



РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА

А. И. Бенедик

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Представлены результаты электродинамического моделирования фотонно-кристаллического резонатора для диодного генератора с автоэмиссионным катодом при помощи современных программных пакетов расчета СВЧ-структур. Резонатор образован удалением центрального элемента в периодической двумерной фотонно-кристаллической решетке из диэлектрических стерженьков. Снаружи фотонно-кристаллическая структура окружена металлическим экраном, на торцевых стенках которого в центре дефекта расположены катод и анод. Результаты моделирования показали, что добротность резонатора, в первую очередь, определяется омическими потерями в анодной и катодной пластинах металлического экрана. Путем вариации конструкции вывода ВЧ-энергии можно менять нагруженную добротность резонатора в широких пределах, что позволяет оптимизировать выходную мощность и КПД генератора.

Ключевые слова: Вакуумная микроэлектроника, фотонно-кристаллический резонатор, диодный генератор, нагруженная добротность.

Введение

Одним из перспективных направлений современной вакуумной электроники является освоение терагерцового диапазона частот, представляющего большой интерес для широкого круга фундаментальных и прикладных исследований в области физики, химии, биологии и медицины. В последние годы в связи с развитием технологии и разработкой новых искусственных материалов с необычными электродинамическими свойствами появилась возможность создания приборов – миниатюрных аналогов существующих вакуумных СВЧ-приборов, работающих в терагерцовом диапазоне [1–3]. В частности, для таких приборов относительно недавно была выдвинута идея использования фотонных кристаллов (ФК) в качестве электродинамических структур ввиду чрезвычайной сложности изготовления миниатюрных объемных резонаторов и замедляющих систем. ФК представляет собой искусственную периодическую структуру, в которой естественным образом существуют разрешенные и запрещенные зоны. Если в такой структуре сделать дефект, то волны, попадающие в запрещенную зону, смогут распространяться в дефекте, а стенки

ФК-структуры будут являться для них идеальными отражателями. Использование ФК-структур позволяет уменьшить омические потери, а также облегчает селекцию типов колебаний, так как фотонный кристалл можно сконструировать таким образом, чтобы в область запрещенной зоны не попадали частоты наиболее опасных паразитных мод. Современные технологии позволяют изготавливать фотонно-кристаллические резонаторы миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн, обладающие высокой добротностью.

Предлагалось использовать подобные структуры для giroприборов [4–8], отражательных клистронов [9–11], ЛБВ [12,13], ускорительных структур [14, 15]. В работах [16, 17] была предложена модель диодного генератора, помещенного в фотонно-кристаллический резонатор. На рис. 1 представлена схема генератора. Высокодобротный резонатор образован точечным дефектом в двумерной ФК-решетке из диэлектрических стерженьков. Резонатор спроектирован таким образом, чтобы рабочим типом колебаний являлась мода TM_{110} , частота которой лежит в полосе непропускания ФК-структуры. Вывод СВЧ-энергии представлен линейным дефектом в фотонном кристалле (ФК-волновод), соединенным с обыкновенным прямоугольным металлическим волноводом. Вся ФК-структура окружена металлическим экраном. На нижней и верхней пластинах металлического экрана в центре ФК-резонатора расположены катод и анод, соответственно. В качестве источника электронов предполагается использовать автоэмиссионные катоды, к достоинствам которых, в первую очередь, стоит отнести эффективную модуляцию эмиссии из-за сильной зависимости эмиссионного тока от поля на катоде. Также важными преимуществами автоэмиссионных катодов являются безынерционность, то есть практически мгновенная готовность прибора к работе, отсутствие необходимости использования подогревательного элемента, потенциальное уменьшение размеров и массы прибора.

В работах [18, 19] развита линейная теория диодного генератора с автоэмиссионным катодом и представлены результаты численного моделирования генератора X-диапазона. В настоящей работе приводятся методика и результаты численного анализа электродинамических параметров ФК-резонатора представленного генератора при помощи современных пакетов электродинамического моделирования.

