

УДК 537.535

Проблемы электронно-оптических систем для перспективных пучково-плазменных приборов СВЧ

М. А. Завьялов, В. И. Переводчиков, В. А. Сыровой

Государственное унитарное предприятие "Всероссийский электротехнический институт",
Москва, Россия

Работа посвящена проблемам, связанным с реализованными и перспективными системами мощных пучково-плазменных приборов СВЧ с интенсивными электронными пучками, а также теоретическим разработкам по оптике плотных пучков, относящимся к этим устройствам.

Пучково-плазменным процессам в мощной электронной аппаратуре научного и прикладного назначения посвящен ряд оригинальных и обзорных статей и монографий [1–9]. Собственно плазменная электроника СВЧ возникла пятьдесят лет назад после основополагающих работ Ахиезера и Файнберга,

Бома и Гросса, в которых было предсказано явление пучковой неустойчивости, состоящее в эффективном возбуждении колебаний и волн в плазме электронным пучком. В последнее время в ВЭИ создан черенковский пучково-плазменный усилитель с нерелятивистским электронным пучком на основе гибридной замедляющей структуры в виде цепочки связанных резонаторов (ЦСР) с заполненным плазмой пролетным каналом [2–6]. Гибридные плазменно-резонаторные системы сочетают в себе высокую эффективность взаимодействия, характерную для плазменных волноводов, с возможностью практически полного излучения энергии возбужденных СВЧ-полей. Высокие параметры нерелятивистских черенковских пучково-плазменных усилителей и генераторов СВЧ определяются эффективностью взаимодействия пучок–плазма, имеющего объемный характер, компенсацией пространственного заряда электронного пучка, а также длительным синхронизмом пучка с волнами гибридных замедляющих структур.

Создание мощного широкополосного СВЧ-усилителя (выходная мощность 20 кВт, ширина полосы 30 %, КПД = 30 %) потребовало решения ряда физико-технических задач: разработки систем формирования и транспортировки электронного пучка (20 кэВ, ~ 3 А) в узком протяженном канале замедляющей структуры (диаметр 1,2 см; длина ~ 40 см), заполненном плазмой; системы газодинамики отпаянного прибора, обеспечивающей регулировку давления рабочего газа в требуемых пределах (10^{-6} – 10^{-3} мм рт. ст.) с помощью водородных генераторов, а также вакуумный перепад между плазменной электродинамической системой и ЭОС пушки; систем вывода СВЧ-мощности. Особенности и характеристики данных приборов описаны в работах [2–8]. На рис. 1 представлена схема пучково-плазменного усилителя СВЧ (плазменная ЛБВ) сантиметрового диапазона [10].

В данном приборе электронный пучок транспортируется в пролетном канале, помещенном в продольное магнитное поле $B_{zm} = 0,25$ Тл. При давлении газа $7 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. в результате ионизации газа электронным пучком и пучково-плазменного взаимодействия в канале ЦСР генерируется плазма с концентрацией до 10^{12} см⁻³ и электронной температурой ~15–20 эВ. Для плазменного режима работы прибора необходимо выполнение соотношений

$$\omega_b^2 \ll \omega^2 < \omega_e^2 < \omega_{eh}^2,$$

где ω_b – электронная частота пучка;

ω – рабочая частота;

ω_e – электронная плазменная частота;

ω_{eh} – электронная циклотронная частота.

В действующей модели пучково-плазменного прибора (ППП) СВЧ электронный пучок эмитируется плоским термокатодом с диаметром 1 см. Параметры пучка согласовывались с расчетом электродинамической структуры. В плоскости катода магнитное поле составляет 0,3–0,5 B_{zm} . Расчет ЭОС проводился при помощи пакетов ЭРА, ЭСТАМП, ЭРА-РИНОТС [2–4, 8].

В рабочем режиме в системе реализуется состояние “плазменный пучок”, при котором электронный поток с концентрацией электронов $n_b = 3 \cdot 10^9$ см⁻³ транспортируется в плотной плазме $n_e \geq 10^2 n_b$, генерируемой электронным пучком при развитии пучково-плазменного разряда [1, 8, 9].

