

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «СА-
РАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАР-
СТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

**Новые электродинамические структуры для миниатюрных приборов
вакуумной электроники миллиметрового диапазона**

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕН-
НОЙ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)

аспиранта 4 курса

направления 03.06.01 «Физика и астрономия»

факультета нелинейных процессов

Бенедика Андрея Ивановича

Научный руководитель

зав. кафедрой нелинейной физики,

д.ф.-м.н., профессор

Н.М. Рыскин

Саратов 2017

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы работы. Освоение терагерцевого (ТГц) диапазона частот (0.1-3.0 ТГц) является одной из приоритетных проблем современной вакуумной сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники. Приборы ТГц диапазона востребованы в медицине, информационно-коммуникационных системах, системах обеспечения безопасности, спектроскопии и радиоастрономии.

Научными коллективами разных стран активно ведутся исследования и разработка миниатюрных аналогов классических усилителей и генераторов вакуумной электроники, таких как ламп бегущей волны (ЛБВ), ламп обратной волны (ЛОВ), отражательных клистронов, клистронов бегущей волны, приборов со скрещенными полями и др. в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне (см., например, обзорные работы [1-3]).

Для перехода в область более высоких частот, необходимо пропорционально уменьшать геометрические размеры электродинамических (ЭД) структур приборов, что вызывает технологические трудности при их изготовлении. Кроме того, уменьшение поперечных размеров влечет за собой необходимость использования новых типов катодов с чрезвычайно высокой плотностью тока.

Для решения технологических проблем изготовления миниатюрных резонансных и волноведущих систем, относительно недавно была предложена идея использования фотонных кристаллов (ФК) — искусственных периодических структур, обладающих разрешенными и запрещенными зонами. Если в таком кристалле сделать дефект, то электромагнитные (ЭМ) волны, попадающие в запрещенную зону, смогут распространяться в дефекте, а стенки ФК структуры будут являться для них «идеальным» отражателем. Использование ФК позволяет уменьшить омические потери, а также облегчает селекцию типов колебаний. Современные технологии позволяют изготавливать ФК структуры миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн [4,5]. Предлагалось использовать подобные структуры для гиротронов [6,7],

гиро-ЛБВ [8], пролетных [9] и отражательных [10] клистронов, ЛБВ [11], ЛОВ [12,13], линейных ускорителей [14].

Перспективы использования автоэлектронных эмиттеров в приборах вакуумной СВЧ электроники давно вызывают большой интерес [1,15,16]. Помимо возможности получения высоких плотностей тока, важными достоинствам автоэмиссионных катодов (АЭК) являются безынерционность, т.е. практически мгновенная готовность прибора к работе и отсутствие необходимости использования подогревательного элемента, т.е. потенциальное уменьшение размеров и массы прибора. Однако работающих приборов СВЧ диапазона практически нет, за исключением ЛБВ, разработанной фирмой Northrop–Grumman (США) [17]. В приборах с протяженными пучками типа ЛОВ и ЛБВ возникают трудности с формированием и фокусировкой пучков с высокой плотностью. С этой точки зрения представляют интерес приборы со «средним» углом пролета типа монотрона и его модификаций [18].

В работе [19] был предложен интересный прибор подобного класса — диодный генератор с автоэмиссионным катодом, помещенным в фотонно-кристаллический резонатор. Предполагалось, что в генераторе будет использован катод из углеродных нанотрубок (УНТ). Следует ожидать, что сочетание двух перспективных идей: использование АЭК и ФК позволит создать работоспособный генератор и, в том числе, продвинуться в коротковолновые диапазоны. В [19] были приведены параметры резонатора для генератора Х-диапазона, а в [20] проведено численное моделирование модуляции тока эмиссии внешним СВЧ сигналом, подаваемым в резонатор. Более подробное исследование характеристик генератора проведено не было.

Принципиальной трудностью при продвижении в коротковолновые диапазоны, является необходимость использования электронных пучков с ультравысокой плотностью тока. Одним из путей решения этой проблемы является использование пространственно-развитых замедляющих систем (ЗС) и электронных пучков с большим поперечным сечением. В частности, в работе [21] были предложены планарные замедляющие системы на диэлек-

трических подложках для приборов О-типа, таких как ЛБВ и ЛОВ. Подобные системы обладают высоким замедлением, поэтому их использование позволяет понизить рабочие напряжения, что также является принципиальным для миниатюризации. В последние годы над созданием аналогичных ЗС работает ряд авторов [22-25].

