

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СО СХОДЯЩИМСЯ ЛЕНТОЧНЫМ ПУЧКОМ ДЛЯ ЛАМП БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА

© 2019 г. А. А. Бурцев<sup>1,2, \*</sup>, А. В. Данилушкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-производственное предприятие “Алмаз”,  
Российская Федерация, 410033 Саратов, ул. Панфилова, 1

<sup>2</sup>Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,  
Российская Федерация, 410054 Саратов, ул. Политехническая, 77

\*E-mail: antbourtsew@gmail.com

Поступила в редакцию 19.10.2017 г.

После доработки 13.04.2018 г.

Принята к публикации 14.06.2018 г.

Представлены результаты моделирования сходящегося ленточного электронного пучка сечением  $0.05 \times 2 \text{ мм}^2$  и с плотностью тока  $200 \text{ А/см}^2$ , сформированного электронной пушкой методами синтеза и анализа при различной магнитной экранировке катода и с линейной компрессией 10 и 15. Проведен анализ деформации в поперечном сечении пучка в фокусирующем магнитном поле на основе компьютерного трехмерного моделирования электронно-оптических систем с ленточным электронным пучком. Показана возможность получения низкоперевансного потока с малой деформацией в пролетном канале замедляющей структуры типа гребенка длиной до 30 мм.

DOI: 10.1134/S0033849419090067

Компактные усилители средней мощности диапазона частот 0.2...0.3 ТГц могут быть разработаны на основе миниатюризированных приборов вакуумной СВЧ-электроники, таких как лампы бегущей волны (ЛБВ), клистрон бегущей волны. Во многих работах обсуждаются перспективы создания ЛБВ терагерцевого (ТГц) диапазона с ленточными или многолучевыми электронными пучками [1–5]. Одной из основных проблем при разработке вакуумных приборов ТГц-диапазона является необходимость использования тонких электронных пучков с высокой плотностью тока ввиду уменьшения поперечных размеров пролетного канала в замедляющей системе. В большинстве случаев в пространстве взаимодействия требуется плотность тока до  $500 \text{ А/см}^2$ , что является трудно осуществимой задачей для современных катодов. Поэтому перспективны электронно-оптические системы (ЭОС), в которых используются ленточные пучки. ЭОС с магнитно-экранированным катодом позволяет получить достаточно большие значения плотности тока в пучке при меньшей токовой нагрузке на катод и с меньшим значением магнитного поля.

Принцип компрессии эллиптического пучка для получения за анодным отверстием в кроссовере ленточного пучка был применен в работе [4] для разработки ЛБВ с выходной мощностью 50 Вт, работающей на частоте 220 ГГц. В данной работе рассчитан вариант пушки с ленточным

пучком с током 257 мА при ускоряющем напряжении 20 кВ. Ленточный пучок с линейной компрессией порядка 7 формируется с эллиптического катода за счет фокусирующего электрода сложной формы, при этом средняя плотность тока на катоде составила  $40 \text{ А/см}^2$ . В работе [5] проведен расчет электронной пушки для ЛБВ 220 ГГц, в которой формируется ленточный электронный пучок с током 80 мА и напряжением 25 кВ. Пучок формируется с поверхности цилиндрического катода радиусом 0.35 мм, т.е. плотность тока на катоде составляет  $20 \text{ А/см}^2$ . В пушке применена компрессия электронного пучка в соотношении 7 : 4 и 7 : 1 по осям  $x$  и  $y$  соответственно, и в результате формируется пучок сечением  $0.4 \times 0.1 \text{ мм}^2$ . Для более коротковолновых приборов в работе [6] приведены результаты моделирования высококомпрессионной ЭОС. Для обеспечения пропускания электронного пучка с высокой плотностью тока используется периодическая магнитная система, обеспечивающая фокусировку пучка вдоль оси  $Z$ , а квадрупольная ее часть – для удержания пучка в поперечном направлении. Эта фокусирующая система используется для транспортировки ленточного пучка с параметрами: 19 кВ, 0.15 А, компрессией 8.5, с поперечным сечением эллиптической формы пучка  $0.60 \times 0.07 \text{ мм}^2$ . Плотность тока в пучке превышает  $400 \text{ А/см}^2$ , в пролетном канале двухсекционного петляющего волновода длиной 45 мм (для 263 ГГц), размер которого со-

ставляет  $0.7 \times 0.12 \text{ мм}^2$ . Коэффициент токопрохождения прогнозируется на уровне 95%.

