

УДК 621.385.624

## ДИСПЕРСИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕРХРАЗМЕРНЫХ ЛАМП БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

© 2023 г. В. Е. Родякин<sup>1</sup>, \*, В. М. Пикунов<sup>1</sup>, В. Н. Аксенов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал Федерального государственного учреждения “Федеральный научно-исследовательский центр “Кристаллография и фотоника” Российской академии наук”, Шатура, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, физический факультет и Международный лазерный центр, Москва, Россия

\*E-mail: vrodyakin@mail.ru

Поступила в редакцию 29.08.2022 г.

После доработки 16.09.2022 г.

Принята к публикации 26.09.2022 г.

Исследованы возможности использования сверхразмерных замедляющих систем в лампах бегущей волны субмиллиметрового диапазона. Предложена линейная теория, разработанная для анализа свойств таких замедляющих систем. Приводятся результаты теоретического анализа горячих дисперсионных характеристик сверхразмерных диафрагмированных волноводов на частоты 315 и 800 ГГц.

DOI: 10.31857/S0367676522700120, EDN: JJMННУ

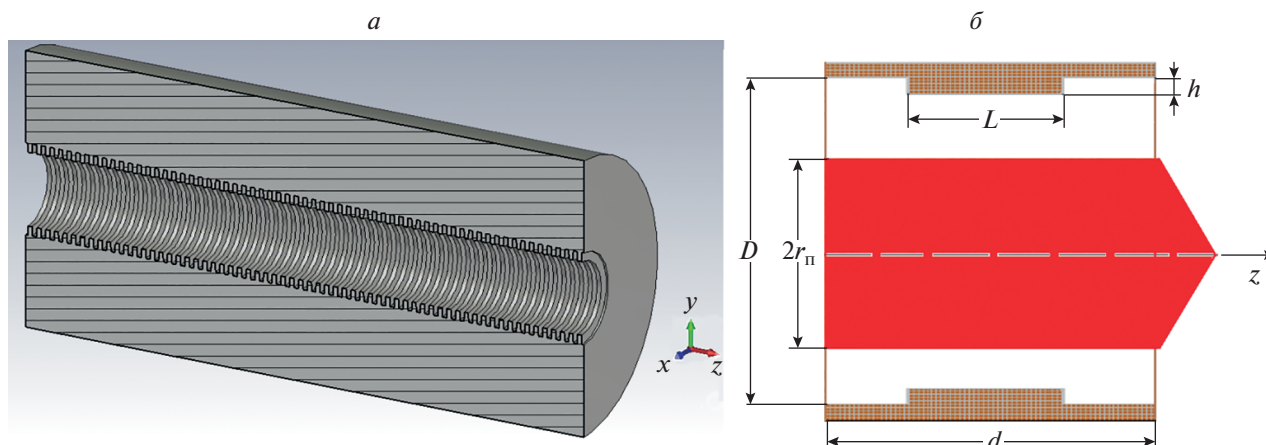
### ВВЕДЕНИЕ

Создание мощных компактных усилителей излучения в субмиллиметровом диапазоне длин волн является актуальной задачей электроники больших мощностей для многих технических приложений. Такие классические электровакуумные усилители СВЧ диапазона, как лампа бегущей волны (ЛБВ) и клистроны с распределенным взаимодействием (КРВ) являются перспективными устройствами при переходе в миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны длин волн [1].

Важнейшим параметром, определяющим выходную СВЧ мощность подобных устройств, является величина силы тока транспортируемого электронного пучка, которая ограничивается диаметром пролетного канала. Поперечные размеры пролетных каналов (труб дрейфа) различных микроволновых электронных устройств определяются рабочей длиной волны, типом устройства и характеризуются параметром сверхразмерности  $O_S = D/\lambda$ , где  $D$  – средний диаметр пролетного канала,  $\lambda$  – центр полосы рабочих длин волн. Для обеспечения эффективного взаимодействия электронного потока с электромагнитными полями диаметр пролетных каналов ЛБВ и КРВ, разработанных в субмиллиметровом и в коротковолновой части миллиметрового диапазона, обычно меньше  $\lambda/4$  ( $O_S < 0.25$ ) [2].

