестных помех в цвете на одной из сторон сетки нанесен фокусирующий слой. При исследовании дисплея на управляющий электрод было подано напряжение 40 В в то время, как катодное напряжение составило 25 В.

Следует также упомянуть, что единичные автоэмиссионные катоды нашли применение в электронно-зондовых системах: просвечивающих и растровых электронных микроскопах атомного разрешения, в системах электронной литографии и спектроскопии [78,79]. Создание класса приборов сверхвысокого разрешения стало возможно благодаря тому, что острейный автокатод является почти идеальным точечным источником электронов с очень узким энергетическим спектром и большой яркостью. Одним из последних достижений является реализация идеи электронной голографии [78]. В электронной голографии удается получить объемное изображение атомных объектов. Этот результат был получен благодаря тому, что острейный автоэмиттер обладает одновременно большой яркостью и высокой пространственной и временной когерентностью.

И заключительное замечание. Авторы отдают себе отчет в том, что наверняка не все работы, выполненные после 1996 года, вошли в обзор, поскольку многие из них нам просто не доступны по разным причинам.

Библиографический список

1. Трубецков Д.И., Рожнев А.Г., Соколов Д.В. Лекции по сверхвысокочастотной вакуумной микроэлектронике. Саратов: Гос УНЦ «Колледж», 1996.

2. *Татаренко Н.И., Кравченко В.Ф.* Автоэмиссионные наноструктуры и приборы на их основе. М.: Физматлит, 2006.
3. *Дьячков П.Н.* Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006.
4. *Spindt C.A., Brodie L., Humphrey L., Westerberg E.R.* Physical properties of thin-film field emission cathodes with molybdenum cones // J. of Appl. Physics. 1976. Vol. 47, № 12. P. 5248.
5. *Lockwood N.P., Cartwright K.L., d'Aubigny C.Y., et.al.* Development of field emission cathodes, electron gun and a slow wave structure for a terahertz travelling wave tube // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2010. P. 25.
6. *Шешин Е.П.* Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. М.: Физматкнига, 2001.
7. *Викулов И.* Американская программа по СВЧ вакуумной электронике HiFIVE // Электроника НТБ. 2008. № 5. С. 70.
8. *Викулов И.* Вакуумная СВЧ электроника. По материалам конференции IVEC 2009 // Электроника НТБ. 2010. № 4. С. 108.
9. *Whaley D.R., Duggal R., Armstrong C.M., et al.* Operation of a low-voltage high-transconductance field emitter array TWT // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2008. P. 78.
10. *Whaley D.R., Duggal R., Armstrong C.M., et al.* 100 W operation of a cold cathode TWT // IEEE Trans. Plasma Sci. 2009. Vol. 56, № 5. P. 896.
11. *Dayton J.A., Kory C.L., Mearini G.T.* Backward wave oscillator development at 300 and 650 GHz // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2006. P. 423.
12. *Dayton J.A., Mearini G.T., Kory C.L., Bower C.A.* Fabrication of diamond-based 300 and 650 GHz BWOs // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2007. P. 1.
13. *Paoloni C., Carlo A.D., Brunetti F., et.al.* Design and Fabrication of a 1 THz Backward Wave Amplifier // Terahertz Science and Technology. 2011. Vol. 4, № 4. P. 149.
14. *Guzilov I., Konnov A., Kuzmich K., et.al.* Multi Beam S-band Klystron with the field emitter // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2009. P. 366.
15. *Краснова Г.М.* К двумерной линейной теории взаимодействия электронного потока с бегущей электромагнитной волной: учет влияния пространственного заряда в модели тонкого пучка // Изв. вузов «ПНД». 2010. Т. 18, № 5. С. 151.
16. *Krasnova G.M.* Interaction of space-charge waves in an electron beam with electromagnetic waves in a longitudinal magnetic field // Physics of Wave Phenomena. 2011. Vol. 19, № 4. P. 290.
17. *Kyhl R.L., Webster H.F.* Break of Hollow Cylindrical Electron Beams // IRE Trans. Electron Devices ED-3. 1956. № 4. P. 172.
18. *Cutler C.C.* Instability in hollow and strip electron beams // Jour. of Applied Physics. 1956. Vol. 27, № 9. P. 1028.
19. *Шевчик В.Н., Трубецков Д.И.* Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. М.: Советское радио, 1970.

