

К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХЭЛЕКТРОДНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ ЛБВ

И.В. БАРСУК, Г.С. ВОРОБЬЕВ, А.А. ДРОЗДЕНКО

В данной работе представлены результаты моделирования режимов работы трехэлектродной аксиально-симметричной электронной пушки, которая нашла широкое применение в усилителях типа ЛБВ. Проведена серия численных экспериментов на базе метода конечных интегралов для определения оптимальных потенциалов электродов электронно-оптической системы, необходимых для получения потоков электронов оптимальной геометрии. Предложен численный алгоритм распознавания плотности энергии переходного излучения на металлических мишенях, который позволяет усовершенствовать методику экспериментального анализа структуры электронного пучка. Результаты численных расчетов сравниваются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: электронный пучок, электронно-оптическая система, электронная пушка, метод конечных интегралов, моделирование, оптимизация.

ВВЕДЕНИЕ

Электронные пучки (ЭП) в настоящее время находят широкое применение в различных электрофизических установках для сварки и плавления металлов, модификации их поверхностей для упрочнения материалов, многочисленных приборах СВЧ для передачи и преобразования энергии [1, 2]. В частности, параметры ЭП существенным образом определяют такие важнейшие характеристики приборов СВЧ, как КПД, коэффициент усиления, стабильность и шумовые характеристики. В связи с этим к электронно-оптическим системам (ЭОС) предъявляются жесткие требования по формированию пучков с большой плотностью тока (до десятков и сотен А/см²) при достижении необходимых выходных параметров: величины удельной мощности и компрессии формируемых потоков частиц. Как следствие, возникает необходимость в анализе формирования электронных потоков при их движении во внешних статических электрических и магнитных полях. При этом интерес представляют как трехмерное распределение электромагнитных полей в пространстве движения ЭП, так и его микроструктура. Поэтому вопросы эффективного анализа и получения высокоточных данных, увеличения скорости обработки информации, повышения экономичности и оптимизации методик численных и экспериментальных исследований ЭП различных уровней интенсивности в настоящее время представляют значительный интерес для широкого круга специалистов и исследователей в этой области.

Целью данной работы является комплексное численное и экспериментальное моделирование динамики формирования ЭП в трехэлектродной аксиально-симметричной электронной пушке ЛБВ с выработкой практических рекомендаций по ее оптимизации.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ ЭОС

Объектом исследования в данной работе является ЭП, который используется в СВЧ

приборах типа ЛОВ, ЛБВ миллиметрового диапазона волн [3]. Пучок формируется трехэлектродной аксиально-симметричной электронной пушкой со сходящейся оптикой и далее вводится в электродинамическую систему, например, замедляющую. Пушки такого типа позволяют формировать ЭП с диаметром в кроссовере порядка 0,05–0,5 мм, током пучка 5–30 мА при ускоряющих напряжениях до 6 кВ [2]. Схематическое изображение конфигурации и расположения электродов ЭОС представлено на рис. 1.

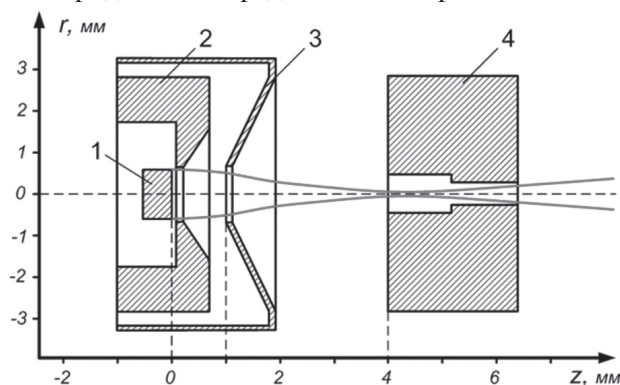


Рис. 1. Схема ЭОС аксиально-симметричной электронной пушки: 1 – термокатод (U_c), 2 – фокусирующий электрод (U_f), 3 – первый анод (U_{a1}), 4 – второй анод (U_{a2})