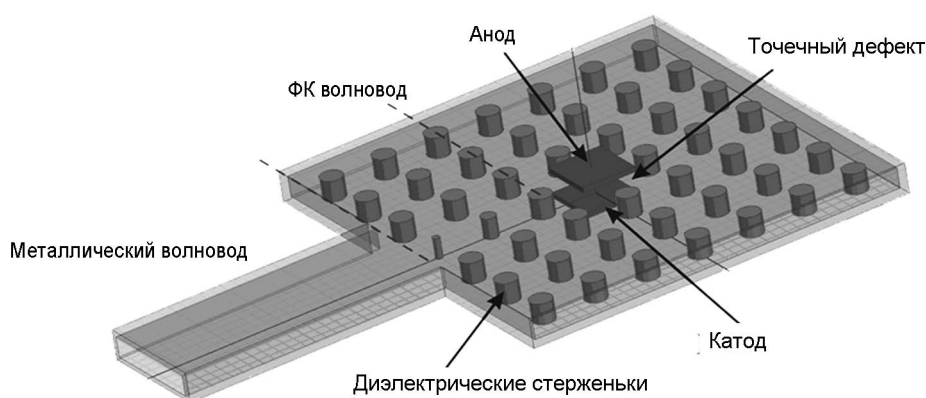


Рис. 1. Схема диодного генератора с автоэмиссионным катодом, помещенного в фотонно-кристаллический резонатор

1. Фотонно-кристаллическая структура

Как уже отмечалось, под ФК понимают искусственную периодическую структуру, обладающую полными запрещенными зонами, то есть электромагнитные волны определенных длин волн, падающие под любым углом к поверхности кристалла, не могут распространяться в такой структуре ни в каком направлении. При помощи свободно распространяемого пакета программ MIT Photonic-Bands (MPB) [20] были проведены расчеты границ первой запрещенной зоны для двумерной квадратной решетки с периодом Λ , в узлах которой находятся круглые диэлектрические стерженьки радиуса r (рис. 2). В соответствии с [17], предполагалось, что стерженьки изготовлены из алуминооксидной керамики с диэлектрической проницаемостью $\text{Re}(\epsilon) = 9.85$, $\text{Im}(\epsilon) < 0.001$. На рис. 3 представлены результаты расчетов дисперсионных характеристик ТМ-мод фотонного кристалла для различных значений радиусов стерженьков r . Как видно из рисунка, ТМ-моды электромагнитного поля обладают запрещенной зоной, которая лежит между первой и второй ветвями дисперсионной характеристики. В результате расчетов размеры ФК-структуры бы-

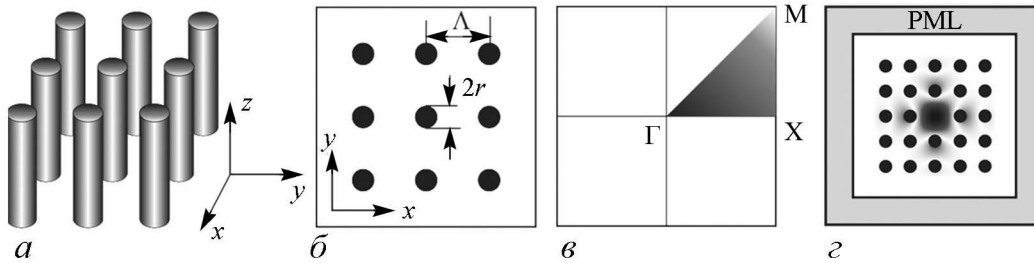


Рис. 2. *a* – трехмерная периодическая в направлении осей x и y , однородная вдоль оси z ФК-структура (предполагается, что цилиндры имеют бесконечную высоту). *b* – геометрия системы с квадратной решеткой (фрагмент бесконечной системы), темная область – $\epsilon = 9.85$, белая – $\epsilon = 1$. *в* – первая зона Бриллюэна для двумерной квадратной решетки; буквами Γ , M и X обозначены вершины неприводимой зоны Бриллюэна (серая область на рисунке) в пространстве обратных векторов решетки. *г* – двумерная модель фотонно-кристаллического резонатора и пространственное распределение поля, соответствующее моде TM_{110} ; по периметру ФК-структура окружена идеально согласованными поглощающими стенками (PML)

