

12

## Моделирование электронно-оптических систем со сходящимся ленточным пучком для лампы бегущей волны терагерцевого диапазона частот

© А.А. Бурцев<sup>1,2</sup>, А.В. Данилушкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НПП „Алмаз“, Саратов, Россия

<sup>2</sup> Саратовский государственный технический университет

им. Гагарина Ю.А., Саратов, Россия

E-mail: antbourtsew@gmail.com

Поступило в Редакцию 21 сентября 2017 г.

В окончательной редакции 18 апреля 2018 г.

Представлены результаты моделирования сходящегося ленточного электронного пучка сечением  $0.05 \times 2$  мм с плотностью тока  $200$  А/см<sup>2</sup>, сформированного электронной пушкой, методами синтеза и анализа при магнитной экранировке катода. Проведен анализ деформации в поперечном сечении пучка в фокусирующем магнитном поле на основе компьютерного трехмерного моделирования электронно-оптической системы с ленточным электронным пучком. Экспериментально исследована вольт-амперная характеристика электронной пушки в импульсном режиме, в результате получен ток на коллекторе  $200$  мА, при этом измеренная толщина пучка составила  $70$  мкм.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.17.46574.17052

Компактные усилители средней мощности диапазона частот  $0.2$ – $0.3$  ТГц могут быть реализованы на основе миниатюризированных приборов вакуумной СВЧ-электроники, таких как лампа бегущей волны (ЛБВ), клистрон бегущей волны. Во многих работах обсуждаются перспективы создания ЛБВ терагерцевого диапазона с ленточными или многолучевыми электронными потоками [1–5]. Одной из основных проблем при разработке вакуумных приборов терагерцевого диапазона является необходимость использования тонких электронных пучков с высокой плотностью тока ввиду уменьшения поперечных размеров пролетных каналов в замедляющей системе. В большинстве случаев в пространстве взаимодействия требуется плотность тока, достигающая

значений порядка  $500 \text{ A/cm}^2$ , что трудноосуществимо для современных катодов. Поэтому перспективны электронно-оптические системы (ЭОС), в которых используются компрессионные ленточные пучки. ЭОС с компрессией электронного потока и магнитоэкранированным катодом позволяют получить достаточно большие плотности тока в пучке при меньшей токовой нагрузке на катод и с меньшим значением магнитного поля. Для ЛБВ с частотой  $220 \text{ GHz}$  в работе [3] приведены результаты моделирования высококомпрессионной ЭОС с плотностью тока  $750 \text{ A/cm}^2$  ленточного пучка в пролетном канале сечением  $0.77 \times 0.15 \text{ mm}$  и общим током  $400 \text{ mA}$  с применением постоянного магнитного поля. Линейная компрессия пучка составила 25 единиц. В работе [4] были представлены результаты моделирования ЭОС с ленточным пучком и периодической магнитной системой. Данная фокусирующая система использовалась для транспортировки пучка с поперечным сечением  $0.6 \times 0.07 \text{ mm}$  с параметрами  $19 \text{ kV}$ ,  $0.15 \text{ A}$  и линейной компрессией 8.5. Плотность тока пучка превышала  $400 \text{ A/cm}^2$  в пролетном канале длиной  $45 \text{ mm}$  двухсекционного петляющего волновода, размер которого составляет  $0.7 \times 0.12 \text{ mm}$ . Позднее были проведены экспериментальные исследования подобной ЭОС в составе ЛБВ и получено 75% токопрохождение до коллектора [5].

Разработка ЭОС, как правило, проводится с помощью современных программ анализа, основанных на численных методах. Но использование метода анализа при моделировании ЭОС обычно сопряжено с неоднократными расчетами при поиске конфигурации электродов и распределения магнитного поля в ней. Поэтому основными недостатками являются неоперативность и большие затраты на вычислительные ресурсы. Один из наиболее точных методов расчета ЭОС с компрессией электронного пучка по заданной траектории — метод синтеза [6]. Впервые этот метод для решения задачи о формировании плоскопараллельного пучка в электронных пушках был применен для случая формирования эллиптических электронных пучков. В дальнейшем результаты были использованы при разработке программы синтеза электростатических электронных пушек, формирующих ленточные и эллиптические пучки. Однако для проектирования ЭОС для приборов О-типа терагерцевого диапазона дополнительно возникает задача фокусировки и согласованного ввода ленточного пучка в магнитное поле.