В связи с малыми размерами сечения пролетного канала в субмиллиметровом диапазоне электронная пушка должна иметь либо катоды с плотностью тока эмиссии  $j_k \sim 100 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$  и более, либо достаточно высокую компрессию электронного пучка для получения рабочих токов. При этом в силу предельно малых размеров пролетных каналов в этом диапазоне, плотности токов в пролетных каналах могут достигать  $j_0 > 1 \text{ кА} \cdot \text{см}^{-2}$  [2, 3], характерных для релятивистских электронных пучков сильноточных электронных устройств сантиметрового диапазона. Однако увеличение плотности тока в компактных приборах микроэлектроники миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов в основном ограничивается проблемой их магнитной фокусировки с помощью постоянных магнитов, максимальная индукция которых в настоящее время составляет около 1 Тл [2].

Для увеличения тока и мощности может быть использовано пространственное развитие поперечного сечения пролетных каналов. В сантиметровом диапазоне для этого широко используются многолучевые приборы. Однако продвижение таких конструкций в миллиметровый диапазон ограничивается проблемами формирования и транспортировки отдельных плотных электронных пучков в узком пространстве системы взаимодействия. Поэтому в миллиметровом диапазо-



**Рис. 1.** Конструкция сверхразмерной ЗС в виде диафрагмированного волновода (а). Схема одной ячейки периодической ЗС в виде диафрагмированного волновода со сплошным электронным пучком (красный цвет) (б).

не в настоящее время в ведущих мировых центрах микроэлектроники ведутся активные работы по разработке ЛБВ и КРВ на основе ленточных электронных пучков, обеспечивающих пространственное развитие приборов в одном измерении [3, 4].

При освоении субмиллиметрового диапазона перспективным представляется использование сверхразмерных аксиально-симметричных конструкций ЛБВ, которые позволяют обеспечить пространственное развитие в двух измерениях. Подобная технология широко применяется в сильноточной электронике СВЧ при создании мощных источников импульсного излучения в миллиметровом и сантиметровом диапазоне длин волн [5–8]. Так для многоволновых черенковских устройств на сверхразмерных замедляющих структурах (ЗС) типа ЛБВ и ЛОВ параметр  $O_S \geq 3-4$ , и ограничен вырождением замедленных несимметричных гибридных волн [9]. При больших значениях  $O_S$  существенно обостряется конкуренция мод, что является одной из серьезных проблем, возникающей при создании мощных микроволновых электронных устройств на сверхразмерных ЗС с аксиальной симметрией [10].

Чтобы избежать существенных трудностей с вырождением и конкуренцией высших мод в сверхразмерных ЗС будем рассматривать в качестве перспективной конструкцию ЛБВ с периодическим волноводом в качестве ЗС, имеющей значения параметра  $O_S \sim 1.5-2.5$ . Такая конструкция позволяет использовать электронную селекцию рабочей моды  $E_{01}$  периодического волновода вблизи  $\pi$ -вида.

Увеличение параметра  $O_S$  в 6–10 раз по сравнению с традиционными для КРВ и ЛБВ приводит

к увеличению в десятки раз площади поперечного сечения пролетного канала в сверхразмерных ЛБВ с периодическим волноводом и делает возможным использование электронных пучков с большим диаметром. Это позволяет повысить ток и выходную мощность электровакуумных усилителей в субмиллиметровом диапазоне.

