

## Численное моделирование процессов формирования электронных пучков в аксиально-симметричных системах

И.В. Барсук\*, Г.С. Воробьев, А.А. Пономарева

Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, 40007 Сумы, Украина

(Получено 03.02.2014; опубликовано online 20.06.2014)

В работе изложена общая методика моделирования процессов формирования электронных пучков в аксиально-симметричных системах, которая базируется на результатах тестовых экспериментов вольт-амперных характеристик типичной трехэлектродной электронно-оптической системы, численном анализе электрических полей в межэлектродных промежутках и анализе траекторий движения электронов в заданных полях. Методика апробирована путем численных экспериментов в заданных реальных интервалах напряжений на фокусирующих электродах и может быть рекомендована при практической реализации электронно-лучевых приборов различного назначения.

**Ключевые слова:** Потенциал, Фокусирующая система, Электрод, Электронно-оптическая система, Электронный пучок.

PACS numbers: 84.40.Fe, 41.85.Ew

### 1. ВВЕДЕНИЕ

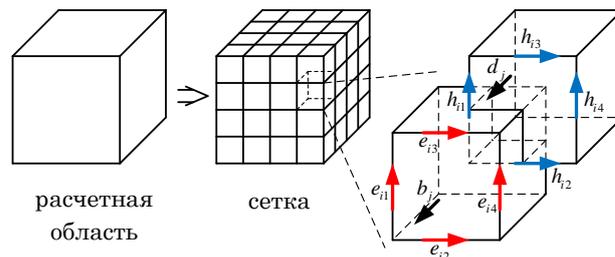
Пучки заряженных частиц различных уровней интенсивности в настоящее время находят широкое применение в различных электровакуумных приборах и технологических установках [1-3]. Возрастающие требования к выходным характеристикам таких приборов обуславливают необходимость разработки и совершенствования математических моделей систем формирования и фокусировки, а также методик оптимизации геометрии пучков в пространстве взаимодействия. Решение такого рода задач особенно целесообразно при конструировании электровакуумных приборов с протяженными интенсивными пучками достаточно высоких энергий. Наиболее широкое применение в этом плане нашли аксиально-симметричные пучки, которые используются как в СВЧ-приборах типа ЛОВ, ЛБВ, так и при создании разноплановых технологических и диагностических установок [4].

В данной работе изложена методика численного моделирования процессов формирования электронных пучков (ЭП) в аксиально-симметричных электронно-оптических системах (ЭОС). Данная методика в работе реализована путем применения метода конечных интегралов [5] и современных методов анализа движения заряженных частиц в неоднородных электрических и магнитных статических полях. Сравнительный анализ численного моделирования с экспериментальными результатами работы [6] указывает на их достоверность и на целесообразность проведения численного эксперимента на начальной стадии проектирования ЭОС с заданными параметрами.

### 2. МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОКУСИРУЮЩИХ ПОЛЕЙ

При моделировании статических аксиально-симметричных полей использовался метод конечных интегралов в формате CST Studio Suite – это универсальный электромагнитный симулятор, основанный на методе конечных интегралов (FIT), впервые предложенном Вейлендом в 1976-1977 г. [5]. Этот

численный метод обеспечивает универсальную схему пространственной дискретизации уравнений Максвелла, которую можно применять при решении различных задач электромагнитного моделирования: от определения компонент статического поля до высокочастотных расчетов во временной и частотной областях. На рис. 1 представлена структурная схема построения полей в ячейке ортогональной сетки для исследуемой аксиально-симметричной системы.



**Рис. 1** – Поля в ячейке ортогональной сетки для исследуемой аксиально-симметричной системы:  $e_i, h_i$  – компоненты напряженностей электрического и магнитного полей соответственно,  $b_j, d_j$  – компоненты электрической и магнитной индукции соответственно

В случае сетки в декартовых координатах метод FIT может быть приведен к виду стандартной модели метода конечных разностей во временной области [7].

После создания трехмерной модели исследуемого объекта одним из важнейших этапов расчета электростатических полей является разбиение области построения и самой моделируемой системы на элементарные участки – формирование сетки. Особенность любого метода дискретизации пространства заключается в необходимости уменьшения размера элементарной ячейки сетки для увеличения точности вычислений. Однако с ростом количества ячеек возрастает объем необходимой машинной памяти для проведения расчетов, длительность вычислительного цикла, а также значения различного вида погрешностей, которые неизбежно возникают в ходе численного моделирования [8].

