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

Моделирование умножителя частоты терагерцевого диапазона с ленточным электронным пучком

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 411 группы
направления 03.03.01 «Прикладные математика и физика»
факультета нелинейных процессов
Плоских Андрея Эдуардовича

Научный руководитель
ассистент, к.ф.-м.н. _____ Каретникова Т.А.
Зав. кафедрой нелинейной физики
профессор, д.ф.-м.н. _____ Рыскин Н.М.

Саратов 2017 год

ВВЕДЕНИЕ

Получение компактных источников терагерцевого (0.1 – 1.0 ТГц) излучения средней мощности (10-100 Вт) в настоящее время является одной из важнейших задач радиофизики и электроники. Это связанно с рядом фундаментальных особенностей ТГц-излучения: ТГц-излучение обладает высокой проникающей способностью и позволяет получать контрастное изображение, но обладает гораздо меньшим ионизирующим воздействием, нежели рентгеновское излучение; широкий диапазон частот привлекателен для систем передачи информации; колебательные и вращательные спектры многих веществ лежат в данном диапазоне частот. Поэтому такие приборы могут широко применяться во многих областях, таких как безопасность и противодействие терроризму, медицина, спектроскопия, информационно-коммуникационные системы, радиоастрономия.

Главная проблема разработки таких источников заключается в необходимости использовать электронные пучки (ЭП) высокой плотности тока (до 400-500 А/см^2), что трудно достижимо для современных термокатодов. Поэтому активно изучаются приборы, в которых используются ЭП с большим поперечным сечением и пространственно-развитые электродинамические системы. В частности, создание приборов на основе замедляющих систем (ЗС) типа плоских ребенок с ленточными ЭП.

В ТГц диапазоне такие мощности могут обеспечить миниатюрные вакуумные усилители и генераторы [1-2]. Например, в G-диапазоне (0.22 ТГц) получены уровни мощности свыше 50 Вт с помощью ламп бегущей волны (ЛБВ) с ленточным электронным пучком и замедляющей системой (ЗС) в виде плоский гребенки [3]. Главная проблема состоит в том, что для достижения таких высоких мощностей требуется источник входного сигнала мощностью несколько Вт. В суб-ТГц диапазоне частот подобные источники труднодоступны. Поэтому в ряде работ использовались клистроны с распределенным взаимодействием, однако эти приборы

являются узкополосными, поэтому высокая мощности получена практически на фиксированной частоте.

Для решения этой проблемы применяются приборы типа умножителей частоты. В частности, в нашей научной группе разрабатываются ЛБВ G-диапазона с ленточным электронным пучком [4-6].

Целью данной работы является разработка замедляющей системы типа сдвоенной гребенки в прямоугольном волноводе с плоским электронным пучком для приборов ЛБВ W-диапазона (95-110 ГГц), а также проектирование умножителя частоты с данной ЗС. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

- Подбор и оптимизация геометрических параметров ЗС
- Расчет и сравнительные исследования основных характеристик ЗС;
- Исследование умножителя частоты с данной ЗС.

Выпускная квалификационная работа состоит из Введения, трех глав, Заключения и Списка литературы. В главе 1 представлено устройство и принцип действия замедляющей системы типа сдвоенной гребенки в прямоугольном волноводе с плоским электронным пучком, описан метод моделирования и компьютерного расчета данной системы. Показаны исследования различных показателей ЗС в зависимости от ее геометрических параметров. Получены оптимальные размеры ЗС. В главе 2 приводятся основные уравнения, которые используются при моделировании ЛБВ-умножителя. Введены такие понятия, как коэффициент редукции, поперечное волновое число в канале, параметр усиления Пирса и параметр пространственного заряда. В 3 главе представлены результаты моделирования умножителя частоты с исследуемой ЗС при оптимальных параметрах. Исследованы различные размеры секций умножителя, рассмотрены результаты при входных сигналах разной мощности.

В Заключении сформулированы основные результаты и выводы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении описывается актуальность работы, основные сферы и причины применения приборов терагерцевого диапазона, а так же основные проблемы сознания подобных приборов. Происходит постановка задач, решение которых является целью данной работы.

Глава 1 посвящена описанию модели замедляющей системы типа сдвоенной гребенки прямоугольном волноводе с плоским электронным пучком, для ЛБВ диапазона 95-110 ГГц.

