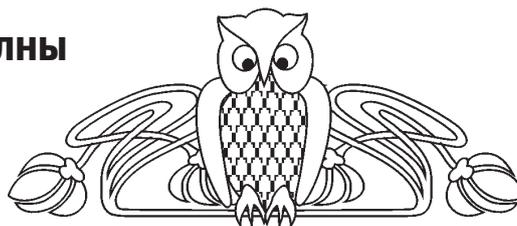




УДК 621.385.6

Моделирование лампы бегущей волны суб-ТГц диапазона с многолучевым ленточным электронным пучком



А. Э. Плоских, Н. М. Рыскин

Плоских Андрей Эдуардович, студент факультета нелинейных процессов, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, andreyploskih@gmail.com.

Рыскин Никита Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией микро- и нанoeлектроники, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН (ИРЭ РАН); заведующий кафедрой динамических систем на базе Саратовского филиала ИРЭ РАН, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, RyskinNM@info.sgu.ru

Миниатюрные лампы бегущей волны (ЛБВ) субтерагерцевого диапазона с пространственно-развитыми электронными потоками (ЭП) и замедляющими системами (ЗС) являются предметом активных исследований. В частности, привлекли большое внимание ЛБВ с ленточным ЭП и ЗС типа сдвоенной гребенки. В данной работе рассматривается ЛБВ с ЭП, состоящим из трех лучей эллиптической формы, что делает возможным дальнейшее увеличение поперечного сечения и снижение плотности тока. Пучок взаимодействует с высшей модой ЗС, имеющей три вариации поля вдоль поперечной координаты. Рассчитаны дисперсионные характеристики ЗС диапазона 0.22 ТГц, а также проведено моделирование режимов усиления малого и большого сигнала при токе пучка 100 мА и напряжении около 20 кВ. Определены параметры, при которых выходная мощность достигает 40 Вт в полосе частот 210–250 ГГц.

Ключевые слова: терагерцевый диапазон, лампа бегущей волны, многолучевой электронный пучок, замедляющая система, компьютерное моделирование.

DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-2-113-121>

Введение

Освоение короткой части миллиметрового и субмиллиметрового (терагерцевого) диапазона является одной из важнейших проблем современной электроники. Для многих приложений, таких как высокоскоростные системы беспроводной передачи данных, спектроскопия высокого разрешения, диагностика плазмы и т.д., требуются источники суб-ТГц диапазона (0.1–0.3 ТГц) с мощностью 10–100 Вт [1–4]. Миниатюризация приборов приводит к увеличению рабочей плотности тока до чрезвычайно высоких значений, достигающих 500 А/см² и выше. Для снижения плотности тока целесообразно использовать

пространственно-развитые замедляющие системы (ЗС) и электронные пучки (ЭП) с большой площадью поперечного сечения, в частности ленточные [5–11] или многолучевые [12–16]. В лампе бегущей волны (ЛБВ) с ленточным ЭП недавно был достигнут уровень мощности свыше 50 Вт в диапазоне 0.22 ТГц [10].

В течение ряда лет нами проводятся исследования, направленные на создание ЛБВ диапазона 0.22 ТГц с ленточным ЭП и ЗС в виде двух гребенок, сдвинутых друг относительно друга на половину периода [17–19]. Данный частотный диапазон соответствует одному из «окон прозрачности» атмосферы. Расчеты усиления показывают, что при токе пучка 0.1 А и напряжении около 20 кВ выходная мощность может составлять 60–80 Вт в режиме насыщения. Была разработана электронная пушка с катодом, погруженным в магнитное поле, которая формирует прямолинейный ленточный ЭП сечением 0.1×0.75 мм и с плотностью тока до 120 А/см² [18]. 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.

Одним из способов снижения нагрузки на катод и фокусирующего магнитного поля является использование многолучевого ленточного ЭП. В работе [20] была разработана электронно-оптическая система (ЭОС), формирующая ЭП, состоящий из трех лучей эллиптической формы. Ток каждого луча составлял 30 мА при полном токе около 90 мА. Последующие исследования показали возможность увеличения тока одного луча до 70 мА (полный ток 210 мА) за счет повышения температуры катода [21]. Токпрохождение в канале ЗС длиной 25 мм составило свыше 60% при фокусировке однородным магнитным полем с напряженностью 0.55 Тл. Дальнейшим развитием этой системы является ЭОС с компрессией пучка [22]. Отметим, что фокусировка ленточного пучка представляет значительные трудности ввиду его вращения, которое возникает за счет диокотронной неустойчивости (см.,



например, [23, 24]). Для эллиптического пучка этот эффект выражен в меньшей степени [22].

В настоящей работе изложены результаты расчетов характеристик ЛБВ с ЭОС такого типа.