\* [ivanbarsuk@gmail.com](mailto:ivanbarsuk@gmail.com)

В данной работе принцип разбиения объекта исследования на элементарные ячейки заключается в следующем. Первоначально происходит построение сетки с прямоугольной ячейкой при длине ребер  $dx = dy = 0,2$  мм, имеющей однородную плотность по всему расчетному объему (рис. 2). Далее определяются критические участки объекта, в которых абсолютная величина и градиент электростатического поля принимают максимальные значения (на рис. 2 данные участки отмечены маркерами). В указанных точках сетка уплотняется на 50% от первоначального значения. Помимо критических участков повышенная точность расчета поля необходима в самом канале дрейфа, часть объема которого будет занята непосредственно ЭП. В связи с этим область пролетного канала уплотняется максимально ( $dx = dy = dz = 0,05$  мм). Вариант дискретизации сетки в плоскости  $yOz$  для аксиально-симметричной системы описанной в [6] представлен на рис. 2.

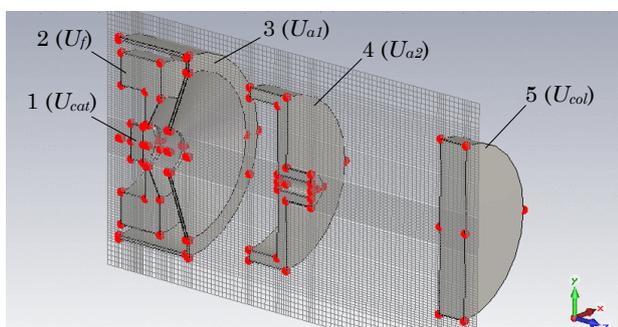


Рис. 2 – Вариант построения сетки с гексагональной ячейкой и локальным увеличением ее плотности в критических областях аксиально-симметричной системы: 1 – катода ( $U_{cat}$ ), 2 – фокусирующий электрод ( $U_f$ ), 3 – первый анод ( $U_{a1}$ ), 4 – второй анод ( $U_{a2}$ ), 5 – коллектор ( $U_{col}$ )

### 3. ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫХ СИСТЕМАХ

В качестве примера реализации описанной выше методики вычисления компонент электрических полей, произведен расчет их структуры в реальной ЭОС [6], объемная конфигурация электродов которой представлена на рис. 2. Поскольку структура формируемых электрических полей в значительной степени определяется величинами заданных на электродах 2-4 потенциалов:  $U_f$ ,  $U_{a1}$  и  $U_{a2}$ , то целесообразно для практических приложений определение интервалов, с точки зрения оптимальной структуры полей при фокусировке ЭП с заданным режимом работы ЭОС. В частности, для сокращения вариантов численного моделирования интервал значений ускоряющих напряжений  $U_{a2} = (1 \div 4)$  кВ целесообразно разбить на два подинтервала:  $U_{a2} \leq 2$  кВ – низковольтная область и  $U_{a2} > 2$  кВ – высоковольтная область. Такой подход обоснован различной степенью влияния пространственного заряда при формировании ЭП для различных уровней ускоряющего напряжения.

Как показал анализ результатов эксперимента [6], получение приемлемого распределения поля

возможно в довольно широком диапазоне значений потенциалов электродов. Так, для низковольтного режима удовлетворительными являются значения  $U_f = -10$  В,  $U_{a1} = 40$  В ( $U_{a2} = 1$  кВ) и  $U_f = -10 \div 5$  В,  $U_{a1} = 80 \div 140$  В ( $U_{a2} = 2$  кВ), а для высоковольтного режима –  $U_f = -10 \div 20$  В,  $U_{a1} = 100 \div 140$  В ( $U_{a2} = 3$  кВ) и  $U_f = 0 \div 20$  В,  $U_{a1} = 120 \div 160$  В ( $U_{a2} = 4$  кВ). Закономерным является тот экспериментальный факт [6], что для всех вышеуказанных режимов работы соблюдается условие  $U_{a1} = (0.03 \div 0.07)U_{a2}$ , позволяющее с высокой вероятностью определять оптимальное значение потенциала первого анода по ускоряющему напряжению системы без необходимости проведения моделирования. В качестве примера на рис. 3 приведена одна из картин распределения полей для оптимального режима фокусировки.