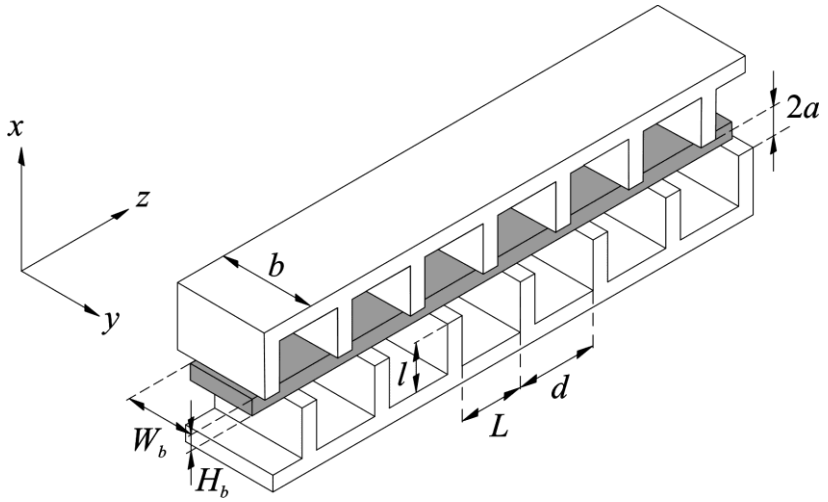


Рис. 1. Схема ЗС типа сдвоенной гребенки и ленточным электронным пучком.

Кратко описаны устройство, принцип действия ЛБВ. Рассмотрено устройство исследуемой ЗС (Рис. 1). Она представляет собой две гребенки, сдвинутые на половину периода по оси Z относительно друг друга (Рис. 1). Такой сдвиг позволяет получить наиболее широкую полосу пропускания, так как происходит смыкание первой и второй мод, что является нормальным для систем со скользящей плоскостью симметрии.

Описаны методы компьютерного моделирование гребенок, приведены уравнения для ветров электрического $\vec{E}$ и магнитного $\vec{H}$ полей:

$$\vec{E}(x,y,z) = E_x(x,z)\sin(\kappa_y y)\,\vec{x}_0 + E_y(x,z)\cos(\kappa_y y)\,\vec{y}_0 + E_z(x,z)\sin(\kappa_y y)\,\vec{z}_0,$$

$$\vec{H}(x,y,z) = H_x(x,z)\cos(\kappa_y y)\,\vec{x}_0 + H_y(x,z)\sin(\kappa_y y)\,\vec{y}_0 + H_z(x,z)\cos(\kappa_y y)\,\vec{z}_0,$$

где $\vec{x}_0$, $\vec{y}_0$ и $\vec{z}_0$ — единичные орты прямоугольной системы координат, $\kappa_y = \pi n_y / b$ — волновое число в y-направлении, n_y — число вариаций поля по y-направлению (для основной моды $n_y = 1$).

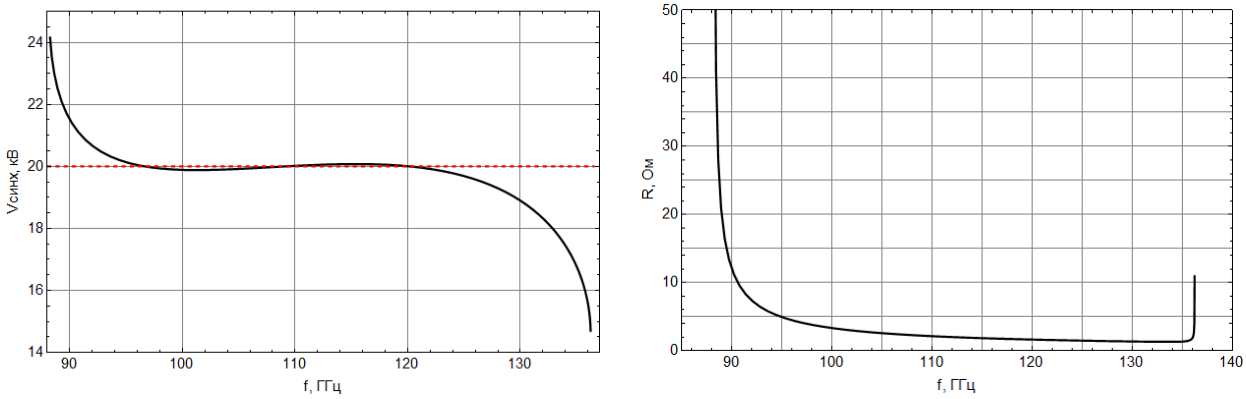
Подробно методика моделирования замедляющей системы описана в статье [5].