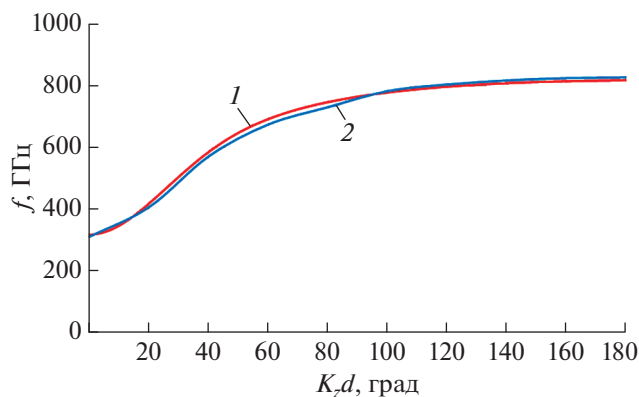
Для исследования возможности использования сверхразмерных периодических волноводов в качестве ЗС компактных ЛБВ в субмиллиметровом диапазоне были разработаны численные алгоритмы линейной теории таких приборов.

### ЛИНЕЙНАЯ ТЕОРИЯ СВЕРХРАЗМЕРНОЙ ЛБВ

В данной линейной модели рассматривается задача вычисления постоянных распространения аксиально-симметричных электронно-электромагнитных волн, возбуждаемых сплошным или кольцевым электронным пучком в круглом слабо гофрированном волноводе (рис. 1а). Схема одной ячейки периодической ЗС с периодом  $d$  и глубиной неоднородности  $h$  для трапецевидной гофрировки представлены на рис. 1б.

Предполагается, что в области взаимодействия существует достаточно большое магнитное поле, и электроны потока имеют лишь продольную составляющую скорости, а электронный пучок с внешним радиусом  $r_{\text{п}}$  возбуждает только аксиально-симметричные поля  $E$ -типа. Также считается, что потери энергии электронов на излучение при пролете ячейки ЗС малы и справедливы приближения линейной теории.

С учетом сделанных предположений система уравнений в системе МКСА для определения пе-



**Рис. 2.** “Холодная” дисперсионная характеристика сверхразмерного диафрагмированного волновода на 800 ГГц, рассчитанная с помощью разработанного алгоритма (1) и с помощью CST Studio (2).

ременных составляющих физических величин имеет вид:

$$\operatorname{rot} \vec{H} - i\omega \epsilon_0 \vec{E} = \vec{j}, \quad (1.1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} + i\omega \mu_0 \vec{H} = 0, \quad (1.2)$$

$$\frac{dv_z}{dz} + i \frac{\omega}{v_{0z}} v_z = - \frac{\eta_e}{\gamma_0^3 v_{0z}} E_z, \quad (1.3)$$

$$\frac{dj_z}{dz} + i\omega \rho = 0, \quad (1.4)$$

где:  $\vec{E} = \{E_r, 0, E_z\}$ ,  $\vec{H} = \{0, H_\phi, 0\}$ ,  $\epsilon_0, \mu_0$  – диэлектрическая и магнитная постоянные;  $\vec{j} = (\rho_0 v + v_0 \rho)$ ,  $\rho, j, v$  – переменные, а  $\rho_0, j_0, v_0$  – постоянные составляющие плотности заряда, конвекционного тока и скорости электронного пучка;  $\gamma_0 = 1 + V_0/mc^2$  – релятивистский фактор Лоренца,  $V_0$  – ускоряющий потенциал в области прохождения электронного потока,  $\eta_e = |e|/m, e, m$  – заряд и масса электрона;  $c$  – скорость света в вакууме;  $\omega = 2\pi f$  – исследуемая круговая частота. Первые два уравнения (1) есть уравнения Максвелла, третье – линеаризованное релятивистское уравнение одномерного движения электронного пучка, четвертое – одномерный закон сохранения заряда в линейном случае. Решение (1) должно удовлетворять следующим граничным условиям:

а) тангенциальная компонента электрического поля во внутренних точках поверхности нерегулярного волновода равна нулю;

б) выполнены условия ограниченности электромагнитных полей на оси нерегулярного волновода;

в) справедливы линейные краевые условия в виде обобщенных условий Флоке.

Для решения системы уравнений (1) с граничными условиями а), б) и в) используется неполный метод Галеркина со вспомогательной функцией [11], который позволяет свести задачу к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ) для переменных компонент электромагнитных полей, скорости и плотности тока к жесткой линейной однородной СОДУ с периодическими коэффициентами. Для нахождения искомого собственных значений комплексной постоянной распространения  $K_z$  используется численный QZ алгоритм.

