

PACS numbers: 41.85.Ct, 29.27.Eg, 42.60.Jf

МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ИНТЕНСИВНЫХ ПУЧКОВ ЭЛЕКТРОНОВ В СТАТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ (ОБЗОР)

Г.С. Воробьев, И.В. Барсук, А.А. Дрозденко

Сумский государственный университет,
ул. Римского-Корсакова 2, 40007, г. Сумы, Украина
E-mail: vp@sumdu.edu.ua

В данном обзоре освещены общие принципы формирования пучков электронов в статических электрических и магнитных полях. Рассмотрены традиционные, а также новые перспективные разработки электронно-оптических и магнитных систем. Анализируются вопросы фокусировки и транспортировки пучков заряженных частиц на уровне современных технологий, а также рассмотрены теоретические и экспериментальные методы исследования их параметров.

***Ключевые слова:* ПУЧКИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТОКА, ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ, ЭЛЕКТРОН, ЭЛЕКТРОННАЯ ПУШКА.**

*(Получено 17.03.2011, в отредактированной форме – 28.10.2011,
опубликовано online – 05.11.2011)*

1. ВВЕДЕНИЕ

Пучки заряженных частиц различных уровней интенсивности в настоящее время нашли широкое применение в диагностике материалов (бетатроны, линейные ускорители, микротроны), дефектоскопии и при неразрушающем контроле качества изделий [1, 2], стали эффективным инструментом в промышленных технологических установках для размерной и термической обработки различных материалов: резки, сварки, плавки и распыления металлов, нанесения и модификации покрытий, получения новых структур, полимеризации пластмасс и др. Кроме того, интенсивные протяженные электронные пучки (ЭП) являются главным рабочим элементом многочисленных и разнообразных по типам вакуумных приборов СВЧ, в которых они выполняют задачу преобразования энергии внешних источников питания в энергию высокочастотных колебаний: клистроны, магнетроны ЛОВ, ЛБВ, ГДИ и др. [35]. Для оптимизации параметров таких приборов кроме выходных характеристик необходимы также сведения о прост-ранственной конфигурации и микроструктуре самого ЭП, т.е. о распределении плотности тока, поперечных и продольных компонент скорости электронов в любом поперечном сечении пучка. Эта информация особенно важна при конструировании электронных приборов с протяженными интенсивными пучками достаточно высоких энергий.

В настоящее время информацию о параметрах пучка можно получить путем их экспериментального или теоретического анализа. Опыт экспериментальных исследований пучков [6, 7] показывает, что эффективность применения различных методов измерений их параметров во многом зависит от специфики приборов, в которых они применяются. Однако применение экспериментальных методов – достаточно дорогостоящий процесс, поэтому на стадии начального исследования характеристик конкретного ЭП целесообразным является его численный анализ. Так, теоретические методы исследования характеристик ЭП позволяют оперативно определять геометрию и основные параметры пучка без проведения эксперимента, однако приближенность расчетных моделей вынуждает рассматривать получаемую информацию только в качестве предварительной. Таким образом, актуальными являются вопросы развития как экспериментальных, так и теоретических методов исследования ЭП.

Целью данной статьи является краткий обзор традиционных и современных направлений в разработке электронно-оптических систем (ЭОС), а также анализ основных экспериментальных и теоретических методов исследования статических параметров протяженных ЭП и выбора на этом основании наиболее оптимальных решений для их применения. В соответствии с этим основное внимание уделяется экспериментальным методам диагностики микроструктуры пучков мощностью от единиц Вт/см² до сотен кВт/см², а также теоретическим методам расчета полей и анализа движения электронов с учетом различных факторов и параметров, существенным образом влияющих на конфигурацию и характеристики ЭП.

2. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ФОКУСИРОВКИ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ПРОДОЛЬНЫХ СТАТИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

2.1 Традиционные направления в разработке электронных пушек и систем формирования пучков

Структуру ЭОС в общем случае можно представить в виде двух функциональных узлов. Первый узел – электронная пушка, формирующая электронный пучок для заданных значений первеанса, эмиттанса и конфигурации. Второй блок – фокусирующая система, главной задачей которой является транспортировка ранее сформированного пучка определенной геометрии от электронной пушки до коллектора с минимальным токооседанием на электродах [8]. Основные виды классических электронных пушек и их модификации представлены на рис. 1.

Исторически первой была разработана пушка Пирса для формирования прямолинейных электронных пучков простой конфигурации (рис. 1 а, б), которая содержала термокатод 1, прикатодный электрод 2, анод 3 с центральным отверстием. Пушки Пирса получили широкое распространение с применением различных типов катодов: термоэмиссионного, фотоэмиссионного и автоэмиссионного [9, 10].

Следует отметить также электронные пушки, разработанные Трениевой С.Н., которая брала за основу пушку сферического типа, состоящую из катода 1, фокусирующего электрода 2 и анода 3 (рис. 1 в). Пушка Трениевой предназначалась для формирования клиновидных и конусообразных сходящихся потоков электронов.

Аксиально-симметричный ЭП, как правило, формируется трехэлектродной пушкой со сходящейся оптикой и далее вводится в электродинамическую систему, где фокусируется периодическим магнитным полем. На рис. 1 г представлена типичная конфигурация электродов аксиально-симметричной системы, состоящей из следующих элементов: термокатод 1, фокусирующий электрод 2, первый анод 3, второй анод 4. Пушки такого типа позволяют формировать ЭП с диаметром в кроссовере порядка $0,1 \div 0,25$ мм, током пучка $1 \div 25$ мА при ускоряющих напряжениях $1000 \div 6000$ В [11].