20. *Shiffler D., Nation J.A., Kerslick G.S.* A high-power, TWT amplifier // IEEE Trans. on Pl. Sci. 1990. Vol. 18, № 3. P. 546.
21. *Imura H., Tsuida S., Takahasi M., et al.* Electron gun design for TWT using a field emitter array cathode // Electron Devices Meeting, 1997. IEDM '97. Technical Digest. P. 721.
22. *Whaley D.R., Gannon B.M., Smith C.R., Armstrong C.M., Spindt C.A.* Application of field emitter arrays to microwave power amplifiers // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2000.
23. *Whaley D.R., Gannon B.M., Smith C.R., Armstrong C.M., Spindt C.A.* Application of field emitter arrays to microwave power amplifiers // IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. Vol. 28, № 3. P. 727.
24. *Whaley D.R., Gannon B.M., Heinen V.O., et al.* Experimental demonstration of an emission-gated TWT amplifier // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. Vol. 30, № 3. P. 998.
25. *Вукулов И.* Мощные СВЧ-модули. Гибрид вакуумной и твердотельной электроники // Электроника НТБ. 2007. № 7. С. 69
26. *Li X., Bai G., Ding M., et al.* Field emitter array electron gun for travelling wave tubes // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2006. P. 507.
27. *Legagneux P., Le Sech N., Guiset P., et al.* Carbon nanotube based cathodes for microwave amplifiers (Keynote Presentation) // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2009. P. 80.
28. *Andre F., Ponard P., Rozier Y., et al.* TWT and X-Ray devices based on carbon nanotubes // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2010. P. 83.
29. *Гуринович А.Б., Кураев А.А., Синуцын А.К.* Исследование оптимальных вариантов ЛБВ с катодной модуляцией // 9-я Международная Крымская Конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», КрымМиКо 1999. С. 127.
30. *Gourinovitch A.B., Kurayev A.A., Popkova T.L., Sinitsyn A.K.* Optimized TWT with cathode modulation // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2000.
31. *Петросян А.И., Роговин В.И.* Расчет электронно-оптических систем ЛБВО с полевой эмиссией. // Прикладная физика. 2008. № 2. С. 86.
32. *Dayton J.A., Mearini G.T., Kory C.L., et al.* Assembly and preliminary testing of the prototype 650 GHz BWO // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2008. P. 394.
33. *Baik C.-W., Son Y.-M., Kim S.I., et al.* Microfabricated coupled-cavity backward-wave oscillator for terahertz imaging // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2008. P. 398.
34. *Jeon S.G., Shin Y.M., Kim J.I., et al.* Photonic Crystal Reflex Klystron using Field Emission Cathode // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2004. P. 120.
35. *Park G.-S., Jang K.H., Jeong S.G. et al.* Experimental investigation on high-order-mode photonic crystal reflex klystron using Spindt-type cathodes // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2006. P. 189.

