

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

**Секционированные приборы вакуумной электроники терагерцевого
диапазона**

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

аспиранта 4 курса

направления 03.06.01 «Физика и астрономия»

факультета нелинейных процессов

Белова Кирилла Валентиновича

Научный руководитель

заведующий кафедрой динамических систем

на базе СФ ИРЭ РАН, д.ф.-м.н., профессор

_____ Н.М. Рыскин

Саратов 2019

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время общепризнано, что освоение диапазона электромагнитных волн между микроволновым и инфракрасным (100 ГГц и выше) является ключевой проблемой электроники. Источники когерентного излучения ТГц диапазона будут иметь широкие перспективы применения в таких областях, как безопасность и противодействие терроризму (поиск и обнаружение взрывчатых веществ), информационно-коммуникационные системы, радиоастрономия, спектроскопия, медицина. Это обусловлено рядом фундаментальных особенностей ТГц-излучения: в данном диапазоне лежат колебательные и вращательные спектры многих веществ; широкий диапазон частот привлекателен для систем передачи информации; ТГц излучение обладает высокой проникающей способностью и позволяет получать контрастное изображение, но в то же время обладает гораздо меньшим ионизирующим воздействием, чем рентгеновское излучение.

Однако ТГц диапазон на сегодняшний день является наиболее слабо освоенным участком электромагнитного спектра, поскольку в нем одинаково плохо работают как радиоэлектронные, так и оптические приборы. Поэтому разработка относительно мощных источников когерентного ТГц излучения будет иметь огромное значение. Хотя имеются различные подходы к освоению ТГц диапазона (например, с помощью приборов твердотельной или квантовой электроники), не вызывает сомнений, что для достижения уровней мощности порядка нескольких Вт и выше оптимальными являются электровакуумные приборы. Наиболее высокие мощности потенциально способны обеспечить гиротроны и лазеры на свободных электронах, однако они являются громоздкими и дорогостоящими. Компактные источники ТГц диапазона могут быть реализованы на основе миниатюрных аналогов «классических» приборов вакуумной СВЧ электроники: ламп бегущей и обратной волны, клистронов и др.

Миниатюрные приборы вакуумной электроники суб-ТГц диапазона сейчас активно разрабатываются в различных странах. Несмотря на заметные успехи, разработчики приборов столкнулись со значительными проблемами, в первую очередь, с необходимостью использовать электронные пучки с ультравысокой плотностью. Естественный путь преодоления этой проблемы заключается в использовании пространственно-развитых структур и электронных потоков с большим поперечным сечением. В частности, представляют интерес приборы с ленточным электронным потоком и замедляющими системами (ЗС) в виде плоской гребенки. В лампе бегущей волны (ЛБВ) такого типа можно получить уровни мощности свыше 50 Вт на частоте около 0.22 ТГц. Однако для достижения таких высоких уровней мощности требуется источник входного сигнала с мощностью порядка нескольких Вт. В суб-ТГц диапазоне подобные источники труднодоступны.

В связи с отмеченной проблемой, привлекли внимание секционированные приборы, которые содержат входную секцию, служащую для модуляции пучка, секцию дрейфа, в которой осуществляется группировка электронов, и выходную секцию, в которой электронный пучок отдает свою энергию полю. Это могут быть как усилители, так и умножители частоты. Например, в случае умножителя на второй гармонике для получения выходного сигнала в диапазоне 0.2 ТГц требуется источник входного сигнала в значительно более освоенном диапазоне около 0.1 ТГц.

В связи с этим, тема диссертации представляется актуальной для современной радиофизики и вакуумной сверхвысокочастотной электроники.

Цели и задачи работы:

- Исследование перспектив создания миниатюрных секционированных электровакуумных приборов в суб-ТГц диапазоне (0.22 ТГц);
- Разработка программы компьютерного моделирования секционированных приборов с ленточным электронным пучком;

- Построение приближенной аналитической теории секционированного усилителя и расчет коэффициента усиления в линейном и нелинейном режимах;
- Моделирование нелинейных режимов работы умножителя второй гармоники с ленточным электронным пучком и замедляющими системами типа двойной гребенки.

Научная новизна

1. Развита приближенная теория секционированного прибора О-типа. В первой (входной) секции, решается задача о модуляции пучка заданным полем в приближении малого сигнала. Далее на основе теории клистрона решается задача о группировке пучка в секции дрейфа. Затем решается задача о возбуждении выходной секции заданным током (током первой гармоники в случае усилителя или током одной из высших гармоник в случае умножителя).

2. Проведены расчеты характеристик секционированного усилителя О-типа с ленточным электронным пучком диапазона 0.2 ТГц. Найдены параметры, при которых коэффициент усиления составляет около 15 дБ в широком диапазоне частот (200-240 ГГц). При этом в окрестности низкочастотной границы (185 ГГц) усиление может превышать 20 дБ.

3. Предложена конструкция умножителя второй гармоники с ленточным электронным пучком и ЗС типа сдвоенных гребенок. Проведено исследование его выходных характеристик. Найдены параметры, при которых выходная мощность на частоте 190 ГГц превышает 60 Вт, для чего требуется входная мощность порядка 10 Вт на частоте 95 ГГц.

Теоретическая и практическая значимость

В работе развиты приближенные теоретические модели, позволяющие проводить быструю оценку выходных характеристик секционированного прибора (усилителя и умножителя частоты). Проведенное моделирование умножителя второй гармоники диапазона 0.2 ТГц позволило выявить режимы,

характеризующиеся максимальной выходной мощностью и максимальным коэффициентом преобразования мощности входного сигнала.

