

Сравнение с экспериментом. Проведем сравнение приведенной выше теории с экспериментальными данными работы [7] (рис. 3). В [7] исследова-

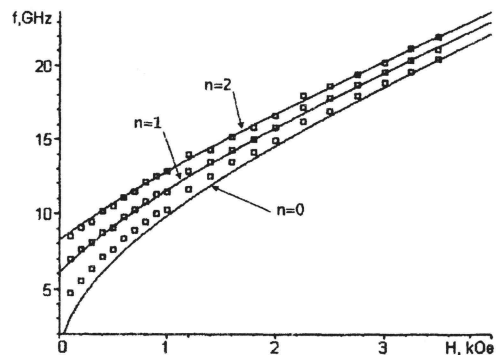


Рис. 3

лись длинные, продольно намагниченные, пермаллоевые нанопроволоки прямоугольного поперечного сечения. Данную теорию можно применить, аппроксимируя экспериментальные образцы цилиндрами эллиптического сечения (эллипс вписан в прямоугольник). Все параметры проволок (магнитные и геометрические) взяты из [7]. Как видим, (13) дает хорошее совпадение с экспериментом.

Выводы. Построена теория магнитоэлектрических колебаний в ферритовых эллиптических

трубках. Показано, что спектр ПМСК состоит из двух групп — высокочастотной и низкочастотной. Колебания, принадлежащие к высокочастотной группе, локализируются на внешней поверхности эллиптической трубки в отличие от колебаний принадлежащих к низкочастотной группе, которые локализируются на внутренней поверхности трубки. С ростом номера моды степень локализации увеличивается, и моды приобретают ярко выраженный поверхностный характер. Если отношение полуосей эллипсов a_1/a_2 близко к единице, то более разреженный спектр имеет высокочастотная группа, а если $a_1/a_2 \ll 1$, то наоборот.

Проведенное сравнение теории с экспериментом продемонстрировало хорошее совпадение, что свидетельствует, в частности, о применимости данной теории к анализу длинных прямоугольных ферромагнитных резонаторов. Рассмотренная электродинамическая система может представлять интерес как резонатор с двумя основными модами, перестраиваемый магнитным полем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Неведов Е. И. Открытые коаксиальные резонаторные структуры. — М.: Наука, 1982, — 220 с.
2. Dyott R. B. Elliptical Fiber Waveguides. Norwood, MA: Artech House, 1995, — 280 p.
3. R. E. De Wames, T. Wolfram. Magnetostatic surface modes in an axially magnetized elliptical cylinder // Appl. Phys. Lett. — 1970. — Vol. 16, № 8. — P. 305 — 308.
4. Walker L.R. Magnetostatic modes in ferromagnetic resonance // Phys. Rev. — 1957. — 105, № 2. — P. 390 — 399.

5. Schneidere M., Marquart J. Fast computation of modified Mathieu functions applied to elliptical waveguide problems // IEEE Trans. — 1999. — V. MTT-47, № 4. — P. 513 — 515.

6. Зависляк И. В., Головач Г. П., Попов М. А., Романюк В. Ф. Поверхностные магнитоэлектрические колебания в эллиптических отверстиях и цилиндрах // Новые магнитные материалы микроэлектроники. Сборник трудов XIX международной школы-семинара. - Москва: Из-во физ. факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, 2004, С.263 — 265.

7. Jorzick J., Demokritov S.O., Mathieu C., et al. Brillouin light scattering from quantized spin waves in micron-size magnetic wires // Phys. Rev. B. — 1999 — V 60, № 22. — P. 15194 — 15200.

Киевский нац. ун-т

Поступила в редакцию 06.10.05

УДК 621.385.6120

ВОРОБЬЕВ Г. С., ДРОЗДЕНКО А. А., ПОНОМАРЕВ А. Г.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В ПРИБОРАХ СВЧ

Предложен алгоритм численного анализа статических характеристик пучков для аксиально-симметричных электронно-оптических систем произвольной конфигурации. В сравнении с экспериментальными данными показано, что разработанный алгоритм позволяет с достаточной степенью точности провести оценку характеристик электронного пучка и оптимальных режимов работы исследуемой трехэлектродной пушки.

