

# Исследование низкоперевансных эллиптических пучков и их эквипотенциальных контуров, образованных пространственным зарядом

И.А. Навроцкий,<sup>1</sup> Н.М. Рыскин,<sup>2</sup> А.В. Данилушкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «НПП «Алмаз»

<sup>2</sup>Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН

**Аннотация:** Раскрывается способ формирования ленточного пучка с эллиптическими краями и многолучевого эллиптического пучка на примере электронно-оптической системы (ЭОС) с микроразмерным каналом с высокоаспектным поперечным сечением. Показано формирование эквипотенциальных контуров пространственного заряда вокруг низкоперевансного ленточного пучка с эллиптическими краями. В результате было выявлено, что низкоперевансный многолучевой эллиптический пучок в прямоугольном пролетном канале с высокоаспектным поперечным сечением более устойчив к явлению диокотронной неустойчивости. На основе такого пучка предлагается создавать ЭОС для приборов терагерцового диапазона с замедляющей системой (ЗС) типа «встречные штыри».

**Ключевые слова:** ЛБВ, ЭОС, терагерцовое излучение, эллиптический пучок, электронная пушка.

## 1. Введение

В настоящее время большой вклад в развитие теории электронных пучков внесли многие ученые за рубежом и в России. У нас в стране большой вклад в развитие физических принципов формирования ленточных и эллиптических электронных пучков внесли ученые: Акимов П.И., Гамаюнов Ю.Г., Сыровой В.А., Невский П.В., Овчаров В.Т., Олейников В.И., Пензяков В.В.[1-2] и другие. По данной тематике можно выделить работы [3, 4, 5].

Алгоритмы расчета электронно-оптической системы с экранированным катодом на основе ленточного пучка эллиптического сечения позволяющие формировать пучок с высокой компрессией без осцилляций с сохранением эллиптической формы, который не подвержен повороту и деформации рассмотрены в работе [6].

В данной работе предлагается использовать несколько эллиптических пучков в прямоугольном пролетном канале, с целью улучшить токопрохождение в приборе, а также предполагается, что усиление в таком приборе должно достигаться за счет трех вариаций ВЧ поля вдоль широкой стенки канала [7, 8], для этого и поднимается вопрос о моделировании трех пучков. Идея с несколькими вариациями ВЧ поля вдоль широкой стенки канала поднималась раньше различными учеными, например на конференции «11<sup>th</sup> UK-Europe-China Workshop on Millimetre Waves and Terahertz Technologies» в работе [9] показана ЭОС с пятью пучками для которых создается пролетный канал с ЗС имеющей пять вариаций ВЧ поля вдоль широкой стенки канала, такая же ЭОС разработана и на АО НПП «Алмаз» [10]. Стоит отметить, что идея нескольких пучков также лежит в основе работы многолучевых клистронов.

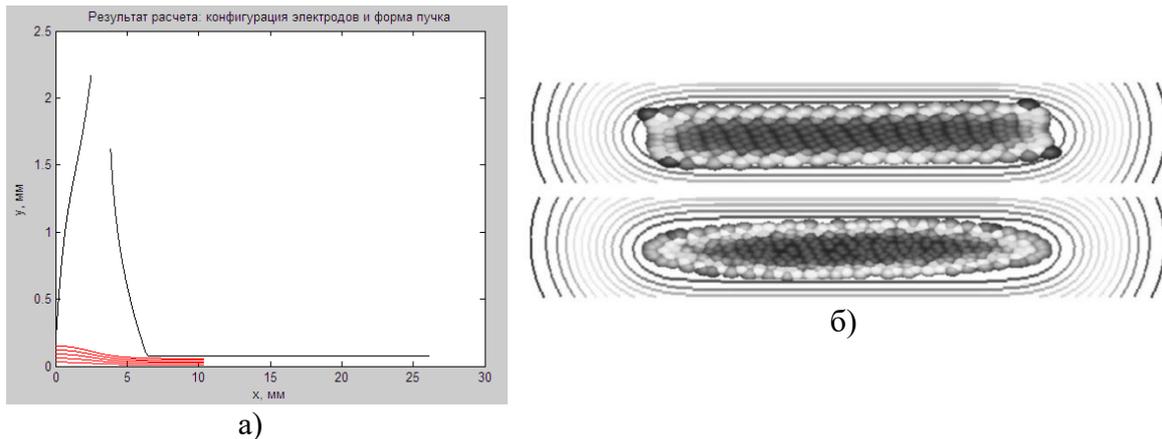
Предлагаемая методика формирования многолучевых эллиптических пучков базируется на магнитных системах с соленоидальным магнитным полем. Так как известно, что такое поле может быть эффективным транспортным механизмом для плоских электронных пучков, при условии, что геометрические параметры канала такого пучка согласованы с его фазовым объемом и наоборот.

