



ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ ДИОДА С АВТОЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ И ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ*

А.И. Бенедик

Представлены результаты теоретического анализа генератора на основе диода с автоэмиссионным катодом, помещенного в фотонно-кристаллический резонатор. Проведен анализ условий самовозбуждения генератора в приближении малого сигнала. Разработана нестационарная численная модель генератора, основанная на нестационарном уравнении возбуждения резонатора и методе «частиц в ячейке» для моделирования динамики электронного потока. Проведено численное моделирование процессов установления колебаний, результаты которого показывают возможность достижения достаточно высоких значений выходной мощности и электронного КПД.

Ключевые слова: Вакуумная микроэлектроника, автоэлектронная эмиссия, фотонно-кристаллический резонатор, метод «частиц в ячейке».

Введение

В последние годы в связи с развитием технологий вакуумной микроэлектроники (см., например, [1,2]) появились перспективы создания усилителей и генераторов – миниатюрных аналогов классических приборов вакуумной электроники: ламп бегущей волны, отражательных клистронов, клистронов бегущей волны, приборов со скрещенными полями и др. в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне [1–6]. В качестве источника электронов в подобных приборах предполагается использовать автоэмиссионные катоды, к достоинствам которых относят компактность и высокую плотность тока. В частности, в работах [7,8] был предложен перспективный генератор на основе диода с автоэмиссионным катодом, помещенного в фотонно-кристаллический резонатор (рис. 1). Фотонный кристалл представляет собой искусственную периодическую структуру из диэлектрических стержней. В кристалле имеется точечный дефект, играющий роль высокочастотного резонатора. В резонаторе возбуждается мода TM_{110} , частота которой находится в полосе непропускания фотонно-кристаллической структуры. Также в кристалле имеется дефект для вывода энергии.

*Статья написана по материалам доклада на Школе-конференции «Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2011» Саратов, 25–28.10.2011, 15–16.11.2011.

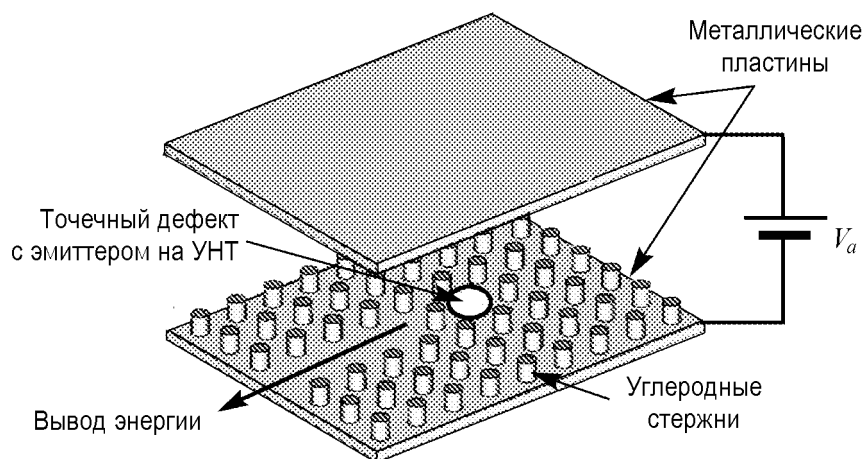


Рис. 1. Схема диода с автоэмиссионным катодом и фотонно-кристаллическим резонатором

Диод состоит из двух металлических пластин – катода и анода, между которыми прикладывается напряжение смещения. На поверхности катода в центре резонатора помещается автоэлектронный эмиттер. Следуя [7, 8], считаем, что эмиттер представляет собой пленку из углеродных нанотрубок (УНТ).

