

ФГБОУ ВО «САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»
АО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «АЛМАЗ»

На правах рукописи



НАВРОЦКИЙ Игорь Александрович

ФОРМИРОВАНИЕ ЛЕНТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ
С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ТОКА
ДЛЯ ПРИБОРОВ ВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
СУБТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА

1.3.5. – Физическая электроника

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
профессор Н.М. Рыскин

Саратов – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
ГЛАВА 1. Транспортировка протяженного ленточного электронного пучка со сложной структурой в однородном магнитном поле	14
1.1. Краткий анализ состояния исследований в области вакуумных приборов О-типа ТГц-диапазона	14
1.1.1. Проблематика разработки и применения	14
1.1.2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований	16
1.1.3. Постановка задачи исследования	26
1.2. Синтезирование пушки с ленточным ЭП для ЛБВ диапазона 0.2 ТГц.....	27
1.2.1. Описание методики синтеза.....	27
1.2.2. Сопоставление синтеза с 3-D моделированием	34
1.2.3. Аппроксимация криволинейной геометрии электродов пушки	36
1.3. Анализ транспортировки ленточного пучка в однородном магнитном поле	38
1.3.1. Предварительные замечания.....	38
1.3.2. Магнитная система с однородным полем.....	39
1.3.3. Моделирование формирования и транспортировки ленточного пучка	41
1.3.4. Влияние асимметрии и несоосности на транспортировку ЭП.....	49
1.4. Выводы.....	54
ГЛАВА 2. Транспортировка протяженного ленточного электронного пучка со сложной структурой в реверсном магнитном поле	56
2.1. ЭОС с реверсным магнитным полем	56
2.1.1. Вводные замечания	56
2.1.2. Методика ввода реверсного поля	57
2.1.3. Магнитная система с реверсным полем.....	58
2.2. Результаты моделирования транспортировки ленточного пучка с	

компрессией в реверсном поле	60
2.3. Выводы	66
ГЛАВА 3. Транспортировка многолучевых эллиптических электронных пучков	68
3.1. Вводные замечания	68
3.2. Эквипотенциальные контуры одно- и многолучевых ЭП	69
3.3. ЭОС с компрессией трёхлучевого эллиптического пучка	73
3.4. Увеличение компрессии в ЭОС с многолучевым эллиптическим пучком	82
3.4. Выводы	93
ГЛАВА 4. Результаты экспериментальных исследований ЭОС	95
4.1. Пушки с однолучевым ленточным пучком	95
4.1.1. Пушка с прямоточным пучком, погруженная в однородное магнитное поле	95
4.1.2. Пушка с компрессией ленточного пучка	97
4.2. Пушка с многолучевым пучком	105
4.2.1. Технологическая реализация многолучевой пушки	105
4.2.2. Результаты эксперимента	109
4.3. Изготовление замедляющих систем субтерагерцевого диапазона	112
4.3.1. ЗС типа одиночной и сдвоенной гребенки	112
4.3.2. Многоэтажный меандр	113
4.4. Выводы	117
Заключение	119
Благодарности	122
Список сокращений	123
Список использованных источников	124

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Одной из важнейших задач современной вакуумной СВЧ электроники является создание миниатюрных усилителей и генераторов, функционирующих в коротковолновой части миллиметрового и в субмиллиметровом (терагерцевом) диапазонах [1-7]. Ожидается, что подобные приборы станут основой нового поколения радиоэлектронной аппаратуры. Создание приборов миллиметрового и ТГц диапазона основано на современных технологических процессах (микрофрезерование, глубокая ультрафиолетовая литография, глубокое ионное травление и др. [6]) и на использовании современных пакетов 3D моделирования, позволяющих повысить точность расчетов и оптимизировать конструкцию устройства. Компьютерное моделирование ЭОС, электродинамических структур, анализ процессов электронно-волнового взаимодействия позволяют создавать СВЧ приборы с требуемыми выходными характеристиками.

Среди различных ЭВП СВЧ для ряда приложений, прежде всего, для нового поколения информационно-телекоммуникационных систем, наибольший интерес представляют широкополосные усилители типа ЛБВ. Известно, что при переходе в ТГц диапазон для сохранения выходной мощности ЛБВ-усилителя необходимо уменьшать размеры электродинамических узлов пропорционально длине волны и одновременно увеличивать ускоряющее напряжение для поддержания синхронизма пучка с волной. При этом плотность тока в ЭП должна увеличиваться пропорционально квадрату частоты [1, 2]. Поэтому большое внимание привлекли ЭОС с пространственно-развитыми электронными пучками, в частности, ленточными и многолучевыми.

В связи с этим, в настоящее время особенно актуальна задача по разработке ЭОС для приборов ТГц диапазона. ЭОС включает в себя электронную пушку, пролетный канал, коллектор, магнитно-фокусирующую систему. Существенный вклад в развитие физических принципов разработки вакуумных СВЧ приборов и теории формирования пучков внесли, в частности, такие отечественные ученые, как Акимов П.И., Алямовский И.В., Гамаюнов

Ю.Г., Гершензон Е.М., Григорьев Ю.А., Мещанов В.П., Морев С.П., Мясин Е.А., Овчаров В.Т., Олейников В.И., Пензяков В.В., Соминский Г.Г., Сыровой В.А., Трубецков Д.И. и другие.

Создание новых миниатюрных ЭОС с плотностью тока 100 А/см^2 и более для приборов ТГц диапазона требует решения целого ряда взаимосвязанных научно-технических задач, в том числе, исследование формирования траекторий электронных пучков в ЭОС и создание перспективных магнитно-фокусирующих систем с повышенной однородностью магнитного поля. Решением подобных задач занимаются многие зарубежные корпорации и научные учреждения, например, University of California Davis (США), US Naval Research Laboratory (США), Northrop Grumman (США), CPI (США, Канада), L-3 Communications (США), Beijing Vacuum Electronics Research Institute (Пекин, Китай), University of Electronics Science and Technology (Chengdu, Китай), Thales Electron Devices (Франция), Paul Scherrer Institut (Швейцария) и др. В нашей стране разработки подобного рода проводит, в частности АО «НПП «Исток», где созданы лампы обратной волны (ЛОВ), перекрывающие значительную часть ТГц диапазона [8, 9]. Однако стоит отметить, что коммерчески реализуемые ЛБВ О-типа в ТГц диапазоне до сих пор отсутствуют.

По сравнению с классическими СВЧ приборами, в миниатюрных суб-ТГц и ТГц усилителях напряжения анода и ЗС могут достигать 15–20 кВ, а ток пучка составляет порядка 10-100 мА, т.е. такой пучок является низкоперевансным. Плотность тока в канале таких приборов обычно принимает чрезвычайно высокие значения порядка сотен А/см^2 . Поэтому для повышения стабильности и долговечности прибора целесообразно снижать плотности тока эмиссии с поверхности катода, чего можно достичь при помощи компрессии пучка. Однако пушки с компрессией формируют потоки со значительным разбросом электронов по скоростям, что создает проблемы с фокусировкой пучка в микроразмерном канале. Кроме того, существенную роль играют абберрации, возникающие в пушке из-за сложной структуры фокусирующих полей, а также из-за собственного пространственного заряда пучка. Известно, что интенсивные

пространственно-развитые электронные пучки (например, ленточные и трубчатые), подвержены диокотронной неустойчивости, обусловленной дрейфом электронов в скрещенных полях — собственном поперечном электрическом поле пространственного заряда и внешнем продольном магнитном фокусирующем поле [10-12]. Диокотронная неустойчивость вызывает деформацию пучка и его осаждение на стенки канала. Следовательно, задача по исследованию ЭОС, в которой будет обеспечиваться формирование пространственно-развитого ЭП и его устойчивая транспортировка на расстояния, необходимые для получения требуемой выходной мощности и усиления, является актуальной.

Целью работы является разработка систем формирования низкоперевансных пространственно-развитых ленточных электронных пучков для приборов вакуумной электроники О-типа диапазона 0.1–0.2 ТГц.

Для достижения поставленных целей в работе были решены следующие **основные задачи**:

1. Разработка, моделирование и экспериментальное исследование характеристик электронной пушки, формирующей сходящийся ленточный ЭП с током 0.1, первансом менее $0.1 \times 10^{-6} \text{ A/V}^{3/2}$ и толщиной 100 мкм.
2. Анализ транспортировки ленточного ЭП при фокусировке однородным магнитным полем, включая исследование токопрохождения при различных нарушениях оптической симметрии и сдвигах.
3. Анализ транспортировки ленточного ЭП при фокусировке реверсным магнитным полем, сопоставление с результатами исследования при фокусировке однородным магнитным полем.
4. Разработка, моделирование и экспериментальное исследование электронной пушки с компрессией многолучевого ленточного пучка с первансом менее $0.1 \times 10^{-6} \text{ A/V}^{3/2}$.

Научная новизна работы. Все результаты, включенные в диссертацию, являются новыми, в частности:

1. Разработана новая конструкция электронной пушки с первеансом менее $0.1 \times 10^{-6} \text{ A/V}^{3/2}$ и компрессией ленточного ЭП ~ 16 единиц по площади и Пушка содержит фокусирующий электрод, представляющий собой четыре лепестка и катод с размерами $0.8 \text{ мм} \times 0.8 \text{ мм}$.
2. При помощи пакета CST Studio исследован процесс транспортировки низкопервеансного ленточного ЭП с компрессией в однородном магнитном поле в канале микроразмерной ЗС. Исследована сложная структура пучка в виде ядра и диффузной переходной области (гало), которая частично осаждается на стенки канала. Плотность частиц в этой области мала, вследствие чего на всей протяженности системы сохраняется высокое токопрохождение.
3. Разработана ЭОС с компрессией интенсивного ленточного пучка магнитной фокусирующей системой с реверсным полем. Показано, что введение реверсного магнитного поля позволяет уменьшить влияние диокотронной неустойчивости.
4. Предложена новая конструкция электронной пушки, формирующая пучок, состоящий из трех парциальных лучей эллиптического сечения. Пушка содержит три планарных эллиптических катодных выступа, закрытых с торцов теневой сеткой, и диафрагму с тремя эллиптическими отверстиями, которые обеспечивают компрессию до 16 единиц по площади.
5. Предложена оригинальная методика, позволяющая создавать многолучевую электронную микропушку с эллиптическими катодами, расположенными в ряд. Методика позволяет повысить точность формирования отверстий в ее электродах. Пушка, созданная при помощи данной методики защищена патентом РФ № 179616.
6. Изготовлена и экспериментально исследована электронная пушка с катодом размером $0.1 \times 0.7 \text{ мм}^2$ и плотностью токоотбора более 100 A/cm^2 ,

формирующая прямоточный ленточный электронный пучок с током до 80 мА.

7. Изготовлена и экспериментально исследована электронная пушка с фокусирующим электродом сложной формы, формирующая с ленточный ЭП с током до 135 мА. При помощи диафрагмы-анализатора проведены измерения распределения плотности тока в пучке, подтверждающие высокую компрессию пучка в вертикальном направлении.
8. Изготовлены макеты замедляющих систем миллиметрового диапазона типа «сдвоенная гребенка» и многоэтажной меандровой структуры.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная электронно-оптическая система обеспечивает формирование ленточного электронного пучка с первеансом менее 0.1×10^{-6} А/В^{3/2}, характерной толщиной менее 0.1 мм, компрессией до 16 единиц и током свыше 100 мА при средней плотности тока на катоде 15.6 А/см², а в области кроссовера — более 200 А/см².

2. Ленточный электронный пучок, формируемый в разработанной электронно-оптической системе с высокой компрессией, имеет сложную структуру, которая включает высокоплотную центральную часть (ядро) и краевую низкоплотную диффузную область (гало), при этом оседание частиц низкоплотной диффузной области на стенки канала в процессе транспортировки пучка составляет не более 1%.

3. Разработанная электронная пушка, содержащая планарный катод в виде трех выступов эллиптической формы, теневую сетку и планарную фокусирующую диафрагму с тремя эллиптическими отверстиями, формирует трёхлучевой электронный пучок с первеансом $0.3 \div 0.6 \times 10^{-7}$ А/В^{3/2}, толщиной менее 0.1 мм с компрессией до 16 единиц по площади.

4. Многолучевой электронный пучок с эллиптической формой лучей, создаваемый пушкой с высокой компрессией, при транспортировке в однородном магнитном поле 1.345 Тл распространяется в канале высотой 0.1 мм на расстояние не менее 25 мм без существенных деформаций и токооседания.

Методология и методы исследования. Синтез ЭОС с ленточным пучком проводился с использованием двумерной методики, развитой в работах [13-20]. Трехмерное численное моделирование ЭОС проводилось с помощью пакетов Lorentz-3EM [21] и 3-D CST Particle Studio Simulator [22], основанных на методе конечных элементов. Эти пакеты при решении задачи траекторного анализа используют самосогласованный итерационный метод расчета трехмерного распределения электростатического поля пространственного заряда по уравнению Пуассона.

Для изготовления электродов электронных пушек и макета ЭОС использовались токарно-фрезерный и электроискровой способы. Для визуального контроля допусков собранных макетов электронных пушек и качества катодных поверхностей использовались методы оптической и электронной микроскопии.

Экспериментальное исследование макетов электронных пушек и макета ЭОС проводилось в вакуумной установке исследования электронных пучков. Для исследования структуры плотности тока ЭП применялся метод диафрагмы-анализатора с малым отверстием.

Достоверность полученных результатов подтверждается их соответствием фундаментальным принципам и закономерностям физической электроники. Моделирование электронно-оптических систем проводилось с помощью хорошо апробированных программных пакетов CST Particle Studio Simulator и Lorentz-3EM. Результаты моделирования ЭОС, полученные с помощью различных программных комплексов, хорошо согласуются друг с другом. Экспериментальные результаты удовлетворительно согласуются с данными численного моделирования. Экспериментальные исследования электронных пушек и макетов ЭОС проводилось при помощи апробированных методов исследования и аттестованной аппаратуры.

Научно-практическая значимость работы. Результаты диссертации предназначены для использования при создании компактных широкополосных ЛБВ-усилителей диапазона 0.1-0.2 ТГц с выходной мощностью 10-100 Вт.

Результаты моделирования и экспериментального исследования электронно-оптических систем ЛБВ использованы на ОАО «НПП «Алмаз» (г. Саратов) в процессе выполнения опытно-конструкторской работы «Пагода-Постулат», что позволило изготовить и испытать образцы электронных пушек, а также повысить плотность тока в пролетном канале создаваемого прототипа прибора и увеличить токопрохождение.

Результаты работы использовались при проведении НИР, поддержанных грантом Фонда содействия инновациям (УМНИК-2015, Договор № 6196 ГУ/2015), грантом РФФИ № 17-12-01160, грантами РФФИ № 20-57-12001, № 19-58-45040, № 16-08-00450.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы доложены на следующих конференциях: научно-техническая конференция, посвященная 55-летию ОАО «НПП «Алмаз» «Электронные приборы и устройства СВЧ» (Саратов, 2012); Международные научно-технические конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП (Саратов, 2012-2020); 11 Всероссийская с международным участием научно-техническая конференция «Быстрозакаленные материалы и покрытия». (МАТИ, Москва, 2012); Юбилейная научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов, посвященная 70-летию ФГУП «НПП «Исток» (Фрязино, 2013); Всероссийская конференция молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратов, 2013); International Vacuum Electron Sources Conference IVESC (С.-Петербург, 2014); Научно-техническая конференция, посвященная 60-летию ОАО «НПП «Алмаз» (Саратов, 2017); Europe-China Workshop on Millimetre-Waves and Terahertz Technologies (UCMMT) 2017 Liverpool, UK, 11-13 September 2017; VIII Всероссийская конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019); 2021 22nd International Vacuum Electronics Conference (IVEC). 27-30 April 2021 (Virtual); 2021 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 29 Aug.-3 Sept. 2021. Chengdu, China (Virtual).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 36 работ, из них 6 статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых базах данных Web of Science и/или Scopus [99-104], 3 статьи в журналах, входящих в список изданий, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук [105-107], 21 работа в материалах международных конференций, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus [108-127], 6 работ в сборниках трудов всероссийских конференций [128-133] и 1 патент РФ [134].

Личный вклад соискателя. Все основные результаты в диссертационной работе получены автором лично: проведены численные эксперименты, разработаны и собраны исследуемые образцы электронных пушек и макет ЭОС, проведено их экспериментальное исследование. Постановка задач исследования, поиск пути их решения осуществлялась совместно с научным руководителем д.ф.-м.н., профессором Рыскиным Н.М., а также с д.ф.-м.н., профессором Григорьевым Ю.А. и к.т.н. Бурцевым А.А. Вклад других соавторов отмечается в соответствующих местах по тексту диссертации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из Введения, четырех глав и Заключения, содержит 140 страниц текста, включая иллюстрации и таблицы. Список литературы включает 134 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение характеризует актуальность темы диссертации, цели работы, положения, выносимые на защиту, научную новизну и практическую значимость работы, реализацию результатов и апробацию работы.

Глава 1 содержит результаты анализа современного состояния исследований электронных пушек и ЭОС для вакуумных приборов терагерцового диапазона. Выделены проблемы проектирования электронно-оптических систем. На основании проведенного анализа были выявлены достоинства и недостатки проектируемых моделей ЭОС и поставлены цели и

задачи диссертационной работы.

На основе методики синтеза разработана предварительная конструкция электронной пушки с компрессией ленточного ЭП для микроразмерного канала ЛБВ суб-ТГц диапазона. Сложная криволинейная геометрия фокусирующих электродов пушки оптимизируется в программном пакете 3-D CST Particle Studio, с помощью которого далее проводится анализ транспортировки ленточного ЭП с высокой компрессией.

Изучается сложная структура распределения частиц в поперечном сечении ленточного ЭП. Пучок состоит из высокоплотной центральной части (ядро) и краевой низкоплотной диффузной области с малым количеством частиц (гало). Обсуждаются вопросы транспортировки такого пучка с учетом различных нарушений симметрии ЭОС.

В **главе 2** рассматривается транспортировка многоскоростного ленточного ЭП в поле реверсной магнитной фокусирующей системы. Обсуждаются преимущества такой системы по сравнению с магнитной системой с однородным фокусирующим полем. Анализируется влияние однократного введения реверса магнитного поля на низкоплотное гало. Показано, что незначительное увеличение магнитного поля во второй секции позволяет устранить оседание частиц пучка на стенки канала.

Глава 3 посвящена вопросам создания ЭОС с многолучевым ленточным ЭП. Проводится сравнительный анализ эквипотенциальных контуров многолучевого и однолучевого ЭП. Показано, что ЭП, состоящий из трех лучей эллиптического сечения, испытывает значительно меньшие деформации и менее чувствителен к нарушениям симметрии, чем одиночный пучок прямоугольной или эллиптической формы с высокоаспектным соотношением сторон.

Предложены и исследованы ЭОС с компрессией трехлучевого эллиптического ЭП. Пушки состоят из трех эллиптических катодов, теневой сетки и управляющей сетки (диафрагмы). Представлены две конструкции пушки, в которых обеспечивается компрессия по площади 6.4 ед. и 16 ед. соответственно. Проведен анализ токопрохождения, который показал, что

достигается транспортировка трех эллиптических пучков на расстояние до 25 мм без существенного оседания. Изучается структура распределения плотности тока.

В главе 4 приведены результаты экспериментальных исследований. Описано создание однолучевых и многолучевых электронных пушек, конструкции которых изучались в главах 1 и 3. Предлагается методика, которая позволяет формировать с высокой точностью парциальные эллиптические катоды и идентичные им отверстия в электродах пушки и наконечниках ЭОС.

Представлены результаты создания миниатюрных замедляющих систем суб-ТГц диапазона на основе планарных одиночных и сдвоенных гребенок (200-220 ГГц). Также рассмотрен способ формирования многоэтажной меандровой структуры V-диапазона (50-70 ГГц).

В Заключении приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

ГЛАВА 1. ТРАНСПОРТИРОВКА ПРОТЯЖЕННОГО ЛЕНТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА СО СЛОЖНОЙ СТРУКТУРОЙ В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

1.1. Краткий анализ состояния исследований в области вакуумных приборов О-типа ТГц-диапазона

1.1.1. Проблематика разработки и применения

В настоящем разделе представлен краткий анализ исследований в рамках создания электронно-оптических систем для импульсных ТГц приборов, написанный на основе работ [1-4, 102].

Исследование формирования и сопровождения высокоплотных электронных потоков для вакуумной ТГц микроэлектроники представляет большой научный интерес, связанный с уникальными свойствами, которыми обладает миллиметровое и терагерцевое излучение [1]. На сегодняшний день представляют интерес различные перспективы использования СВЧ усилителей ТГц-диапазона: применение в наземных и спутниковых системах высокоскоростной передачи данных, в системах формирования радиолокационных изображений с высокими разрешающими способностями, сверхточных и скоростных РЛС, бортовых системах предупреждения столкновений, радиотехнических системах обеспечения безопасности. Весьма перспективным является применение ТГц излучения в биофизических и биомедицинских исследованиях, так как ТГц излучение представляет гораздо меньшую опасность для живых организмов, чем рентгеновское. Сформировалось и такое экзотическое направление, как ТГц-астрономия, которое представляет огромный интерес для исследования объектов дальнего космоса, реликтового излучения, спектрального анализа звезд, галактик, туманностей, экзопланет, астероидов, комет, квазаров и многих других космических объектов. Для этих целей используются частоты 120...180 ГГц, 500 ГГц, 787...950 ГГц; новейшие открытия в этой области были сделаны с помощью радиотелескопов SOFIA, CCAT, SPICA, ALMA, AMANOGAWA [3].

Как было отмечено выше во Введении, основными задачами при разработке миниатюрных электровакуумных ТГц приборов являются:

- Разработка компактных источников электронов и электронно-оптических систем на их основе;
- Моделирование траекторий интенсивных электронных пучков и их взаимодействия с электромагнитной волной, разработка программных комплексов для траекторного анализа;
- Создание микроразмерных пространственно-развитых электродинамических структур для взаимодействия с электронным потоком, изготовление ввода/вывода СВЧ энергии и коллектора;
- Создание миниатюрных магнитных фокусирующих систем, обеспечивающих требуемые значения напряженности магнитного поля.

Для создания вакуумных СВЧ усилителей, работающих в ТГц-диапазоне, необходимо разработать ЭОС, с плотностью тока более 100 А/см^2 и током пучка порядка 0.1 А что, в свою очередь, влечет за собой увеличение абсолютных значений индукции магнитного поля для фокусировки высокоплотного электронного потока. Это приводит к увеличению размеров магнитно-фокусирующей системы и массогабаритных характеристик прибора [23]. В обзорных работах [1, 2] показано, что отклонение в несколько десятков микрон в области нарастания или смещение области нарастания магнитного поля приводит к искажению электронного потока в пролетном канале.

Существенной проблемой представляется влияние разброса поперечных скоростей электронов и обеспечение соосности деталей и узлов в пушке. Оседание электронов на поверхность ЗС может ухудшать характеристики электронно-волнового взаимодействия или даже вызывать разрушение ЗС.

Для устранения токооседания и снижения тепловых нагрузок на электродинамическую структуру прибора необходимо разрабатывать системы формирования и фокусировки электронных потоков с ламинарной формой траекторий. Для исследования траекторий и формы ламинарных электронных потоков широко известны множество аналитических методов, базирующихся на

общефизических принципах.

Численное моделирование процессов фокусировки, удержания и транспортировки высокоплотного электронного потока в каналах миниатюрных приборов суб-ТГц диапазона, имеет ряд особенностей. Они связаны в первую очередь с многоскоростным характером электронного пучка.

Известно, что для эффективного взаимодействия ЭП с полем ЗС необходимо минимизировать величину пульсаций и их радиальную составляющую. Вопросы устойчивости и равновесной формы пространственно-развитых электронных пучков (например, ленточных) неоднократно поднималась рядом авторов, см., например, [24, 25]. Также пучок должен быть расположен достаточно близко к поверхности ЗС для достижения высоких значений сопротивления связи.

В связи с этим, представляется перспективным использование ЭОС с низкоперевансными электронными пучками, где уменьшается влияние пространственного заряда на расфокусировку пучка. С другой стороны, в низкоперевансных ЭОС увеличивается влияние поперечных тепловых скоростей электронов.

1.1.2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований

Разработка различных приборов О-типа суб-ТГц и ТГц диапазона (ЛБВ, ЛОВ, клистроны), создаваемых при помощи современных перспективных технологий, активно ведется во многих странах, таких как США, Китай, Индия, Южная Корея, Канада, Великобритания, Франция. В таблице 1.1 приведены некоторые параметры макетов вакуумных СВЧ приборов. Таблица составлена по данным, представленным в [4]. Создан ряд вакуумных СВЧ приборов, которые работают в частотах до 220 ГГц. Исходя из данных, представленных в Таблице 1.1, видно, что данный приборный ряд имеет различные значения усиления и КПД.

Таблица 1.1. Сравнение характеристик макетов вакуумных ТГц приборов

Производитель, страна	Тип прибора	Частота (ТГц)	Мощность (Вт)	Усиление (дБ)	КПД (%)	Источник
Samsung, Korea, CCR, USA	ЛОБ	0.1	6	—	1	[27]
CPI, Canada	клистрон	0.214	6	—	—	[28]
CPI, Canada	клистрон	0.218	7	23.6	—	[29]
NRL, CPI, and Beam-Wave Research, US (DARPA HiFIVE)	ЛБВ	0.218	64	14	4	[30]
NGES, US (DARPA HiFIVE)	ЛБВ	0.214	54.2	38.5	2.1	[31]
NGES and Teledyne Scientific, US (DARPA HiFIVE)	ЛОБ	0.65	0.108	21.5	0.44	[31]
NGES, US (DARPA HiFIVE)	ЛБВ	0.85	0.05	26	1.1	[32]
Lancaster Univ., UK and Thales, France (EUOPTHER project)	ЛОБ	1	0.0025 (целевая)	10	0.001	[34]
JPL- NASA, US	клистрон	1.2	0.003 (целевая)	—	0.02	[35]

Заслуживает внимания линейка мощных КРВ в фирмы CPI, с параметрами, представленными в Таблице 1.2 (данные из публикаций [4, 26-35]). Данные приборы характеризуются высоким уровнем выходной мощности, а также имеют широкую для клистронов полосу частот, например, 2.25 ТГц для усилителя W-диапазона.

В нашей стране также ведутся работы по проектированию и созданию ЛБВ и клистронов суб-ТГц и ТГц диапазонов. В ОАО НПП «Салют» (г. Нижний Новгород) созданы макеты ЛБВ W-диапазона на основе петляющего волновода [36]. В макетах напряжение на ЗС составило 12 кВ, ток пучка 90 мА, токопрохождение 85%, выходная мощность более 10 Вт. Расчет ЭОС

производился авторами с помощью программы CST. На предприятии ЗАО «Светлана-Электронприбор» (г. С.-Петербург) совместно с СПбГЭТУ «ЛЭТИ» проводится проектирование клистрона W-диапазона с ленточным электронным пучком [37].