Цель работы состоит в исследовании электродинамических структур нового типа для миниатюрных приборов миллиметрового диапазона на основе ФК и планарных замедляющих структур на диэлектрических подложках. Для достижения поставленной цели решаются следующие **основные задачи**:

1. Расчет холодных и нагруженных характеристик ФК резонатора с помощью современных пакетов электромагнитного моделирования. Определение параметров резонаторов для генераторов Х-, W- и G-диапазонов.

2. Разработка линейной теории диодного генератора с автоэмиссионным катодом, анализ условий самовозбуждения генератора.

3. Компьютерное моделирование выходных характеристик диодного генератора в различных частотных диапазонах.

4. Моделирование планарных ЗС на диэлектрических подложках, исследование влияния геометрических параметров ЗС на электродинамические характеристики. Определение основных электродинамических параметров ЗС (дисперсионные характеристики, сопротивление связи) для приборов миллиметрового диапазона.

Научная новизна результатов работы заключается в следующем:

1. Впервые проведены расчеты холодных и нагруженных электродинамических характеристик ФК резонаторов диапазонов частот 11.8, 95 и 220 ГГц. Показано, что вариация конструкции ФК вывода СВЧ энергии позволяет менять нагруженную добротность резонатора в широких пределах, что позволяет оптимизировать выходную мощность генератора.

2. Развита линейная теория диодного генератора с АЭК, которая позволяет провести простую теоретическую оценку условий самовозбуждения.

Теоретические результаты находятся в хорошем соответствии с результатами численного моделирования.

3. Впервые проведено подробное исследование выходных характеристик диодного генератора с АЭК и ФК резонатором. Показано, что в X-диапазоне возможно достичь значения выходной мощности в насыщении порядка нескольких кВт. Показано, что для продвижения в коротковолновую часть миллиметрового диапазона необходимо использовать высшие зоны генерации, что позволяет снизить значения рабочего анодного напряжения и стартового тока. В этом случае максимальная выходная мощность составляет 250 и 100 Вт для генераторов W- и G-диапазонов соответственно.

4. Впервые при помощи современных пакетов 3-D моделирования проведены детальные расчеты электродинамических параметров (дисперсия, замедление, сопротивление связи, напряжение синхронизма) планарных ЗС на диэлектрических подложках типа металлизированного меандра и встречных штырей диапазонов 50-70 ГГц и 180-230 ГГц.

Научная и практическая значимость работы. Представленные в работе результаты моделирования могут быть использованы для проектирования различных миниатюрных приборов вакуумной электроники (диодный генератор с автоэмиссионным катодом, низковольтные ЛОВ и ЛБВ с планарными ЗС на диэлектрических подложках).

Результаты, представленные в научно-квалификационной работе, использовались при выполнении НИР, поддержанных грантами РФФИ (№ 11-02-01280, № 13-08-00986, № 14-02-00976, 16-08-00450) и РНФ № 17-12-01160.

Достоверность результатов подтверждается использованием хорошо апробированных методов теоретического анализа, методов и численных схем компьютерного моделирования. Результаты расчета электродинамических характеристик ФК резонатора, полученные при моделировании в различных пакетах, хорошо согласуются между собой. Результаты теоретического анали-

за условий самовозбуждения диодного генератора с АЭК хорошо согласуются данными численного моделирования.

Личный вклад автора заключается в проведении теоретического анализа изучаемого генератора, разработке компьютерных моделей, проведении расчетов. Обсуждение и анализ полученных результатов проводился совместно с научным руководителем.

Структура работы. Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, содержит 87 страниц текста, включая 27 рисунков и графиков, 8 таблиц и список литературы из 71 наименования.

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, положения, выносимые на защиту, научная новизна и научно-практическая значимость полученных результатов.