В качестве оптимального для анализа систем, приведенных на рис. 1, был выбран метод конечных интегралов (в литературе известен как FIT – the Finite Integration Technique), впервые предложенный Вейлендом в 1977 году [4]. В настоящее время данный метод в различных модификациях широко используется в акустике, динамической теории упругости, при моделировании электромагнитных полей, пьезоэлектрических эффектов и др [5]. В отличие от большинства численных алгоритмов, FIT основан на использовании системы уравнений Максвелла не в дифференциальной, а в интегральной форме. Дискретизация уравнений осуществляется по двухсеточной схеме: помимо основной сетки, покрывающей

расчетную область, формируется вторичная сетка, расположенная ортогонально основной и смещенная относительно нее на половину ширины ячейки. Механизм дискретизации уравнений Максвелла заключается в последовательной замене аналитических операторов ротора и дивергенции их дискретными аналогами, что позволяет сформировать систему так называемых сеточных уравнений Максвелла [6]. Следует отметить, что дискретные операторы несут исключительно топологическую информацию и сохраняют важнейшие свойства векторного поля в пределах исследуемого пространства.

Метод FIT выгодно отличается своей универсальностью, поскольку может быть реализован как во временной, так и в частотной области моделирования. Апробация метода FIT показала высокую степень корреляции теоретических и экспериментальных данных [7], что позволяет использовать данный алгоритм при оптимизации ЭОС произвольной геометрии.

В качестве исходных параметров электронной пушки была выбрана комбинация потенциалов электродов, описанных в работе [8], первеанс пучка $P = 0,045 \text{ мкА/В}^{3/2}$, количество эмитируемых частиц $N = 2965$, средняя кинетическая энергия вылета электронов $E_k = 5 \text{ эВ}$ с разбросом $dE_k = \pm 0,33 \cdot E_k$, 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 $N_{cells} = 1104460$.

При проведении численных расчетов особое внимание уделялось значению потенциала фокусирующего электрода, существенным образом влияющего на качество геометрии потока электронов в начальной фазе эмиссии. Как правило, его значение равно либо близко к значению потенциала катода электронной пушки. В некоторых приборах для корректировки прикатодных условий на фокусирующий электрод подается небольшое отрицательное напряжение, которое уменьшает общий ток пучка в основном за счет «возмущенных» траекторий крайних частиц [9].

В результате моделирования режимов работы электронной пушки было установлено, что при высоком значении потенциала фокусирующего электрода ($U_f \approx -40 \text{ В}$ и выше) кроссовер пучка располагается в области между первым и вторым анодами, а не на выходе пушки. Кроме того, из-за размещения фокусирующего электрода в непосредственной близости к катоду, создается эффект частичного запираания электронного пучка, при котором кинетической энергии вышедших электронов не хватает для преодоления создаваемого потенциального барьера, что существенно снижает степень токопрохождения и нарушает

ламинарность ЭП. Анализ времени существования частиц в моделируемой системе показал, что режим работы пушки, использованный в [8], приводит к потере порядка 44,7% частиц еще на начальном этапе эмиссии, оседающих под действием потенциала U_f обратно на катод. Представленная на рис. 2 кривая временной зависимости количества частиц имеет два характерных спада, демонстрирующих оседание электронов на катоде и мишени ЭОС.