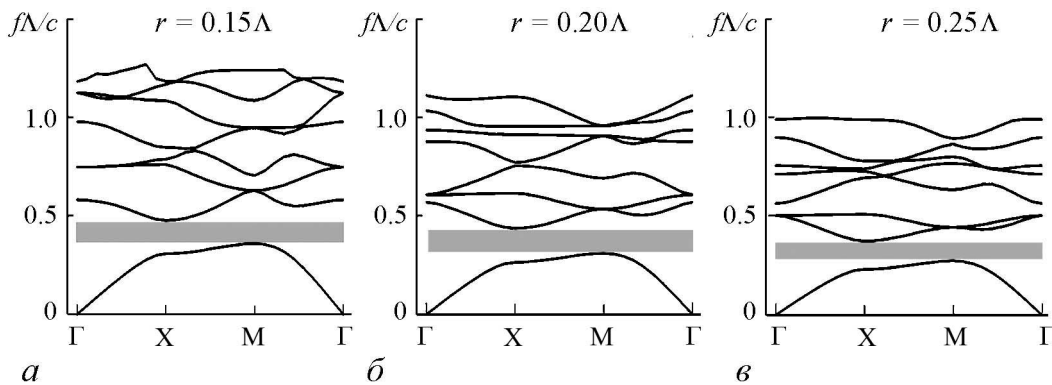


Рис. 3. Дисперсионная диаграмма ТМ-мод, построенная для системы с квадратной решеткой при различных значениях радиусов стерженьков r . По оси абсцисс отложены значения координат волнового вектора в пространстве векторов обратной решетки, соответствующие вершинам (Γ, X, M) неприводимой зоны Бриллюэна (см. рис. 2, *в*). Серым цветом показана область частот, в которой не могут распространяться ТМ-моды электромагнитного поля

ли выбраны таким образом, чтобы запрещенная зона приходилась на X-диапазон: $\Lambda = 1$ см, $r = 2$ мм. Для повышения частотного диапазона в n раз необходимо уменьшить в n раз все геометрические размеры ФК-структуры.

2. Расчет электродинамических характеристик ненагруженного ФК-резонатора

Первоначально была рассмотрена двумерная модель ФК-резонатора (рис. 2, z): вдоль оси z фотонно-кристаллическая структура предполагалась однородной; высокодобротный резонатор образован точечным дефектом в диэлектрической решетке, а боковые стенки резонатора образованы N рядами диэлектрических стерженьков. Чтобы исключить отражения от границ расчетной области, с боков ФК-структура была окружена идеально согласованными поглощающими стенками – perfectly matched layers (PML).

При помощи свободно распространяемого программного пакета MIT Electromagnetic Equation Propagation (MEEP) [21] был проведен расчет собственных частот и добротностей возбуждаемых мод ФК-резонатора. На рис. 4, a представлена зависимость собственной добротности резонатора от толщины стенки ФК (числа рядов диэлектрических стерженьков). Собственная добротность такого резонатора определяется омическими потерями в диэлектрических стерженьках ($\text{Im}(\varepsilon) = 0.001$) и дифракционными потерями, то есть потерями за счет «вытекания поля» из области дефекта ФК-структуры в область слоев PML:

$$1/Q_0 = 1/Q_{\text{ом}} + 1/Q_{\text{диф}},$$

где Q_0 , $Q_{\text{ом}}$, $Q_{\text{диф}}$ – собственная, омическая и дифракционная добротности, соответственно.

С ростом числа рядов диэлектрических стерженьков в боковой стенке резонатора дифракционные потери уменьшаются, так как поле лучше локализуется в области точечного дефекта, а потери в диэлектрике остаются практически постоянными. В результате собственная добротность Q_0 растет, стремясь к некоторому пределу $Q_{\text{ом}} \sim 32000$. Собственная частота возбуждаемой моды TM_{110} составила $f_0 \approx 11.626$ ГГц.