Известно, что электроны в пучке смещаются из-за влияния сил электрического и магнитного поля  $\vec{E} \times \vec{B}$ . Силы  $\vec{E} \times \vec{B}$  вызывают дрейф электронов относительно центра пучка, который возникает из-за дисбаланса в результате прироста и потерь энергии электроном из-за закручивания вокруг силовых линий магнитного поля и электрического поля пространственного заряда. Закручивание края ленточного пучка при его транспортировке может быстро привести к перехвату пучка стенками пролетного канала. В настоящее время существуют способы в которых эффект влияние сил  $\vec{E} \times \vec{B}$  на пучок сводится к минимуму путем согласования размеров канала с пучком [11]. Оно достигается при помощи согласования эквипотенциальных контуров пространственного заряда пучка с пролетным каналом при помощи аналитического подбора коэффициента заполнения по высоте и ширине. При этом точное формирование краев и отсутствие эффекта «закручивания» пучка требует выравнивания с эквипотенциальными контурами его пространственного заряда.

## **2. Методика моделирования низкоперевансных эллиптических электронных пучков**

Задача о стационарном движении электронов при учете поля, создаваемого пространственным зарядом электронов и частные решения этой задачи, которое соответствует эллиптическим сгусткам, рассмотрена в работе [12], показано как электроны дрейфуют вдоль эквипотенциальных линий. Показано, что отклонение электронных траекторий от эквипотенциалей пучка приводит к появлению, неустойчивости которое превращает ламинарный поток в неламинарный. Поэтому многолучевая пушка создается таким образом, чтобы траектории ее отдельных лучей не соединялись между собой, это должно обеспечиваться необходимым расстоянием между пучками и полями пространственного заряда с учетом выбранного значения сопровождающего магнитного поля. Но для начала необходимо получить начальные данные для создания первичной геометрии пушки. Для этого воспользуемся программой синтеза [13] ленточного электронного пучка с начальными данными: пусть ток пучка 90 мА, размеры катода;  $2,3 \times 0,3 \text{ мм}^2$ ; размер пролетного канала  $0,14 \times 2,5 \text{ мм}^2$  анодное напряжение 20 кВ. Толщина пучка в канале – 100 мкм. В результате была получена первичная геометрия пушки, в которой были определены геометрические параметры электродов, и компрессия пучка (рисунок 1, а). Магнитное поле составило 0,8 Тл, расстояние между катодом и анодом 4 мм.

Выбор «эллиптичности» т.е. соотношения большой и малой полуосей эллиптических краев ленточного пучка должен согласовываться с распределением эквипотенциалей пространственного заряда пучка как на рис. 4. На нем различным цветом показаны частицы, которые находятся на разных эквипотенциалах. При наложении траекторий ленточного пучка на эквипотенциальные линии пространственного заряда видно, что краевые электроны находятся на той эквипотенциали, которая не проходит через основное тело пучка, а проходит только через краевые частицы. При попадании частиц на такую эквипотенциаль, увеличивается диокотронная нестабильность пучка, поэтому коэффициент эллипсности выбирается таким образом, чтобы частицы не попадали на такие эквипотенциальные линии. Известно, что в зависимости от геометрических параметров пролетного канала распределение эквипотенциальных линий пространственного заряда пучка будет отличаться. Поэтому для каждого канала необходимо аналитически подбирать коэффициент эллипсности. Траекторный анализ и изображение полей пространственного заряда были построены в результате использования программного пакета Lorentz [14].