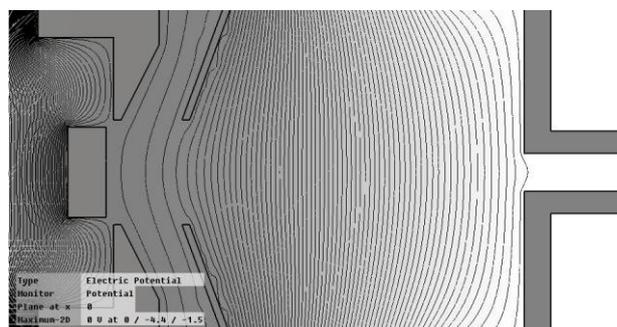


Рис. 3 – Пример оптимального распределения фокусирующих полей в высоковольтном режиме:  $U_f = 0$  В,  $U_{a1} = 180$  В ( $U_{a2} = 4$  кВ)

### 4. ПРИМЕРЫ ТРАЕКТОРНОГО АНАЛИЗА ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ЗАДАНЫХ ПОЛЯХ ЭОС

Следующим этапом после определения структуры электрических полей в задаче анализа физики формирования потоков электронов в ЭОС является построение траекторий отдельных частиц, формирующих пучок, и исследование его микроструктуры с целью получения потоков с максимально приемлемыми геометрическими и физическими характеристиками. Для численного решения уравнений движения электронов в электростатических полях описанной в [6] геометрии электродов была выбрана разностная схема «перешагиванием», которая позволяет определять координаты и скорости частицы только в чередующиеся моменты времени, а не на каждом временном интервале [9].

Все вычисления проводились с учетом рассчитанной в работе [6] модуляционной характеристики ЭОС, ограничивающей значения фокусирующего потенциала в диапазоне  $U_f = (-37 \div -124)$  В, ток эмиссии поддерживался неизменным в пределах расчетного цикла.

На первом этапе моделирования проводился тестовый анализ положения кроссовера ЭП в зависимости от фокусирующего потенциала, который показал, что при увеличении  $U_f$  кроссовер пучка смещается в сторону второго анода, что является более предпочтительным вариантом для его дальнейшей транспортировки.

Из проведенного анализа и результатов работы [6], можно сделать вывод о значительном влиянии потенциала  $U_f$  на качество геометрии потока электронов в начальной фазе эмиссии. Однако при задании слишком больших отрицательных напряжений на фокусирующем электроде возникает эффект частичного запираания ЭП, при котором кинетической энергии вышедших электронов не хватает для преодоления создаваемого потенциального барьера. Данный эффект существенно снижает степень токопрохождения и нарушает ламинарность ЭП. На рис. 4 в качестве примера представлена картина распределения электрического поля (рис. 4 а) в прикатодной области пушки для следующих значений потенциалов электродов:  $U_f = -40$  В,  $U_{a1} = 180$  В,  $U_{a2} = 2400$  В. Из рисунка видно отклонение эквипотенциальных линий фокусирующего электрода в область кромки катода. Отрицательный эффект данного явления показан на рис. 4б в виде набора траекторий движения электронов. Так, при задании  $U_f = -40$  В кромка катода практически не эмитирует.

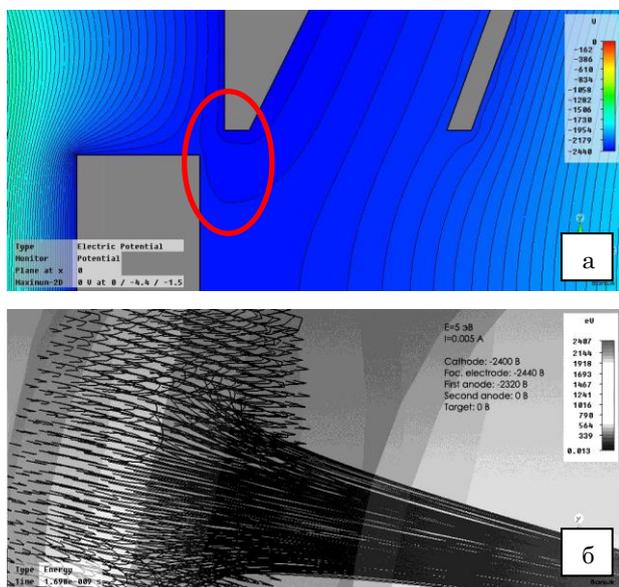


Рис. 4 – Влияние потенциала фокусирующего электрода на возникновение потенциального барьера, запирающего часть ЭП: структура электрического поля (а); результаты траекторного анализа (б)

Таким образом, выбор потенциала фокусирующего электрода равным или близким к потенциалу катода является наиболее предпочтительным.