Глава 1 посвящена электродинамическому моделированию ФК резонатора для диодного генератора с АЭК при помощи программных пакетов MPB, MEEP, COMSOL Multiphysics и High Frequency Structure Simulator (HFSS). В п. 1.1 излагается устройство и принцип работы генератора. В п. 1.2 подробно исследована зависимость положения и размера запрещенной зоны от параметров ФК структуры, образованной диэлектрическими стерженьками. В п. 1.3 описана методика расчета холодных и нагруженных характеристик ФК резонатора. Рассматриваются двумерная модель резонатора с бесконечной ФК решеткой и трехмерная модель резонатора, окруженного металлическим экраном. В п. 1.4 приведены результаты моделирования ФК резонатора 3-х см диапазона. Подробно исследовано влияние различных факторов на собственную и нагруженную добротности резонатора. Проводится сравнение результатов расчетов, полученных при рассмотрении 2D и 3D моделей резонаторов с использованием различных пакетов электродинамического моделирования. В п. 1.5 представлены результаты моделирования ФК резонаторов миллиметрового (95 ГГц) и субмиллиметрового (220 ГГц) диапазонов.

Глава 2 посвящена теоретическому анализу и численному моделированию диодного генератора с АЭК и ФК резонатором. В п. 2.1 развивается линейная теория диодного генератора с АЭК в кинематическом приближении. В п. 2.1 проводится модификация линейной теории для оценки влияния сил пространственного заряда на процесс взаимодействия электронного потока с полем резонатора. В п. 2.3 описана методика численного моделирования диодного генератора с АЭК, основанная на методе «частиц в ячейке» и нестационарной теории возбуждения резонаторов. В п. 2.4 приводятся результаты численного моделирования выходных характеристик (мощность, КПД) генератора 3-х сантиметрового диапазона. В п. 2.5 представлены результаты моделирования выходных характеристик генераторов миллиметрового (95 ГГц) и субмиллиметрового (220 ГГц) диапазонов. В п. 2.6 обсуждаются типы автоэмиссионных катодов, которые могут быть использованы для создания диодного генератора с ФК резонатором.

Глава 3 посвящена электродинамическому исследованию планарных ЗС на диэлектрических подложках типа металлизированного меандра и встречно-штыревой ЗС. В п. 3.1 проводится детальный анализ зависимости электродинамических характеристик ЗС от геометрических параметров. В п. 3.2 приводятся результаты моделирования меандровой ЗС субмиллиметрового диапазона (180-230 ГГц) на подложке из кварца. В п. 3.3 представлены результаты моделирования ЗС типа встречные штыри и меандр миллиметрового (50-70) диапазона частот на подложках из кварца и поликора.

В **Заключении** приведены основные результаты и выводы, полученные в научно-квалификационной работе.

Цитируемая литература

1. Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Sokolov D.V., Trubetskov D.I., Han S.T., Kim J.I., Park G.S. // Phys. Plasmas. 2002. Vol. 9, No. 9. P. 4020-4027.
2. Srivastava V. // J. Physics: Conf. Series. 2008. Vol. 114. No.1. 012015.
3. Booske J.H., Dobbs R.J., Joye C.D., et al. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2011. Vol. 1. No. 1. P. 54-75.

4. Temelkuran B., Ozbay E. // *Appl. Phys. Lett.* 1999. Vol. 74. No. 4. P. 486-488.
5. Schuster M., Antoniuk O., Lahl P., Klein N. // *J. Appl. Phys.* 2005. Vol. 97. 044912.
6. Sirigiri J.R., Kreisler K.E., Machuzak J., et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2001. Vol. 86, No. 24. P 5628-5631.
7. Joo Y.-D., Park G.-S., Kim D.-H., Kim J.-I., et al. // *Japan. J. Appl. Phys.* 2009. Vol. 48, 074502.
8. Nanni E.A., Lewis S.M., Shapiro M.A., et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2013. Vol. 111, 235101.
9. Smirnov A.V., Yu D. // *Proc. 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, Tennessee, USA 2005.* DOI: 10.1109/PAC.2005.1591375.
10. Jang K.-H., Jeon S.-G., Kim J.-I., et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2008. Vol. 93, No. 21. 211104.
11. Gong Y., Yin H., Wei Y., et al. // *IEEE Trans. Electron Devices.* 2010. Vol. 57, No. 5. P. 1137-1145.
12. Letizia R., Mineo M., Paoloni C. // *IEEE Trans. Electron Devices.* 2015. Vol. 6, No. 1. P. 178-183.
13. Nashed A.I., Chaudhuri S.K., Safavi-Naeini S. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2017. Vol. 45. No. 3. P. 372-380.
14. Shapiro M.A., Brown W.J., Mastovsky I., et al. // *Phys. Rev. ST Accel. Beams.* 2001. Vol. 4. 042001.
15. Трубецков Д.И., Рожнёв А.Г., Соколов Д.В. *Лекции по сверхвысококачественной вакуумной микроэлектронике.* Саратов. Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 1996.
16. Трубецков Д.И., Краснова Г.М. // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика.* 2013. Т. 21, № 1. С. 35-66.
17. Whaley D.R., Duggal R., Armstrong C.M., et al. // *IEEE Transactions On Electron Devices.* 2009. Vol. 56. No. 5. P. 896–904.
18. Солнцев В.А., Галдецкий А.В., Клеев А.И. // *Лекции по СВЧ электронике и радиофизике. 10-я зимняя школа-семинар. Кн. 1, Ч. I.* Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 1996. С. 76-95.
19. Han S.-T. // *35th Int. Conf. Infrared Millim. Terahertz Waves (IRMMW-THz).* Rome, Italy, 2010.
20. Han S.-T. // *J. Korean Phys. Soc.* 2011. Vol. 59, № 1. P. 141.

