

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра нелинейной физики  
наименование кафедры

**Моделирование вакуумных усилителей суб-ТГц диапазона с ленточным  
электронным потоком**

**АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТРСКОЙ РАБОТЫ**

Студента 2 курса 214 группы

направления 03.04.01 «Прикладные математика и физика»  
код и наименование направления

факультета нелинейных процессов  
наименование факультета

Плоских Андрея Эдуардовича  
фамилия, имя, отчество

Научный руководитель  
профессор, д.ф.-м.н  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
дата, подпись

Н.М. Рыскин  
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой:  
доцент, к.ф.-м.н.  
\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
дата, подпись

Е.Н. Бегинин  
инициалы, фамилия

Саратов 2019 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Создание компактных источников субтерагерцевого (0.1–0.3 ТГц) и терагерцевого (0.3–3.0 ТГц) излучения средней мощности (10–100 Вт) в настоящее время является одной из важнейших задач радиофизики и электроники. Это связано 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 [1,2]; 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 [1–3].

В суб-ТГц диапазоне высокие уровни мощности могут обеспечить миниатюрные вакуумные усилители и генераторы [3–6]. Главная проблема разработки подобных источников заключается в необходимости использовать электронные пучки высокой плотности тока (до 400–500 А/см<sup>2</sup>), что трудно достижимо для современных термоэмиссионных катодов. Поэтому в настоящее время активно изучаются приборы, в которых используются электронные пучки с большим поперечным сечением и пространственно-развитые электродинамические системы. В частности, привлекли внимание приборы типа лампы бегущей волны (ЛБВ) с замедляющими системами (ЗС) типа плоских гребенок с использованием ленточных [7–9] или многолучевых [10–12] электронных пучков (ЭП). Например, в ЛБВ с ленточным ЭП в G-диапазоне (0.22 ТГц) недавно был достигнут уровень мощности свыше 50 Вт [13].

Коллективом сотрудников СГУ имени Н.Г. Чернышевского, АО «НПП «Алмаз» и Саратовского филиала ИРЭ РАН на протяжении ряда лет разрабатываются ЛБВ с ленточным электронным пучком и замедляющей

системой в виде двух гребенок, сдвинутых друг относительно друга на половину периода [14-18]. Расчеты усиления в нелинейном режиме показывают возможность получения выходной мощности порядка 60-80 Вт в режиме насыщения на частоте около 0.2 ТГц. Однако для этого требуется достаточно большая мощность входного сигнала (порядка 1 Вт). Широкополосные источники такого уровня мощности в суб-ТГц диапазоне труднодоступны.

Была разработана электронная пушка с катодом, погруженным в магнитное поле, которая формирует прямолинейный ленточный ЭП сечением  $0.1 \times 0.75$  мм и плотностью тока до  $120 \text{ А/см}^2$ . Однако такой катод может работать только в импульсном режиме с высокой скважностью. Также для фокусировки пучка требуется очень высокое магнитное поле  $B_0=1.12$  Тл. В качестве еще одного недостатка можно указать малое сопротивление связи  $R_c$ . При высоте канала  $2a=0,2$  мм усредненное по сечению пучка  $R_c$  не превышает 1 Ом; на частоте 0.2 ТГц оно составляет примерно 0.35 Ом.

Поэтому актуальной задачей является исследование способов улучшения характеристик подобной ЛБВ (снижение плотности тока на катоде, повышение коэффициента усиления, выходной мощности и т.д.).

**Целью** данной работы является теоретический анализ способов улучшения характеристик приборов ЛБВ G-диапазона (0.1–0.3 ТГц) с ЗС типа сдвоенной гребенки с ленточным электронным пучком. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- Моделирование электродинамических характеристик замедляющей системы типа сдвоенной гребенки миллиметрового диапазона при заданных ограничениях на геометрические размеры системы и электрические параметры;
- Моделирование выходных характеристик ЛБВ суб-ТГц диапазона частот со сходящимся ленточным ЭП;
- Моделирование выходных характеристик ЛБВ суб-ТГц диапазона с многолучевым ленточным ЭП.

**Научная новизна** работы состоит в том, что в ней изучаются новые возможности улучшения характеристик ЛБВ диапазона 0.2 ТГц за счет использования электронно-оптической системы с компрессией ленточного электронного пучка, а также за счет использования многолучевого электронного пучка, взаимодействующего с высшей поперечной модой ЗС.

**Научная и практическая значимость** работы состоит в том, что в ней изучены модифицированные конструкции ЛБВ с ЗС типа сдвоенной гребенки, в которых повышается коэффициент усиления ЛБВ в режиме малого сигнала и уменьшается мощность входного сигнала, при котором достигается насыщение выходной мощности. Широкополосные ЛБВ суб-ТГц диапазона с выходной мощностью порядка десятков Ватт могут найти применение, в частности, в системах высокоскоростной беспроводной передачи данных.

**Апробация работы и публикации.** Результаты, полученные в ходе выполнения выпускной квалификационной работы, опубликованы в работах [27-38], а также докладывались на следующих научных конференциях:

- Всероссийские конференции молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», СФ ИРЭ РАН, Саратов, 2017, 2018;
- «Presenting academic achievements to the world», СГУ, Саратов, 2018
- Студенческие научные конференции ФНП СГУ, Саратов, 2017, 2018.
- Школа-конференция «Нелинейные дни в Саратове для молодых», СГУ, Саратов, 2017, 2018.
- VI Международная молодежная научная школа-конференция, посвященная 75-летию НИЯУ МИФИ и 95-летию академика Н.Г. Басова, Москва, 2017.

