

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра нелинейной физики

**Исследование низковольтных приборов О-типа на диэлектрических
подложках**

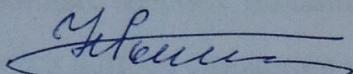
АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 411 группы

направления 03.03.01 «Прикладные математика и физика»
Факультета нелинейных процессов

Торгашова Романа Антоновича

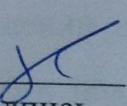
Научный руководитель
профессор, д.ф.-м.н.



Рыскин Н.М.

Дата, подпись

Зав. кафедрой нелинейной физики
доцент, к.ф.-м.н.

15.06.2018 
Дата, подпись

Бегинин Е.Н.

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра нелинейной физики

**Исследование низковольтных приборов О-типа на диэлектрических
подложках**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 411 группы

направления 03.03.01 «Прикладные математика и физика»
Факультета нелинейных процессов

Торгашова Романа Антоновича

Научный руководитель
профессор, д.ф.-м.н.

Рыскин Н.М.

Дата, подпись

Зав. кафедрой нелинейной физики
доцент, к.ф.-м.н.

Бегинин Е.Н.

Дата, подпись

Саратов 2018 г.

ВВЕДЕНИЕ

На данный момент освоение терагерцевого (0.1–1.0 ТГц) диапазона является одной из приоритетных проблем современной вакуумной сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники. Научными коллективами различных стран активно исследуются и разрабатываются миниатюрные аналоги классических усилителей и генераторов вакуумной электроники, таких как лампа бегущей волны (ЛБВ), лампа обратной волны (ЛОВ), отражательный клистрон и т.д. [1-4]. Такие источники излучения могут найти широкое применение в различных областях: информационно-коммуникационные системы, спектроскопия, медицина. Это связано с особенностями ТГц-излучения: широкий диапазон частот используется в системах передачи информации, колебательные спектры различных веществ лежат в близком диапазоне, высокая проникающая способность электромагнитного излучения данного диапазона. Таким образом, создание относительно мощных устройств когерентного излучения ТГц-диапазона является перспективным и значимым.

При создании электровакуумных СВЧ усилителей и генераторов О-типа в коротковолновых диапазонах для повышения выходной мощности и КПД целесообразно использовать пространственно-развитые замедляющие системы (ЗС), а также электронные пучки с большим поперечным сечением. Принципиальным также является вопрос снижения ускоряющего напряжения, что в свою очередь приводит к уменьшению продольных размеров устройств, и, следовательно, их массы. В этом отношении наиболее перспективными являются планарные ЗС на диэлектрических подложках, предложенные в работе [5]. В последние годы исследования в этом направлении возобновились в СФ ИРЭ РАН и СГУ. В [6,7] были представлены результаты разработки меандровой ЗС диапазона 180-230 ГГц. Однако ввиду трудности измерения электродинамических параметров в данном диапазоне перешли к разработке ЗС средней части миллиметрового диапазона (50÷70 ГГц). В [8] были представлены предварительные результаты разработки планарных

замедляющих систем типа «встречные штыри» и меандр на диэлектрических подложках из кварца и поликорда, рассчитанные для низковольтных приборов О-типа диапазона 50-70 ГГц. ЗС были изготовлены с использованием технологии фотолитографии.

В последние годы над созданием аналогичных ЗС также работает ряд авторов [9-15]. Однако большинство работ посвящено компьютерному моделированию, а экспериментальные образцы ЗС до сих пор не созданы, за исключением нескольких низкочастотных (3-5 ГГц) прототипов [10,12].

Таким образом, тема выпускной квалификационной работы является **актуальной**.

Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование электродинамических характеристик миниатюрных планарных ЗС на диэлектрических подложках и моделирование выходных характеристик низковольтных приборов О-типа с ленточным электронным пучком на основе подобных ЗС.

