

Синтез электронно-оптических систем с компрессией ленточного пучка для ламп бегущей волны терагерцевого диапазона

© А.А. Бурцев,^{1,3} А.В. Данилушкин,² Н.И. Сеницын³

¹ Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Алмаз», 410033 Саратов, Россия

² Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., 410054 Саратов, Россия

³ Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 410019 Саратов, Россия
e-mail: antbourtsew@gmail.com

(Поступило в Редакцию 8 февраля 2018 г. В окончательной редакции 25 мая 2018 г.)

Представлены результаты синтеза электронно-оптических систем формирования сходящегося ленточного электронного пучка с компрессией 15 и 20, сечением 0.05×2 мм и с плотностью тока 100 A/cm^2 при полной магнитной экранировке автоэмиссионного катода. Проведен анализ деформации в пролетном канале замедляющей структуры низкоперевансного потока в магнитном поле на основе компьютерного трехмерного моделирования электронно-оптической системы с ленточным электронным пучком.

DOI: 10.21883/JTF.2018.12.46797.54-18

Мощные миниатюрные электровакуумные источники когерентного терагерцевого излучения диапазона частот 0.2–0.3 THz могут быть реализованы на основе электровакуумных приборов таких, как лампы бегущей волны (ЛБВ), где используются ленточные электронные пучки с высокой плотностью тока [1,2]. Одной из основных проблем при создании вакуумных приборов терагерцевого диапазона является необходимость использования в узких пролетных каналах замедляющих систем электронные пучки с уровнем плотности тока до 500 A/cm^2 , что является трудноосуществимым из-за ограниченной эмиссии современных катодов в прямоочной оптике. Поэтому перспективны те электронно-оптические системы (ЭОС), в которых используются сходящиеся ленточные пучки, позволяющие получить достаточно большие плотности тока при меньшей токовой нагрузке на катод и с меньшим значением магнитного поля.

Существуют несколько вариантов реализации ЭОС формирования сходящегося ленточного пучка. В одном из них катод пронизывается магнитным полем, при этом обеспечивается лучшая структура электронного пучка в пролетном канале за счет некоторого подавления тепловых скоростей электронов на катоде и меньшей зависимости от возмущающих факторов таких, как, например, несоосность элементов ЭОС. Вторым вариантом — полностью магнито-экранированная пушка. В этом случае величина рабочего магнитного поля может быть меньше при тех же размерах пучка и перевансе. Пучок становится менее чувствительным к влиянию переходной области магнитного поля и степени экранировки катода. Поскольку уровни фокусирующих магнитных полей минимальны, в настоящей работе для проектирования ЭОС, формирующих ленточные пучки, рассматривается вариант с магнито-экранированным катодом.

При разработке ЭОС для приборов О-типа терагерцевого диапазона дополнительно возникает задача фокусировки и согласованного ввода ленточного пучка в магнитное поле. Трудность токопрохождения ленточного пучка в пролетном канале из-за его деформации предполагает анализ поведения электронов на краях пучка.

В настоящей работе используются модель ламинарного пучка и криволинейная система координат (рис. 1), при этом ширина электронного пучка больше его толщины. Это позволяет предположить, что распределение плотности тока и заряд в пучке не зависят от поперечной по ширине пучка координаты q_3 . Уравнение внутренней задачи синтеза, согласно [3], имеет вид

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

где φ — функция, описывающая границу пучка; u, h — нормированные осевые потенциал и магнитное поле; h_c и φ_c — значение функций h и φ на катоде, $i = 0.0952 \frac{p_\mu}{\mu\mu_1}$, $\mu = \Phi_0/l$, $\mu_1 = s/l$; p_μ — микропереванс; Φ_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 $\varphi(x)$, $u(x)$, $h(x)$ и для его решения необходимо задаваться двумя из них. 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) можно записать: $\gamma^2 h_0^2 \varphi_0 = i$, откуда можно выразить γ . Тогда уравнение (1) запишется в следующем виде:

$$(u'\varphi)' + 2\varphi''u + ih^2 \frac{\varphi}{\varphi_0} = \frac{i}{\sqrt{u}}. \quad (2)$$