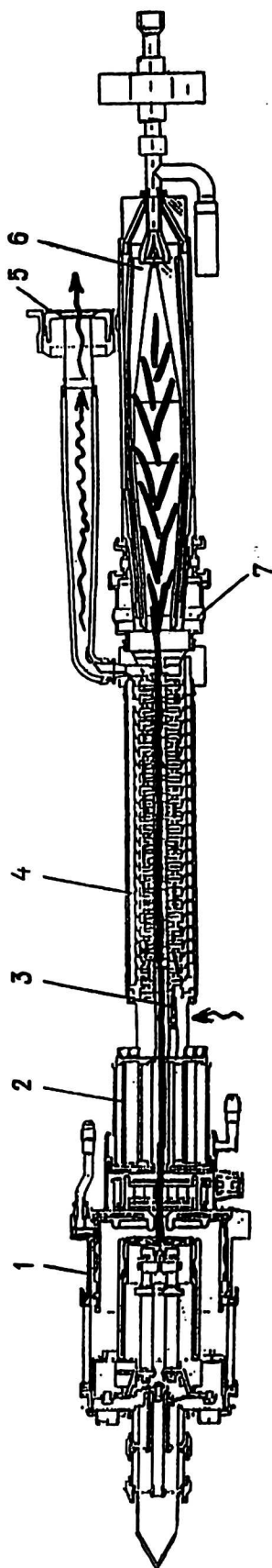


Рис. 1. Структурная схема прибора:

1 - электронная пушка; 2 - встроенная система дифференциальной откачки; 3 - вход усиленного сигнала СВЧ; 4 - электродинамическая замедляющая система (ЦСР); 5 - выходное металлокерамическое окно; 6 - коллектор; 7 - водородный генератор

Для снижения влияния пучково-плазменных процессов в гибридной электродинамической структуре на работу ЭОС пушки данные системы, как отмечалось, разделены встроенной системой дифференциальной откачки. Она состоит из сорбционного насоса и работающего в поле соленоида магнито-разрядного насоса, электроды которого образуют ионную ловушку для защиты термоэмиссионного катода от ионной бомбардировки. Из-за сложных режимов работы ППП СВЧ в описываемой модели применялись высокотемпературные W-катоды (температура ~ 2530 °С, мощность системы нагрева 500 Вт, эффективность ~ 6 мА/Вт) и LaB_6 -катоды (1650 °С, 120 Вт, ~ 25 мА/Вт), последние из которых в настоящее время являются основными элементами электронных пушек. В традиционных вакуумных приборах СВЧ применяются низкотемпературные оксидные катоды (900–1000 °С), а также W-Ba-катоды (~ 1100 °С), в то же время в мощных системах также используются LaB_6 -катоды [11].

Для пучково-плазменного усилителя с повышенной мощностью СВЧ-излучения разработана ЭОС с электронным пучком мощностью 300 кВт (30 кВ, 10 А). Увеличение тока пучка до 10 А вызвало необходимость выбора LaB_6 -катода диаметром 1,5 см, при этом оставались жесткие ограничения по геометрии транспортируемого на длину ~ 50 см электронного пучка диаметром 0,8–0,9 см при минимальных пульсациях границы. Оптимизация решения выполнена по программе параксиального синтеза с учетом компенсирующего ионного фона и магнитного поля соленоида, модифицированного на начальном участке распространения пучка при помощи магнитного экрана. Определение формы и расположение экрана относительно соленоида и катода электронной пушки проводились по программе SPLAV, а влияние технологичной формы электродов на геометрию потока – по программе траекторного анализа ЭРА. Схема ЭОС пушки с указанием основных конструктивных размеров и взаимного расположения элементов ЭОС и магнитной системы приведены в работе [8].

Продвижение разработок ППП СВЧ в область более высоких частот потребовало, помимо решения проблемы генерации в гибридной электродинамической системе более плотной плазмы, разработки ЭОС, формирующей интенсивный электронный пучок в пролетном канале диаметром $\sim 0,5$ см с необходимой компрессией его в переходной области.