При создании генераторов и усилителей СВЧ требуется максимальная информация об электронном пучке (ЭП), которую можно получить как экспериментальными, так и теоретическими методами исследований. Проведенный в [1] анализ показывает что, наиболее перспективным в экспериментальном направлении является метод регистрации и обработки переходного излучения, возникающего при падении электронов на металлическую мишень. Однако при оптимизации параметров ЭП в электронных устройствах на стадии начального проектирования целесообразным является численный анализ. Для теоретического анализа параметров электронных пучков в данной работе применена методика, описанная в [2]. Численные методы решения уравнений движения электрона в заданных внешних электрических полях с учетом влияния пространственного заряда и ряда других факторов позволяют рассчитать траектории электронов и определить профиль и распределение плотности тока ЭП для заданного режима работы электронной пушки.

Цель данной работы заключается в сравнительном анализе распределения плотности тока в поперечных сечениях аксиально-симметричного ЭП по результатам численных расчетов и экспериментальных данных. Данный ана-

лиз может быть полезен на начальной стадии оптимизации режимов работы трехэлектродных пушек в приборах СВЧ.

Объект исследования. Объектом исследования в данной работе является аксиально-симметричный ЭП, который используется в СВЧ приборах типа ЛБВ. Он формируется трехэлектродной пушкой со сходящейся оптикой и далее вводится в замедляющую систему. Пушки такого типа позволяют формировать ЭП с диаметром в кроссовере порядка 0,1—0,5 мм, током пучка $I = 2-30$ мА при ускоряющих напряжениях 2000—6000 В. На рис. 1 представлена конфигурация электродов аксиально-симметричной электронной пушки, состоящей из следующих элементов, на которые поданы соответствующие потенциалы: 1 — термокатод (U_K), 2 — фокусирующий электрод (U_Φ), 3 — первый анод (U_{A1}), 4 — второй анод (U_{A2}), 5 и 6 — передвигаемая мишень, на которой фиксируется интенсивность переходного излучения при экспериментальных исследованиях. Пунктиром показана огибающая формируемого аксиально-симметричного ЭП.

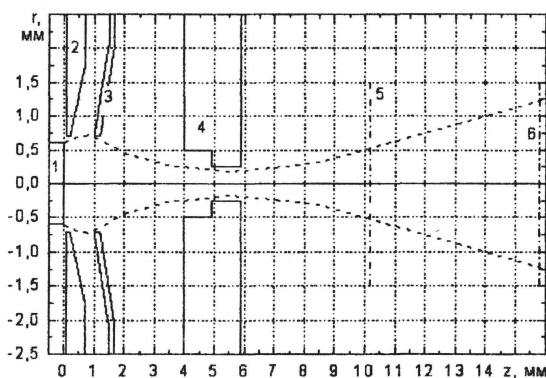


Рис. 1

Методика исследований. При экспериментальном определении распределения плотности тока по диаметру аксиально-симметричного ЭП используется фотометод [1, 3] регистрации переходного излучения электронов на металлической мишени. Для этого используются хорошо разработанные оптические методы и фотометрическая аппаратура. Повышение оперативности обработки экспериментальных данных, отображенных на фотопленке, достигается путем использования измерительного комплекса, содержащего микроденситометр, управляющую ЭМВ, блок сопряжения с микроденситометром. Идентификация плотности почернения фотоматериала с плотностью тока исследуемого пучка и пересчет относительных значений в абсолютные осуществ-

вляются путем использования специальных пакетов программ, что позволяет на площади поперечного сечения пучка, равной 1 мм², получить до 10⁵ значений плотности тока с погрешностью, не превышающей 13%. Высокая разрешающая способность фотометода дает возможность выявлять микроструктуру ЭП и исследовать роль различных факторов, приводящих к нарушению однородности распределения плотности тока по сечению пучка.