Основными задачами для достижения поставленной цели являются:

1. Моделирование электродинамических характеристик ЗС (дисперсионные характеристики, сопротивление связи, затухание);
2. Экспериментальное исследование электродинамических параметров изготовленных образцов ЗС, сопоставление с результатами моделирования;
3. Моделирование ЛОВ и ЛБВ с планарными ЗС и расчет их выходных характеристик.

Работа состоит из трех глав. В главе 1 представлена геометрия встречно-штыревой и меандровой ЗС, представлены результаты моделирования в программных пакетах Ansys High Frequency Structure Simulator (HFSS) [16] и COMSOL Multiphysics [17], а также результаты экспериментального исследования электродинамических параметров (коэффициента стоячей волны напряжения (КСВН) и ослабления). В главе 2 приведены основные уравнения ЛБВ и представлены результаты моделирования усиления ЛБВ

средней части миллиметрового диапазона с планарной ЗС типа меандр на диэлектрической подложке из кварца. В главе 3 приведены основные уравнения нестационарной теории ЛОВ с учетом сил пространственного заряда и затухания, а также результаты моделирования выходных характеристик ЛОВ-генератора с встречно-штыревой ЗС на диэлектрической подложке из кварца.

В Заключении представлены основные результаты и выводы.

Результаты выпускной квалификационной работы докладывались на студенческих конференциях Факультета нелинейных процессов СГУ (2017, 2018), на Школе-конференции «Нелинейные дни в Саратове для молодых» (2017), на Всероссийских конференциях «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (2017, 2018), на Международном симпозиуме и Школе «Saratov Fall Meeting 2017» и опубликованы в работах [20-27].

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описывается актуальность работы, перечислены основные цели и задачи работы.

Глава 1 посвящена геометрии и характеристикам планарных замедляющих систем на диэлектрических подложках.

В п. 1.1 представлено описание ЗС типа меандр и «встречные штыри» на диэлектрических подложках (рис. 1), а также их геометрические размеры. Описана технология изготовления макетов ЗС и представлены фотографии изготовленных макетов.

П. 1.2 посвящен результатам компьютерного моделирования указанных ЗС на диэлектрических подложках в программном пакете Ansys High Frequency Structure Simulator (HFSS) и COMSOL Multiphysics. Приведены такие характеристики ЗС, как замедление, сопротивление связи, усредненное по поперечному сечению пучка, зависимость напряжения синхронизма и затухания в ЗС от частоты и дисперсионные характеристики ЗС.

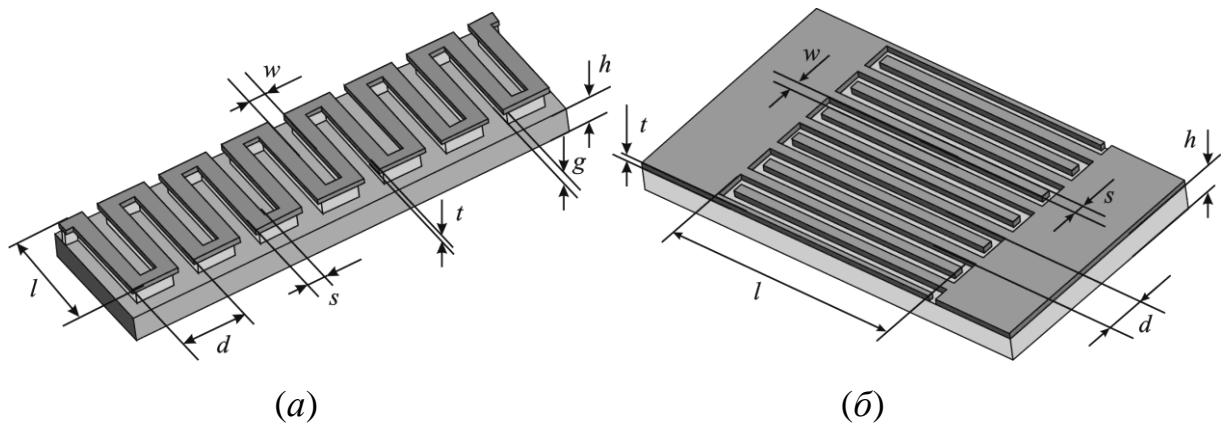


Рис. 1. Модели планарных замедляющих систем типа металлизированного меандра на диэлектрической подложке (а) и встречных штырей (б).