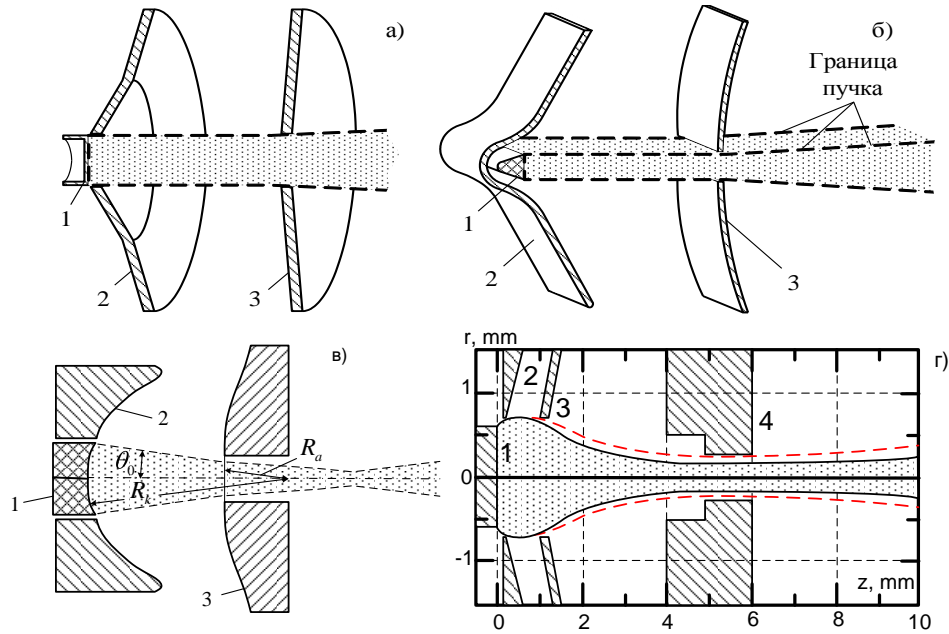


Рис. 1 – Примеры конструкций классических электронных пушек: пушки Пирса (а, б), пушка Треновой (в), типичная модификация электродов аксиально-симметричной электронной пушки (г)

Наряду с аксиально-симметричными ЭП, ленточные пучки также нашли широкое применение в электронных приборах СВЧ типа ЛОВ и генераторах дифракционного излучения (ГДИ) [12]. Одной из типичных систем, формирующих ленточный ЭП, является двухэлектродная диодная пушка, модифицированная на основе системы рис. 1 б для применения в электровакуумных приборах (ЭВП) миллиметрового диапазона волн. Пушки такого типа позволяют формировать ленточные электронные пучки шириной $3 \div 10$ мм и толщиной $0,1 \div 0,25$ мм, током пучка $10 \div 200$ мА при ускоряющих напряжениях $1000 \div 5000$ В [12].

2.2 Новые направления в разработке электронных пушек

2.2.1 Однолучевые ЭОС

Попытки улучшения микропараметров ленточных ЭП, а также их миниатюризация привели к появлению новой разработки щелевого катода

в ИРЭ НАН Украины. Было предложено использование неоднородного электрического поля для формирования ЭП в диодных электронных пушках с магнитным ограничением потока, что было реализовано в оригинальной ЭОС типа инжекционной магнетронной пушки [13].

Предложенный принцип состоит в использовании существенно неоднородного электрического поля для отбора тока эмиссии с катода и дальнейшего формирования электронного потока в промежутке катод-анод при расположении всей ЭОС в магнитном поле, близком к однородному. Использование L-катода «щелевого» типа, схематически представленного на рис. 2 а, позволяет формировать ЭП с высокой плотностью тока при толщине в десятые и сотые доли миллиметра.

Катод состоит из цилиндрической емкости (чашечки) – 1, заполняемой запасом вещества – 2, обеспечивающим снижение работы выхода с поверхности катода. При механическом сжатии полуцилиндров, производимом по их периметру, на участке их соединения образуется особая щелевая структура 5.

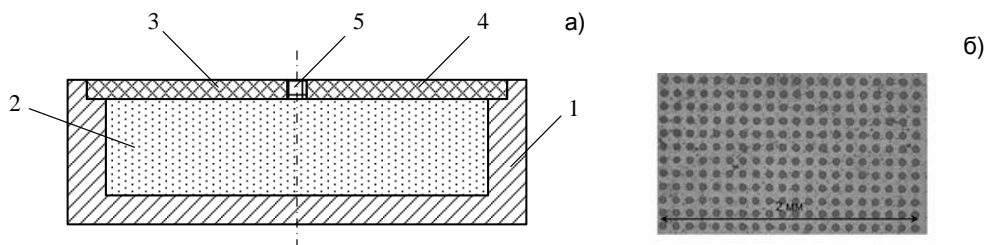


Рис. 2 – Конструкция щелевого L-катода (поперечное сечение) (а) и микрофотография поверхности массива ПЭК (б)

Апробация электронных пушек с L-катодами постоянной активации, имеющих поперечный размер менее 0,05 мм при плотности эмиссии 10 А/см², используемых в ГДИ диапазона 65 ÷ 80 ГГц, показала высокую их эффективность [14].