21. Гуляев Ю.В., Жбанов А.И., Захарченко Ю.Ф., Нефедов И.С., Сеницын Н.И., Торгашов Г.В. // Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39. № 12. С. 2049-2058.
22. Shen F., Wei Y.-Y., Xu X., et al. // J. Electromagnetic Waves and Applications. 2012. Vol. 26. No. 1. P. 89-98.
23. Sumathy M, Augustin D, Datta S.K., et al // IEEE Trans. Electron Devices. 2013. Vol. 60. No. 5. P. 1769-1775.
24. Bai N., Shen M., Sun X. // IEEE Trans. Electron Devices. 2015. Vol. 62. No. 5. P. 1622-1627.
25. Ракова Е.А., Галдецкий А.В., Корепин Г.Ф. и др. // Электроника и микроэлектроника СВЧ. Сб. статей V Всероссийской конференции. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. Т. 1. С 148-152.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Вариация конструкции ФК вывода СВЧ энергии позволяет менять нагруженную добротность в широких пределах, что дает возможность оптимизировать выходные характеристики и стартовый ток генератора;

2. Для диода с АЭК и ФК резонатором в 3-х сантиметровом диапазоне возможно достичь значения выходной мощности в насыщении порядка нескольких кВт. Плотность стартового тока при этом составляет порядка 400мА/см²;

3. Для диодного генератора при продвижении в коротковолновую часть миллиметрового диапазона необходимо использовать высшие зоны генерации, что позволяет снизить значения рабочего анодного напряжения и стартового тока;

4 Планарные меандровая ЗС на подложке из кварца и встречно-штыревая ЗС на подложке из поликора могут быть использованы для создания низковольтных ЛБВ (2-4.5кВ) и ЛОВ (1-2кВ) субмиллиметрового и миллиметрового диапазонов частот соответственно.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Оработана методика и проведено электродинамическое моделирование ФК резонаторов X-, W- и G-диапазонов для диодного генератора с АЭК. Результаты моделирования показали, что путем вариации конструкции ФК вывода энергии можно менять нагруженную добротность резонатора в широких пределах, что дает возможность оптимизировать выходную мощность генератора.

2. Развита линейная теория диодного генератора с АЭК, позволяющая провести простую оценку условий самовозбуждения генератора, результаты которой находятся в хорошем соответствии с результатами численного моделирования. На основе теоретической оценки установлено, что для приборов короткой части миллиметрового диапазона необходимо использовать высшие зоны генерации, для которых значения анодного напряжения и стартового тока ниже, чем в основной зоне.

3. Проведены расчеты выходных характеристик генераторов (выходной мощности и электронного КПД). Результаты численного эксперимента показывают возможность достижения достаточно высоких значений выходной мощности в насыщении порядка 3, 0.25 и 0.1 кВт для генераторов диапазонов частот 11.8, 95 и 220 ГГц соответственно. Значения электронного КПД составляют порядка 15 %.