Рис. 2 иллюстрирует различные схемы построения ЭОС пушек и других элементов пучково-плазменных приборов СВЧ, начиная от уже реализованных (I, II), разрабатываемых в настоящее время (III), а также перспективных моделей (IV, V). Волнистыми стрелками на рис. 2 условно показаны ввод и вывод электромагнитных колебаний. В схемах I и II применяются плоские LaB_6 -катоды, формирующие аксиально-симметричные электронные пучки, транспортируемые в плазменном канале гибридных электродинамических структур при давлении рабочего газа (водород) $\sim 7 \cdot 10^{-4} \div 1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. В схемах I – III применена ставшая уже “классической” система газодинамики отпаянного прибора, включающая в себя управляемые водородные генераторы и систему откачки (сорбционный и магнитозарядный насосы). Схема III предлагает варианты ионно-защищенной оптики с кольцевым катодом либо оптики с однослойной кольцевой многопучковой структурой, теоретические аспекты которых обсуждаются ниже. В данной схеме возможно применение экономичных низкотемпературных оксидных катодов и W-Ba-катодов с большим сроком службы. Кроме того, в случае многопучковой системы возможно продолжение работы прибора даже при выходе их строя одного или нескольких “микрокатодов”.

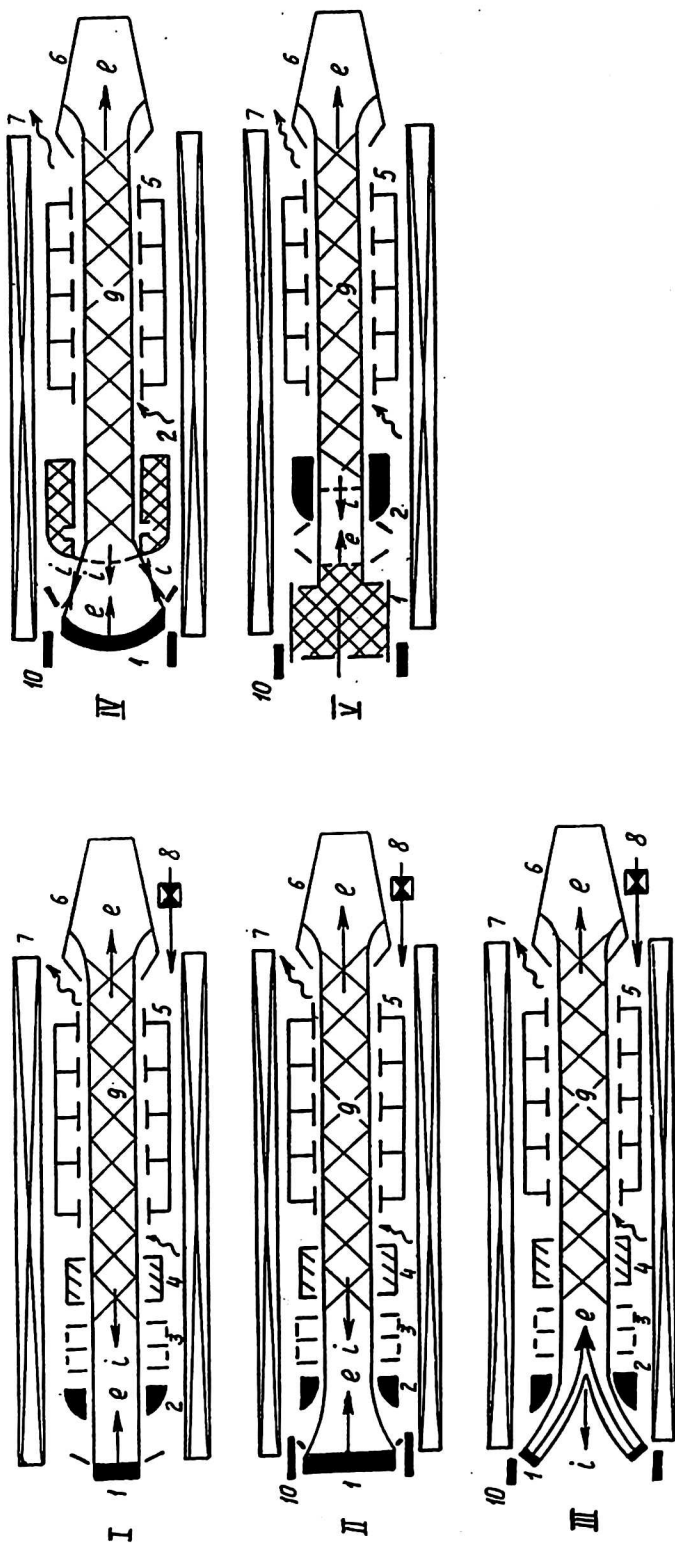


Рис. 2. Схемы различных ЭОС пушек лучково-плазменных СВЧ:

- I – ЭОС с термокатодом с диаметром пролетного канала; II – ЭОС с компрессионной электронной пушкой;
 III – ЭОС со сплошным либо многоструйным ионно-защитным кольцевым катодом; IV – биполярная ЭОС с плазменным анодом (2 – анод – кольцевой автономный газоразрядный источник анодной плазмы); V – ЭОС с плазменным катодом (1 – катод – газоразрядный источник катодной плазмы, работающий при давлении рабочего газа в приборе);
 3 – магнитоэрозийный насос с электродами, образующими ионную ловушку;
 4 – сорбционный титановый насос; 5 – электродинамическая замедляющая система (ЦСР);
 6 – коллектор; 7 – соленоид; 8 – водородный генератор; 9 – “плазменный” пучок; 10 – магнитный экран

Следует отметить, что введение устройства регистрации ионного тока, величина которого непосредственно связана с параметрами пучковой плазмы в гибридной структуре, определяющими выходные СВЧ-характеристики, может быть использовано в системе управления и стабилизации плазменного режима работы прибора.

Перспективные схемы IV и V могут, на первый взгляд, показаться "экзотическими", но предлагаемые решения электронных пушек уже прошли теоретическую и экспериментальную проработки на моделях. В монографии [1] подробно анализируются биполярные электронно-оптические системы пушек с термокатодом и плазменным анодом (см. схему IV). Экспериментальные исследования показали возможность практической реализации высокопереванских ЭОС пушек квазистационарного и стационарного режимов. Биполярные ЭОС, "настроенные" с помощью автономно управляемых источников плазмы, могут найти применение для устройств плазменной электроники с вводом пучка в плазменный канал гибридных электродинамических замедляющих структур. В подобных устройствах плазменный анод (автономный газоразрядный источник анодной плазмы) является согласующим элементом между областью интенсивного пучково-плазменного взаимодействия и областью ЭОС пушки [1, 8]. Применение высокопереванских биполярных ЭОС в ЛБВ повысит их эффективность за счет увеличения параметра Пирса.

Создание анодно-плазменных биполярных ЭОС с термокатодом, нагреваемым равномерно распределенным по поверхности катода ионным потоком, может привести к значительному упрощению конструкции катодных узлов пушек, а также высоковольтных источников питания. В работе [1] приведены результаты испытания пушки (выполненной по схеме, подобной схеме IV) с анодно-плазменной ЭОС и катодом, нагреваемым ионами. При подаче высокого напряжения на сферический LaB_6 -катод диаметром 1,8 см и достижении необходимой мощности ионного пучка, регулируемой разрядным током кольцевого плазменного источника, находящегося под потенциалом земли, катод разогревается до температуры, достаточной для термоэмиссии. Испытания пушки проводились при напряжении до 25 кВ. Реализация предлагаемой модели (см. схему IV), конечно, потребует теоретического анализа биполярной ЭОС с введением электронного пучка в плазменный канал в магнитном поле.

В то же время, привлекательной является идея создания модели «истинно плазменного» ППП СВЧ, которая включает плазменный катод и биполярную электронно-оптическую систему с плазменным анодом [1, 8, 12] (см. схему V). В такой модели генерация плазмы в газоразрядном источнике плазменного катода и в области гибридной плазменной электродинамической системы (область пучково-плазменного разряда), формирующей также плазменный анод, может происходить при одинаковом давлении рабочего газа во всей системе ($\sim 7 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.). Попытка разработки плазменного катода с "безрасходным" газоразрядным источником с холодными электродами для ППП предпринята в [12]. В этой работе представлены результаты исследований, направленных на реализацию в системе типа "обращенный магнетрон" сильноточной низковольтной формы тлеющего разряда при давлении $\sim 10^{-3}$ мм рт. ст. и разработку электронного инжектора с плазменным катодом, обеспечивающего получение электронного пучка миллисекундной длительности с сечением ~ 1 см², током до 3 А при энергии частиц 20 кэВ. Выбор способа генерации плазмы был обусловлен высокой эффективностью иони-