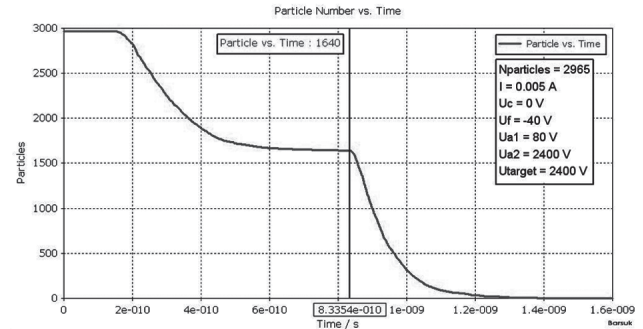


Рис. 2. Временная зависимость количества частиц

Уменьшение потенциала U_f позволяет частично решить указанные вопросы. Из графика, приведенного на рис. 3, видно, что при понижении U_f кроссовер пучка смещается в область пролетного канала второго анода ($z = (4 \div 6,4) \text{ мм}$), его диаметр уменьшается, а токопрохождение возрастает при значениях $U_f = (-10 \div 0) \text{ В}$ до 100%.

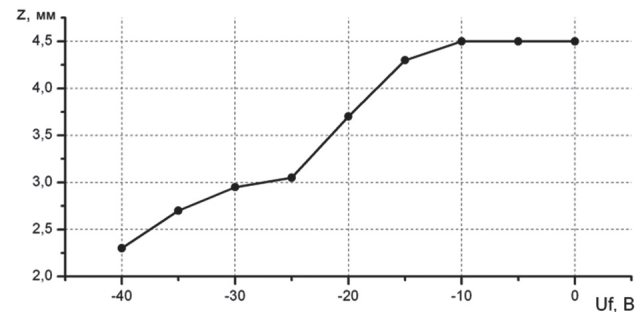


Рис. 3. Влияние величины потенциала U_f фокусирующего электрода на положение кроссовера ЭП

Однако, изменяя потенциал только фокусирующего электрода, вывести кроссовер пучка за второй анод невозможно.

Комплекс проведенных численных экспериментов по реализации оптимальных режимов работы электронной пушки (рис. 1), путем варьирования значениями потенциалов электродов U_f, U_{a1}, U_{a2} , позволил сформировать ЭП с оптимальной геометрией, представленный на рис. 4. Как видно из рисунка, кроссовер пучка располагается за вторым анодом электронной пушки на расстоянии 8 мм, 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 ≈ 30 при энергии пучка 3 кэВ.

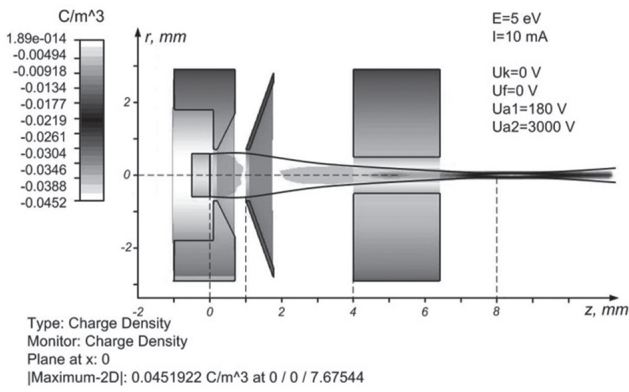


Рис. 4. Конфигурация ЭП после проведения оптимизации режимов работы электронной пушки

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОГО ЭП ПО ПЕРЕХОДНОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

Экспериментальная установка и методика диагностики ЭП по переходному излучению подробно описаны в работах [10, 11], где показано, что интенсивность переходного излучения прямо пропорциональна величине энергии бомбардирующих электронов в диапазоне от 30 эВ до 100 кэВ. Данный факт позволяет реализовать компьютерную обработку информации и значительно повысить скорость получения экспериментальных данных путем анализа интенсивности участков фотоснимков, используя, например, цветовую модель RGB цифрового изображения.

Для реализации данной методики разработан алгоритм и создана программа анализа интенсивности свечения в произвольном сечении цифровой фотографии, получаемой различными способами. Первый шаг работы программы заключается в загрузке изображения переходного излучения и создании массивов соответствующих размеров. Далее выбирается положение сечения анализа и его ширина. Максимальной чувствительностью обладает анализ с наименьшей шириной сечения, т.е. в 1 пиксель. Однако присутствие на фотографии микрофакелов, дефектов, шумов и прочих неоднородностей проявляется при анализе изображения в виде резких скачков или спадов плотности тока, искажающих картину реального распределения, что продемонстрировано на рис. 5 а, где микрофакелы явно присутствуют в виде точек с аномальной яркостью.