Таблица 1.2. Клистроны с распределенным взаимодействием фирмы Communications & Power Industries

№	Частота, ГГц	Пиковая мощность, Вт	Средняя мощность, Вт	Внешний вид прибора
1	95	3000	400	
2	140	400	50	
3	183	50	10	
4	220	50	6	
5	280	30	0.3	

В АО «НПП «Исток» (г. Фрязино) помимо множества разработанных маломощных ЛОВ ТГц диапазона (от 250 ГГц до 1.5 ТГц) [9] проведено проектирование и исследование перспективной ЗС для ЛБВ W-диапазона на основе ЗС типа «меандр» [38-40]. В данных работах приведены результаты моделирования ЭОС с ленточным электронным пучком с сечением $400 \times 108 \text{ мкм}^2$ и током 43 мА. Показано, что магнитная система на постоянных

магнитах с индукцией поля в пролетном канале 0.8 Тл обеспечивает устойчивую транспортировку без оседания на стенки канала. Согласно расчетам, при длине области взаимодействия 24.6 мм, рабочем напряжении 15.6 кВ, выходной мощности 1 Вт, выходная мощность в полосе 5 ГГц достигает 27 Вт.

На предприятии АО «НПП «Алмаз» (г. Саратов) выпускались серийно маломощные ЛОВ Ку-диапазона. Конструкция этих ЛОВ включала в себя электронную пушку с многолучевыми ленточными пучками, которые взаимодействовали с пространственно-развитой ЗС типа «меандр». В такой ЛОВ пучки осаждались на ЗС, но при этом достигался требуемый уровень выходной мощности. На предприятии также выпускались маломощные ЛОВ с однолучевым ленточным электронным пучком. Важный вклад в развитие систем формирования таких пучков внесли такие ученые, как Пензяков В.В., Олейников В.И., Батуев Ю.И. [41-47]. В последнее время на предприятии ведется разработка перспективной ЛБВ, в основе которой лежит замедляющая система типа «гребенка» с пятью полукольцевыми пазами для пяти круглых электронных пучков. Планируется, что данная ЛБВ будет работать в диапазоне частот 180-220 ГГц [48].

В СГУ им. Н.Г. Чернышевского в течение многих лет активно велись разработки приборов миллиметрового диапазона. Они были начаты еще в 1950-х годах, когда под руководством М.А. Григорьева была создана ЛОВ «Камелия» с рабочей частотой 75 ГГц (граница V- и W- диапазона) с прямоугольным катодом, ленточным электронным пучком и ЗС типа «гребенка» [49]. Причем было создано специальное приспособление для ручного изготовления ЗС, которое представляло собой направляющие, обеспечивающие точное перемещение миниатюрной «пилки», с помощью которой в медной заготовке создавались зубцы гребенки, а также перемещение самой гребенки (лаборант, изготавливающий ЗС вручную, обрабатывал пилкой медную заготовку). Шаг этой гребенки и высота зубцов были порядка 0.1 мм. Для согласования ЭП в пролетном канале лампы было разработано специальное устройство для поворота лампы в магнитном поле при ее испытаниях, при этом

лампа размещалась в зазоре мощного электромагнита. Окна ввода/вывода СВЧ энергии представляли собой пластины из мусковита (слюды) паянные по торцам припоем из цементирующего стекла.

Поскольку одним из ключевых элементов электровакуумного СВЧ прибора является ЭОС, разработчики активно изучают процессы формирования интенсивных электронных пучков, в том числе и ленточных. Особенностью современного этапа исследований является то, что существенно возросли вычислительные мощности, которые позволяют использовать программные пакеты компьютерного моделирования, предназначенные для решения полевых и траекторных задач в трехмерной постановке. Это, в свою очередь, позволяет более детально наблюдать и анализировать физические процессы, происходящие в пучке. Остановимся на некоторых наиболее важных с нашей точки зрения работах последних лет.

Как известно, для ленточного пучка, транспортируемого в однородном магнитном поле, характерна диокотронная неустойчивость, приводящая к S-образному искривлению краев пучка. Электроны в пучке движутся в скрещенных $\vec{E} \times \vec{B}$ полях, где \vec{E} — поперечная составляющая напряженности электрического поля пространственного заряда, \vec{B} — индукция фокусирующего продольного магнитного поля. Сила, возникающая в скрещенных полях, вызывает дрейф электронов относительно центра пучка. Скорость дрейфа электронов описывается следующей формулой (см., например, [25]):

$$\vec{v}_d = \left(1 + \frac{1}{4} r_L^2 \nabla^2 \right) \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}, \quad (1.1)$$

где r_L — ларморовский радиус, символ \times обозначает векторное произведение. Электрическое поле \vec{E} выражается через потенциал пространственного заряда как

$$\vec{E} = -\nabla\varphi, \quad (1.2)$$

где потенциал φ удовлетворяет уравнению Пуассона. На стенках пролетного канала $\varphi = 0$. На Рис. 1.1 схематически изображено сечение ЭП, поясняющее его

деформацию и закручивание краев.

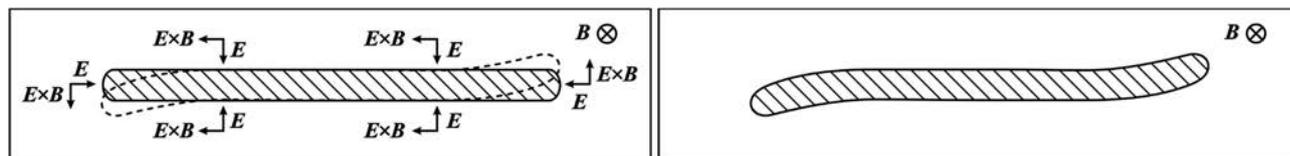


Рис. 1.1. К объяснению эффекта закручивания ленточного ЭП в скрещенных полях

Известно, что при этом возникает экспоненциальный рост возмущений плотности заряда — диокотронная неустойчивость [10-12]. Образование «завихрений» под воздействием эффекта диокотронной неустойчивости лавинообразно нарастает, и пучок осаждается на стенки канала. Аналогичный эффект наблюдается и в кольцевых пучках, когда силы пространственного заряда в локальной области нарушают азимутальную симметрию пучка [10-12].

Характерную длину L_D , на которой развивается диокотронная неустойчивость в пучке, можно оценить следующим образом: $L_D = v_0 \omega_c / \omega_p^2 = 3B_z V_0 / j_0$ [25, 50]. Понятно, что увеличение магнитного поля B_z приводит к уменьшению скручивания ЭП, однако это одновременно приводит к увеличению объема и веса магнитной системы.

Для подавления диокотронной неустойчивости можно не только увеличивать магнитное поле, но и изменять саму форму пучка, например, использовать пучки эллиптического сечения. В связи с этим активно развивается теория формирования эллиптических электронных пучков, см., например, работы [44, 51-54], в которых отражены методики синтеза эллиптических пучков, а также представлены результаты исследования процессов их транспортировки. В частности, в [54] представлен алгоритм формирования эллиптического пучка с высокой компрессией, который распространяется в пролетном канале без осцилляций и не испытывает поворота и деформаций. Однако в результате получаются сложные трехмерные криволинейные конфигурации электродов, которые затруднительно реализовать на практике.

В работе [25] предлагается методика подавления диокотронной неустойчивости пучка путем согласования его эквипотенциальных контуров и формы канала. Поскольку закручивание пучка обусловлено дрейфом в скрещенных $E \times B$ полях, если граница пучка совпадает с эквипотенциальной линией, дрейф возникать не будет (см. (1.1)). В [25] представлены результаты моделирования, демонстрирующие устойчивую транспортировку ленточного пучка в прямоугольном канале с закругленными стенками. Моделирование проводилось как для прямого пучка, так и для пучка с компрессией. Однако применение данной методики на практике затрудняется тем, что в реальной ЗС пролетный канал неоднородный и состоит из периодических элементов.

В работе [55] моделируется ленточный ЭП для ЛБВ W-диапазона с размерами канала 0.94×0.22 мм, током 150 мА и демонстрируется его успешная транспортировка на расстояние в 70 мм от катода. В данной работе сравниваются результаты моделирования магнитных систем в программных пакетах OPERA 3D Modeler и CST Particle Studio, которые показали близкие значения величины токопрохождения в канале: 98.8% и 97.3% соответственно. Авторы демонстрируют различные картины поперечных сечений пучка в пролетном канале, по которым можно получить некоторое представление о его структуре.

В работе [56] авторы исследуют формирование ленточного ЭП, который был получен в результате компрессии фокусирующим электродом в виде «рупора» с катода круглого сечения. Пучок транспортируется в периодическом магнитном поле на расстояния порядка 80 мм. Однако X-образная форма, которую приобретает пучок в процессе компрессии, негативно сказывается на токопрохождении.

Большой цикл исследований, направленных на создание ЛБВ G-диапазона, был выполнен в США в рамках выполнения программы «DARPA HiFIVE» (см., например, [57-61]). Авторами была спроектирована ЭОС на основе электронной пушки с эллиптическим катодом с размерами 1.012×0.813 мм². Фокусировка и компрессия пучка в данной ЭОС обеспечивается электродами сложной криволинейной формы, а транспортировка в канале сопровождается полем

0.62 Тл. Напряжение анода составило 20 кВ, ток пучка 257 мА. В канале прибора поперечные размеры пучка составляют примерно $0.77 \times 0.15 \text{ мм}^2$. На Рис. 1.2 показаны сечения пучка, демонстрирующие S-образные загибы краев. Однако данные картины не дают полного физического представления о его структуре и характере пульсаций.

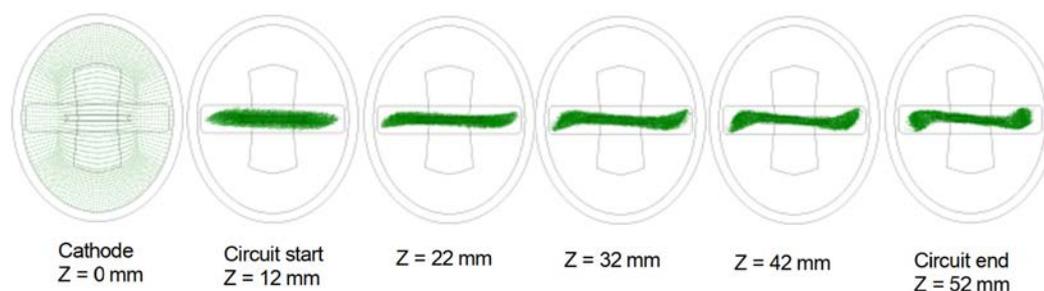


Рис. 1.2. Моделирование ЭОС с компрессией эллиптического пучка [61]

В итоге был экспериментально реализован ЛБВ-усилитель диапазона 220 ГГц с коэффициентом усиления в режиме малого сигнала свыше 24 дБ в полосе шириной 14 ГГц, с твердотельным предусилителем мощностью 45 мВт. В режиме большого сигнала, подаваемого на вход ЛБВ (до 750 мВт), была достигнута выходная мощность 110 Вт на частоте 213 ГГц. Однако необходимо отметить, что такая мощность была достигнута лишь на отдельных фиксированных частотах, поскольку для получения высокой входной мощности использовался предусилитель на основе КРВ.

В конечном варианте прибора [61] был получен ленточный ЭП с соотношением сторон 12.5:1 ($1 \text{ мм} \times 0.08 \text{ мм}$) и плотностью тока 438 А/см^2 . Однако величина токопрохождения составила 75%, что отличается от расчетного значения 99%. Это несоответствие объясняется авторами смещением катодной поверхности вследствие термического воздействия. Отметим также, что в экспериментах фокусировка пучка осуществлялась магнитной системой с однородным полем на постоянных магнитах [61]. Вес такой системы составлял около 100 фунтов, т.е. около 45 кг. В связи с этим, актуальной задачей представляется разработка магнитных систем с меньшими размерами и весом.

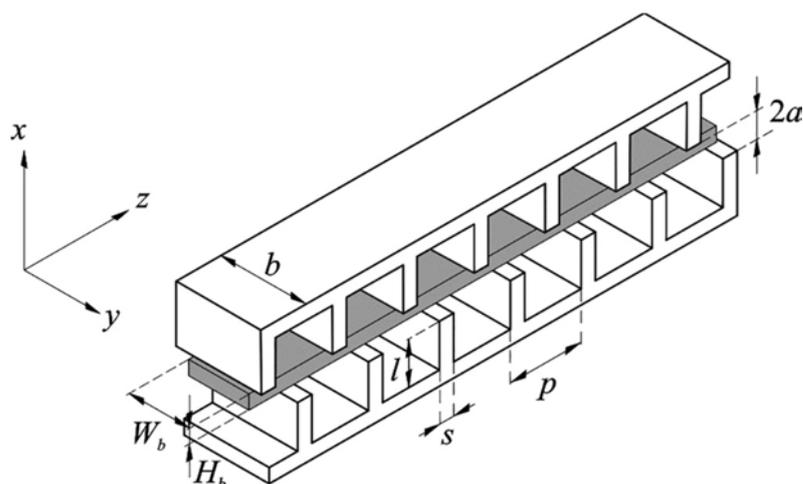


Рис. 1.3. Схема ЗС типа «двойная гребенка»

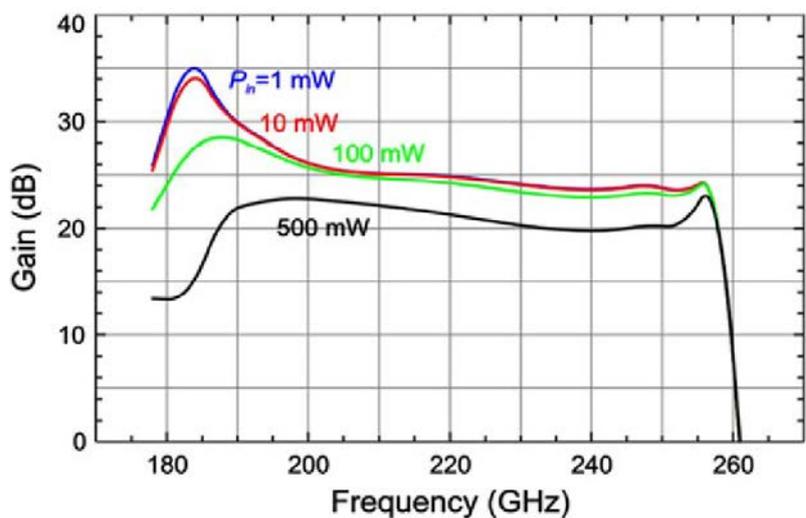
Таблица 1.3. Геометрические параметры ЗС.

Параметр	Величина, мкм
Период структуры, p	500
Толщина ламели, s	100
Высота ламели, l	300
Высота канала, $2a$	100÷200
Толщина широкой стенки канала, b	850
Толщина пучка, H_b	50÷100
Ширина пучка, W_b	800

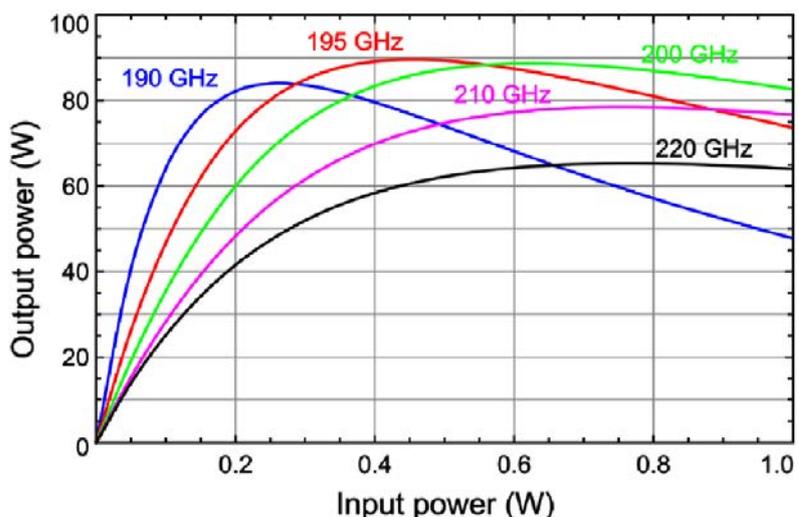
Отметим, что в настоящее время в СФ ИРЭ РАН и СГУ совместно с АО «НПП Алмаз» проводятся исследования, направленные на создание ЛБВ диапазона 0.2 ТГц с ленточным ЭП и ЗС типа двойной гребенки [62-64]. Схема ЗС приведена на Рис. 1.3, а основные геометрические параметры ЗС — в Таблице 1.3. Согласно этим работам, необходимо обеспечить толщину ленточного ЭП 100÷150 мкм в канале высотой 200 мкм. Размер канала вдоль широкой стенки 850 мкм. Ускоряющее напряжение составляет 20 кВ, плотность тока в канале 100–200 А/см².

Проведенные в [63, 64] расчеты усиления при помощи одномерной нелинейной теории ЛБВ хорошо согласовывались с результатами

моделирования при помощи 3-D PIC-кодов KARAT и CST. При этом транспортная длина пучка, необходимая для получения высокого усиления, должна составлять 40 мм и более.



a



б

Рис. 1.4. Зависимость коэффициента усиления ЛБВ от частоты при различной мощности входного сигнала (а) и зависимости выходной мощности от входной на разных частотах(б) [101]

При уменьшении толщины пучка и высоты канала до 75 мкм и 150 мкм соответственно коэффициент усиления существенно возрастает, что обусловлено, главным образом, возрастанием сопротивления связи. На Рис. 1.4

приведены типичные результаты расчетов.¹ Они показывают широкую полосу усиления в режиме малого сигнала, которая составляет почти 70 ГГц (Рис. 1.4(а)). Максимальная выходная мощность достигается на частоте 195 ГГц и составляет 90 Вт при входной мощности 0.425 Вт (Рис. 1.4(б)). На частоте 220 ГГц выходная мощность в режиме насыщения составляет примерно 65 Вт при входной мощности 0.6-0.9 Вт.

1.1.3. Постановка задачи исследования

В результате проведенного анализа можно утверждать, что разработчики вакуумных СВЧ приборов с протяженным взаимодействием суб-ТГц диапазона сталкиваются со многими проблемами, такими как необходимость обеспечить чрезвычайно высокую точность изготовления деталей и узлов, сопутствующие деструктивные процессы, возникающие при работе прибора, проблемы токопрохождения и долговечности работы, низкий КПД и недостаточная выходная мощность.

В частности, одной из особенностей ЭОС суб-ТГц диапазона является наличие пролётного канала с высокоаспектным соотношением сторон. В таком канале транспортируются ленточные электронные пучки или несколько пучков, расположенных в ряд. Несмотря на миниатюрные размеры канала, активно разрабатываются пушки с компрессией, хотя они и труднее в реализации.

Следует отметить, что в таких ЭОС имеют место разнообразные явления, вызывающие интерес у исследователей. К основным вопросам относятся: изучение многоскоростного характера частиц пучка, возникающего вследствие теплового разброса скоростей; влияние диокотронной неустойчивости на структуру пучка в процессе длительной транспортировки; согласование формы эквипотенциальных контуров пучка с пролетным каналом; влияние на эволюцию пучка магнитных фокусирующих полей сложной формы; различные отклонения от оптической оси прибора; тепловые уходы пушки.

¹ Расчеты усиления проведены А.Э. Плоских.

1.2. Синтезирование пушки с ленточным ЭП для ЛБВ диапазона 0.2 ТГц

1.2.1. Описание методики синтеза

В разделе 1.2 описаны результаты разработки ЭОС для описанной выше ЛБВ с ЗС типа сдвоенной гребенки (см. в п. 1.1.2 и [62-64]). С целью дальнейшего улучшения характеристик прибора уменьшим высоту канала до 100 мкм, а толщину пучка до $50 \div 75$ мкм.

Создание ЭОС для вакуумного СВЧ усилителя с протяженным взаимодействием работающего в диапазоне 0.1 ТГц и выше, которая обеспечила бы высокое токопрохождение, долговечность и требуемые значения выходных характеристик прибора, является трудоемкой задачей. При этом необходимо, чтобы конструкция обеспечивала минимальные пульсации пучка, его согласование с магнитным полем, ламинарные траектории частиц и высокое токопрохождение. Большой интерес представляет разработка ЭОС, в которых ЭП подвергается высокой компрессии в пушке, но транспортируется в пролетном канале с малой величиной пульсаций. При этом, вследствие его сжатия в нарастающем магнитном поле, можно обеспечить высокую плотность тока в канале при относительно небольшой плотности тока на катоде, а также получить близкую к ламинарной структуру электронного потока.

В то же время, траекторный анализ формирования протяженных низкопервееансных пучков на основе термоэмиссии затрудняется необходимостью учета влияния поперечных тепловых скоростей электронов. Влияние тепловых скоростей электронов в ЭВП СВЧ обсуждалось во многих работах, в большинстве из которых рассматриваются круглые цилиндрические пучки. В частности, С.П. Моревым и Г.А. Рехеном в работе [65] подробно описаны методика и результаты численного моделирования, а также проводится сопоставление с результатами экспериментов. Известно, что при первееансах, меньших 10^{-7} А/В^{3/2}, радиус формируемого пучка в однородном магнитном поле определяется в основном тепловым разбросом скоростей электронов. Согласно данным, приведенным в [6-8], в приборах суб-ТГц диапазона величины

первеанса пучка находятся в интервале $(0.14...0.35) \times 10^{-7} \text{ A/V}^{3/2}$.

Для получения предварительной геометрии электродов электронной пушки с такими параметрами воспользуемся известным методом синтеза, развитым Ю.Г. Гамаюновым и соавторами [13-17] на основе работ В.Т. Овчарова, В.В. Пензякова, А.И. Петросяна, В.И. Олейникова [18-20, 41-47] (см. также обзор [66]). Так как электронная пушка имеет фокусирующие электроды, которые находятся под потенциалом катода, то, изменяя их угол наклона по отношению к оптической оси (ось исходит из поверхности катода и перпендикулярна его поверхности), можно регулировать величину кривизны эквипотенциальных поверхностей, через которые пролетит ЭП, тем самым осуществляя его компрессию. Методика синтеза позволяет определить геометрию пушки: радиус кривизны катода, угол наклона фокусирующих электродов, расстояние между катодом и анодом, геометрию анодного электрода и величину нарастания магнитного поля.

Рассмотрим схематическое изображение ленточного ЭП, представленное на Рис. 1.5. Предположим, что поперечная координата q_2 совпадает с траекториями электронов ленточного пучка, причем значения координаты q_2 в пучке изменяются в пределах $0 \leq q_2 \leq 1$. Следовательно, если декартова система координат включает в себя функцию $\Phi(x)$, описывающую траекторию граничного электрона пучка, то траектории электронов внутри пучка будут описываться функцией $y(x) = q_2 \Phi(x)$. Вторая криволинейная координата q_1 является продольной координатой и выбрана так, что поверхности q_1 ортогональны поверхностям q_2 . Третья криволинейная координата q_3 совпадает с обычной декартовой координатой z по ширине пучка. Ниже рассматривается двумерная модель бесконечно широкого ленточного пучка, т.е. считается, что компоненты скорости ЭП, распределение плотности тока и объемный заряд в пучке не зависят от координаты q_3 .

Известно, что метод синтеза ЭОС включает в себя решение уравнений внутренней и внешней задач. Процедура вывода этих уравнений для

сходящегося ленточного пучка подробно рассмотрена в [66] и далее развита в [13-17].

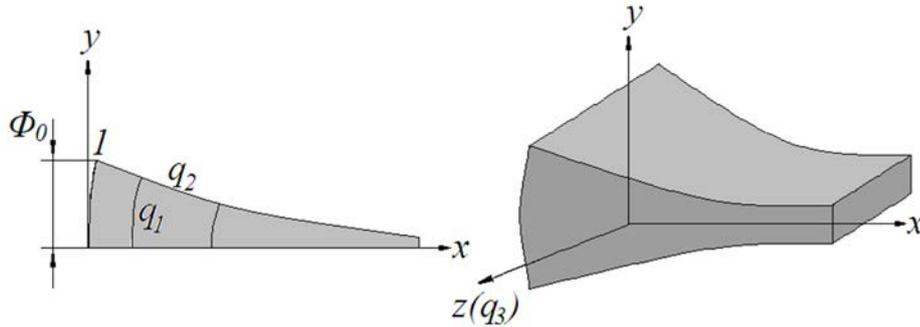


Рис. 1.5. Конфигурация ленточного пучка и системы координат

В параксиальном приближении уравнение внутренней задачи синтеза имеет следующий вид:

$$(u'\varphi)' + 2\varphi''u + \gamma^2(h^2\varphi - h h_c \varphi_c) = \frac{i}{\sqrt{u}}, \quad (1.3)$$

где φ — функция, описывающая границу пучка; $u=U/U_0$ и $h=B/B_0$ — нормированные осевые потенциал и магнитное поле соответственно; h_c и φ_c — значения функций h и φ на катоде, $i=0.0952 p_\mu/\mu\mu_1$, $\mu=\Phi_0/l$, $\mu_1=s/l$; p_μ — микропервеанс; Φ_0 и l — нормировочные величины поперечных и продольных размеров ЭОС (Φ_0 — высота катода), s — ширина пучка, $\gamma^2 = \eta B_0^2 l^2 / U_0$, B_0 — магнитное поле в канале, U_0 — потенциал анода. Штрихи обозначают производные по продольной криволинейной координате q_1 .

Решение внутренней задачи синтеза (1.3) связано с нахождением функций $\varphi(x)$, $u(x)$ и $h(x)$ во всей области ЭОС. Уравнение внутренней задачи содержит три искомые функции, и для его решения нужно предварительно задать две из них. Следуя [13-17], выберем

$$h(x_1) = \frac{h_c \varphi_c}{\varphi(x_1)}, \quad (1.4)$$

где $x_1 = q_1/l$ — нормированная продольная координата. Тогда (1.3) примет вид

$$(u'\varphi)' + 2\varphi''u = \frac{i}{\sqrt{u}}. \quad (1.5)$$

Распределение осевого потенциала в области нарастания ($x_1 \leq x_{01}$) задается в виде

$$u(x_1) = kx_1^{4/3} \left(1 + \sum_{n=1}^7 a_n x_1^n \right)^2 \quad (1.6)$$

В области $x_1 \geq x_{01}$ потенциал полагается $u=1$.

Зависимость $\varphi(x_1)$ при $x_1 < x_{01}$ находится из решения уравнения (1.5), а в области $x_1 \geq x_{01}$, где потенциал уже постоянен, для границы пучка используется выражение

$$\varphi(x_1) = \sum_{n=0}^6 b_n (x_1 - x_{01})^n. \quad (1.7)$$

Методика определения коэффициентов k , a_n , b_n для ленточного пучка описана в работе [13], где для них получены громоздкие выражения, которые здесь не приводятся. Они обеспечивают требуемый первеанс и согласованный ввод пучка в регулярную область магнитного поля.

Нахождение конфигурации фокусирующего электрода и анода пушки следует из решения уравнения внешней задачи синтеза, которая имеет следующий вид:

$$V(x_1, q_2) = u + \frac{\mu^2 i \varphi}{2\sqrt{u}} (2q_2 - 1) - \frac{\mu^2 q_2^2}{2} (\varphi^2 u'' + \varphi \varphi' u'), \quad (1.8)$$

где V — потенциал вне пучка.