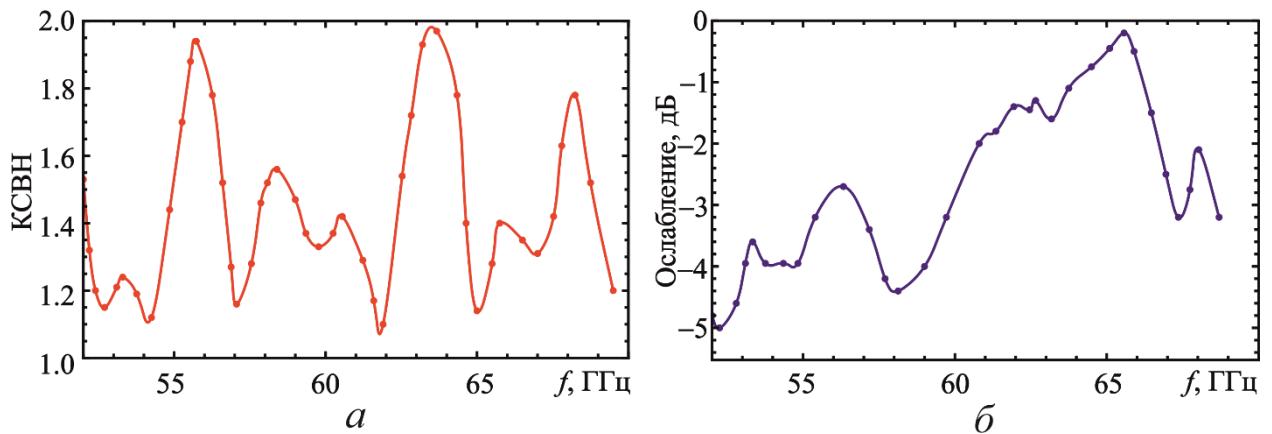


Рис. 2. Частотные зависимости КСВН (а) и ослабления (б) для ЗС типа меандр

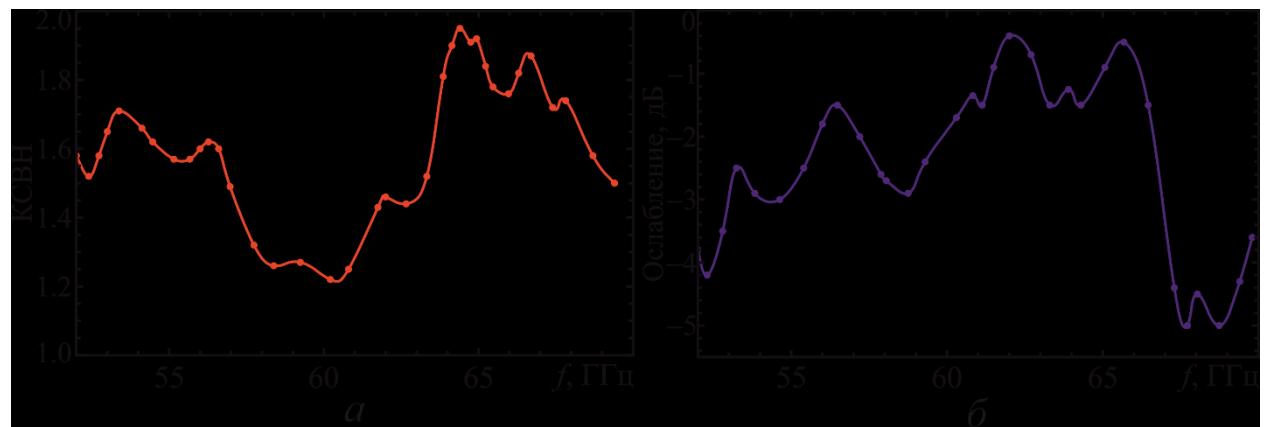


Рис. 3. Частотные зависимости КСВН (а) и ослабления (б) для ЗС типа «встречные штыри»

В п. 1.3 представлены результаты экспериментального исследования электродинамических параметров ЗС (КСВН и ослабление) на panoramicном

измерителе Р2-69. В результате было получено, что КСВН данных ЗС не превышает 2, а ослабление не превышает 5 дБ в диапазоне частот 53.57-78.33 ГГц (рис. 2 и 3).