Практическая значимость связана с тем, что источники когерентного излучения суб-ТГц диапазона с мощностью порядка нескольких десятков Ватт имеют широкие перспективы практического применения в высокоскоростных системах беспроводной передачи данных, в системах радиолокации и спектроскопии высокого разрешения и т.д.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Секционированный усилитель О-типа с ленточным электронным пучком и замедляющими системами типа сдвоенной гребенки имеет более низкий коэффициент усиления, чем лампа бегущей волны с аналогичными параметрами, однако обеспечивает более равномерную частотную зависимость коэффициента усиления в широкой полосе частот.

2. В секционированном приборе – умножителе второй гармоники с ленточным электронным пучком и замедляющими системами типа сдвоенной гребенки для получения максимальной выходной мощности необходимо уменьшать протяженность секции дрейфа до минимально возможных значений. Для прибора диапазона 0.2 ТГц при длине входной секции 10-15% общей длины прибора максимальная выходная мощность составляет 60 Вт при входной мощности около 10 Вт.

3. Для получения максимального коэффициента преобразования мощности входного сигнала в умножителе второй гармоники диапазона 0.2 ТГц с ленточным электронным пучком длина входной секции должна составлять примерно 60-65% длины прибора. При этом во входной секции происходит заметное усиление входного сигнала, который также может быть выведен в полезную нагрузку.

Краткое содержание работы

Работа состоит из трех глав. В **первой** главе развивается приближенная аналитическая теория секционированного усилителя О-типа. Схема прибора приведена на рис. 1.

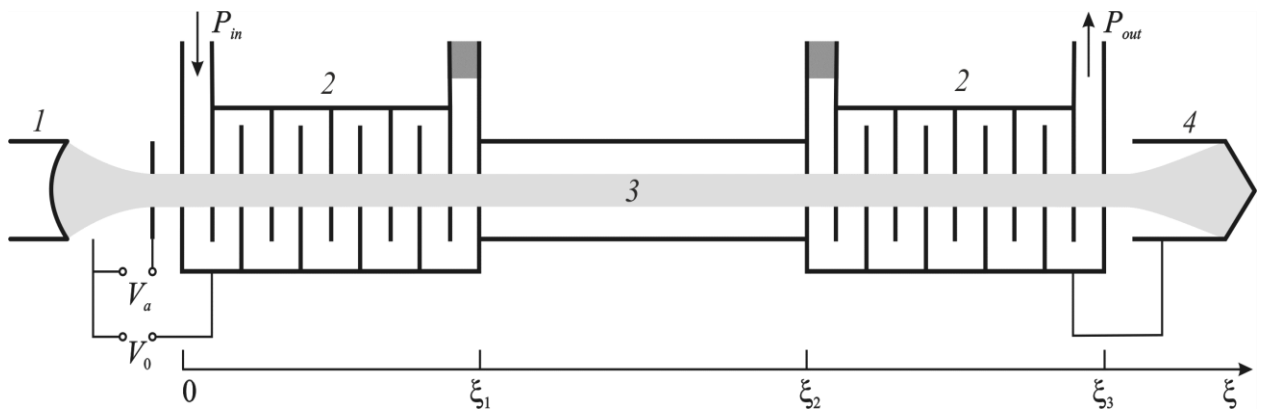


Рис. 1. Схема секционированного усилителя О-типа. 1 — электронная пушка, 2 — замедляющая система, 3 — электронный пучок, 4 — коллектор

Усилитель состоит из трех секций. Во входной и выходной секциях осуществляется взаимодействие прямолинейного электронного пучка с полем замедляющей системы. Между ними располагается свободная от высокочастотных электромагнитных полей секция дрейфа.

Электронный пучок формируется электронной пушкой и ускоряется под действием постоянного напряжения, после чего попадает в замедляющую систему входной секции. На электронный пучок начинает действовать внешнее электромагнитное поле замедленной бегущей волны, которое приводит к модуляции электронов по скоростям и к формированию сгустков. Далее в секции дрейфа происходит дополнительная инерционная группировка электронов в сгустки. На последнем этапе сгруппированный электронный пучок попадает в замедляющую систему выходной секции, где происходит возбуждение электромагнитной волны электрическим током. Сигнал с выхода третьей секции поступает в полезную нагрузку. Электронный пучок, отдав энергию электромагнитной волне оседает на коллекторе.

В 1-й главе развита приближенная аналитическая теория секционированных приборов. Теория строится на основе традиционных уравнений многочастотной нелинейной теории ЛБВ. Модуляция электронного пучка во входной секции ($0 < \xi < \xi_1$, $\xi = \beta_e C z$ — безразмерная координата) рассчитывается в приближении заданного поля согласно линейной теории ЛБВ. На границе входной секции и секции дрейфа фазы электронов описываются следующими аналитическими выражениями:

$$\theta(\xi_1) = \theta_0 + \xi_1^2 \operatorname{Re} \left[F_0 \frac{(e^{i\Phi_1} - i\Phi_1 - 1)}{\Phi_1^2} e^{i\theta_0} \right], \quad (1)$$

$$\frac{d\theta(\xi_1)}{d\xi} = \xi_1 \operatorname{Re} \left[iF_0 \frac{(e^{i\Phi_1} - 1)}{\Phi_1} e^{i\theta_0} \right] \quad (2)$$

Здесь θ_0 — начальная фаза электрона, F_0 — безразмерная амплитуда входного сигнала, Φ_1 — относительный угол пролета. Соотношения (1), (2) позволяют определить фазы и скорости электронов на входе в секцию дрейфа.