Переход от криволинейной системы координат к декартовой осуществляется с помощью уравнения:

$$\frac{d\xi}{dq_2} = - \frac{\mu^2 \varphi(\xi) \varphi'}{1 + (\mu q_2 \varphi'(\xi))^2} q_2, \quad (1.9)$$

где $\xi = x/l$ — нормированная продольная координата. Поперечная декартова координата определяется из соотношения $y/l = \mu q_2 \varphi(\xi)$.

Далее вычисляются нормировочные размеры, осевая длина пушки, линейная компрессия пучка, радиус кривизны катода. Параметры нормировки

задаются следующими выражениями [13]: $\Phi_0 = d/2\phi_0$, где d — толщина пучка в кроссовере; $l = \sqrt{is\Phi_0/(0.0952p_\mu)}$; осевая длина пушки $L = x_{1cr}l$ (x_{1cr} — положение кроссовера); высота катода $H = \Phi_0/\sqrt{1+\mu^2(\phi'_c)^2}$; линейная компрессия пучка $S = 1/\phi_0\sqrt{1+\mu^2(\phi'_c)^2}$, радиус кривизны катода $R = -l/\phi'_c$.

С помощью описанной выше методики был проведен синтез ЭОС формирования ленточного пучка с плоским и цилиндрическим криволинейным катодами, погруженными в магнитное поле. В соответствии с работами [62-64] будем считать, что ширина катода $s = 0.8$ мм. Высота катода выбиралась равной 0.5 мм. Ток пучка составил 100 мА, первеанс — 0.707×10^{-7} А/В^{3/2}, ускоряющее напряжение 20 кВ, толщина пучка в кроссовере 0.055 мм. Таким образом, линейная компрессия составила ≈ 9 единиц, плотность тока в пучке ≈ 227 А/см², а плотность тока на катоде 25.2 А/см². На Рис. 1.6(а) показана конфигурация электродов и профиль магнитного поля в пушке с плоским катодом, т.е. угловой коэффициент $\phi'_c = 0$. На Рис. 1.6(б) показана пушка с цилиндрическим катодом, угловой коэффициент $\phi'_c = -1.62$, радиус кривизны катода $R \approx 4.2$ мм. В обоих случаях поле на катоде $B_c \approx 0.05$ Тл, поле в канале 0.68 Тл и 0.7 Тл соответственно.

Однако с технологической точки зрения пушка с магнитно-экранированным катодом более предпочтительна. Такая конструкция упрощает согласование пучка с магнитным полем, а также способствует уменьшению веса магнитной системы. Чтобы обеспечить наличие магнитного поля в зоне катода, у пушки пришлось бы разместить дополнительные магниты с большим внутренним зазором между ними. В этом зазоре должен поместиться керамический изолятор пушки или ее анод-наконечник.

Далее рассмотрим пушку с магнитно-экранированным катодом, т.е. $h_c = 0$. В этом случае, следуя работам [67, 68], распределение магнитного поля в пушке в области нарастания примем в следующем виде (ср. [23, гл. 8]):

$$h = \sin^2(x_1 - x_m), \quad (1.10)$$

где x_m — координата начала нарастания магнитного поля в ЭОС.

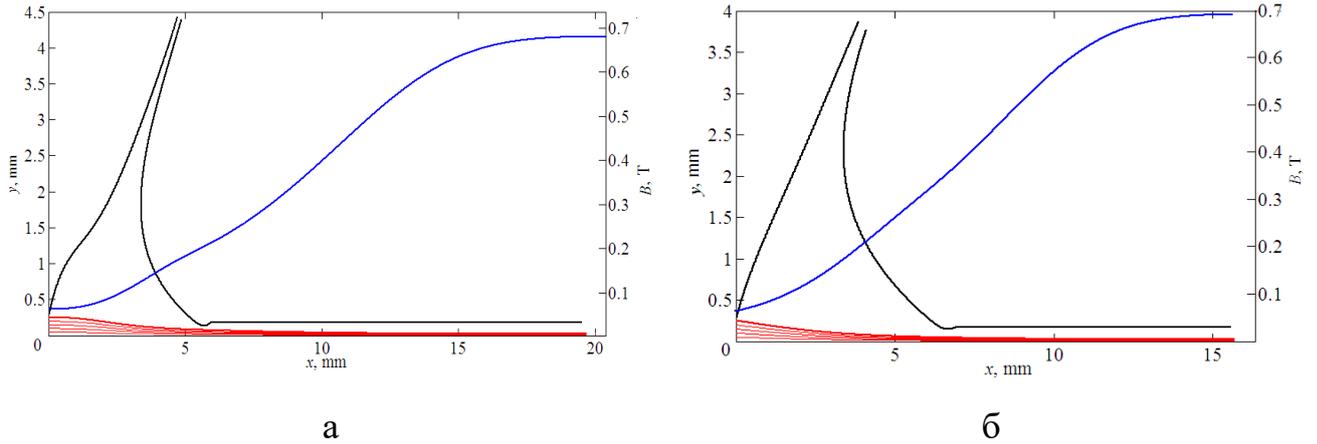


Рис. 1.6. Пример синтеза ЭОС формирования пучка с катодом, погруженным в магнитное поле: (а) плоский катод; (б) цилиндрический катод, радиус кривизны катода $R \approx 4.2$ мм

В области $x_1 > x_{1cr}$ осевой потенциал $u = 1$, осевое магнитное поле $h = 1$, $\varphi = \varphi_0$, где $\varphi_0 = d / (2\Phi_0)$ — полутолщина непульсирующего ЭП в кроссовере. Тогда из уравнения (1.3) можно получить, что $\gamma^2 \varphi_0 = i$, после чего оно принимает вид

$$(u'\varphi)' + 2\varphi''u + ih^2 \frac{\varphi}{\varphi_0} = \frac{i}{\sqrt{u}} \quad (1.11)$$

Уравнение (1.11), в котором u и h задаются формулами (1.6) и (1.10) соответственно, решается в области $x_1 < x_{01}$.

В области $x_{01} < x_1 < x_{1cr}$, где $u = 1$, из уравнения (1.11) получим выражение для h

$$h(x_1) = \sqrt{\frac{\varphi_0}{\varphi} - 2 \frac{\varphi''}{i} \frac{\varphi_0}{\varphi}} \quad (1.12)$$

При этом $\varphi(x_1)$ определяется из соотношения (1.7).

С помощью данной методики был проведен синтез рабочего варианта пушки с катодом размера 0.8×0.8 мм². Катод имел криволинейную цилиндрическую поверхность с радиусом кривизны $R = 4.93$ мм. Результаты

расчета приведены на Рис. 1.7, а основные характеристики пушки — в Таблице 1.4. Таким образом, линейная компрессия была увеличена до ~ 15 единиц, что позволяет уменьшить плотность тока на катоде с 25.2 А/см^2 до 15.6 А/см^2 .

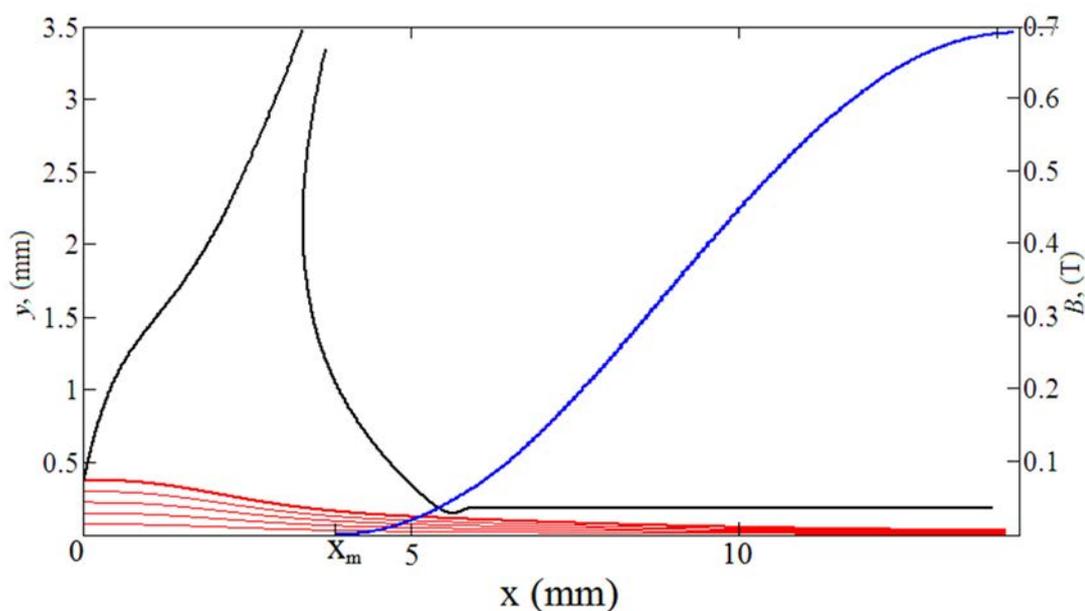


Рис. 1.7. Результат синтеза ЭОС с цилиндрическим катодом, экранированным от магнитного поля

Таблица 1.4. Параметры электронной пушки

Ускоряющее напряжение, кВ	20
Ток, мА	100
Размер катода, мм ²	0.8×0.8
Размер пролетного канала, мм ²	0.2×0.85
Компрессия пучка	~ 15
Радиус кривизны катода R , мм	4.93
Расчетный размер пучка, мм ²	0.055×0.8
Плотность тока на катоде, А/см ²	15.6
Средняя плотность тока в пучке, А/см ²	≈ 230

Полученные в результате данного синтеза геометрия пушки и распределение магнитного поля обеспечивают неп пульсирующий ЭП заданной толщины. В данном случае рабочее магнитное поле (0.7 Тл) превышает бриллюэновское $B_{br} = 1.04 \times 10^{-3} \sqrt{p_{\mu} U_0 / sd} = 0.16$ Тл в 4.3 раза. Это в свою очередь требует некоторого пояснения (см. ниже п. 1.2.3).

1.2.2. Сопоставление синтеза с 3-D моделированием

Описанная выше методика синтеза имеет ряд недостатков. Прежде всего, она является двумерной, т.е. справедлива, вообще говоря, лишь в случае, когда ширина пучка s много больше высоты катода. Для рассмотренной в п. 1.2.2 конфигурации это приближение, очевидно, не выполняется. Далее, электроды и распределение магнитного поля, получаемые в результате синтеза, могут иметь сложную криволинейную форму, которую затруднительно реализовать на практике.

В идеальной задаче синтеза с экранированного от магнитного поля катода пушки формируется ламинарный пучок. Он транспортируется в пролетном канале и не пульсирует только в случае, если величина магнитного поля равна бриллюэновскому полю. Однако, на практике фокусирующее магнитное поле по ряду причин всегда больше бриллюэновского (см. замечания об условиях реализации бриллюэновского потока в [23]). Кроме того, в программах анализа получение бриллюэновского ЭП затрудняется перераспределением плотности тока в пучке, которое вызвано тепловыми скоростями и неоднородным распределением плотности тока на катоде.

В связи с этим, необходимо верифицировать результаты синтеза при помощи трёхмерного численного моделирования, для чего целесообразно использовать какие-либо современные программные пакеты. В диссертации для этой цели используются пакеты Lorentz-3EM [21] и CST Studio [22]. В них напрямую решаются уравнения Лапласа и Пуассона в области заданной конфигурации электродов. Затем в результате сложного самосогласованного многоитерационного процесса вычисляются траектории частиц.

На Рис. 1.8 приведен результат моделирования пушки, геометрия которой была получена при помощи описанной выше методики синтеза, в пакете Lorentz-ЗЕМ. С торцов (в плоскостях $y=0, b$, где $b = 850$ мкм), система закрыта металлическими стенками. Далее будем обозначать оптическую ось пушки как z , координату по вертикали – x , а по горизонтали – y .

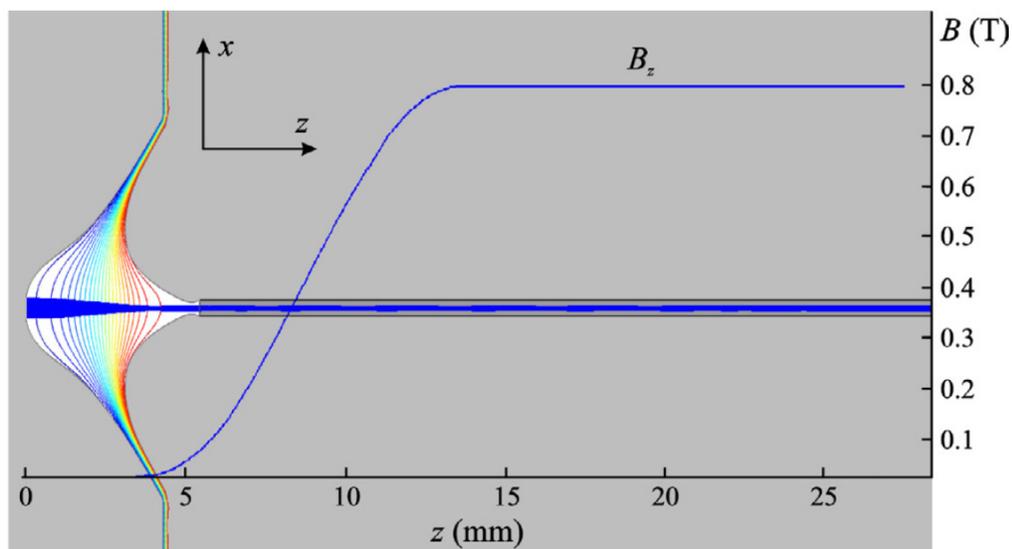


Рис. 1.8. Результаты 3-D моделирования синтезированной ЭОС в пакете Lorentz-ЗЕМ. Показаны контур пучка, профиль магнитного поля и распределение эквипотенциалей в области пушки в плоскости симметрии $y=b/2$

В результате 3-D моделирования криволинейной геометрии синтезированной пушки было выявлено, что результаты двух подходов достаточно хорошо согласуются друг с другом. Однако присутствуют пульсации пучка, заметные на Рис. 1.9. В результате не обеспечивается транспортировка пучка на необходимое расстояние, так как пучок начинает оседать на стенки канала на расстоянии 30-35 мм от катода. Вследствие этого магнитное поле в канале было увеличено с 0.7 до 0.8 Тл (см. также [106, 113]). На Рис. 1.9 приведены поперечные сечения пучка в канале на различных расстояниях от катода. Видно, что оседание на стенки начинается на расстояниях 40-45 мм.

При изменении значения магнитного поля в канале изменяется и профиль его нарастания в переходной области, который уже не полностью соответствует синтезу. Однако это различие принципиально не сказывается на форме пучка в области его формирования.

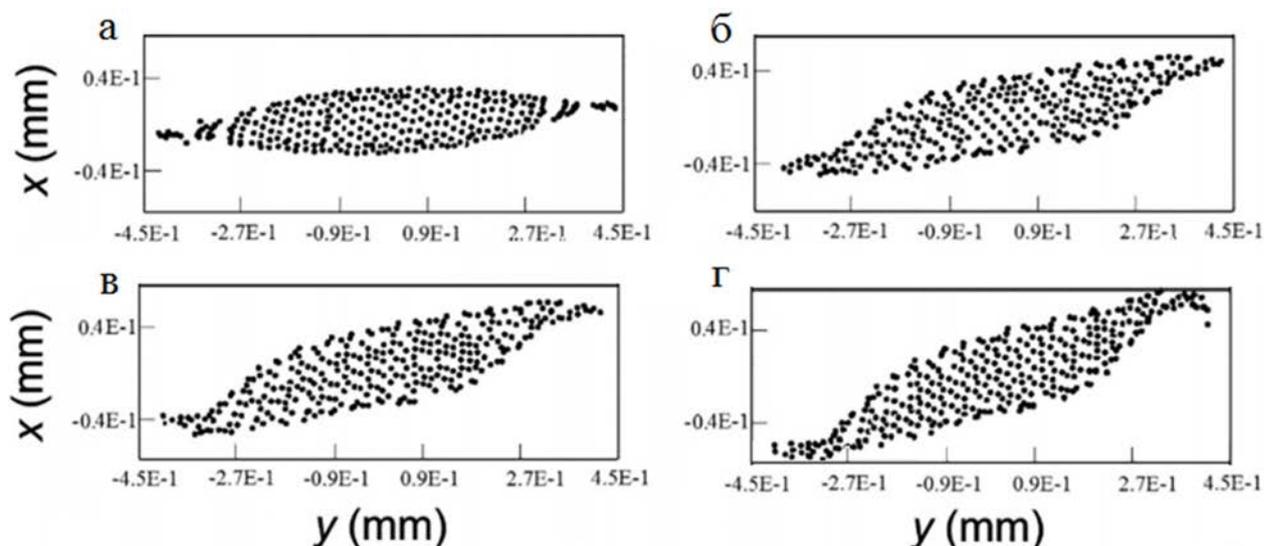


Рис. 1.9. Распределение «крупных» частиц в поперечном сечении на различных расстояниях z от катода: (а) 7 мм, (б) 15 мм, (в) 25 мм, (г) 45 мм

1.2.3. Аппроксимация криволинейной геометрии электродов пушки

ЭОС, рассмотренная в разделе 1.2.3, имеет сложную криволинейную форму фокусирующего электрода. С учетом технологических ограничений такую конструкцию затруднительно реализовать на практике. В связи с этим необходимо рассмотреть возможность аппроксимации криволинейных поверхностей фокусирующих электродов прямолинейными. Однако такая аппроксимация представляет собой сложную задачу. Небольшое изменение угла «раскрыва» фокусирующих электродов изменяет характер фокусировки пучка, при этом меняется величина тока и первеанс пучка.

Поэтому задача решалась в пакете CST Particle Studio [22] с использованием встроенного параметрического оптимизатора (CST Optimizer). В данном оптимизаторе при помощи специальных алгоритмов возможно задавать целевые параметры по которым будет вычисляться новая геометрия пушки. Конкретно она достигается путем анализа различных углов раскрытия лепестков фокусирующих электродов, сдвигом магнитного поля относительно катода, изменением кривизны поверхности катода и некоторых других параметров (см. подробнее в [22]). Конечной целью аппроксимирования является вычисление геометрических параметров пушки с первеансом, током,

положением кроссовера и профилем магнитного поля, которые наиболее близки к синтезу. Параметры пучка см. в табл. 1.4. Однако формирование пучка должно обеспечиваться электродами с плоскими поверхностями, а не криволинейными. Результат аппроксимации конструкции пушки представлен на Рис. 1.10.

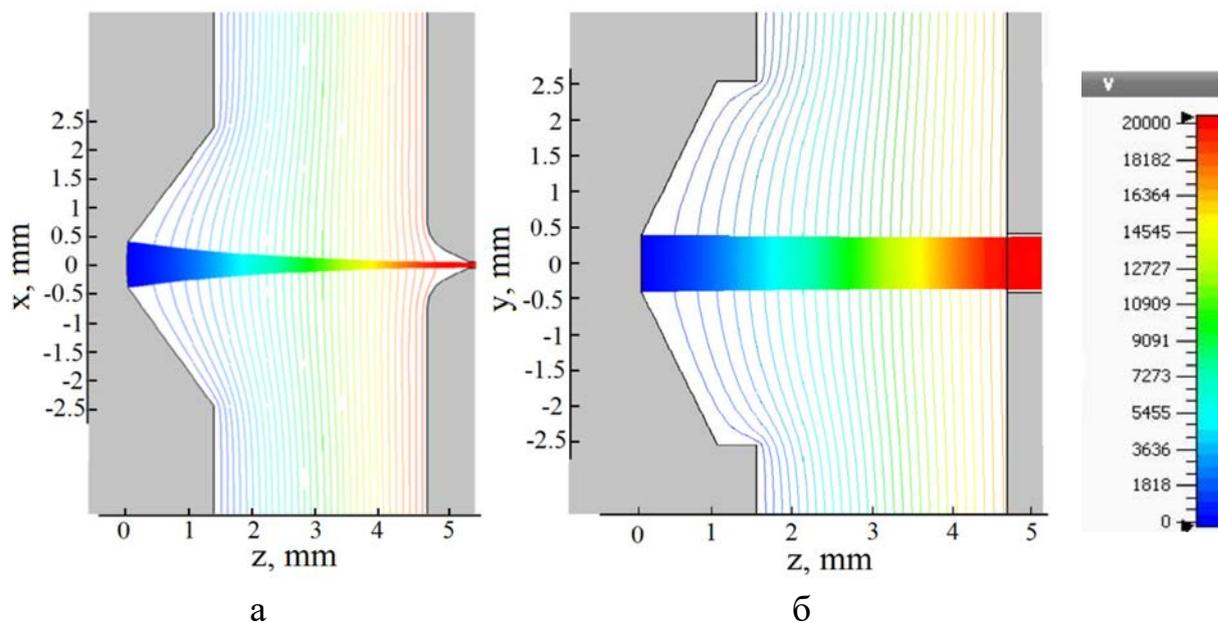


Рис. 1.10. Моделирование сходящегося ленточного ЭП в пакете CST: (а) плоскость xy ; (б) плоскость xz . Показаны эквипотенциальные линии в области пушки

Ток пучка определяется в соответствии с законом «трех вторых» Чайльда–Ленгмюра, т.е. пушка работает в режиме ограничения пространственным зарядом. Фокусирующий электрод находится под потенциалом катода, т.е. 0 В. Траектории рассчитаны при помощи моделирования 16 000 частиц.

Катод магнитоэкранированный, общая протяженность нарастания магнитного поля такая же, как и в синтезе. Магнитное поле в канале составляет 0.8 Тл.

1.3. Анализ транспортировки ленточного пучка в однородном магнитном поле

1.3.1. Предварительные замечания

Приведенный выше пример моделирования ленточного ЭП (Рис. 1.9) демонстрирует, что его движение имеет сложный характер. Еще в 1950-е годы было обнаружено, что при фокусировке таких пучков в однородном магнитном поле возникает диокотронная неустойчивость, приводящая к закручиванию краев пучка и его оседанию на стенки канала [10-12]. Впоследствии этот эффект исследовался в известных трудах В.В. Пензякова, В.И. Олейникова, Ю.И. Батуева [41, 42], а также в более современных работах [25, 69-71]. Однако в этих работах рассматриваются пучки с однородным распределением плотности тока в поперечном сечении.

Важно отметить, что для повышения долговечности прибора необходимо снижать плотность тока эмиссии с поверхности катода, то есть увеличивать компрессию пучка в ЭОС. Удовлетворяющие этому требованию электронные пушки формируют потоки со значительным разбросом поперечных скоростей [72]. Таким образом, возникает необходимость более детального исследования вопросов, связанных с формированием и сопровождением многоскоростного пучка (пучка с ненулевым фазовым объёмом). Многоскоростной характер ЭП связан как с тепловым разбросом электронов по скоростям на катоде электронной пушки, так и с абберациями из-за неоднородности электрических и магнитных полей. Основные трудности, возникающие при моделировании многоскоростного характера пучка связаны с тем, что в каждой точке пространства, занятого пучком, существует распределение электронных траекторий по углам наклона [72]. Поведение такого ленточного пучка изучено далеко не полностью.

В данном разделе поведение ленточного ЭП с компрессией, фокусируемого магнитной системой с однородным полем, исследуется с помощью современного универсального пакета 3-D CST Studio Suite [22].

Достоинством этой программы является то, что ее алгоритмы изначально создавались и оптимизировались для работы с большим количеством частиц на базе архитектуры многоядерных процессоров с высокой частотой, что значительно сокращает время расчетов. Отметим, что пакет CST позволяет исследовать такие важные с практической точки зрения вопросы, как оседание частиц на стенки канала и анализ технологических допусков (нарушение соосности пушки и канала и др.).

1.3.2. Магнитная система с однородным полем

Прежде всего было осуществлено проектирование магнитной системы. В качестве материала был выбран сплав из неодима, железа и бора ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$). В зависимости от марки сплава, он обладает разной намагниченностью. В данной работе предлагается возможность использования сплавов с намагниченностью насыщения 1.2 Тл. К ним можно отнести 35SH, 35UH, 35EH, предлагаемые фирмой «ЛЭПОКС»². Изображение магнитной системы и график распределения индукции магнитного поля на оси системы представлены на Рис. 1.11.

Отметим, что в данной системе магнитное поле увеличено по сравнению с предварительными расчетами, см. п. 1.2. Это связано с тем, что была увеличена длина системы и, соответственно, для транспортировки пучка требуется более высокое магнитное поле. Как видно из Рис. 1.11,б, на расстоянии $z \approx 7.0$ мм от плоскости катода ($z=0$) магнитное поле достигает своего максимального значения $B_z \approx 1.1$ Т и остается практически постоянным на расстоянии более 55 мм. Отметим, что величина магнитного поля значительно превышает поле Бриллюэна $B_{Br} \approx 0.16$ Т.

