

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.10.8>

УДК: 621.385.6

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛОСЫ ПРОПУСКАНИЯ В ЛАМПЕ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ О-ТИПА ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

Ч.З. Нгуен, Д.Г. Ковтун

Волгоградской государственной технический университет  
400005, Волгоград, пр. В.И. Ленина 28

Статья поступила в редакцию 26 июня 2023 г.

**Аннотация.** При разработке усилителей в терагерцовом диапазоне частот на лампе бегущей волны О-типа как правило используются модели, которые учитывают взаимодействие электронного потока с электромагнитной волной только в замедляющей системе, не рассматривая при этом влияние на эти процессы областей, занимаемых электронной пушкой и коллектором. Однако, если внутри объемов, занимаемых электронной пушкой и коллектором возникает резонанс, то это может повлечь за собой искажение полосы пропускания замедляющей системы, тем самым ухудшая характеристики прибора. Использование отражателей может существенно улучшить ситуацию, т.к. благодаря им электромагнитные волны не проходят внутрь данных областей, а слой поглотителя, находящийся внутри них, подавляет возможность появления резонанса. В результате, устройство становится более стабильным и эффективным в качестве усилителя электромагнитных волн. В данной работе представлены результаты численного моделирования процессов в модели ЛБВО терагерцового диапазона, включающего весь объем прибора без исключений, на основе метода конечных разностей во временной области (FDTD) для уравнений Максвелла и метода «частиц-в-ячейках» (PIC) для расчёта динамики электронного потока.

**Ключевые слова:** усилитель, метод конечных разностей, ЛБВО, терагерцовый диапазон частот, замедляющая структура, сдвоенная гребенка, отражатель, амплитудно-частотная характеристика, поглотитель.

**Автор для переписки:** Ковтун Дмитрий Григорьевич, [kdmob74@gmail.com](mailto:kdmob74@gmail.com)

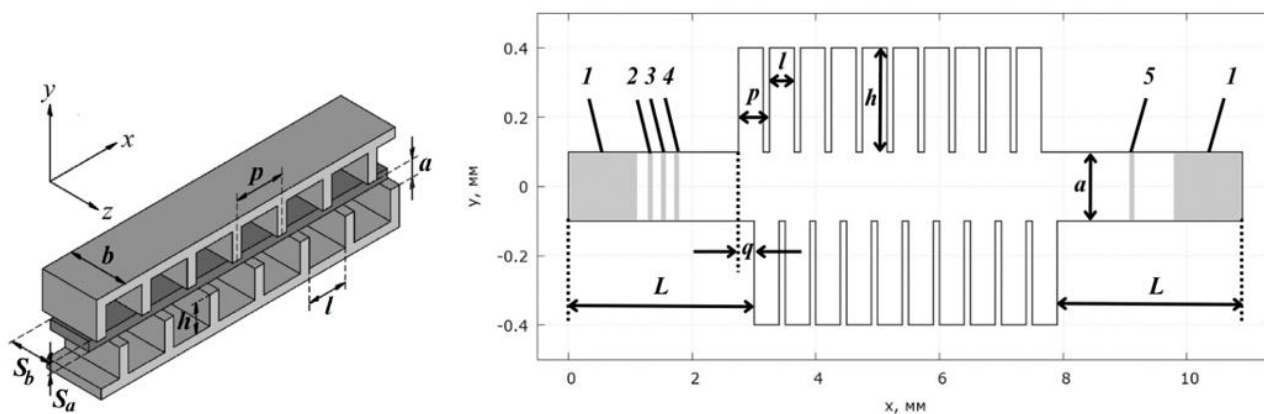
## Введение

Излучение в терагерцовом диапазоне привлекает к себе внимание благодаря широким возможностям его применения в таких областях, как медицина, телекоммуникация, обеспечение безопасности объектов и, даже для исследования потоков плазмы в термоядерных реакторах [1-4]. Исследовательские команды по всему миру сосредоточены на совершенствовании существующих приборов и создании новых источников или усилителей, работающих в данном диапазоне частот. Одним из такого типа приборов является лампа бегущей волны О-типа (ЛБВО) с замедляющей системой типа сдвоенной гребенки, которая обладает рядом преимуществ, обусловленных комбинацией её характеристик по выходной мощности и полосе пропускания [5-6]. В ряде работ были опубликованы результаты исследований по оптимизации ЛБВО: добавления параллельных [7] или последовательных замедляющих систем [8] для увеличения коэффициента усиления; вставки поглощающего слоя для ограничения обратных волн [9]; использование резонансного отражателя для изоляции пространства взаимодействия от влияния электронной пушки и электронного коллектора [10-14]. Однако, в используемых в данных работах моделях, существуют ограничения, связанные с тем, что не учитывается влияние на протекающие процессы областей, содержащих электронную пушку и коллектор, поэтому получаемые при моделировании результаты несколько отличаются от экспериментальных данных [15]. В данной статье приводится анализ результатов численного моделирования процессов, протекающих как в холодных (без электронного потока), так и горячих (с учетом влияния электронного потока) системах ЛБВО, в границах пространства взаимодействия, включающего весь объем прибора без исключений.

## 1. Полосы пропускания исходных конфигураций пространства взаимодействия

Представленные в данной работе результаты численных экспериментов были получены с помощью трехмерной модели, созданной на основе метода конечных разностей во временной области (FDTD) для решения уравнений Максвелла и метода «частиц-в-ячейках» для расчёта динамики электронного потока. Более подробно использованная модель и численные методы описаны в [16], непосредственно с самим кодом программы, реализующей данную модель, можно ознакомиться в [17].

В качестве исходной конфигурации пространства взаимодействия, были взяты электродинамические параметры замедляющей системы из работы [6] (рисунок 1 и таблица 1). Здесь используется упрощение в виде помещения в области 1 структур, позволяющих добиться идеального согласования электромагнитной волны, тем самым исключая из рассмотрения области, содержащие электронную пушку и коллектор, и обеспечивая широкую полосу пропускания и приемлемое сопротивление связи.



- 1 – нерасщепленные идеально согласованные слои (UPML); 2 – область расчёта обратной мощности;  
 3 – область генерации входной волны, 4 – область расчёта входной мощности, |  
 5 – область расчёта выходной мощности.

Рис. 1. Схематическое представление моделируемой замедляющей системой типа «двойная гребенка».