Для устранения грубых ошибок такого рода предложено использовать большую ширину зоны анализа и усреднение значений плотности тока в пределах ширины зоны. Установлено, что использование ширины 5–20 пикселей (в зависимости от разрешения сканирования фотографии) является достаточным для избегания грубых ошибок анализа при хорошей разрешающей способности метода. Другим способом устранения влияния микрофакелов и различных шумов

является наложение масок и фильтров при обработке цифрового фото (рис. 5 б). Но в этом случае значительно изменяется и достоверность информации об интенсивности излучения, что может существенно исказить результаты эксперимента.

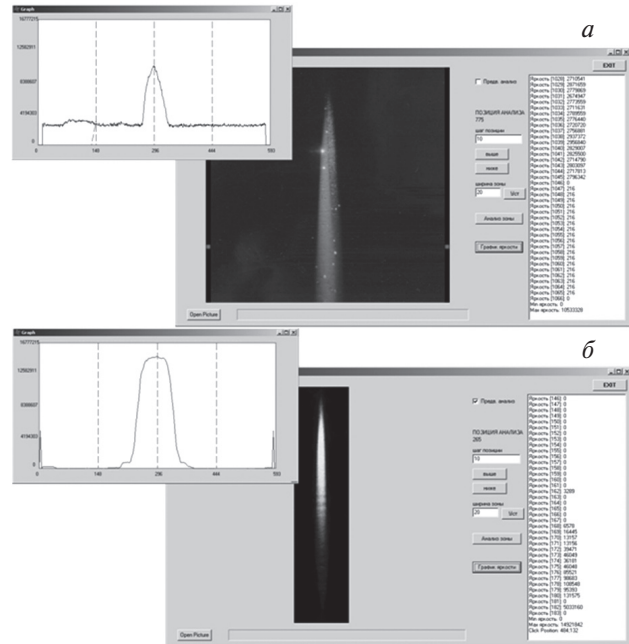


Рис. 5. Распределения плотности тока при анализе переходного излучения ЭП

Теоретически чувствительность анализа цифровых изображений характеризуется возможностью различать до 2^{24} цветов и оттенков в модели RGB. Однако практически чувствительность метода может быть значительно ниже из-за неправильной установки выдержки приемника излучения (пере- или недосвеченное фото). Эта проблема может быть устранена при съемке в цифровом формате RAW и дальнейшей возможности коррекции баланса белого цвета.

Несмотря на эффективное распознавание переходного излучения ЭП предложенной методикой остается открытым вопрос его регистрации цифровым способом. Попытки использования веб-камер и цифровых фотоаппаратов не дали достаточной точности, хотя скорость получения изображения у них наивысшая [10]. Поэтому в данной работе для достижения высокой точности регистрация излучения использовался аналоговый фотоаппарат с последующим высокоточным сканированием.

На рис. 6 приведены экспериментальная (кривая 1, до оптимизации) и теоретическая (кривая 2, после оптимизации) зависимости распределения плотности тока по диаметру ЭП на расстоянии 4,4 мм от второго анода, которые были получены в результате применения рассмотренных выше методик. Сравнение данных результатов позволяет сделать вывод о возможности дальнейшего улучшения параметров ЭП путем оптимизации конфигурации ЭОС и режимов ее работы.