Далее рассматривается движение электронов в секции дрейфа $\xi_1 < \xi < \xi_2$. В этой области скорости электронов остаются постоянными, так как пучок не испытывает влияния поля замедленной волны. Их движение хорошо описывается уравнениями из нелинейной теории группировки в пролетном клистроне (с той лишь разницей, что пучок на входе в секцию дрейфа модулирован и по скорости, и по плотности). Зная фазы и скорости электронов на входе в секцию дрейфа, можно получить соотношения, описывающие фазы электронов на выходе из секции дрейфа:

$$\theta(\xi_2) = \theta_0 - \operatorname{Re} \left(X e^{i(\theta_0 + \psi)} \right). \quad (3)$$

Здесь введен комплексный параметр группировки

$$X e^{i\psi} = -F_0 \xi_1^2 \frac{e^{i\Phi_1} - i\Phi_1 - 1 + i\Phi_2 (e^{i\Phi_1} - 1)}{\Phi_1^2}, \quad (4)$$

где Φ_2 — относительный угол пролета в секции дрейфа. Это выражение позволяет найти гармоники сгруппированного тока:

$$I_n = 2i^n J_n(nX) e^{in\psi}. \quad (5)$$

Здесь J_n — функция Бесселя 1-го рода порядка n .

После того, как найден сгруппированный ток, рассчитывается возбуждение выходной секции ($\xi_2 < \xi < \xi_3$) в приближении заданного тока.

Решается уравнение возбуждения

$$\frac{dF}{d\xi} + ib_2 F = I_n(\xi), \quad (0.6)$$

где I_n — соответствующая гармоника тока ($n=1$ в случае усилителя, $n=2,3,\dots$ в случае умножителя), b_2 — параметр рассинхронизма для выходной секции. Уравнение (0.6) решается с граничным условием

$$F(\xi_2) = 0, \quad (0.7)$$

так как сигнал на входе в эту секцию отсутствует. Считая, что выходная секция достаточно короткая и скорости электронов в этой секции не меняются, можно в итоге получить следующее выражение:

$$F(\xi_3) \approx 2i^n \left[(\xi_3 - \xi_2) J_n(nX) - \frac{nF_0 \xi_1 (\xi_3 - \xi_2)^2}{2} J'_n(nX) \right]. \quad (8)$$

Были проведены расчеты для секционированного усилителя диапазона 0.2 ТГц с ленточным электронным пучком и замедляющими системами в виде сдвоенных гребенок. Принципиальная схема данной замедляющей системы представлена на рис. 2. Верхняя и нижняя гребенки сдвинуты друг относительно друга на половину периода; при этом обеспечивается наибольшая ширина полосы пропускания. Основные параметры прибора (характеристики замедляющей системы, параметры пучка) выбирались согласно данным работ.^{1,2} В частности, ток пучка выбран равным 100 мА, ускоряющее напряжение — 20 кВ, частота входного сигнала — 220 ГГц, сечение пучка 150×750 мкм², ширина гребенки $b = 850$ мкм, высота канала $2a = 200$ мкм, период структуры $d = 500$ мкм. Показано, что при точном

¹ Рожнёв А.Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 8-9. С. 601-613.

² Karetnikova T.A. et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2018. Vol. 65. No. 6. P. 2129-2134.

синхронизме коэффициент усиления составляет около 20 дБ. С ростом мощности входного сигнала усиление уменьшается.

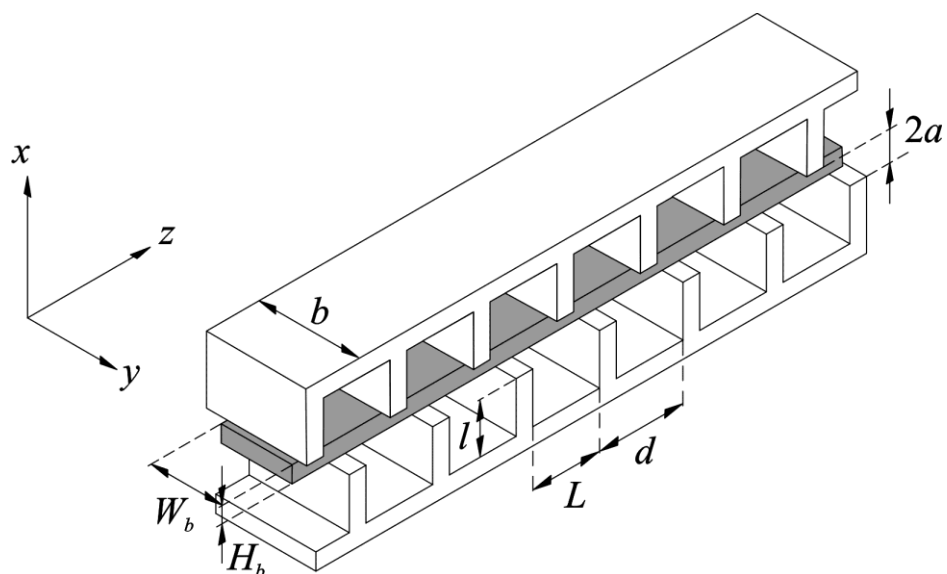


Рис. 2. Схема замедляющей системы типа «плоская сдвоенная гребенка»