В настоящей работе применен метод синтеза для расчета ЭОС, формирующих сходящиеся ленточные электронные пучки с током  $200 \text{ mA}$

при напряжении  $U = 20 \text{ kV}$  в пролетном канале ЛБВ с замедляющей системой типа „гребенка“, работающей в диапазоне до  $200 \text{ GHz}$ . Проведено сопоставление одной из моделей с экспериментальными результатами измерений макета электронной пушки.

Уравнения внутренней и внешней задач синтеза в криволинейных координатах, связанных с формой пучка, для модели бесконечно широкого ленточного пучка, согласно [6,7], имеют вид

$$(u'\varphi)' + 2\varphi''u + in^2 \left[ \frac{\varphi}{\varphi_0} - \frac{(n_0^2 - 1)}{nn_0} \right] = \frac{i}{\sqrt{u}}, \quad (1)$$

$$V(x_1, q_2) = u + \frac{\mu^2 i \varphi}{2\sqrt{u}} (2q_2 - 1) - \frac{\mu^2 q_2^2}{2} [\varphi^2 u'' + \varphi \varphi' u'], \quad (2)$$

где  $\varphi$  — функция, описывающая границу пучка,  $x_1$  — продольная,  $q_2$  — поперечная криволинейная координата,  $u, n$  — нормированные осевые потенциал и магнитное поле,  $n_0$  — превышение рабочего магнитного поля над бриллюэновским полем для пучка шириной  $s$  и толщиной  $d = 2\varphi_0 \Phi_0$ ,  $i = 0.095 p_\mu / \mu \mu_1$ ,  $\mu = \Phi_0 / l$ ,  $\mu_1 = s / l$ ,  $p_\mu$  — микропервеанс,  $\Phi_0, l$  — нормировочные величины поперечных и продольных размеров ЭОС,  $\varphi_0$  — нормированная полутолщина пучка в кроссовере,  $V$  — распределение потенциала вне пучка. Распределение осевого потенциала в пушке до выбранной плоскости задается в виде

$$u(x_1) = kx_1^{4/3} \left( 1 + \sum_{n=1}^7 a_n x_1^n \right)^2. \quad (3)$$

В области  $x_1 \geq x_{01}$  (где  $x_{01}$  — плоскость с потенциалом  $u(x_1) = 1$ ) граница пучка описывается соотношением

$$\varphi(x_1) = \sum_{n=0}^6 b_n (x_1 - x_{01})^n.$$

В области  $x_1 < x_{01}$  функция  $\varphi(x_1)$  определяется с помощью уравнения (1). Значения коэффициентов  $k, i, a_n, b_n$  получены по аналогии с [7] и обеспечивают требуемый первеанс и согласованный ввод пучка в регулярную область магнитного поля.

Решение внутренней задачи синтеза (1) связано с нахождением функций  $\varphi(x_1), u(x_1), n(x_1)$  во всей области ЭОС. В результате

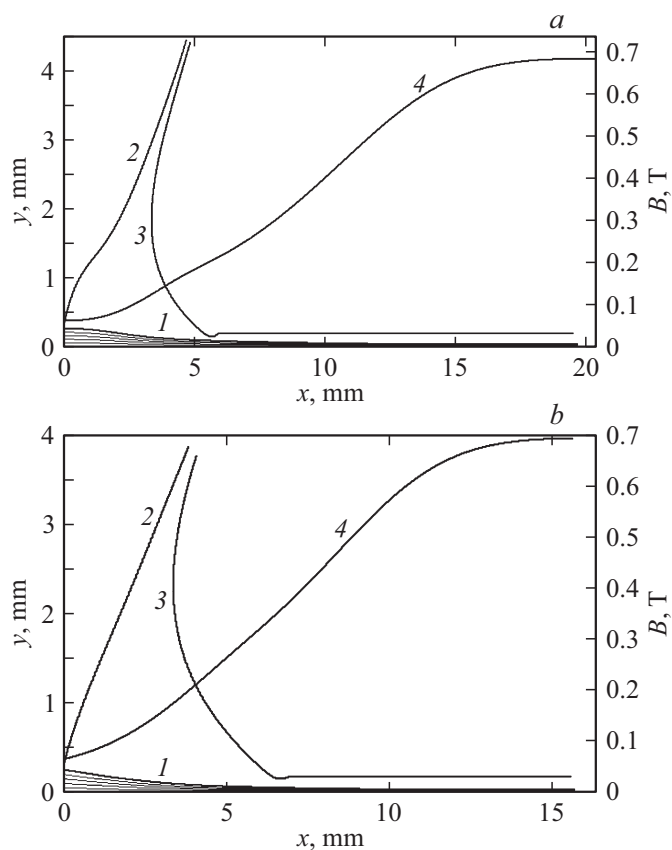
решения внешней задачи синтеза (2) для заданной формы сходящегося пучка определяются профили фокусирующего электрода и анода и межэлектродные зазоры электронной пушки. Переход от криволинейной системы координат к декартовой осуществляется с помощью уравнения из работы [6]. Далее вычисляются нормировочные длины, осевая длина пушки, линейная компрессия пучка, радиус кривизны катода. Распределение магнитного поля в пушке вдоль нормированной координаты  $x_1$  определяется по формуле