Современным направлением в настоящее время является создание ЭОС на базе матриц полевых автоэмиссионных катодов (ПЭК), рис. 2 б. Такие системы обладают целым рядом преимуществ по сравнению с термоэмиссионными аналогами, поскольку потребляют существенно меньше энергии, практически безынерционны, обладают более узким энергетическим спектром эмиттируемых электронов [15, 16].

Кроме ПЭК на основе углеродных нанотрубок перспективными являются автоэмиссионные катоды на основе тонких полимерных покрытий [17], специальных полупроводниковых пленок [18]. В ряде работ также сообщается об увеличении эмиссионного тока кремниевых, молибденовых и вольфрамовых острий при покрытии их алмазоподобными пленками [19].

2.2.2 Многолучевые ЭОС

СВЧ-приборы диапазона миллиметровых волн (ЛБВ, клистроны) с высоким уровнем выходной мощности широко используются в передающей аппаратуре систем связи, РЛС и оборудовании средств радиопротиво-

действия. Поэтому развитию и совершенствованию электронно-оптических систем таких приборов уделяется особое внимание [20, 21].

В этом отношении выгодно отличаются конструкции СВЧ усилителей, использующие низковольтный, многолучевой электронный пучок [21] с криволинейными осями лучей и многорядным расположением катодов.

Данная идея была предложена и реализована в модификации многолучевой электронной пушки с однорядным расположением катодов, формирующей криволинейные электронные лучи с отклонением их осей на угол 90° с помощью электростатического поля [22], что позволило улучшить технологичность и точность изготовления пушки, а также исключить сложную систему поворота электронных лучей, сопровождаемых магнитным полем.

Типичная многолучевая пушка радиального типа состоит из 8 индивидуальных катодных узлов, анода и отражателя. Обязательным условием работы такой пушки является ее полная экранировка от магнитного поля, создаваемого в пролетных каналах. Конфигурация электродов одной ячейки пушки показана на рис. 3.

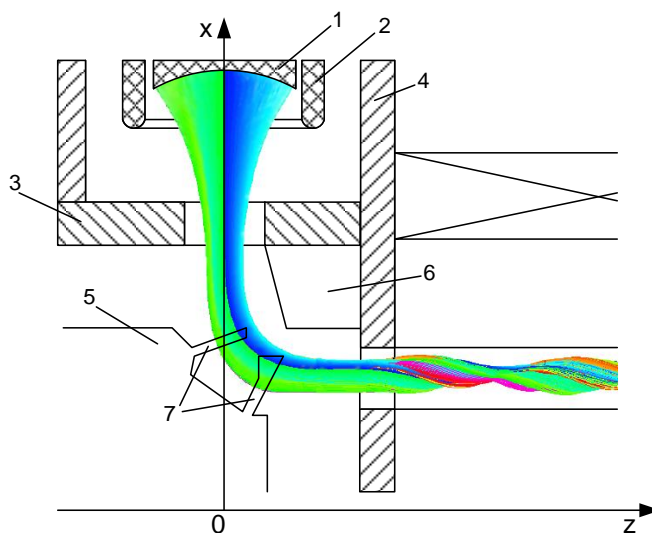


Рис. 3 – Конфигурация электродов одной ячейки многолучевой электронной пушки радиального типа

Каждый катодный узел состоит из сферического катода 1, окруженного цилиндрическим фокусирующим электродом 2 под потенциалом катода. Входная часть анода представляет собой цилиндрическую трубу 3, ось которой совпадает с общей осью симметрии пушки. Торцевая часть трубы закрыта катодным полюсным наконечником 4 в виде диска с отверстиями. В анодной полости установлен отражатель 5 и кольцевой электрод 6, между которыми создается электростатическое поле, отклоняющее электронные лучи на угол 90° и обеспечивающее оптимальное вхождение их в пролетные каналы. Для устранения «расплывания» лучей в азимутальном направлении и уменьшения разброса скоростей электронов отклоняющий электрод 5 должен иметь дополнительные выступы 7.

Описанная модификация многолучевой электронной пушки с криволинейными электронными лучами и электростатическим отклонением лучей на угол 90° выгодно отличается конструктивной простотой и возможностью обеспечения компрессии пучков на уровне однолучевых пушек.

Принципиально новые возможности для построения мощных низковольтных СВЧ усилителей открываются при применении нескольких многолучевых электронных пушек, расположенных вдоль цепочек связанных многозачорных резонаторов [21].

2.3 Магнитные фокусирующие системы

Основной задачей на выходе электронного пучка из ЭОС является его сопровождение в пространстве взаимодействия с СВЧ полями заданного типа электродинамической системы. Для этих целей используются различного рода магнитные фокусирующие системы (МФС). Простейшие МФС с фокусировкой электронных потоков однородным магнитным полем впервые были исследованы и применены для фокусировки протяженных аксиально-симметричных и ленточных потоков еще в сороковых-пятидесятых годах прошлого столетия [23].

В настоящее время широкое распространение получили многореверсные МФС [20]. Применение реверсивных систем магнитной фокусировки представляется целесообразным для построения мощных приборов бегущей волны в диапазоне миллиметровых волн. В таких приборах, как правило, используются в качестве ЗС цепочки связанных резонаторов, разделенных на каскады. Причем фокусирующую реверсивную систему выполняют из секций, сопряженных с секциями ЗС. Такое совмещение фокусирующей и замедляющей систем позволяет максимально оптимизировать конструкцию и значительно уменьшить габариты ЭВП.