Отметим, что аналогичные по принципу действия приборы предлагались и ранее (см., например, [9–11]). Однако конструкция, использующая фотонно-кристаллический резонатор, представляется весьма удобной по сравнению с обычным металлическим объемным резонатором, поскольку диэлектрические стержни, образующие боковые стенки резонатора, одновременно служат изолятором, и источник анодного напряжения может быть подключен непосредственно к катодной и анодной пластинам [7, 8]. Современные технологии позволяют изготавливать фотонно-кристаллические резонаторы миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн, обладающие высокой добротностью. В последние годы активно изучается возможность создания колебательных и волноведущих систем на основе фотонных кристаллов для различных СВЧ-приборов: гиротронов, отражательных клистронов, ламп бегущей волны и т.д. [12–16].

В настоящей работе проводится теоретический анализ генератора, предложенного в работах [7, 8]. Проведен анализ условий самовозбуждения генератора в приближении малого сигнала. Разработана численная модель генератора, основанная на нестационарном уравнении возбуждения резонатора и методе «частиц в ячейке» для моделирования динамики электронного потока. Проведено численное моделирование процессов установления колебаний, результаты которого показывают возможность достижения достаточно высоких значений выходной мощности и электронного КПД.

1. Условия самовозбуждения генератора

Линейная теория диода с автоэмиссионным катодом развивалась в ряде работ (см., например, [10, 11]). Следуя этим работам, считаем, что между катодом и анодом приложено постоянное напряжение V_a и высокочастотное напряжение $V_1 \exp(i\omega t)$,

тогда уравнение движения электрона без учета сил пространственного заряда запишется следующим образом:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{e}{md} (V_a + \operatorname{Re}(V_1 e^{i\omega t})). \quad (1)$$

Здесь v , e и m – скорость, заряд и масса электрона, соответственно; d – расстояние между катодом и анодом. В приближении малого сигнала ($\xi = V_1/V_a \ll 1$) после интегрирования уравнения движения стандартными методами можно получить выражение для мощности взаимодействия электронов с высокочастотным полем резонатора

$$P_e = P_0 |\xi|^2 (GF_1(\varphi) + F_2(\varphi)), \quad (2)$$

где $P_0 = I_a V_a$ – постоянная мощность электронного пучка, $G = (V_a/I_a) (dI/dV)|_{V_a}$ – нормированная крутизна вольт-амперной характеристики диода, $\varphi = 2\omega d/v_a$ – угол пролета электронов, $v_a = \sqrt{2eV_a/m}$ – скорость, с которой электроны достигают анода, а функции $F_{1,2}$ определяются выражениями

$$F_1(\varphi) = \frac{(1 + i\varphi)e^{-i\varphi} - 1}{\varphi^2}, \quad (3)$$

$$F_2(\varphi) = \frac{2(1 - e^{-i\varphi}) - i\varphi(1 + e^{-i\varphi})}{\varphi^2}. \quad (4)$$

Функция $F_1(\varphi)$ отвечает вкладу модуляции эмиссии, функция $F_2(\varphi)$ – вкладу инерционной группировки электронов за счет скоростной модуляции (так называемый монотронный эффект). Эти функции хорошо известны в СВЧ-электронике (см., например, [17, 18]). Графики действительных и мнимых частей этих функций приведены на рис. 2. Области, в которых действительные части $F_{1,2}(\varphi)$ отрицательны, соответствуют передаче энергии электронного потока высокочастотному полю резонатора ($\operatorname{Re} P_e < 0$). При достаточно больших значениях нормированной проводимости G эффект модуляции эмиссии доминирует. При этом оптимальным будет угол пролета, при котором функция $F_1(\varphi)$ достигает минимума, $\varphi \approx 4\pi/3$. Если $G \ll 1$, доминирующим становится монотронный эффект и оптимальный угол пролета соответствует минимуму функции $F_2(\varphi)$, $\varphi \approx 2.4\pi$.