36. *Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Sokolov D.V., Trubetskov D.I., Han S.T., Kim J.I., Park G.S.* Novel concepts of vacuum microelectronic microwave devices with field emitter cathode arrays // *Physics of Plasmas*. 2002. Vol. 9, № 9. P. 4020.
37. *Солнцев В.А.* Карсинотрод. Патент на изобретение № 2121194RU2121194С1.Б.И. № 30.27.10.98 г.
38. *Солнцев В.А.* Нелинейные явления в вакуумных микроэлектронных структурах // *Изв.вузов «ПНД»*. 1998. Т. 6, № 1. С. 54.
39. *Solntsev V.A.* Nonlinear analysis of a carcinotrode: a BWO with an automodulation of the cathode emission // *Jour. of Communications Technology and Electronics*. 2000. Vol. 45, № 1. P. S39.
40. *Солнцев В.А., Колтунов Р.П., Мелихов В.О.* Исследование характеристик лампы обратной волны с автомодулирующей эмиссии // *Радиотехника и электроника*. 2005. Т. 50, № 4. С. 483.
41. *Koltunov R., Melikhov V., Solntsev V.* Frequency properties of BWO with emission automodulation // *IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2005*. P. 203.
42. *Мелихов В.О., Назарова М.В., Солнцев В.А.* Моделирование нестационарных процессов в лампе обратной волны с автомодулирующей эмиссии (карсинотроде) // *РЭ*. 2009. Т. 54, № 12. С. 1481.
43. *Назарова М.В., Солнцев В.А., Мелихов В.О.* Группирование электронов в оптимальном режиме карсинотрода // *РЭ*. 2011. Т. 56, № 4. С. 511.
44. *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по СВЧ электронике для физиков. М.: Физматлит, 2003. Т. 1.
45. *Кураев А.А., Лукашевич Д.В., Синицын А.К., Сокол В.А.* Генерация электромагнитных волн в диодных структурах с автоэмиссионными катодами // 9-я Международная Крымская Конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», КрыМиКо 1999. С. 133.
46. *Kurayev A.A., Lukashevich D.V., Sinitsyn A.K.* Modeling of Diode Oscillators with Field-Emission Cathodes // *IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2000*.
47. *Bower C., Shalom D., Zhu W., et al.* Micromachined Vacuum Triode Using a Carbon Nanotube Cold Cathode // *IEEE Trans. Electron Devices* 2002. Vol. 49, № 8. P. 1478.
48. *Holloway B., Zhu M., Zhao X., et al.* Milliamper-Class Back-Gated Triode Field Emission Devices Based on Free-Standing Two-Dimensional Carbon Nanostructures // *IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2006*. P. 517.
49. *Tyler T., Shenderova O., Ray M., et al.* Buried-line back-gated triode field emission devices // *IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2006*. P. 519.
50. *Milne W.I., Teoa K.B., et al.* Aligned carbon nanotubes/fibers for applications in vacuum microwave amplifiers // *J. Vac. Sci. Technol.* 2006. Vol. 24, № 1. P. 345.
51. *Riccitelli R., Brunetti F., Petrolati E., et al.* Innovative design of nano-vacuum triode // *IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2007*. P. 1.

52. Riccitelli R., Brunetti F., Paoloni C., et al. Field-emission vacuum triode: THz waveguide solutions for the transmission lines // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2008. P. 382.
53. Бенедик А.И. Численное моделирование генератора на основе диода с автоэмиссионным катодом и фотонно-кристаллическим резонатором // Изв.вузов «ПНД». 2012. Т. 20, № 2. С. 63.
54. Benedik A.I., Ryskin N.M., Han S.-T. Simulation of the field emission diode oscillator with photonic crystal resonator // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2012. P. 379.
55. Lei W., Zhang X., Wang B. Field emission display with printable planar triode // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2012. P. 555.
56. Zheng L., Zhu Z., Lei W., et al. Enhanced field emission density current of a planar triode structure with double cathodes // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2012. P. 377.
57. Terranova M.L., Orlanducci S., Tamburri E., et al. Cold cathodes assembled by microsized cnt systems // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2009. P. 415.
58. Cheng Y., Zhou O. Electron field emission from carbon nanotubes // C.R. Physique. 2003. № 4. P.1021.
59. Modi A., Koratkar N., Lass E., et al. Miniaturized gas ionization sensors using carbon nanotubes // Nature (London). 2003. № 424. P. 171.
60. Espinosa R.J., McKenzie C., Munson M., et al. X-ray tubes incorporating CNT cathodes // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2004. P. 253.
61. Maslennikov O.Y., Stanislavchik K.V., et al. Small-sized X-ray tube with the field electron emitter on the base of CNT // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2006. P. 513.
62. Schwoebel P., Holland C.E., Spindt C.A. Field emission arrays for tomographic medical X-ray imaging // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2006. P. 511.
63. Guzilov I., Kuzmich K., Maslennikov O., et al. Multi beam X-ray tube with field emitter on the base of nanocrystalline graphite for computer tomography // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2009. P. 289.
64. Jeong J.-W., Kim J.-W., Choi S., Kang J.-T., Song Y.-H. The Vacuum-sealed micro-focus X-ray tube with CNT field emitters // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2012. P. 93.
65. Kim J.-W., Kang J.-T., Jeong J.-W., Choi S., Kim D.-O. Song Y.-H. The design and fabrication of CNT field emitters for a vacuum-sealed X-ray tube // IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2012. P. 103.
66. Kim J.M., Hong J.P., Kim J.W., Choi J.H., Park N.S., Kang J.H., Jang J.E., Ryu Y.S., Yang H.C., Gorfinkel B.I., Roussina E.V. Reliability analysis of 4 in. field-emission display // Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures. 1997. Vol. 15, № 2. P. 528.