Периодическая фокусировка широко применяется в ЭВП с распределенным взаимодействием.

Применяя в многолучевых ЛБВ фокусировку электронного пучка однородным магнитным полем, реализуемым системой постоянных магнитов, получить удовлетворительные массогабаритные характеристики самих ламп можно только при их малой длине, что не позволяет получить большое усиление. В связи с этим возникло направление по созданию мощных усилителей в виде цепочки двух ЛБВ: предварительной традиционной ЛБВ с фокусировкой периодическим магнитным полем и выходной односекционной «прозрачной» ЛБВ с фокусировкой пучка постоянным магнитным полем [24]. Вместе с тем поиск других альтернативных и более приемлемых способов фокусировки многолучевых электронных потоков в миниатюрных многолучевых ЛБВ и усилительных клистродах миллиметрового диапазона длин волн привел к появлению конструкции электронно-оптической системы ЛБВ с фокусировкой многолучевого электронного потока полем однореверсной магнитной системы на постоянных продольно намагниченных магнитах [25].

По другому пути создания мощных усилителей пошли разработчики НИИ «Орион» (Украина), разработав и внедрив в производство многолучевые секционированные ЛБВ с большим усилением и фокусировкой электронного пучка периодическим магнитным полем, что позволяет кардинально решить проблему снижения массогабаритных характеристик и, следовательно, длины ЛБВ при увеличении усиления [26, 27].

3. МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Получение сведений о параметрах ЭП теоретическими методами основано на анализе траекторий движения электронов и их энергий, компонент скоростей, пространственных координат и других параметров, связанных непосредственно с частицами. Вычисление траекторий частиц в однородных полях не составляет трудностей, однако в реальных полях моделирование траекторий значительно усложняется. Прежде чем изучать движения частиц в полях сложной конфигурации, необходимо получить информацию о распределении полей в пространстве для заданной геометрии электродов. Традиционно теоретические методы определения распределения полей и траекторий движения электронов можно разделить на аналитические и численные [28, 29].

Идеальным является случай, когда удастся получить точное выражение для описания потенциалов или напряженностей полей. Однако это возможно только для элементарно простых электронно-оптических систем. В реальных же ситуациях при рассмотрении произвольного скалярного электростатического или магнитного потенциала $u(\vec{r})$, как функции пространственных координат, зачастую удобно представлять его в виде ряда Фурье [30].

После определения электрических и магнитных полей проводится вычисление траекторий движения различными аналитическими или численными методами решения конкретных задач. В большинстве случаев, в связи с развитием вычислительной техники, оптимальным является использование численных методов.

3.1 Численные методы анализа пучков заряженных частиц

Кратко рассмотрим наиболее распространенные в настоящее время численные методы расчета электростатических полей.

Метод конечных разностей основывается на дискретизации уравнения Лапласа. В результате непрерывное дифференциальное уравнение заменяется системой алгебраических уравнений, которую достаточно легко решить.

Для начала вычисления необходимо покрыть всю область дискретной сеткой (расчетной решеткой). Способ дискретизации системы однозначно не определен, поскольку можно свободно выбирать сетку по типу решаемой задачи, а конечная ширина ячейки может быть переменной. Очевидно, что от выбора формы и размера ячейки зависит точность и скорость вычислений. Построив вычислительную сетку и записав уравнения для всех узлов, можно приступить к численному решению системы линейных алгебраических уравнений прямыми, либо итерационными методами [8, 30]. Метод конечных разностей используется в современных программных пакетах QuickWave-3D (Concerto), Fidelity, XFDTD, CST Microwave Studio и др.

Метод конечных элементов основывается на использовании расчетной сетки, состоящая из треугольных элементов переменных размеров, покрывающих всю область, для которой необходимо найти решение уравнения в частных производных. Затем аппроксимируемая вариация потенциала Δu на каждом таком элементе связывается с положением угловых узлов, и строится функционал (интегральная величина,

определенная на множестве функций), минимизация которого по значениям потенциала в узлах треугольников эквивалентна решению уравнения в частных производных. Конечно-разностная процедура аппроксимирует решение задачи в форме уравнения в частных производных, в то время как метод конечных элементов решает ту же задачу на основе вариационного подхода.

Несомненным преимуществом метода конечных элементов перед методом конечных разностей является простота постановки граничных условий и рассмотрения сложных электродных или полюсных конфигураций, обусловленная возможностью произвольно изменять как форму элементов, так и их плотность, подгоняя их края к границам и увеличивая точность на критических участках. Очевидным недостатком метода конечных элементов является его относительно низкая точность (особенно в критической области, прилегающей к оси) и скорость расчета.

Выбор между двумя методами должен зависеть от конкретной задачи. Очевидно, метод конечных элементов больше подходит для нелинейных магнитных задач, в то время как методу конечных разностей следует отдавать предпочтение при вычислении электростатических полей. Однако оба метода эффективны только для закрытых систем. Если фокусирующий или отклоняющий элемент не окружен экраном, в вычислениях появляются большие ошибки.

Самыми известными пакетами электромагнитного моделирования, построенными на методе конечных элементов, являются пакеты HFSS, Multiphysics и FEMLAB.