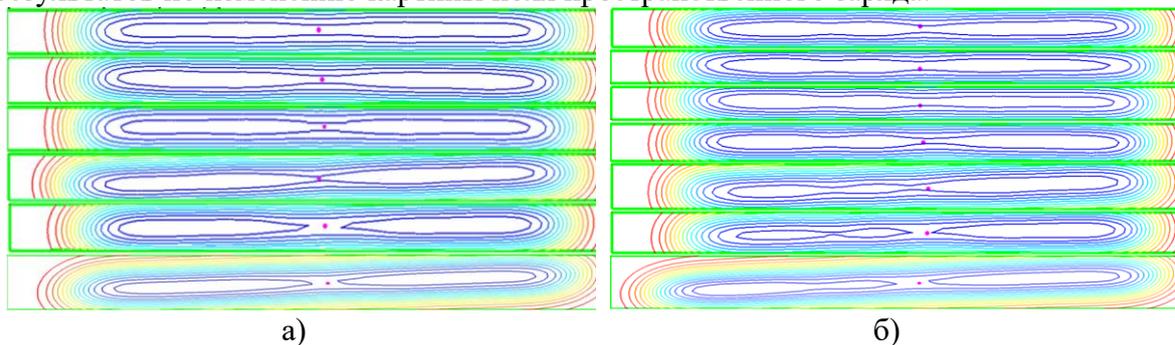


**Рисунок 1.** Синтез ЭОС формирования пучка (а). Траектории ленточного и эллиптического пучков в поперечном сечении при наложении на эквипотенциальные контуры пространственного заряда (б).

В низкоперевансных электронных пушках на расплывание контура пучка в большей степени влияют поперечные тепловые скорости [15], а роль пространственного заряда в этом процессе снижется. Однако заметим, что диокотронная неустойчивость пучка в низкоперевансных пушках никуда не исчезает, она обусловлена влиянием пространственного заряда. Рассмотрим эквипотенциальные контуры эллиптического пучка, полученные в результате его согласования с пролетным каналом и при его дальнейшей транспортировке на расстоянии  $Z$  от катода (рисунок 2, а).

Как видно из рисунка, вначале пучок находится в равновесии и внутри пучка существует некоторая «однородная» область поля. В этой области в центре пучка есть неоднородность, в которой наблюдается ослабление поля пространственного заряда. В результате моделирования смещения катода на 10-20 мкм по оси  $X$  было установлено, что поле пространственного заряда ленточного пучка испытывает неоднородные aberrации, связанные с образованием очаговых сгустков.

Так как смещение катода на 20 мкм по оси  $Y$  (по вертикали) не целесообразно, потому что пучок будет практически сразу же садиться на канал, поэтому смещение катода по оси  $Y$  задавалось на 5, 10 и 15 мкм и не показывало столь значимых результатов по изменению картины поля пространственного заряда.



**Рисунок 2.** Изменение эквипотенциальных контуров пучка при его транспортировке:  $Z=9$  мм,  $Z=16$  мм,  $Z=23$  мм,  $Z=30$  мм,  $Z=37$  мм,  $Z=44$  мм,  $Z=53$  мм; а – катод соосно оптической оси, б – положение катода в пределах технологического допуска.

Следует отметить несимметричное расположение сгустков относительно оптической оси. Два сгустка сформировались в области смещения катода относительно центра и один цельный сгусток – в противоположенной стороне. Таким образом, по результатам численного эксперимента в программе анализа на основе данных о распределении поля пространственного заряда было показано, что

устойчивость ленточного пучка с эллиптическими краями зависит от его ориентации в пролетном канале. При смещении его по оси X (по горизонтали) в пределах технологических допусков в поле его пространственного заряда увеличивается неоднородность. Эта неоднородность в рассматриваемой ЭОС представляет собой три сгустка с переходными областями в виде «перешейков» или провалов поля.

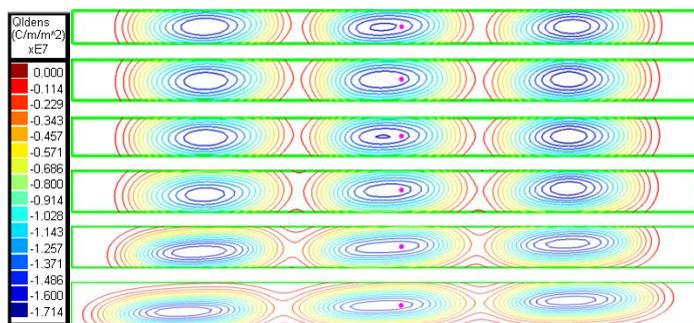
Возникает следующий вопрос – если разделить общий пучок на парциальные части, согласно числу однородных сгустков пространственного заряда, которые были получены в пролетном канале в результате смещения катода, то будет ли такой пучок более устойчивым?

Для начала необходимо установить расстояние между лучами. При этом определим границы пучков, для того чтобы можно было их сравнивать друг с другом. Вначале по результатам синтеза введем внешние границы лучей: 2300 мкм по ширине и 105 мкм по высоте, (рисунок 3, как и границы ленточного пучка).