² <https://ferrite.ru/products/magnets/ndfeb>

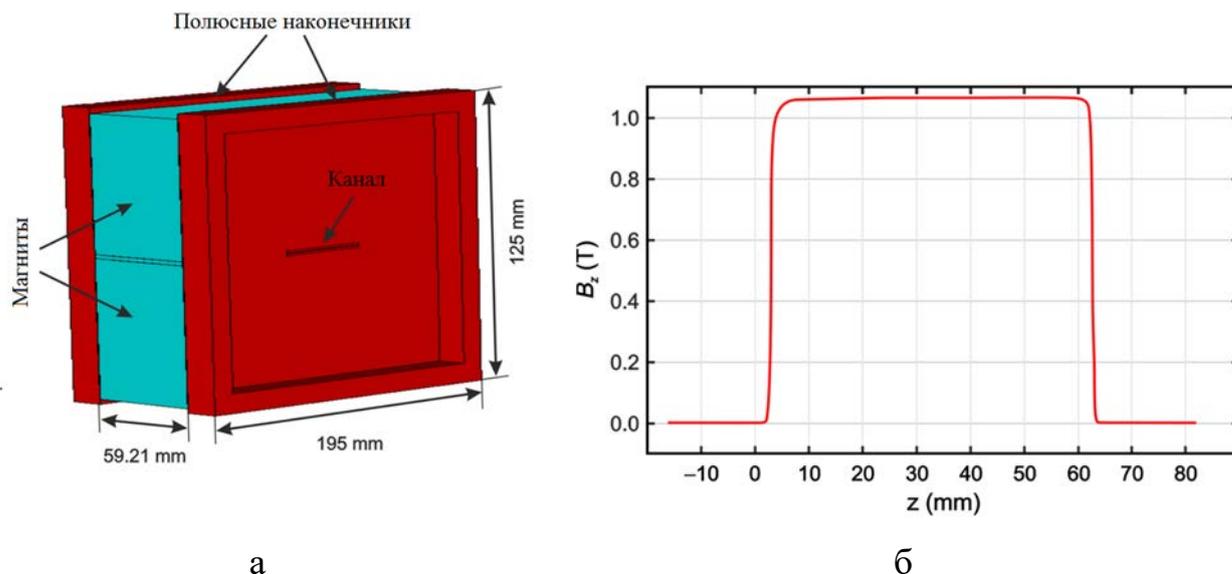


Рис. 1.11. Схема магнитной системы (а) и аксиальный профиль компоненты магнитного поля (б)

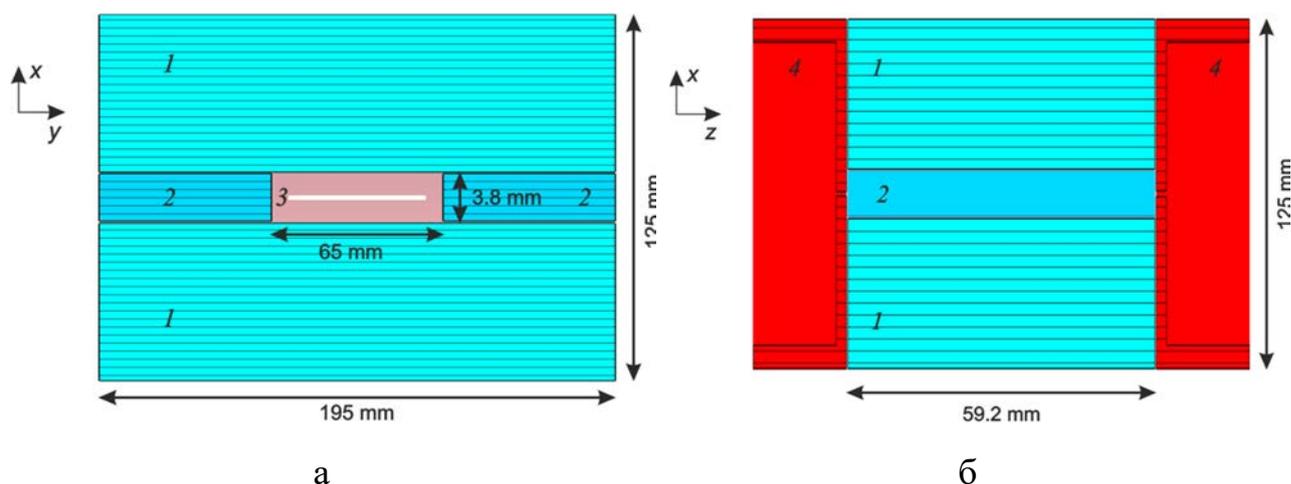


Рис. 1.12. Вид в разрезе магнитной системы в плоскости xy (а) и в плоскости xz (б): 1 – верхний и нижний магниты; 2 – боковые магниты; 3 – пролётный канал; 4 – полюсные наконечники

Как видно из Рис. 1.12, система состоит из массивных верхнего и нижнего постоянных магнитов, а также из боковых вставок меньшего размера, которые обеспечивают более однородное распределение поля в канале. Поперечные размеры зазора магнитной системы составляют $3.8 \text{ мм} \times 65.0 \text{ мм}$, то есть имеется достаточно места для размещения ВЧ-пакета. Поперечная (боковая) компонента магнитного поля внутри зазора пренебрежимо мала. При проектировании полюсных наконечников предполагалось, что они изготовлены из сплава

$\text{Co}_{47}\text{Ni}_{18}\text{Fe}_{45}$, который обладает высоким магнитным полем насыщения $B_s \approx 2.08$ Тл, см., например, [73].

1.3.3. Моделирование формирования и транспортировки ленточного пучка

Для первоначального проектирования фокусирующих электродов и профиля магнитного поля был использован 2-D метод синтеза, описанный в разделе 1.2. Была разработана электронная пушка с магнитно-экранированным катодом размером $0.8 \times 0.8 \text{ мм}^2$. Катод имеет вогнутую цилиндрическую поверхность, радиус кривизны которой составляет 4.93 мм. Расстояние между катодом и анодом около 4.3 мм. В соответствии с результатами проектирования ЗС [101], ускоряющее напряжение было выбрано равным 19.75 кВ. На Рис. 1.13 представлен схематический трехмерный вид электронной пушки. Электрод, фокусирующий пучок, имеет форму прямоугольного рупора.

Предполагается, что из каждой точки на поверхности катода одновременно эмитируется несколько частиц, которые имеют энергетический разброс, соответствующий распределению Максвелла–Больцмана при температуре катода 1200°C , а также угловой разброс до 5° . Рис. 1.14 дает пояснение о том, как вводится угловой разброс частиц.

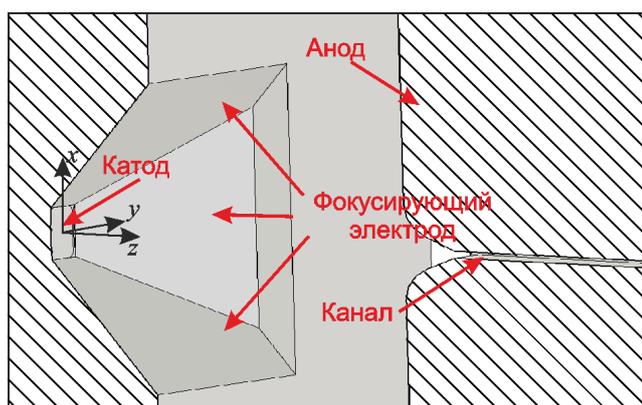


Рис. 1.13. Трехмерная схема электронной пушки

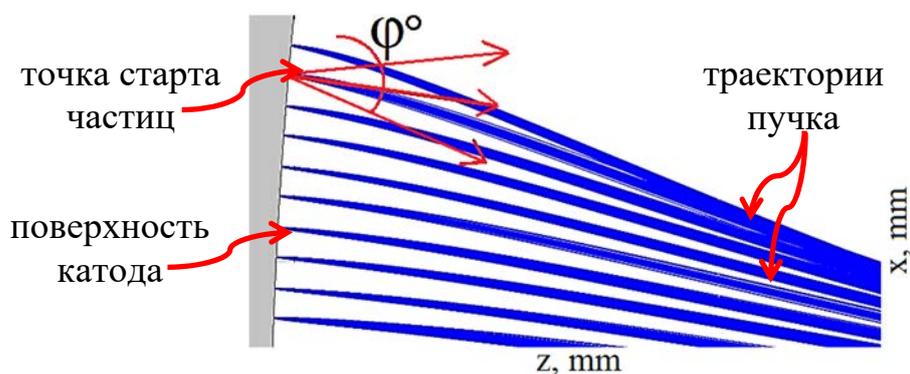


Рис. 1.14. К вопросу об учете углового разброса частиц

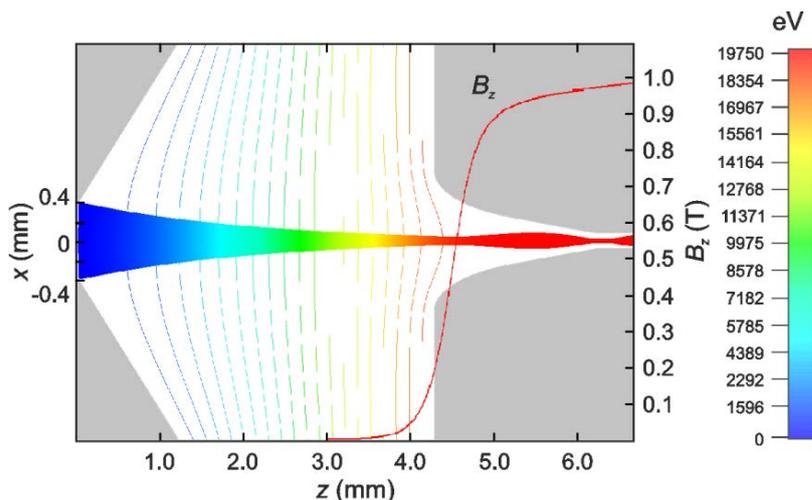


Рис. 1.15. Траектории частиц и эквипотенциальные линзы в области пушки

Также для моделирования в пакете CST необходимо задать работу выхода электронов. В соответствии с данными экспериментальных измерений, представленными в разделе 4.1, она выбрана равной 2.055 эВ. При таких параметрах ток электронного пучка составляет 96 мА.

Моделирование демонстрирует возможность фокусировки ленточного ЭП с током в канал с размерами 0.1 мм×0.85 мм. На Рис. 1.13, Рис. 1.15 показана схема пушки в разрезе и траектории электронов, построенные в средней плоскости $y=0$. В плоскости кроссовера толщина пучка составляет 0.05 мм, то есть компрессия составляет ~16 единиц по вертикали. Также боковые фокусирующие электроды обеспечивают небольшую компрессию по оси y . Отметим, что эти электроды расположены под углом 54.8° к поверхности катода, но по отношению к электронному пучку при этом соблюдается «пирсовский» угол в 67.5° , что согласуется с рекомендациями по разработке ЭОС из работы

[74].

Также, вследствие влияния лепестков фокусирующих электродов, плотность тока на поверхности катода распределена неравномерно. В итоге средняя плотность тока на катоде составляет 15.6 А/см^2 , в то время как максимальная плотность тока в канале достигает примерно 250 А/см^2 .

Далее исследовалась транспортировка пучка в канале прямоугольного сечения $0.1 \times 0.85 \text{ мм}$. Моделирование областей пушки и канала осуществлялось совместно; при этом распределение магнитного поля импортировалось из результатов моделирования магнитной системы. В модели ЭОС частицы пучка, пролетающие сквозь правую границу пролетного канала, считаются осевшими на коллектор.

На Рис. 1.16 показаны проекции ЭП на плоскости xz и xz . В плоскости xz видны периодические пульсации пучка с пространственным периодом $\lambda_c = 2\pi v_{0z} / \omega_c \approx 2.9 \text{ мм}$. Здесь v_{0z} — продольная скорость пучка, определяемая анодным напряжением электронной пушки, равным 19.75 кВ , $\omega_c = eB_{0z} / m$ — циклотронная частота. В плоскости xz пучок имеет более сложную форму, в частности, период пульсаций близок к значению $\lambda_c / 2$.

Такая картина контрастирует с поведением прямого пучка, погруженного в однородное магнитное поле 1.1 Тл , см. Рис. 1.17. При моделировании прямого пучка считалось, что он имеет равномерное распределение плотности тока на катоде, размер которого $0.05 \text{ мм} \times 0.8 \text{ мм}$. Поверхность катода плоская, угловой разброс частиц на катоде не учитывался. Остальные параметры (температура катода, работа выхода, напряжение пучка), оставались теми же, что и в предыдущем случае. Как видно из Рис. 1.17, в случае прямого пучка период пульсаций как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях одинаков.

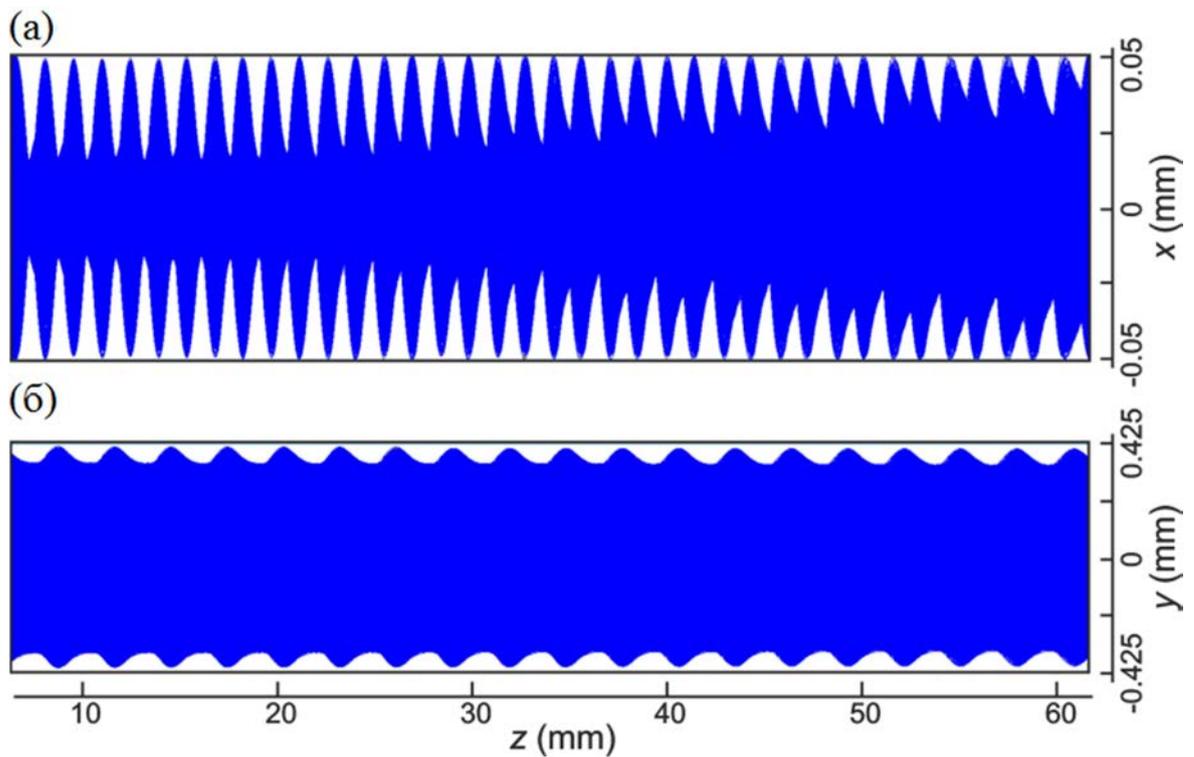


Рис. 1.16. Профиль пучка, создаваемого ЭОС с компрессией, в однородном магнитном поле: (а) плоскость xz , (б) плоскость yz

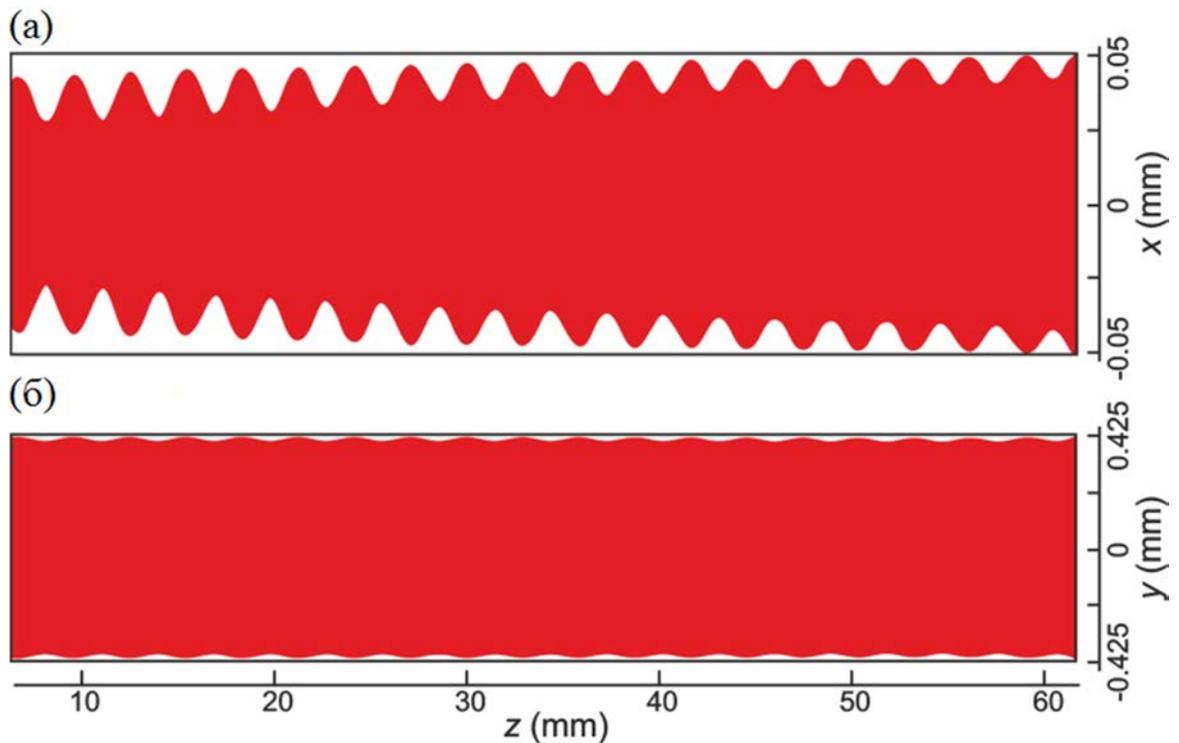


Рис. 1.17. Профиль прямого пучка, транспортируемого в однородном магнитном поле: (а) плоскость xz , (б) плоскость yz

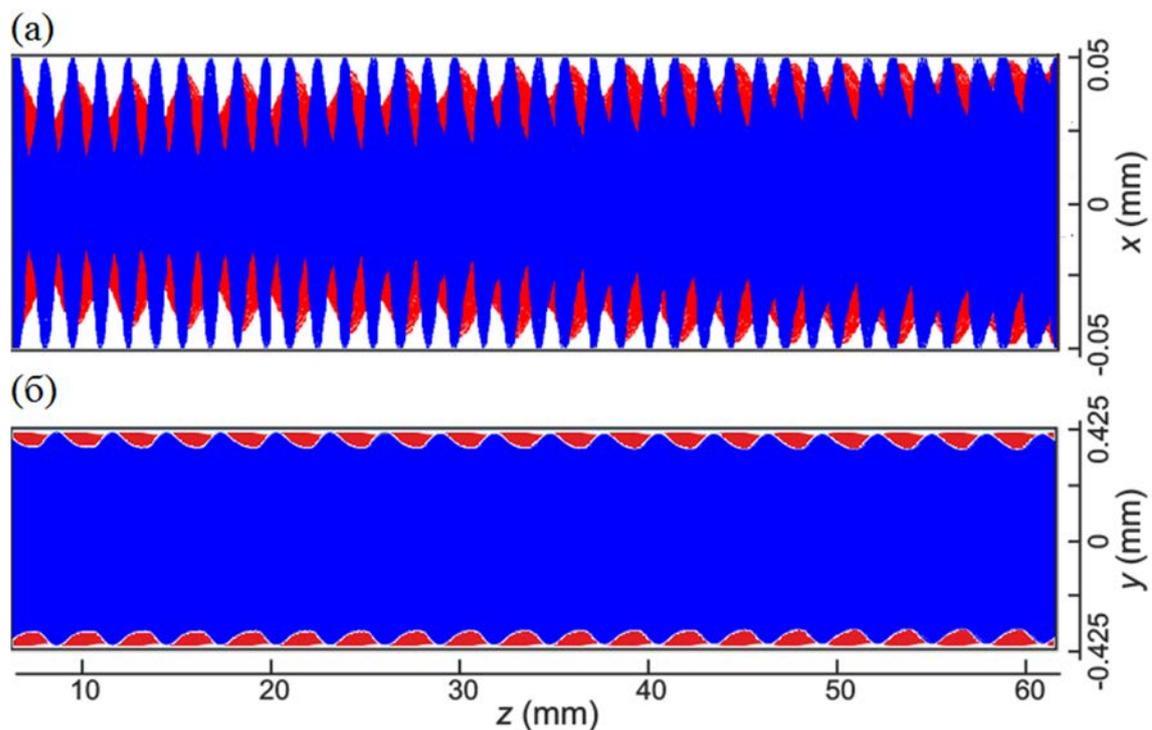


Рис. 1.18. Профили пучков в однородном магнитном поле (без компрессии – красный, с компрессией – синий). (а) плоскость xz , (б) плоскость yz

На Рис. 1.18 представлено сравнение пучков с компрессией (синий цвет) и без компрессии (красный). В плоскости xz пучок без компрессии немного шире, так как на нем не сказывается влияние боковых фокусирующих электродов.

Как видно из Рис. 1.16, крайние частицы осаждаются на верхней и нижней стенках канала на протяжении большей части его длины. Тем не менее, моделирование показало, что перехват частиц стенками канала очень мал, а токопрохождение составляет почти 99%. Поэтому необходимо провести более тщательное исследование структуры пучка.

На Рис. 1.19 (а) показаны поперечные сечения пучка на разных расстояниях от катода, демонстрирующие сложную «тонкую структуру» распределения частиц. Пучок имеет центральную часть с высокой плотностью (ядро) и периферийную часть с низкой плотностью (гало). При компрессии в области пушки частицы гало приобретают достаточно высокие поперечные скорости, которые могут достигать 10% от продольной скорости. Соответственно, радиусы их циклотронных орбит могут достигать 40-50 мкм.

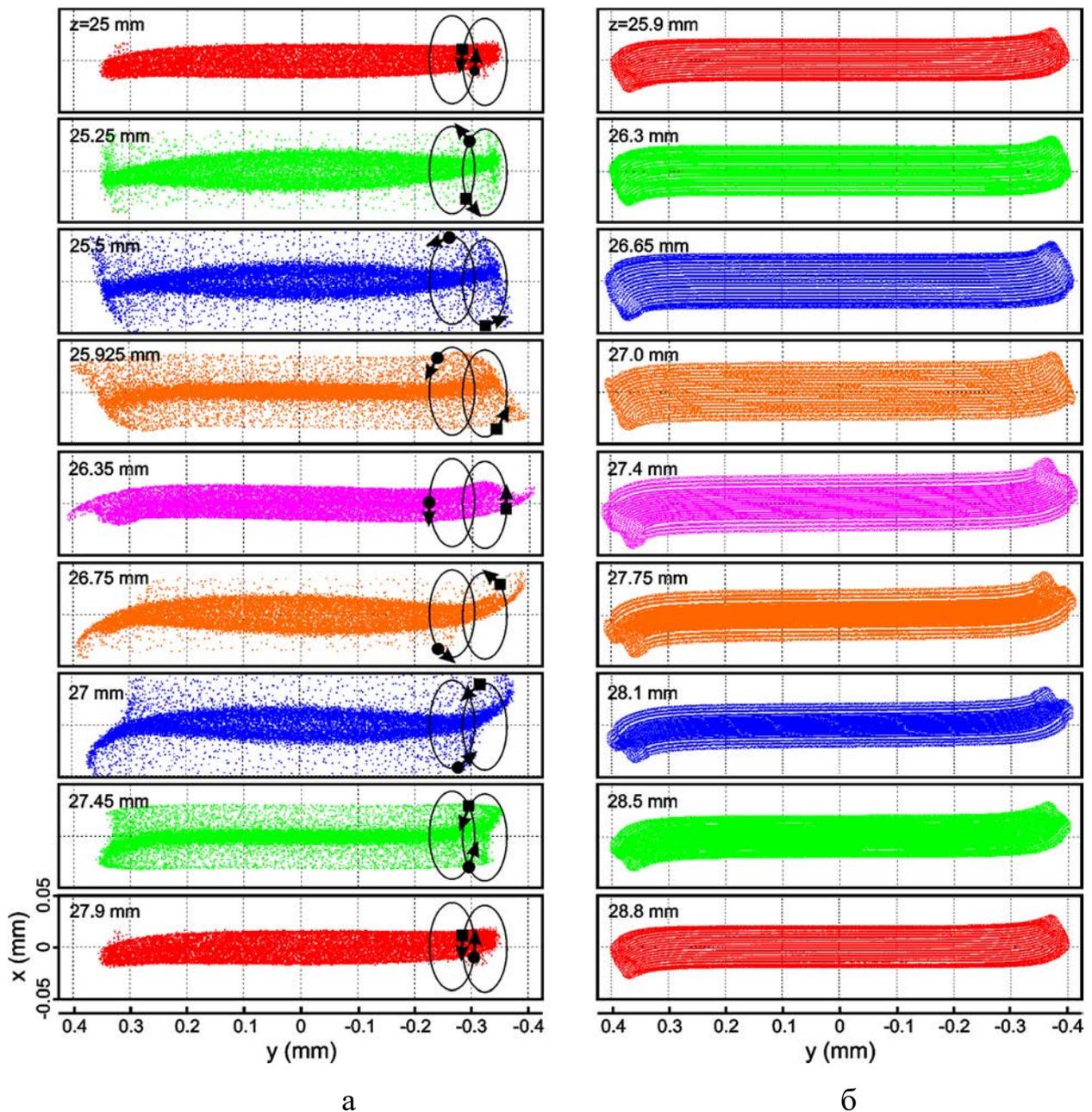


Рис. 1.19. Вид поперечного сечения пучка с компрессией (а) и без компрессии (б) на различном расстоянии от катода

Различные частицы, которые колеблются противофазно, обеспечивают двоякопериодическую огибающую пучка в плоскости xz . На Рис. 1.19(а) отмечены положения двух таких частиц. В сечениях $z=25$ мм, 26.35 мм и 27.9 мм пучок имеет минимальную толщину, а в сечениях $z=25.5$ мм и 27.0 мм — максимальную. Таким образом, хорошо видно, что на одном периоде имеются два минимума и два максимума. Такая структура распределения частиц сохраняется по всей длине системы. Поэтому осаждение частиц на стенках

канала, которое видно на Рис. 1.16, не приводит к нарушению токопрохождения пучка.

Напротив, несжатый пучок, эмитируемый катодом, погруженным в магнитное поле, имеет довольно равномерное распределение частиц, как показано на Рис. 1.19(б). В этом случае на одном периоде существует только одно положение с максимальной ($z=27.4$ мм) и минимальной толщиной ($z=25.5$ мм или 28.8 мм). Пучок пульсирует, а его края заворачиваются против часовой стрелки. Такое поведение обсуждается во многих работах, см., например, [25, 69-71].

Также отметим, что в случае пучка с компрессией дрейф ведущих центров орбит электронов выражен в гораздо меньшей степени (см. Рис. 1.19(б)). Это объясняется тем, что ведущие центры расположены вблизи плоскости $x=0$ где вертикальная составляющая электрического поля пространственного заряда мала, что приводит к минимизации сдвигового дрейфа в скрещенных полях [25].

Сказанное иллюстрирует Рис. 1.20, на котором приведены проекции траекторий некоторых частиц на плоскость xz (а) и xy (б). На этом рисунке также видны плотное ядро и разреженное гало, причем краевые частицы практически колеблются между верхней и нижней стенками канала. На Рис. 1.21 показаны траектории двух пар частиц, противофазно дрейфующих на противоположенных краях пучка. По траекториям частиц с малым диаметром ведущих центров можно отслеживать процесс дрейфа ядра пучка, которое постепенно расширяется по мере транспортировки, тогда как для частиц, образующих «гало», дрейф выражен значительно слабее.

Рассмотрим Рис. 1.22(а), где показана проекция краевой частицы пучка на плоскость xz . В данном случае была выбрана траектория одной из частиц пучка, которая находится в его «гало». Аналогичные ей траектории стартуют с края катода, где плотность токоотбора меньше, чем в центре, и они обладают большими поперечными скоростями. С этой картиной контрастирует распределение плотности тока в ЭП, показанное на Рис. 1.22(б). Можно наблюдать, что ядро пучка, в котором сосредоточена основная часть плотности

тока, транспортируется с умеренными пульсациями и без оседания на стенки канала.