Метод зарядовой плотности (интегральный метод) основывается на том, что статическое поле выталкивается из любой области, занятой проводником. Заряды распределяются по поверхностям всех проводников таким образом, что все они становятся эквипотенциальными. Если потенциалы проводников (электродов) создаются извне, то это эквивалентно созданию определенных распределений заряда на электродах. Можно считать, что эти заряды являются источниками электростатического распределения потенциала в пространстве, окружающем электроды, в том числе и потенциалов самих электродов. Если заменить потенциалы электродов этими поверхностными распределениями заряда на электродах, то не сложно рассчитать потенциал в любой точке на основе принципа суперпозиции полей, не прибегая к использованию сложных расчетных сеток, как в методах конечных разностей или конечных элементов. Метод зарядовой плотности позволяет точно вычислить распределение потенциала на оси и не требует замкнутых границ в отличие от рассмотренных ранее методов, а также применим для вычисления и магнитных полей при условии возможности использования скалярного магнитного потенциала [31, 32].

Метод конечных интегралов впервые был предложен Вейлэндом в 1977 году [33] (в литературе известен как FIT – the Finite Integration Technique). В настоящее время данный алгоритм в различных модификациях широко используется в акустике, динамической теории упругости, при моделировании электромагнитных полей, пьезоэлектрических эффектов и др. 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, покры-

вающей расчетную область, формируется вторичная сетка, расположенная ортогонально основной. 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 [34]. 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. Кроме того данный метод не накладывает никаких ограничений на тип используемой сетки дискретизации пространства: наряду со структурированной сеткой в декартовой системе координат поддерживаются неортогональные сетки, что позволяет проводить моделирование трехмерных конфигураций систем любой сложности. Численный алгоритм FIT был успешно реализован в программных пакетах CST MAFIA и CST Studio Suite.

После численного расчета электрических и магнитных полей становится возможным траекторный анализ движения электронов. Траектории частиц в общем случае полностью определяются системой дифференциальных уравнений второго порядка типа

$$\frac{d^2y}{dz^2} = f(z, y, y'), \quad (1)$$

где y' – дифференцирование по независимой переменной z ; f – произвольная функция трех переменных, определяемая конкретным видом дифференциального уравнения и зависит от распределений потенциала и магнитной индукции фокусирующих полей.

Наиболее простой путь решения подобных уравнений – применение метода Эйлера [30]. К сожалению, точность этого метода неудовлетворительна. Поэтому более широкое применение при численном решении уравнения (1) нашли одношаговые и многошаговые методы аппроксимации.

Одношаговые методы используют информацию о функции $f(z, y, y')$ внутри интервала, на котором ищется решение. Эти методы требуют вычисления значений функции не только в граничных точках интервала, но также и в точках, лежащих внутри. Наиболее распространенный представитель этого класса методов – явный одношаговый алгоритм Рунге-Кутты, использующий разложение в ряд Тейлора. Однако с точки зрения быстродействия метод рациональной экстраполяции Булирша и Штера и метод Эверхарта [35] более эффективны.

Многошаговые методы основаны на использовании информации о функции $f(z, y, y')$ в более чем одной точке сетки. Очевидно, что при использовании этой информации можно ожидать как повышения скорости, так и улучшения точности вычислительной процедуры. Наиболее известные альтернативные методы этого класса – алгоритм Адамса-Мултона, основанный на методе предиктора-корректора и метод Нумерова (часто в литературе упоминается как метод Фокса-Гудвина). Недостатком таких методов является то, что они требуют экстраполяции, основанной на некоторых полученных ранее значениях опорных точек, а

это подразумевает использование какого-либо одношагового метода для начала цикла вычисления. Кроме того, если требуется изменять величину шага, следует снова выполнять начальную процедуру. Таким образом, использование многошаговых методов может оказаться намного сложнее сравнительно простых одношаговых методов.

3.2 Экспериментальные методы измерения параметров пучков

В настоящее время по классическим экспериментальным методам исследования конфигурации и микроструктуры электронных пучков наиболее полным остается обзор [7]. За время, прошедшее после опубликования обзора, появились новые разработки, которые привели не только к значительному техническому совершенствованию, но и к принципиально новым решениям задач исследования пучков заряженных частиц [6, 36, 37].

По общему подходу к измерению параметров пучков все методы исследований можно разделить на две группы: прямые и косвенные. Первая группа методов основана на измерении характеристик непосредственно самих электронных пучков: тока, плотности тока, энергии, распределения по скоростям и т. д. Косвенные методы основаны на регистрации и анализе электрических и магнитных полей ЭП, либо различных эффектов, происходящих при взаимодействии электронов со средой или объектами, размещенными на пути движения ЭП.

Прямые методы по своей сути являются коллекторными, поскольку основаны на поглощении электронного пучка (полностью или частично) коллектором измерительного устройства, установленным на пути движения ЭП. Данные методы подразделяются на методы, не требующие пространственного разложения ЭП, и методы с разложением пучка на отдельные элементы. Наиболее широкое применение в технике анализа ЭП нашли следующие прямые методы: зондовые, метод подвижного коллектора с малым отверстием и щелевого экрана [7].

Косвенные методы могут быть как контактными, так и неконтактными. Контактные методы связаны с эффектами, возникающими при взаимодействии ЭП с веществом: излучательные методы – свечение газов, оптическое излучение возбуждаемого полупроводника, тепловое излучение металлической пластинки; и неизлучательные методы, основанные на измерениях электрических и механических свойств мишени (метод стимулированной проводимости полупроводника и ударных акустических волн в мишени). Косвенные неконтактные методы можно разделить на радиационные (эффект Вавилова-Черенкова, синхронного, тормозного и переходного излучений) и полевые (резонаторные методы, методы зондирующего пучка). Наиболее широкое распространение из данных методов в диагностике ЭП нашли методы регистрации и анализа тормозного и переходного излучений, зондирующего пучка.