Характеристики замедляющей системы

Схема ЗС типа сдвоенной гребенки приведена на рис. 1. Предполагается, что с боков структура закрыта металлическими стенками, которые на рисунке не показаны. В работах [17–19] рассматривался ленточный однолучевой ЭП, взаимодействующий с основной поперечной модой, для которой рабочая компонента поля синхронной пространственной гармоники E_z зависит от поперечной координаты y как $E_z \sim \sin(\pi y/b)$ [17]. В то же время пучок, состоящий из n лучей, должен взаимодействовать

с высшей поперечной модой, имеющей соответствующее число вариаций поля вдоль оси y , $E_z \sim \sin(\pi n y/b)$, поскольку коэффициент связи с этой модой максимален [12].

На рис. 2 представлены схематические изображения поперечного сечения ЛБВ с однолучевым пучком, взаимодействующим с основной поперечной модой, и с трехлучевым пучком, взаимодействующим с третьей поперечной модой. Взаимодействие традиционно характеризуется сопротивлением связи

$$K = \frac{|E_z|^2}{2\beta^2 P},$$

где β – постоянная распространения, P – поток мощности [4, 25, 26]. Считая, что высокочастотное (ВЧ) поле, действующее на каждый из пучков, одинаково, имеем, что сопротивление связи

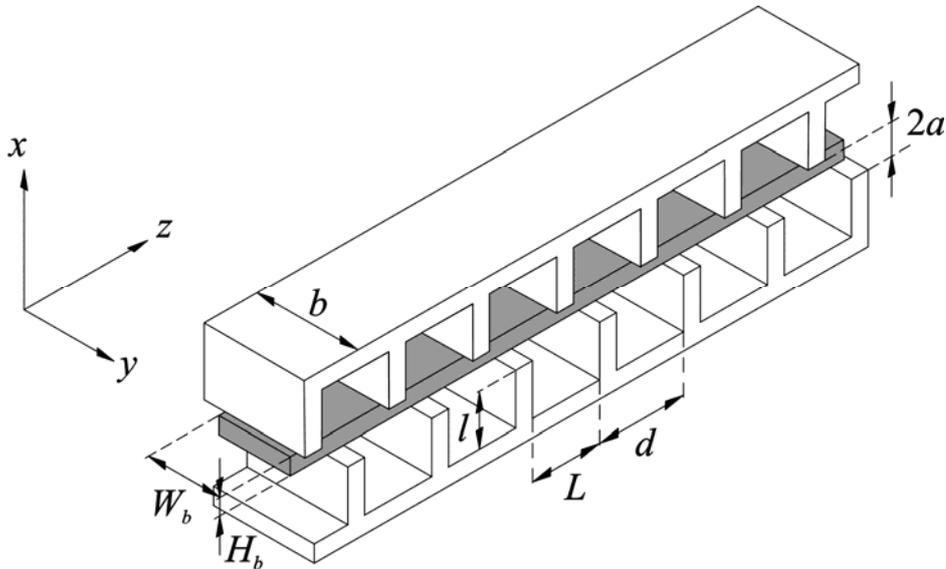


Рис. 1. Схема ЗС типа сдвоенной гребенки с ленточным электронным пучком [17]

Fig. 1. Scheme of the dual-grating SWS with a sheet electron beam [17]

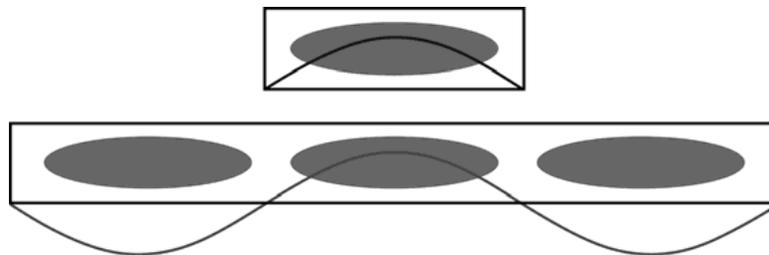


Рис. 2. Схематическое изображение поперечного сечения ЛБВ с однолучевым пучком, взаимодействующим с основной поперечной модой, и с трехлучевым пучком, взаимодействующим с третьей поперечной модой

Fig. 2. Schematic view of the cross section of a TWT with a single interacting with the fundamental transverse mode and with three beams interacting with the third transverse mode



во втором случае в три раза меньше. Однако, если плотности тока также одинаковы, то будет одинаковым и параметр усиления Пирса

$$C = \sqrt[3]{\frac{KI_0}{4V_0}},$$

где I_0 и V_0 – ток и напряжение пучка соответственно. Таким образом, однолучевая и трехлучевая конструкции должны характеризоваться одинаковым коэффициентом усиления, но в последнем случае постоянная мощность пучка $P_0 = I_0V_0$ будет в три раза больше, что позволяет рассчитывать, что выходная мощность также будет больше.

Было проведено проектирование ЗС для ЛБВ с трехлучевым ЭП. Размеры ЗС приведены в таблице.