зации газа в скрещенных электрическом и магнитном полях, простотой инициирования такого разряда, а также возможностью использования магнитного поля соленоида ППП. Магнетронная ячейка образуется цилиндрическим катодом и стержневым вольфрамовым анодом (см. схему V). В результате проведенных исследований были определены условия зажигания и стабильного горения импульсного и непрерывного тлеющего разряда в системе "обращенный магнетрон" без прокачки газа при низких давлениях и токах разряда до 10 А и выявлены факторы, способствующие повышению эффективности извлечения электронов. Показана возможность создания электронного инжектора с плазменным катодом, формирующим электронный пучок с требуемыми параметрами. В работе [13] также приведены результаты исследований в данном направлении.

Данная модель ППП СВЧ (см. схему V) может обладать несомненными преимуществами перед уже реализованными приборами. К ним относятся постоянное газовое наполнение (например, инертным газом) отпаянного прибора, соответствующее рабочему давлению, при отсутствии систем подачи газа и систем дифференциальной откачки, имеющих ограниченный ресурс работы; наличие плазменного катода, не критичного к ионной бомбардировке, вместо термоэмиссионного катода; возможность частотно-импульсной модуляции тока электронного пучка и выходной мощности электромагнитного излучения за счет управления газоразрядным источником плазменного катода [1, 8].

Следует отметить, что применение мощных ЛБВ как наиболее широкополосных СВЧ-приборов в системах связи и телекоммуникаций вызывает появление целого ряда специфических требований. Одним из основных требований является низкий уровень собственных шумов. Особый интерес вызывает исследование этих характеристик в новом классе приборов — ППП СВЧ, обладающих уникальной совокупностью рабочих параметров. Предварительные результаты исследования шумовых характеристик ППП СВЧ показали, что перевод ЛБВ в плазменный режим не приводит к повышению уровня шумовых и побочных колебаний [14].

Известно, что не просто оптимальным, но и единственным способом расчета ЭОС с качественно новыми свойствами (уровень параметров, существенно трехмерные многопучковые системы и т. д.) является последовательное применение синтеза и анализа. Синтез ЭОС обеспечивает ее оптимизацию за счет варьирования таких удобных управляющих функций, как форма оси пучка, распределение потенциала и магнитного поля на оси. На этапе анализа выбирается близкий к идеальному вариант с технологичными электродами. Придание им технологичных очертаний может опираться на опыт и интуицию исследователя, но может быть и алгоритмизировано [15].

В практике расчета ЭОС указанная схема реализована для осесимметричных (плоских) течений с использованием параксиальной синтеза и программ траекторного анализа. Как правило, используется параксиальная теория первого приближения [16]. Теория второго приближения в варианте В. Т. Овчарова не получила широкого распространения. В работе [17], посвященной применению этой модели при расчете систем с торможением, не приводятся данные, позволяющие судить о вкладе второго приближения и поперечных градиентах, которые можно учесть с его помощью. Последний вопрос — весьма существенный для симптотической теории, где последующий член асимптотического ряда часто не уточняет, а ухудшает решение.

В то время как отмеченные в [18–19] методические недостатки программ траекторного анализа до сих пор не устранены, а способы их устранения не

реализованы, в теории синтеза непараксиальных осесимметричных течений достигнут значительный прогресс, основанный на геометризованных уравнениях пучка. В заранее неизвестной системе координат x^1, x^2 , связанной с геометрией потока ($x^2 = \text{const}$ — трубки тока), эти уравнения удается представить в виде соотношения на трубке тока, содержащего только продольные производные, и эволюционной системы уравнений первого порядка с производными от параметров потока по поперечной координате в левой части [20].