Были исследованы зависимости напряжения синхронизма и сопротивления связи от частоты при различных геометрических параметрах ЗС.

Оптимизированные параметры гребенок представлены в Таблице 1. Геометрические размеры побирались таким образом, чтобы при напряжение пучка около 20кВ, обеспечивался синхронизм в достаточно широкой полосе частот

Таблица 1. Геометрические параметры гребенки

Период *d*, мкм	1030	Глубина резонатора *l*, мкм	620
Ширина резонатора *L*, мкм	830	Высота канала 2*a*, мкм	200
Толщина штыря *s*, мкм	200	Ширина канала *b*, мкм	1700



(а) (б)

Рис. 2. Зависимость от частоты напряжения синхронизма с линией электронного пучка (а) и сопротивления связи (б)

Из Рис.2а хорошо видно, что при данных параметрах синхронизм обеспечивается в широком диапазоне частот (95-120ГГц). Так же на Рис.2б показано, что сопротивление связи порядка 4 Ом на частоте 100ГГц.

В Главе 2 представлены основные уравнения для численного моделирования умножителя частоты. Используется аппарат многочастотной нелинейной теории ЛБВ [7]. Уравнения электронов имеют вид

$$\frac{d^2\phi_i}{d\xi^2} = -\left(1 + C\frac{d\phi_i}{d\xi}\right)^3 \times \left[\sum_{k=1}^{N_F} F_k \exp\left(k\phi_i\right) + i\sum_{k=1}^{N_H} \frac{q_k}{k} J_k \exp\left(k\phi_i\right)\right].$$

Здесь ϕ_i — фазы «крупных частиц», $\xi = \beta_e Cz$ — безразмерная координата, $\beta_e = \omega/v_0$ — электронная постоянная распространения, C — параметр усиления Пирса, F_k — амплитуды гармоник ВЧ-поля,

$$J_k = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} \exp\left(-ik\phi\right) d\phi_0$$

— гармоники ВЧ-тока. $q_k = \left(\omega_{qk}/\omega C\right)^2$ — параметр пространственного заряда (ПЗ) для соответствующей гармоники (здесь учтено, что разные гармоники имеют различный коэффициент редукции сил ПЗ), N_F и N_H — число учитываемых гармоник поля и тока соответственно. При расчетах учитываются 4-5 гармоник тока; дальнейшее увеличение N_H не оказывает влияния на результаты.

Уравнения возбуждения гармоник ВЧ-поля имеют вид

$$\frac{dF_k}{d\xi} + k\left(d_k - ib_k\right)F_k = -k^2\left(1 + b_k C\right)^2 \delta_k J_k .$$

Здесь d_k и b_k — параметры затухания и рассинхронизма для соответствующей гармоники, δ_k — отношение сопротивления связи k-й гармоники к сопротивлению связи 1-й гармоники [7].

Введены такие понятия, как коэффициент редукции, поперечное волновое число в канале, параметр усиления Пирса и параметр пространственного заряда.

В Главе 3 содержатся результаты моделирования ЛБВ-умножителя, схема которого представлена на рис. 3. Прибор состоит из трех секций. Во входной секции сигналом на частоте ω происходит модуляция электронного пучка. Затем пучок попадает в секцию дрейфа, где электроны

группируются в плотные сгустки. Стоит отметить, что группировка носит нелинейный характер, вследствие чего в спектре возбуждаются высшие гармоники. Сгруппированный ток возбуждает выходную секцию на частоте второй гармоники 2ω.