Существует два варианта реализации магнитного поля в ЭОС со сходящимся ленточным пучком. Первый вариант – использование электронной пушки с частичной магнитной экранировкой катода, позволяющего обеспечить лучшую структуру электронного пучка в пролетном канале за счет подавления тепловых скоростей на катоде. Второй вариант – пушка с полностью магнитно-экранированным катодом. Величина рабочего магнитного поля в данном варианте ЭОС может быть меньше при тех же размерах пучка и микропервеансе, при этом ленточный пучок становится менее чувствительным от влияния переходной области магнитного поля.

В данной работе для проектирования ЭОС, формирующих ленточные пучки, рассмотрено моделирование двух вариантов электронных пушек.

Для разработки ЭОС для приборов *O*-типа ТГц-диапазона возникает задача фокусировки и согласованного ввода ленточного пучка в магнитное поле. Также существует трудность транспортировки ленточного пучка в пролетном канале из-за его деформации относительно плоскости симметрии, что предполагает анализ поведения электронов на краях пучка.

Разработка ЭОС, как правило, проводится современными программами анализа, основанных на численных методах. Но использование метода анализа при моделировании ЭОС обычно сопряжено с неоднозначными расчетами при поиске конфигурации электродов и распределения магнитного поля. Поэтому основными недостатками программ анализа являются неоперативность и большие затраты на вычислительные ресурсы. Одним из наиболее точных методов расчета ЭОС с компрессией электронного пучка по заданной траектории является метод синтеза [7]. В данной работе был применен метод синтеза для расчета ЭОС, формирующих сходящиеся ленточные электронные пучки с током 200 мА при напряжении 20 кВ в узком пролетном канале замедляющей системы. Затем модель синтеза была сопоставлена с результатами расчета по программе анализа интенсивного низкопервеансного ленточного электронного потока с линейной компрессией.

Уравнения внутренней и внешней задач синтеза в криволинейных координатах для модели бесконечно широкого ленточного пучка согласно [7, 8] имеют вид

$$(u'\varphi)' + 2\varphi''u + \gamma^2(h^2\varphi - hh_c\varphi_c) = \frac{i}{\sqrt{u}}, \quad (1)$$

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

где  $\varphi$  – функция, описывающая границу пучка;  $u, h$  – нормированные осевые потенциал и магнитное поле;  $h_c$  и  $\varphi_c$  – значение функций  $h$  и  $\varphi$  на ка-

тоде,  $i = 0.0952 \frac{p_\mu}{\mu\mu_1}$ ,  $\mu = \Phi_0/l$ ,  $\mu_1 = s/l$ ;  $p_\mu$  – микропервеанс;  $\Phi_0, l$  – нормировочные величины поперечных и продольных размеров ЭОС,  $s$  – ширина пучка,  $\gamma^2 = \eta B^2 l^2 / U_0$  ( $B$  и  $U_0$  – нормировочные величины магнитного поля и потенциала).

Уравнение внутренней задачи (1) содержит три искомые функции –  $\varphi(x), u(x), h(x)$ , для его решения необходимо задаваться двумя из них. Распределение осевого потенциала в пушке до выбранной плоскости задается в виде

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

В области  $x_1 \geq x_m$  потенциал равен 1, при этом граница пучка описывается полиномом

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

Коэффициенты  $k, i, a_n, b_n$ , обеспечивающие требуемый первеанс и согласованный ввод пучка в регулярную область магнитного поля, а также распределение магнитного поля  $h(x)$  получены по методике, представленной в работе [9].