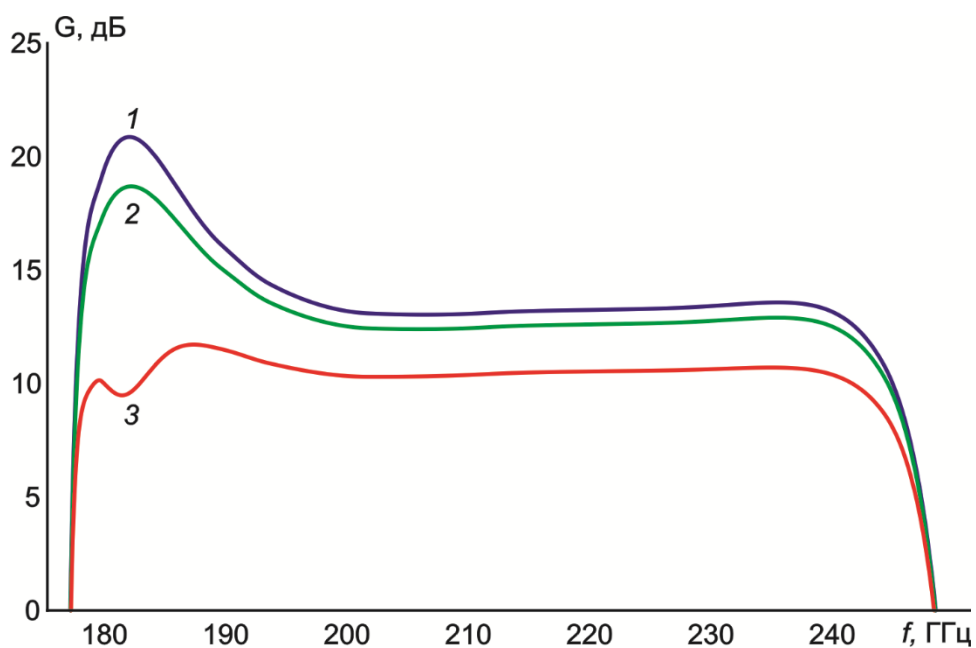


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления от частоты при различных значениях безразмерной амплитуды входного сигнала:

1 — 0.01; 2 — 0.2; 3 — 0.4

Также было проведено моделирование на основе разработанной программы, описанной в Главе 3. На рис. 3 представлены амплитудно-

частотные характеристики — зависимости коэффициента усиления от частоты. Видно, что при малом сигнале максимальное усиление на частоте синхронизма (около 185 ГГц) достигает величины около 20 дБ, что согласуется с приближенной теорией. Важно отметить, что, хотя усиление и меньше, чем в случае ЛБВ-усилителя с аналогичными параметрами, однако имеется широкая полоса частот (200-240 ГГц), в которой усиление практически не зависит от частоты.

Во **второй главе** исследуется возможность создания умножителя второй гармоники диапазона 0.2 ТГц с ленточным электронным пучком и замедляющими системами типа сдвоенной гребенки (рис. 2). Одним из недостатков усилителей суб-ТГц диапазона является то, что для получения достаточно большой выходной мощности (> 50 Вт) требуется источник входного сигнала с мощностью порядка 1 Вт. Широкополосные источники суб-ТГц диапазона с таким уровнем мощности труднодоступны. В случае умножителя требуется источник входного сигнала в более низкочастотном диапазоне 0.1 ТГц.

Схема прибора приведена на рис. 4. Он состоит из трех секций. Во входной секции осуществляется модуляция электронного пучка входным сигналом на частоте порядка 0.1 ТГц. Далее пучок попадает в секцию дрейфа, где происходит группирование электронов в плотные сгустки. Ввиду нелинейного характера группировки, в спектре происходит возбуждение высших гармонических составляющих. Затем пучок попадает из секции дрейфа в выходную секцию, где рабочая частота лежит в диапазоне около 0.2 ТГц. Соответственно, выходная секция возбуждается второй гармоникой сгруппированного тока.

Параметры электронного пучка и замедляющей системы в выходной секции брались такими же, как и для секционированного усилителя, рассмотренного в главе 1. (в частности, ток пучка 0.1 А, напряжение 20 кВ). Также было проведено проектирование замедляющей системы диапазона 0.1 ТГц для входной секции и рассчитаны ее электродинамические параметры.

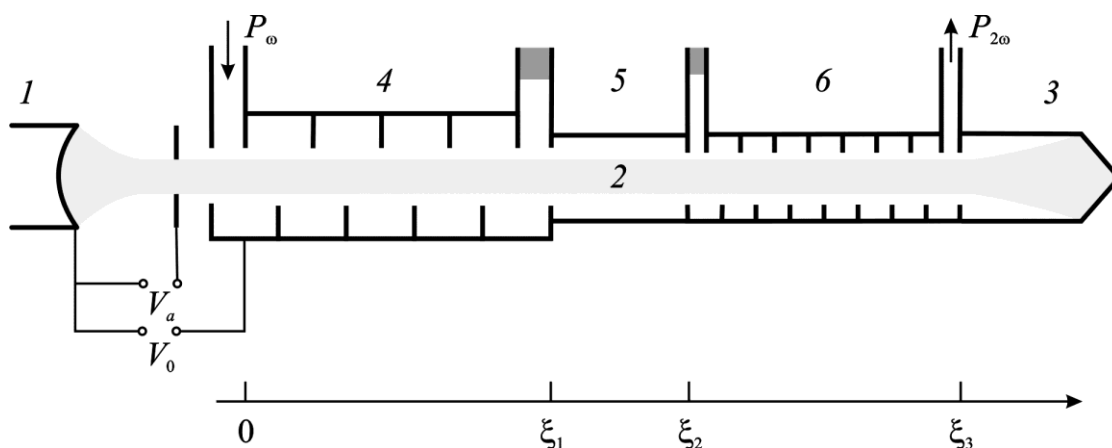


Рис. 4. Схема умножителя О-типа: 1 — электронная пушка; 2 — ленточный электронный пучок; 3 — коллектор; 4 — входная (модулирующая) секция; 5 — секция дрейфа; 6 — выходная секция.