Результаты работы использовались при выполнении НИР, поддержанных грантом РФФ 17-12-01160 и грантом РФФИ № 18-02-00961.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Работа состоит из трех глав. В главе 1 описана схема ЛБВ с ЗС типа сдвоенной гребенки в прямоугольном волноводе с плоским ленточным ЭП. ЗС представляет собой две гребенки, сдвинутые на половину периода по оси  $z$  относительно друг друга (Рис. 1).

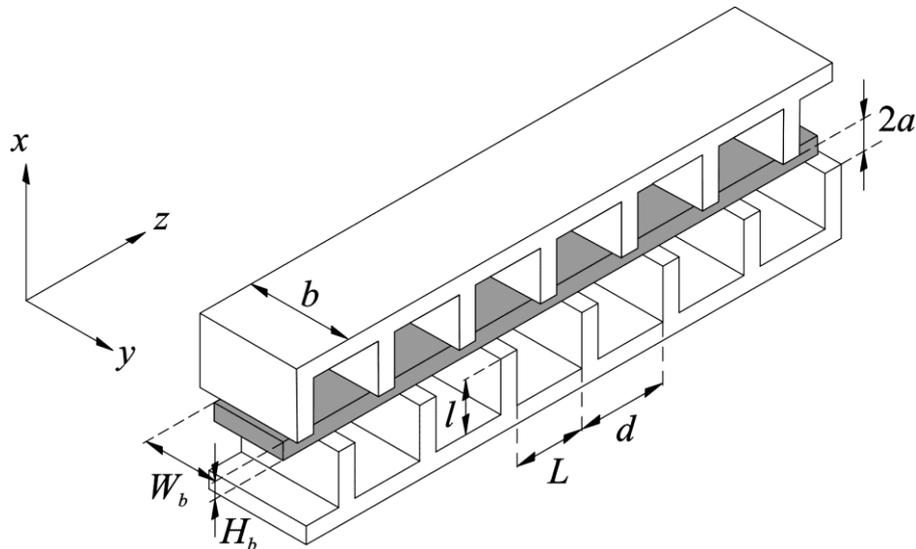


Рис. 1. Схема ЗС типа сдвоенной гребенки и ленточным электронным пучком

Для расчёта электродинамических параметров ЗС используется численный алгоритм, основанный на методе интегрального уравнения, подробно описанный в статье [14]. Геометрические параметры ЗС представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Геометрические параметры замедляющей системы

Период $d$ , мкм	500	Высота штыря $l$ , мкм	300
Ширина резонатора $L$ , мкм	400	Высота пролетного канала $2a$ , мкм	150
Толщина штыря $s$ , мкм	100	Ширина пролетного канала $b$ , мкм	850

На Рис. 2 показана дисперсионная характеристика системы. Для ЗС со сдвигом гребенок на половину периода она состоит из двух ветвей, смыкающихся на  $\pi$ -виде колебаний. За счет этого обеспечивается наиболее широкая полоса пропускания. Также на Рис. 2 приведена характеристика пучка при напряжении 19.75 кВ. Хорошо видно, что при данных параметрах

синхронизм электромагнитной волны с электронным пучком обеспечивается в широком диапазоне частот в середине полосы пропускания. На рис. 3 приведена частотная зависимость сопротивления связи, усредненная по поперечному сечению пучка  $75 \times 750 \text{ мкм}^2$ .