$$B(x_1) = n(x_1)B_{Br}, \quad (4)$$

где  $B_{Br} = \sqrt{6.9 \cdot 10^{-7}(p_\mu/sd)U}$  — бриллюэновское поле.

На рис. 1 представлены результаты расчета методом синтеза ЭОС с ленточным пучком с током 200 мА с плоским и цилиндрическим катодами. Магнитное поле на катоде  $B_c = 0.05$  Т, в канале 0.68 Т. Корректность расчета методом синтеза была проверена с помощью расчетов ЭОС методом анализа в трехмерной программе Lorentz-3EM [8]. Результаты моделирования представлены на рис. 2, при этом конфигурация фокусирующего электрода задавалась с учетом конструкторско-технологических особенностей изготовления электронной пушки. В результате были получены поперечные сечения ленточного пучка при различных расстояниях от катода (рис. 2, с) при транспортировке в магнитном поле 0.7 Т, причем угол деформации данного пучка на расстоянии 30 мм не превышал  $35^\circ$  при его 100% токопрохождении. Транспортировка пучка в магнитном поле на расстоянии более 35 мм от катода дает заметное токооседание на стенки канала.

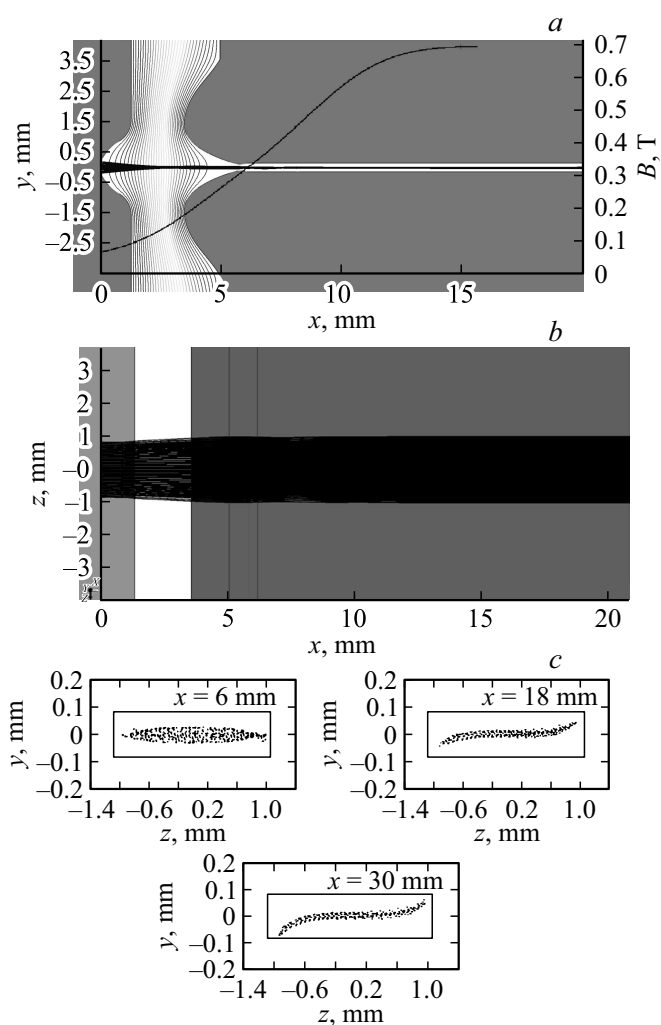
Для экспериментальных исследований ЭОС с ленточным потоком с помощью размерной электроискровой обработки были изготовлены прессованный импрегнированный плоский катод и фокусирующая сетка (рис. 3). В ходе исследований вольт-амперной характеристики электронной пушки в вакуумном разборном макете использовался подвижной коллектор. Макет электронной пушки, формирующей ленточный пучок, состоял из катодно-подогревательного узла, фокусирующей сетки, анода и коллектора с диафрагмой 0.01 мм. Расстояние катод–анод составляло 2 мм. Анодный потенциал изменялся от 0 до 10 000 В. В результате экспериментальных исследований вольт-амперной характеристики электронной пушки в импульсном режиме (скважность 2000, длительность импульса 10  $\mu$ s) при рабочей температуре катода  $1200^\circ\text{C}$  получен ток на