Остановимся подробнее на наиболее распространенных прямых и косвенных методах экспериментального исследования параметров ЭП в СВЧ приборах О-типа.

Зондовые методы. Проволочные зонды различной конструкции в свое время нашли широкое применение при исследовании распределения плотности тока и контура ЭП [7]. До настоящего времени используются зонды-сканеры с полным отбором тока пучка [38]. Однако существенные недостатки данного метода, такие как сложность обработки информации,

невозможность измерения структуры пучка в пролетном канале СВЧ прибора и большие погрешности, существенно сузили границы его применения.

Метод подвижного коллектора с малым отверстием. Сущность метода подвижного коллектора с малым отверстием заключается в последовательном разложении (с помощью движущегося отверстия) поперечного сечения электронного пучка на малые элементы и измерении токов этих элементов. Найденная таким образом зависимость тока, прошедшего через отверстие, от местоположения этого отверстия (координат его центра) будет с некоторой погрешностью определять собой функцию распределения плотности тока вдоль линии перемещения отверстия. Таким способом могут быть найдены распределения плотности тока в различных сечениях электронного пучка, размеры этих сечений, изменение этих размеров по длине пучка, определяющих его конфигурацию, эмиттанс и т.д.

Однако при определении абсолютной величины плотности тока имеют место значительные погрешности, связанные с конечными размерами отверстия диафрагмы (апертурная ошибка), погрешностями измерительной аппаратуры, а также с искажениями, вносимыми в реальный пучок диафрагмой. При измерении параметров пучка малого диаметра ($0,5 \div 1$ мм) с максимальной плотностью в центре диафрагмы с отверстием диаметром $0,1$ мм ошибка может превышать 15% .

Метод регистрации оптического излучения остаточных газов. Ионизационное свечение газа широко используется для контроля тока, размеров, профиля и эмиттанса электронных и протонных пучков мощных источников излучения [39].

При измерении параметров пучков частиц по ионизационному свечению газа особое внимание уделяется геометрии эксперимента. Необходимо принимать специальные меры для устранения светового фона катода инжектора, экранировать свечение, вызываемое при ударах частиц о поверхность объема, из которого выводится излучение, а также уменьшать количество обратно рассеянных электронов. С этой целью световое излучение коллимируют диафрагмами. Погрешность измерения тока пучка данным методом зависит от применяемой приемной, усиливающей и регистрирующей аппаратуры и составляет $5 \div 10\%$.

Метод регистрации переходного излучения на мишени. Опыт экспериментальных исследований ЭП с поперечными размерами порядка $0,1$ мм и удельными мощностями в десятки и сотни $\text{кВт}/\text{см}^2$ показал, что для таких пучков становится проблематичным использование диафрагмы с малым входным отверстием. Данный факт стимулировал развитие метода, основанного на использовании явления переходного излучения оптического диапазона, возникающего при падении электронов на металлическую мишень и реализованный в конкретных схемах измерений параметров ленточных и аксиально-симметричных [36] ЭП.

В ходе экспериментальных исследований переходного излучения [40] определены следующие его свойства:

- прямая пропорциональность интенсивности излучения величине энергии бомбардирующих электронов в диапазоне энергий от 30 эВ до 100 кэВ, полученные значения интенсивности хорошо согласуются с расчетными, основанными на линейном пересчете энергии от 80 эВ до 100 кэВ;

- однородность по структуре на всей поверхности металла, подвергающегося бомбардировке электронами;
- спектр излучения непрерывен в наблюдаемой области длин волн от 400 нм до 600 нм;
- источники излучения локализованы на поверхности металла в области падения на него электронов;
- интенсивность излучения не зависит от давления остаточных газов в рабочем интервале давления установок;
- распределение интенсивности излучения определяется распределением плотности тока в поперечном сечении падающего на мишень пучка;
- при фиксированном ускоряющем напряжении зависимость интенсивности переходного излучения от плотности тока ЭП имеет линейный характер;
- переходное излучение полностью поляризовано, что может быть использовано для селекции его от других видов излучения.

Описанные свойства переходного излучения легли в основу метода определения геометрических размеров, характера распределения и величины плотности тока в поперечном сечении ЭП [36, 41, 40]. Дальнейшее развитие данный метод получил в работах [42, 43].

Оценка предельных значений мощности исследуемых электронных пучков (от единиц Вт/см² до 100 кВт/см² и выше) указывает также на возможность применения метода переходного излучения при диагностике высокоинтенсивных пучков, используемых в технологических установках и для физических исследований.

4. ВЫВОДЫ

Миниатюризация современных электронных приборов, а также повышение требований к их микропараметрам и выходным характеристикам способствовали появлению новых и развитию уже существующих типов эмиссионных поверхностей, разработок электронных пушек и конструкций фокусирующих систем.