Геометрические размеры ЗС, в мкм
Geometric dimensions of the SWS (in microns)

Параметр / Parameter	Значение / Value
Период / Period of the structure, d	500
Ширина резонатора / Resonator width, L	400
Толщина штыря / Vane thickness, s	100
Высота штыря / Vane height, l	300
Высота канала / Beam tunnel height, $2a$	150
Ширина канала / Width of the structure, b	2400

На рис. 3 приведены дисперсионные характеристики основной ($n = 1$) и высшей ($n = 3$)

поперечных мод – зависимости частоты f от фазового сдвига на период структуры φ . Расчеты были проведены с помощью хорошо зарекомендовавшего себя численного алгоритма, основанного на методе интегрального уравнения, который отличается высокой точностью и быстродействием [17]. Как видно из рис. 3, дисперсионные характеристики состоят из двух ветвей, которые в случае противофазно расположенных гребенок попарно смыкаются на π -виде колебаний, тем самым обеспечивая наиболее широкую полосу пропускания. Подобная ситуация характерна для структур, обладающих скользящей плоскостью симметрии [5, 6, 9, 17–19, 27].

Для каждой моды нижняя граница полосы пропускания практически равна частоте отсечки соответствующей моды TE_{n0} прямоугольного волновода сечением $2a \times b$: $f_c = nc/2b$, где c – скорость света. Соответственно, основная мода имеет частоту отсечки около 60 ГГц. Для моды с $n = 3$ полоса пропускания лежит в интересующем нас диапазоне 187–275 ГГц.

Также на рис. 3 приведена дисперсионная характеристика пучка при напряжении $V_0 = 21.4$ кВ. Видно, что при таком значении напряжения обеспечивается синхронизм в широкой полосе частот. Отметим, что ЗС обладает относительно низким замедлением, поэтому взаимодействие осуществляется не с основной (нулевой), а с +1-й пространственной гармоникой ($2\pi < \varphi < 4\pi$). Обратная гармоника в этой области имеет на

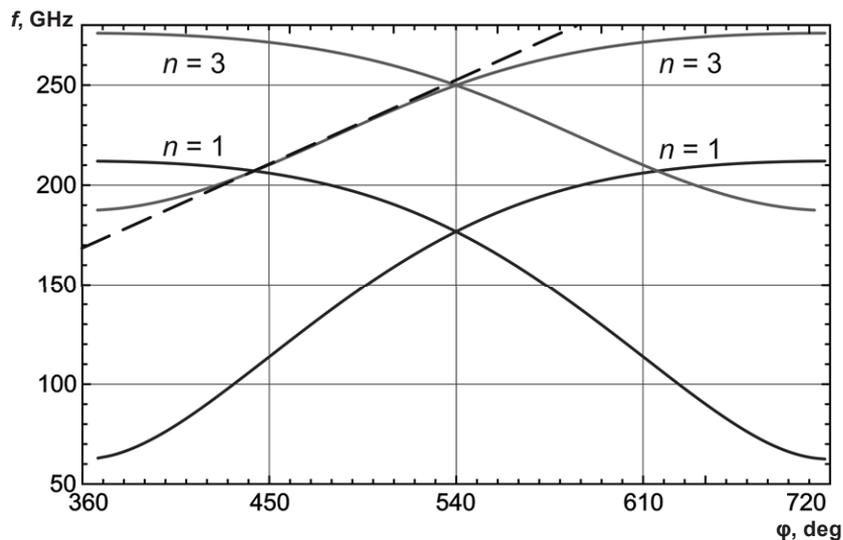


Рис. 3. Дисперсионные характеристики основной ($n = 1$) и высшей ($n = 3$) поперечных мод. Штриховой линией показана дисперсионная характеристика пучка при напряжении 21.4 кВ

Fig. 3. Dispersion characteristics of the fundamental ($n = 1$) and higher-order ($n = 3$) transverse modes. The dispersion characteristic of the 21.4 kV electron beam is shown by the dashed line



1-2 порядка меньше сопротивление связи, чем прямая, поэтому взаимодействие с ней несущественно [18, 19].

Основные уравнения

Для численного моделирования режимов усиления использован хорошо известный аппарат одномерной нелинейной теории ЛБВ (см., например, [19, 25, 26]). Результаты, полученные с помощью такого подхода, достаточно хорошо согласуются с трехмерными пакетами, такими как KARAT и CST Particle Studio [19].

Самосогласованная система уравнений состоит из уравнения движения электронов и уравнения возбуждения замедляющей системы сгруппированным током. Уравнения движения имеют вид

$$-\frac{d^2\theta}{d\xi^2} = \left[\left(1 + C \frac{d\theta}{d\xi} \right)^2 - \frac{v_0^2}{c^2} \right]^{3/2} \operatorname{Re} [F e^{i\theta} + F_{sc}]. \quad (1)$$