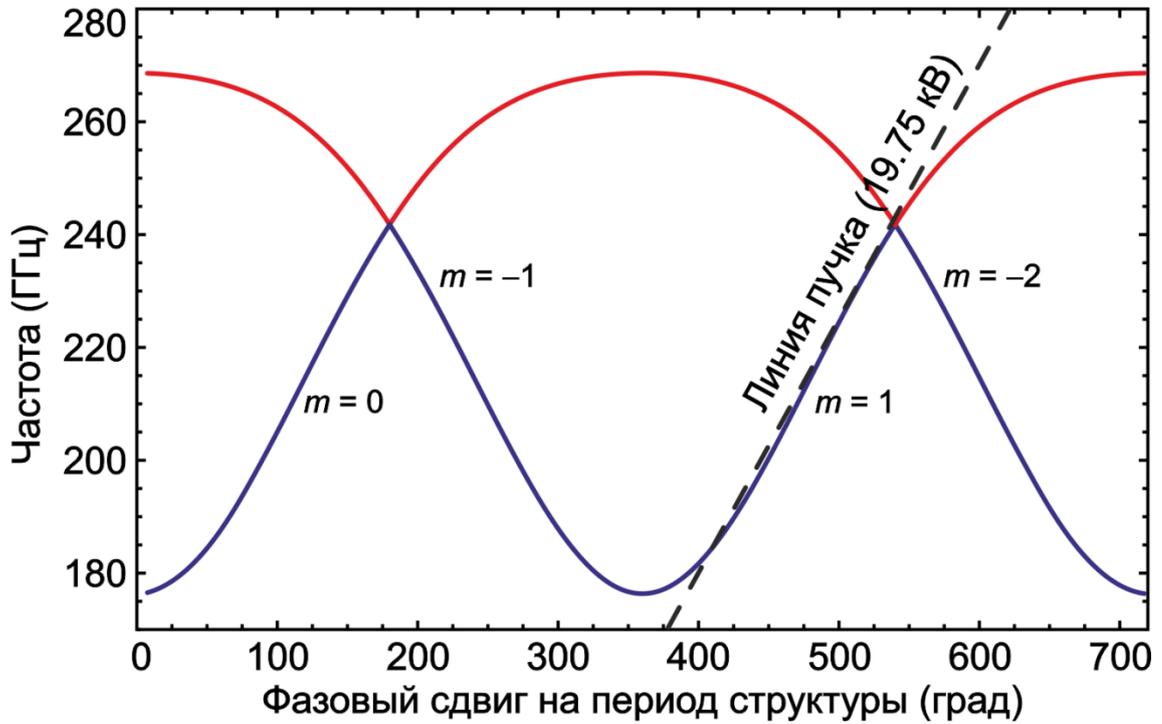


Рис. 2. Дисперсионная характеристика замедляющей системы. Штриховой линией показана характеристика пучка при напряжении 20 кВ.

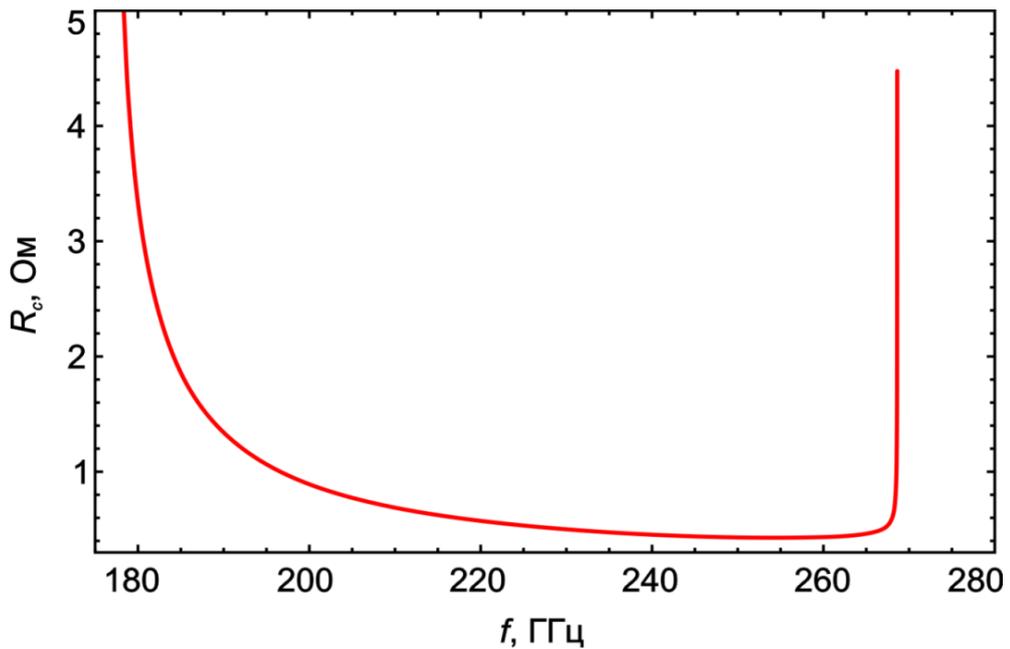


Рис. 3. Зависимость сопротивления связи от частоты

Также в рамках работы было проведено моделирование ЗС W-диапазона. В результате оптимизации размеров ЗС были получены геометрические параметры, при которых обеспечивается эффективное взаимодействие с пучком при напряжении около 20 кВ в диапазоне 95–120 ГГц, (Таблица 2). Результаты исследований ЗС W-диапазона были использованы при разработке прибора типа умножителя частоты со входной (модулирующей) секцией на частоте около 100 ГГц и выходной секцией диапазона 200 ГГц [27,30,34].

Таблица 2. Геометрические параметры ЗС W-диапазона

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

Во **второй** главе представлены результаты моделирования ЛБВ-усилителя со сходящимся ЭП. Использование компрессионной электронной оптики с магнитоэкранированным катодом позволяет существенно снизить плотность тока катода и дает возможность перехода в непрерывный режим работы. В работах [19,20] была разработана конструкция диодной электронной пушки с 10-кратной вертикальной компрессией ленточного электронного пучка. Моделирование при помощи 3D-пакета Lorentz-3EM с учетом теплового и углового разброса на катоде показало, что толщина пучка в канале ЗС составляет 70-75 мкм. В канале высотой 150 мкм обеспечивается транспортировка пучка без его оседания на стенки канала на расстояния свыше 40 мм. Магнитное поле в канале составляет 0.8 Тл. При этом плотность тока на катоде составляет  $26.67 \text{ А/см}^2$ , а плотность тока в канале на оси пучка превышает  $200 \text{ А/см}^2$ .

Были проведены исследования основных выходных характеристик ЛБВ с пучком, параметры которого соответствуют ЭОС, исследованной в работах [19,20]: ток пучка 0.1 А, сечение  $75 \times 750 \text{ мкм}^2$ . Численное

моделирование проводилось на основе известных уравнений самосогласованной линейной и нелинейной теории ЛБВ [18,21,22]. Геометрические параметры ЗС приведены в Таблице 1, соответствующие электродинамические параметры (замедление, сопротивление связи, затухание) выбирались исходя из результатов Главы 1. Длина ЗС составляла 4 см (80 периодов). На рис. 4 представлены зависимости коэффициента усиления малого сигнала от частоты при различных напряжениях электронного пучка. Видно, что при напряжении 19.75 кВ обеспечивается усиление около 25 дБ в широкой полосе частот, превышающей 50 ГГц.