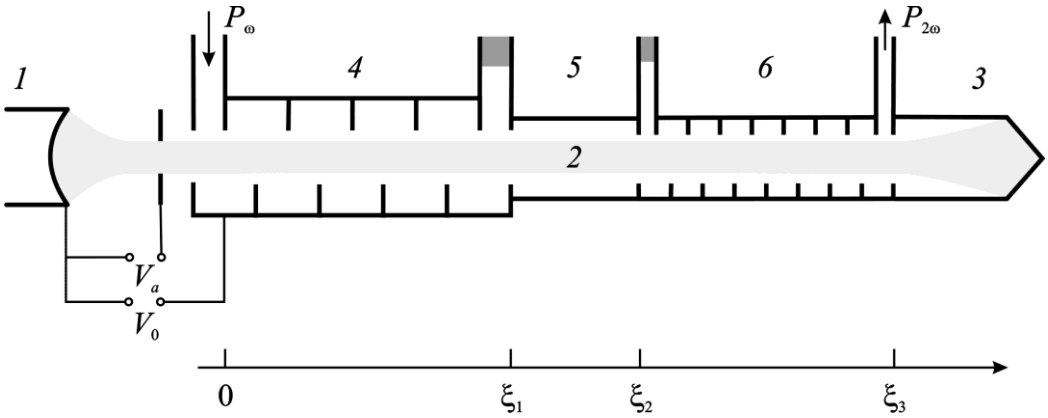


Рис. 3. Схема ЛБВ-умножителя: 1 — электронная пушка; 2 — ленточный электронный пучок; 3 — коллектор; 4 — входная (модулирующая) секция; 5 — секция дрейфа; 6 — выходная секция.

Параметры входной секции были приведены в Таблице 1. В Таблице 2 представлены параметры выходной секции, которые выбирались в соответствии с данными работ [4-6]. Размеры и напряжение пучка для обеих секций, одинаковы.

Таблица 2. Геометрические параметры выходной секции

Период *d*, мкм	500	Глубина резонатора *l*, мкм	300
Ширина резонатора *L*, мкм	400	Высота канала 2*a*, мкм	200
Толщина штыря *s*, мкм	100	Ширина канала *b*, мкм	850

На Рис.4 показано, что синхронизм с электронным пучком наблюдается и на частоте 100ГГц и на частоту 220ГГц

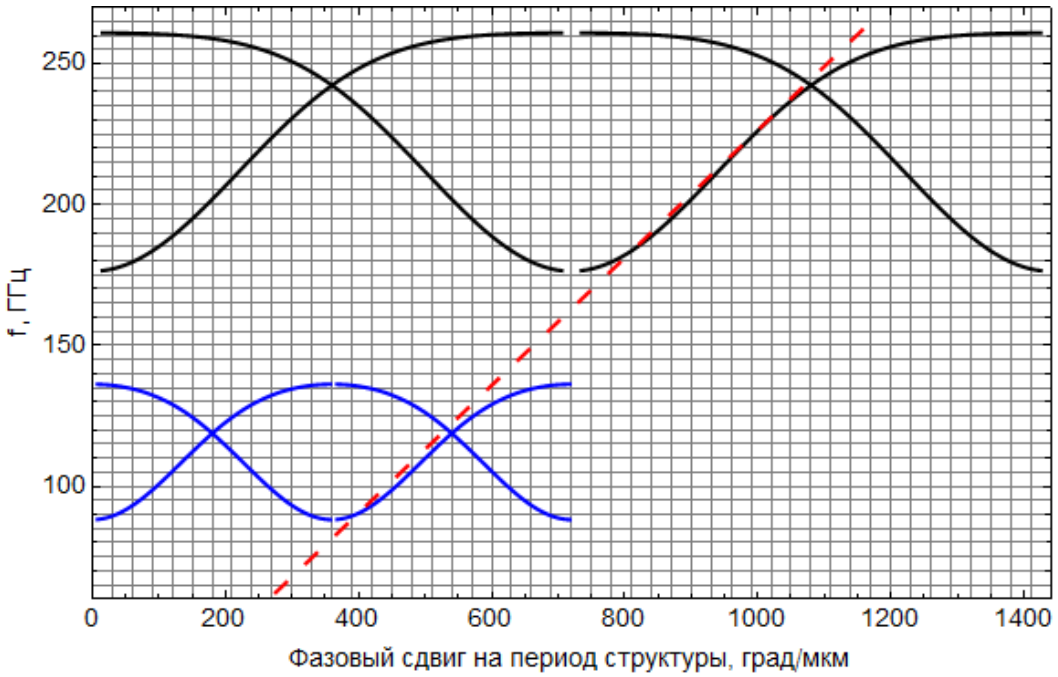
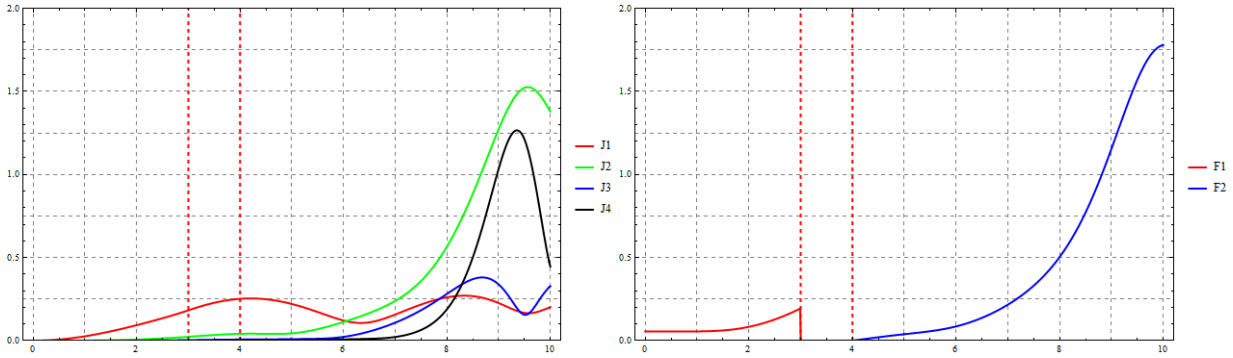