При численном анализе параметров ЭП известными считаются геометрия электродов, величины потенциалов электродов, значение тока пучка, распределение плотности тока на эмитирующей поверхности, максимальный разброс электронов по энергии, средняя энергия вылета электронов и их предельные угловые характеристики. Суммарное электрическое поле, обуславливающее поведение электронного пучка, состоит из составляющей поля электронно-оптических линз и составляющей поля самого электронного пучка, вызванного распределением пространственного заряда. Для электронно-оптических систем с аксиальной симметрией напряженность поля, создаваемого непрерывным электронным пучком, не имеет продольной составляющей по оси z , поэтому радиальная составляющая поля по оси r , обусловленная пространственным зарядом пучка, с некоторым приближением может быть представлена соотношением [5]. В этом случае нерелятивистское траекторное уравнение с учетом влияния пространственного заряда в цилиндрической системе координат легко получить в следующем виде:

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = \frac{1+r'}{2(U-\tilde{U})} \cdot \left(\frac{I r}{2\pi R^2 \varepsilon_0 V} - E_r(r, z) + r' E_z(r, z) \right), \quad (1)$$

где $U-\tilde{U}$ — разность потенциалов, пройденная электронами; I — ток пучка; R — радиус огибающей поверхности пучка; ε_0 — электрическая постоянная; V — средняя скорость движения электронов, определяемая законом сохранения энергии; $E_r(r, z)$ и $E_z(r, z)$ — радиальная и продольная компоненты электрического поля электронно-оптических линз.

Если поперечные размеры пучка значительно меньше его продольных размеров, компоненты аксиально-симметричного поля представляются в виде степенных рядов от радиуса с коэффициентами, содержащими производные от распределения потенциала на оси прохождения пучка [5]. Для определения распределения потенциала и его производных на оси системы применяется численный метод решения интегральных уравнений для теории потенциала. После дискретизации контура электродов распределение плотности поверхностного заряда представляется в виде аппроксимации с помощью линейного сплайна по неизвестным дискретным значениям зарядов в узлах. Путем применения метода коллокаций задача сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных величин плотности за-

рядов σ_j . Преимущество применения интегрального метода заключается в том, что, после того как определены значения σ_j , вычисление производных от распределения потенциала происходит на аналитическом уровне путем дифференцирования ядра интегрального уравнения.

В уравнении (1) неопределенным является радиус огибающей пучка R . Поэтому при вычислении организован итерационный процесс, на первом шаге которого считается, что ток пучка равен нулю. В произвольной итерации m уравнение (1) имеет вид:

$$\frac{d^2 r_m}{dz^2} = \frac{1+r'_m}{2(U-\tilde{U})} \cdot \left(\frac{I r_m}{2\pi R_{m-1}^2 \epsilon_0 V} - E_r(r_m, z) + r'_m E_z(r_m, z) \right). \quad (2)$$

Уравнение (2) с учетом компонент электрического поля электронно-оптических линз, представленных в виде степенных рядов, является нелинейным по r , поэтому для его решения используется пошаговый метод Эверхарта [6]. Достоинство метода Эверхарта состоит в широком диапазоне изменения контрольного параметра, позволяющего выбрать оптимальный вариант затрат машинного времени и точности интегрирования. Для определения радиуса огибающей пучка расчет проводится для некоторого начального фазового множества из набора N частиц, которое генерируется случайным образом в плоскости эмитирующей поверхности. Для моделирования распределения плотности тока каждая из частиц начального фазового множества наделяется значением плотности тока. Огибающая пучка m -й итерации определяется из соотношения:

$$R_m(z) = \max_k(r_{m,k}(z)), k = 1, \dots, N.$$

Расчет проводится до выполнения соотношения:

$$\max_z |R_{m+1}(z) - R_m(z)| < \xi,$$

где ξ — задаваемая точность расчета.