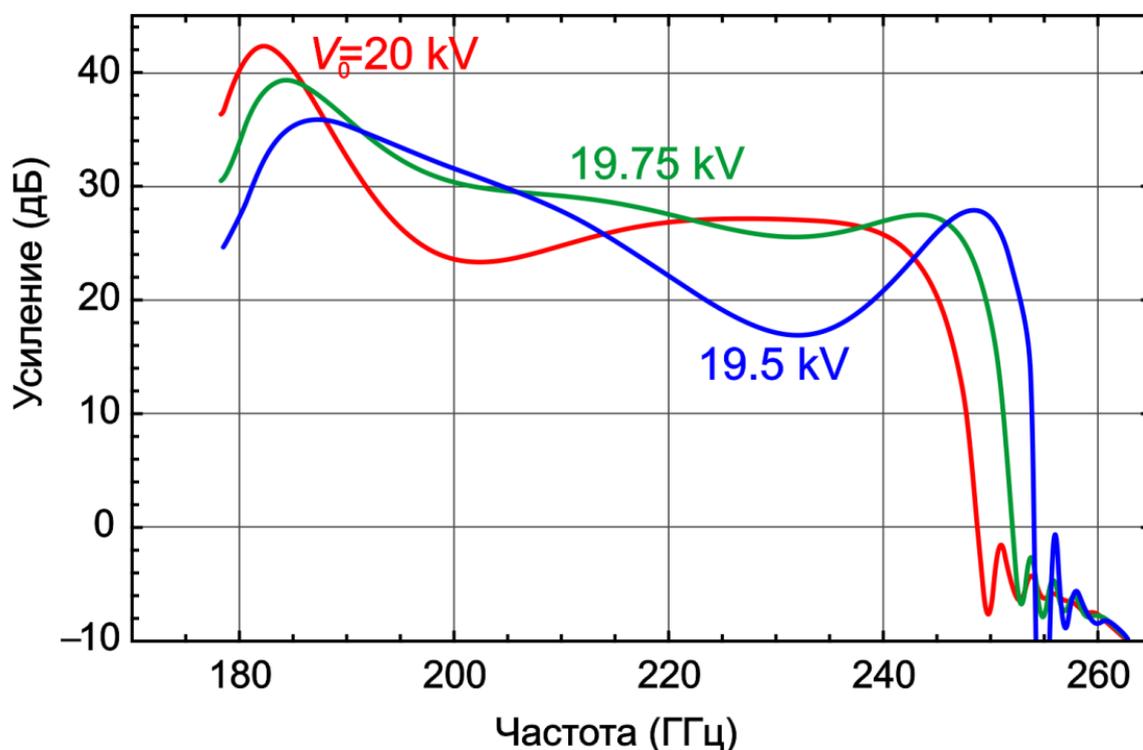


Рис. 4. Зависимости коэффициента линейного усиления от частоты при различных напряжениях электронного пучка.

По сравнению с результатами работы [18], где рассматривалась ЛБВ с прямоточной ЭОС, погруженной в однородное магнитное поле, коэффициент усиления значительно увеличивается. Это обусловлено уменьшением толщины пучка и высоты канала, что, в свою очередь, приводит к увеличению сопротивления связи.