Рис. 4. Дисперсионные характеристики входной (нижняя) и выходной (верзхняя) секции с наложеной линией электронного пучка.

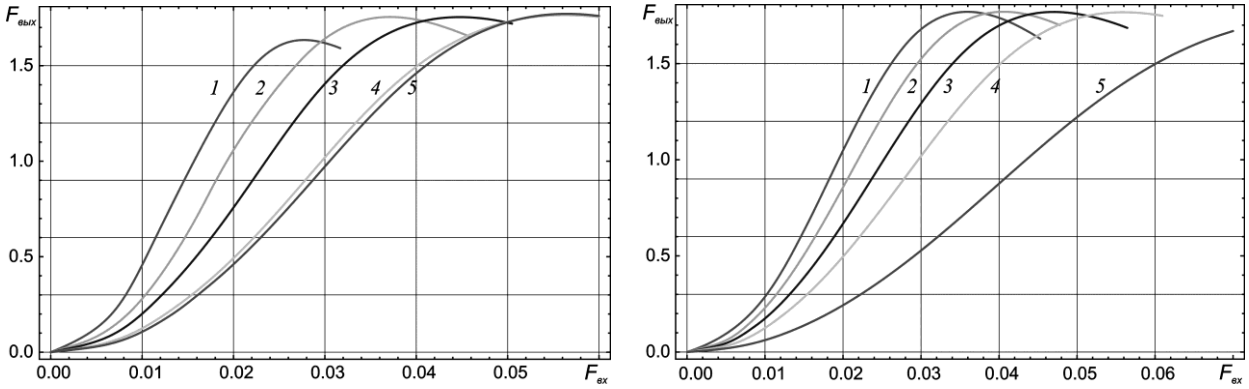


(а) (б)

Рис. 5. Зависимость амплитуд гармоник тока (а) и поля (б) вдоль системы при $\xi_1 = 3$, $\xi_2 = 4$, $\xi_3 = 10$, пунктирами отмечена область дрейфа.

Так же, в главе 3 исследованы амплитудные характеристики, проанализированы основные гармоники тока и поля вдоль системы (рис. 5). В первой секции происходит группировка электронов, и рост амплитуды первой гармоники тока. Так же наблюдается незначительное усиление поля. К концу первой секции начинается возбуждение второй гармоники тока, за счет нелинейности. В секции дрейфа продолжается группировка и рост гармоники тока. Поле первой гармоники равно нулю, в дальнейшем зависимость $J_1(\xi)$ носит осциллирующий характер, что отражает биения быстрой и медленной волн пространсвенного заряда. Сгруппированный ток

второй гармоники возбуждает выходную секцию. Происходит интенсивное взаимодействие и усиление поля. Одновременно происходит нарастание четвертой гармоники тока, за счет квадратичной нелинейности, амплитуда третьей гармоники остается относительно небольшой.