Было проведено моделирование режимов работы умножителя. Длина пространства взаимодействия выбиралась равной 40 мм. Согласно результатам моделирования электронно-оптической системы, при фокусировке интенсивным однородным магнитным полем возможна транспортировка ленточного пучка в канале высотой 200 мкм на такие расстояния без оседания на стенки канала.³ Было выявлено, что для получения высокой выходной мощности требуется уменьшать длину секции дрейфа до минимально возможных значений. В дальнейшем при расчетах она принималась равной 2 мм.

Исследование зависимости характеристик умножителя от длины входной секции показало, что для достижения максимальной выходной мощности ее также следует уменьшать. Оптимальная длина входной секции составила 5 мм. На рис. 5а приведены амплитудно-частотные характеристики, из которых видно, что максимальная выходная мощность имеет значение порядка 60 Вт на частоте около 190 ГГц (т.е. частота входного сигнала составляет 95 ГГц).

³ Каретникова Т.А. и др. // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 1. С. 54-60.

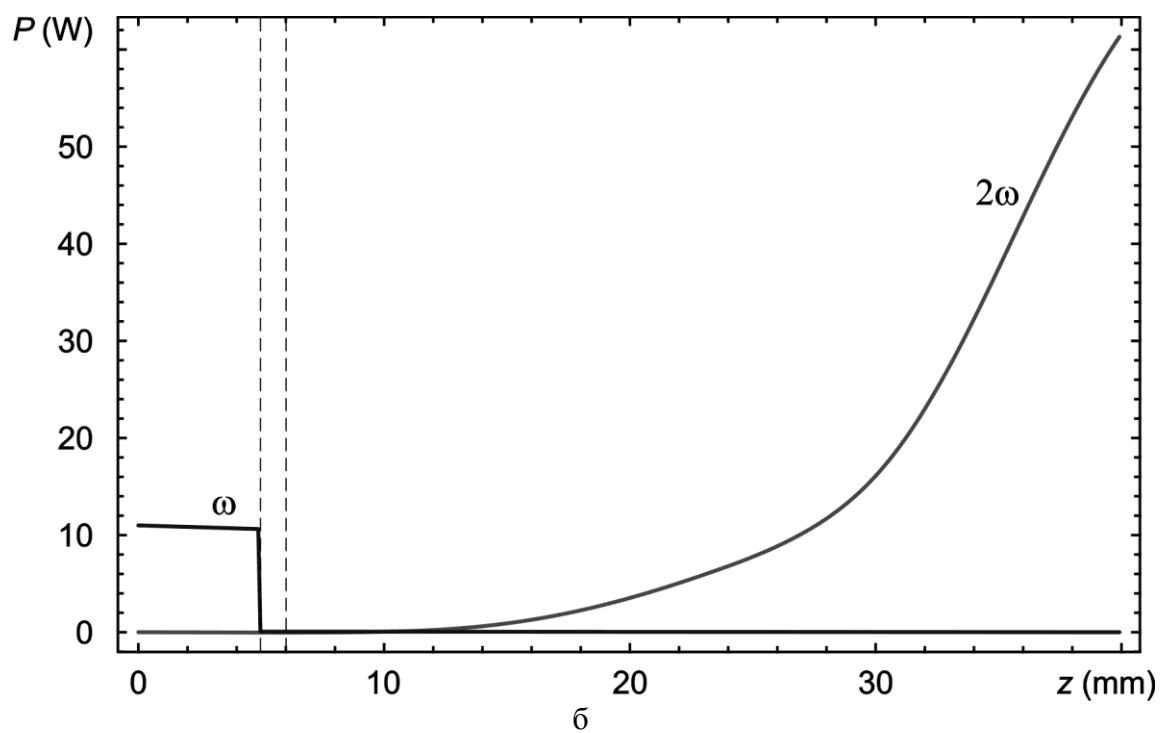
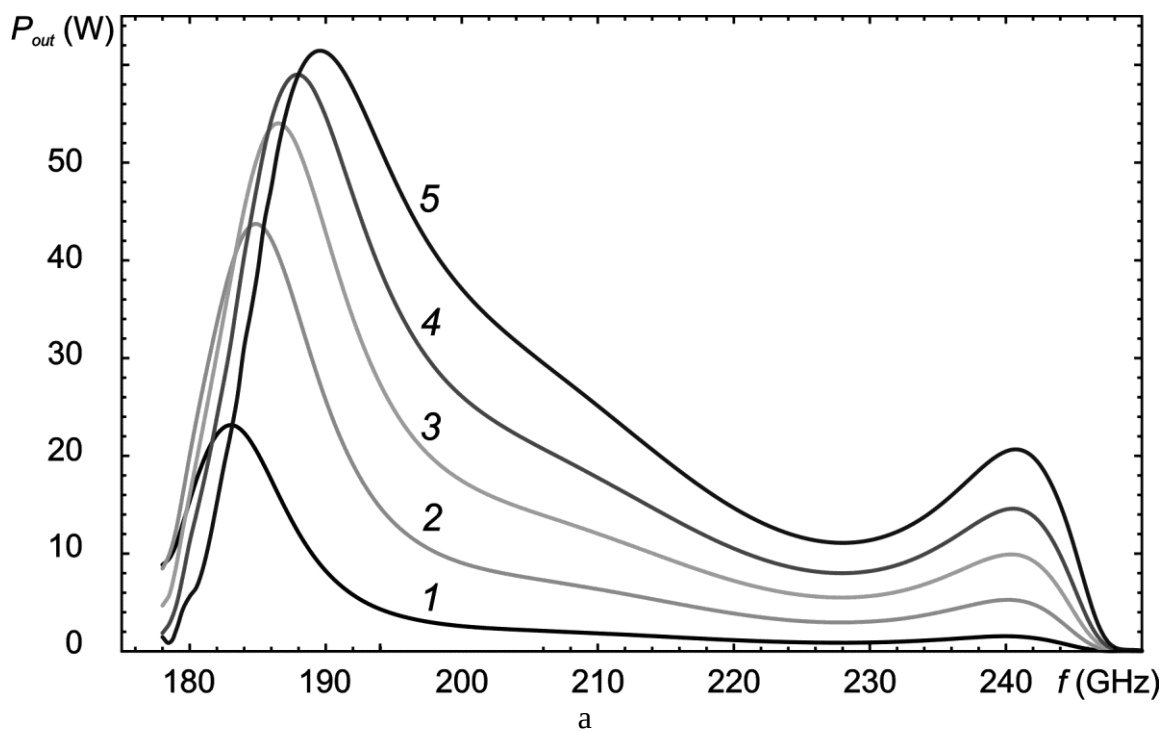