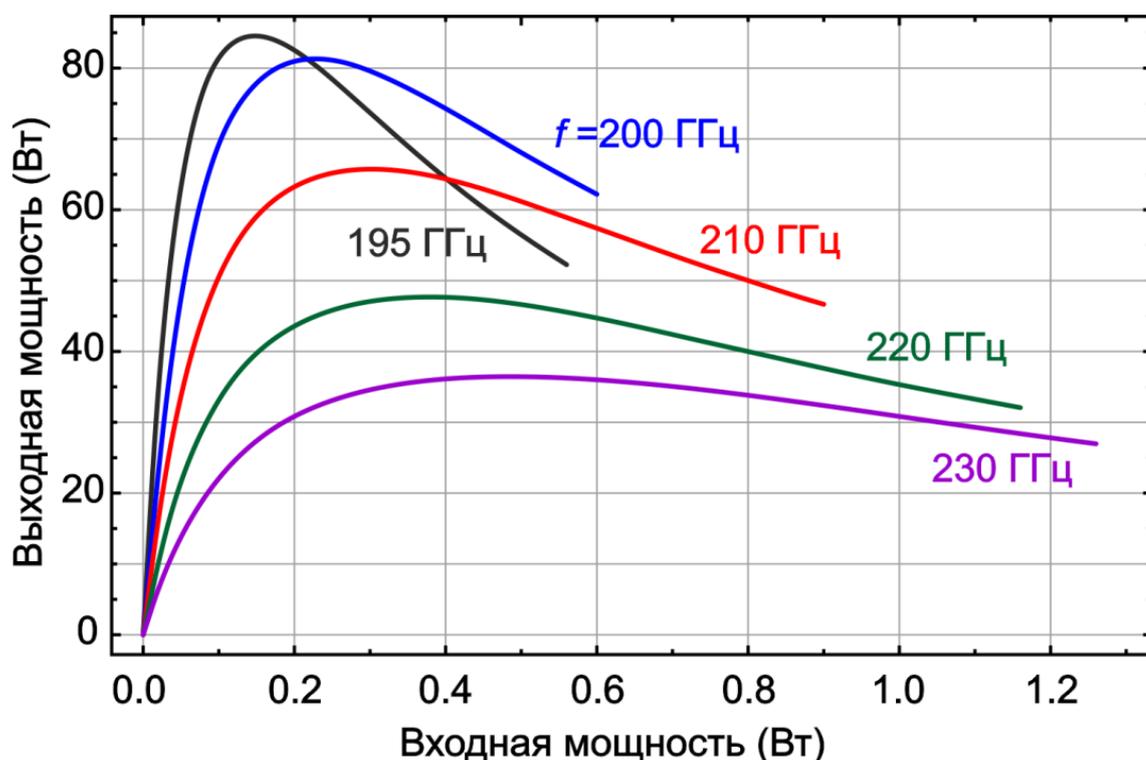


Рис. 5. Зависимость выходной мощности прибора от входной при различных частотах. Ток пучка 0.1 А, напряжение – 19.75 кВ.

На рис. 5 приведены амплитудные характеристики, т.е. зависимости выходной мощности от входной при различных частотах. Выходная мощность в режиме насыщения может достигать 65 Вт, что примерно соответствует результатам [18]. Однако в данном случае насыщение достигается при уровнях входной мощности 0.1-0.2 Вт, что примерно на порядок меньше, чем в [18].

В **третьей главе** рассматривается ЛБВ-усилитель с многолучевым ЭП, состоящим из трех лучей эллиптического сечения. В [23-25] была разработана электронно-оптическая система (ЭОС), формирующая ЭП, состоящий из трех лучей эллиптической формы. Ток каждого луча составлял около 30 мА при полном токе 93 мА. Такая конструкция позволяет увеличить поперечное сечение ЗС и облегчить фокусировку пучка.

В ЛБВ с ленточным однолучевым ЭП, рассмотренной в Главе 2, взаимодействие осуществляется с основной поперечной модой, для которой рабочая компонента поля синхронной пространственной гармоники  $E_z$  зависит от поперечной координаты  $y$  как  $E_z \sim \sin(\pi y/b)$ . В то же время,

пучок, состоящий из  $n$  лучей, должен взаимодействовать с высшей поперечной модой, имеющей соответствующее число вариаций поля вдоль оси  $y$ ,  $E_z \sim \sin(\pi ny/b)$ , поскольку коэффициент связи с этой модой максимален [26]. Простые оценки показывают, что такая система имеет тот же коэффициент усиления, что и однолучевая, однако в данном случае постоянная мощность пучка  $P_0 = I_0 V_0$  три раза больше, что приведет к соответствующему увеличению выходной мощности.

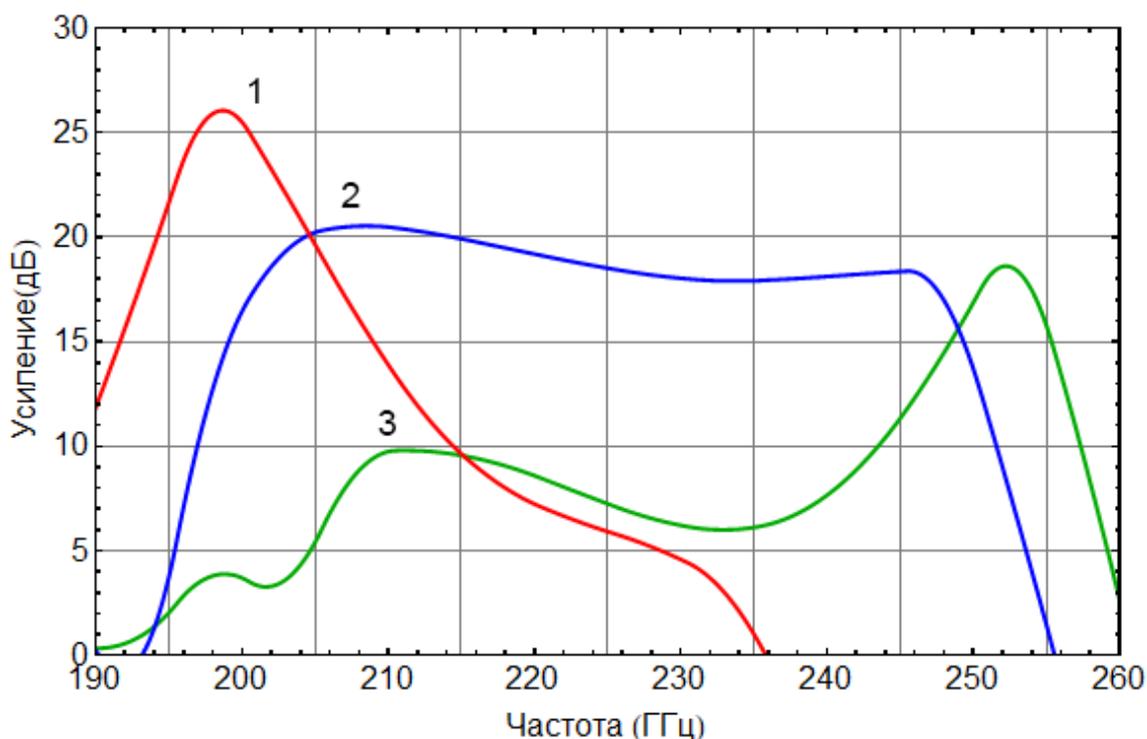


Рис. 6. Зависимости линейного усиления от частоты при различных напряжениях: 21.0 кВ (1), 21.4 кВ (2) и 22.0 кВ (3)