При расчетах в пакете программ High Frequency System Simulator (HFSS) [22] рассматривалась трехмерная модель ФК-резонатора с высотой диэлектрических стерженьков $d = 2$ мм, окруженная металлическим экраном из меди с конечной проводимостью $\sigma = 20 \cdot 10^6$ См/м. Диэлектрическая проницаемость оксидной керамики полагалась равной $\varepsilon = 9.8$, а тангенс диэлектрических потерь – $\text{tg} \delta = 0.001$, что примерно соответствует керамике, используемой на предприятиях радиоэлектронной промышленности в России. Как видно, диэлектрические потери данной керамики в 10 раз больше диэлектрических потерь керамики, описанной в [17], что должно привести к значительному уменьшению собственной добротности ФК-резонатора. Однако результаты 3D моделирования в пакете HFSS показали, что добротность резонатора, окруженного металлическим экраном, в первую очередь, определяется не диэлектрическими потерями в стерженьках, а омическими потерями в катод-

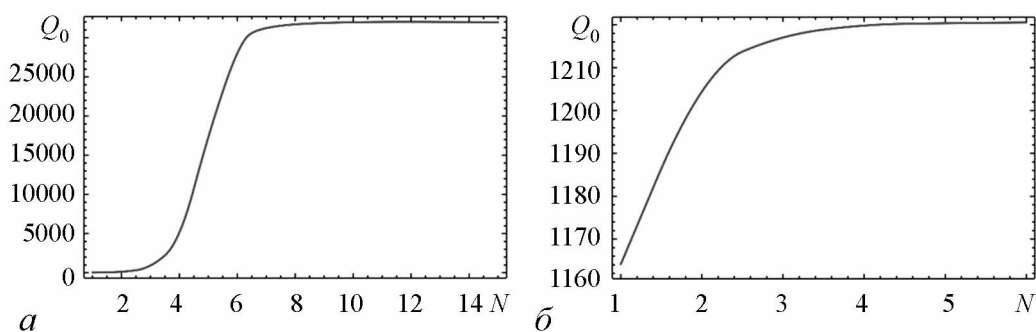


Рис. 4. Зависимость собственной добротности ФК-резонатора с идеально согласованными поглощающими стенками (а) и резонатора с металлическим экраном (б) от числа рядов диэлектрических стерженьков в ФК-стенке

ной и анодной пластинах. До боковых стенок экрана поле практически не доходит. На рис. 4, б представлена зависимость собственной добротности ФК-резонатора с металлическим экраном от толщины ФК-стенки резонатора. Для резонатора с ФК-решеткой приемлемого размера – 7x7 стерженьков, которую можно реализовать технологически, ненагруженная добротность составляет порядка $Q_0 \approx 1217$, собственная частота $f_0 \approx 11.686$ ГГц.

Расчет волнового сопротивления резонатора проводился при помощи калькулятора поля – подпрограммы постпроцессорной обработки в HFSS. На оси системы волновое сопротивление определяется формулой

$$Z_0 = \frac{E_0^2 d^2}{\omega_0 \varepsilon_0 N_s},$$

где E_0 – поле на оси системы, d – ширина зазора резонатора, $\omega_0 = 2\pi f_0$ – круговая частота возбуждаемой моды колебаний, ε_0 – диэлектрическая постоянная, $N_s = \int_V E(x, y, z)^2 dV$ – норма колебаний. Вычисления показали, что волновое сопротивление на оси и волновое сопротивление, усредненное по сечению пучка (1×1 см²), составляют 30.3 и 24.6 Ом, соответственно.

3. Методика расчета добротности нагруженного ФК-резонатора

Подпрограмма анализа собственных колебаний и собственных волн, реализуемая в пакете HFSS, не позволяет провести расчет электродинамических характеристик нагруженного резонатора, так как вывод энергии будет восприниматься как еще один связанный резонатор. В работе [14] описана методика расчета фотонно-кристаллического резонатора с выводом энергии. Для расчета нагруженной добротности необходимо провести расчет S-параметров при помощи подпрограммы Modal, позволяющей проводить анализ многополюсников с многомодовыми портами, идеально согласованными с нагрузкой (то есть нагруженными полубесконечными волноводами).