Теория параксиальных и узких трубчатых пучков в геометризованной постановке при рассмотрении высших приближений дает решение не в виде асимптотического ряда по малому геометрическому параметру ε , а в форме отрезка ряда Тейлора по поперечной координате. Ряд по ε получается путем отбрасывания в уравнениях пучка членов, величина которых превышает принятую точность рассмотрения, в то время как ряд Тейлора является результатом действий с точными уравнениями пучка. Тот факт, что геометризованные модели используют систему координат, связанную с действительными характеристиками $x^2 = \text{const}$ исходной системы уравнений в частных производных [21], приводит, при прочих равных условиях, к повышению точности этих моделей по сравнению с традиционными вариантами [22]. Последние, кроме того, не позволяют исследовать случай произвольной ориентации магнитного поля на катоде, доступный для изучения в рамках формализма геометризованной теории при использовании неортогональной системы x^1, x^2 [20].

Синтез трубчатых непараксиальных потоков возможен в двух вариантах.

В первом варианте приближенное интегрирование геометризованных уравнений пучка осуществляется с помощью метода полос [23], в котором информация с базовой трубки тока $x^2 = 0$ с помощью уравнений эволюционной системы переносится на внешнюю границу первой полосы $x^2 = y_1$. Далее может быть выполнен новый шаг в поперечном направлении, которому предшествует интегрирование соотношения на трубке тока $x^2 = y_1$. С формальной точки зрения алгоритм сводится к решению обыкновенного дифференциального уравнения с обновляемой правой частью, которое выполняется столько раз, сколько полос включает модель. Оценки показывают, что для описания пучка с относительной шириной 0,6 и существенными поперечными градиентами оказывается двухполосное приближение.

Второй вариант синтеза непараксиальных трубчатых пучков основан на использовании высших приближений, формально описывающих узкие потоки. Однако результаты тестирования на примере известного точного решения, описывающего поток со спиральными траекториями со спирального катода, позволяют надеяться на возможность рассмотрения в рамках третьего приближения пучков с относительной шириной 0,6, перепадом плотности тока по сечению 3,3 и компрессией порядка 70 при ошибке менее 1 %.

В работе [24] построено высшее приближение для параксиального пучка при произвольной ориентации внешнего магнитного поля на катоде в рамках геометризованной теории. Оно же служит для описания ядра сплошного непараксиального пучка, на которое по методу узких полос наращиваются периферические слои [25].

Идеи синтеза на основе геометризованной теории достаточно подробно изложены в обзорной работе [26].

Обсуждавшиеся выше алгоритмы служат основой современных расчетных моделей по синтезу непараксиальных сплошных и трубчатых осесимметричных потоков. Они могут быть использованы также для описания макропотока при расчете многопучковых систем с взаимодействующими микропучками [27, 28].

В основе модели лежит идея [29] об эффективном сплошном (многослойные системы) или трубчатом (однослойные системы) потоке, интегральные характеристики которого эквивалентны характеристикам совокупности микропучков. Микропучок описывается традиционной трехмерной параксиальной теорией и распространяется в поле микропотока, подвергаясь одновременно действию собственного пространственного заряда.

В случае произвольной ориентации внешнего магнитного поля осью микропучка является пространственная спираль, навитая на базовую поверхность вращения (трубку тока макропучка); первоначально круглый микропучок становится эллиптическим под действием электрических и магнитных квадрупольей, меняет полуоси сечения и проворачивается относительно пространственной спирали, распространяясь вдоль нее [30].

Заметим, что используя параксиальную теорию, здесь решается задача об эволюции пучка в заданных внешних полях, традиционно относимая к компетенции программ траекторного анализа.

Несмотря на существенно трехмерную картину описанного выше потока, аппаратом теории являются обыкновенные дифференциальные уравнения. Модель позволяет рассчитать тонкую структуру потока с гарантированной точностью, присущей параксиальному приближению.

Обзор развития теории многопучковых систем приведен в работе [31].

Геометризованная теория в варианте второго приближения [24] или с использованием метода узких полос [25] может быть применена при расчете ЭОС по схеме II, где реальный пучок не является параксиальным, но рассчитывается по традиционной параксиальной теории, возможно, на границе ее применимости. Алгоритмы, основанные на синтезе непараксиальных кольцевых потоков (реальный или эффективный пучок в случае многопучковых структур, в том числе и неоднослойных), позволяют рассчитывать ЭОС по схеме III с использованием традиционной параксиальной теории [29] (эффективный макропоток, бескатодный вариант) или геометризованного формализма [24, 25].