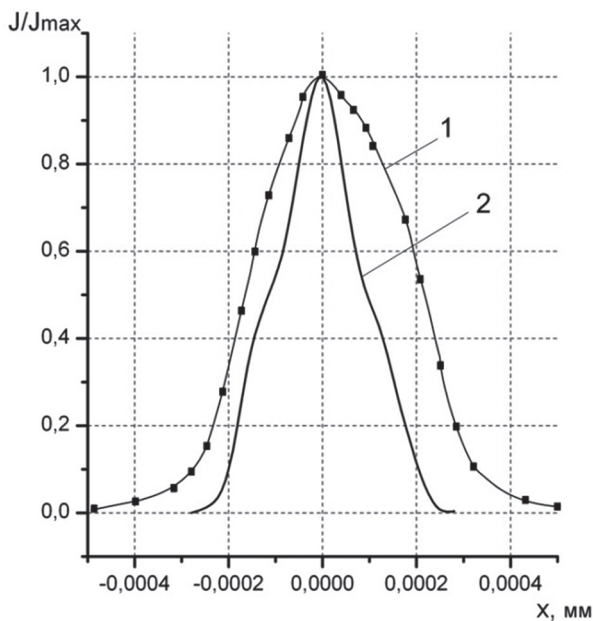


Рис. 6. Распределение относительной плотности тока по толщине ЭП на расстоянии 4,4 мм от второго анода: 1, 2 – экспериментальный и численный результаты соответственно

ВЫВОДЫ

В работе проведена серия численных экспериментов по формированию аксиально-симметричного ЭП на базе метода FIT, что позволило определить оптимальные режимы работы трехэлектродной электронной пушки при формировании низкоэнергетического интенсивного ЭП с кроссовером за вторым анодом.

Реализован численный алгоритм распознавания и анализа переходного излучения, позволивший частично автоматизировать и значительно ускорить процесс обработки экспериментальной информации. Приведен пример работы алгоритма при распознавании плотности тока в поперечном сечении интенсивного аксиально-симметричного ЭП, используемого в приборах типа ЛОВ и ЛБВ.

Путем экспериментальных исследований и численного моделирования получена информация о распределении относительной плотности тока по диаметру ЭП, которая позволяет определить резервы по улучшению параметров исследуемого ЭП.

Литература.

[1] Вакуумная СВЧ электроника: Сборник обзоров. (Под ред. М.И. Петелина) // Нижний Новгород: ИПФ РАН. – 2002.
 [2] Воробьев Г.С., Барсук И.В., Дрозденко А.А. Методы формирования и анализа интенсивных пучков электронов в статических электромагнитных полях (обзор) // ЖНЭФ. – 2011. – Т.3, №3. – С. 70–84.
 [3] Касаткин Л.В., Рукин В.П., Еремка В.Д., Науменко В.Д., Рапопорт Г.Н., Мирошниченко В.С. Электровакuumные приборы диапазона миллиметровых волн. // Севастополь: Вебер: 2007. – 252 с.
 [4] Weiland T. A Discretization Method for the Solution of Maxwell's Equations for Six-Component Fields //

Electron. Commun. (AEU). – 1977. – Vol.31, No. 3. – P. 116–120.

[5] Marklein R. The finite Integration Technique as a General Tool to Compute Acoustic, Electromagnetic, Elastodynamic, and Coupled Wave Fields // in: W.R. Stone (Ed.), Review of Radio Science 1999 – 2002, IEEE Press/Wiley, Piscataway/NewYork. – 2002. – P. 201–244.
 [6] Clemens M., Weiland T., Discrete electromagnetism with the finite integration technique // Progress in Electromagnetics Research. – 2001. – Vol. 32. P. 65–87.
 [7] Барсук И.В., Дрозденко А.А. Комплексное моделирование системы генератора дифракционного излучения // Материалы 7-й международной молодежной научно-технической конференции «РТ-2011». Севастополь. – 2011. – С. 324.
 [8] Белоусов Е.В., Воробьев Г.С., Корж В.Г., Пушкарёв К.А., Чабань В.Я. Экспериментальное исследование статических параметров осесимметричных электронных пучков малого диаметра // Современные проблемы прикладной физики: сборник научных трудов. – 1992. С. 87–100.
 [9] Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки // М.: Сов. радио. – 1966. – 455 с.
 [10] Воробьев Г.С., Дрозденко А.А., Шульга Ю.В., Барсук И.В. Методика диагностики электронных пучков среднего уровня мощности по переходному излучению // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2010. – №5-6. – С. 7–10.
 [11] Belousov E.V., Vorobyov G.S., Drozdenko A.A., Kornushchenko A.S., Korzh V.G., Shulga Y.V. Methods and tools of transient radiation registration for diagnostics of high-intensity electron beams // Eur Phys J Appl Phys. – 2011. – Vol. 55. – P. 11001p1 – p5.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы «Электромагнитные явления в низкоразмерных планарных периодических металлодиэлектрических системах миллиметрового-инфракрасного диапазонов волн».