**Рис. 1.** Конфигурация электродов ЭОС (фокусирующий электрод — 2, анод — 3), формирующих ленточный пучок (1) со следующими параметрами: микропервееанс 0.0707, напряжение 20 kV, сечение пучка  $0.05 \times 2$  mm, а также кривая магнитного поля (4). *a* — плоский катод, *b* — цилиндрический катод, радиус кривизны катода  $R \approx 4.2$  mm.

коллекторе 200 mA, при этом измеренная толщина пучка в кроссовере пушки составила порядка  $70 \mu\text{m}$ .

В результате проведенного моделирования была спроектирована ЭОС с ленточным потоком сечением  $0.05 \times 2$  mm с линейной сходи-



**Рис. 2.** ЭОС с ленточным электронным потоком в магнитном поле  $B = 0.7$  Т с плоским катодом. *a* — проекция траектории крупных частиц на плоскость  $xy$ , *b* — проекция траектории крупных частиц на плоскость  $xz$ , *c* — проекция траектории крупных частиц на плоскость  $zy$ .



**Рис. 3.** Полученное методом сканирующей электронной микроскопии изображение катодно-сеточного узла с импрегнированным катодом макета электронной пушки, формирующей ленточный пучок.

мостью 10 и плотностью тока в пучке  $200 \text{ A/cm}^2$ . Амплитуда магнитного поля составила 0.7 Т. Проблема деформации ленточного пучка в узких пролетных каналах может ограничивать разработку многосекционных терагерцевых приборов с более протяженными замедляющими системами. Экспериментально показано, что в макете электронной пушки получен импульсный ток 200 мА. Необходимо отметить, что в отличие

от численной модели в экспериментальном макете электронной пушки измеренная толщина пучка составила  $70\ \mu\text{m}$ , что может быть связано с влиянием начальных тепловых скоростей электронов на катоде, приводящим к расширению пучка и перераспределению плотности тока в нем.

## Список литературы

- [1] *Burtsev A.A., Bushuev N.A., Navrotsky I.A., Sakhadzhi G.V., Shalaev P.D., Grigoriev Y.A.* // Proc. of the 16th IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC). Beijing, China, 2015. DOI: 10.1109/IVEC.2015.7223751
- [2] *Бурцев А.А., Павлов А.А., Кицюк Е.П., Григорьев Ю.А., Данилушкин А.В., Шумихин К.В.* // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. В. 11. С. 88–94.
- [3] *Atkinson J.E., Gajaria D.D., Grant T.J., Kimura T., Stockwell B.C., Field M., Borwick R.J., Brar B., Pasour J.A.* // Proc. of the IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC). Monterey, 2010. P. 97–98. DOI: 10.1109/IVELEC.2010.5503586
- [4] *Zheng Y., Gamzina D., Popovic B., Luhmann N.C.* // IEEE Trans. Electron. Dev. 2016. V. 63. N 11. P. 4466–4472.
- [5] *Field M., Kimura T., Atkinson J., Gamzina D., Luhmann N.C., Jr., Stockwell B., Grant T.J., Griffith Z., Borwick R., Hillman C., Brar B., Reed T., Rodwell M., Shin Y.-M., Barnett L.R., Baig A., Popovic B., Domier C., Barchfield R., Zhao J., Higgins J.A., Goren Y.* // IEEE Trans. Electron. Dev. V. 65. N 6. P. 2122–2128. DOI: 10.1109/TED.2018.2790411
- [6] *Невский П.В.* Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. М.: ЦНИИ „Электроника“, 1989. В. 15(1483). 48 с.
- [7] *Gamayunov Y.G., Toreev A.I., Patrusheva E.V.* // J. Commun. Technol. Electron. 2008. V. 3. N 3. P. 323–332.
- [8] <http://www.integratedsoft.com/products/lorentz/>