Разработанные алгоритмы позволяют получать как “холодные” (без пучка), так и “горячие” (с пучком) дисперсионные характеристики сверхразмерных периодических ЗС на основе периодических неоднородных волноводов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С целью проверки точности разработанного алгоритма было проведено сравнение результатов расчета “холодных” дисперсионных характеристик слабо гофрированных волноводов с результатами, полученными с помощью трехмерного спектрального модуля широко известного комплекса программ CST Studio [12]. Сравнительные результаты расчетов “холодных” дисперсионных характеристик ЗС с трапециевидной гофрировкой на частоту 800 ГГц представлены на рис. 2. Результаты свидетельствуют о хорошей точности разработанных алгоритмов.

С помощью разработанной линейной модели было проведено численное исследование дисперсионных характеристик двух сверхразмерных ЛБВ субмиллиметрового диапазона на 315 и 800 ГГц. Параметры приборов и полученные результаты расчетов приведены в табл. 1. Указанные в таблице значения  $K_1$  и  $K_{100}$  означают полученные в расчетах коэффициенты усиления на одну и 100 ячеек ЛБВ соответственно.

**Таблица 1.** Параметры приборов и результаты расчетов

$V_0$ , кВ	$I_0$ , А	$r_{\text{п}}$ , мм	$D$ , мм	$h$ , мм	$d$ , мм	$L$ , мм	$f$ , ГГц	$\lambda$ , мм	$O_s$	$K_1$ , дБ	$K_{100}$ , дБ
20	6	0.65	2	0.2	0.1	0.05	315	0.95	2.10	0.3	30
20	1	0.25	0.8	0.08	0.045	0.03	800	0.37	2.16	0.2	20

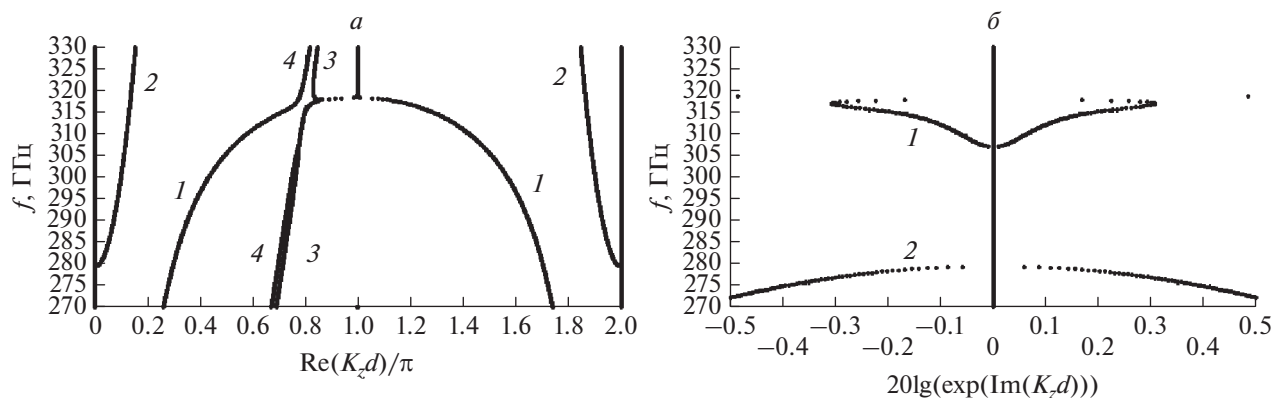


Рис. 3. Реальная (а) и мнимая (б) части дисперсионной диаграммы сверхразмерного волновода на 315 ГГц с трапециевидной гофрировкой (1 –  $E_{01}$ , 2 –  $E_{02}$ , 3 и 4 – медленная и быстрая волны пространственного заряда).