Проводилось моделирование режимов усиления ЛБВ с трехлучевым ЭП. В соответствии с результатами моделирования ЭОС [24] считалось, что в поперечном сечении пучки имеют форму эллипсов с полуосями  $300 \times 37.5$  мкм. Длину ЗС примем равной 40 мм. Ток одного пучка выбирался равным 33.3 мА, т.е. суммарный ток пучка 100 мА. При этом плотность тока в канале ЗС составляет около  $95 \text{ А/см}^2$ . На рис. 6 приведены зависимости коэффициента линейного усиления  $G$  от частоты  $f$  при различных напряжениях  $V_0$ . При  $V_0 = 21.0$  кВ точка синхронизма лежит вблизи нижней

границы полосы пропускания ЗС, где сопротивление связи велико. Соответственно, в этой области, на частоте  $f \approx 197$  ГГц наблюдается максимум коэффициента усиления, который составляет около 26 дБ. Наиболее широкая полоса усиления обеспечивается при  $V_0 = 21.4$  кВ, когда синхронизм достигается в широкой полосе частот. По форме эти зависимости аналогичны представленным на рис. 4.

Также проводилось моделирование нелинейных режимов работы прибора. На рис. 7 приведены зависимости выходной мощности  $P$  от частоты  $f$  при различных значениях входной мощности  $P_{in}$ , построенные при напряжении 21.4 кВ. При  $P_{in} = 3$  Вт выходная мощность составляет около 40 Вт в широкой полосе частот 210-250 ГГц. Соответствующее значение входной мощности является довольно высоким, что объясняется низким коэффициентом усиления. Источники входного сигнала с таким уровнем мощности в суб-ТГц диапазоне труднодоступны. Однако данную ЛБВ можно использовать в составе двухкаскадного усилителя с целью повышения мощности.

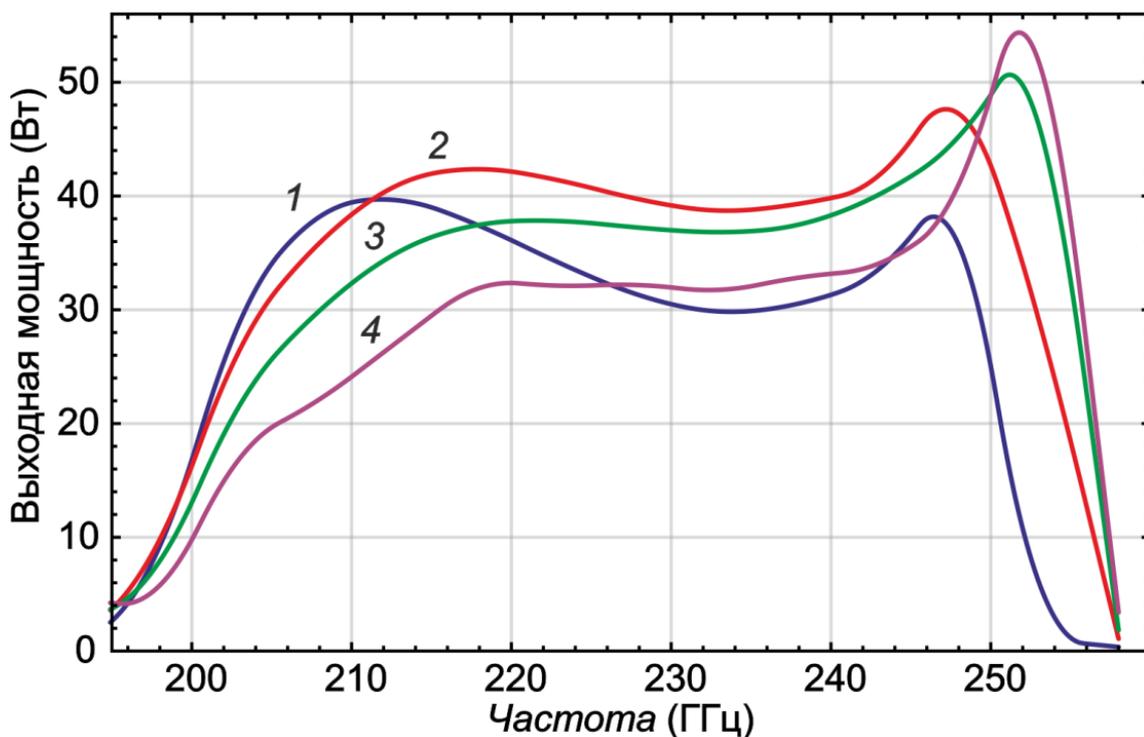


Рис. 8 Зависимости выходной мощности от частоты при напряжении 21.4 кВ и различной входной мощности:  $P_{in} = 1$  Вт (1), 3 Вт (2), 5 Вт (3) и 9 Вт (4)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была рассмотрена возможность создания ЛБВ-усилителей диапазона 0.22 ТГц с ЗС в виде сдвоенных гребенок и различными типами ЭОС.

Проведено проектирование ЗС диапазона 200 ГГц, состоящей из двух гребенок, сдвинутых на половину периода. Найдены геометрические параметры, при которых обеспечивается синхронизм с электронным пучком с напряжением около 20 кВ в широкой полосе частот. Рассчитаны основные электродинамические характеристик такой ЗС (замедление, сопротивление связи, затухание).