67. *Temple D.* Recent progress in field emitter array development for high performance applications // *Materials Science and Engineering*. 1999. R24. P. 185.
68. *Choi W.B., Chung D.S., Kang J.H., et al.* Fully sealed, high-brightness carbon-nanotube field-emission display // *Appl. Phys. Lett.* 1999. Vol. 75, № 20. P. 3129.
69. *Горфинкель Б.И., Миронов Б.Н., Михайлова В.В., Финкельштейн С.Х., Хазанов А.А., Зелепукин А.В.* Патент на изобретение RU2174268C2.
70. <http://www.ire.krgtu.ru/subdivision/pc/data/tecnol.htm>
71. *Будзиаловский В.В., Засемков В.С.* Патент на изобретение RU2174266C2.
72. *Горфинкель Б.И., Абаньшин Н.П., Хоу В.Х., Крузос Д.А., Наар С., Кастальский А., Шохор С.* Патент на изобретение RU2217837C2.
73. *Itoh S. et al.* Development of field emission display // *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*. 2004. Vol. 22, № 3. P. 1362.
74. *Sakurada K. et al.* Development of high resolution Spindt-type FED // *IDW06*, 2006. P. 1805.
75. *Itoh S. et al.* Development of field emission display (FEDs) // *J. of Vac. Sci. Technol. Microelectronics and Nanometer Structures*. 2006. № 6. P. 1821.
76. *Mimura H.* The status of field emission displays // *IEEE International Vacuum Electronics Conference Proceedings, IVEC 2007*. P. 1.
77. *Abanshin N.P., Yakunin A.N., Gorfinkel B.I.* Questions of development of durable flat graphic indicators on the basis of planar-edge auto-emissive structures // *Proc. of the 14th International Symposium: Advanced Display Technologies, Crimea, 2006*. P. 16.
78. *Фурсей Г.Н.* Автоэлектронная эмиссия // *Соросовский образовательный журнал*. 2000. № 11. С. 96.
79. *Jonge N., Lamy Y., Schoots K., Oosterkamp T.H.* High brightness electron beam from a multi-walled carbon nanotube // *Nature (London)*. 2002. № 420. P. 393.

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

Поступила в редакцию 25.07.2012

ABOUT CURRENT STATE HIGH FREQUENCY VACUUM ELECTRONIC AND MICROELECTRONIC DEVICES WITH FIELD EMISSION

D. I. Trubetskov, G. M. Krasnova

Some results of researches and development of devices with field emission (TWT, BWO, carcinotrode, klystrons and X-ray tubes, field emission displays, etc.) have been briefly presented in the article. Lines of development of its theory have been designated. Also the vacuum microwave electronics programs offered in Europe and USA have been considered. They are directed on using new technologies in coping with the terahertz frequency range, reflecting the trend of recent years.

Keywords: Field emission array cathodes, TWT, BWO, klystron, carcinotrode.



Трубецков Дмитрий Иванович – родился в Саратове (1938). Окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1960). Защитил диссертации на соискание ученой степени кандидата (1965) и доктора физико-математических наук в СГУ (1978) в области радиофизики. Заведующий кафедрой электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов СГУ, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, заслуженный деятель науки РФ, лауреат премии Президента РФ в области образования. Научный руководитель Лицея прикладных наук и факультета нелинейных процессов СГУ. Область научных интересов: вакуумная электроника и микроэлектроника сверхвысоких частот, теория колебаний и волн, нелинейная динамика, история науки. Автор более двадцати учебных пособий и монографий, а также более двухсот статей в периодической печати.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: dtrubetskov@yahoo.com



Краснова Галина Михайловна – родилась в 1989 году. В 2011 году окончила Саратовский государственный университет. Продолжает обучение в аспирантуре на кафедре электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов СГУ. Принимала участие в таких конференциях, как «Нелинейные дни в Саратове для молодых», «Волновые явления в неоднородных средах», «Физика и применение микроволн» и в XV Международной юбилейной зимней школе-семинаре по электронике СВЧ и радиофизике.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
E-mail: krasnovagm@rambler.ru