Здесь $\theta = \omega t - \beta_e z$ – фазы «крупных частиц», $\xi = \beta_e C z$ – безразмерная координата, $\beta_e = \omega/v_0$ – электронная постоянная распространения, ω – частота сигнала, v_0 – скорость электронного пучка, $C = \sqrt{I_0 K / 4V_0}$ – параметр усиления Пирса, I_0 и V_0 – ток и напряжение пучка соответственно, K – сопротивление связи, $F = E / (2\beta_e V_0 C^2) \cdot \exp(-i\beta_e z)$ – безразмерная амплитуда синхронной гармоники ВЧ поля,

$$F_{sc} = iq \sum_{k=1}^N \frac{D_k I_k}{k} e^{ik\theta} \quad (2)$$

– амплитуда ВЧ поля пространственного заряда (ПЗ). В уравнении (2) $q = (\omega_q / \omega C)^2$ – параметр ПЗ, D_k – коэффициент редукции сил ПЗ для соответствующей гармоники,

$$I_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \exp(-ik\theta) d\theta_0 \quad (3)$$

– амплитуды гармоник ВЧ тока, N – число гармоник тока, которые учитываются при вычислении поля ПЗ. При расчетах учитывались до 6 гармоник тока; дальнейшее увеличение N не оказывает влияния на результаты.

Поскольку на вход системы поступает однородный электронный поток, не модулированный ни по скорости, ни по плотности, граничные условия ставятся следующим образом:

$$\theta(\xi = 0) = \theta_0, \quad d\theta/d\xi|_{\xi=0} = 0 \quad (4)$$

причем начальные фазы электронов θ_0 равномерно распределены на отрезке $(0; 2\pi)$.

Амплитуда ВЧ поля находится из уравнения возбуждения

$$\frac{dF}{d\xi} + (d - ib)F = -(1 + bC)^2 \frac{2\gamma_0^2}{1 + \gamma_0} I_1. \quad (5)$$

Здесь $b = (\beta - \beta_e) / (\beta_e C)$ – параметр рассинхронизма, d – параметр затухания, $\gamma_0 = (1 - v_0^2/c^2)^{-1/2}$. Считалось, что на вход замедляющей системы подается сигнал постоянной амплитуды $F_+(\xi = 0) = F_{in}$. Уравнения решались методом Рунге–Кутты четвертого порядка.

Также для анализа режимов линейного усиления использовался линеаризованный вариант уравнений (1)–(5). После линеаризации уравнений движения (1) можно получить

$$\frac{d^2 I_1}{d\xi^2} + \frac{q^2}{\gamma_0^3} I_1 = \frac{iF}{\gamma_0^3}, \quad (6)$$

а граничные условия (4) принимают вид

$$I_1(\xi = 0) = dI_1(\xi = 0)/d\xi = 0. \quad (7)$$

Режимы усиления ЛБВ с трехлучевым пучком

Перейдем к моделированию режимов усиления ЛБВ с трехлучевым ЭП. В соответствии с результатами моделирования ЭОС [22] считаем, что в поперечном сечении пучки имеют форму эллипсов с полуосями 300×37.5 мкм. Длину ЗС примем равной 40 мм. Согласно [22], при фокусировке однородным магнитным полем 0.55 Тл обеспечивается устойчивая транспортировка ЭП на такое расстояние без оседания на стенки канала. 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 А/см². Поскольку считается, что ВЧ поля, действующие на каждый из пучков, одинаковы, используем стандартный вариант одномерной нелинейной теории ЛБВ, полагая ток пучка равным суммарному току.

На рис. 4 приведены зависимости коэффициента линейного усиления G от частоты f при различных напряжениях V_0 . Расчеты проводились на основе линеаризованной модели (5)–(7). 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 23 дБ. Наиболее широкая полоса усиления обеспечивается при $V_0 = 21.4$ кВ, когда синхронизм достигается в широкой полосе частот (см. рис. 3). При $V_0 = 22$ кВ точка синхро-

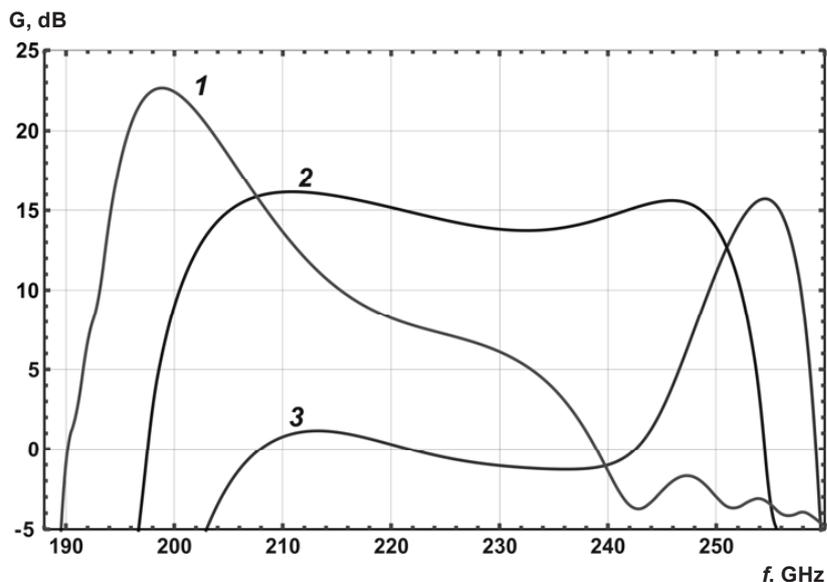


Рис. 4. Зависимости линейного усиления от частоты при различных напряжениях, кВ: 21.0 (1), 21.4 (2) и 22.0 (3)

Fig. 4. Small-signal gain versus frequency for different beam voltages: 21.0 kV (1), 21.4 kV (2), and 22.0 kV (3)

низма приближается к верхней частоте отсечки, поэтому максимум усиления также находится в этой области. По форме эти зависимости аналогичны представленным в [19], где рассматривалась ЛБВ с однолучевым ленточным ЭП.