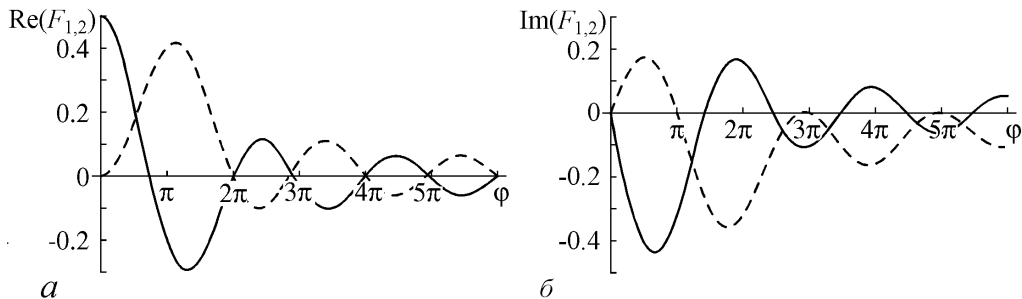


Рис. 2. Действительные (а) и мнимые (б) части функций F_1 (сплошная линия) и F_2 (пунктир) в зависимости от угла пролета $\varphi = 2\omega d/v_0$

Далее подставим выражение (2) в уравнение возбуждения резонатора, которое в энергетической форме имеет вид (см., например, [18, 19])

$$\frac{dW}{dt} + \left[2i(\omega - \omega_0) + \frac{\omega_0}{Q} \right] W = -P_e, \quad (5)$$

где $W = V_a^2 \xi^2 / (2\omega_0 Z_0)$ – энергия электромагнитного поля; ω_0 , Q и Z_0 – собственная частота, добротность и характеристическое сопротивление резонатора, соответственно; ω – частота генерации. В стационарном режиме ($dW/dt = 0$), разделяя действительную и мнимую части, можно получить выражения для стартового тока и частоты генерации

$$I_a = -\frac{V_a}{2QZ_0 \operatorname{Re} [GF_1(\varphi) + F_2(\varphi)]}, \quad (6)$$

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{Z_0 I_a \operatorname{Im} [GF_1(\varphi) + F_2(\varphi)]}{V_a} \right). \quad (7)$$

Заметим, что (7) является трансцендентным уравнением относительно ω , поскольку угол пролета φ , в свою очередь, зависит от частоты. Однако, если считать, что безразмерный параметр возбуждения $\varepsilon \equiv I_a Z_0 / V_a \ll 1$, можно в первом приближении получить следующее выражение для частоты генерации:

$$\omega \approx \omega_0 \left(1 + \frac{1}{2Q} \frac{\operatorname{Im} [GF_1(\varphi_0) + F_2(\varphi_0)]}{\operatorname{Re} [GF_1(\varphi_0) + F_2(\varphi_0)]} \right), \quad (8)$$

где $\varphi_0 = 2\omega_0 d / v_a \approx \varphi$.

Оценим стартовый ток генератора, параметры которого приведены в таблице. Они примерно соответствуют параметрам устройства, описанного в [8]. Считаем, что вольт-амперная характеристика автоэмиссионного катода подчиняется закону Фаулера–Нордгейма

$$I(V) = a_{\text{FN}} V^2 \exp\left(-\frac{b_{\text{FN}}}{V}\right) \quad (9)$$

при $V > 0$, где a_{FN} , b_{FN} – постоянные, зависящие от формы и материала эмиттера (подробнее см. [1]). Отсюда находим, что $G = 2 + b_{\text{FN}}/V$. Для автоэмиссионного катода из УНТ, описанного в [8], при напряженности поля на поверхности

катода $E_0 = 5$ МВ/м, что соответствует анодному напряжению 10 кВ, находим, что $G = 5$. В этом случае модуляция эмиссии доминирует над скоростной модуляцией. Тогда оптимальное значение статического угла пролета $\varphi_0 \sim 4\pi/3$, при этом $-\operatorname{Re} [F_1(\varphi_0)] \sim \sim 0.25 \dots 0.3$, так что условие самовозбуждения (6) можно переписать в виде

$$\varepsilon Q G \approx -\frac{1}{2 \operatorname{Re} F_1(\varphi_0)} \sim 2. \quad (10)$$

Параметры генератора

Расстояние между катодом и анодом d , мм	2
Поперечные размеры резонатора, мм	20
Ускоряющее напряжение, кВ	10
Частота резонатора, ГГц	10
Волновое сопротивление, Ом	36
Добротность резонатора	1000

Отсюда для параметров, приведенных в таблице, находим, что минимальный стартовый ток $I_{st} \sim 110\text{мА}$.