4. Развита методика учета статического и динамического пространственного заряда для диодного генератора с АЭК. Результаты теоретической оценки показали, что влияние пространственного заряда в 3-х см диапазоне незначительное и им можно пренебречь.

5. Проведено детальное исследование электродинамических характеристик планарных ЗС на диэлектрических подложках типа металлизированного меандра и встречных штырей диапазонов частот 50-70 ГГц и 180-230 ГГц. Установлено, что для меандровых ЗС, лучше использовать подложки из кварца, а для встречно-штыревых — из поликора.

Меандровая ЗС G-диапазона на кварцевой подложке обеспечивает замедление прямой пространственной гармоники в рабочей полосе частот порядка 7.5-11, соответствующее ускоряющему напряжению 4.5-2 кВ, при значениях сопротивления связи на частоте 200 ГГц порядка 1-10 Ом. Может быть использована для создания низковольтной ЛБВ субмиллиметрового диапазона.

Встречно-штыревая ЗС V-диапазона на подложке из поликора обладает большим замедлением около 20 на частоте 60 ГГц, при значении сопротивления связи с обратной пространственной гармоникой равном 0.5-3 Ом. Может быть использована для создания низковольтной (~1-2кВ) ЛОВ миллиметрового диапазона.

IV. ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ И АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Результаты, представленные в работе, докладывались на следующих конференциях и семинарах:

- Международная зимняя школа-семинар по радиофизике и электронике сверхвысоких частот (Саратов, 2015 г.);
- Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (Саратов, 2014 г.);
- Всероссийская объединенная научная конференции «Проблемы СВЧ электроники» (МИЭМ НИУ ВШЭ, Москва, 2015г.);
- VI-XI Всероссийская конференция молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратов, 2011–2016 гг.);
- Научно-технический семинар АО «НПП «Алмаз» «Электронные приборы СВЧ и их применение в современных системах радиоэлектроники» (Саратов 2015);
- Школы-конференции «Нелинейные дни для молодых в Саратове» (2009–2013 гг.).

По материалам диссертации опубликовано 24 работы, из которых 5 статей в журналах, входящих в список изданий, рекомендованных ВАК, 3 статьи в сборниках трудов конференций, 16 тезисов докладов.

Список основных публикаций

1. 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. 63-71.
2. Бенедик А.И. Расчет электродинамических характеристик фотонно-кристаллического резонатора // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22, № 6. С. 49-58.
3. Benedik A.I., Ryskin N.M., Han S.-T. Theory and simulation of field emission diode oscillators // Physics of Plasmas. 2013. Vol. 20. No. 8. 083117.
4. Бенедик А.И., Рожнёв А.Г., Рыскин Н.М., Сеницын Н.И., Торгашов Г.В., Шалаев П.Д. Разработка планарных замедляющих систем на диэлектрических подложках для приборов вакуумной микроэлектроники миллиметрового и субмиллиметрового диапазона // Радиотехника. 2016. № 7. С. 47-52.
5. Бенедик А.И., Крачковская Т.М., Шестеркин В.И. Микроразряды в диодах с малыми зазорами и автоэмиссионными катодами из стеклоуглерода // ЖТФ. 2015. Т. 85, № 10. С. 121-125.
6. Бенедик А.И., Рыскин Н.М. Генератор с автоэмиссионным катодом в фотонно-кристаллическом резонаторе // Труды всероссийской научной конференции «Проблемы СВЧ электроники». 24-25 октября 2013 г., Москва. М: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. С. 36-39.
7. Бенедик А.И., Каретникова Т.А., Рыскин Н.М., Рожнев А.Г., Григорьев Ю.А., Сеницын Н.И., Торгашов Г.В., Бушуев Н.А., Бурцев А.А., Шалаев П.Д. Исследование ламп бегущей волны суб-ТГц диапазона с ленточным электронным пучком // Сборник трудов II Всероссийской научной конференции «Проблемы СВЧ электроники». 26-28 октября 2015 г., Москва: МИЭМ НИУ ВШЭ. С. 58-60.
8. В.И. Шестеркин, А.И. Бенедик, Т.М. Крачковская. Микропробой в вакуумных зазорах диодов с автоэмиссионными катодами из стеклоуглерода. Актуальные проблемы электронного приборостроения. 11-я Международная научно-техническая конференция. Саратов.2014. С 100-105.
9. Бенедик А.И., Рыскин Н.М. Расчет электродинамических характеристик фотонно-кристаллического резонатора // Материалы XVI Международ-

ной зимней школы-семинара по радиофизике и электронике сверхвысоких частот. 2-7 февраля 2015 г. Саратов: ООО «Издательский центр «Наука». С. 18.