В целом значения коэффициента усиления невелики (10–20 дБ), что обусловлено более низким сопротивлением связи по сравнению с однолучевой конструкцией, рассмотренной в

[18, 19]. Однако коэффициент усиления можно существенно повысить, так как, согласно [22], имеется возможность повышения тока пучка более чем в два раза.

Перейдем к результатам моделирования нелинейных режимов на основе модели (1)–(5). На рис. 5 приведены зависимости выходной мощности P от частоты f при различных значениях входной мощности P_{in} , построенные при напряжении

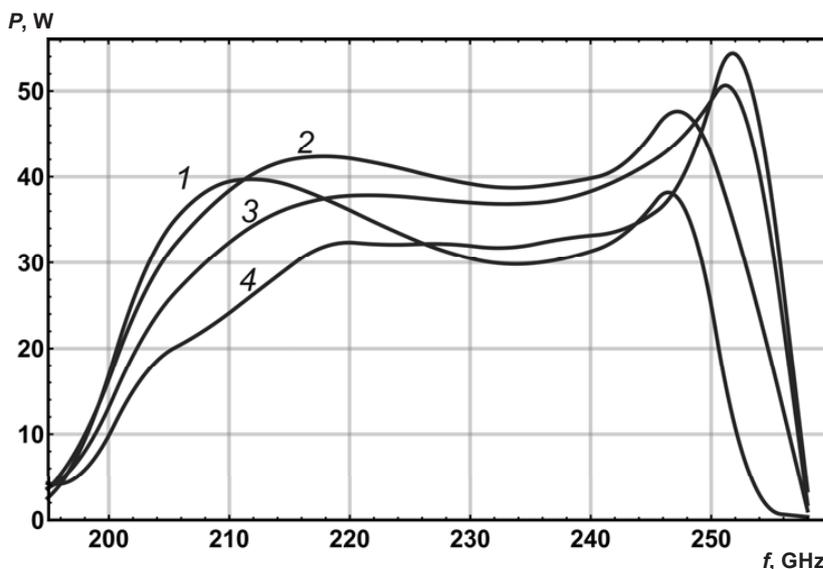


Рис. 5. Зависимости выходной мощности от частоты при напряжении 21.4 кВ и входной мощности P_{in} : 1 Вт (1), 3 Вт (2), 5 Вт (3) и 9 Вт (4)

Fig. 5. Output power versus frequency for 21.4-kV beam voltage and different values of the input power: 1 W (1), 3 W (2), 5 W (3), and 9 W (4)



21.4 кВ. При $P_{in} = 3$ Вт выходная мощность составляет около 40 Вт в широкой полосе частот 210–250 ГГц. Соответствующее значение P_{in} 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.

Выводы

В работе рассмотрена возможность создания ЛБВ-усилителя диапазона 0.22 ТГц с ЗС в виде сдвоенных гребенок и ЭОС, формирующей ЭП, состоящий из трех лучей эллиптической формы. 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 облегчается фокусировка пучка магнитным полем.

Проведено проектирование ЗС, в которой пучок с напряжением около 20 кВ взаимодействует с высшей поперечной модой, имеющей три вариации поля вдоль горизонтальной координаты. Также проведено моделирование режимов усиления. Согласно расчетам, при токе пучка 100 мА мощность составляет около 40 Вт в широкой полосе частот.

Отметим, что в подобном приборе можно ожидать конкуренции со стороны низших поперечных мод. Однако пучок, состоящий из n лучей, очевидно, имеет максимальное сопротивление связи с модой, имеющей n вариаций поля (подробное обсуждение этого вопроса см. в [12]). Кроме того, существуют эффективные методы подавления нежелательных поперечных мод, например, нанесение на верхнюю и нижнюю стенки канала продольных полосок из поглощающего материала в точках $y = b/3$ и $y = 2b/3$ (см., например, [28]). Поскольку поле рабочей моды в этих точках равно нулю, ее затухание не меняется, в то время как моды, имеющие другую поперечную структуру, эффективно поглощаются.