Таблица 1. Параметры модели проверки замедляющей системы

Высота канала $a$	200 мкм	Ширина волновода $b$	850 мкм
Ширина резонатора $l$	400 мкм	Мода входной волны	$TE_{10}$
Глубина резонатора $h$	300 мкм	Частота входной волны $f$	180 - 260 ГГц
Период структуры $p$	500 мкм	Входная мощность $P_0$	1 Вт
Сдвиг, $q$	250 мкм	Время исследования	4 нс
Вход/Выход волны $L$	3000 мкм	Длина ЗС	10 периодов

При данных параметрах, ЗС имеет следующие границы по частотам:

- Критическая частота отсечки: минимальная частота, с которой волна может распространяться через ЗС. Для волны типа  $TE_{10}$ :

$$f_k = c/2a = 176,35 \text{ ГГц} [18].$$

- Первая полоса пропускания [19]:

$$n\pi < \frac{2\pi f}{c} h < \left(n + \frac{1}{2}\right)\pi, n = 0 \rightarrow f \in \left(0; \frac{c}{4h}\right) = (0; 250 \text{ ГГц}).$$

Таким образом, рассматривается диапазон частот 176 ГГц – 262 ГГц.

На рисунке 2а показана рассчитанная для данной конфигурации зависимость выходной мощности от частоты входной волны в холодной системе.

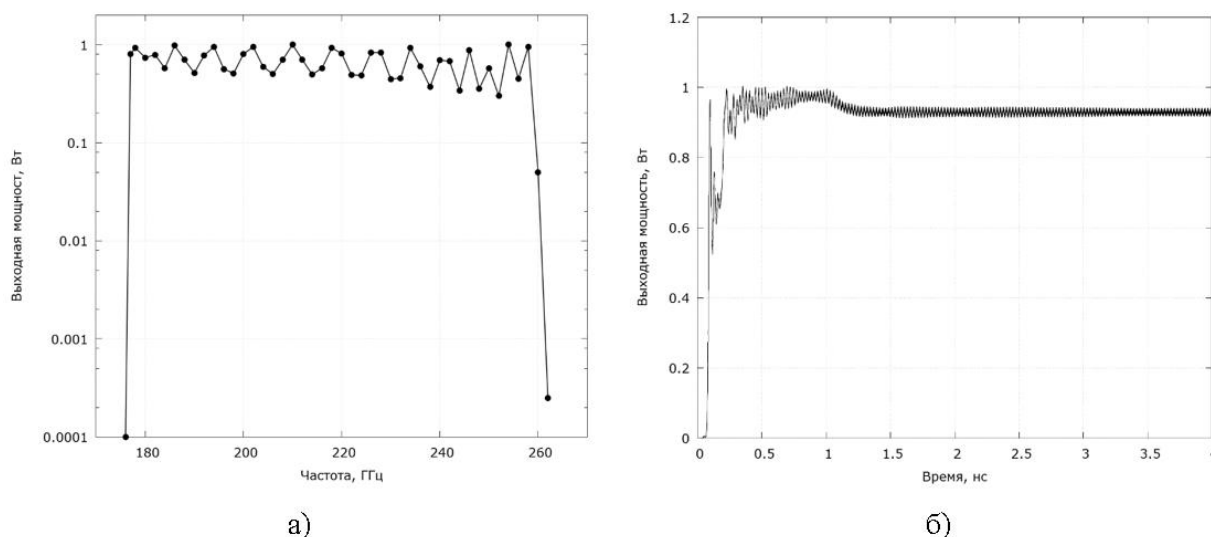
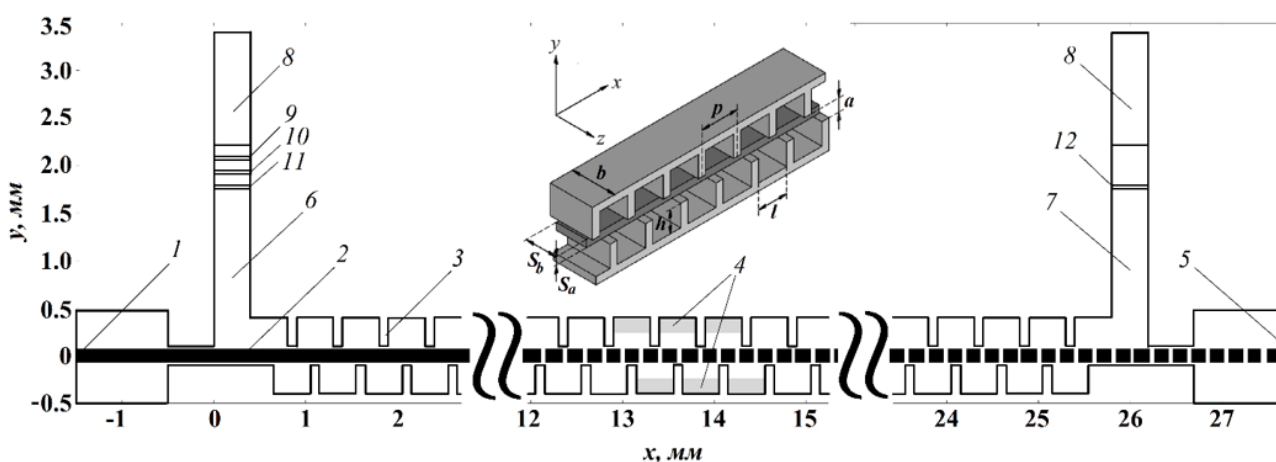


Рис. 2. Зависимость выходной мощности от: а) входной частоты; б) времени для волны 218 ГГц.

Как можно заметить, за пределами частотного диапазона 180 ГГц – 260 ГГц волна практически не распространяется через ЗС, поэтому он и был выбран для дальнейшего исследования. Для более детального изучения процессов была выбрана частота из центра диапазона - 218 ГГц. Зависимость

усредненной по периоду сигнала (4,59 пс) выходной мощности на такой частоте от времени показана на рисунке 2б, при входной мощности 1 Вт (далее везде берется входная мощность равная 1 Вт).

Конфигурация пространства взаимодействия, используемая в работе [16] представлена на рисунке 3. Здесь, в отличие от предыдущей модели, уже присутствуют области, в которых могут находиться электронная пушка и коллектор размером 1000 мкм × 1000 мкм × 850 мкм.



- 1 – электронная пушка; 2 – ленточный электронный поток; 3 – замедляющая система;  
 4 – поглотитель; 5 – коллектор; 6 – входной волновод; 7 – выходной волновод;  
 8 – нерасщепленные идеально согласованные слои (UPML); 9 – область расчёта обратной мощности;  
 10 – область генерации входной волны; 11 – область расчёта входной мощности;  
 12 – область расчёта выходной мощности[16].