Поступила в редколлегию 9.02.2012



Барсук Иван Владимирович, аспирант Сумского государственного университета. Область научных интересов: физика формирования пучков заряженных частиц, построение математических моделей, разработка численных алгоритмов и проведение компьютерного моделирования электронно-оптических систем формирования и фокусировки потоков заряженных частиц, экспериментальные исследования микроструктуры пучков электронов по переходному излучению.



Воробьев Геннадий Савельевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры нанoeлектроники Сумского государственного университета. Область научных интересов: физика волновых процессов в приборах и устройствах сверхвысоких частот; различные типы высококогерентных источников колебаний

миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн с использованием радиационных эффектов; элементная база приборов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн на базе открытых электродинамических систем; исследование физических свойств излучения, возбуждающегося при движении заряженных частиц вдоль периодических металлодиэлектрических структур различных модификаций; физика формирования пучков заряженных частиц, экспериментальное исследование микроструктуры пучков электронов по переходному излучению.



Дрозденко Алексей Александрович, кандидат физико-математических наук доцент кафедры наноэлектроники Сумского государственного университета. Область научных интересов: физика формирования пучков заряженных частиц, построение математических моделей, разработка численных алгоритмов и проведение компьютерного моделирования электронно-оптических систем формирования и фокусировки потоков заряженных частиц, экспериментальные исследования микроструктуры пучков электронов по переходному излучению.

УДК 621.385.6

До питання про моделювання режимів роботи триелектродної електронної гармати ЛБХ / І.В. Барсук, Г.С. Воробйов, А.А. Дрозденко // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2012. Том 11. № 1. – С. 72-76.

У даній роботі представлені результати моделювання режимів роботи триелектродної аксіально-симетричної електронної гармати, яка широко використовується в підсилювачах типу ЛБХ. Проведена серія чисельних експериментів на базі метода кінцевих інтегралів для визначення оптимальних потенціалів електродів електронно-оптичної системи, необхідних для отримання потоків електронів оптимальної геометрії. Запропонований чисельний алгоритм розпізнавання густини енергії перехідного випромінювання на металевих мішенях, який дозволяє удосконалити методику експериментального аналізу структури електронного пучка. Результати чисельних розрахунків порівнюються з експериментальними даними.

Ключові слова: електронний пучок, електронно-оптична система, електронна гармата, метод кінцевих інтегралів, моделювання, оптимізація.

Л. 06. Бібліогр.: 11 найм.

UDC 621.385.6

On the issue of modeling operating regimes of TWT three-electrode electron gun / I.V. Barsuk, G.S. Vorobyov, A.A. Drozdenko // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2012. Vol. 11. № 1. – P. 72-76.

The paper presents the results of modeling operating regimes of a three-electrode axially symmetric electron gun which is widely used in TWT amplifiers. To determine optimal potentials of the electron-optical system electrodes, which are necessary to obtain electron beams with optimal geometry, a series of numerical calculations based on the FIT-method has been carried out. A numerical algorithm of recognizing a transition radiation energy density on metal target is suggested, which allows to improve the technique of experimental analyzing of the electron beam structure. The results of numerical calculations are compared with the experimental data.

Keywords: electron beam, electron-optical system, electron gun, finite integration technique, modeling, optimization.

Fig. 06. Ref.: 11 items.