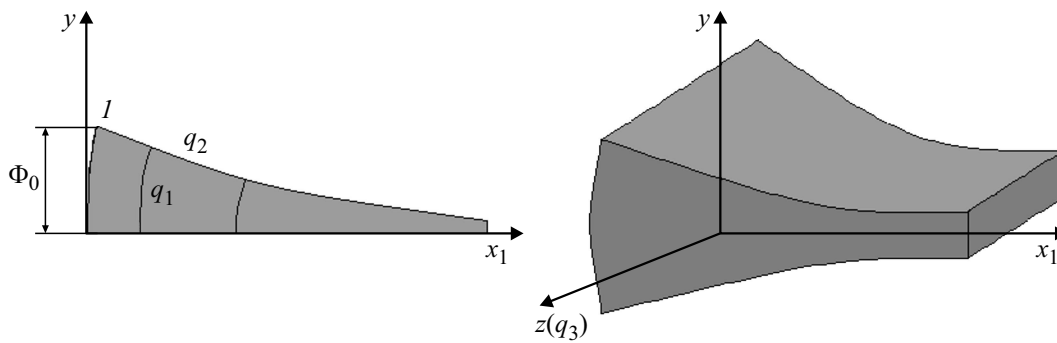


Рис. 1. Конфигурация ленточного пучка и системы координат.

Распределение магнитного поля в магнито-экранированной пушке в области нарастания потенциала до $u = 1$ примем в следующем виде [4,5]:

$$h = \sin^2(x_1 - x_m), \tag{3}$$

где x_1 — продольная координата, x_m — координата начала нарастания магнитного поля в ЭОС.

В области, где осевой потенциал $u = 1$, из уравнения (2) получим выражение для распределения магнитного поля h :

$$h = \sqrt{\frac{\varphi_0}{\varphi} - 2 \frac{\varphi''}{i} \frac{\varphi_0}{\varphi}}. \tag{4}$$

Перспективными ЭОС формирования ленточных электронных пучков источников излучения О-типа терагерцевого диапазона являются системы, использующие эффект автоэлектронной эмиссии. Моделирование таких систем может быть проведено методом синтеза с использованием модели ЭОС с гладкой поверхностью катода и наличием напряженности электрического поля на его поверхности, которая за счет усиления электрического поля в автоэммитерах в катоде достигает величины, необходимой для автоэмиссии.

В настоящей работе распределение потенциала вблизи поверхности катода определяется уравнением

$$(u'\varphi)' + 2\varphi''u = \frac{i}{\sqrt{u}}. \tag{5}$$

Из уравнения (5), как это показано в работе [6], можно аналитически получить выражение для напряженности электрического поля

$$u'(x) = \sqrt{2.7\sqrt{xu'_c}i\varphi'_c x + [2i\sqrt{u}(1 - \varphi'_c x) + (u'_c)^2(1 - \varphi'_c x)^2]},$$

при этом функция φ вблизи автоэмиссионного катода задается в виде $\varphi = \varphi'_c x + 1$. Далее в пушке распределение

потенциала задается в виде

$$u(x) = \sum_0^6 a_n(x - x_1)^n, \tag{6}$$

где первые три коэффициента находятся из условий сшивания потенциала, его первой и второй производной, а остальные — из условий $u(x_2) = 1, u'(x_2) = u''(x_2) = 0$; функция φ находится из решения уравнения внутренней задачи синтеза (2).

Нахождение конфигурации фокусирующего электрода и анода пушки следует из решения уравнения внешней задачи синтеза, имеющей, согласно [7], вид

$$V(x, q_2) = u + \frac{\mu^2 i \varphi}{2\sqrt{u}} (2q_2 - 1) - \frac{\mu^2 q_2^2}{2} (\varphi^2 u'' + \varphi \varphi' u'). \tag{7}$$

Переход от криволинейной системы координат к декартовой осуществляется с помощью уравнения

$$\frac{d\xi}{dq_2} = - \frac{\mu^2 \varphi(\xi) \varphi'}{1 + (\mu q_2 \varphi'(\xi))^2} q_2. \tag{8}$$

где q_2 — поперечная криволинейная координата, $\xi = x/l$ — продольная декартова координата, $y/l = \mu q_2 \varphi(\xi)$ — поперечная декартова координата. Далее вычисляются нормировочные размеры, осевая длина пушки, линейная компрессия пучка, радиус кривизны катода. Магнитное поле в пушке вдоль нормированной координаты x_1 определяется по формуле $B = h(x) \sqrt{6.9 \cdot 10^{-7} (p_\mu / sd) U}$.