Совершенствование параметров термоэмиссионных катодов привело к созданию новой модели катода «целевого» типа, позволяющего формировать ЭП с высокой плотностью тока при толщине в десятые и сотые доли миллиметра. Активно развивается направление по созданию ЭОС на базе холодных полевых автоэмиссионных катодов. Созданные на их основе матрицы ПЭК позволяют получать равномерную по площади и стабильную во времени электронную эмиссию при невысоких значениях напряженности электрического поля. Высокую эффективность демонстрируют автоэмиссионные катоды на основе тонких полимерных покрытий, полупроводниковых пленок, кремниевых и молибденовых структур, покрытых алмазоподобными пленками.

Поиски оптимального сочетания массогабаритных параметров и выходной мощности СВЧ приборов привели к появлению различных модификаций их электронных пушек и фокусирующих систем. Весьма перспективными для построения мощных низковольтных СВЧ усилителей являются многолучевые системы с криволинейными осями лучей, а также ЭОС, состоящие из нескольких многолучевых электронных пушек, способных обеспечивать высокую выходную мощность при небольшой плотности тока. Среди фокусирующих систем наибольшее распространение

в настоящее время получили многореверсные и периодические МФС. Отдельно стоит отметить развитие направления по созданию мощных усилителей в виде цепочки двух ЛБВ с фокусировкой периодическим и постоянным магнитными полями.

Анализ основных экспериментальных методов исследования параметров ЭП показал, что эффективность их применения во многом зависит от специфических особенностей исследуемых систем. Несмотря на их многообразие, одним из перспективных считается метод переходного излучения. С учетом необходимости получения предварительных данных о микроструктуре и параметрах ЭП при конструировании ЭОС все большее развитие получают численные методы анализа пучков заряженных частиц. Их сопоставительный анализ в задачах расчета полей и траекторий движения частиц позволяет сделать вывод о том, что при соответствующем выборе системы уравнений, порядка метода, шага интегрирования и длины разрядной сетки ЭВМ высокой точности вычисления можно достичь любым из изложенных в настоящем обзоре методов.

INTENSE ELECTRON BEAMS FORMATION AND ANALYSIS METHODS IN STATIC ELECTROMAGNETIC FIELDS (REVIEW)

G.S. Vorobyov, I.V. Barsuk, A.A. Drozdenko

Sumy State University,
2, Rymsky-Korsakov St., 40007 Sumy, Ukraine
E-mail: vp@sumdu.edu.ua

In this review basic principles of electron beams formation in static electric and magnetic fields are reported. Traditional and new perspective designs of electron-optical systems and magnetic systems are also considered. Questions of charged-particle beam focusing and transport on the level of modern technologies are being analyzed and their theoretic and experimental parameter research methods are examined as well.

Keywords: CHARGED PARTICLE BEAMS, CURRENT DENSITY DISTRIBUTION, ELECTROMAGNETIC FIELD, ELECTRON, ELECTRON GUN.

МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ І АНАЛІЗУ ІНТЕНСИВНИХ ПУЧКІВ ЕЛЕКТРОНІВ У СТАТИЧНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛЯХ (ОГЛЯД)

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

Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова 2, 40007, м. Суми, Україна
E-mail: vp@sumdu.edu.ua

У даному огляді висвітлені загальні принципи формування пучків електронів у статичних електричних і магнітних полях. Розглянуті традиційні, а також нові перспективні розробки електронно-оптичних і магнітних систем. Аналізуються питання фокусування та транспортування пучків заряджених частинок на рівні сучасних технологій, а також розглянуті теоретичні та експериментальні методи дослідження їх параметрів.

Ключові слова: ПУЧКИ ЗАРАДЖЕНИХ ЧАСТИНОК, РОЗПОДІЛ ГУСТИНИ СТРУМУ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ, ЕЛЕКТРОН, ЕЛЕКТРОННА ГАРМАТА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P.V. Logatchov, P.A. Bak, A.A. Starostenko, N.S. Dikansky, Ye.A. Gusev, A.R. Frolov, D.A. Malutin, *Particle Accelerator Conference. Proceedings of the 2004*, 355 (2004).
2. P.V. Logatchov, D.A. Malyutin, A.A. Starostenko *Particle Accelerator Conference. Proceedings of the 2006*, 40 (2006).
3. Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов, *Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т.2* (М.: Физматлит: 2004).
4. А.А. Шматько, *Электронно-волновые системы миллиметрового диапазона. Т.1* (Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина: 2008).
5. *Вакуумная СВЧ электроника: Сборник обзоров* (Ред. М.И. Петелин) (Нижний Новгород: ИПФ РАН: 2002).
6. Г.С. Воробьев, А.А. Дрозденко, К.А. Пушкарев, И.В. Барсук, *Компрессорное и энергетическое машиностроение* №3(9), 79 (2007).
7. Г.И. Александров, Б.М. Заморозков, А.Ю. Калинин и др., *Сер. 1. Электроника СВЧ* 8 (108) (1973).
8. С.И. Молоковский, А.Д. Сушков, *Интенсивные электронные и ионные пучки* (М.: Энергоатомиздат: 1991).
9. T. Srinivasan-Rao, J. Fischer, T. Tsang, *J. Appl. Phys.* **77**, 1275 (1995).
10. И.А. Светликина, А.В. Иванова, О.Ф. Кузнецова, *Сер. 1. Электроника СВЧ* №19 (1988).
11. Е.В. Белоусов, Г.С. Воробьев, В.Г. Корж, К.А. Пушкарев, А.И. Рубан, *Вісник СумДУ. Серія : Фізика, математика, механіка* №1(7), 73 (1997).
12. *Генераторы дифракционного излучения* (Ред. В.П. Шестопалов) (Киев: Наук. думка: 1991).
13. А.Н. Аверин, Е.В. Белоусов, В.Г. Корж, А.С. Тищенко, Л.В. Удянская, *А.с. 486600 SU 1762675 A1, H01 J 23/06* (1992).
14. Е.В. Белоусов, В.В. Завертанний, А.В. Нестеренко, *Радиофизика и электроника* **11**, 275 (2006).
15. N.N. Dzbakovskii, P.V. Minakov, A.A. Pilevskii, A.T. Rakhimov, V.V. Seleznev, N.V. Suetin, A.Yu. Yur'ev, *Tech. Phys.* **50**, 1360 (2005).
16. Г.С. Бочаров, А.В. Елецкий, *ЖТФ* **75**, 126 (2005) (G.S. Bocharov, A.V. Eletsckii, *Tech. Phys.* **50**, 944 (2005)).
17. A.N. Ionov, E.O. Popov, V.M. Svetlichnyi, A.A. Pashkevich, *Tech. Phys. Lett.* **30**, 566 (2004).
18. N.V. Egorov, L.I. Antonova, S.R. Antonov, D.V. Zhukov, L.-C. Chao, *Tech. Phys.* **54**, 916 (2009).
19. S.A. Pshenichnyuk, Yu.M. Yumaguzin, *Tech. Phys.* **49**, 623 (2004).
20. Л.В. Касаткин, В.П. Рукин, В.Д. Ерёмка, В.Д. Науменко, Г.Н. Рапопорт, В.С. Мирошниченко, *Электровакuumные приборы диапазона миллиметровых волн* (Севастополь: Вебер: 2007).
21. Н.И. Сеницын, Ю.Ф. Захарченко, Ю.В. Гуляев, *Журнал Радиоэлектроники* №10 (2009).
22. A.V. Galdetskiy, I.I. Golenitskiy, N.G. Dukhina, L.A. Saprynskaja, *17th International Crimean Conference – Microwave and Telecommunication Technology (CRIMICO-2007)*, art. no. 4368658, 133 (2007).