Рис. 3. Схематическое представление моделируемой ЛБВ с замедляющей системой типа «двойная гребенка».

На рис. 4 показаны выходные мощности волн на разных частотах в холодной и горячей системах при работе ЛБВО в одночастотном режиме. Полоса пропускания лежит в том же диапазоне 180 ГГц – 260 ГГц, но появляются «провалы» на 210 ГГц и 235 ГГц, вызванные свойствами замедляющей системы и конструкцией пушки и коллектора [20]. Данный эффект объясняется тем, что области 1 и 5 на рисунке 3 по сути являются объемными резонаторами размером 1000 мкм × 1000 мкм × 850 мкм, которые имеют собственные частоты, оценить которые можно с помощью формулы [18]:

$$f_{\text{соб}} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{850 \cdot 10^{-6}}\right)^2 + \left(\frac{n}{1000 \cdot 10^{-6}}\right)^2 + \left(\frac{p}{1000 \cdot 10^{-6}}\right)^2}.$$

Подстановка значений дает основные собственные частоты, равные 231,45 ГГц при  $(m, n, p) = (1, 1, 0)$  или  $(1, 0, 1)$  и 211,99 ГГц при  $(m, n, p) = (0, 1, 1)$ . Таким образом, на данных частотах происходит обратное отражение электромагнитной волны в пространство замедляющей системы, что и приводит к виду полосы пропускания, изображенной на рисунке 4.

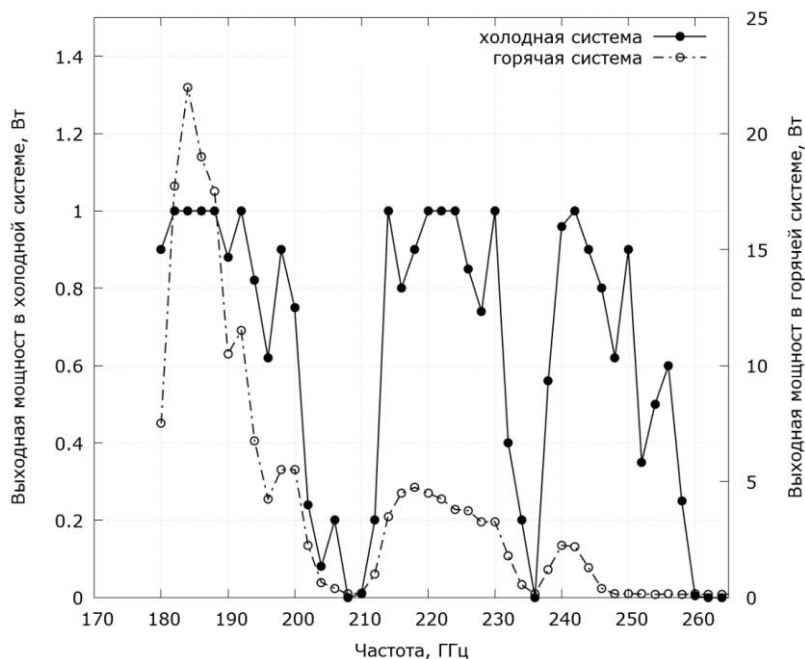


Рис. 4. Выходные мощности волн на разных частотах в холодной и горячей системах при входной мощности 1 Вт [20].

## 2. Изучение полосы экранирования резонансного отражателя

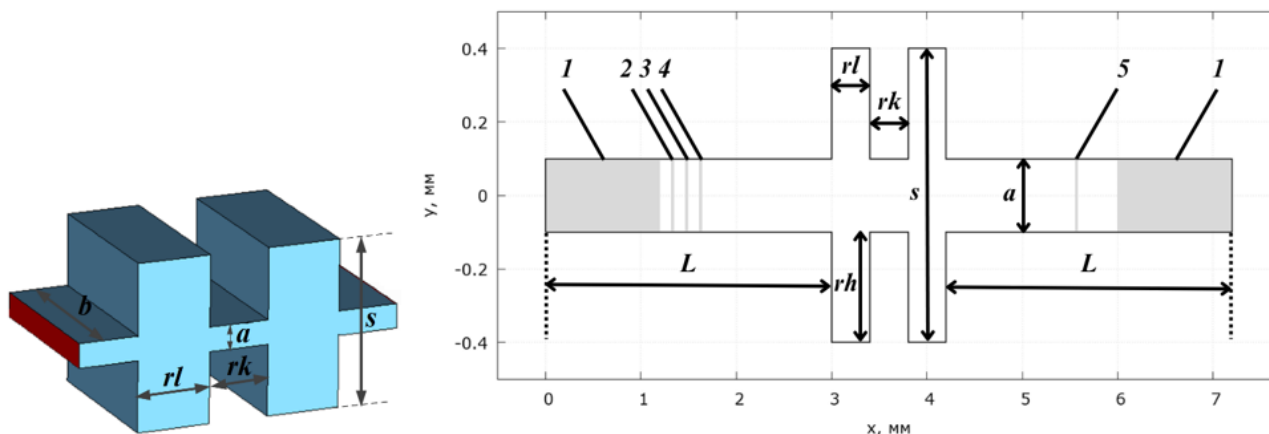
Прерывистый характер полосы пропускания может негативно повлиять на характер работы устройства, особенно в многочастотном режиме. В работах [10-14] исследованы методы препятствования распространению электромагнитных волн за пределы ЗС, путем добавления в пространство взаимодействия отражателей вида, показанного на рисунке 5. Электродинамические параметры резонансного отражателя представлены в таблице 2.

Если подобрать расстояние между плоскостями  $s = n\lambda/2$  ( $\lambda$  — длина волны, а  $n$  — целое число), то интерференция волн приводит к образованию стоячей волны и явления резонанса [18]. Для получения высокого коэффициента отражения волны  $TE_{10}$ , выбран  $n = 2$ .

$$s = \lambda_{218\text{ГГц}} = \frac{c}{218 \cdot 10^9} \approx 1375 \text{ мкм.}$$

Если высота канала  $a$  равна 200 мкм, то глубина резонатора отражателя  $rh$  приблизительно должна быть равна около:

$$rh = \frac{1375 - 200}{2} \approx 588 \text{ мкм.}$$



- 1 – нерасщепленные идеально согласованные слои (UPML); 2 – область расчёта обратной мощности;
- 3 – область генерации входной волны; 4 – область расчёта входной мощности;
- 5 – область расчёта выходной мощности.