На рис. 3 представлены границы самовозбуждения на плоскости параметров (φ_0, ε) для первых двух зон генерации. Сплошной и пунктирной линиями показаны теоретические кривые, построенные с учетом и без учета скоростной модуляции электронов, соответственно. Видно, что различие между этими кривыми в первой зоне невелико, так что для оценки стартового тока в первом приближении можно пренебречь функцией $F_2(\varphi)$ в формуле (6). Кружками на этом рисунке показаны результаты численного моделирования, которые полностью согласуются с теоретическими при учете скоростной модуляции.

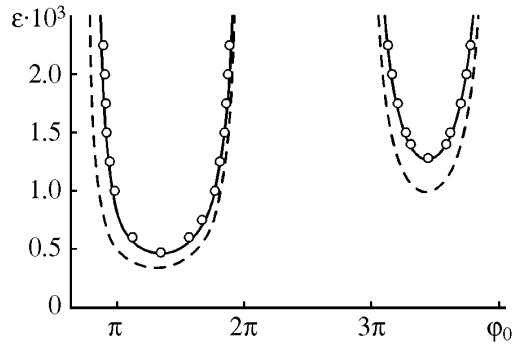


Рис. 3. Зависимость безразмерного параметра возбуждения $\varepsilon = I_a Z_0 / V_a$, при котором происходит самовозбуждение генератора, от угла пролета

2. Методика и результаты численного моделирования

Для моделирования процесса взаимодействия электронного потока с полем объемного резонатора была разработана программа, основанная на использовании нестационарной теории возбуждения резонаторов [19,20] и известного метода «частиц в ячейке» (см., например, [21]), который хорошо зарекомендовал себя в электронике СВЧ и физике плазмы. Аналогичная методика ранее с успехом использовалась при моделировании нестационарных явлений в других приборах СВЧ-электроники с колебательными системами резонансного типа, в частности, в отражательном клистроне [22] и лампе бегущей волны с цепочкой связанных резонаторов [23].

Продольная компонента напряженности высокочастотного поля резонатора представляется в виде $E(x, y, z, t) = \mathcal{E}(t) E_s(x, y, z)$, где $\mathcal{E}(t)$ – безразмерная амплитуда, а функция E_s , задающая распределение поля в пространстве, соответствует моде ТМ₁₁₀:

$$E_s = \frac{V_a}{d} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right).$$

Амплитуда $\mathcal{E}(t)$ подчиняется нестационарному уравнению возбуждения резонатора [19,20]

$$\frac{d^2 \mathcal{E}}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{d\mathcal{E}}{dt} + \omega_0^2 \mathcal{E} = -\frac{1}{N_s} \frac{d}{dt} \int_V j_z E_s dV, \quad (11)$$

где $N_s = \varepsilon_0 \int E_s^2 dV$ – норма колебания, j_z – продольная составляющая плотности тока пучка. Удобно ввести новую переменную $A(t)$, такую что $\mathcal{E} = -(1/\omega_0)(dA/dt)$, то есть A фактически есть безразмерная амплитуда векторного потенциала. Движение электронов будем считать одномерным, а поперечные размеры пучка достаточно небольшими, чтобы зависимостью тока от поперечных координат можно было пре-

небречь. Тогда уравнение (11) принимает вид

$$\frac{d^2 A}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{dA}{dt} + \omega_0^2 A = \frac{\omega_0}{N_s} \int_0^d I(z, t) E_s dz, \quad (12)$$

где I – ток пучка. Уравнение возбуждения (12), как и уравнения движения электронов, решается при помощи известной схемы с перешагиванием второго порядка точности [21].