На рис. 2 представлено моделирование ЭОС с автоэмиссионным катодом и ленточным пучком 0.05×2 мм с линейной компрессией 15 с плоским автокатодом и с компрессией 20 с цилиндрическим автокатодом, имеющим радиус кривизны 6.2 мм. Плотность тока в пучке 100 А/см².

Найденное по формуле $E_c = u'_c U_0 / l$ значение средней напряженности электрического поля вблизи катода для рассчитанного варианта ЭОС с цилиндрическим автокатодом ($0.2 \cdot 10^5$ В/см) может, например, определять действующую напряженность поля для необходимой плотности токоотбора в соответствии с формулой Фаулера-Нордгейма за счет экспериментально измеренного коэффициента усиления поля микро-наноострийного катода.

Синтезированная ЭОС была также рассчитана в трехмерной программе численного анализа Lorentz-3EM. В результате были получены сечения ленточного пучка в пролетном канале замедляющей структуры (рис. 3), где наблюдается его деформация при разных расстояниях от катода при транспортировке в магнитном поле порядка 0.6 Т. Среднеквадратичный эмиттанс пучка составил $5.3 \cdot 10^{-8} \pi \cdot \text{m} \cdot \text{rad}$. Транспортировка ленточного пучка с коэффициентом заполнения в канале 0.5 дает стопроцентное токопрохождение на длине до 45 мм.

В результате проведенного моделирования была спроектирована ЭОС с ленточным потоком сечением $0.05 \times 2 \text{ mm}$ с линейной компрессией 15 и 20 и плотностью тока в пучке 100 A/cm^2 . Проведенное в рамках данного исследования моделирование сходящегося ленточного электронного пучка, сформированного с помощью магнито-экранированной электронной пушки, показало возможность получения низкоперевансного ленточного потока с незначительной деформацией формы в поперечном сечении, что важно для применения в микроразмерных электродинамических структурах ЛБВ терагерцевого диапазона, при этом амплитуда магнитного поля была выбрана 0.6 Т. Дальнейшее уменьшение

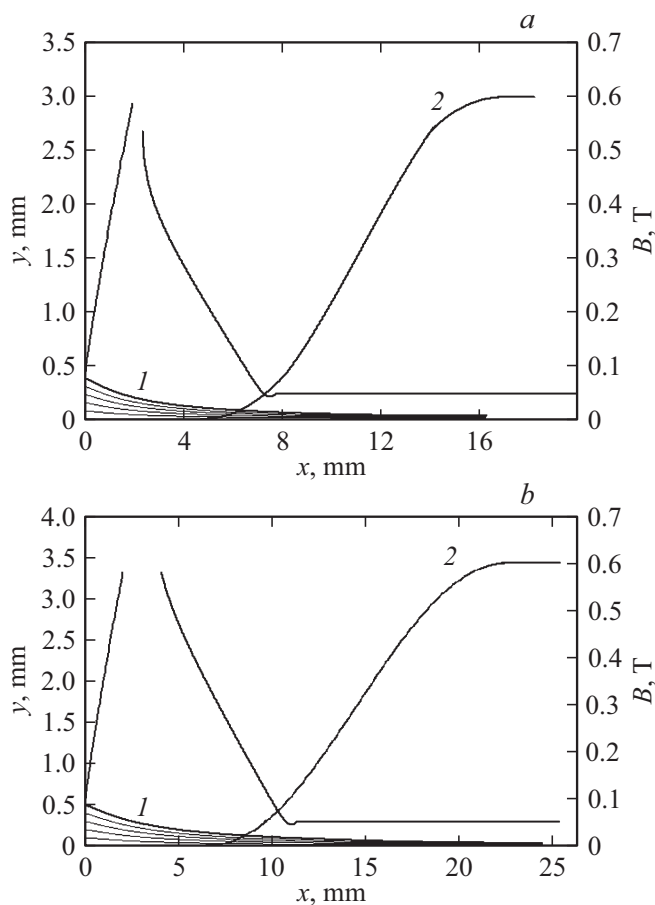


Рис. 2. Результаты моделирования ЭОС: *a* — с плоским автокатодом с компрессией 15; *b* — с цилиндрическим автокатодом с компрессией 20; *1* — траектории электронов $\varphi(x)$, *2* — распределение магнитного поля $B(x)$.