Рис. 5. Результаты моделирования при длине входной секции 5 мм: *а* – амплитудно-частотные характеристики при различной мощности входного сигнала 1 – 2 Вт; 2 – 4 Вт; 3 – 6 Вт; 4 – 8 Вт; 5 – 11 Вт; *б* – зависимости мощности первой (95 GHz) и второй (190 GHz) гармоник от координаты на частоте при входной мощности 11 Вт.

Соответствующая входная мощность достаточно высока — примерно 10-11 Вт. Однако источники такого уровня мощности в W-диапазоне на основе ЛБВ представляются вполне доступными.⁴

Также рис. 5а демонстрирует смещение пика максимальной мощности в сторону более высоких частот при увеличении мощности входного сигнала на частоте первой гармоники. Причина этого заключается в нелинейном эффекте торможения пучка в сильном высокочастотном поле.

На рис. 5б приведены распределения мощностей первой и второй гармоники вдоль длины системы. Границы области дрейфа показаны вертикальными штриховыми линиями. Видно, что в первой секции мощность входного сигнала незначительно падает, расходуясь на модуляцию пучка. В выходной секции происходит усиление сигнала на второй гармонике, вносимого модулированным электронным пучком.

Если же поставить целью добиться максимального коэффициента преобразования мощности входного сигнала в выходную мощность, длину входной секции следует выбирать несколько большей, чем половина общей длины системы. На рис. 6 приведены результаты расчетов для этого случая (длина входной секции 25 мм). В этом случае максимальная выходная мощность $P_{out} \approx 34$ Вт достигается при входной мощности $P_{in} \approx 1$ Вт, т.е. коэффициент преобразования равен 34 (см. рис. 6а). Поскольку мощность меньше, чем в предыдущем случае, максимум АЧХ также достигается на несколько меньшей частоте, $f \approx 184$ ГГц. В первой секции происходит заметное усиление входного сигнала (см. рис. 6б), который также может быть выведен в полезную нагрузку.

⁴ Zhang X., Feng J., Cai J., Wu X., Du Y., Chen J., Li S., Meng W. // IEEE Trans. Electron Devices. 2017. Vol. 64. No. 12. P. 5151-5156.