Рассмотрим обыкновенный металлический резонатор с одним вводом-выводом энергии (рис. 5, а). Пусть $P_{вх}$ – входная мощность, поступающая в резонатор от внешнего источника, $\Gamma = E_{отр}/E_{пад}$ – коэффициент отражения, то есть отношение

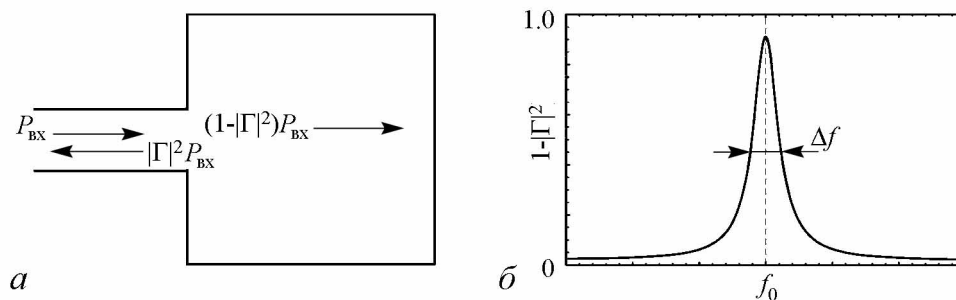


Рис. 5. Схема резонатора с одним вводом-выводом энергии (а) и качественная амплитудно-частотная характеристика (б)

амплитуд отраженной ($E_{отр}$) и падающей ($E_{пад}$) волн, что по сути есть параметр S_{11} . Тогда отраженная мощность $P_{отр} = |\Gamma|^2 P_{вх}$, а мощность колебаний в резонаторе $P_{кол} = (1 - |\Gamma|^2) P_{вх}$. Построив зависимость коэффициента $(1 - |\Gamma|^2)$ от частоты, мы получим резонансную кривую (рис. 5, б). Нагруженная добротность резонатора определяется выражением

$$Q_{нагр} = f_0 / \Delta f,$$

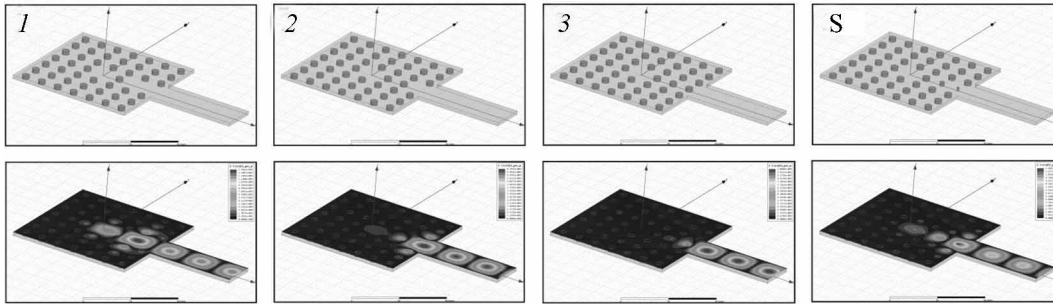
где f_0 – резонансная частота, Δf – полоса частот, взятая на половинном уровне мощности.

При численных расчетах нагруженной добротности ФК-резонатора рассматривались варианты, когда перед металлическим прямоугольным волноводом располагаются один, два и три одинаковых стерженька, либо «согласованный» ФК-волновод – 3 стерженька с линейно уменьшающимися радиусами (рис. 6). На рис. 7 представлены резонансные кривые рассматриваемых конструкций. Соответствующие значения добротностей указаны в таблице. Для проверки результатов рассматривались также конструкции резонаторов с двумя симметричными выводами ВЧ-энергии. Как и следовало ожидать, внешняя добротность резонаторов $Q_{вн} = Q_0 Q_{нагр} / (Q_0 - Q_{нагр})$ с двумя выводами энергии оказалась в два раза меньше добротности резонаторов с одним выводом. Таким образом, результаты расчетов показывают, что путем вариации конструкции вывода ВЧ-энергии нагруженную добротность можно менять в широких пределах, что дает возможность получить приемлемую выходную мощность и КПД генератора при умеренных значениях стартового тока.