В результате решения внешней задачи синтеза (2) для заданной формы сходящегося пучка были найдены профили фокусирующего электрода и анода и межэлектродные зазоры электронной пушки. Переход от криволинейной системы координат к декартовой осуществлялся с помощью уравнения

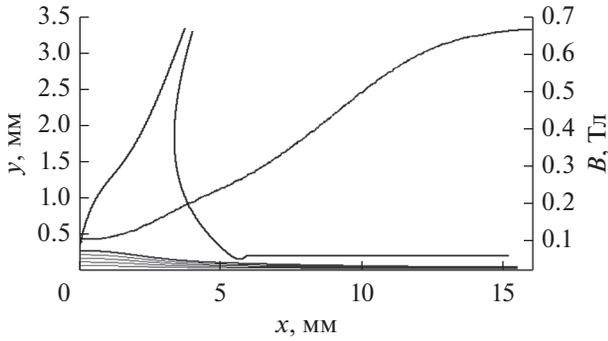
$$\frac{d\xi}{dq_2} = - \frac{\mu^2 \varphi(\xi) \varphi'}{1 + (\mu q_2 \varphi'(\xi))^2} q_2, \quad (3)$$

где  $\xi = x/l$  – продольная декартовая координата,  $y/l = \mu q_2 \varphi(\xi)$  – поперечная декартовая координата.

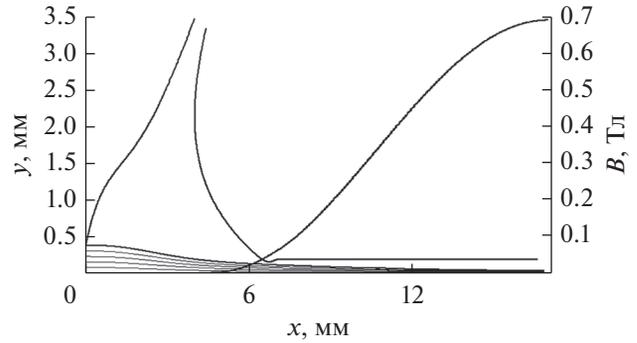
Далее были вычислены нормировочные длины, осевая длина пушки, линейная компрессия пучка, радиус кривизны катода. Магнитное поле в пушке вдоль нормированной координаты  $x_1$  определяли по формуле

$$B = h(x) \sqrt{6.9 \times 10^{-7} (p_\mu / sd) U}.$$

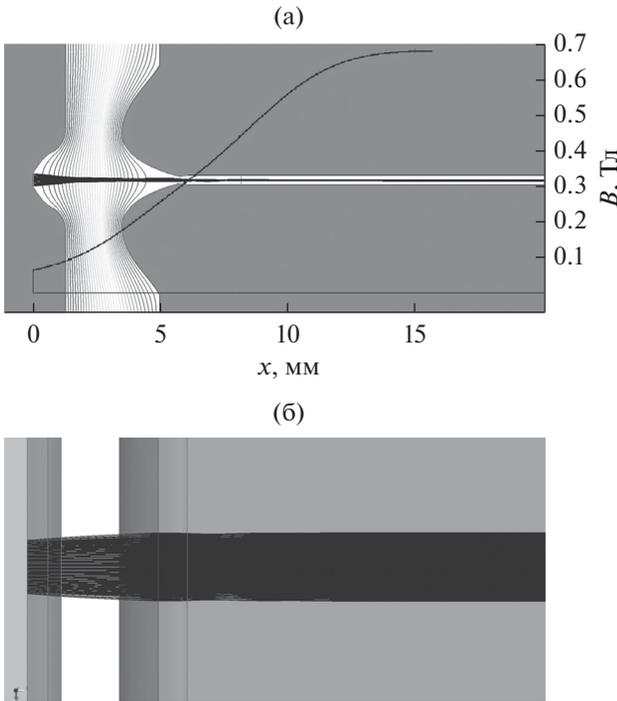
Рассмотрим вариант ЭОС формирования ленточного пучка с частичной магнитной экранировкой катода. На рис. 1 представлены результаты расчета ЭОС с ленточным пучком с током 200 мА с плоским катодом методом синтеза. В случае с плоским катодом угловой коэффициент (значение производной функции  $\varphi$  на катоде) равен  $\varphi'_c = 0$ . Магнитное поле на катоде  $B_c = 0.05$  Тл, в канале



**Рис. 1.** Конфигурация электродов ЭОС с частичной магнитной экранировкой катода, формирующих пучок с параметрами: микропервеанс 0.0707, ускоряющее напряжение 20 кВ, сечение пучка  $0.05 \times 2 \text{ мм}^2$ .