(а) (б)

Рис. 6. Зависимости выходного сигнала от входного: (а) при различных длинах входной секции $\xi_1 = 5.0$ (*1*), 4.0 (*2*), 3.5 (*3*), 3.0 (*4*), 2.0 (*5*) и фиксированной длине секции дрейфа $\xi_{dr} = 1.0$; (б) при фиксированной длине входной секции $\xi_1 = 3.0$ и различных длинах секции дрейфа $\xi_{dr} = 0.25$ (*1*), 0.5 (*2*), 0.75 (*3*), 1.0 (*4*), 1.5 (*5*)

Приведены исследования зависимость выходного сигнала от длин секций. Исследования показали, что с увеличением длины первой секции скорость нарастания выходного сигнала повышается, однако при слишком большой длине максимальная амплитуда выходного сигнала начинает падать (См. Рис.6а). Аналогичное поведение наблюдается с уменьшением длины пространства дрейфа (см. Рис 6б)

Проведены исследование зависимости амплитуды гармоник поля от длин различных секций: входной секции W-диапазона, секции дрейфа и выходной секции G-диапазона. Длину секции дрейфа нужно стараться уменьшить, а длину выходной секции выбирать такую, чтобы на выходе получалась максимальная амплитуда поля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. Была разработана оптимизированная замедляющая система типа сдвоенной гребенки в прямоугольном волноводе с плоским электронным пучком. Получены оптимальные геометрические и электродинамические параметры ЗС для использования ее в приборах ЛБВ диапазона 95-110 ГГц. Был обеспечен синхронизм с электронным пучком в широком диапазоне частот (95-120 ГГц).
2. Для полученной замедляющей системы исследованы основные характеристики усилителя, такие как параметр Пирса и параметр пространственного заряда. Данные сравнивались с аналогичными параметрами для выходной секции в ЛБВ-умножителе.
3. Промоделированы выходные характеристики ЛБВ-умножителя с рассмотренной замедляющей системой. Изучены зависимости амплитудных характеристик прибора от длин входной секции и секции дрейфа.

Таким образом, полученные результаты работы свидетельствуют о возможности создания умножителя частоты в терагерцевом и субтерагерцевом диапазонах частот, использующего существующие источники входного сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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, No. 9. P. 4020-4027.
2. Srivastava V. THz vacuum microelectronic devices // J. Physics: Conf. Series. 2008. Vol. 114. No.1. 012015.
3. Baig A., Gamzina D., Kimura T., Atkinson J., et al. Performance of a nano-CNC machined 220-GHz traveling wave tube amplifier // IEEE Trans. Electron Devices. 2017. Vol. 64. No. 5. DOI: 10.1109/TED.2017.2682159
4. Рожнёв А.Г., Рыскин Н.М., Каретникова Т.А., Торгашов Г.В., Синицын Н.И., Шалаев П.Д., Бурцев А.А. Исследование характеристик замедляющей системы лампы бегущей волны миллиметрового диапазона с ленточным электронным пучком // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56. № 8-9. С. 601-613.
5. Каретникова Т.А., Рожнёв А.Г., Рыскин Н.М., Торгашов Г.В., Синицын Н.И., Григорьев Ю.А., Бурцев А.А., Шалаев П.Д. Моделирование лампы бегущей волны субтерагерцевого диапазона с замедляющей системой типа сдвоенной гребенки и ленточным электронным пучком // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 1. С. 54-60.
6. Каретникова Т.А., Рожнёв А.Г., Рыскин Н.М., Белов К.В. Анализ усиления в приборах О-типа терагерцевого диапазона с ленточным электронным пучком // Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы научно-технической конференции. Саратов: СГТУ, 2016. Т. 1. С. 58-62.
7. Кац А.М., Ильина Е.М., Манькин И.А. Нелинейные явления в СВЧ приборах О-типа с длительным взаимодействием. М.: «Сов. радио». 1975. 296 с.