На рис. 3 в качестве примера показаны рассчитанные реальная и мнимая части дисперсионной диаграммы для ЛБВ на 315 ГГц. Реальная часть дисперсионных диаграмм (рис. 3а) определяет набег фазы рассматриваемых волн, а мнимые части (рис. 3б) – величину нарастания (затухания) на периоде ЗС односекционной сверхразмерной ЛБВ. Как видно из рисунка, вблизи  $\pi$ -вида происходит интенсивное взаимодействие рабочей моды  $E_{01}$  с медленной волной пространственного заряда. Используемый электронный пучок при ускоряющем напряжении 20 кВ имеет среднюю плотность тока около  $500 \text{ А/см}^2$ , что позволяет обеспечить его жесткую фокусировку магнитным полем постоянного магнита с индукцией от 0.5 до 1.0 Тл. Полученное значение усиления 0.3 дБ на одну ячейку ЗС позволяет обеспечить коэффициент усиления односекционной ЛБВ 30 дБ при количестве ячеек, равном 100. Общая длина системы взаимодействия такого усилителя составляет всего 1 см.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для создания мощных усилителей СВЧ излучения в субмиллиметровом диапазоне предложено использовать сверхразмерные аксиально-симметричные конструкции ЛБВ со слабо гофрированными ЗС. Для их исследования разработана линейная теория электронно-волнового взаимодействия. Полученные с ее помощью результаты проведенных теоретических исследований подтверждают возможность применения в сверхразмерных компактных ЛБВ электронных потоков с мощностью, в десятки раз превышающую мощность используемых в настоящее время традиционных усилителей в субмиллиметровом диапазоне. Для оценок уровней выходной мощности и КПД предлагаемого нового типа усилителей этого диапазона необходимо проведение дальнейших ис-

следований с помощью нелинейных моделей с учетом высокочастотных потерь в стенках ЗС.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Srivastava A.* // EJAET. 2015. V. 2. No. 8. P. 54.
2. *Booskee J. H.* // Phys. Plasmas. 2008. V. 15. Art. No. 055502.
3. *Pasour J., Wright E., Nguyen K.T. et al.* // IEEE Trans. Electron. Devices. 2014. V. 61. No. 6. P. 1630.
4. *Field M.* // IEEE Trans. Electron Devices. 2018. V. 65. No. 6. P. 2122.
5. *Бугаев С.П., Канавец В.И., Кошелев В.И., Черепенин В.А.* Релятивистские многоволновые СВЧ генераторы. Новосибирск: Наука, 1991.
6. *Черепенин В.А.* // УФН. 2006. Т. 176. № 10. С. 1124.
7. *Корниенко В.Н., Черепенин В.А.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 1. С. 52; *Kornienko V.N., Cherepenin V.A.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No. 1. P. 45.
8. *Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю., Сергеев А.С. и др.* // Изв. вузов. Прикл. нелин. динамика. 2020. Т. 28. № 6. С. 575.
9. *Пикунов В.М.* // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2016. № 5. С. 165507.
10. *Дейчули М.П., Кошелев В.И.* // Радиотехн. и электрон. 2013. Т. 58. № 8. С. 829.
11. *Лузянин Д.Б., Пикунов В.М.* // Радиотехн. и электрон. 1991. Т. 37. № 11. С. 144.
12. [www.cst.com](http://www.cst.com).

## **Dispersion characteristics of oversized travelling wave tubes of the submillimeter wave range**

**V. E. Rodyakin<sup>a, \*</sup>, V. M. Pikunov<sup>a</sup>, V. N. Aksenov<sup>b</sup>**

*<sup>a</sup>Institute on Laser and Information Technologies – Branch of the Federal Scientific Research Centre  
“Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences, Shatura, 140700 Russia*

*<sup>b</sup>Lomonosov Moscow State University, Physics Department and International Laser Center, Moscow, 119991 Russia*

*\*e-mail: vrodyakin@mail.ru*

The possibilities of using oversized slow-wave structures in traveling wave tubes of the submillimeter wave range are investigated. A description of a linear theory developed to analyze the properties of such slow-wave structures is given. The results of the theoretical analysis of the hot dispersion characteristics of oversized diaphragm waveguides at frequencies of 315 and 800 GHz are presented.