Рис. 5. Схематическое представление моделируемого отражателя с 2-мя периодами.

Таблица 2. Параметры модели проверки резонансного отражателя

Длина отражателя	1 - 2 периода	Ширина резонатора $rl$	400 мкм
Глубина резонатора $rh$	500 - 675 мкм	Ширина гребенки $rk$	100 - 400 мкм

Поэтому, для нахождения условия, при котором частота, соответствующая максимуму отражения волны (минимум прохождения через отражатель), совпадает с центром полосы пропускания ЗС, было проведено моделирование отражателя при различных значениях  $rh$  в пределах от 500 мкм до 675 мкм. Как видно из рис. 6, при изменении глубины резонатора отражателя, положение центра полосы экранирования меняется и, при  $rh = 675$  мкм, находится на частоте 218 ГГц. Такая глубина резонатора отражателя применяется для дальнейших исследований.

Для получения более высокого коэффициента отражения, было решено добавить ещё 1 период резонатора в отражателе. Варьируя ширину гребенки  $rk$  от 100 мкм до 400 мкм, были получены результаты, представленные на рисунке 7. Так как получившиеся графики выходной мощности не сильно

меняются от данного параметра, то в итоге, для симметрии конструкции отражателя ( $rl = rk$ ), была выбрана ширина 400 мкм.

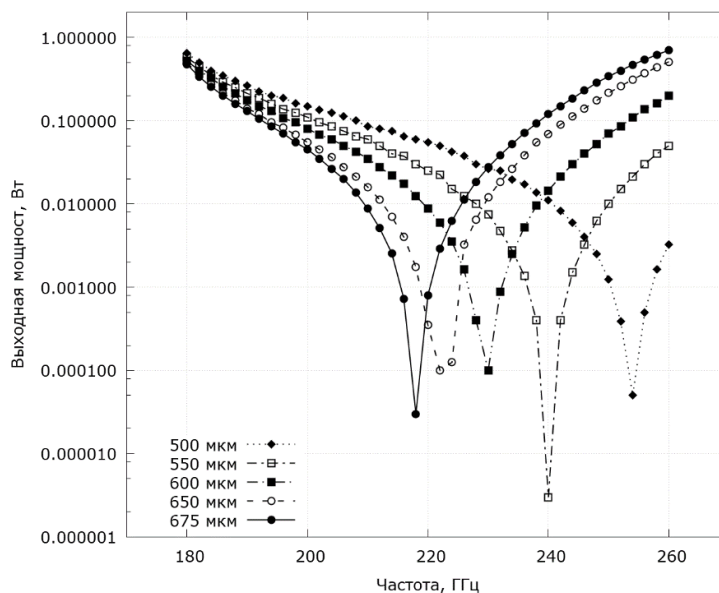


Рис. 6. Выходные мощности волн на разных частотах при разных глубинах резонатора отражателя  $rh$  (в плоскости 5 на рис. 5).

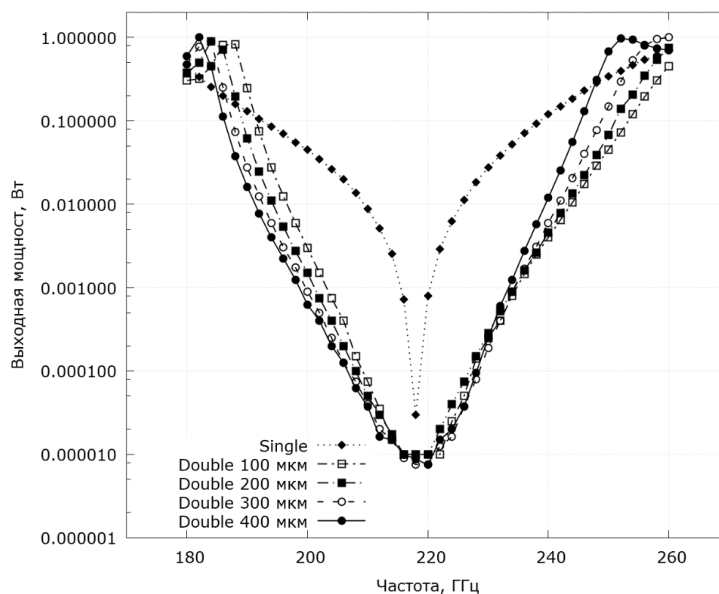


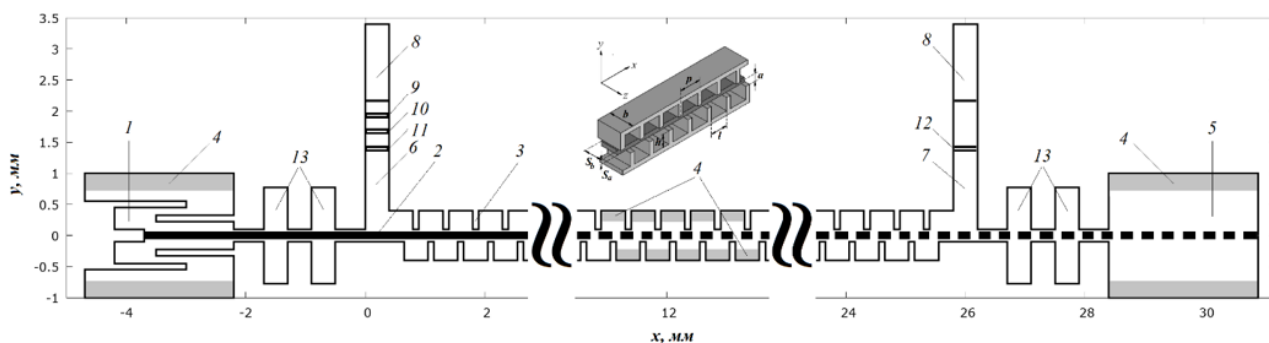
Рис. 7. Выходные мощности волн на разных частотах при разных толщинах/ширина гребенки отражателя  $rk$ .

### 3. Изучение полосы пропускания ЛБВО с использованием отражателя

На последнем этапе исследования была создана окончательная конструкция ЛБВ, используя вышеупомянутые элементы. Размер области электронной пушки составил 2500 мкм × 2000 мкм × 850 мкм, близкий



к фактическим размерам, используемых в конструкциях электронной пушки [21], внутри которой могут находиться электродинамическая или фокусирующая система, а также поглощающие слои, которые подавляют небольшую часть проходящих через отражатель электромагнитных волн. Коллектор представляет собой пустой резонатор с поглощающими слоями.