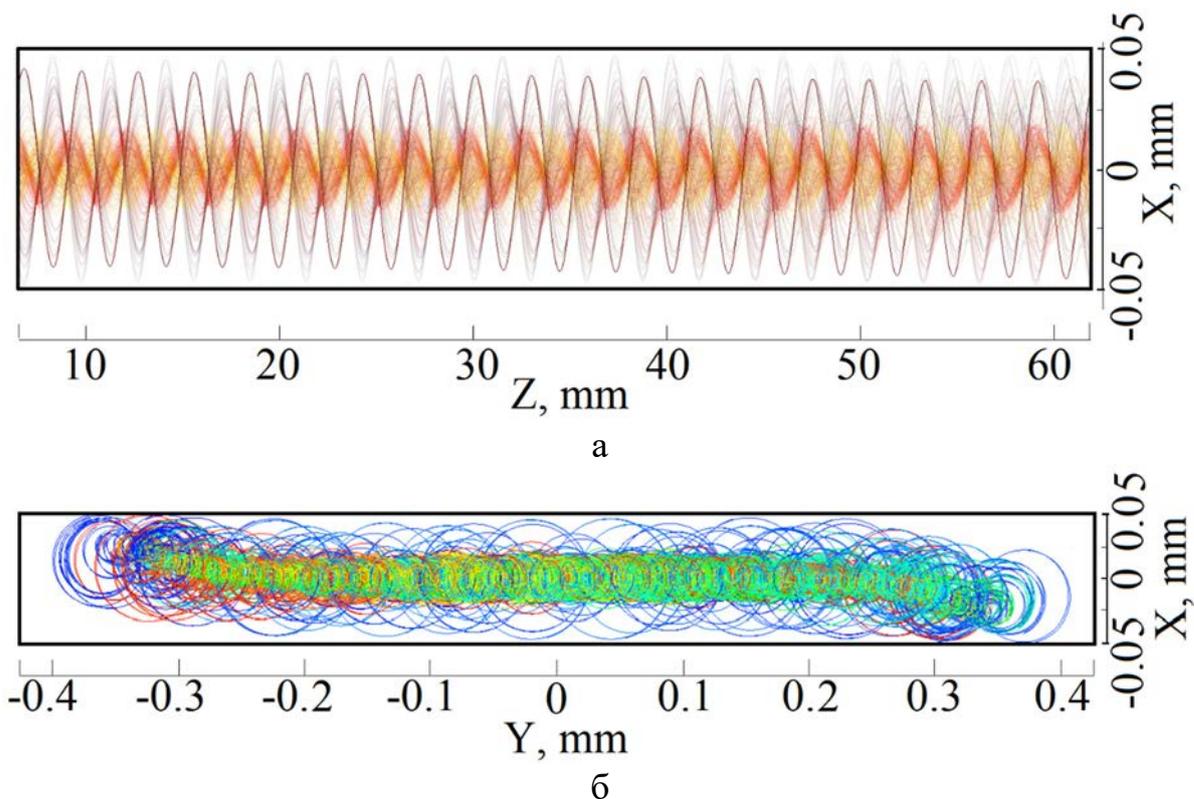


Рис. 1.20. Траектории случайно выбранных частиц в многоскоростном пучке с компрессией: (а) проекция на плоскость xz , (б) проекция на плоскость xy

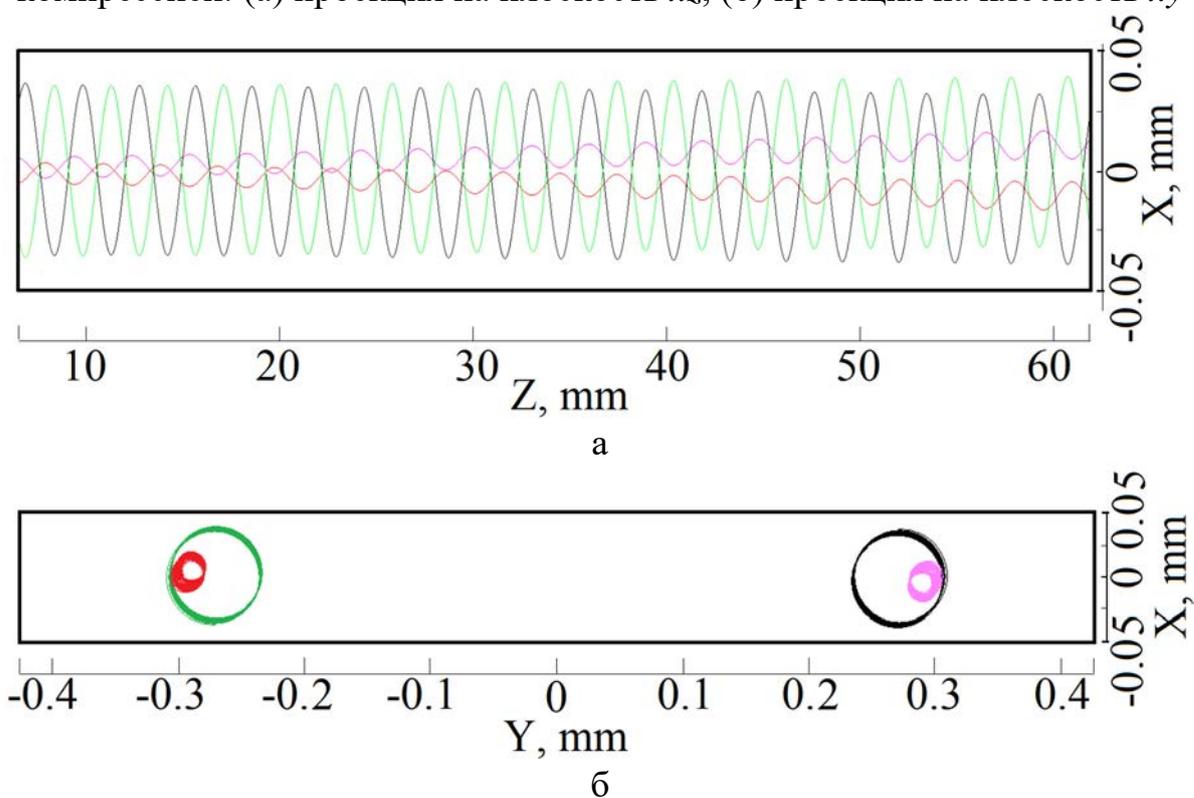


Рис. 1.21. Траектории двух пар частиц, дрейфующих противофазно: (а) проекция на плоскость xz , (б) проекция на плоскость xy

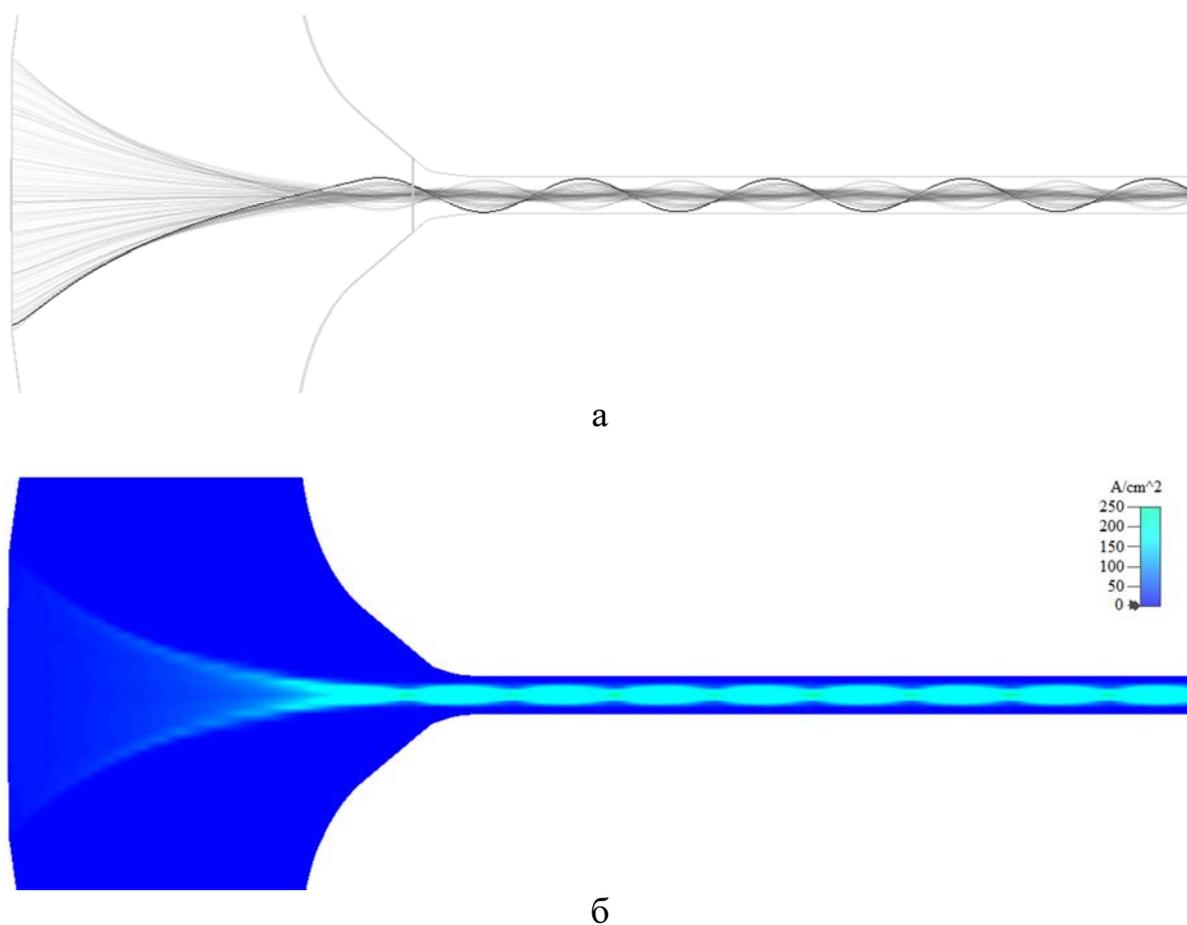


Рис. 1.22. (а) Проекция траекторий на плоскость xz , выделена одиночная «краевая» частица. (б) Проекция плотности тока на плоскость xz

1.3.4. Влияние асимметрии и несоосности на транспортировку ЭП

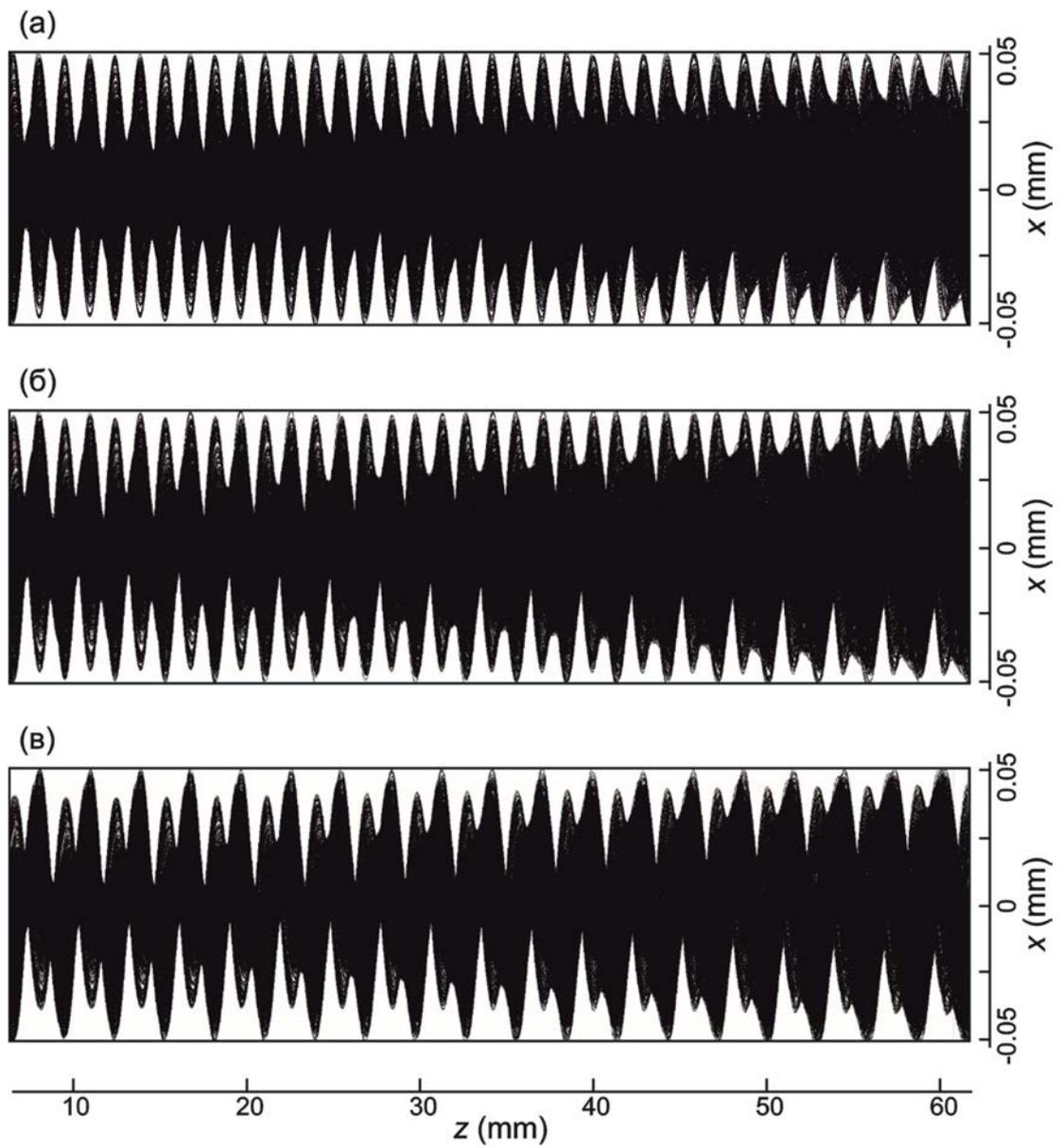
Выше рассматривался случай, когда все элементы ЭОС расположены соосно. Однако сборка и юстировка микроразмерной ЭОС является сложной задачей, и возможные несоосности могут сильно повлиять на транспортировку пучка. Численным оценкам влияния несоосностей в ЭОС посвящено достаточно много публикаций, однако в них рассматриваются преимущественно цилиндрические пучки (см., например, [75, 76]). Такие оценки фактически проводились для любых прототипов или серийных приборов. Также существуют различные экспериментальные методики оценки технологических допусков, основанные на исследовании макетов ЭОС.

В связи с этим было проведено численное исследование транспортировки пучка в ЭОС с учетом отклонений геометрических размеров и несоосности ее элементов. Исследовались вращения пушки относительно канала в различных плоскостях, смещения канала по вертикали и горизонтали, угловой разброс частиц на катоде, а также смещение магнитного поля. На Рис. 1.23 показаны профили пучка при различных углах поворота. Видно, что при повороте на угол 0.3° наблюдается заметная деформация пучка.

Известно, что на форму пучка большое влияние оказывает неоднородность эмиссии, возникающая за счет шероховатости катода (см., например, [81]). Поэтому изучалось влияние добавочного углового разброса частиц на катоде, что моделирует влияние шероховатости. На Рис. 1.24 приведены профили пучка при различном угловом разбросе. Зависимость от данного фактора выражена гораздо слабее и даже при разбросе 10° не наблюдается существенная деформация пучка.

Рис. 1.25 иллюстрирует влияние смещения нарастающей области магнитного поля относительно точки его согласования с ЭП. Результаты расчетов демонстрируют, что при смещении данной точки вдоль оси z в пределах ± 0.6 мм сохраняется высокое токопрохождение на уровне 99%, хотя при этом наблюдается возмущение пучка.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что токопрохождение наиболее чувствительно к повороту пушки в плоскости xz , а также к ее вертикальному смещению по оси x . На Рис. 1.26 представлены зависимости коллекторного тока и тока, перехваченного стенками канала, для этих двух случаев. Значительный перехват начинается, когда смещение по повороту пушки в плоскости xz превышает 0.3° (Рис. 1.26 (а)), а вертикальное смещение по оси x составляет около 20-25 мкм (Рис. 1.26 (б)). Такие допуски вполне достижимы для существующих технологий.



в

Рис. 1.23. Профили пучка в плоскости xz при повороте пушки на угол $0,1^\circ$ (а), $0,2^\circ$ (б) и $0,3^\circ$ (в)

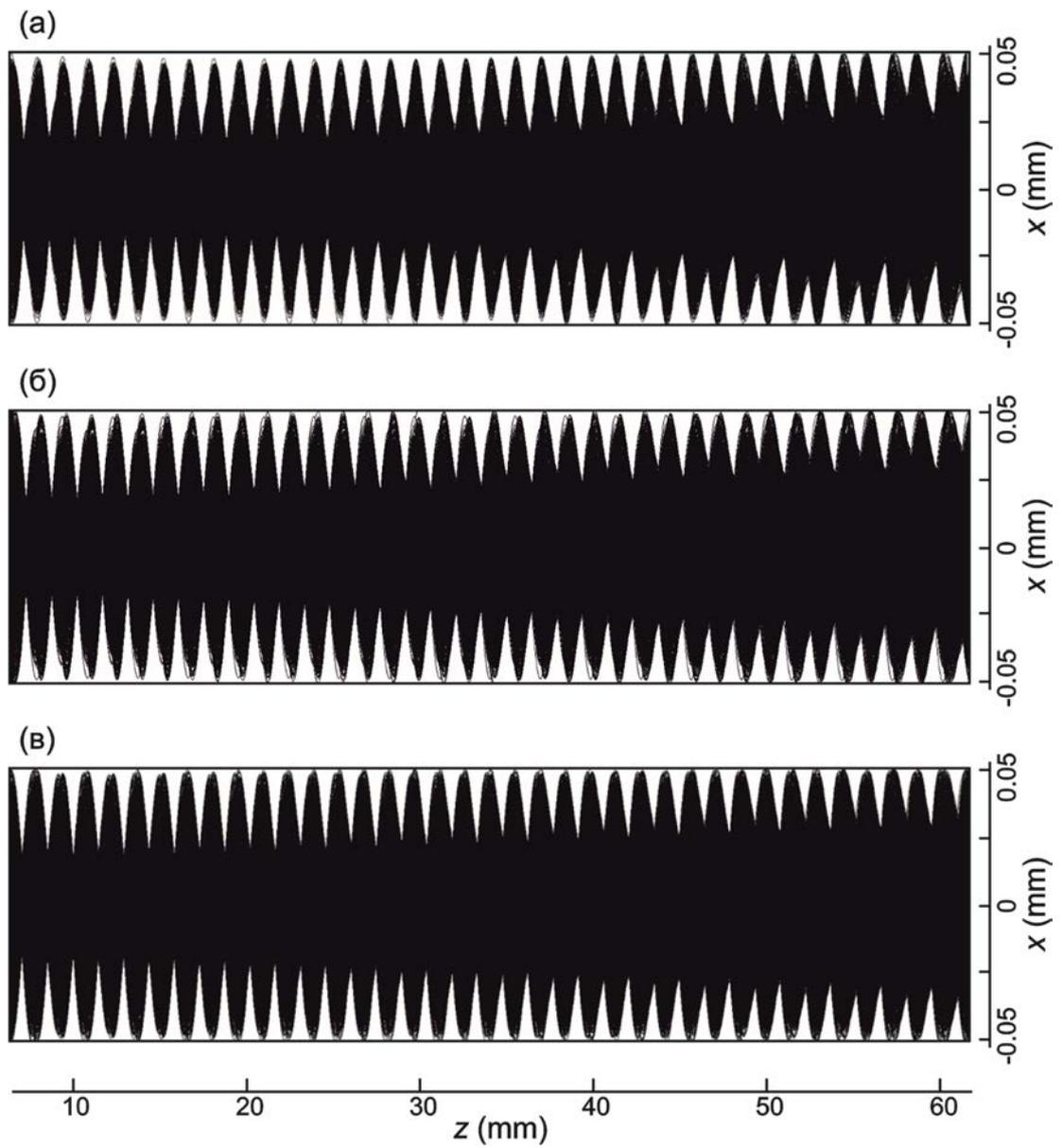


Рис. 1.24. Профили пучка в плоскости xz при угловом разбросе частиц на катоде 2° (а), 5° (б) и 10° (в)

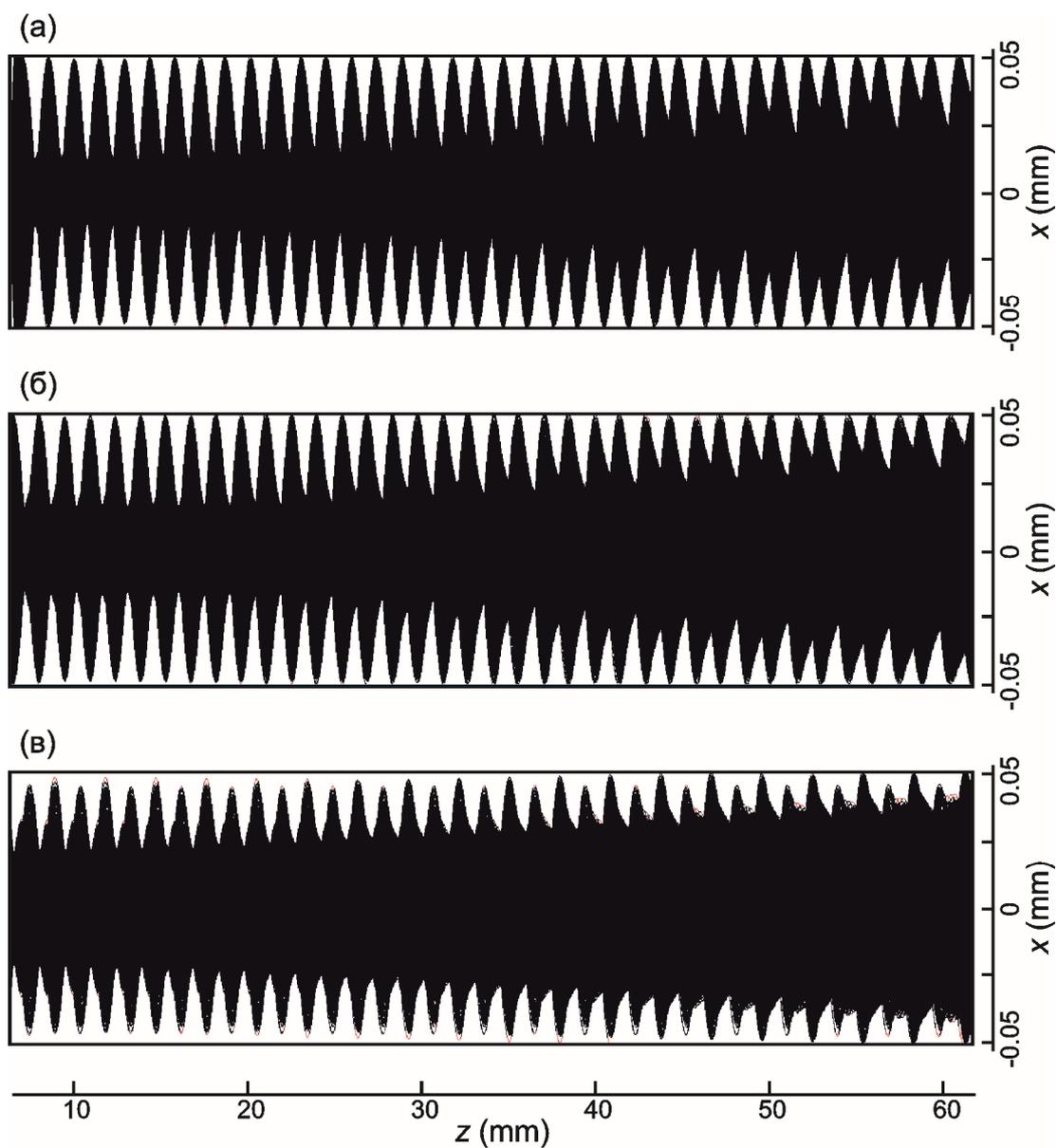


Рис. 1.25. Профили пучка в плоскости xz при смещении магнитной системы относительно оптимальной точки согласования z_1 оси z : $\Delta z = -0.6$ мм (а), 0 (б) и $+0.6$ мм (в)

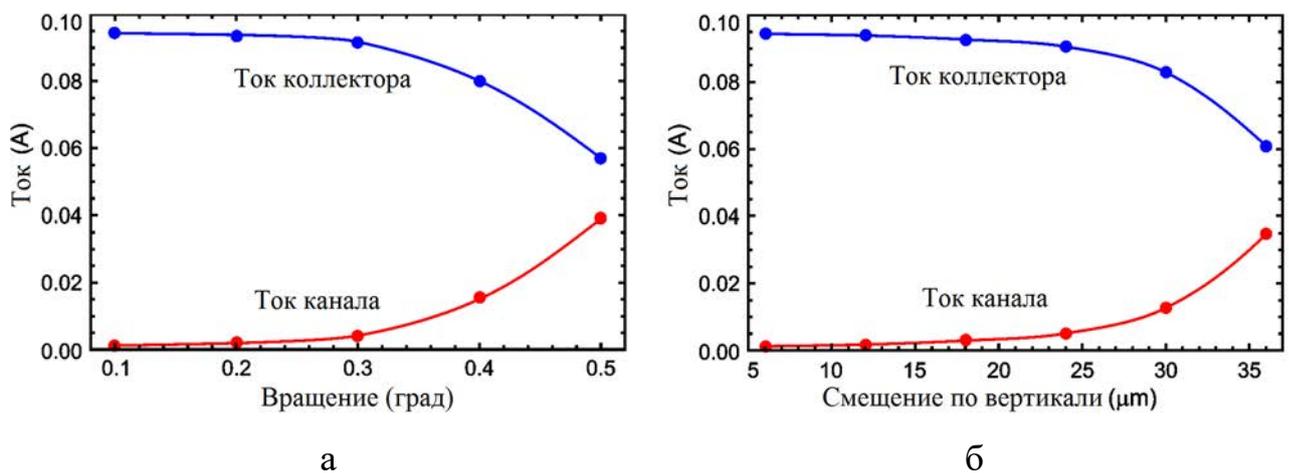


Рис. 1.26. Коллекторный ток и ток пролетного канала, полученный при вращении катода (а) и смещения катода по вертикали (б)

Для сравнения укажем, что при смещении пушки вдоль оси y на величину до 30 мкм токопрохождение сохраняется на уровне 99%, а при смещении на 35 мкм составляет около 98%. При повороте пушки в плоскости yz на величину до 0.3° токопрохождение сохраняется на уровне 99%.

1.4. Выводы

Таким образом, в данной главе проведено синтезирование ЭОС формирования ленточного ЭП с компрессией. Определены геометрические параметры пушки, электродов и пролетного канала синтезированной ЭОС и проведено их исследование с помощью пакетов Lorenz-3EM и CST Studio. Электронная пушка имеет четырехлепестковый рупорный фокусирующий электрод и катод с криволинейной цилиндрической поверхностью с радиусом кривизны 4.93 мм. В пушке обеспечивается компрессия ~ 16 ед. в вертикальном направлении, что обеспечивает толщину пучка в кроссовере около 50 мкм, напряжение анода — 19.75 кВ, ток пучка — 96 мА.

Проведено проектирование магнитной фокусирующей системы, которая состоит из двух полюсных наконечников, верхнего и нижнего магнитов и боковых магнитов-вставок для уменьшения влияния боковой компоненты магнитного поля. Магнитное поле на оси системы составляет 1.1 Тл, а протяженность однородного участка — 55 мм.

Исследован процесс транспортировки ленточного ЭП в микроразмерном канале сечением $0.1 \text{ мм} \times 0.85 \text{ мм}$. Показано, что пучок имеет сложную структуру распределения частиц, а именно, высокоплотную центральную часть и краевую низкоплотную диффузную область с малым количеством частиц. Несмотря на оседание краевых частиц на стенки канала, токопрохождение превышает 99%.