Список литературы

1. *Srivastava V.* THz vacuum microelectronic devices // J. Physics : Conf. Series. 2008. Vol. 114, № 1. 012015.
2. *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, № 1. P. 54–75.
3. *Dhillon S. S., Vitiello M. S., Linfield E. H., Davies A. G., Hoffmann M. C., Booske J., Paoloni C., Gensch M., Weightman P., Williams G. P., Castro-Camus E., Cumming D. R. S., Simoens F., Escorcia-Carranza I., Grant J., Lucyszyn S., Kuwata-Gonokami M., Konishi K., Koch M., Schmuttenmaer C. A., Cocker T. L., Huber R., Markelz A. G., Taylor Z. D., Wallace V. P., Zeitler J. A., Sibik J., Korter T. M., Ellison B., Rea S., Goldsmith P., Cooper K. B., Appleby R., Pardo D., Huggard P. G., Krozer V., Shams H., Fice M., Renaud C., Seeds A., Stöhr A., Naftaly M., Ridler N., Clarke R., Cunningham J. E., Johnston M. B.* The 2017 terahertz science and technology roadmap // J. Phys. D, Appl. Phys. 2017. Vol. 50, № 4. 043001. DOI: 10.1088/1361-6463/50/4/043001
4. *Grigoriev A. D., Ivanov V. A., Molokovsky S. I.* Microwave Electronics. Springer Series in Advanced Microelectronics. Springer, 2018. 554 p. DOI: 10.1007/978-3-319-68891-6
5. *Shin Y.-M., Barnett L. R., Luhmann N. C.* Phase-shifted traveling-wave-tube circuit for ultrawideband high-power submillimeter-wave generation // IEEE Trans. Electron Devices. 2009. Vol. 56, № 5. P. 706–712.
6. *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.
7. *Pasour J., Wright E., Nguyen Kh., Balkcum A., Wood F. N., Myers R. E., Levush B.* Demonstration of a multikilowatt, solenoidally focused sheet beam amplifier at 94 GHz // IEEE Trans. Electron Devices. 2014. Vol. 61, № 6. P. 1630–1636.
8. *Shi X., Wang Z., Tang X., Tang T., Gong H., Zhou Q., Bo W., Zhang Y., Duan Z., Wei Y., Gong Y., Feng J.* Study on wideband sheet beam traveling wave tube based on staggered double vane slow wave structure // IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. Vol. 42, № 12. P. 3996–4003.
9. *Wang J., Shu G., Liu G., Yang L. Y., Luo Y.* Ultrawideband coalesced-mode operation for a sheet-beam traveling-wave tube // IEEE Trans. Electron Devices. 2016. Vol. 63, № 1. P. 504–511.
10. *Baig A., Gamzina D., Kimura T., Atkinson J. E., Domier C., Popovic B., Himes L., Barchfeld R., Field M., Luhmann N. C.* Performance of a nano-CNC machined 220-GHz traveling wave tube amplifier // IEEE Trans. Electron Devices. 2017. Vol. 64, № 5. P. 2390–2397.
11. *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.
12. *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.
13. *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.



14. 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.
15. Shu G., Liu G., Chen L., Bambarandage H., Qian Zh. Terahertz backward wave radiation from the interaction of high-order mode and double sheet electron beams // J. Phys. D : Appl. Phys. 2018. Vol. 51, № 5. P. 055107.
16. Shu G. X., Liu G., Qian Z. F. Simulation study of a high-order mode terahertz radiation source based on an orthogonal grating waveguide and multiple sheet electron beams // Opt. Express. 2018. Vol. 26, № 7. P. 8040–8048.
17. 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.
18. 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. DOI: 10.1134/S1064226915120116
19. 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, № 6. P. 2129–2134. DOI: 10.1109/TED.2017.2787960
20. 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. P. 8068467. DOI: 10.1109/UCMMT.2017.8068467
21. 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 : Саратовский государственный технический университет, 2018. Т. 1. С. 170–174.
22. 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. : в 2 т. Саратов : Саратовский государственный технический университет, 2018. Т. 1. С. 166–169.
23. Nguyen K. T., Pasour J. A., Antonsen T. M., Larsen P. B., Petillo J. J., Levush B. Intense sheet electron beam transport in a uniform solenoidal magnetic field // IEEE Trans. Electron Devices. 2009. Vol. 56, № 5. P. 744–752. DOI: 10.1109/TED.2009.2015420
24. Ruan C. J., Wang S. Z., Han Y., Li Q. S., Yang X. D. Theoretical and experimental investigation on intense sheet electron beam transport with its diocotron instability in a uniform magnetic field // IEEE Trans. Electron Devices. 2014. Vol. 61, № 6. P. 1643–1650. DOI: 10.1109/TED.2014.2299286
25. Шевчик В. Н., Трубецков Д. И. Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. М. : Сов. радио, 1970. 584 с.
26. 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.
27. Lei X., Wei Y., Wang Y., Zhou Q., Wu G., Ding C., Li Q., Zhang L., Jiang X., Gong Y., Wang W. Full-wave analysis of the high frequency characteristics of the sine waveguide slow-wave structure // AIP Advances. 2017. Vol. 7, № 8. P. 085111. DOI: 10.1063/1.4997329
28. Kowalski E. J., Shapiro M. A., Temkin R. J. An overmoded W-band coupled-cavity TWT // IEEE Trans. Electron Devices. 2015. Vol. 62, № 5. P. 1609–1616. DOI: 10.1109/TED.2015.2407865