Таблица

Тип вывода энергии	Конструкции с одним выводом СВЧ-энергии		Конструкции с двумя выводами СВЧ-энергии	
	Нагруженная добротность	Внешняя добротность	Нагруженная добротность	Внешняя добротность
1	81	87	42	43.5
2	429	663	266	340
3	973	4853	806	2387
S	254	321	143	162

Варианты конструкций с одним выводом энергии



Варианты конструкций с двумя выводами энергии

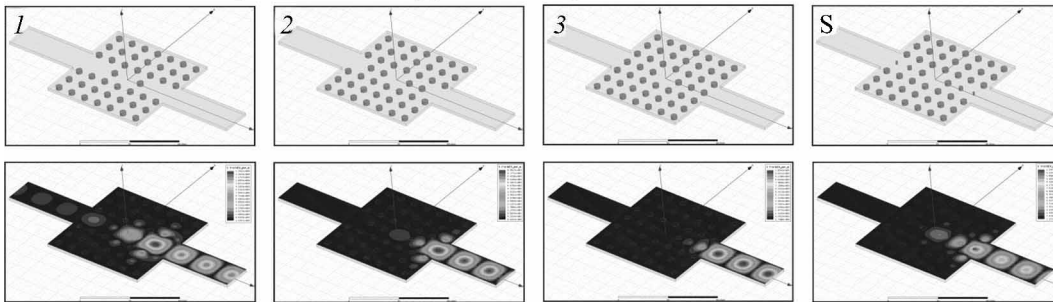


Рис. 6. Варианты конструкций композитного вывода СВЧ-энергии фотонно-кристаллического резонатора и соответствующие распределения электрического поля

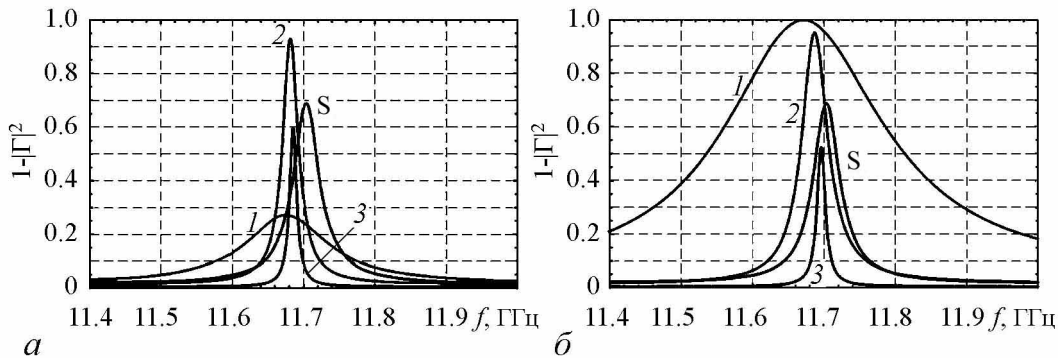


Рис. 7. Резонансные кривые различных конструкций резонаторов с одним (а) и двумя (б) выводами энергии. Кривые 1, 2, и 3 соответствуют случаям, когда перед металлическим выводом энергии стоит один, два или три диэлектрических стерженька, кривая S – «согласованному» фотонно-кристаллическому волноводу (см. рис. 6)

4. Численное моделирование генератора X-диапазона

В работах [18,19] была развита линейная теория диодного генератора с автоэмиссионным катодом, проведен анализ условий самовозбуждения генератора, получены аналитические выражения для оценки стартового тока. Была разработана численная модель взаимодействия электронного потока с высокочастотным полем диода, основанная на использовании нестационарной теории возбуждения резонаторов и методе «частиц в ячейке».