В ходе моделирования в качестве исходных были установлены следующие параметры пучка: первеанс  $P = 0,045$  мкА/В<sup>3/2</sup>, количество эмитируемых частиц  $N = 2965$ , средняя кинетическая энергия вылета электронов  $E_k = 5$  эВ с разбросом  $dE_k = \pm 0,33 E_k$ , максимальное угловое отклонение  $\alpha = \pm 10^\circ$  от оси системы, что соответствует реальным системам такого типа. При этом эмитирующая поверхность задавалась идеально плоской с равномерным распределением плотности тока. В процессе моделирования расчетная область покрывалась сеткой с переменным размером ячеек, общее количество которых составило  $N_{cells} = 1104460$ .

В результате моделирования режимов работы электронной пушки было установлено, что при высоком

отрицательном значении потенциала фокусирующего электрода  $U_f \approx -40$  В кроссовер пучка располагается в области между первым и вторым анодами, а не на выходе последнего анода пушки. Анализ времени существования частиц в моделируемой системе показал, что такой режим работы пушки приводит к потере порядка 45 % частиц еще на начальном этапе эмиссии, оседающих под действием потенциала  $U_f$  обратно на катод. Представленная на рис. 5 кривая временной зависимости количества частиц имеет два характерных спада, демонстрирующих оседание электронов на катоде и мишени ЭОС.

Уменьшение потенциала  $U_f$  позволяет частично решить указанные вопросы. При понижении  $U_f$  кроссовер пучка смещается в область пролетного канала второго анода  $z = (4 \div 6,4)$  мм, его диаметр уменьшается, а токопрохождение возрастает при значениях  $U_f = (-10 \div 0)$  В до 100 %. Однако, изменяя потенциал только фокусирующего электрода, вывести кроссовер пучка за второй анод невозможно.

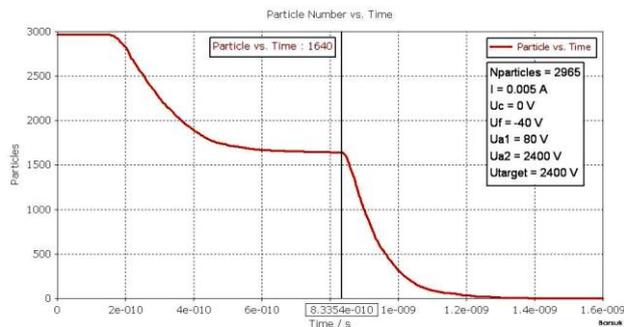


Рис. 5 – Временная зависимость количества частиц, оседающих на электроды ЭОС

Комплекс проведенных численных экспериментов по реализации оптимальных режимов работы электронной пушки, путем варьирования значениями потенциалов электродов  $U_f$ ,  $U_{a1}$ ,  $U_{a2}$ , позволил сформировать ЭП с оптимальной геометрией, представленной на рис. 6.

Как видно из рисунка, кроссовер пучка располагается за вторым анодом электронной пушки на расстоянии 8 мм от эмитирующей поверхности, при этом диаметр пучка составил 0,22 мм. При измерении диаметра ЭП в поперечном сечении предполагалось, что в пределах определяемого размера содержится 90 % тока пучка, что соответствует компрессии ЭП  $\approx 30$  при энергии пучка 3 кэВ.

Помимо информации о токе оседания на электродах пушки, позволяющей провести предварительный анализ ее режимов работы, чрезвычайно важны сведения о качестве формируемого ЭП: характере распределения частиц в поперечном сечении, ламинарности, разбросу поперечных компонент скоростей электронов.