Распределение магнитного поля в ЭОС оставим таким же, как и в синтезе. Теперь при формировании лучей, необходимо чтобы траектории электронов с двух соседних лучей не накладывались друг на друга. То есть при транспортировке нескольких эллиптических пучков, дрейф электронов не приводил к объединению лучей, при воздействии на них бокового компонента электрического поля пространственного заряда. Результат аналитического выбора расстояния между лучами представлен на рисунке 3, где показаны траектории случайно выбранной группы частиц на половине интервала от их общей транспортной длины. Выбор расстояния между лучами осуществлялся, начиная с 1 мкм между их краями с шагом 20 мкм. Аналитический подбор показал, что с расстояния  $\approx 100$  мкм поле пространственного заряда между лучами немного падает и обеспечивается их эффективная транспортировка в канале ЭОС. При увеличении расстояния между лучами  $>100$  мкм с шагом 50 мкм показало, что пучки меньше деформируются и возмущают друг друга, но в данной системе широкая стенка канала ограничена (общий ток  $I=90$  мА, ток отдельного луча  $I_0=30$  мА).



**Рисунок 3.** Траектории случайно выбранных крайних электронов в многолучевом пучке.



**Рисунок 4.** Эквипотенциальные контуры многолучевого пучка при изменении положения катода по оси X в пределах технологического допуска и различном расстоянии от него:  $Z=9$  мм,  $Z=16$  мм,  $Z=23$  мм,  $Z=30$  мм,  $Z=37$  мм,  $Z=44$  мм,  $Z=53$  мм.

Как видно из диаграммы (рисунок 4), распределение эквипотенциального поля каждого отдельного луча является однородным, поле пространственного заряда не испытывает aberrаций в области падения между лучами. При смещении катода и

диафрагмы в пределах технологических допусков (20-40 мкм) распределение поля на диаграмме практически не показывало отклонений. Следовательно, можно утверждать, что такой многолучевой пучок показывает меньшую диокотронную нестабильность, чем ленточный с эллиптическими краями, а также он является более устойчивым к изменениям технологических допусков. Увеличение количества лучей, расположенных в ряд показало, что наблюдается схожая картина.

### 3. Заключение

Результат траекторного анализа ЭОС показывает снижение диокотронной нестабильности и улучшение токопрохождения пучка в микроразмерном пролетном канале в соленоидальном магнитном поле, по сравнению с ленточным пучком с эллиптическими краями, при одинаковых значениях магнитного поля, первеансе и токе сравниваемых пучков. Ранее на основе эллиптических пучков расположенных в ряд авторами был разработан и исследован экспериментальный макет ЭОС [7-8]. В процессе его создания была апробирована технологическая методика изготовления и юстировки пушки с тремя эллиптическими катодами. На основе подобного макета предлагается проектировать ЛБВ для приборов терагерцового диапазона с замедляющей системой типа «встречные штыри» частотой 0,2-0,3 ТГц и выходной мощностью 10-100 Вт, в том числе и с одиночным ленточным пучком [15-17].

В будущих работах предполагается исследовать влияние электрического поля ламелей замедляющей системы на поле пространственного заряда пучка при различных вариантах согласования его поперечного сечения с геометрическими параметрами канала, с учетом влияния высокочастотного поля входного сигнала с различными вариациями высшей поперечной моды.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект № 17-12-01160)**.