Образец для цитирования:

Плоских А. Э., Рыскин Н. М. Моделирование лампы бегущей волны суб-ТГц диапазона с многолучевым ленточным электронным пучком // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2019. Т. 19, вып. 2. С. 113–121. DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-2-113-121>

Simulation of a Sub-THz Traveling Wave Tube with Multiple Sheet Electron Beam

A. E. Ploskikh, N. M. Ryskin

Andrey E. Ploskikh, <https://orcid.org/0000-0003-0363-5530>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, andreyploskikh@gmail.com

Nikita M. Ryskin, <https://orcid.org/0000-0001-8501-6658>, Saratov Branch of Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, 38 Zelenaya St., Saratov 410019, Russia, RyskinNM@info.sgu.ru

Background and Objectives: Many applications, such as high-data-rate wireless communications, spectroscopy, high-resolution radar, biomedical imaging, security, etc. require compact high-power sources of sub-THz radiation. Traveling wave tube (TWT) amplifiers are the most promising candidates for such sources combining 10–100 W power and wide bandwidth. Here we present the results of design and simulation of a 0.2 THz TWT with a grating slow-wave structure (SWS) and electron-optical system (EOS) with three elliptic-shaped beams. **Materials and Methods:** We have conducted numerical simulation of a 0.22 THz TWT amplifier with three elliptic-shaped electron beams and dual-grating staggered SWS. For SWS design and simulation of cold electromagnetic pa-



rameters, a fast and accurate code based on the integral equation method was used. For calculation of small-signal and large-signal gain regimes, the well-known 1D nonlinear frequency-domain TWT theory was used. **Results:** Dispersion characteristics of different transverse modes in the dual-grating SWS are calculated. The electron beam with 21.4 kV dc beam voltage is synchronous with the third-order transverse mode in a wide range of frequencies around 0.22 THz. Small-signal gain for 100 mA total beam current (i.e. 33.3 mA current of each beamlet) is calculated. For 21.4 kV beam voltage, the gain is around 15 dB in 200–250 GHz frequency band. Large signal gain calculations show that over 50 W output power may be attained. **Conclusions:** In this paper, the possibility of developing a 0.22 THz TWT amplifier with a dual-grating staggered SWS and electron beam consisting of three elliptic beamlets is considered. Such a design with increased cross section allows to decrease the current density, which opens up the possibility of a continuous-wave operation. In addition, it facilitates the beam focusing by the magnetic field.

Keywords: terahertz band, traveling wave tube, multiple electron beam, slow-wave structure, numerical simulation.