Проведено моделирование выходных характеристик ЛБВ с ленточным ЭП с током 0.1 А, толщиной 75 мкм. Подобные параметры ЭП обеспечиваются в ЭОС со сходящимся пучком и магнитоэкранированным катодом [19,20]. Использование компрессионной ЭОС позволяет уменьшить высоту канала ЗС до 150 мкм (по сравнению с 200 мкм в ЛБВ с прямоочной ЭОС, погруженной в однородное магнитное поле [17,18]) и, соответственно, увеличить сопротивление связи примерно в 2.5 раза. В результате оказывается возможным достичь линейного усиления свыше 25 дБ в широкой полосе частот (180-240 ГГц). Выходная мощность в режиме насыщения около 65 Вт достигается на частоте 195 ГГц при входной мощности 0.1-0.2 Вт, что примерно на порядок меньше, чем в [18].

Проведено моделирование выходных характеристик ЛБВ-усилителя с ЭОС, формирующей ЭП, состоящий из трех лучей эллиптической формы. Пучок взаимодействует с высшей поперечной модой ЗС, имеющей три вариации поля вдоль широкой стенки канала. Такая пространственно-развитая конструкция приводит к дальнейшему увеличению поперечного сечения прибора и способствует снижению плотности тока, что открывает возможность перехода к непрерывному режиму работы. Также, согласно [23-25], облегчается фокусировка пучка магнитным полем. Согласно расчетам, при общем токе пучка 100 мА мощность составляет около 40 Вт в широкой полосе частот (210-250 ГГц).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Siegel P.H. Terahertz technology // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 2002. Vol. 50. No. 3. P. 910-928.
2. Siegel P.H. Terahertz technology in biology and medicine // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 2004. Vol. 52. No. 10. P. 2438-2447.
3. Dhillon S.S., Vitiello M.S., Linfield E.H., Davies A.G., et al. The 2017 terahertz science and technology roadmap // *J. Phys. D, Appl. Phys.* 2017. Vol. 50, No. 4. 043001.
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. Vacuum electronic high power terahertz sources // *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2011. Vol. 1. No. 1. P. 54-75.
5. Srivastava V. THz vacuum microelectronic devices // *J. Physics: Conf. Series.* 2008. Vol. 114. No.1. 012015.
6. 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.
7. Shin Y.-M., Barnett L. R., Luhmann N. C. Phase-shifted traveling-wave-tube circuit for ultrawideband highpower submillimeter-wave generation // *IEEE Trans. Electron Devices.* 2009. Vol. 56, № 5. P. 706–712
8. Shin Y. M., Baig A., Barnett L. R., Luhmann N.C., Pasour J., Larsen P. Modeling investigation of an ultrawideband terahertz sheet beam traveling-wave tube amplifier circuit // *IEEE Trans. Electron Devices.* 2011. Vol. 58, № 9. P. 3213–3219.
9. Srivastava V. Nonlinear analysis of beam-wave interaction in a planar THz travelling-wave tube amplifier // *J. Electromagnetic Waves Appl.* 2018. Vol. 32, № 2. P. 190–203
10. Nusinovich G. S., Cooke S. J., Botton M., Levush B. Wave coupling in sheet- and multiple-beam traveling-wave tubes // *Phys. Plasmas.* 2009. Vol. 16, № 6. P. 063102.
11. Gee A., Shin Y.M. Gain analysis of higher-order-mode amplification in a dielectric-implanted multi-beam traveling wave structure // *Phys. Plasmas.* 2013. Vol. 20, № 7. P. 073106.
12. Ruan C., Zhang M., Dai J., Zhang C., Wang S., Yang X., Feng J. W-band multiple beam staggered double-vane traveling wave tube with broad band and high output power // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2015. Vol. 43, № 7. P. 2132–2139.

13. 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. P. 2390-2397.
14. Рожнёв А.Г., Рыскин Н.М., Каретникова Т.А., Торгашов Г.В., Сеницын 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.
15. Каретникова Т.А., Рожнёв А.Г., Рыскин Н.М., Торгашов Г.В., Торгашов И.Г., Сеницын Н.И. Вопросы разработки усилителей и генераторов О-типа субтерагерцевого диапазона частот // Радиотехника. 2014. № 10. С. 46-51.
16. Ryskin N.M., Karetnikova T.A., Rozhnev A.G., Torgashov G.V., Bushuev N.A., Shalaev P.D. Development and modeling of a sheet-beam sub-THz traveling wave tube // Proceedings of 2015 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2015), Beijing, China.
17. Каретникова Т.А., Рожнёв А.Г., Рыскин Н.М., Торгашов Г.В., Сеницын 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.
18. Karetnikova T.A., Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Fedotov A.E., Mishakin S.V., Ginzburg N.S. Gain analysis of a 0.2-THz traveling-wave tube with sheet electron beam and staggered grating slow wave structure // IEEE Trans. Electron Devices. 2018. Vol. 65. No. 6. P. 2129-2134.
19. Бурцев А.А., Данилушкин А.В. Моделирование электронно-оптических систем со сходящимся ленточным пучком для лампы бегущей волны терагерцевого диапазона частот // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44, № 17. С. 78-85.
20. Бурцев А.А., Данилушкин А.В., Сеницын Н.И. Синтез электронно-оптических систем с компрессией ленточного электронного пучка для лампы бегущей волны терагерцевого диапазона // ЖТФ. 2018. Т. 88, № 12. С. 1908-1911.
21. Шевчик В.Н., Трубецков Д.И. Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. М.: Сов. радио. 1970. 584 с.
22. 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.