#### Список литературы

1. Олейников В.И., Пензяков В.В. Расчет магнитной фокусировки ленточных пучков конечной ширины // Электронная Техника серия 1, номер 9, 1974 С. 51-56.
2. Батуев Ю.И., Пензяков В.В. Фокусировка ленточного пучка конечной ширины // Электронная Техника серия 1, номер 4. 1977 С.119-120.
3. Акимов П.И. Расчет эллиптических электронных пучков для приборов СВЧ / Акимов П.И., Гаврилин А.А., Никитин А.П., Саблин В.М., Смирнов А.В., Чудин В.Г., Сыровой В.А., Богословская А.Б. // V Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург 2016, С. 210-214.
4. П.И. Акимов, А.А. Гаврилин, А.П. Никитин, В.А. Сыровой, В.Г. Чудин. Расчетные модели электронно-оптических систем с ленточными электронными пучками для мощных приборов СВЧ. IV Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Т. 1. Санкт-Петербург, июнь 2015 г. С.226-231.
5. П. И. Акимов, А. А. Гаврилин, А. П. Никитин, В. А. Сыровой, А. Б. Богословская. Транспортировка пучка с начальным эллиптическим сечением при сохранении его формы // Журнал Радиоэлектроники, N11, 2015. С. 1-15.
6. П. И. Акимов, А. А. Гаврилин, А. П. Никитин, В. А. Сыровой, А. Б., Е.П. Шешин. Электронно-оптические системы с экранированным катодом и ленточным пучком эллиптического сечения. РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА, 2018, том 63, № 11, с. 1165–1180.
7. Igor A. Navrotsky. Development of electron-optical system with three elliptic electron beams for a THz-band vacuum-tube device / Igor A. Navrotsky, Anton A. Burtsev, Tatiana A. Karetnikova, Nikita M Ryskin et al. // 10th UK-Europe-China Workshop on Millimetre Waves and Terahertz Technologies (UCMMT) 2017 DOI: 10.1109/UCMMT.2017.8068467.
8. I.A. Navrotsky. Parametric 3D Modeling of Low Perveance Elliptical Electron Beams for Devices of THz Range / I.A. Navrotsky ; A.A. Burtsev ; A.V. Danilushkin // 2018 International Conference on Actual

- Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). –Saratov, Russian Federation, 27-28 Sept. 2018 pp. 166-169. DOI: 10.1109/APEDE.2018.8542283
9. Guoxiang Shu. Study of high-order mode terahertz backward wave oscillator driven by multiple sheet electron beams / Guoxiang Shu, C.Q. Zhou, H. Xiong, L. Chen, Z. F Qian, G. Liu. // 11<sup>th</sup> UK-Europe-China Workshop on Millimetre Waves and Terahertz Technologies. September 05-07, 2018, Hangzhou, China.
  10. Д.Н. Золотых, В.И. Роговин Замедляющая система для ЛБВ субтерагерцевого диапазона частот // Радиотехника №12, 2016 г. С. 196-198.
  11. Khanh T. Nguyen. Intense Sheet Electron Beam Transport in a Uniform Solenoidal Magnetic Field / Khanh T. Nguyen, John A. Pasour, Thomas M. Antonsen, Jr., Paul B. Larsen, John J. Petillo, Varuch Levush // IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 56, NO. 5, MAY 2009.
  12. Вайнштейн Л.А. Теория дифракции. Электроника СВЧ. –М.: Радио и связь, 1995. С. 365-377.
  13. Гамаюнов Ю.Г. Моделирование электронно-оптических систем формирования с высокой компрессией электронного пучка / Ю.Г. Гамаюнов, Е.В. Патрушева, А.И. Тореев, С.А. Шаталина // Радиотехника и электроника, 2008, том 53, №3. С. 344-353.
  14. LORENTZ, INTEGRATED Engineering Software, Winnipeg, Manitoba R3H0G4 Canada, 2018. Available online: <https://www.integratedsoft.com/Products/lorentz.aspx>.
  15. Морев С.П. Особенности формирования низкоперевансных электронных пучков / С.П. Морев, Г.А. Рехен // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. Вып.1 (349). М.: Изд-во ЦНИИ «Электроника», 1983. С. 67-69.
  16. I.A. Navrotsky. Developing of EOS Model with Elliptical Beams for THz Devices / I.A. Navrotsky ; A.A. Burtsev ; A.V. Danilushkin ; T.A. Karetnikova ; N.M. Ryskin ; K.V. Shumikhin // Conference Proceedings: 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering. –Saratov, Russian Federation, 2018 pp. 206-208. DOI: 10.1109/APEDE.2018.8542203
  17. A.A. Burtsev. Experimental Study of Compressed Sheet Beam Under THz Amplifier Developing / A.A. Burtsev ; N.M. Ryskin ; A.V. Danilushkin ; I.A. Navrotsky ; K.V. Shumikhin // Conference Proceedings: 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering. –Saratov, Russian Federation, 2018 pp. 206-208. DOI: 10.1109/APEDE.2018.8542268
  18. Andrey E. Ploskih, Nikita M. Ryskin, Anton A. Burtsev, Aleksei V. Danilushkin, Igor A. Navrotsky Performance improvement of a sub-THz traveling-wave tube by using an electron optic system with a converging sheet electron beam / Results in Physics 12 (2019) 799–803 2019 pp. 799-803.