- 1 – электронная пушка; 2 – ленточный электронный поток; 3 – замедляющая система;  
 4 – поглотитель; 5 – коллектор; 6 – входной волновод; 7 – выходной волновод;  
 8 – нерасщепленные идеально согласованные слои (UPML); 9 – область расчёта обратной мощности;  
 10 – область генерации входной волны, 11 – область расчёта входной мощности;  
 12 – область расчёта выходной мощности; 13 – отражатель.

Рис. 8. Схематическое представление моделируемой ЛБВ с замедляющей системой типа «двойная гребенка».

Исследование ЛБВО с ЗС длиной 10 периодов проводилось в холодной системе в четырех сценариях: без отражателя, с отражателем длиной 1 период, 2 периода и 2 периода с добавлением поглощающих слоев в пушке и в коллекторе. Результаты эксперимента представлены на рисунке 9, где показаны выходные мощности в холодной системе. При отсутствии отражателя полоса пропускания оказалась прерывистой и не пригодной для использования в многочастотном режиме (рисунок 9а). Однако, в случаях с использованием отражателя (рисунок 9б) полоса пропускания была непрерывной в диапазоне от 186 ГГц до 234 ГГц.

Волны с частотой в этом диапазоне могут проходить через прибор и сохранять более 90% своей мощности. В качестве примера, на рисунке 10 показан модуль электрического поля на плоскостях  $xOy$  и  $xOz$  в момент 4 нс, при отсутствии отражателя (рис. 10а) и наличии двухпериодного отражателя (рис. 10б). Видно, что во втором случае электромагнитная

волна 218 ГГц почти не распространяется в пушку и коллектор, полная мощность передается через прибор.

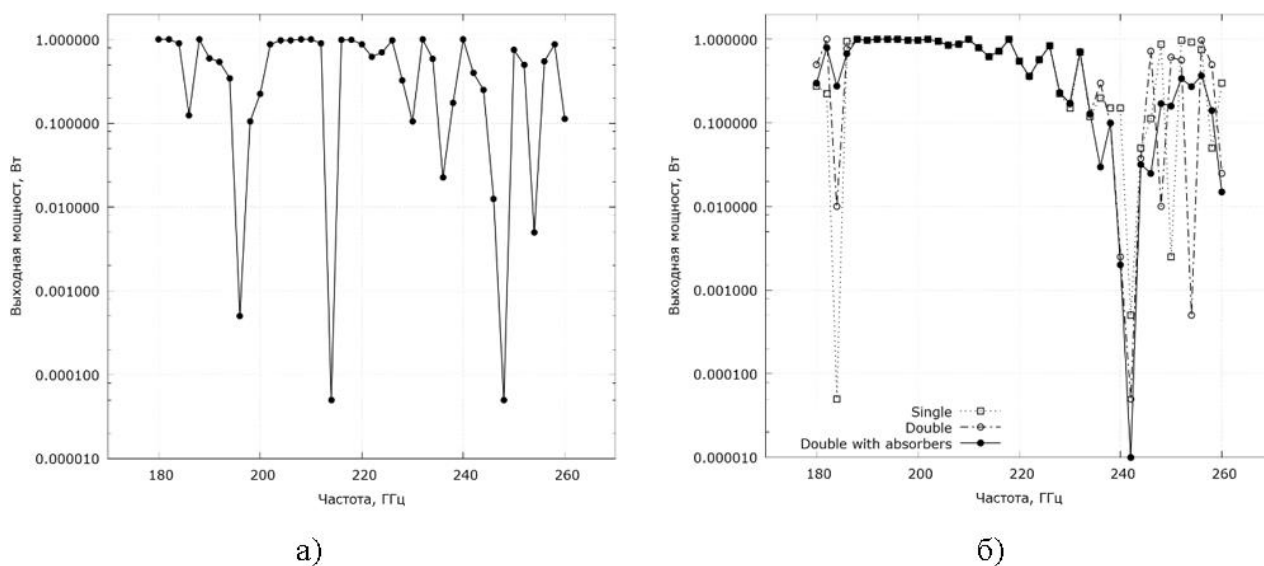


Рис. 9. Выходные мощности волн в холодной системе на разных частотах при разных условиях: а) отсутствия отражателя; б) наличия отражателя и поглотителя в пушке и коллекторе.

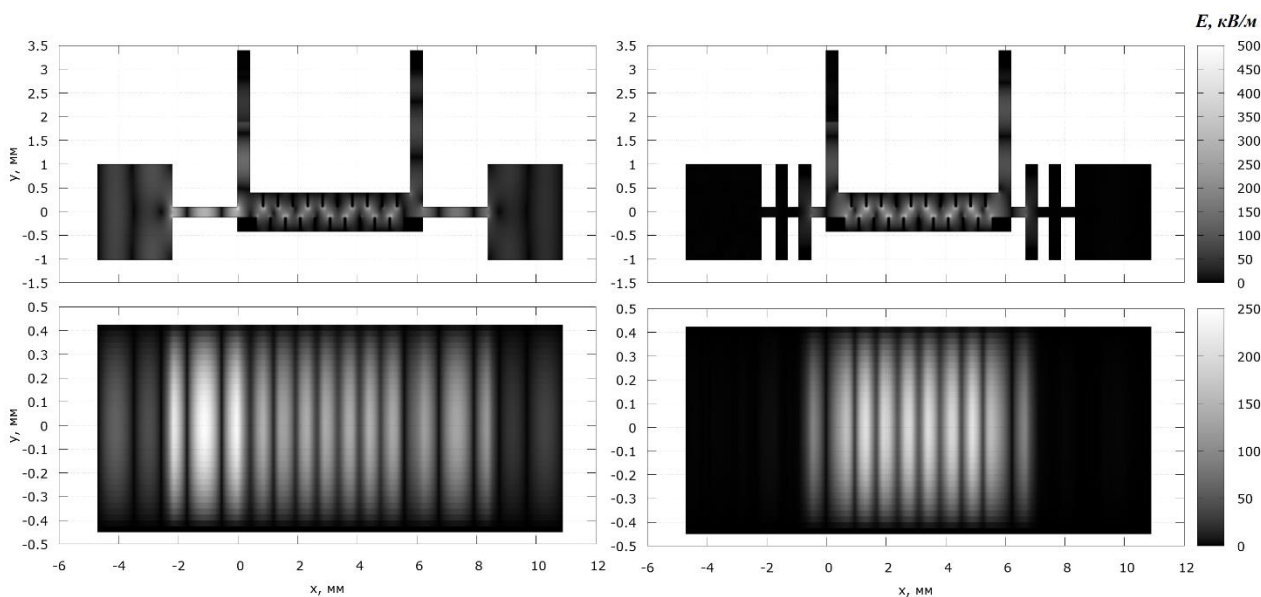


Рис. 10. Модуль электрического поля на плоскостях xOy и xOz в момент 4 нс при: а) отсутствие отражателя; б) наличии 2-х периодного отражателя.