23. И.В.Алямовский, *Радиотехника и электроника* **4**, 841 (1959).
24. Б.В. Сазонов, А.С. Победоносцев, *Электронная техника. Серия СВЧ-техника* №2, 5 (2003).
25. A.V. Galdetskiy, I.I. Golenitskij, N.G. Dukhina, E.G. Kanevskij, L.A. Saprynskaja, *18th International Crimean Conference – Microwave and Telecommunication Technology (CRIMICO-2008)*, art. no. [4676344](#), [187](#) (2008).
26. И.А. Данович, В.А. Перекупко, *ТП СВЧ: Электровакуумные приборы* №1, 7 (2009).
27. С.П. Ракигин, *Прикладная радиоэлектроника* **3**, 2 (2004).
28. В.П. Ильин, *Численные методы решения задач электрофизики* (М.: Наука. Физматлит: 1985).
29. И.В. Мельник, *Изв. вузов. Радиоэлектроника* **48**, 61 (2005).
30. М. Силадьи, *Электронная и ионная оптика* (М.: Мир: 1990).
31. И.О. Арушанян, *Численное решение интегральных уравнений методом квадратур: пособие для практикума на ЭВМ* (М.: МГУ: 2002).
32. А.Д. Полянин, А.И. Журов, В.Ф. Зайцев, *Методы решения нелинейных уравнений математической физики и механики* (М.: Физматлит: 2005).
33. T. Weiland, *Electron. Commun. (AEU)* **31**, 3 (1977).
34. M. Clemens, T. Weiland, *Progr. Electromagn. Res.* **32**, 65 (2001).
35. E. Everhart, *Celestial Mech.* **10**, 35 (1974).
36. Е.В. Белоусов, Г.С. Воробьев, В.Г. Корж, К.А. Пущкарев, В.Я. Чабань, *Патент 2008737 СИ РФ, МКИ H01J-9/42, G01T1/29, Бюлл. РФ «Изобретения»* №4, 160 (1994).
37. Yu.O. Averkov, *Tech. Phys.* **50**, 1058 (2005).
38. М.А. Алсайед Али, *Электронный журнал «Исследовано в России»* (<http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2001/020.pdf>).
39. A.S. Artemov, G.F. Astrakharchik, Yu.K. Baigachev, A.K. Gevorgov, *Tech. Phys.* **45**, 116 (2000).
40. И.М. Балаклицкий, Е.В. Белоусов, В.Г. Корж, *Изв. вузов. Радиоэлектроника* **25**, 38 (1982).
41. А.Ф. Шарафутдинов, Г.А. Науменко, А.П. Потылицин, Б.Н. Калинин, Г.А. Саруев, *Известия Томского политехнического университета* **307**, 15 (2004).
42. Г.С. Воробьев, А.А. Дрозденко, Д.А. Нагорный, А.А. Рыбалко, *Изв. вузов. Радиоэлектроника* **51**, 22 (2008) (G.S. Vorobjov, A.A. Drozdenko, D.A. Nagorniy, A.A. Rybalko, *Radioelectronics and Communications Systems* **51**, 364 (2008)).
43. Г.С. Воробьев, А.А. Дрозденко, Д.А. Нагорный, *Приборы и техника эксперимента* №1, 115 (2009) (G.S. Vorob'ev, A.A. Drozdenko, D.A. Nagorniy, *Instrum. Exp. Tech.* **52**, 104 (2009)).