Задача расчета ЭОС по схемам IV, V является существенно более сложной, чем ее чисто электронный аналог. Для биполярных потоков известны только простейшие одномерные решения [32], а наиболее сложную однокомпонентную среду можно эффективно описывать лишь с помощью численных методов [33].

Программы анализа, как уже отмечалось, мало приспособлены для решения проблем оптимизации в смысле некоторого сформулированного критерия и позволяют лишь проводить перебор вариантов — подход громоздкий и малоэффективный, но вместе с тем единственный, если говорить о самосогласованном решении. В дополнение к сказанному необходимо добавить, что в случае плазменного катода модель прикатодной области должна основываться на теории антипараксиальных разложений. В отличие от твердого эмиттера, здесь задача сводится к расчету формы стартовой поверхности при заданном значении плотности тока эмиссии $J = \text{const}$, определяемом концентрацией плазмы.

Для исследования ЭОС по схемам IV, V целесообразно, наряду с программами траекторного анализа, использовать простую феноменологическую модель параксиального (с учетом возможной неламинарности) пучка, распространяющегося на неподвижном неоднородном ионном фоне [34]. Решение исходной задачи не является самосогласованным, а степень отличия определяется моделью ионного фона, в которую мы можем вложить все имеющиеся у нас теоретические представления и экспериментальные данные относи-

тельно изучаемого явления. Например, в ускоряющем промежутке схемы IV распределение ионов можно было бы определить соответствующим одномерным решением, в которое введены свободные параметры, позволяющие деформировать это решение за счет поперечных и продольных градиентов.

Достоинствами подхода [34] являются простой математический аппарат (обыкновенные дифференциальные уравнения), удобные управляющие функции (распределения на оси пучка) и возможность за счет свободных параметров покрывать всю область изменения концентрации ионов, которая может встретиться на практике. В результате вопрос о токопрохождении может быть решен исключительно в рамках этой модели.

Введение неоднородного ионного фона в аппарат геометризованной теории позволяет не ограничивать рассмотрение параксиальными потоками.

Выводы

Разработаны нерелятивистские черенковские пучково-плазменные усилители СВЧ (плазменные ЛБВ) на основе гибридных замедляющих структур типа ЦСР с заполненным плазмой пролетным каналом. В работе анализируются различные схемы построения ЭОС пушки с введением интенсивных электронных пучков в газоплазменную среду, начиная от уже реализованных, разрабатываемых в настоящее время, а также перспективных моделей. Специфика работы приборов данного класса требует нетрадиционных подходов в решении целого ряда физико-технических задач.

Для расчета ЭОС перспективных ППП сформулирована теория, позволяющая описывать непараксиальные сплошные и трубчатые осесимметричные потоки при произвольной ориентации внешнего магнитного поля, не поддающиеся изучению в рамках традиционного параксиального синтеза, а также метод расчета взаимодействующих многопучковых структур.

Конечный математический аппарат сводится к интегрированию обыкновенных дифференциальных уравнений. Упомянутые ЭОС могут включать как катоды, нечувствительные к ионной бомбардировке (сплошные пучки), так и ионно-защищенные оксидные катоды (кольцевые и многопучковые структуры).

Для биполярных течений рассмотрены простые одномерные модели и построена феноменологическая теория квази-аксиально-симметричных потоков, учитывающая неподвижный неоднородный ионный фон и возможную неламинарность течения.

Литература

1. Завьялов М. А., Крейнделъ Ю. Е., Новиков А. А., Шантурин Л. П. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Пучково-плазменные процессы в электронно-лучевой аппаратуре промышленного применения // Сб. науч. тр. ВЭИ/Под ред. В. И. Переводчикова. — М.: ВЭИ, 1994.
3. Бацких Г. И., Гуреев К. Г., Завьялов М. А. и др. // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38. № 9. С. 1681.
4. Perevodchikov V. I., Zavjalov M. A., Mitin L. A. et al. // 9 BEAMS. Washington. 1992. V. 2. P. 1318; 10 BEAMS. San Diego, 1994; 11 BEAMS. Prague, 1966. V. 1. P. 229, 430; 12 BEAMS. Haifa, 1998. P. 323.
5. Zavjalov M. A., Mitin L. A., Perevodchikov V. I. et al. // IEEE Transactions on Plasma Science. 1994. V. 22. № 5. P. 600.
6. Митин Л. А., Переводчиков В. И., Завьялов М. А. и др. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 7, 8. С. 733.
7. Nusinovich G., Carmel Y., Antonsen T. et al. // IEEE Transactions on Plasma Science. 1998. V. 26. № 3. P. 628.
8. Завьялов М. А., Неганова Л. А., Сыровой В. А. // Прикладная физика. 1998. Вып. 3–4. С. 65–94.
9. Zavjalov M. A. // SHEF'99. Dubna. JINR. P. 59–65.
10. Мартынов В. Ф., Завьялов М. А., Переводчиков В. И. и др.: Пат. РФ 2084985, 2084986, 1447256, 1400467, 1572328.