Изучено влияние асимметрии и несоосности на транспортировку пучка в ЭОС. Исследование показывает, что наибольшее влияние оказывает поворот пушки относительно канала в плоскости xz (максимально допустимый угол поворота до 0.3°) и вертикальное смещение пушки относительно канала (до 20-25 мкм).

ГЛАВА 2. ТРАНСПОРТИРОВКА ПРОТЯЖЕННОГО ЛЕНТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА СО СЛОЖНОЙ СТРУКТУРОЙ В РЕВЕРСНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

2.1. ЭОС с реверсным магнитным полем

2.1.1. Вводные замечания

Использование фокусирующей системы с реверсным магнитным полем имеет ряд преимуществ по сравнению с фокусировкой постоянным однородным магнитным полем. Во-первых, реверсные системы имеют лучшие массогабаритные характеристики. В теории использование реверсной системы позволяет уменьшить вес в $(n+1)^2$ раз по сравнению с системой с постоянным магнитным полем (n -число реверсов) [23]. Различные вопросы фокусировки реверсным полем рассматривались в диссертации А.Н. Дармаева [77], однако в ней исследовались только цилиндрические пучки. В то же время, следует ожидать, что в случае ленточного ЭП реверсная система позволит компенсировать его поворот в пролетном канале, так как при смене полярности поле начинает закручивать частицы в обратную сторону.

В последнее время активно разрабатываются магнитные периодические системы для фокусировки ленточных ЭП: так называемые системы типа РСМ (periodic cusped magnet) [78-80]. В данной главе рассматривается фокусировка ленточного ЭП в системе, содержащей один реверсный переход. Такая система конструктивно существенно проще, чем системы типа РСМ. В [77] при рассмотрении многолучевого ЭП было показано, что для уменьшения деформации парциального пучка и минимизации его дрейфа по спирали необходимо обеспечить влет электронов в область реверса в фазе с минимумом пульсации и как можно ближе к оси парциального канала. Следовательно, в случае ленточного ЭП область реверса также следует размещать в минимумах пульсаций пучка по оси z .

Основной трудностью при расчетах и конструировании систем с реверсными полями является то, что область смены знака магнитного поля

должна быть соизмерима с протяженностью пульсации пучка, но в тоже время не должно достигаться насыщение магнитных наконечников. Обычные полюсные наконечники из стали с регламентированными магнитными свойствами при малой толщине могут не обеспечить требуемую крутизну магнитного поля индукцией $1.0 \div 1.5$ Тл. В качестве материала наконечников вызывает интерес использование сплава из кобальта, никеля и железа $Co_{47}Ni_{18}Fe_{45}$ [73].

2.1.2. Методика ввода реверсного поля

Как уже отмечалось выше, необходимо вводить реверс поля в область с минимальной пульсацией пучка, которая предшествует его оседанию на стенку. Теоретически такую операцию можно повторять до бесконечности, но существуют определенные ограничения. В частности, для ленточных пучков из-за высокой плотности тока и разброса частиц по скоростям магнитное поле в каждой следующей секции магнитной системы должно увеличиваться, чтобы предотвратить оседание пучка в области реверсного перехода.

Исходя из того, что заметное токооседание в системе с однородным полем начинается примерно в середине транспортной длины, реверс следует вводить в этой области, т.е. при $z \approx 30$ мм. Рассмотрим центральную часть ленточного пучка, фокусируемого однородным магнитным полем, представленную на Рис. 2.1. Реверс может быть введен в различных точках минимальных значений пульсаций пучка. Однако, как уже отмечалось в разделе 1.3.3, в случае пучка с компрессией вследствие большого разброса по скоростям на периоде имеются два локальных минимума \min_1 и \min_2 , причем на первой половине транспортной длины глубина этих минимумов примерно одинакова, а далее один из них становится заметно глубже другого. Поэтому целесообразно введение реверсного поля в области более глубокого локального минимума \min_1 , который располагается ближе всего к середине пучка. Этот локальный минимум находится на расстоянии ≈ 27 мм от пушки (см. Рис. 2.1). В этом минимуме необходимо согласовать переходную область магнитного поля с пучком.

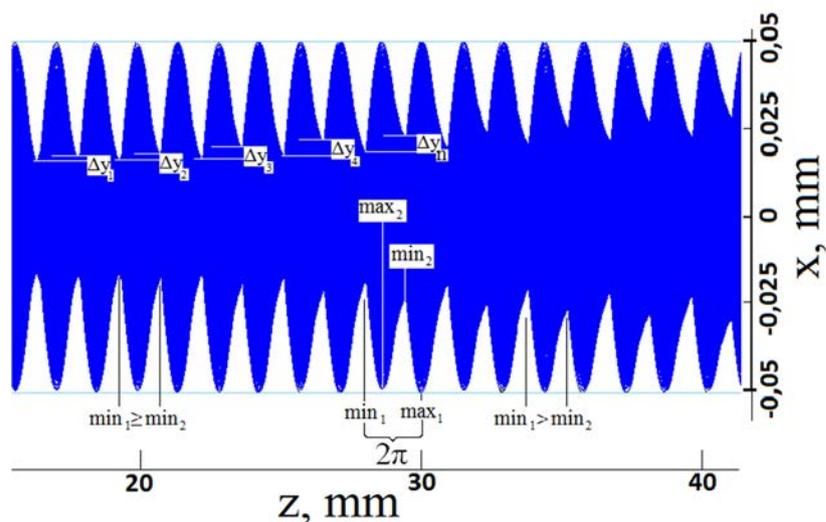


Рис. 2.1. Центральная часть пучка при фокусировке однородным полем, вид сбоку

2.1.3. Магнитная система с реверсным полем

Магнитная система с однородным полем (см. п. 1.3.2) была доработана с учетом дополнительного полюсного наконечника. Вследствие этого стало возможным уменьшить вес и размер магнитов. На Рис. 2.2 представлена размерная схема данной системы, а также распределение продольной компоненты магнитного поля вдоль оси. В первой секции магнитное поле на однородном участке равно 1.1 Тл, т.е. такое же, как и в системе с однородным полем, а во второй секции оно увеличено до 1.6 Тл. Между секциями располагается полюсный наконечник толщиной 1 мм.

Сравнение массогабаритных параметров двух систем представлено в табл. 2.1. Значения массы были вычислены исходя из известного значения плотности сплава магнитов из материала $Nd_2Fe_{14}B$, которое равно 7.4 г/см^3 . Данные для обеих систем приведены без учета веса полюсных наконечников.

Расчет конструкции пушечного и коллекторного наконечников допускает стенки с толщинами $10 \div 30 \text{ мм}$, которых вполне достаточно, чтобы обеспечить требуемую величину поля в области пушки и канала³. Однако в области реверса требуется наиболее резкий переход поля с переменной знака.

³ Аналогичные значения толщины наконечников использовались в п. 1.3.2.

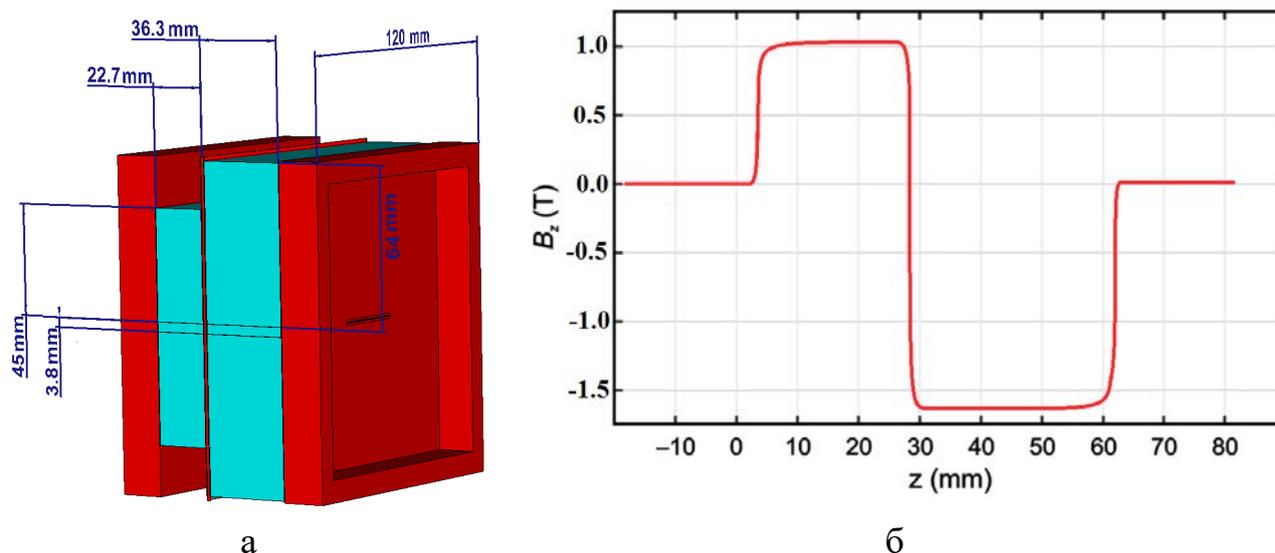


Рис. 2.2. Схема магнитной системы с реверсным магнитного поля (а) и профиль продольной компоненты поля B_z (б)

Таблица 2.1. Сравнение веса магнитов магнитных систем

Тип системы	Объем магнитов	Итоговый вес магнитов
Система с однородным полем	2910 см ³	21.5 кг
Система с реверсным полем	811 см ³	6 кг

При сборке системы в идеальном случае два магнита–«кубика» с противоположенными направлением намагниченности размещаются вплотную друг к другу и фиксируются при помощи оснастки (или связующего компаунда). Для небольших магнитов (к примеру, с массой ≤ 0.3 кг, $M=1.05$ Тл) данная операция не представляется сложной. Но в случае массы магнитов, превышающей 1 кг, в конструкции системы должны быть предусмотрены промежуточные наконечники, которые будут выполнять функцию крепежа магнитов. В связи с этим в данной системе в области реверса предусмотрен наконечник толщиной 1 мм.

2.2. Результаты моделирования транспортировки ленточного пучка с компрессией в реверсном поле

Моделирование транспортировки пучка проводилось при помощи пакета CST Studio Suite. На Рис. 2.3 показаны проекции пучка на плоскости xz и yz . На Рис. 2.4 приведено сравнение проекций частиц в системах с однородным и реверсным полем, для чего они наложены друг на друга. В обоих случаях ЭП формируется электронной пушкой с компрессией, описанной в разделе 1.3.3 (см. Рис. 1.13 и Рис. 1.15). Как видно из Рис. 2.4, до введения реверса контуры пучков в пролетном канале идентичны, однако после введения реверса поля пучок сжимается и наблюдается некоторое уменьшение периода пульсаций. Это объясняется увеличением магнитного поля во второй секции реверсной системы.

Таким образом, увеличение магнитного поля во второй секции реверсной системы позволяет избавиться от оседания частиц, тогда как при транспортировке пучка в однородном поле его краевые частицы оседают на стенки пролетного канала практически на всей длине транспортировки. Чтобы устранить оседание в системе с однородным полем потребовалось бы существенно увеличить значение однородного магнитного поля, что привело бы к существенному увеличению размеров и веса магнитной системы (см. также [116]).

Рассмотрим более детально динамику пучка в области реверса. На Рис. 2.5 приведен увеличенный фрагмент Рис. 2.3 в переходной области реверсного поля. Рис. 2.6 демонстрирует распределения частиц в поперечном сечении пучка на разных расстояниях z от катода. Видно, что происходит постепенное сжатие пучка. Частицы, образующие «гало», перемещаются ближе к ядру, и пучок становится значительно более однородным.

Затем процесс компрессии пучка завершается и ЭП транспортируется в ЭОС в магнитном поле, которое изменило свое направление на противоположенное. Теперь рассмотрим Рис. 2.7, где приведены поперечные сечения пучка для различных значений продольной координаты z . Видно, что, начиная с $z \sim 28.38$ мм, под воздействием реверсного поля частицы пучка начинают закручиваться в противоположную сторону.

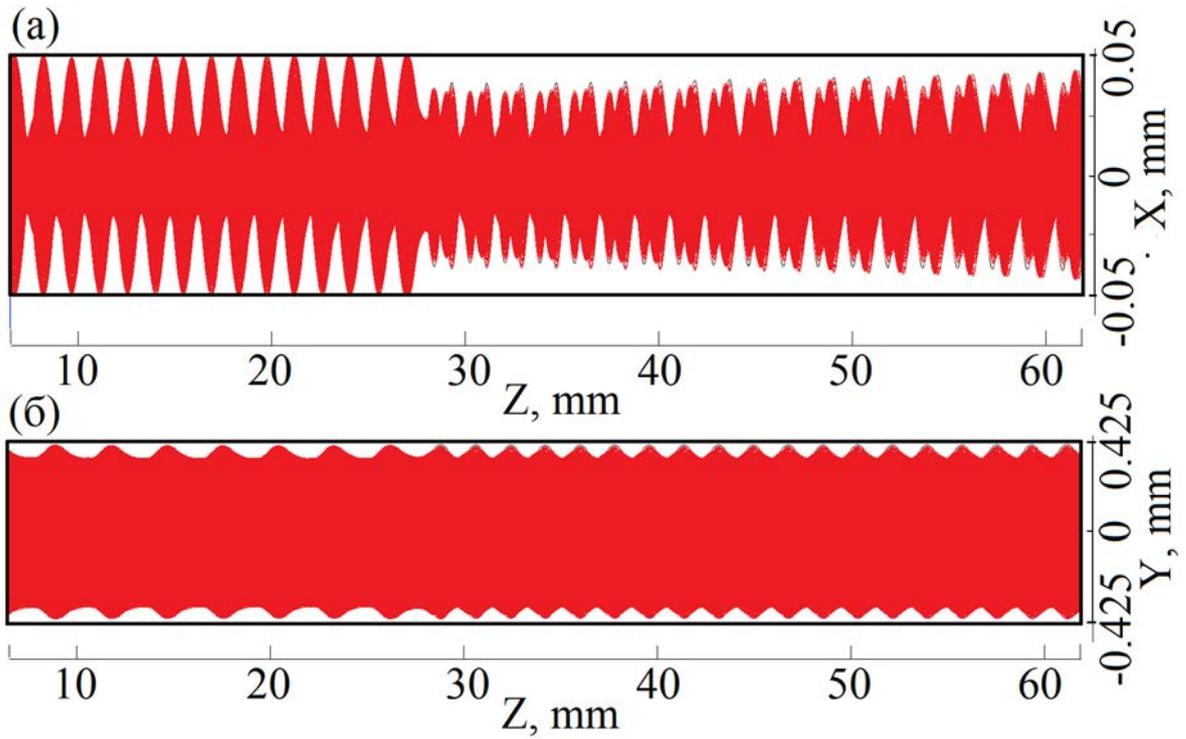


Рис. 2.3. Профиль пучка, транспортируемого в реверсном магнитном поле:

а – вид сбоку, б – вид сверху

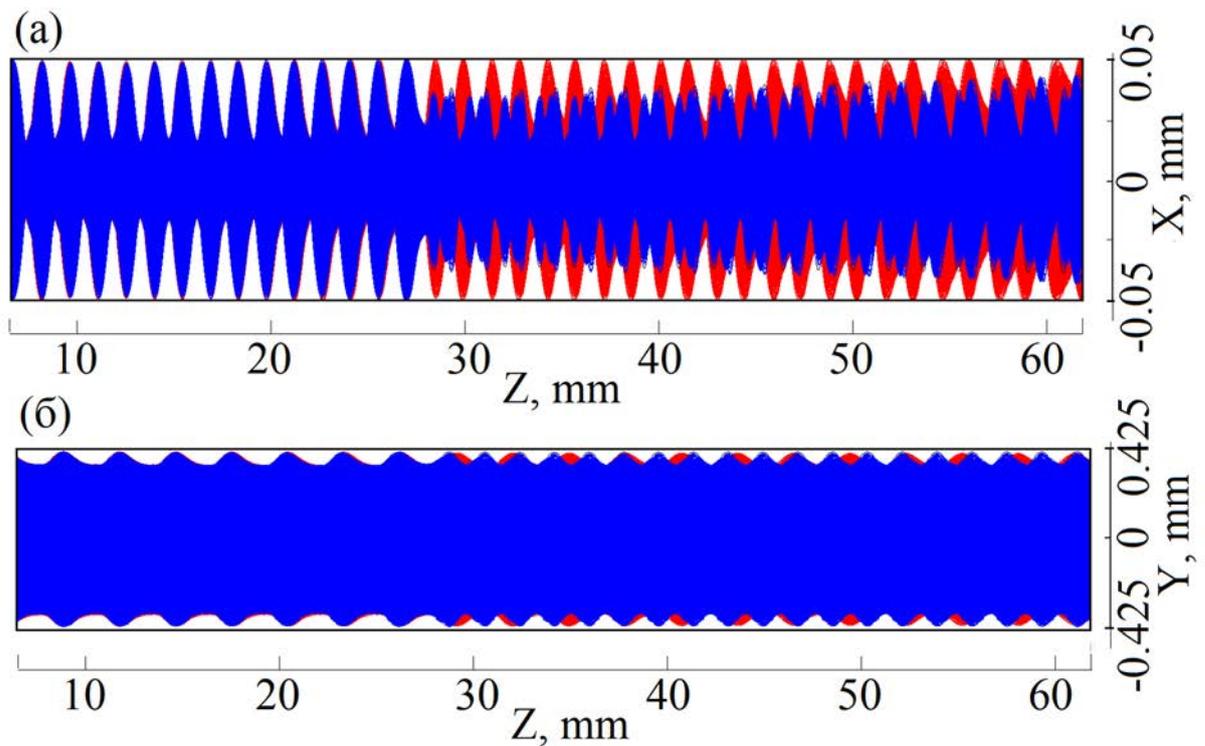


Рис. 2.4. Сравнение профилей пучков, транспортируемых в однородном (красный) и реверсном (синий) магнитных полях

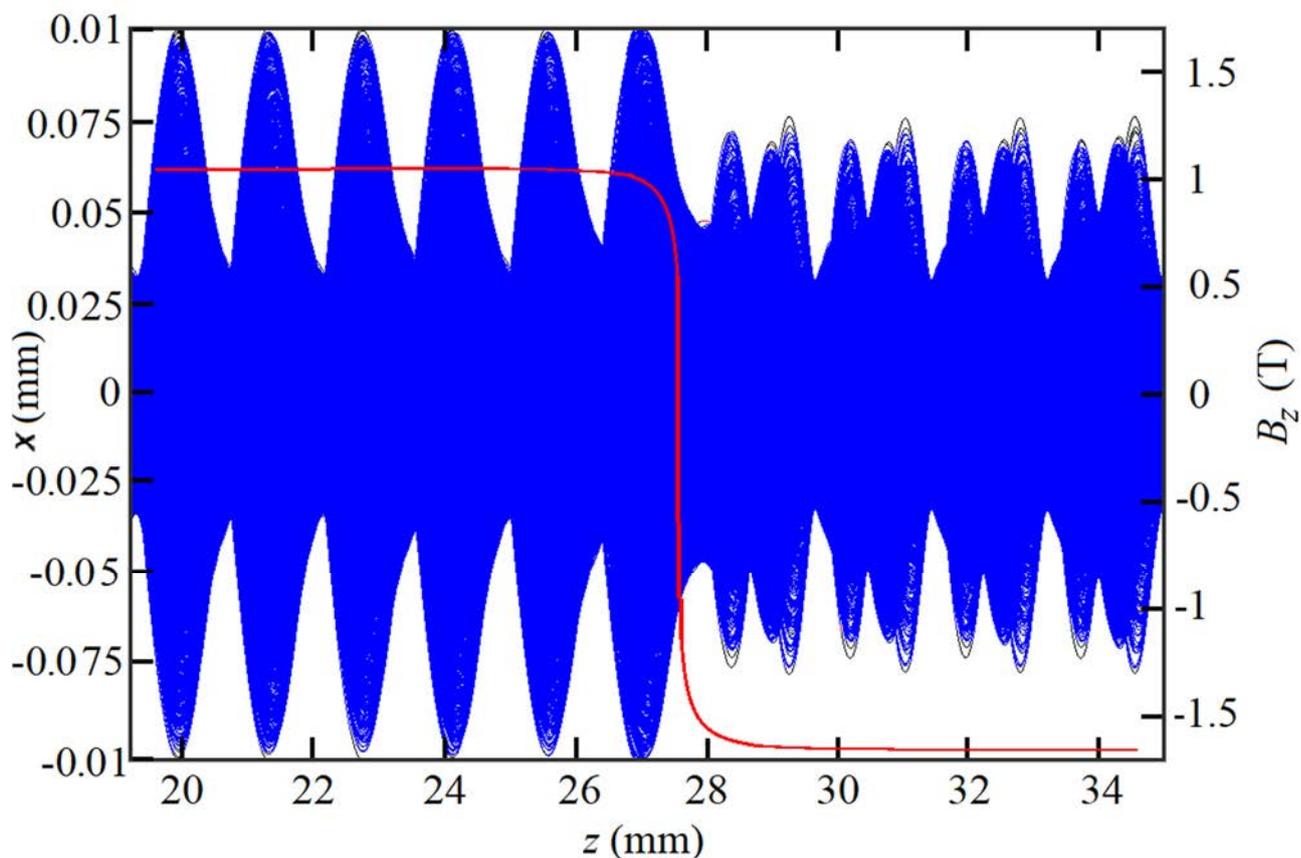


Рис. 2.5. Формирование переходной области пучка в районе реверса

Отметим, что после введения реверсного поля характер пульсаций пучка усложняется. Сечения пучка, приведенные на Рис. 2.7, соответствуют локальным минимумам ($z=27.9$ мм, 28.7 мм и 29.1 мм) и максимумам ($z=28.38$ мм, 29.01 мм и 29.3 мм) толщины пучка. Затем, в точке $z=29.69$ мм располагается еще один глубокий минимум, после чего характер пульсаций повторяется. Тем не менее, несмотря на усложненный характер движения частиц, в целом описанная в разделе 1.3.3 структура пучка, состоящая из ядра и «галло», сохраняется.

Для более подробного исследования структуры частиц в ЭП рассмотрим проекции траекторий некоторых частиц на плоскость xz . На Рис. 2.8 видно, что, граничный электрон до реверса колебался симметрично относительно центра канала, а после реверса – асимметрично. После реверса пространственный период пульсаций несколько возрастает. Это обусловлено увеличением магнитного поля, которое приводит к увеличению циклотронной частоты.

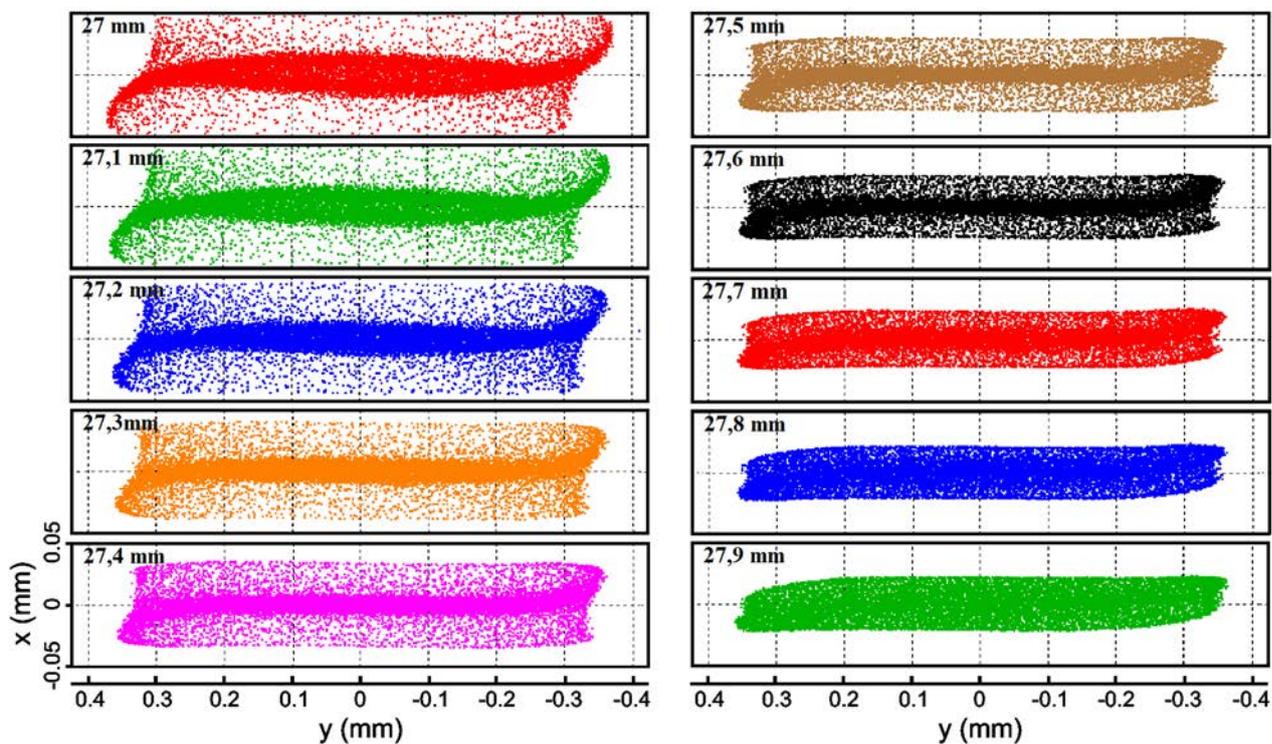


Рис. 2.6. Сечения пучка в области реверса на разных расстояниях z от катода

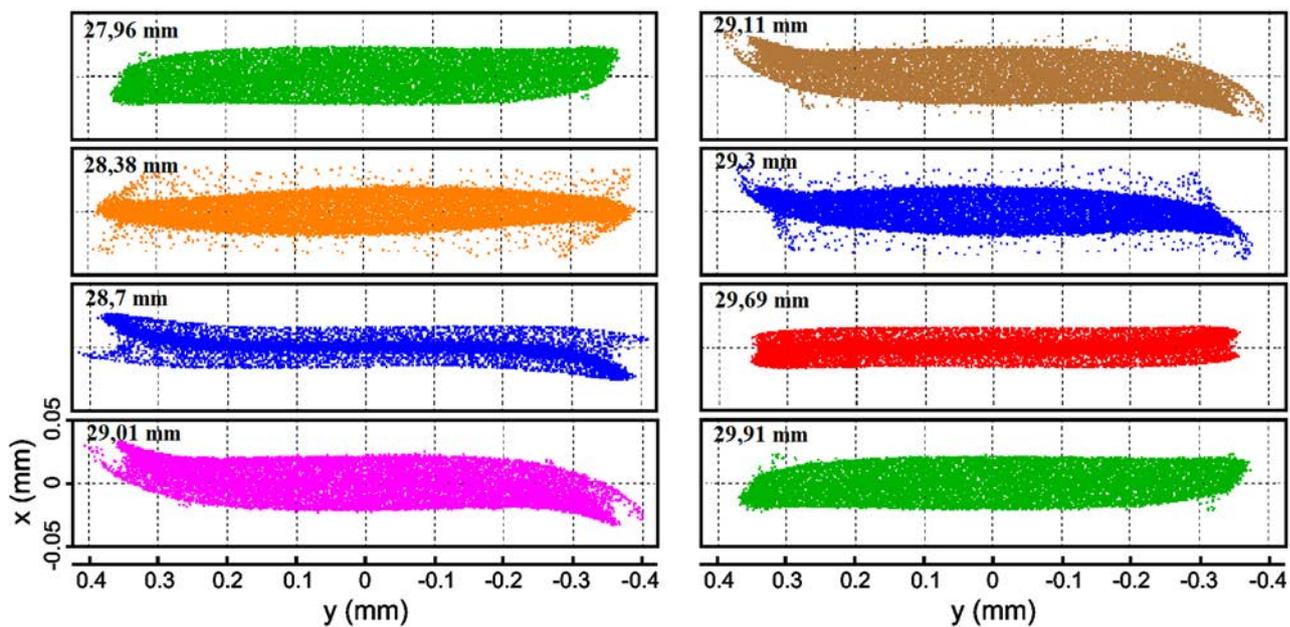


Рис. 2.7. Сечения пучка после области реверса на разных расстояниях z от катода

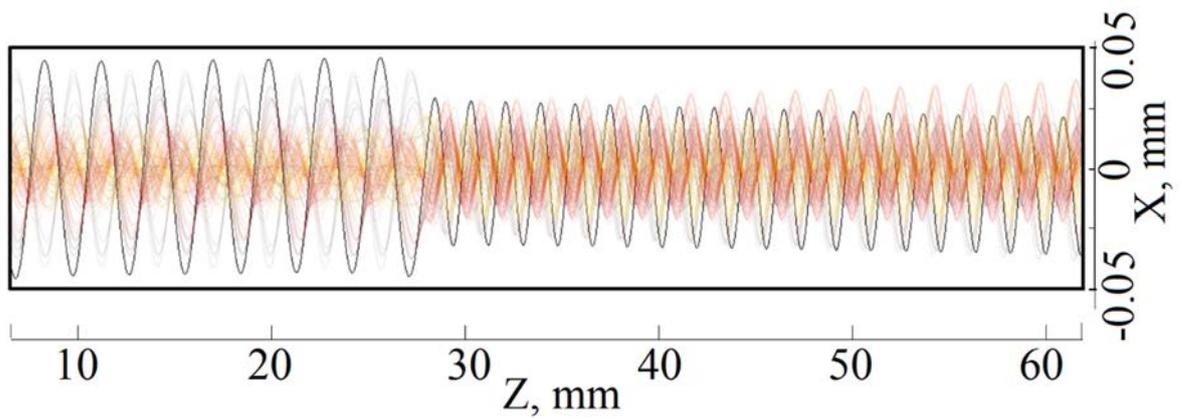


Рис. 2.8. Траектории случайно выбранных частиц пучка с компрессией в реверсном поле в проекции на плоскость xz