#### 4. Изучение усиления волны 218 ГГц в ЛБВО (в горячей системе)

Конфигурация моделируемой системы представлена в таблице 3. В ЛБВО может использоваться поглотитель в ЗС или в пушке/коллекторе для подавления обратной волны. Длина поглотителя внутри ЗС равна 1/10 длины ЗС и начинается с первой 1/3 части ЗС. Выбранное значение проводимости

равно 50 См/м, что соответствует параметру материала углерода (C), кремния (Si) или карбида кремния (SiC) [22].

Таблица 3. Параметры электродинамической системы и потока

Ширина потока $l_b$	700 мкм	Энергия электрона $V_e$	20 кэВ
Толщина потока $l_a$	150 мкм	Ток $I$	100 мА
Входная мощность $P_0$	1 Вт	Частота входной волны $f$	218 ГГц
Магнитная индукция $B_x$	1.12 Тл	Длина ЗС	50 периодов
Проводимость $\sigma$	50 См/м	Длина поглотителя	5 периодов
Время	12 нс	Длина отражателя	1-2 периода

Рассматриваются 16 вариантов, каждый характеризуется длиной отражателя (1 – 2 периода), наличием электродинамической системы в пушке, наличием поглотитель в ЗС или в пушке/коллекторе.

Таблица 4. 16 вариантов исследования конструкции прибора

Вариант	Длина отражателя	Элек.-дин. система в пушке	Поглотитель в пушке и коллекторе	Поглотитель в ЗС
I	1 период			
II		существует		
III			существует	
IV				существует
V		существует	существует	
VI		существует		существует
VII			существует	существует
VIII		существует	существует	существует
IX	2 периода			
X		существует		
XI			существует	
XII				существует
XIII		существует	существует	
XIV		существует		существует
XV			существует	существует
XVI		существует	существует	существует

Сначала рассматриваются случаи, в которых существует однопериодный отражатель. В I, II, III и V, при отсутствии поглотителя в ЗС. Здесь после 1.5 нс возникает обратная волна, сильно влияющая на входную мощность, что приводит к нарушению процесса взаимодействия потока с волной. В результате усилитель теряет стабильность, что отражено на рисунке 11. Кроме того, в спектрах появилась частота около 240 ГГц.

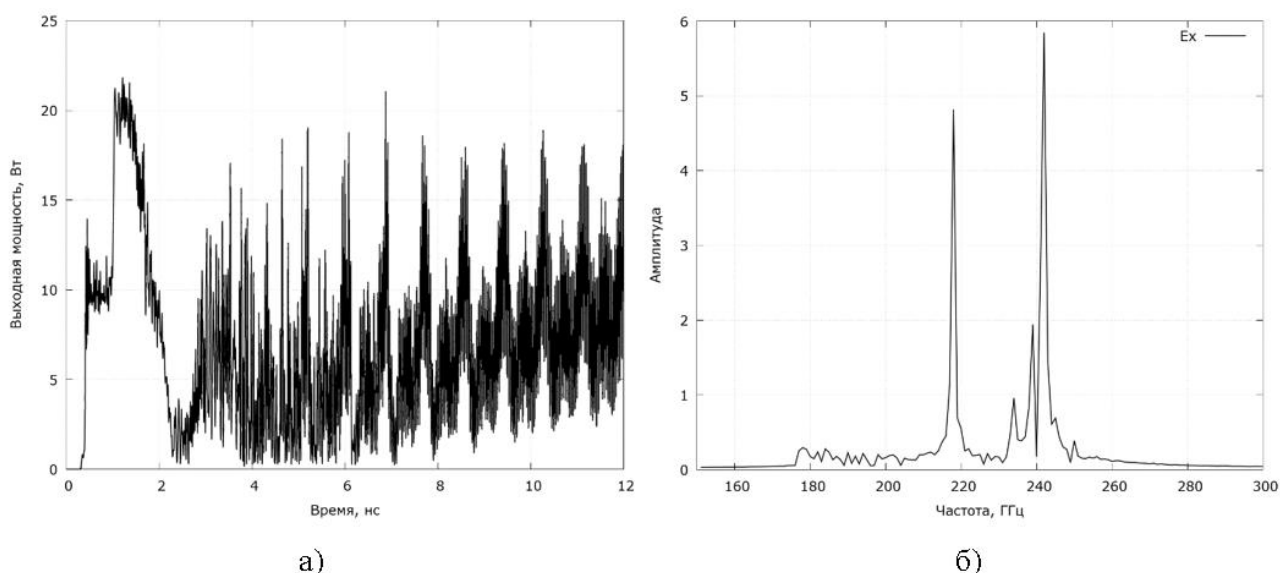


Рис. 11. Выходные характеристики в случае I: а) мощность и б) спектр.

В IV возникающая обратная волна уже частично гасится поглотителем в ЗС, но оставшаяся часть волны, распространяется через отражатель в пушку, а затем, отражаясь обратно в пространство ЗС, нарушает процесс усиления волны. В итоге усилитель теряет стабильность после 5 нс, а в спектре появляется частота  $\sim 182$  ГГц, как показано на рис. 12.