Глава 2 посвящена изучению низковольтного ЛБВ-усилителя с планарной ЗС типа меандр на диэлектрической подложке из кварца и ленточным электронным пучком.

В п. 2.1 представлены основные уравнения нелинейной и линейной теории ЛБВ, используемые при расчете усиления лампы. Уравнения интегрируются методом «крупных частиц» [18], причем вычисление гармоник тока проводится с помощью усовершенствованного метода, предложенного в [19].

П. 2.2 посвящен определению безразмерных параметров ЛБВ, необходимых для расчета усиления лампы (параметр Пирса C , нормированная длина пространства взаимодействия L , параметр пространственного заряда q).

В п. 2.3 результаты расчета усиления в режиме малого сигнала сопоставляются с известными приближенными теоретическими формулами (метод последовательных приближений [18]). Показано, что результаты, полученные с помощью различных методов, достаточно хорошо согласуются друг с другом.

В п. 2.4 представлены результаты расчета усиления ЛБВ в линейном и нелинейном режиме. Расчет проводился при различных напряжениях пучка. Показано, что при токе 100 мА коэффициент усиления может достигать 20 дБ. Ввиду сильной дисперсии ЗС полоса усиления оказывается достаточно узкой, 8-10 ГГц. Однако можно использовать перестройку диапазона усиления за счет изменения ускоряющего напряжения пучка. Изменяя напряжение в пределах 2.5-5.5 кВ, можно перестраивать центральную частоту в пределах 47-71 ГГц. Расчеты в режиме большого сигнала показывают, что выходная мощность может достигать 75 Вт при мощности входного сигнала порядка 6 Вт.

Глава 3 посвящена моделированию низковольтного ЛОВ-генератора с планарной ЗС типа «встречные штыри» на диэлектрической подложке из кварца и ленточным электронным пучком.

В п. 3.1 представлены основные уравнения одномерной нестационарной теории ЛОВ с учетом сил пространственного заряда и холодного затухания. На основе результатов компьютерного моделирования, представленных в п. 1.2, рассчитаны основные безразмерные параметры такие-то.

В п. 3.2 проводится расчет стартового тока в ЛОВ. Проведенные расчеты показывают, что для ЗС из 50 периодов в диапазоне напряжений от 800 В до 4000 В самовозбуждение происходит при значениях плотности тока 50–100 А/см², что достижимо для существующих термоэмиссионных катодов. Также проведено моделирование установления колебаний в нелинейном режиме. Показано, что в лампе не реализуются хаотические и автомодуляционные режимы при разумных значениях тока, не превышающих 50 мА. При таких токах выходная мощность может достигать 1–2 Вт. При этом зависимость выходной мощности от тока пучка подчиняется линейному закону.

В заключении представлены основные выводы и результаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были получены следующие основные результаты.

1. Были экспериментально исследованы электродинамические параметры (КСВН и ослабление) изготовленных замедляющих системы типа меандр и «встречные штыри» на диэлектрических подложках из кварца на панорамном измерителе Р2-69 в диапазоне частот 53.57-78.33 ГГц. Были получены значения КСВН не превышающие 2, а ослабление не превышает 5 дБ для меандровой ЗС длиной 1 см и встречно-штыревой ЗС длиной 0.2 см. Были подобраны размеры для ЗС типа меандр, рассчитанной на диапазон 75-110 ГГц.