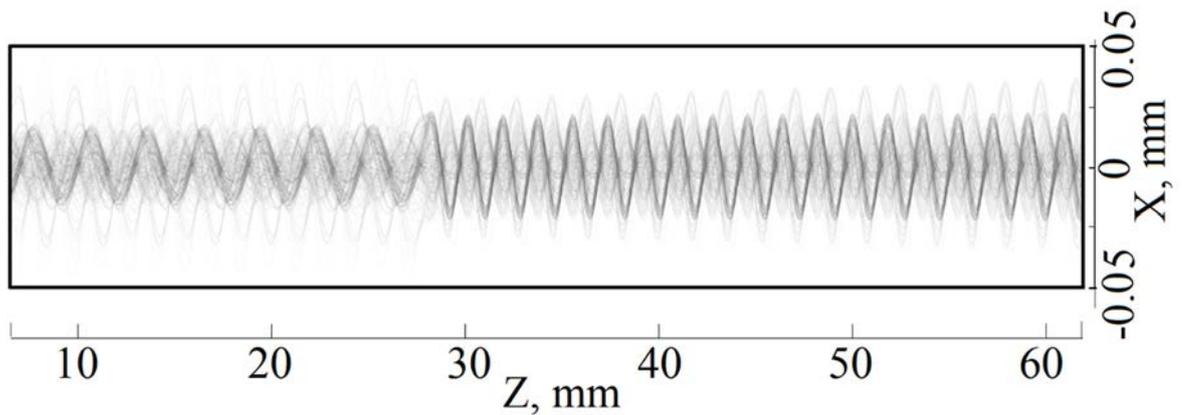


Рис. 2.9. Траектории частиц ЭП с увеличивающимися радиусами циклотронных орбит. Проекция на плоскость xz

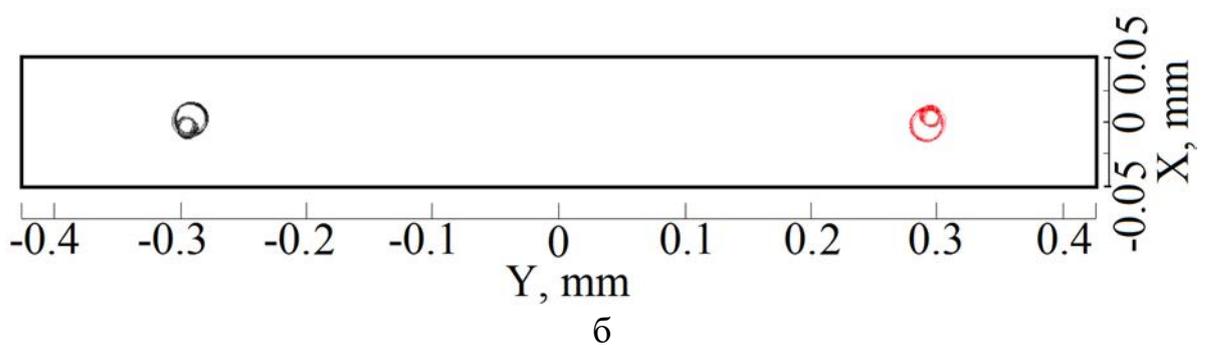
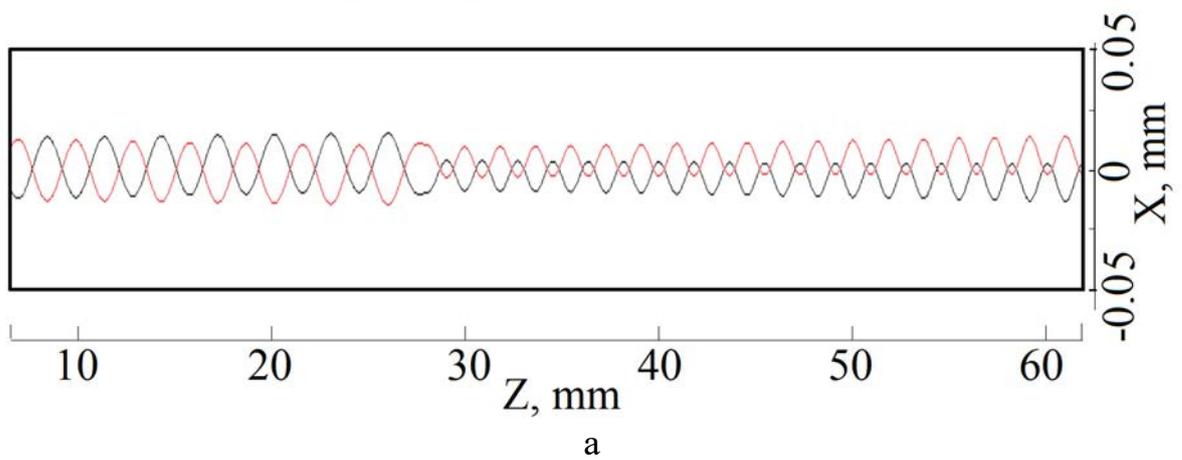


Рис. 2.10. Траектории двух частиц, дрейфующих противофазно в реверсном поле: (а) проекция на плоскость xz , (б) проекция на плоскость xy

Несмотря на то, что реверсное в целом приводит к компрессии пучка, имеются частицы, радиусы орбит которых, наоборот, увеличиваются, что иллюстрирует Рис. 2.9. По-видимому, это явление связано увеличением поперечных скоростей при прохождении области реверса. Однако число таких частиц невелико (<10% от общего количества частиц).

С этой картиной резко контрастирует поведение частиц, дрейфующих на краях пучка. На Рис. 2.10 представлены проекции траекторий двух краевых частиц, дрейфующих противофазно на противоположных краях. Видно, что у данных частиц вследствие воздействия реверсного поля уменьшились диаметры орбит (Рис. 2.10(б)), а положения ведущих центров сместились к соответствующим краям пучка.

Также проводилось исследование влияния нарушений симметрии и несоосностей на транспортировку пучка. В целом результаты такого исследования аналогичны представленным в разд. 1.3.4 для ЭОС с однородным магнитным полем. Основное влияние оказывают поворот пушки относительно канала в плоскости xz и вертикальное смещение пушки относительно канала.

В качестве примера на Рис. 2.11 представлен анализ токопрохождения для обеих систем. На графике значения токопрохождения в однородном и реверсном поле практически совпадают, поэтому они представлены одной кривой.

В случае реверсного поля важным вопросом является возможное смещение области реверса относительно оптимального положения, которое, как было показано в п. 2.1.2, совпадает с точкой минимальной пульсации пучка. Однако пространственный период пульсаций составляет $\lambda_c \approx 2.9$ мм, что значительно превышает технологические допуски на положение реверса ($10 \div 50$ мкм). Поэтому влияние данного фактора несущественно. На Рис. 2.12 представлены результаты расчетов токопрохождения в зависимости от смещения реверсной магнитной системы вдоль по оси z . Нуль на графике иллюстрирует оптимальное положение реверсного магнитного поля, по мере приближения к которому фокусировка пучка улучшается. Токопрохождение существенно снижается при сдвиге ~ 1 мм.

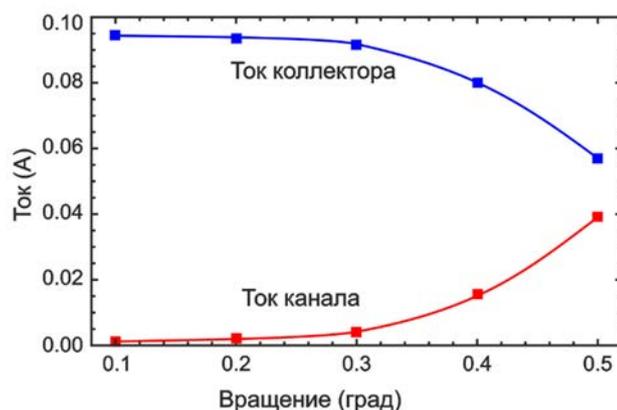


Рис. 2.11. Анализ поворота катода на определенный угол в плоскости x, z , для пучков транспортируемых в однородном и реверсном магнитных полях

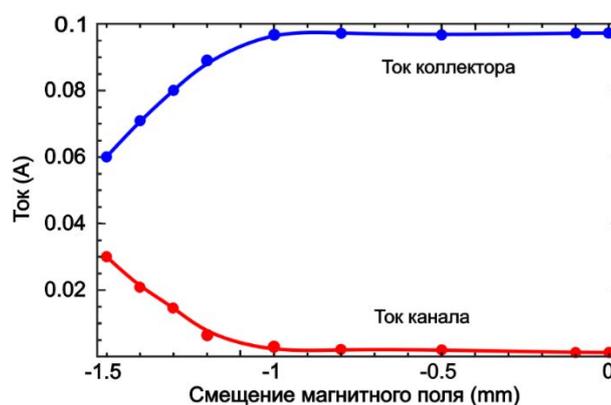


Рис. 2.12. Токопрохождение пучка в зависимости смещения реверсного магнитного поля вдоль оси z .

2.3. Выводы

В данной главе исследована транспортировка ленточного ЭП с высокой компрессией в поле реверсной магнитной системы. Показано, что по сравнению с системой с однородным полем использование реверсной магнитной системы позволяет уменьшить массу магнитов. Таким образом, можно повысить продольную компоненту магнитного поля во второй секции на $\approx 40\%$ по сравнению с первой секцией, а масса всей системы уменьшится в 3.5 раза. Это, в свою очередь, позволяет улучшить токопрохождение и полностью избавиться от токооседания на стенки канала. Положение реверса должно быть согласовано с областью минимальной пульсации пучка.

Исследовано влияние реверсного поля на сложную структуру пучка,

которая включает высокоплотную центральную часть (ядро) и краевая низкоплотная диффузная область (гало) с малым количеством частиц. Анализ траекторий частиц показывает, что однократное введение реверса магнитного поля снижает влияние диокотронной неустойчивости и уменьшает вертикальный размер низкоплотного гало по сравнению с фокусировкой в однородном поле.

ГЛАВА 3. ТРАНСПОРТИРОВКА МНОГОЛУЧЕВЫХ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

3.1. Вводные замечания

Повышение тока ленточного ЭП могло бы быть обеспечено увеличением его ширины, т.е. увеличением аспектного соотношения $W_b \times H_b$. Однако при этом затрудняется транспортировка пучка. Определенные преимущества имеет пучок эллиптического сечения, поскольку он подвержен меньшим деформациям, чем пучок прямоугольного сечения. В нашей стране большой вклад в развитие физических принципов формирования ленточных и эллиптических электронных пучков внесли такие ученые, как П.И. Акимов, Ю.Г. Гамаюнов, П.В. Невский, В.А. Сыровой, В.Т. Овчаров, В.И. Олейников, В.В. Пензяков и другие. В частности, в работах [42-45] были созданы методики и программы трехмерного синтеза электронных пушек, формирующих ленточные пучки конечной ширины. В работе В.И. Олейникова [45] была сформулирована идея, что границу ленточного пучка можно аппроксимировать эллипсом с большим эксцентриситетом. В работе [41] был проведен теоретический анализ формирования одиночного эллиптического пучка и получены простые аналитические выражения, позволяющие оценить его деформацию при фокусировке однородным и периодическим магнитным полем. Однако этот анализ носит приближенный характер, так как проводится в параксиальном приближении и предполагает однородное распределение плотности тока по сечению пучка.

Были также разработаны программы трехмерного анализа неламинарных эллиптических и ленточных электронных пучков⁴, основанные на аналитическом представлении электростатических полей, создаваемых электродами и совокупностью «электронных трубок» тока ЭП [46,47]. В настоящее время аналогичные исследования проводятся В.А. Сыровым и

⁴ Данные программы были реализованы на языке Algol, расчеты проводились на ЭВМ, серии БЭСМ-6 (см. электронный ресурс <http://besm-6.ru>).

соавторами [51-54].

В последние годы также появился ряд работ, в которых обсуждается возможность использования многолучевого ленточного ЭП в усилителях суб-ТГц диапазона для повышения выходной мощности [82-87]. В связи с этим, в данной главе предлагается и исследуется ЭОС с многолучевым низкоперевансным ленточным пучком квазиэллиптического сечения. Такой пучок создается катодом, имеющим форму прямоугольника со скругленными краями (см. рис. 3.1). В дальнейшем будем для краткости называть такой пучок эллиптическим. Использование многолучевого эллиптического пучка в прямоугольном пролетном канале позволяет снизить влияние диокотронной неустойчивости.

Поскольку неустойчивость обусловлена дрейфом электронов в скрещенных $\vec{E} \times \vec{B}$ полях (см. раздел 1.1), наглядную картину развития диокотронной неустойчивости в пучке дает анализ эквипотенциальных контуров поля пространственного заряда, который в ряде случаев дает более адекватное представление, чем наблюдение распределения частиц по сечению пучка. Если бы граница пучка совпадала с эквипотенциальным контуром, это позволило бы минимизировать влияние диокотронной неустойчивости [25]. Анализ, проведенный в разделе 3.2, показывает, что в широком пролетном канале многолучевой эллиптический пучок лучше согласован с эквипотенциальными контурами. В разделе 3.3 разработана конструкция пушки с трехлучевым эллиптическим ЭП. В разделе 3.4 изучается транспортировка такого пучка в пролетном канале и проводится сопоставление с пучками другой формы (одно- и многолучевым прямоугольным, однолучевым эллиптическим).

3.2. Эквипотенциальные контуры одно- и многолучевых ЭП

В данном разделе сравниваются эквипотенциальные контуры одно- и трехлучевого квазиэллиптических пучков (см. Рис. 3.1) в канале с большим аспектным соотношением $140 \text{ мкм} \times 2500 \text{ мкм}$. Длина в продольном направлении составляла 70 мм . Сравнение проводится при одинаковых значениях магнитного

поля (0.83 Тл), тока (100 мА) и напряжения (20 кВ). Расчеты проводились при помощи пакета Lorenz-3EM.

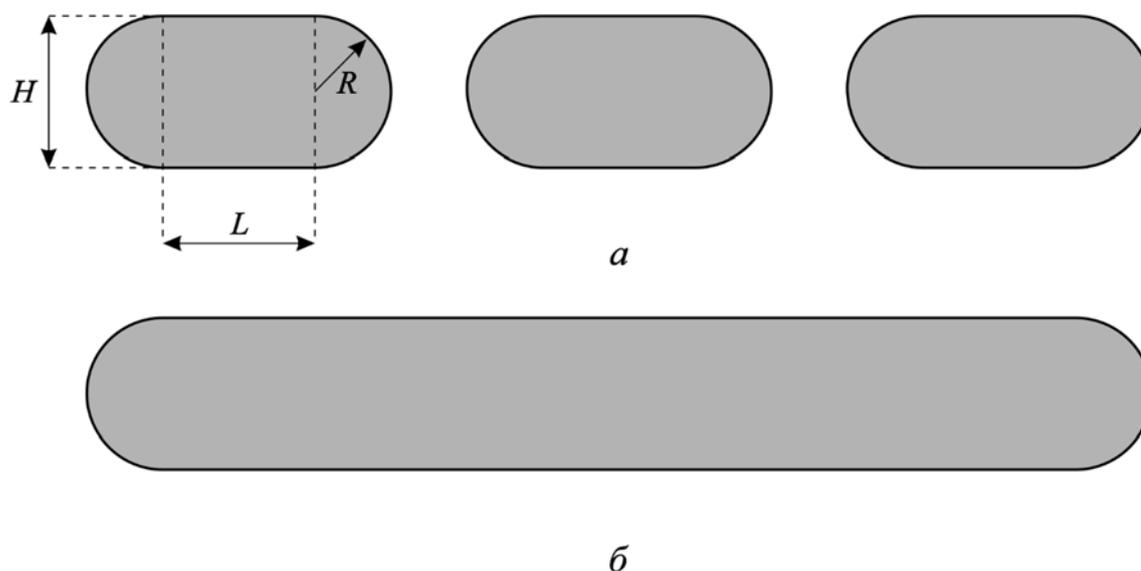


Рис. 3.1. Исходная форма трехлучевого (а) и однолучевого (б) эллиптического пучка

Вначале рассмотрим однолучевой пучок (Рис. 3.1(б)). Размеры сплошного эллиптического катода составляют $L = 1800$ мкм, высота катода $H = 300$ мкм (т.е. радиус скругления $R = 150$ мкм). Пучок подвергается компрессии в пушке, содержащей фокусирующий электрод (диафрагму) и анод (подробнее см. раздел 3.3), в результате чего его вертикальный размер уменьшается примерно до 100 мкм.

Эквипотенциальные контуры такого пучка, рассчитанные с помощью пакета Lorenz 3EM [21] представлены на Рис. 3.2. Вначале пучок находится в равновесии и внутри него распределение поля практически однородное. Однако в процессе транспортировки пучка в его центре возникает неоднородность, в которой наблюдается ослабление поля пространственного заряда. Из-за влияния пульсаций эта неоднородность превращается в провал поля, а на противоположенных концах пучка поле наоборот усиливается. Вследствие этого увеличивается деформация пучка: фактически происходит его разделение на две части.

Рис. 3.2 построен для идеального случая, когда пучок расположен точно по центру канала. На Рис. 3.3 построены эквипотенциальные контуры пучка, смещенного вдоль широкой стенки канала на величину 20 мкм (в пределах технологического допуска). Видно, что поле пространственного заряда возмущается сильнее.

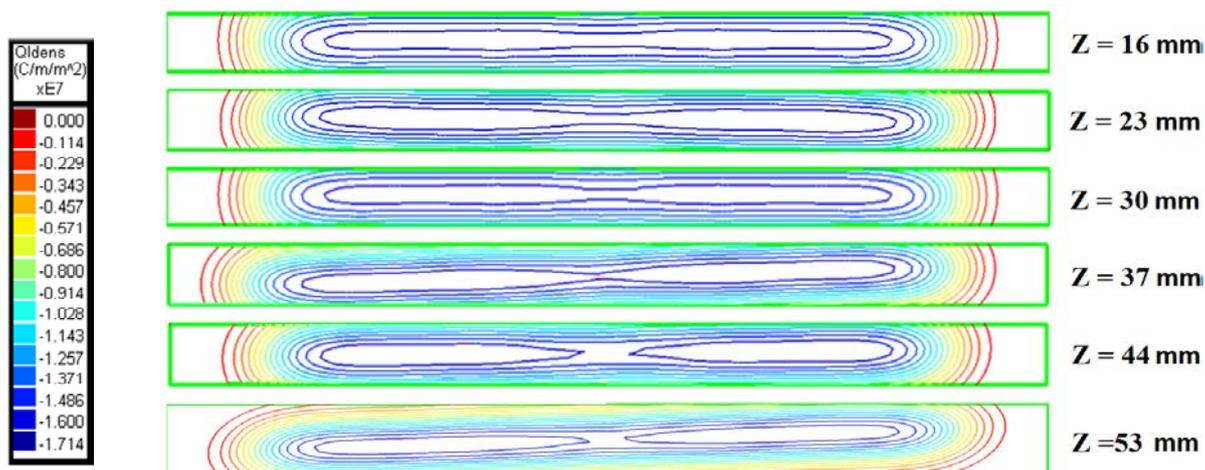


Рис. 3.2. Эквипотенциальные линии однолучевого пучка с эллиптическими краями в плоскости xu на различных расстояниях от катода

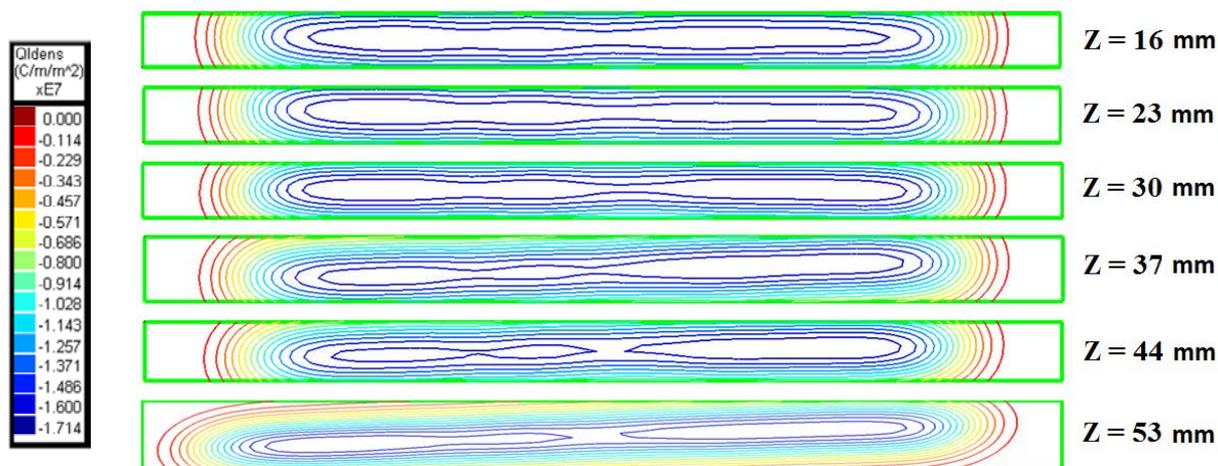


Рис. 3.3. То же, что на рис. 3.1, но пучок сдвинут на 20 мкм влево от центра канала

В то же время, многолучевой пучок с тремя парциальными лучами испытывает значительно меньшие деформации и менее чувствителен к нарушениям симметрии. Размеры эмиттирующей поверхности пучка выбирались следующим образом: $H = 300$ мкм, $L = 300$ мкм, расстояние между парциальными пучками 150 мкм. Таким образом, общая ширина катода в обоих случаях составляет 2100 мкм. На Рис. 3.4 представлена картина

эквипотенциальных контуров трехлучевого пучка. На расстояниях до 40 мм от катода распределение потенциала в пролетном канале практически не испытывает деформаций. Такое поведение можно объяснить наличием провалов поля между парциальными частями пучков. Отметим, что на Рис. 3.4 изображен пучок, сдвинутый относительно центра канала на 20 мкм, и в данном случае сдвиг практически не оказывает влияния. Следовательно, можно утверждать, что диокотронная неустойчивость в значительно меньшей степени влияет на транспортировку многолучевого пучка по сравнению с однолучевым с большим аспектным соотношением.

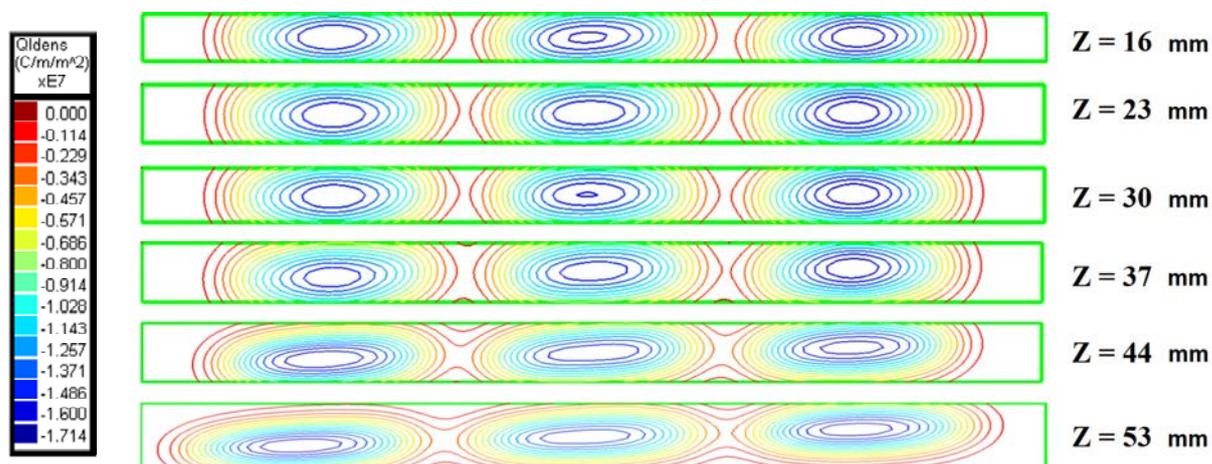


Рис. 3.4. Эквипотенциальные линии многолучевого эллиптического пучка, сдвинутого на 20 мкм влево

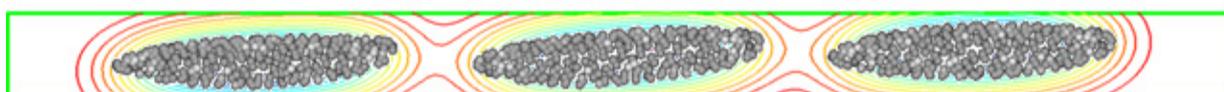


Рис. 3.5. Результат траекторного анализа парциальных пучков с наложенными эквипотенциальными линиями поля пространственного заряда ($z = 44$ мм)

На Рис. 3.5 показано распределение частиц в сечении трехлучевого пучка, наложенное на его эквипотенциальные контуры.