10. Бенедик А.И., Рыскин Н.М., Рожнев А.Г., Торгашов Г.В. Расчет электродинамических характеристик планарной замедляющей системы для приборов вакуумной микроэлектроники терагерцевого диапазона частот // Материалы XVI Международной зимней школы-семинара по радиофизике и электронике сверхвысоких частот. 2-7 февраля 2015 г. Саратов: ООО «Издательский центр «Наука». С. 17.
11. Benedik A.I., Ryskin N.M., Han S.-T. Simulation of the field emission diode oscillator with photonic crystal resonator // Proc. 2012 Int. Vacuum Electronics and Vacuum Electron Sources Conf. (IVEC-IVESC 2012). Monterey, CA, USA. 2012. P. 379-380.
12. Benedik A.I., Ryskin N.M. Modeling of electrodynamic characteristics of the photonic crystal resonator for a field-emission diode oscillator // Proc. 16th Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2015). Beijing, China. 2015
13. Benedik A.I., Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Torgashov G.V., Sinitsyn N.I., Bushuev N.A., Shalaev P.D. Study of electrodynamic parameters of the planar meander slow-wave structures for THz band traveling wave tubes // Proc. 16th Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2015). Beijing, China. 2015.
14. Benedik A.I., Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Sinitsyn N.I., Torgashov G.V., Torgashov R.A. Planar V-band slow-wave structures for low-voltage tubes with sheet electron beam // Proc. 18th Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2017). London, UK. 2017.
15. Benedik A.I., Ryskin N.M. A THz-band oscillator with photonic crystal cavity resonator and field-emission cathode array // 41st International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Copenhagen, Denmark, 2016.
16. Karetnikova T.A., Benedik A.I., Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Torgashov G.V., Sinitsyn N.I., Shalaev P.D. Development and modeling of G-band vacuum tube power amplifiers with sheet electron beam // 41st International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Copenhagen, Denmark, 2016.
17. Бенедик А.И., Яковлев А.В. Моделирование нестационарных процессов взаимодействия электронного пучка с полем объемного резонатора // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. Тез. докл. VI Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во. Сарат. ун-та, 2011. С. 11-12.

18. Бенедик А.И. Численное моделирование генератора с автоэмиссионным катодом и фотонно-кристаллическим резонатором // Научные исследования студентов Саратовского государственного университета: материалы итог. студ. науч. конф. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 2012. С. 8-10.
19. Бенедик А.И., Рыскин Н.М. Численное моделирование генератора на основе диода с автоэмиссионным катодом и фотонно-кристаллическим резонатором// Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. Тез. докл. VII Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: изд-во Саратов. ун-та, 2012. С. 27-28.
20. Бенедик А.И. Генератор X-диапазона с автоэмиссионным катодом в фотонно-кристаллическом резонаторе // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. Тез. докл. VIII Всерос. конф-ции молодых ученых. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2013. С. 35-36.
21. Бенедик А.И., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Торгашов Г.В. Расчет электродинамических характеристик планарных замедляющих систем для приборов вакуумной микроэлектроники терагерцевого диапазона частот // «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тез. докл. IX Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2014. С. 19-20.
22. Бенедик А.И., Рыскин Н.М. Расчет электродинамических характеристик фотонно-кристаллического резонатора для диодного генератора с автоэмиссионным катодом // «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тезисы докладов X Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2015. С. 16-17.
23. Бенедик А.И., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Торгашов Г.В., Шалаев П.Д. Разработка планарных замедляющих систем на диэлектрических подложках для приборов вакуумной микроэлектроники миллиметрового диапазона // «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тезисы докладов X Всерос. конф. молодых ученых. – Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2015. С. 14-15.
24. Бенедик А.И., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Торгашов Г.В., Шалаев П.Д. Разработка планарных замедляющих систем V-диапазона на диэлектрических подложках для СВЧ усилителей и генераторов O-типа // «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тезисы докладов XI Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2016. С. 18-19.