2. На основе проведенного моделирования меандровой и встречно-штыревой ЗС в программном пакете Ansys High Frequency Structure Simulator были построены зависимости основных электродинамических характеристик ЗС (дисперсионная характеристика, зависимость сопротивления связи и замедления от частоты) и рассчитаны основные параметры ЛБВ и ЛОВ такие как параметр Пирса C , нормированная длина пространства взаимодействия L , параметр пространственного заряда q . Было проведено компьютерное моделирование в программном пакете COMSOL Multiphysics для ЗС типа меандр. При расчете были увеличены поперечные размеры пучка, за счет чего были получены более высокие значения сопротивления связи. Проведено сравнение полученных результатов для меандровой ЗС и построены зависимости для основных параметров ЛБВ. Были также построены дисперсионная характеристика в зависимости от фазового сдвига на период и зависимость холодного затухания в замедляющей системе от частоты на основе моделирования в COMSOL.

3. Было проведено моделирование низковольтного ЛБВ-усилителя с планарной замедляющей системой типа меандр из кварца и ленточным электронным пучком. Размеры пучка были выбраны $65\text{O} \times 5\text{ мкм}^2$ согласно моделированию в программном пакете COMSOL Multiphysics. Были получены зависимости усиления от частоты в линейном режиме работы. Было показано, что при токе пучка 100 мА в линейном режиме работы можно получить коэффициент усиления до 20 дБ при длине системы 1 см или 50 периодов. Ввиду сильной дисперсии ЗС полоса усиления оказывается достаточно узкой, 8-10 ГГц. Однако можно использовать перестройку диапазона усиления за счет изменения ускоряющего напряжения пучка. Изменяя напряжение в диапазоне 2.5-5.5 кВ, можно перестраивать центральную частоту в пределах от 47 ГГц до 71 ГГц. Расчеты в нелинейном режиме показывают, что выходная мощность может достигать 75 Вт при входной мощности до 6 Вт.

4. Было проведено моделирование ЛОВ-генератора длиной 50 периодов на диэлектрической подложке из кварца. Проведенные расчеты показывают,

что для ЗС из 50 периодов в диапазоне напряжений от 800 В до 4000 В самовозбуждение происходит при значениях плотности тока $50\text{--}100 \text{ A/cm}^2$, что достижимо для существующих термоэмиссионных катодов. С ростом напряжения ток растет по линейному закону. В области напряжений ниже 1 кВ ток растет с уменьшением напряжения, что обусловлено резким увеличением параметра пространственного заряда. Также проведено моделирование установления колебаний в нелинейном режиме. Показано, что в лампе не реализуются хаотические и автомодуляционные режимы при значениях тока свыше 100 мА. Соответственно можно говорить о подавлении подобных режимов силами пространственного заряда. При токах, не превышающих 50 мА, выходная мощность может достигать 1–2 Вт. При этом зависимость выходной мощности от тока пучка подчиняется линейному закону.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Sokolov D.V., Trubetskoy D.I., Han S.T., Kim J.I., Park G.S.* // Physics of Plasmas. 2002. Vol. 9, No. 9. P. 4020-4027.
2. *Ives R.L.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. Vol. 32, No. 3. P. 1277-1291.
3. *Srivastava V.* // J. Physics: Conf. Series. 2008. Vol. 114. No.1. 012015.
4. *Booske J.H., Dobbs R.J., Joye C.D., Kory C.L., Neil G.R., Park G.S., Park J.H., Temkin R.J.* // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2011. Vol. 1. No. 1. P. 54-75.
5. *Гуляев Ю.В., Жбанов А.И., Захарченко Ю.Ф., Нефедов И.С., Синицын Н.И., Торгашов Г.В.* // Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39. № 12. С. 2049-2058.
6. *Benedik A.I., Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Torgashov G.V., Sinitsyn N.I., Bushuev N.A., Shalaev P.D.* // Abstracts of the Sixteenth IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC2015) April 27-29, 2015, Beijing, China.
7. *Бенедик А.И., Каретникова Т.А., Рыскин Н.М., Рожнев А.Г., Григорьев Ю.А., Синицын Н.И., Торгашов Г.В., Бушуев Н.А., Бурцев А.А., Шалаев П.Д.* // Проблемы СВЧ электроники. Сб. трудов Всеросс. науч. конф. 26-28 октября 2015 г., Москва: МИЭМ НИУ ВШЭ. С. 58-60.
8. *Бенедик А.И., Рожнёв А.Г., Рыскин Н.М., Синицын Н.И., Торгашов Г.В., Шалаев П.Д.* // Радиотехника. 2016. № 7. С. 47-52.
9. *Shen F., Wei Y.-Y., Xu X., Liu Y., Yin H.-R., Gong Y.-B., Wang W.-X.* 140-GHz // J. Electromag. Waves Appl. 2012. Vol. 26. No. 1. P. 89-98.
10. *Sumathy M, Augustin D, Datta S.K., Christie L., Kumar L.* // IEEE Trans. Electron Devices. 2013. Vol. 60. No. 5. P. 1769-1775.
11. *Bai N., Shen M., Sun X.* // IEEE Trans. Electron Devices. 2015. Vol. 62. No. 5. P. 1622-1627.
12. *Bai N., Feng C., Liu Y., Fan H., Shen C., Sun X.* // IEEE Trans. Electron Devices. 2017. Vol. 64. No. 7. P. 2949-2954.