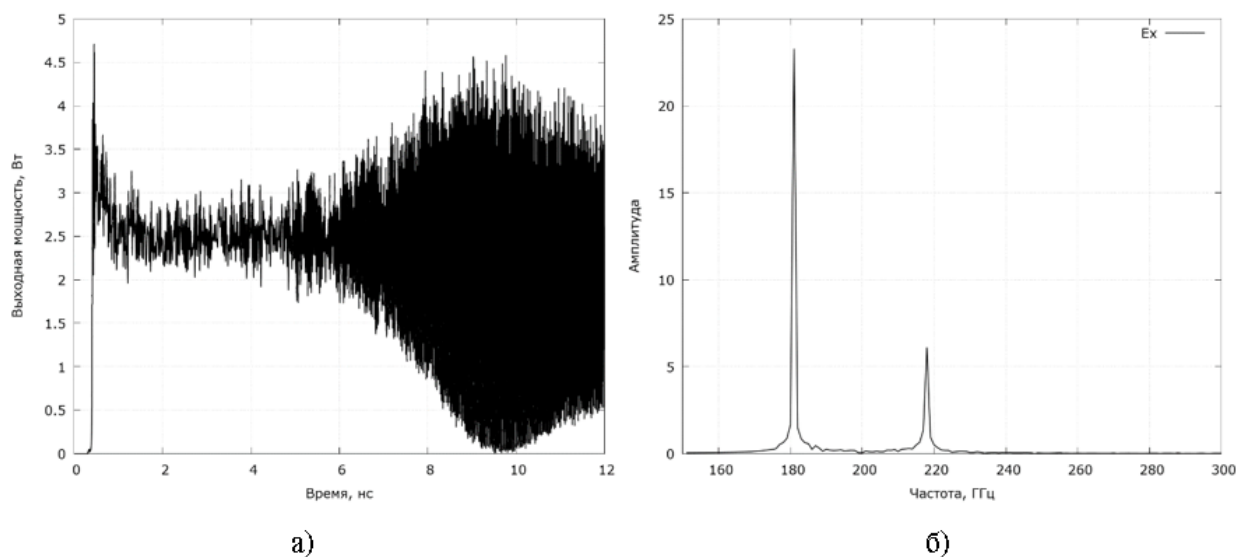


Рис. 12. Выходные характеристики в случае IV: а) мощность; б) спектр.

В VI, VII и VIII, электродинамическая система в пушке ограничивает резонанс, а слой поглотителя окончательно гасит волну в объеме пушки. Как следствие, получается стабильная выходная мощность и чистый спектр (рис. 13), но не трудно заметить, что мощность при этом составляет только около 2,5 Вт, а не 10 – 20 Вт, как при отсутствии поглотителя в ЗС.

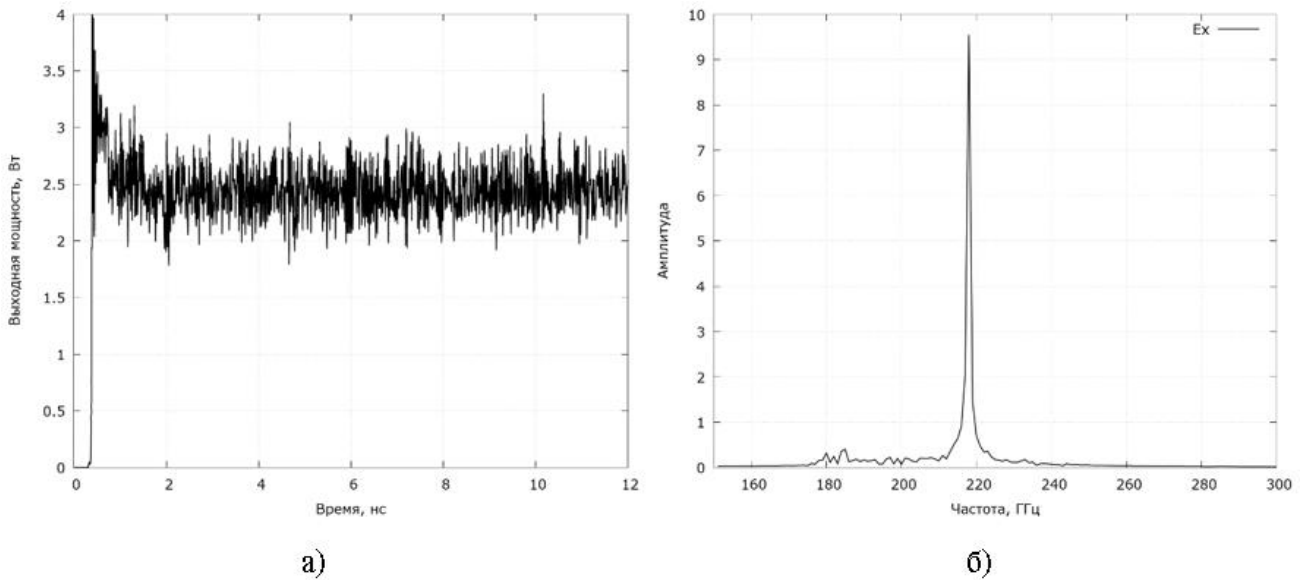


Рис. 13. Выходные характеристики в случае VIII: а) мощность; б) спектр.

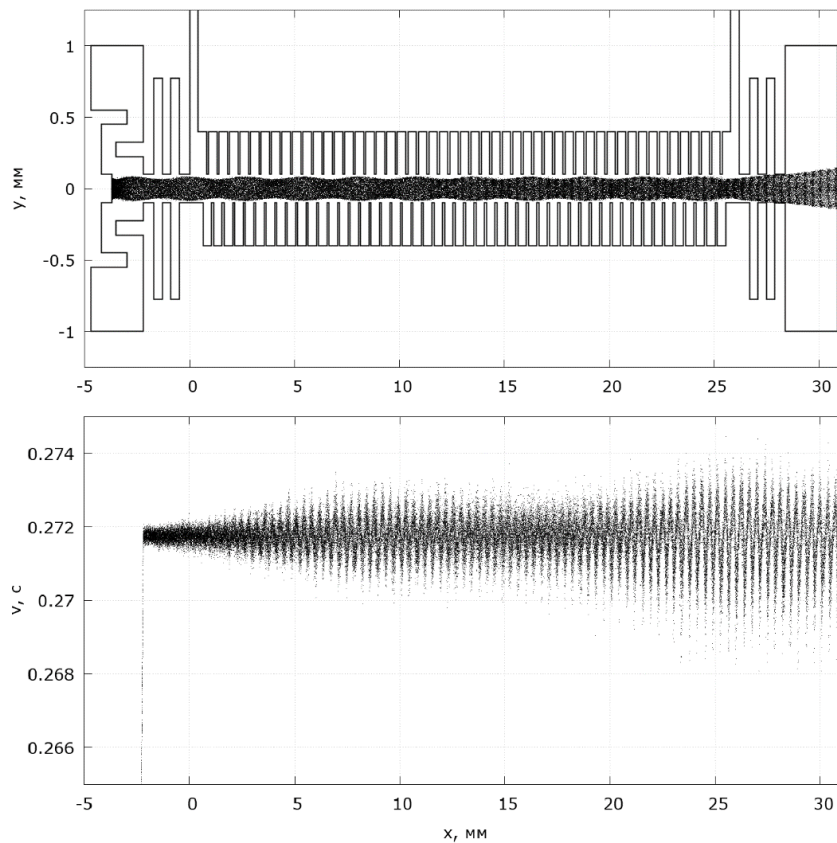


Рис. 14. Проекция на плоскости  $xOy$  и продольная скорость электронов через 12 нс после начала работы.