Аналогично [10,11] граничные условия для электронов ставились следующим образом: скорости «крупных частиц», вылетающих с катода, полагались нулевыми, а заряды определялись исходя из закона эмиссии (9): $q_i = I(E(z=0; t_i)) \Delta t$, где $E(z=0; t_i)$ – поле на катоде в момент вылета i -й частицы, Δt – интервал времени между вылетом двух соседних частиц.

Расчеты показывают, что условия самовозбуждения автоколебаний в точности совпадают с найденными теоретически с учетом вклада скоростной модуляции (см. рис. 3). Минимальное значение стартового тока в центре первой зоны генерации составляет 129 мА, что несколько выше оценки, сделанной в разд. 1 в пренебрежении скоростной модуляцией. Зафиксируем параметры резонатора такими, чтобы оптимальный угол пролета соответствовал напряжению 10 кВ, и будем постепенно увеличивать анодное напряжение. На рис. 4 представлены графики электронной мощности взаимодействия и электронного КПД в зависимости от анодного напряжения. Мощность определялась по формуле $P = \mathcal{V}^2 / (2QZ_0)$, где \mathcal{V} – амплитуда колебаний высокочастотного напряжения, которая выделялась при помощи преобразования Гильберта [24]. С увеличением напряжения мощность и КПД вначале растут, поскольку увеличивается ток катода (причем как постоянная, так и переменная составляющая, поскольку крутизна вольт-амперной характеристики растет с увеличением V_a).

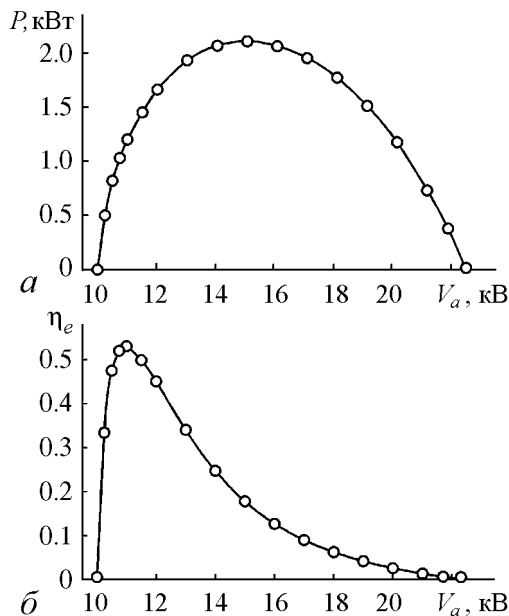


Рис. 4. Зависимость электронной мощности (а) и электронного КПД (б) от анодного напряжения

Однако угол пролета с ростом напряжения уменьшается и смещается от центра зоны генерации. Соответственно, наступает насыщение, затем снижение мощности и КПД. Наконец, когда мы выходим из зоны генерации, мощность и КПД обращаются в нуль. Типичное время установления колебаний составляет несколько микросекунд. Частота колебаний зависит от анодного напряжения (см. формулы (7), (8)), однако ее отличие от собственной частоты не превышает 0.2 %, что объясняется высокой добротностью резонатора.

Отметим, что при выбранных параметрах зона генерации является достаточно широкой по напряжению, а максимальные значения мощности и электронного КПД оказываются весьма высокими: $P \sim 2$ кВт, $\eta_e \sim 53\%$. При

этом ток катода не превышает 1 А. Если считать, что размеры эмитирующей УНТ-пленки составляют 1×1 см, то плотность тока не превышает 1 А/см^2 . Такие значения плотности тока представляются вполне достижимыми для существующих катодов на УНТ [25,26].