**Рис. 3.** Результаты расчета ЭОС формирования ленточного пучка с полной магнитной экранировкой катода методом синтеза с параметрами: микропервеанс 0.0707, ускоряющее напряжение 20 кВ, сечение пучка  $0.05 \times 2 \text{ мм}^2$ .



**Рис. 2.** ЭОС формирования ленточного электронного потока в магнитном поле  $B = 0.7 \text{ Тл}$  с плоским катодом: проекция траектории крупных частиц на плоскость  $XY$  (а) и  $XZ$  (б).

0.7 Тл. Линейная сходимость ленточного пучка составила 10 ед.

Синтезированная ЭОС была также рассчитана в трехмерной программе численного анализа Lorentz-3EM. Результаты моделирования представлены на рис. 2, при этом конфигурацию фокусирующего электрода задавали с учетом конструктивно-технологических особенностей изготовления электронной пушки. В результате были получены сечения ленточного пучка, а также деформация

его в поперечном сечении при разных расстояниях от катода в пролетном канале ЗС при транспортировке в магнитном поле 0.7 Тл. При этом угол деформации, т.е. угол поворота ленточного пучка в однородном магнитном поле относительно плоскости симметрии пушки на расстоянии 30 мм, не превышал  $35^\circ$  при его стопроцентном токопрохождении.

Второй вариант ЭОС формирования ленточного пучка в пушке рассматривается с полностью магнитно-экранированным катодом. В этом случае распределение магнитного поля в магнитно-экранированной пушке в области нарастания потенциала до  $u = 1$  зададим в виде

$$h = \sin^2(x_1 - x_m), \tag{4}$$

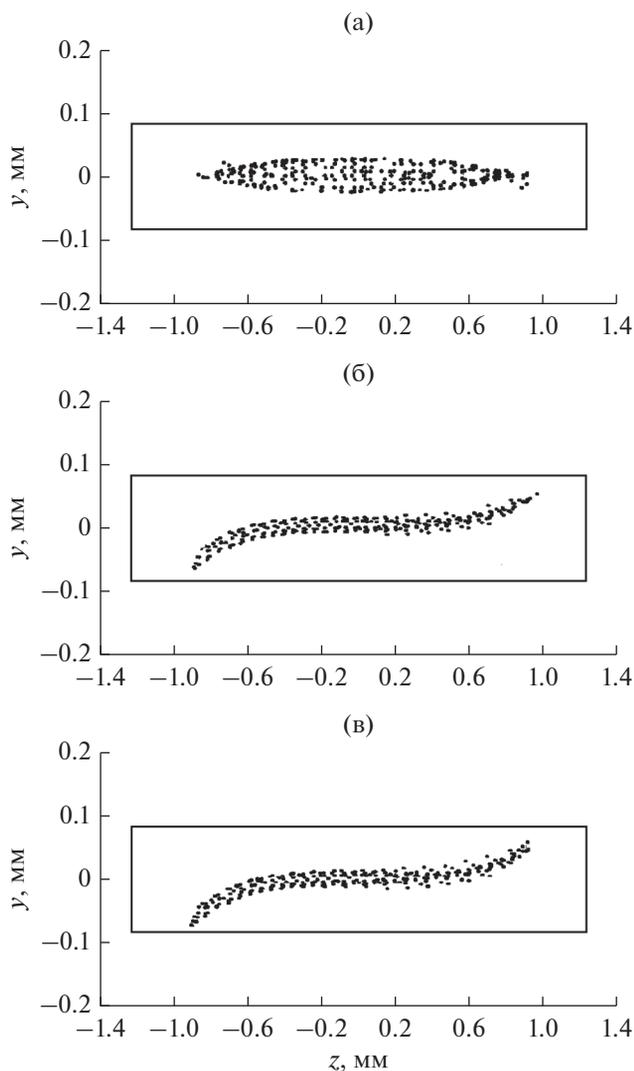
где  $x_1$  – продольная координата;  $x_m$  – координата начала нарастания магнитного поля в ЭОС. В области, где осевой потенциал  $u = 1$  и осевое магнитное поле  $h_0$  (причем на катоде магнитное поле отсутствует ( $h_c = 0$ )), из уравнения (1) получаем  $\gamma^2 h_0^2 \Phi_0 = i$ , откуда выражаем  $\gamma$  и, подставляя его в (1), имеем

$$(u'\Phi)' + 2\Phi''u + ih^2 \frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{i}{\sqrt{u}}. \tag{5}$$