13. *Ulisse G., Krozer V.* // IEEE Electron Device Lett. 2017. Vol. 38. No. 1. P. 126-129.
14. *Shaomeng W., Aditya S.* // 18th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2017), London, United Kingdom 24-26 April 2017.
15. *Galdetskiy A., Rakova E.* // 18th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2017), London, United Kingdom 24-26 April 2017.
16. High Frequency Structure Simulator (HFSS) of ANSYS. [Online]. Available: <http://www.ansoft.com/products/hf/hfss/>
17. Comsol Multiphysics Engineering Simulation Software. COMSOL Inc., Burlington, MA USA. <http://www.comsol.com/products/multiphysics/>
18. Шевчик В.Н., Трубецков Д.И. Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. М.: Сов. радио. 1970.
19. Долов А.М., Кузнецов С.П. // ЖТФ. 2005. Т. 75, №6, С. 126-128.
20. Ryskin N.M., Rozhnev A.G., Starodubov A.V., Serdobintsev A.A., Pavlov A.M., Benedik A.I., Torgashov R.A., Torgashov G.V., Sinitsyn N.I. // IEEE Electron Device Lett. 2018. Vol. 39. No. 5. P. 757-760.
21. Торгашов Р.А., Бенедик А.И., Рыскин Н.М. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2017. Т. 25, № 5. С. 35–46.
22. Ryskin, N.M., Benedik, A.I., Rozhnev, A.G., Sinitsyn, N.I., Torgashov, G.V., Torgashov, R.A. // EPJ Conferences 149, 04027 (2017).
23. Benedik A.I., Karetnikova T.A., Torgashov R.A., Terentyuk A.G., Rozhnev A.G., Torgashov G.V., Ryskin N.M. // Proc. SPIE. 2018. Vol. 10717. Art. No. 95.
24. Бенедик А.И., Каретникова Т.А., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Стародубов А.В., Торгашов Р.А., Торгашов Г.В. // Проблемы СВЧ электроники. Сб. трудов Всеросс. науч. конф. М.: Медиа Паблишер, 2017. С. 16-17.
25. Benedik A.I., Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Sinitsyn N.I., Torgashov G.V., Torgashov R.A. // 18th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2017), London, United Kingdom, 24-26 April 2017.

26. *Ryskin N.M., Benedik A.I., Rozhnev A.G., Sinitsyn N.I., Torgashov R.A., Torgashov G.V.* // 2017 10th UK-Europe-China Workshop on Millimetre Waves and Terahertz Technologies (UCMMT), Liverpool, UK, 11-13 Sept. 2017. 2 p.
27. *Бенедик А.И., Торгашов Р.А., Рыскин Н.М., Синицын Н.И., Торгашов Г.В.* // «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тез. докл. XII Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2017. С. 286-287.