Анализ результатов. В качестве примера апробации выше описанной методики численного анализа на рис. 2, для значений $U_\Phi = 0$ В, $U_{A1} = 180$ В, $U_{A2} = 3200$ В, изображено семейство огибающих траекторий ЭП при токах пучка от 3 до 10 мА с шагом 1 мА. При этом эмитирующая поверхность задавалась идеально плоской с равномерным распределением плотности тока, средняя энергия вылета электронов составляла 15 эВ с разбросом ± 7 эВ, максимальные угловые характеристики эмитируемых электронов задавались в пределах $\pm 10^\circ$.

Из приведенных графиков видно, что рост тока (пространственного заряда) приводит к увеличению диаметра пучка. Для определения распределения плотности тока по диаметру электронного пучка, при сравнении с эксперимен-

том, использовался метод сеточной ловушки частиц. Суть метода состоит в поперечном пересечении ЭП сеткой с заданными размерами ячейки и даль-

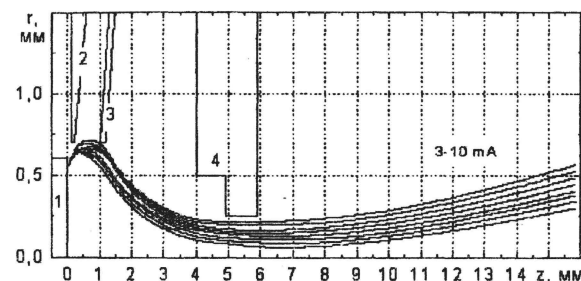


Рис. 2

нейшем подсчете количества плотности тока присущей каждой частице, попавшей в ту или иную ячейку сетки. Таким образом происходит накопительный сбор информации о плотности распределения частиц в пучке. Сетка устанавливалась на расстояниях 4,4 мм и 9,9 мм от второго анода, что соответствовало полученным ранее экспериментальным данным.

На рис. 3 представлены результаты численного расчета распределения относительной плотности тока по диаметру ЭП (сплошные линии) и аналогичные экспериментальные данные 1 — для расстояния 4,4 мм и 2 — 9,9 мм от второго анода. Как видно из рис. 3 результаты экспериментальных исследований статических характеристик аксиально-симметричного ЭП удовлетворительно согласуются с численным анализом.

Однако в эксперименте присутствует асимметрия плотности тока по диаметру пучка, которая наблюдается как при работе катода в режиме ограничения тока пространственным зарядом, так и в режиме полного отбора тока. Следовательно, неоднородность распределения плотности тока по сечению пучка может быть обусловлена неоднородностью

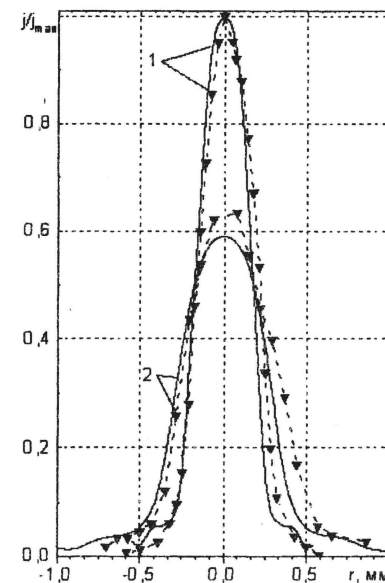


Рис. 3

эмиссии катода, дополнительными поперечными скоростями электронов, вызванными тепловыми эффектами, перекосом электродов пушки, эффектами линз анодных отверстий.