References

1. Srivastava V. THz vacuum microelectronic devices. *J. Physics: Conf. Series*, 2008, vol. 114, no. 1, 012015.
2. 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, pp. 54–75.
3. Dhillon S. S., Vitiello M. S., Linfield E. H., Davies A. G., Hoffmann M. C., Booske J., Paoloni C., Gensch M., Weightman P., Williams G. P., Castro-Camus E., Cumming D. R. S., Simoens F., Escorcia-Carranza I., Grant J., Lucyszyn S., Kuwata-Gonokami M., Konishi K., Koch M., Schmuttenmaer C. A., Cocker T. L., Huber R., Markelz A. G., Taylor Z. D., Wallace V. P., Zeitler J. A., Sibik J., Korter T. M., Ellison B., Rea S., Goldsmith P., Cooper K. B., Appleby R., Pardo D., Huggard P. G., Krozer V., Shams H., Fice M., Renaud C., Seeds A., Stöhr A., Naftaly M., Ridler N., Clarke R., Cunningham J. E., Johnston M. B. The 2017 terahertz science and technology roadmap. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2017. Vol. 50, no. 4. 043001. DOI: 10.1088/1361-6463/50/4/043001
4. Grigoriev A. D., Ivanov V. A., Molokovsky S. I. *Micro-wave Electronics. Springer Series in Advanced Micro-electronics*. Springer, 2018. 554 p. DOI: 10.1007/978-3-319-68891-6
5. Shin Y.-M., Barnett L. R., Luhmann N. C. Phase-shifted traveling-wave-tube circuit for ultrawideband high-power submillimeter-wave generation. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2009, vol. 56, no. 5, pp. 706–712.
6. 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, no. 9, pp. 3213–3219.
7. Pasour J., Wright E., Nguyen Kh., Balkcum A., Wood F. N., Myers R. E., Levush B. Demonstration of a multikilowatt, solenoidally focused sheet beam amplifier at 94 GHz. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2014, vol. 61, no. 6, pp. 1630–1636.
8. Shi X., Wang Z., Tang X., Tang T., Gong H., Zhou Q., Bo W., Zhang Y., Duan Z., Wei Y., Gong Y., Feng J. Study on wideband sheet beam traveling wave tube based on staggered double vane slow wave structure. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2014, vol. 42, no. 12, pp. 3996–4003.
9. Wang J., Shu G., Liu G., Yang L. Y., Luo Y. Ultrawideband coalesced-mode operation for a sheet-beam traveling-wave tube. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2016, vol. 63, no. 1, pp. 504–511.
10. Baig A., Gamzina D., Kimura T., Atkinson J. E., Domier C., Popovic B., Himes L., Barchfeld R. Field M., Luhmann N. C. Performance of a nano-CNC machined 220-GHz traveling wave tube amplifier. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2017, vol. 64, no. 5, pp. 2390–2397.
11. Srivastava V. Nonlinear analysis of beam-wave interaction in a planar THz travelling-wave tube amplifier. *J. Electromagnetic Waves Appl.*, 2018, vol. 32, no. 2, pp. 190–203.
12. 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, pp. 063102.
13. 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, no. 7, pp. 073106.
14. 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, no. 7, pp. 2132–2139.
15. Shu G., Liu G., Chen L., Bambarandage H., Qian Zh. Terahertz backward wave radiation from the interaction of high-order mode and double sheet electron beams. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2018, vol. 51, no. 5, pp. 055107.
16. Shu G. X., Liu G., Qian Z. F. Simulation study of a high-order mode terahertz radiation source based on an orthogonal grating waveguide and multiple sheet electron beams. *Opt. Express*, 2018, vol. 26, no. 7, pp. 8040–8048.
17. Rozhnev A. G., Ryskin N. M., Karetnikova T. A., Torgashev G. V., Sinitsyn N. I., Shalayev P. D., Burtsev A. A. Studying characteristics of the slowing-down system of the traveling-wave tube with a sheet electron beam. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2014, vol. 56, no. 8–9, pp. 542–553.
18. Karetnikova T. A., Rozhnev A. G., Ryskin N. M., Torgashev G. V., Sinitsyn N. I., Grigoriev Y. A., Burtsev A. A., Shalaev P. D. Modeling a subterahertz traveling-wave tube with a slow-wave structure of the double grating type and a sheet electron beam. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2016, vol. 61, no. 1, pp. 50–55. DOI: 10.1134/S1064226915120116
19. 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, pp. 2129–2134. DOI: 10.1109/TED.2017.2787960
20. 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, pp. 8068467. DOI: 10.1109/UCMMT.2017.8068467
 21. Navrotsky I. A., Burtsev A. A., Danilushkin A. V., Karetnikova T. A., Ryskin N. M., Shumikhin K. V. Developing of EOS model with elliptical beams for THz devices. *International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*. Saratov, IEEE, 2018, vol. 1, pp. 170–174. DOI: 10.1109/APEDE.2018.8542203
 22. Navrotsky I. A., Burtsev A. A., Danilushkin A. V. Parametric 3D modeling of low perveance elliptical electron beams for devices of THz range. *International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*. Saratov, IEEE, 2018, vol. 1, pp. 166–169. DOI: 10.1109/APEDE.2018.8542283
 23. Nguyen K. T., Pasour J. A., Antonsen T. M., Larsen P. B., Petillo J. J., Levush B. Intense sheet electron beam transport in a uniform solenoidal magnetic field. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2009, vol. 56, no. 5, pp. 744–752. DOI: 10.1109/TED.2009.2015420
 24. Ruan C. J., Wang S. Z., Han Y., Li Q. S., Yang X. D. Theoretical and experimental investigation on intense sheet electron beam transport with its diocotron instability in a uniform magnetic field. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2014, vol. 61, no. 6, pp. 1643–1650. DOI: 10.1109/TED.2014.2299286
 25. Shevchik V. N., Trubetskov D. I. *Analiticheskie metody rascheta v jelektronike SVCh* [Analytical methods of calculation in microwave electronics]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1970. 584 p. (in Russian).
 26. Katz A. M., Ilina E. M., Mankin I. A. *Nelinejnye javlenija v SVCh priborah O-tipa s dlitel'nym vzaimodejstviem* [Nonlinear phenomena in O-type microwave devices with long-term interaction]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1975. 296 pp. (in Russian).
 27. Lei X., Wei Y., Wang Y., Zhou Q., Wu G., Ding C., Li Q., Zhang L., Jiang X., Gong Y., Wang W. Full-wave analysis of the high frequency characteristics of the sine waveguide slow-wave structure. *AIP Advances*, 2017, vol. 7, no. 8, pp. 085111. DOI: 10.1063/1.4997329
 28. Kowalski E. J., Shapiro M. A., Temkin R. J. An overmoded W-band coupled-cavity TWT. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2015, vol. 62, no. 5, pp. 1609–1616. DOI: 10.1109/TED.2015.2407865

Cite this article as:

Ploskikh A. E., Ryskin N. M. Simulation of a Sub-THz Traveling Wave Tube with Multiple Sheet Electron Beam. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2019, vol. 19, iss. 2, pp. 113–121 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-2-113-121>