В области, где  $u = 1$ , согласно уравнению (5) получаем выражение для функции  $h$ :

$$h = \sqrt{\frac{\Phi_0}{\Phi} - 2 \frac{\Phi'' \Phi_0}{i \Phi}}. \tag{6}$$

На рис. 3 представлены результаты расчета методом синтеза ЭОС формирования ленточного пучка с током 200 мА с плоским магнитно-экранированным катодом при линейной сходимости пучка 15. В этом случае, в отличие от ЭОС, представленной на рис. 1, при том же значении плотности тока в пучке за счет большей сходимости обеспечивается меньшая токовая нагрузка на ка-



**Рис. 4.** Сечения ленточного электронного пучка в ЭОС при различных расстояниях от катода:  $X = 7$  (а), 20 (б) и 30 мм (в).

тод. Результаты расчета ЭОС также были проверены методом анализа. Как известно, токопрохождение ленточного электронного пучка в пролетном канале системы во многом зависит от его закручивания в поперечном сечении. На рис. 4 представлена эволюция ленточного пучка в поперечном сечении, где наблюдалась деформация пучка в магнитном поле 0.7 Тл, при этом токооседание на стенки пролетного канала возникает после 35 мм от катода. Среднеквадратичный эмиттанс пучка со-

ставлял  $1.43 \times 10^{-8}$  п м рад. Необходимо отметить, что для двух вариантов ЭОС, полученных в результате анализа электронных пушек, толщина пучка и линейная компрессия (10 и 15) соответствовали рассчитанным по методу синтеза ЭОС, хотя положение кроссовера пучка незначительно отличалось.

В результате проведенного моделирования методом синтеза была спроектирована ЭОС с ленточным потоком сечением  $0.05 \times 2$  мм<sup>2</sup> с линейной сходимостью 10 и 15, с различной магнитной экранировкой катода и плотностью тока в пучке 200 А/см<sup>2</sup>. Проведенное моделирование сходящегося ленточного электронного пучка, показало возможность получения низкопервееанского (0.0707) ленточного потока с незначительной деформацией формы в поперечном сечении, что важно для применения в микроразмерных электродинамических структурах ЛБВ ТГц-диапазона, при этом амплитуда магнитного поля была выбрана 0.7 Тл. Дальнейшее уменьшение величины угла деформации ленточного пучка и увеличение длины пролетного канала замедляющих структур возможно за счет увеличения уровня фокусирующего магнитного поля, а также за счет применения сложных периодических (реверсных) магнитных систем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Burtsev A.A., Grigor'ev Y.A., Navrotsky I.A. et al.* // Techn. Phys. Lett. 2016. V. 42. № 5. P. 543.
2. *Burtsev A.A., Bushuev N.A., Navrotsky I.A. et al.* // Proc. 16th IEEE Intern. Vacuum Electronics Conf. Beijing, China, 2015. <https://doi.org/10.1109/IVEC.2015.7223751>
3. *Burtsev A.A., Pavlov A.A., Kitsyuk E.P. et al.* // Techn. Phys. Lett. 2017. V. 43. № 6. P. 542.
4. *Kimura T., Atkinson J., Forrest S. et al.* // IVEC. 2012. Monterey, California, USA. P. 195.
5. *Shi X., Wang Z., Tang X. et al.* // IEEE Trans. 2014. V. PS-42. № 12. P. 3996.
6. *Yuan Zheng, Gamzina D., Popovic B., Luhmann N.C.* // IEEE Trans. 2016. V. 63. Iss. 11. P. 4466.
7. *Овчаров В.Т.* // РЭ. 1962. Т. 7. № 8. С. 1367.
8. *Невский П.В.* // Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ. 1989. № 15. С. 48.
9. *Гамаюнов Ю.Г., Патрушева Е.В.* // РЭ. 2017. Т. 62. № 11. С. 1.
10. *Gamayunov, Y.G., Toreev A.I., Patrusheva E.V.* // J. Commun. Technol. Electron. 2008. V. 3. № 3. P. 323.