Заключение. В работе развита методика расчета полей, траекторного анализа электронов и определения плотности тока по диаметру ЭП для произвольной конфигурации аксиально-симметричных электронно-оптических систем. Расчет структуры электрического поля базируется на разделении всех электродов пушки на элементарные заряженные участки с последующим применением известного метода интегральных уравнений. При численном решении нерелятивистского траекторного уравнения движения электронов применяется неявный пошаговый метод Эверхарта, позволяющий при прохождении в фокусирующем поле порядка 10^3 частиц сформировать огибающую пучка с учетом влияния пространственного заряда и теплового разброса электронов по скоростям. Сравнительный анализ численного расчета и экспериментальных данных, полученных с использованием фотометода регистрации переходного излучения на мишени, для конкретной конструкции электронно-оптической системы, указывает на достоверность полученных результатов и возможность использования разработанного алгоритма численного анализа на начальном этапе проектирования электронно-оптических систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воробьев Г. С., Нагорный Д. А., Пушкарев К. А., Белоусов Е. В., Корж В. Г. Фотометод диагностики аксиально-симметричных электронных пучков // Радиоэлектроника.— 1998.— №6.— С.59–64.(Изв. вузов)
2. Воробьев Г. С., Пономарев А. Г., Дрозденко А. А. Расчет структуры электрического поля и траекторный анализ электронного пучка в аксиально-симметричной электронно-оптической системе // Материалы 13-й Международной Крымской конференции (СВЧ — техника и телекоммуникационные технологии) (КрыМиКо'2003).— Севастополь: «Вебер», 2003.— С.294–295.
3. Балаклицкий И. М., Белоусов Е. В., Корж В. Г. Фотометод исследования электронных пучков с высокой удельной мощностью // Радиоэлектроника. — 1982,— Т.25, №5. — С. 38 — 42.(Изв. вузов)
4. Молоковский С. И. Сушков А. Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. — М.: Энергоатомиздат, 1991.— 304с.
5. Силады М. Электронная и ионная оптика: Пер. с англ.— М.: Мир, 1990.— 639с.
6. Бордовицкая Т. В. Современные численные методы в задачах небесной механики.— М.: Наука, 1984.— 136с.

Сумской гос ун-т

Поступила в редакцию 18.10.05

УДК 621.372.8

БЕРДЫШЕВ С. Н.

УЧЕТ ПОТЕРЬ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СРЕДЕ ПРИ СИНТЕЗЕ И АНАЛИЗЕ ОТВЕТВИТЕЛЯ КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ НА ПОЛОСКОВОМ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ

Приведена математическая модель и описание ответвителя круговой поляризации на полосковом металлодиэлектрическом волноводе с учетом потерь в диэлектрической среде волновода, предназначенного для построения поляризационного измерителя комплексных параметров волноводных устройств диапазона крайне высоких частот.

Развитие техники миллиметровых волн требует разработки новых приборов для измерения комплексных параметров микроволновых трактов. Поляризационные измерители предназначены для измерения модуля и аргумента комплексного коэффициента отражения в лабораторных условиях. Отличие предлагаемого ответвителя круговой поляризации (ОКП) для поляризационного измерителя от уже известных моделей заключается в том, что ответвитель построен на новой линии передачи — полосковом металлодиэлектрическом волноводе (ПМДВ). Данная линия передачи предназначена для различных волноводных и измерительных устройств, работающих в диапазоне КВЧ, и при разработке таких устройств необходимо учитывать диэлектрические потери.

ОКП на основе ПМДВ изображен на рис. 1, из которого видно, что ОКП состоит из ПМДВ — *A*, в металлической пластине которого выполнено крестообразное отверстие связи, и круглого металлического волновода — *B*, установленного торцом на ПМДВ.

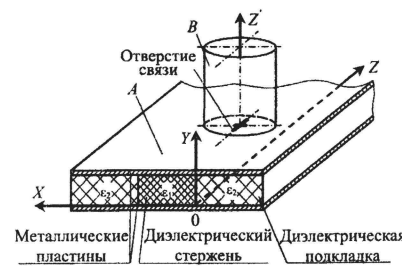


Рис. 1

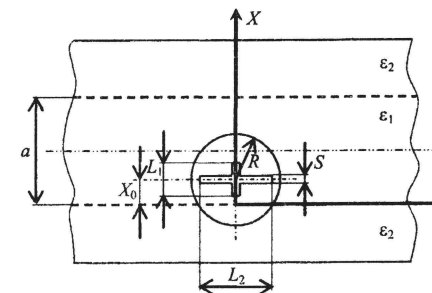


Рис. 2

Рассмотрим математическую модель ОКП, для чего выведем соотношение амплитуд волн, возбуждаемых в круглом волноводе продольной и поперечной шелями крестообразного отверстия связи (рис. 2). При определении