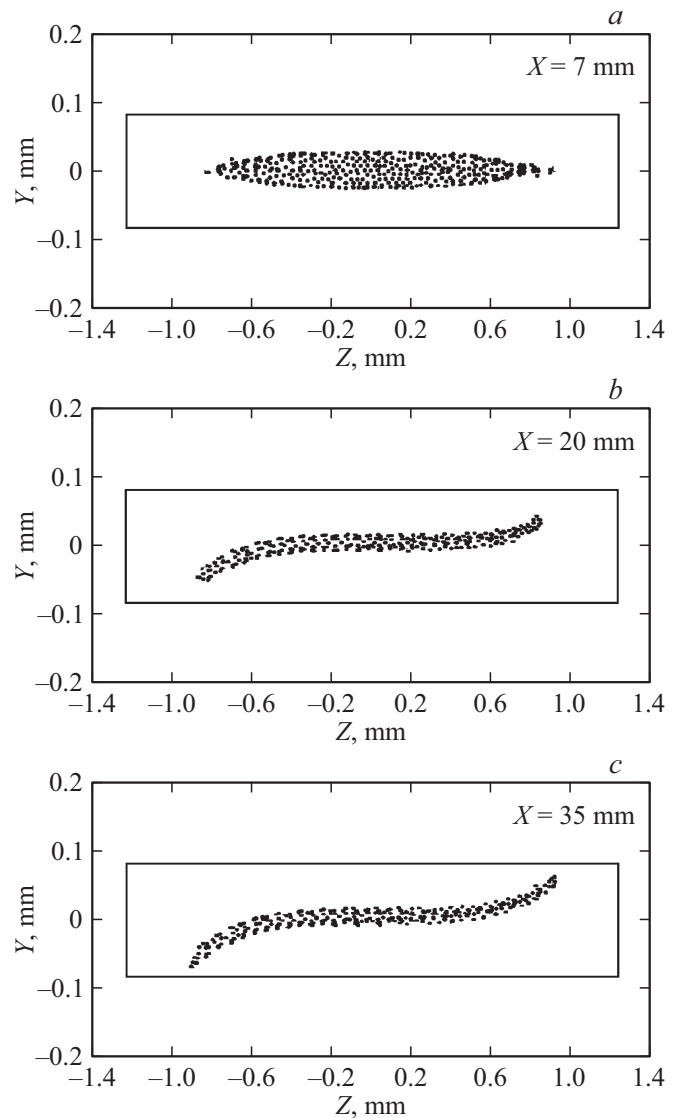


Рис. 3. Сечения ленточного электронного пучка в ЭОС при различных расстояниях от автокатода.

величины угла деформации в данном случае возможно за счет увеличения уровня фокусирующего магнитного поля. Представлено моделирование ЭОС с автоэмиссионным катодом и ленточным пучком $0.05 \times 2 \text{ mm}$ с компрессией 15 и 20 и током 0.1 А.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 17-12-01160.

Список литературы

- [1] Бурцев А.А., Григорьев Ю.А., Навроцкий И.А., Роговин В.И., Сахаджи Г.В., Шумихин К.В. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. Вып. 10. С. 92–98.
- [2] Zheng Y., Gamzina D., Popovic B., Luhmann N.C. // IEEE Trans. El. Dev. 2016. Vol. 63. N 11. P. 4466.

- [3] *Невский П.В.* // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1989. № 15. 1483. С. 1.
- [4] *Алямовский И.В.* Электронные пучки и электронные пушки. М.: Советское радио, 1966. 454 с.
- [5] *Gamayunov Yu.G., Patrusheva E.V.* // Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering. APEDE. 2016. Vol. 1. P. 30.
- [6] *Gamayunov Y.G., Patrusheva E.V., Grigoriev Y.A., Burtsev A.A., Danilushkin A.V.* // IVEC 24-26 April, 2017. London. DOI: 10.1109/IVEC.2017.828954
- [7] *Овчаров В.Т.* // Радиотехника и электроника. 1967. Т. 12. № 12. С. 2161.