В остальных 8 случаях с двухпериодным отражателем, ЛБВО работает аналогично 8 случаям выше, т.е. слой поглотителя в ЗС, пушке и коллекторе играют важную роль в формировании электромагнитной волны и ее взаимодействия с электронным потоком. Преимуществом двухпериодного

отражателя является более лучшие результаты по экранированию пространства ЗС от отраженных волн, что выливается в более стабильную работу прибора.

В качестве примера этому утверждению, на рисунке 14 представлены проекция на плоскости  $xOy$  и продольная скорость электронов через 12 нс после начала работы прибора в конфигурации XVI варианта. Здесь можно четко отследить процесс группирования электронного потока и передачи им своей энергии сигналу.

## **Заключение**

Полученные результаты подтверждают возможность разработки ЛБВО с широкой и непрерывной полосой пропускания, что значительно улучшает ее функциональность в многочастотном режиме. Важную роль в сохранении непрерывности полосы пропускания от 186 ГГц до 234 ГГц играет выбор подходящей конфигурации отражателей. Однако, остается необходимость в наличии слоев поглотителя в ЗС и объемах, занимаемых пушкой и коллектором. Это обеспечивает стабильность выходного сигнала, но также оказывает и отрицательное влияние на амплитуду выходной мощности.

## **Литература**

1. Siegel P. H. Terahertz technology //IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 2002. – Т. 50. – №. 3. – С. 910-928.
2. Zhang J. Y. et al. THz imaging technique for nondestructive analysis of debonding defects in ceramic matrix composites based on multiple echoes and feature fusion //Optics express. – 2020. – Т. 28. – №. 14. – С. 19901-19915.
3. Вакс В. Л. и др. ТГц спектрометр высокого разрешения на основе наноструктурированных полупроводниковых и сверхпроводниковых устройств //Журнал радиоэлектроники. – 2016. – №. 1. – С. 4-4.
4. Анфертьев В. А. и др. Развитие метода двухчастотной ТГц спектроскопии для аналитических исследований //Радиоэлектроники. – 2015. – №. 2.

5. Shin Y. M., Barnett L. R., Luhmann N. C. Phase-shifted traveling-wave-tube circuit for ultrawideband high-power submillimeter-wave generation //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2009. – Т. 56. – №. 5. – С. 706-712.
6. Каретникова Т. А. и др. Моделирование лампы бегущей волны субтерагерцевого диапазона с замедляющей системой типа сдвоенной гребенки и ленточным электронным пучком //Радиотехника и электроника. – 2016. – Т. 61. – №. 1. – С. 54-54.
7. Shi X. et al. An arbitrary staggered multi-vane traveling wave tube driven by double sheet electron beams //2015 8th UK, Europe, China Millimeter Waves and THz Technology Workshop (UCMMT). – IEEE, 2015. – С. 1-3.
8. Deng G. et al. A Three-Stage Cascaded Staggered Double Vane for a 220 GHz Traveling-Wave Tube //Plasma and Fusion Research. – 2015. – Т. 10. – С. 1406078-1406078.
9. Shin Y. M. et al. Modeling investigation of an ultrawideband terahertz sheet beam traveling-wave tube amplifier circuit //IEEE transactions on electron devices. – 2011. – Т. 58. – №. 9. – С. 3213-3218.
10. Shin Y. M. et al. System design analysis of a 0.22-THz sheet-beam traveling-wave tube amplifier //IEEE transactions on electron devices. – 2011. – Т. 59. – №. 1. – С. 234-240.
11. Luo J. et al. A wideband input/output structure for the staggered double grating sheet beam travelling wave tube //2016 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – IEEE, 2016. – С. 1-2.
12. Shu G. et al. Design, fabrication, and cold test of a high frequency system for an H-band sheet beam travelling wave tube //IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2020. – Т. 10. – №. 3. – С. 292-301.
13. Zhang Z., Ruan C. High-power and broadband terahertz TWT amplifier based on high order mode staggered double vane structure //2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERS-Fall). – IEEE, 2019. – С. 555-559.

14. Fan Y., Luo J., Fang Z. W-band sheet beam staggered double grating traveling wave tube with simplified input/output structure //2017 Eighteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – IEEE, 2017. – С. 1-2.
15. Baig A. et al. Performance of a nano-CNC machined 220-GHz traveling wave tube amplifier //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2017. – Т. 64. – №. 5. – С. 2390-2397.
16. Нгуен Ч. З. и др. Трехмерное моделирование процессов в лампе бегущей волны терагерцевого диапазона //Электромагнитные волны и электронные системы. – 2021. – Т. 26. – №. 1. – С. 45-53.
17. Нгуен Ч. З., Ковтун Д. Г. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2021613359 от 5 марта 2021 г. Российская Федерация. Численное моделирование работы электровакуумного СВЧ прибора в многочастотном режиме; правообладатель: ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2021.
18. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны. – Радио и связь, 1988. – С. 440.
19. Силин Р. А. Периодические волноводы //Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2003. – Т. 11. – №. 1. – С. 106-108.
20. Нгуен Ч. З., Ковтун Д. Г. Моделирование двухчастотного режима работы лампы бегущей волны О-типа //Электромагнитные волны и электронные системы. 2023. – Т. 28. – № 1. – С. 12-20.
21. Burtsev A. A. et al. Experimental study of electron guns for TWT of terahertz range //2015 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – IEEE, 2015. – С. 1-2.
22. Taki Y. et al. Electrical and thermal properties of off-stoichiometric SiC prepared by spark plasma sintering //Journal of Asian Ceramic Societies. – 2018. – Т. 6. – №. 1. – С. 95-101.

**Для цитирования:**

Нгуен Ч.З., Ковтун Д.Г. Оптимизация полосы пропускания в лампе бегущей волны О-типа терагерцевого диапазона. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.10.8>