Варьируя нагруженную добротность резонатора, можно оптимизировать выходные характеристики генератора. На рис. 8, а представлена зависимость мак-

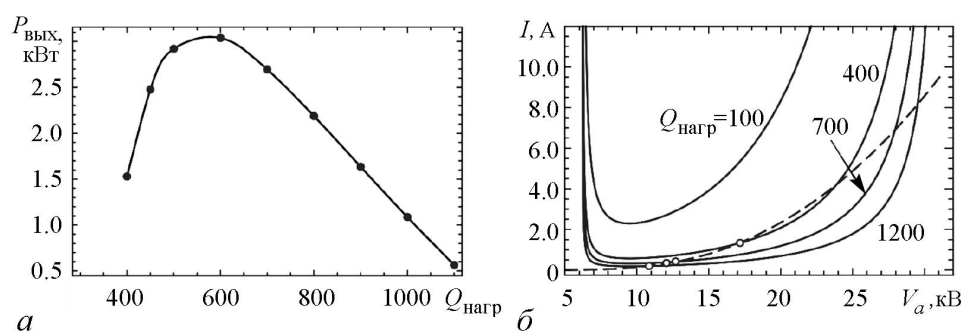


Рис. 8. *a* – зависимость выходной мощности в насыщении от значения нагруженной добротности ФК-резонатора. *б* – первые зоны генерации при различных значениях нагруженной добротности (сплошные линии) на плоскости (V_a, I) и ток эмиссии (пунктирная линия)

симальной выходной мощности генератора от значения нагруженной добротности. Видно, что оптимальная выходная мощность $P_{\text{вых}} \approx 3$ кВт достигается при нагруженной добротности $Q_{\text{нагр}} \approx 600$.

На рис. 8, *б* сплошными линиями показаны границы зон генерации (зависимости стартового тока от анодного напряжения) при различных значениях нагруженной добротности генератора. Пунктирной линией показана вольт-амперная характеристика автокатода, параметры которого взяты из работы [17]. В соответствии с этой работой предполагалось, что в качестве автоэммиттера используется пленка из углеродных нанотрубок. Пересечения этих кривых соответствуют точкам самовозбуждения генератора при различных значениях добротности. Видно, что при уменьшении значения нагруженной добротности стартовый ток растет, и при значении $Q_{\text{нагр}} \approx 300$ происходит срыв генерации.

Таким образом, при проектировании фотонно-кристаллического резонатора необходимо искать компромиссное решение, чтобы снизить стартовый ток и получить приемлемое значение выходной мощности.

Заключение

Представленные результаты электродинамического моделирования показывают, что идея использования фотонно-кристаллических структур в качестве колебательных систем приборов СВЧ-электроники является перспективным направлением. В частности, диэлектрическая ФК-решетка позволяет сконструировать вывод СВЧ-энергии, который достаточно простым способом может быть согласован с нагрузкой. Вариация нагруженной добротности резонатора в широких пределах позволяет получить приемлемое значение выходной мощности при умеренных значениях стартового тока генератора. Так, для представленного диодного генератора X-диапазона при значении нагруженной добротности $Q_{\text{нагр}} = 600$, соответствующей максимальной выходной мощности, плотность стартового тока составляет порядка 0.5 А/см^2 (сечение электронного пучка – $1 \times 1 \text{ см}^2$).

Автор выражает благодарность профессору, заведующему кафедрой нелинейной физики, д.ф.-м.н. Н.М. Рыскину, доценту, старшему научному сотруднику кафедры нелинейной физики А.Г. Рожневу и ассистенту кафедры электроники, колебаний и волн, к.ф.-м.н. А.В. Садовникову за поддержку и полезное обсуждение работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-02-00976.