Заключение

Представленные результаты численного моделирования показывают, что генератор на основе диода с автоэмиссионным катодом, помещенного в фотонно-кристаллический резонатор, является достаточно перспективным прибором. Он позволяет рассчитывать на получение достаточно высоких значений мощности и КПД в сантиметровом диапазоне при умеренных плотностях токов порядка 1 А/см^2 , достижимых для существующих в настоящее время автоэмиссионных катодов [25,26]. Однако большинство полученных в настоящее время результатов относятся к катодам малого размера, где полный ток эмиссии также невелик (порядка единиц или десятков мА). С другой стороны, известно, что катоды на углеродных нанотрубках при работе в импульсном режиме и при высоких напряжениях порядка сотен киловольт способны в принципе обеспечивать большие токи порядка 1 кА [27].

Тем не менее следует отметить, что к представленным в работе количественным характеристикам генератора следует относиться с определенной осторожностью, так как используемая численная модель получена при ряде упрощающих предположений. Не учитывалась неоднородность электрического поля вблизи эмитирующей поверхности, влияние сил пространственного заряда, поперечное движение электронов. Все эти факторы будут снижать эффективность взаимодействия [10,11]. Их учет будет являться предметом дальнейшей работы. Также открытым остается вопрос о возможности продвижения в область более высоких частот, поскольку по мере уменьшения размеров резонатора и анодного напряжения повышаются требования к характеристикам катода.

Автор выражает благодарность профессору кафедры нелинейной физики, д.ф.-м.н. Рыскину Н.М. за поддержку и полезное обсуждение работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 11-02-01280а.

Библиографический список

1. Трубецков Д.И., Рожнев А.Г., Соколов Д.В. Лекции по сверхвысокочастотной вакуумной микроэлектронике. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 1996.
2. Ives R.L. Microfabrication of high-frequency vacuum electron devices // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. Vol. 32, № 3. P. 1277.
3. 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 // Phys. Plasmas. 2002. Vol. 9, № 9. P. 4020.
4. Han S.-T., Jeon S.-G., Shin Y.-M., Jang K.-H., So J.-K., Kim J.-H., Chang S.-S., Park G.-S. Experimental investigations on miniaturized high-frequency vacuum electron devices // IEEE Trans. Plasma Sci. 2005. Vol.33, № 2. P. 679.

5. *Srivastava V.* THz vacuum microelectronic devices // *J. Phys.: Conf. Series.* 2007. Vol. 114, № 1. 012015.
6. *Ryskin N.M., Han S.-T., Jang K.-H., Park G.-S.* Theory of the microelectronic traveling wave klystron amplifier with field-emission cathode array // *Phys. Plasmas* 2007. Vol. 14, № 9, 093106.
7. *Han S.-T.* A high-frequency monotron employing two-dimensional, dielectric photonic-crystal, diode resonator // 35th Int. Conf. Infrared Millim. Terahertz Waves (IRMMW-THz). Rome, Italy, 2010.
8. *Han S.-T.* Numerical study on radio-frequency field emission from carbon nanotube film in a photonic crystal diode resonator // *J. Korean Phys. Soc.* 2011. Vol. 59, № 1. P. 141.
9. *Yokoo K., Ishihara T.* Field emission monotron for THz emission // *Int. J. Infrared Millim. Waves.* 1997. Vol. 18, № 6. P. 1151.
10. *Солнцев В.А., Галдецкий А.В., Клеев А.И.* Приборы вакуумной СВЧ микроэлектроники со средним углом пролета // Лекции по СВЧ электронике и радиофизике. 10-я зимняя школа-семинар. Кн. 1, Ч. I. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 1996. С. 76.
11. *Солнцев В.А.* Нелинейные явления в вакуумных микроэлектронных структурах // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика.* 1998. Т. 6, № 1. С. 54.
12. *Sirigiri J.R., Kreischer K.E., Machuzak J., Mastovsky I., Shapiro M.A., Temkin R.J.* Photonic-band-gap resonator gyrotron // *Phys. Rev. Lett.* 2001. Vol. 86, № 24. P. 5628.
13. *Jeon S.-G., Shin Y.-M., Jang K.-H., Han S.-T., So J.-K., Joo Y.-D., Park G.-S.* High order mode formation of externally coupled hybrid photonic-band-gap cavity // *Appl. Phys. Lett.* 2007. Vol. 90, № 2. 021112.
14. *Jang K.-H., Jeon S.-G., Kim J.-I., Won J.-H., So J.-K., Bak S.-H., Srivastava A., Jung S.-S., Park G.-S.* High order mode oscillation in a terahertz photonic-band-gap multibeam reflex klystron // *Appl. Phys. Lett.* 2008. Vol. 93, № 21. 211104.
15. *Liu X., Lei H., Yu T., Feng J., Liao F.* Characteristics of terahertz slow-wave system with two-dimensional photonic band-gap structure // *Optics Communications.* 2008. Vol. 281, № 1. P. 102.
16. *Gong Y., Yin H., Wei Y., Yue L., Deng M., Lu Zh., Xu X., Wang W., Liu P., Liao F.* Study of traveling wave tube with folded-waveguide circuit shielded by photonic crystals // *IEEE Trans. Electron Devices.* 2010. Vol. 57, № 5. P. 1137.
17. *Шевчик В.Н.* Основы электроники сверхвысоких частот. М.: Сов. радио, 1959.
18. *Гайдук В.И., Палатов К.И., Петров Д.М.* Физические основы электроники сверхвысоких частот. М.: Сов. радио, 1971.
19. *Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М.: Сов. радио, 1973.
20. *Шевчик В.Н., Трубецков Д.И.* Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. М.: Сов. радио, 1970.
21. *Бэдсел Ч., Ленгдон А.* Физика плазмы и численное моделирование / Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1989.