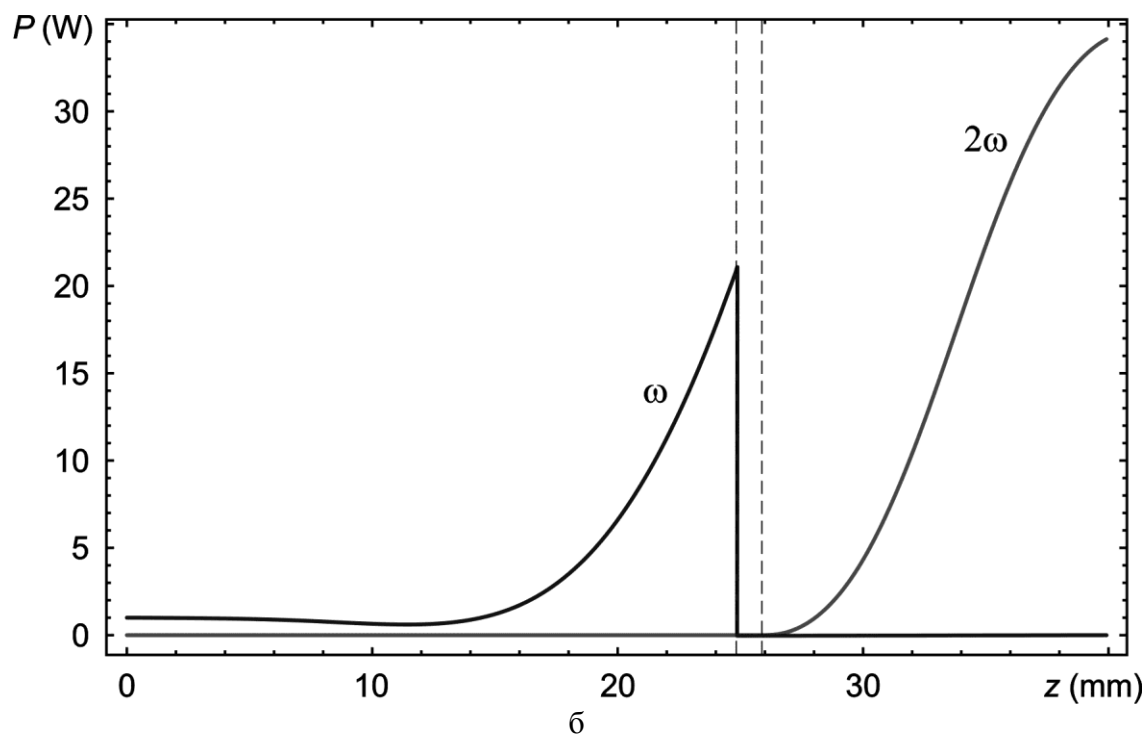
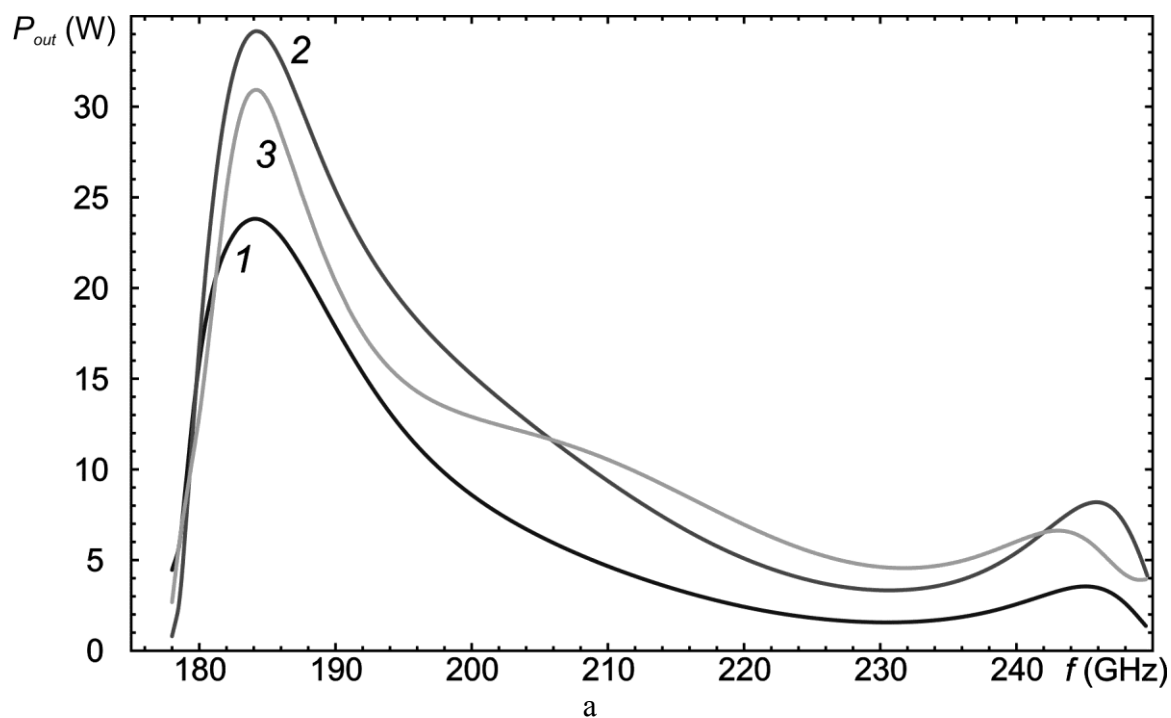


Рис. 6. Результаты моделирования при длине входной секции 25 мм: а – амплитудно-частотные характеристики при различной мощности входного сигнала 1 – 0.5 Вт; 2 – 1 Вт; 3 – 2 Вт; б – зависимости мощности первой (92 ГГц) и второй (184 ГГц) гармоник от координаты при входной мощности 1 Вт.

В третьей главе описана разработанная программа моделирования секционированных приборов О-типа. Данная программа была разработана на языке программирования Wolfram Language. Программа представляет собой стандартный пакет для системы Wolfram Mathematica. Программу можно условно разделить на два модуля. Первый модуль предназначен для численного решения уравнений теории возбуждения сгруппированным электронным пучком. Модуль не имеет графического интерфейса и вызывается в виде подключаемой библиотеки. Стоит отметить, что функции из данного модуля позволяют получать решение как в размерном, так и в безразмерном виде. Важной особенностью пакета является гибкость и настраиваемость. Гибкость программы состоит в том, что с ее помощью можно моделировать прибор, состоящий из произвольного числа секций, которые могут представлять собой как отрезки однородных замедляющих систем с произвольными характеристиками, так и секции дрейфа. Для этого необходимо в качестве входных данных задать электродинамические характеристики всех секций прибора (зависимости сопротивления связи, замедления и затухания от частоты).

Второй модуль разработанной программы представляет собой реализацию пользовательского интерфейса. На рис. 7 изображено основное рабочее окно программы. Рабочую форму можно условно разделить на две области.

Первая область — это область, где располагается интерфейс управления программой. С его помощью можно менять все основные параметры модели секционированного прибора. В том числе, можно варьировать характеристики электронного пучка: ток пучка, напряжение и поперечные размеры. После задания всех характеристик, в соответствующих окнах автоматически в интерактивном режиме обновляются графики. На верхнем графике отображается распределение мощности высокочастотного поля вдоль длины прибора (синим цветом показано распределение мощности первой гармоники на частоте 95 ГГц, оранжевым — на частоте второй гармоники 190 ГГц). На

нижнем графике показано распределение амплитуд гармоник тока вдоль длины прибора. Различными цветами отображаются разные гармоники тока.

Еще одной особенностью программы является возможность повышения точности решения за счет настройки количества крупных частиц, для которых записываются уравнения движения и учета различного числа гармоник тока, которые используются для вычисления поля пространственного заряда.