Библиографический список

1. *Srivastava V.* THz vacuum microelectronic devices // J. Phys.: Conf. Series. 2008. Vol. 114. № 1. 012015.
2. *Ives R.L.* Microfabrication of high-frequency vacuum electron devices // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. Vol. 32, № 3. P. 1277.
3. *Booske J.H., Dobbs R.J., Joye C.D., Kory C.L., Neil G.R., Park G.S., Park J.H., Temkin R.J.* Vacuum electronic high power terahertz sources // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2011. Vol. 1, № 1. P. 54.
4. *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.
5. *Ashutosh, Jain P.K.* Design and analysis of metallic photonic band gap cavity for a gyrotron // Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications. 2012. Vol. 11, № 2. P. 242.
6. *Singh A., Jain P.K.* Multimode analysis and PIC simulation of a metal PBG cavity gyrotron oscillator // Progress in Electromagnetics Research M. 2014. Vol. 39. P. 11.
7. *Joo Y.-D., Park G.-S., Kim D.-H., Kim J.-I., Jeon S.-G., Han S.-T., Jung S.-S., Kim J.-U.* Design of a third-harmonic gyrotron oscillator using a photonic crystal cavity // Japanese Journal of Applied Physics. 2009. Vol. 48. 074502
8. *Nanni E., Lewis S., Shapiro M., Temkin R.* A high gain photonic band gap gyrotron amplifier // Proc. 14th IEEE International Vacuum Electronics Conference. 21–23 May 2013, Paris, France.
9. *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.
10. *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.
11. *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.
12. *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.
13. *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.
14. *Shapiro M.A., Brown W.J., Mastovsky I., Sirigiri J.R., Temkin R.J.* 17 GHz photonic band gap cavity with improved input coupling // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2001. Vol. 4. 042001.
15. *Smirnova E.I., Kesar A.S., Mastovsky I., Shapiro M.A., Temkin R.J.* Demonstration of a 17-GHz, high-gradient accelerator with a photonic-band-gap structure // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 95, № 7. 074801.
16. *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.

17. *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.
18. *Бенедик А.И.* Численное моделирование генератора на основе диода с автоэмиссионным катодом и фотонно-кристаллическим резонатором // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика.* 2012. Т. 20, № 2. С. 63.
19. *Benedik A.I., Ryskin N.M., Han S.T.* Theory and simulation of field emission diode oscillators // *Phys. Plasmas.* 2013. Vol. 20. № 8. 083117.
20. *Johnson S.G., Joannopoulos J.D.* Block-iterative frequency domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis // *Optics Express.* 2001. Vol. 8, № 3. P. 173.
21. *Oskooi A.F., Roundy D., Ibanescu M., Bermel P., Joannopoulos J.D., Johnson S.G.* MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method // *Computer Physics Communications.* 2010. Vol. 181. P. 687–702.
22. High Frequency Structure Simulator (HFSS) of ANSYS. [Online]. Available: <http://www.ansoft.com/products/hf/hfss/>

Поступила в редакцию 27.11.2014

NUMERICAL CALCULATION OF THE ELECTRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE DIODE OSCILLATOR WITH PHOTONIC CRYSTAL RESONATOR

A. I. Benedik

Saratov State University

Design of a diode oscillator with a field-emission cathode placed in a photonic crystal (PC) resonator is described. Results of numerical calculation of basic electrodynamic parameters of the PC resonator are presented. The 3D electrodynamic simulation by using the modern software package HFSS shows that varying the design of the energy output allows control of the loaded Q-factor in a wide range. Selection of the optimal value of the loaded Q-factor provides rather high output power and efficiency for reasonable values of the field-emission cathode current density.

Keywords: Vacuum microelectronics, photonic crystal resonator, diode oscillator, loaded Q-factor.



Бенедик Андрей Иванович – родился в городе Мукачево Закарпатской области, Украина (1990). В 2008 году окончил Лицей прикладных наук г. Саратова и поступил на факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. В 2013 году с отличием защитил диплом по специальности «физика открытых нелинейных систем». Аспирант 2-го года обучения кафедры нелинейной физики СГУ. С 2013 г. также работает инженером АО «НПП «Алмаз», г. Саратов. Область научных интересов включает исследование приборов вакуумной микроэлектроники с автоэмиссионными катодами и фотонно-кристаллическими колебательными системами, численное моделирование нелинейных явлений в приборах вакуумной СВЧ-электроники. Автор ряда публикаций по данным направлениям.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

E-mail: andrej-benedik@yandex.ru