22. *Титов В.Н., Волков Д.В., Яковлев А.В., Рыскин Н.М.* Отражательный клистрон как пример автоколебательной системы с запаздыванием // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2010. Т. 18, № 6. С. 138.
23. *Ryskin N.M., Titov V.N., Yakovlev A.V.* Nonstationary nonlinear discrete model of a coupled-cavity traveling-wave-tube amplifier // IEEE Trans. Electron Devices. 2009. Vol. 56, № 5. P. 928.
24. *Вайнштейн Л.А., Вакман Д.Е.* Разделение частот в теории колебаний и волн. М.: Наука, 1983.
25. *Milne W.I., Teo K.B.K., Minoux E., et al.* Aligned carbon nanotubes/fibers for applications in vacuum microwave amplifiers // J. Vac. Sci. Technol. B. 2006. Vol. 24, № 1. P. 345.
26. *Calderon-Colon X., Geng H., Gao D., An L., Cao G., Zhou O.* A carbon nanotube field emission cathode with high current density and long-term stability // Nanotechnology. 2009. Vol. 20, 325707.
27. *Shiffler D., Zhou O., Bower C., LaCour M., Golby K.* A high-current, large-area, carbon nanotube cathode // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. Vol. 32, № 5. P. 2152.

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Поступила в редакцию 22.02.2012

NUMERICAL SIMULATION OF THE FIELD EMISSION DIODE OSCILLATOR WITH PHOTONIC CRYSTAL RESONATOR

A.V. Benedik

Results of the theoretical analysis of the diode oscillator with a field-emission cathode placed in a photonic crystal resonator are considered. The analysis of conditions of self-excitation in the small signal approximation is carried out. The nonstationary numerical model of the oscillator based on the nonstationary equation of excitation of the resonator and the particle-in-cell method is developed. Numerical simulation of the processes of oscillation build-up is performed. The simulation shows rather high output power and efficiency for reasonable values of cathode current density.

Keywords: Vacuum microelectronics, field emission, photonic crystal resonator, particle-in-cell simulation.



Бенедик Андрей Иванович – родился в городе Мукачево Западной Украины (1990). Окончил Лицей прикладных наук Саратова (2008). Студент 4-го курса факультета нелинейных процессов Саратовского государственного университета. Область научных интересов – численное моделирование нелинейных явлений в приборах вакуумной СВЧ-электроники.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: andrej-benedik@yandex.ru