Для описания таких характеристик был использован среднеквадратичный эмиттанс [10]:

$$\varepsilon = \left( \langle x^2 \rangle \cdot \langle x'^2 \rangle - \langle x \cdot x' \rangle^2 \right)^{1/2} = \left( \langle x - \langle x \rangle \rangle^2 \cdot \langle x' - \langle x' \rangle \rangle^2 - \langle (x - \langle x \rangle) \cdot (x' - \langle x' \rangle) \rangle^2 \right)^{1/2}, \quad (1)$$

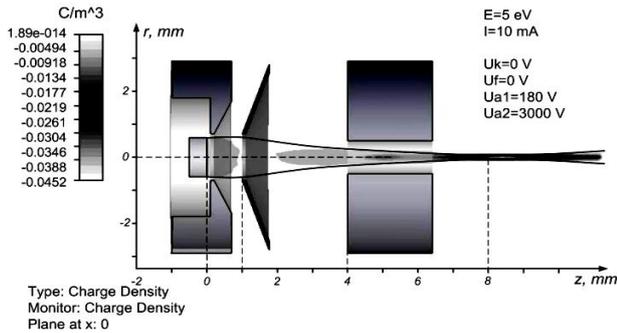


Рис. 6 – Конфигурация ЭП после проведения оптимизации режимов работы электронной пушки

где,  $x' = \frac{v_x}{v_{\perp}}$ ,  $\langle x \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_i$ .

Следует отметить, что формула данного вида, в отличие от других определений, позволяет выразить эмиттанс пучка в простой численной форме. Кроме того, рассмотрение нормализованного эмиттанса в данном случае не целесообразно в связи с малой длиной дрейфового канала и невысокими ускоряющими потенциалами системы (ЭП не является релятивистским [8]).

Расчетный эмиттанс пучка  $\epsilon_{x,y}$  при оптимальном токопрохождении на расстоянии 10 мм от катода (5 мм от второго анода) составил  $\epsilon_x = 1,71$  мрад мм и  $\epsilon_y = 1,85$  мрад мм по абсциссе и ординате соответственно, диаметр пучка –  $D = 0,8$  мм. Однако, как показали численные эксперименты по исследованию поперечной динамики электронов (рис. 7а), это значение может быть уменьшено путем варьирования потенциала  $U_{a1}$  [11].

Анализ двумерных диаграмм поперечного эмиттанса показал, что при увеличении  $U_{a1}$  до 110 В наблюдается значительное ухудшение ламинарности ЭП (рис. 7б), в то время как при уменьшении  $U_{a1}$  диаграмма приближается к виду минимально расходящегося пучка (рис. 7в) при незначительном увеличении диаметра до  $D \approx 0,8$  мм.

Из анализа результатов экспериментальных измерений [6] и численного моделирования выбран оптимальный режим при потенциалах  $U_f = 0$  В,  $U_{a1} = 60$  В и  $U_{a2} = 3$  кВ, обеспечивающий токопрохождение на уровне  $K \approx 0,85$  при значениях поперечного эмиттанса  $\epsilon_x = 1,67$  мрад мм и  $\epsilon_y = 1,76$  мрад мм.

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Формализована методика численного моделирования аксиально-симметричных электрических полей, основанная на методе конечных интегралов (FIT).

2. На примерах расчета конкретных конструкций ЭОС определены оптимальные конфигурации элект-

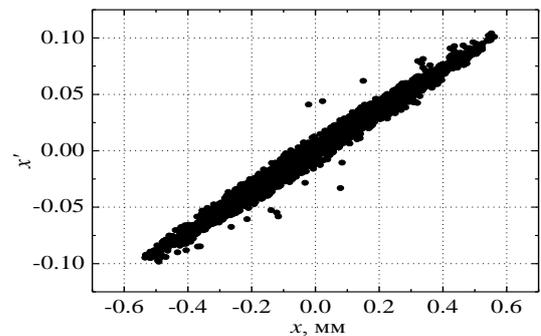
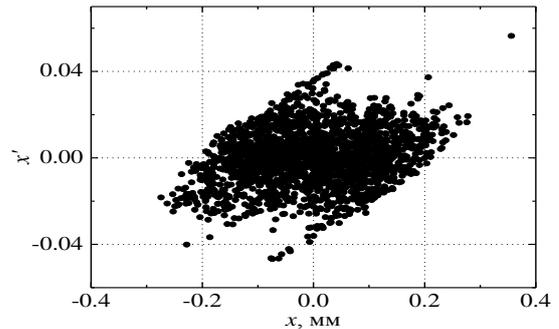
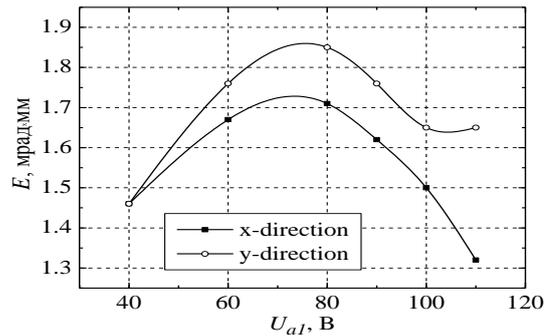


Рис. 7. – Зависимости эмиттанса ЭП от потенциала  $U_{a1}$ : а – численные значения по x-ой и y-ой координатным осям; б, в – двумерные диаграммы при  $U_{a1} = 110$  В и  $U_{a1} = 40$  В соответственно

трических фокусирующих полей, позволяющие сконцентрировать ЭП за вторым анодом ЭОС.