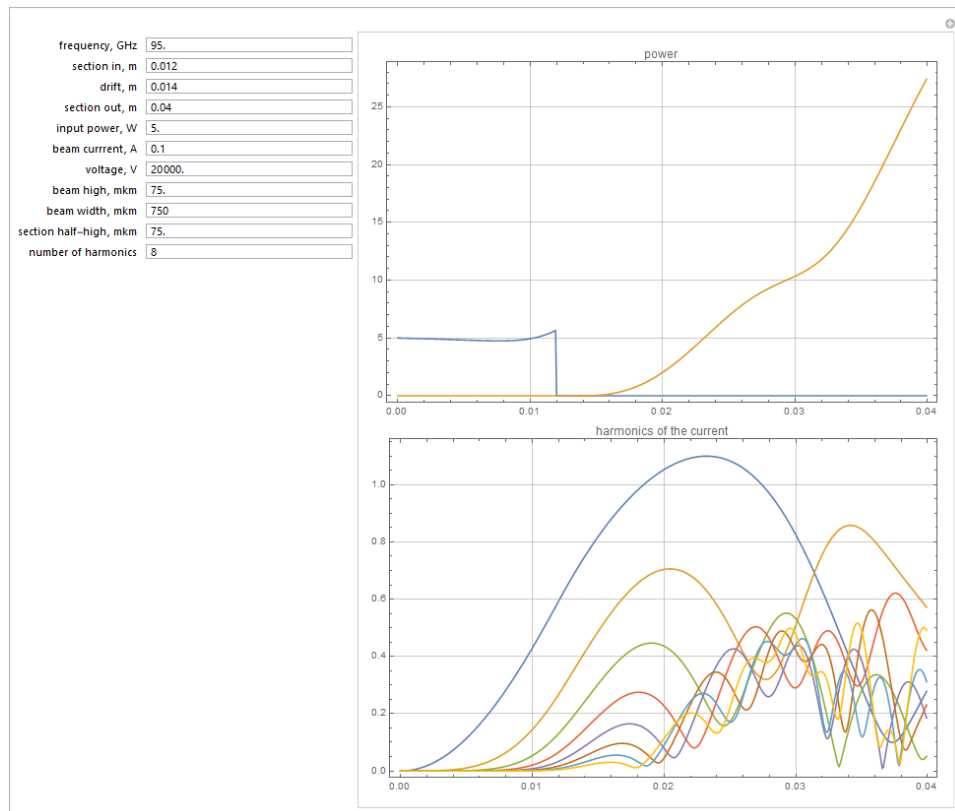


Рис. 7. Основное рабочее окно программы моделирования секционированных приборов (умножитель второй гармоники).

Основные результаты и выводы

1. Развита приближенная теория секционированного прибора О-типа (усилителя или умножителя). В первой (входной) секции, решается задача о модуляции пучка заданным полем в приближении малого сигнала. Далее на основе теории клистрона решается задача о группировке пучка в секции дрейфа. Затем решается задача о возбуждении выходной секции заданным током (током первой гармоники в случае усилителя или током одной из высших гармоник в случае умножителя).

2. Разработана программа, осуществляющая численное моделирование секционированных приборов О-типа на основе уравнений многочастотной нелинейной теории. Программа представляет собой пакет, написанный на языке программирования Wolfram Language. Пользовательский интерфейс программы позволяет в интерактивном режиме варьировать основные параметры секционированных приборов (длины секций, частоту, ток и напряжение пучка, и т.д.) и осуществлять построение графиков зависимостей основных характеристик прибора.

3. Проведены расчеты характеристик секционированного усилителя О-типа с ленточным электронным пучком диапазона 0.2 ТГц. При этом выбирались следующие параметры электронного пучка: ток 0.1 А, напряжение около 20 кВ, толщина пучка 150 мкм, длина системы 40 мм. Выбор данных параметров обусловлен результатами моделирования электронно-оптической системы для ЛБВ-усилителя аналогичного диапазона. Проведены расчеты выходных характеристик, показавшие, что коэффициент усиления в режиме малого сигнала составляет около 15 дБ в широком диапазоне частот (200-240 ГГц). При этом в окрестности низкочастотной границы (185 ГГц) усиление может превышать 20 дБ.

4. Исследована конструкция умножителя второй гармоники с ленточным электронным пучком и ЗС типа сдвоенных гребенок. Показано, что для получения максимальной выходной мощности следует уменьшать длину пространства дрейфа до минимально возможной. Длину входной секции также

следует уменьшать. Однако при этом растет мощность входного сигнала, при котором достигается насыщение. Найдены параметры, при которых выходная мощность на частоте 190 ГГц превышает 60 Вт, для чего требуется входная мощность порядка 10 Вт на частоте 95 ГГц.

5. Для достижения максимального коэффициента преобразования мощности входного сигнала в мощность второй гармоники длина входной секции должна быть несколько больше половины длины прибора. Найдены параметры, при которых выходная мощность на частоте 184 ГГц составляет 34 Вт при входной мощности 1 Вт. В первой секции происходит заметное усиление входного сигнала (см. рис. 6б), который также может быть выведен в полезную нагрузку.

Апробация и публикации

Результаты опубликованы в следующих работах:

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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. 2 p.

5. Белов К.В., Рыскин Н.М. Приближенная теория секционированного усилителя О-типа // «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тезисы докладов XI Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2016. С. 16-17.
6. 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.

Результаты докладывались на следующих научных конференциях:

1. XI Всероссийская конференция молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика». Саратов, 2016.
2. XII Всероссийская конференция молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика». Саратов, 2017.
3. Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Саратов, СГТУ. 2016 г.
4. XVI Международная зимняя школа-семинар по радиофизике и электронике сверхвысоких частот. Саратов. 2-7 февраля 2015 г.
5. Школы-конференции «Нелинейные дни для молодых в Саратове». 2014, 2015.