11. Ашкенazi Л. А. Катоды для электровакуумных приборов СВЧ//Итоги науки и техники. Сер. Электроника. Т. 17. — М., ВИНТИ. 1985. С. 311.
12. Гаарилов Н. В., Завьялов М. А., Никулин С. П., Понаморов А. В.//Письма в ЖТФ. 1993. Т. 21. С. 57.
13. Антипов В. С., Карпунин В. И., Корнилов Е. А.//Восьмая межд. Крымская конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", 1998. — Севастополь. Т. 2. С. 747.
14. Боровиков П. В., Завьялов М. А., Переводчиков В. И. и др.//Там же, 1998. — Севастополь. Т. 2. С. 725.
15. Овчаров В. Т., Невский П. В., Соколов А. И. //Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1978. № 8. С. 54.
16. Невский П. В.//Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ. 1989. № 15 (1483). — М.: ЦНИИ "Электроника".
17. Акимов П. И., Верстакова Е. А., Данилов В. А., Цхай А. Б. //Импульсные электро-механические и полупроводниковые преобразователи энергии: Межвуз. тематич. сб. науч. тр. — Тольятти. Политехнический институт. 1978. С. 135.
18. Акимов П. И., Осипова Г. П., Сыровой В. А.//Журн. вычисл. матем. и матем. физики. 1989. Т. 29. № 3. С. 405.
19. Свешников В. М., Сыровой В. А.//Там же. 1990. Т. 30. № 11. С. 1675.
20. Сыровой В. А.//Радиотехника и электроника. 1996. Т. 41. № 10. С. 1255.
21. Сыровой В. А.//Там же. 1998. Т. 43. № 2. С. 232.
22. Ваишковский А. В., Неганова Л. А., Сыровой В. А.//Прикладная физика. 1998. № 3-4. С. 33.
23. Сыровой В. А.//Радиотехника и электроника. 1997. Т. 42. № 2. С. 220.
24. Сыровой В. А.//Радиотехника и электроника. 1998. Т. 43. № 3. С. 336.
25. Сыровой В. А.//Там же. 1997. Т. 42. № 12. С. 1501.
26. Сыровой В. А.//Прикладная физика. 1997. № 2-3. С. 52.
27. Плохов В. А., Сыровой В. А.//Радиотехника и электроника. 1990. Т. 35. № 12. С. 2582.
28. Неганова Л. А., Плохов В. В., Сыровой В. А.//Там же. 1997. Т. 42. № 4. С. 479.
29. Данилов В. Н., Дроздов С. С.//Там же Т. 22. № 8. С. 1706.
30. Сыровой В. А.// Там же. Т. 42. № 6. С. 741.
31. Сыровой В. А.//Прикладная физика. 1997. № 2-3. С. 69.
32. Ваишковский А. В., Завьялов М. А., Сыровой В. А.//Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44. № 4. С. 485.
33. Дзагуров Л. Ю., Коваленко Ю. А.//Там же. 1987. Т. 32. № 4. С. 847.
34. Неганова Л. А., Сыровой В. А.//Там же. 1992. Т. 37. № 12. С. 2275.

Problems of electron-optical systems for perspective beam-plasma microwave devices

M. A. Zavjalov, V. I. Perevodchikov, V. A. Syrovoy
All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

Problems connected with design of high-power beam-plasma microwave devices are discussed. Special attention is given optical systems of intense electron beams for these new type microwave tubes.