23. Navrotsky I.A., Burtsev A.A., Kivokurtsev A.Y., Shumikhin K.V., Shalaev P.D., Karetnikova T.A., Ryskin N.M. Development of electron-optical system with three elliptic electron beams for a THz-band vacuum-tube device // 10th UK-Europe-China Workshop on Millimetre Waves and Terahertz Technologies (UCMMT). Liverpool, UK, 2017. DOI: 10.1109/UCMMT.2017.8068467.
24. Навроцкий И. А., Бурцев А. А., Данилушкин А. В. Параметрическое 3D моделирование низкоперевансных эллиптических электронных пучков для приборов ТГц диапазона // Актуальные проблемы электронного приборостроения, материалы междунар. науч.-техн. конф. 2 т. Саратов: СГТУ, 2018. Т. 1. С. 166–169.
25. Навроцкий И.А., Бурцев А.А., Данилушкин А.В., Каретникова Т.А., Рыскин Н.М., Шумихин К.В. Разработка макета ЭОС с эллиптическими пучками для приборов ТГц диапазона // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы междунар. науч.-техн. конф.: в 2 т. Саратов : СГТУ, 2018. Т. 1. С. 170–174.
26. Nusinovich G.S., Cooke S.J. Botton M., Levush B. Wave coupling in sheet- and multiple-beam traveling-wave tubes // Phys. Plasmas. 2009. Vol. 16, No. 6. P. 063102.
27. Белов К.В., Плоских А.Э., Рыскин Н.М. Умножитель субтерагерцевого диапазона на основе лампы бегущей волны с ленточным электронным пучком // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. № 1. С. 16-19.
28. Ploskih A.E., Ryskin N.M., Burtsev A.A., Danilushkin A.V., Navrotsky I.A. Performance improvement of a sub-THz traveling-wave tube by using an electron optic system with a converging sheet electron beam // Results in Physics. 2018. Vol. 12. P. 799-803.
29. Плоских А.Э., Рыскин Н.М. Моделирование лампы бегущей волны суб-ТГц диапазона с многолучевым ленточным электронным пучком // Изв. Сарат. ун-та. Нов. Сер. Физика. 2019. Т. 19. № 2. С. 113-121.
30. Белов К.В., Каретникова Т.А., Плоских А.Э., Рыскин Н.М., Торгашов Г.В. Умножитель диапазона 0,2 ТГц с ленточным электронным пучком // Радиотехника. 2017. № 7. С. 19-23.
31. Бурцев А.А., Данилушкин А.В., Навроцкий И.А., Плоских А.Э., Рыскин Н.М. Моделирование лампы бегущей волны субтерагерцевого диапазона со сходящимся ленточным электронным пучком // Радиотехника. 2018, № 7. С. 8-13.
32. Ryskin N.M., Rozhnev A.G., Ploskih A.E., Burtsev A.A., Navrotsky I.A., Danilushkin A.V. Investigations on 0.2-THz traveling-wave tubes with staggered grating slow-wave structure // 2018 43rd International Conference

- on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 9-14 Sept. 2018, Nagoya, Japan. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2018.8510495.
33. Рыскин Н.М., Рожнёв А.Г., Стародубов А.В., Сердобинцев А.А., Павлов А.М., Галушка В.В., Кожевников И.О., Бурцев А.А., Данилушкин А.В., Навроцкий И.А., Плоских А.Э., Терентюк А.Г., Торгашов Р.А., Торгашов Г.В., Сеницын Н.И. Разработка ламп бегущей волны миллиметрового и терагерцевого диапазонов с пространственно-развитыми замедляющими системами // Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы международной научно-технической конференции. Саратов: СГТУ, 2018. Т. 1. С. 126-130.
  34. Karetnikova T.A., Ryskin N.M., Belov K.V., Ploskih A.E. Simulation of a 0.2 THz second-harmonic multiplier with sheet electron beam // 2017 10th UK-Europe-China Workshop on Millimetre Waves and Terahertz Technologies (UCMMT), Liverpool, UK, 11-13 Sept. 2017. DOI: 10.1109/UCMMT.2017.8068466.
  35. Burtsev A.A., Danilushkin A.V., Navrotsky I.A., Ryskin N.M., Ploskih A.E., Titov V.N. Studies on sub-THz sheet-beam TWT with staggered grating slow-wave structure // 20<sup>th</sup> International Vacuum Electronics Conference. Busan, South Korea, April 29 – May 1, 2019. 2 p.
  36. Плоских А.Э., Рыскин Н.М. Моделирование лампы бегущей волны диапазона 0.2 ТГц со сходящимся ленточным электронным пучком // «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: сборник трудов XIII Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2018. С. 228-229.
  37. Плоских А.Э., Белов К.В., Каретникова Т.А. Умножитель диапазона 0.2 ТГц на основе лампы бегущей волны с ленточным электронным пучком // «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тез. докл. XII Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2017. С. 201-202.
  38. Плоских А.Э., Каретникова Т.А. Анализ электродинамических характеристик лампы бегущей волны W-диапазона // В кн: Современные проблемы физики и технологий. VI Международная молодежная научная школа-конференция, посвященная 75-летию НИЯУ МИФИ и 95-летию академика Н.Г. Басова. 2017. С. 153.