3. Проведен траекторный анализ движения электронов для заданных конфигураций фокусирующих полей и определена оптимальная геометрия ЭП, которая может быть реализована для исследуемой ЭОС при следующих значениях потенциалов на электродах пушки:  $U_f = 0$  В,  $U_{a1} = 60$  В и  $U_{a2} = 3$  кВ.

4. Изложенные методика и результаты численного моделирования могут быть использованы при оптимизации режимов работы ЭОС различной конфигурации, включая системы формирования ленточных ЭП.

Статья подготовлена в рамках госбюджетной темы № 0112U001379.

**Numerical Simulation of the Electron Beam Formation in the Axially Symmetric Systems**

I.V. Barsuk, G.S. Vorobjov, A.A. Ponomarova

*Sumy State University, 2, Rimsky-Korsakov Str., 40007 Sumy, Ukraine*

The paper presents a general method of modeling the electron beam formation processes in the axially-symmetric systems. This method is based on the experimental current-voltage characteristics of a typical three-electrode electron-optical system, on the numerical analysis of the electric fields in the electrode gap and on the trajectory analysis in the previously calculated fields. The method is tested by numerical experiments at predetermined intervals of the real voltages on the focusing electrodes and can be recommended for the practical realization of the electron-beam devices for different purposes.

**Keywords:** Potential, Focusing system, Electrode, Electron-optical system, Electron beam.

**Чисельне моделювання процесів формування електронних пучків у аксіально-симетричних системах**

І.В. Барсук, Г.С. Воробйов, Г.О. Пономарьова

*Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, 40007 Суми, Україна*

У роботі викладена загальна методика моделювання процесів формування електронних пучків у аксіально-симетричних системах, яка базується на результатах тестових експериментів вольт-амперних характеристик типової триелектродної електронно-оптичної системи, чисельному аналізі електричних полів у міжелектродних проміжках та аналізі траєкторій руху електронів у заданих полях. Методика апробована шляхом чисельних експериментів у заданих реальних інтервалах напруг на фокусувальних електродах і може бути рекомендована при практичній реалізації електронно-променевих приладів різного призначення.

**Ключові слова:** Потенціал, Фокусувальна система, Електрод, Електронно-оптична система, Електронний пучок.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ**

1. А.Д. Погребняк, А.Г. Пономарев, А.П. Шпак, Ю.А. Куницкий, *УФН* **182**, 287 (2012) (A.D. Pogrebnyak, A.G. Ponomarev, A.P. Shpak, Yu.A. Kunitskii, *Phys. Usp.* **55**, 270 (2012)).
2. G.S. Vorobyov, I.V. Barsuk, A.A. Drozdenko, A.A. Ponomarova, *Telecomm. Radio Eng.* **71**, 705 (2012).
3. И.В. Лебедев, *Генераторы и усилители СВЧ* (Москва: Радиотехника: 2005).
4. G.S. Vorobjov, A.A. Drozdenko, D.A. Nagorniy, A.A. Rybalko, *Radioelectronics and Communications Systems* **51**, 364 (2008).
5. T.A Weiland, *Electronics and Communication* **31**, 116 (1977).
6. I.V. Barsuk, G.S. Vorobyov, A.A. Drozdenko, *J. Nano-Electron. Phys.* **6** No1, 01022 (2014).
7. B. Krietenstein, R. Schuhmann, P. Thoma, T. Weiland, *19th International Linear Accelerator Conference – LIN-AC'98*, 860 (Chicago: 1998).
8. М. Силады, *Электронная и ионная оптика* (Москва: Мир: 1990).
9. D. Greenspan, *Particle Modeling* (Birkhauser Boston: 1997).
10. Г. Браун, *Физика и технология источников ионов* (Москва: Мир: 1998).
11. *Solutions and applications of scattering, propagation, radiation and emission of electromagnetic waves: Ch. 8* (Ed. by A. Kishk) (Rijeka: InTech: 2012).