Интерес представляет анализ движения частиц в пучке, в особенности тех, которые расположены вблизи краев пучка, поскольку именно такие частицы ответственны за его скручивание. На Рис. 3.6 показаны траектории случайно выбранной группы частиц для одиночного пучка с высокоаспектным

соотношением сторон (см. Рис. 3.1 (б)). Видно, что для частиц на краю пучка дрейф выражен сильнее, чем для частиц, расположенных в центре, поскольку электрическое поле намного сильнее на краю пучка. Во-вторых, частицы на краю пучка перемещаются с большим циклотронным радиусом, чем те, которые находятся в центре пучка. Закручивание края пучка проявляется незначительно.

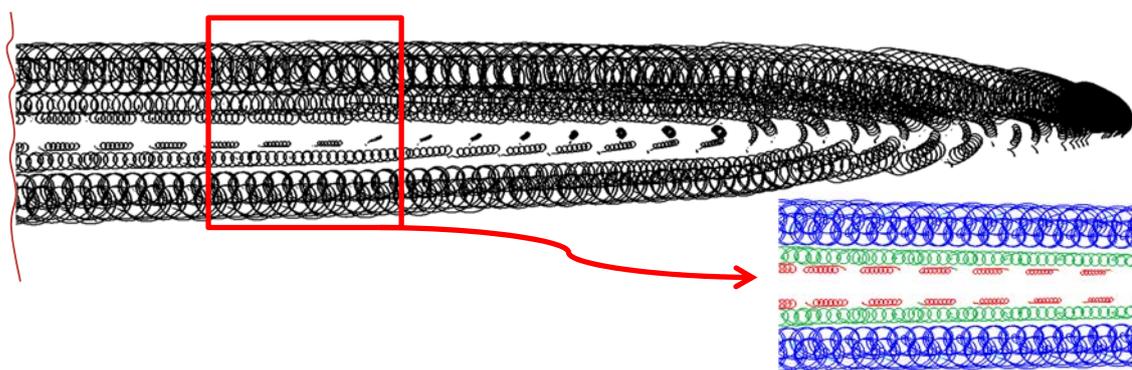


Рис. 3.6. Дрейф частиц в пучке с высокоаспектным соотношением сторон



Рис. 3.7. Дрейф частиц в многолучевом пучке

На Рис. 3.7 приведены траектории частиц трёхлучевого ЭП (показана полутолщина). В этом случае границы пучка близки к эквипотенциальному контуру. В результате частицы дрейфуют вдоль границы, центральный пучок незначительно деформируется, но скручивание его края не происходит, тогда как для краевого пучка оно происходит аналогично пучку с высокоаспектным соотношением сторон на Рис. 3.6.

3.3. ЭОС с компрессией трёхлучевого эллиптического пучка

Хотя электронные СВЧ приборы с многолучевыми пучками хорошо известны, задача компрессии многолучевых пучков на сегодняшний день в целом не решена. В данном разделе предложена и исследована конструкция ЭОС с компрессией трёхлучевого эллиптического пучка. На предприятии АО «НПП

«Алмаз» отработана технология создания многолучевых пушек для приборов клистронного типа сантиметрового диапазона с прямоточными ЭП, которые формируются при помощи плоских электродов (см., например, [88,89]). Впоследствии при участии автора диссертации на аналогичных принципах был разработан экспериментальный образец пятилучевой пушки с максимальным током 210 мА [103]. Предполагается использовать такую пушку в ЛБВ миллиметрового диапазона [48]. Однако диаметр одиночного луча составил 0.3 мм, так что для эффективного взаимодействия с полями микроразмерных ЗС в приборах суб-ТГц диапазона требуется его уменьшение.

Дальнейшим развитием этих работ является пушка с компрессией многолучевого эллиптического ЭП, которая рассмотрена в данном разделе. Пушка состоит из плоского катода, на котором сформированы три катодных выступа, с которых осуществляется эмиссия электронов. Размеры выступов $H=L=0.3$ мм, $R=0.15$ мм (см. Рис. 3.1(a)). Расстояние между краями выступов 0.15 мм. Для того, чтобы избежать эмиссии с остальной плоской поверхности катода, он закрывается теневой сеткой с тремя отверстиями, центры которых совпадают с центрами катодных выступов. Затем на расстоянии 0.53 мм от теневой сетки располагается диафрагма с тремя отверстиями. Данная диафрагма предназначена для фокусировки пучков. Размеры отверстий в диафрагме равны размерам катодных выступов. Толщина сетки составляет 0.1 мм. Анод находится на расстоянии 2 мм от поверхности диафрагмы. Размеры анодного отверстия составили 2.4×0.1 мм². Расположение элементов пушки представлено на Рис. 3.8, а ее размерная схема — на Рис. 3.9. Данная конструкция предназначена для ЛБВ, в которой рабочей является высшая поперечная мода ЗС (см., например, [82-87, 108]), в данном случае — мода типа TE_{30} .

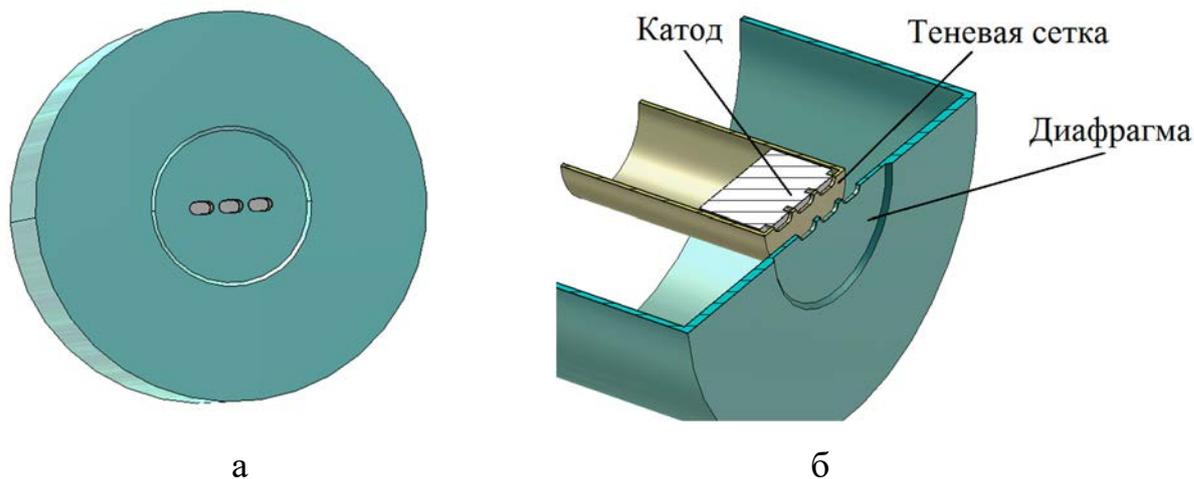


Рис. 3.8. Конструкция электронной пушки с тремя лучами: (а) общий вид; (б) сечение по плоскости yz

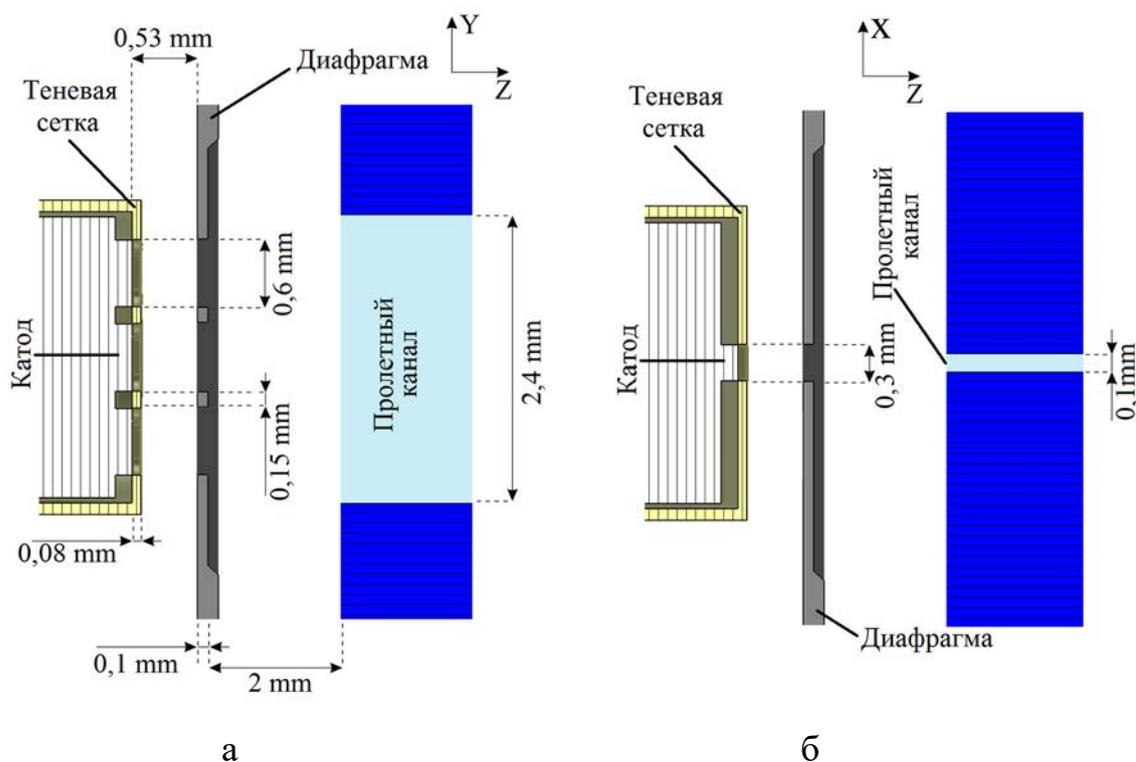


Рис. 3.9. Размерная схема пушки: (а) сечение в плоскости yz ; (б) сечение в плоскости xz

Как известно (см., например, [23]), если в идеализированной модели ЭОС значение индукции рабочего магнитного поля B превышает бриллюэновское магнитное поле, $B > B_{Br}$, то ЭП будет сжиматься. Следовательно, возможно осуществить компрессию ЭП и уменьшить его толщину. Однако при создании ЭОС с компрессией многолучевого пучка задача усложняется близким

расположением парциальных ЭП в области формирования пучка. В этой области фокусирующее магнитное поле еще не достигает своего наибольшего значения, а ускоряющее напряжение мало. Следовательно, в области пушки силы пространственного заряда могут деформировать ЭП раньше, чем он достигнет пролетного канала. Поэтому конструкция пушки включает дополнительный электрод — диафрагму (сетку), которая одновременно выполняет функцию анода и фокусирующего электрода. Сеточным электродам посвящено множество работ (см., например, [90]).

Магнитная система для многолучевой ЭОС должна обеспечивать необходимую компрессию и транспортировку ЭП. Была разработана соответствующая конструкция магнитной системы, которая обеспечивает транспортировку пучка на длину 25 мм. Она представляет собой модификацию магнитной системы, представленной в разделе 1.3.2, за исключением того, что протяженность магнитов по оси z была уменьшена до 30 мм. При этом полюсные наконечники системы остались без изменений. В качестве материала магнитов выбран $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (сплав N35) с величиной намагниченности 1.2 Тл. Материал полюсных наконечников соответствует марке стали 1008, магнитная проницаемость равна $\mu = 10^3$. Схема магнитной системы приведена на рис. 3.10(а), а распределение магнитного поля — на Рис. 3.10(б). Индукция магнитного поля в канале составляет 0.83 Тл. Размеры канала 0.1 мм × 2.4 мм, что соответствует размерам канала ЗС типа сдвоенная гребенка диапазона 0.22 ТГц.

С помощью пакета CST Particle Studio было проведено моделирование ЭОС с тремя эллиптическими пучками. В данном случае общий ток составил 93 мА, т.е. ток парциального пучка равен 31 мА. Потенциал на диафрагме составил 1.45 кВ. Потенциал анода (т.е. ускоряющее напряжение пучка) 21.4 кВ выбран в соответствии с результатами работы [87]. Первеанс одного луча составляет примерно 10^{-8} А/В^{3/2}, соответственно, полный первеанс 0.3×10^{-7} А/В^{3/2}. Параметры эмиссии задавались согласно разделу 1.3.3: работа выхода 2.055 эВ, температура катода 1200°С, угловой разброс частиц на катоде 5°.

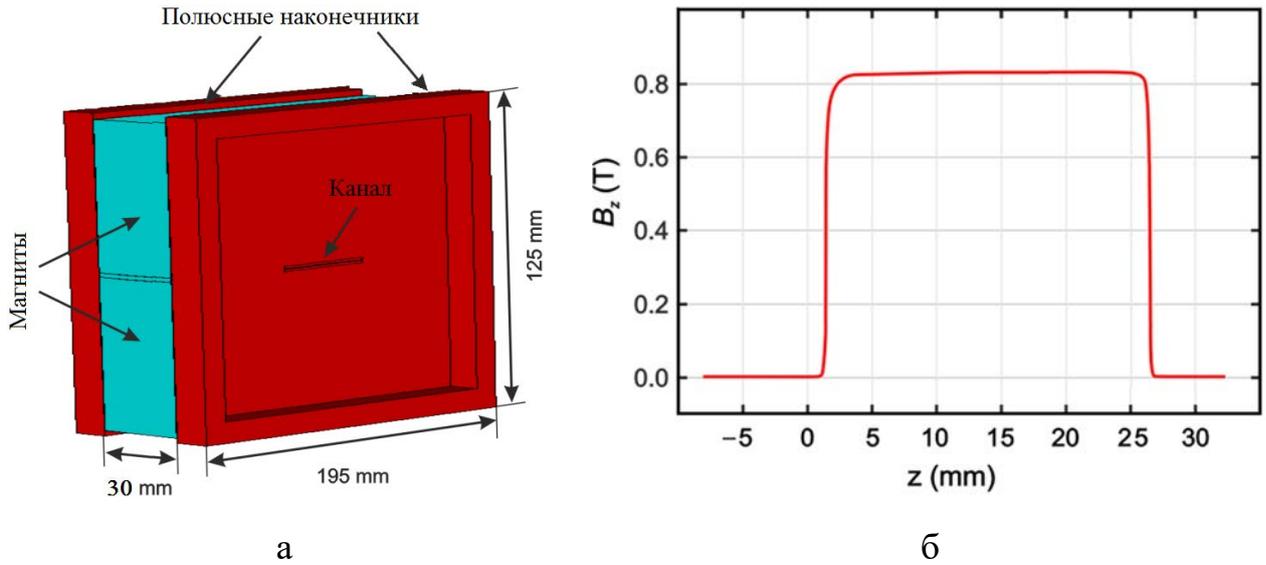


Рис. 3.10. Схема магнитной системы (а) и профиль продольной компоненты магнитного поля (б)

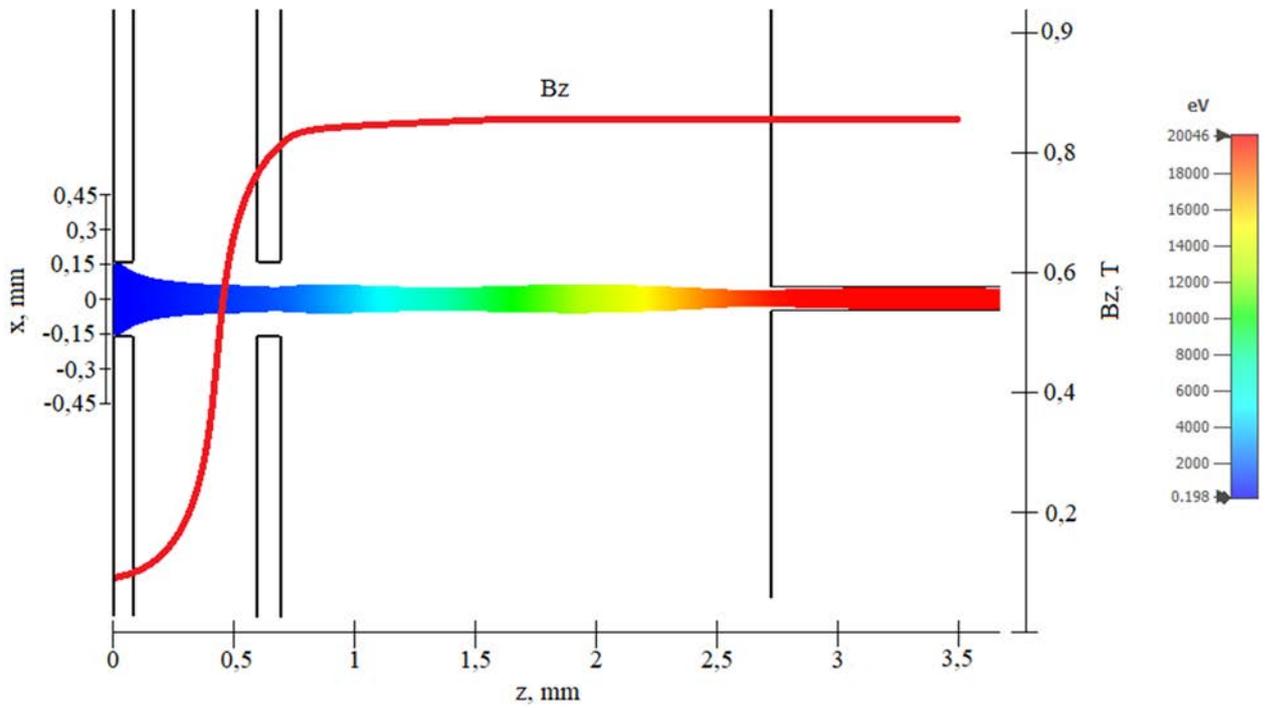


Рис. 3.11. Сечение пучка в плоскости xz и профиль продольной компоненты магнитного поля B_z

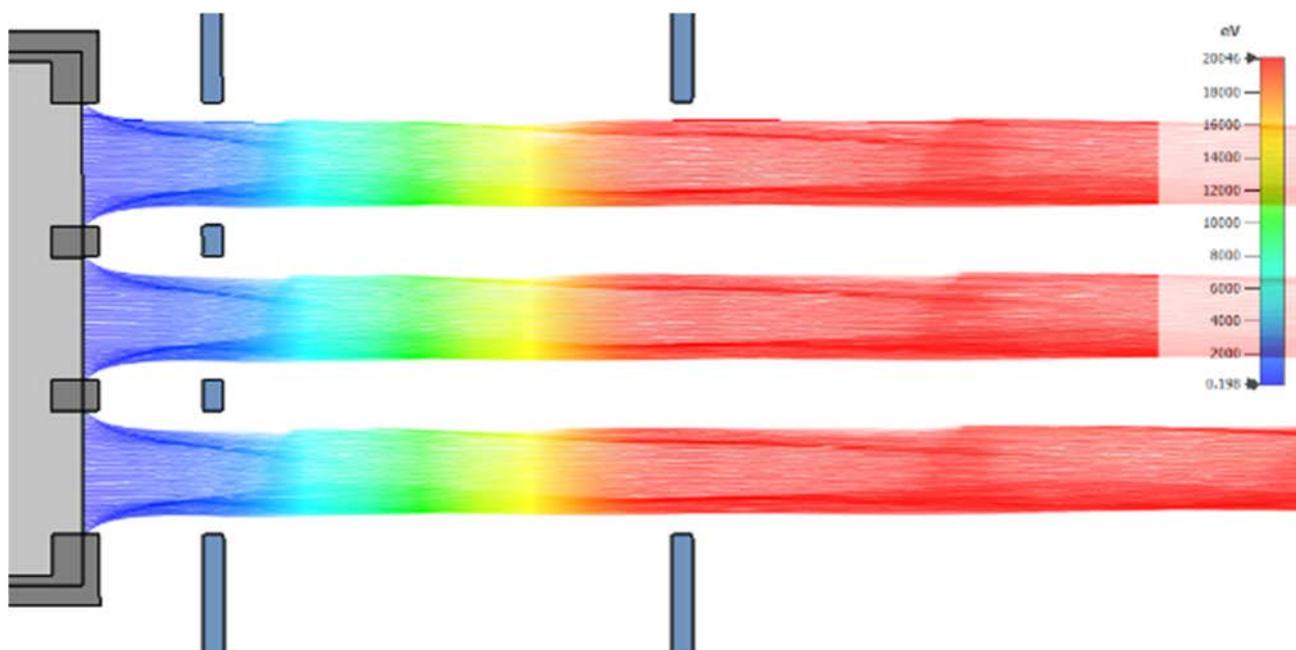


Рис. 3.12. Сечение пучка в плоскости yz

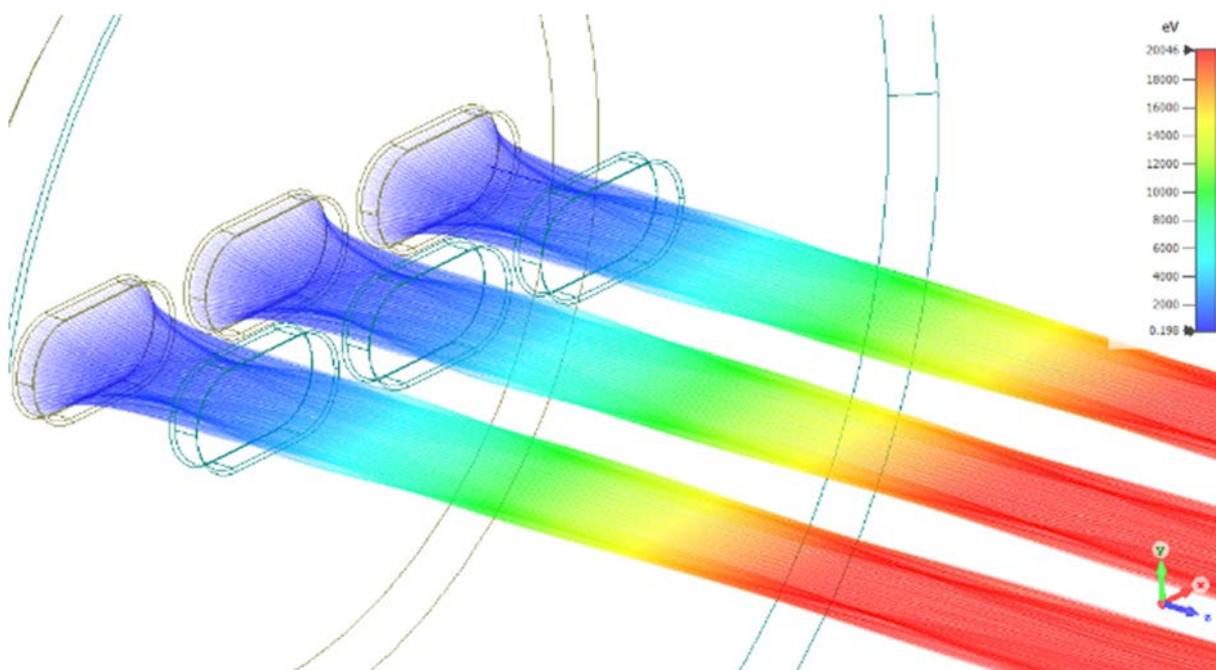


Рис. 3.13. Вид многолучевого пучка в изометрии

На Рис. 3.11 - Рис. 3.13 приведены траектории электронов пучка в проекции на плоскости xz , yz и в изометрии соответственно. Видно, что магнитное поле на катоде $B_z \approx 0.1$ Тл, т.е. катод является частично экранированным. В данном случае приближение магнитной системы к катоду обеспечивает хорошую фокусировку пучка, оседание на фокусирующий электрод и стенки канала отсутствует.

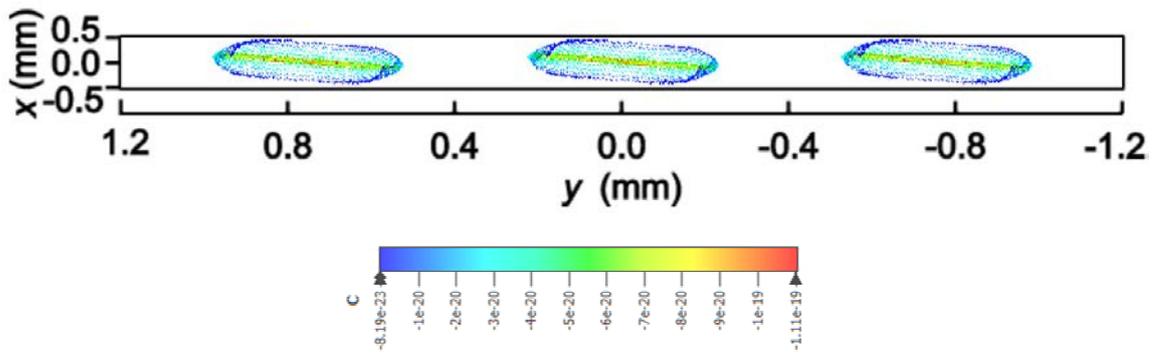


Рис. 3.14. Схема расположения пучков в пролетном канале ($z = 4.68$ мм)

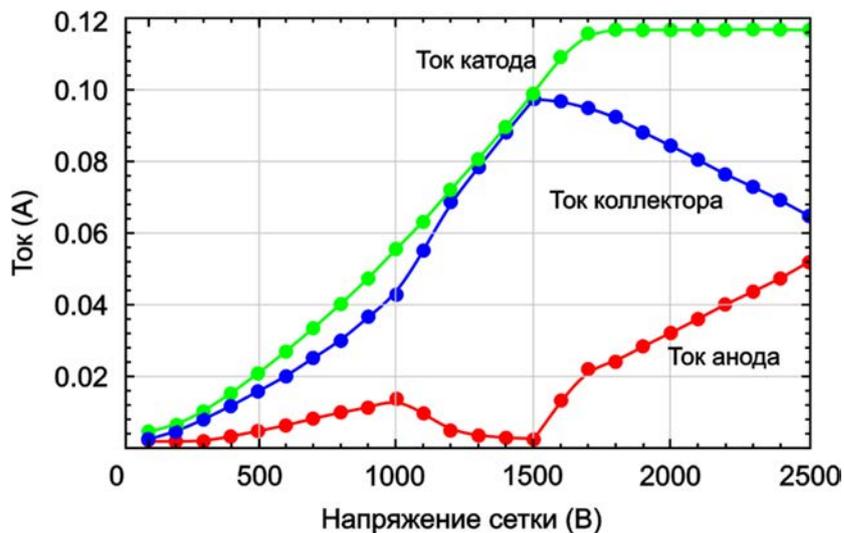


Рис. 3.15. Результаты расчета ВАХ пушки с многолучевым ЭП при потенциале анода $U_a = 21.4$ кВ

Исходя из размеров катода, нетрудно определить, что при токе парциального пучка 31 мА, средняя плотность тока на катоде равна 19.29 А/см^2 . Размерная схема расположения пучков в пролетном канале ЭОС представлена на Рис. 3.14. Характерные размеры пучков в пролетном канале составили $75 \text{ мкм} \times 450 \text{ мкм}$. Для более точной оценки площади пучков, изображенных на Рис. 3.14, был использован программный модуль, написанный в среде С#. ⁵ В результате было найдено значение площади парциального пучка, равное $2.51 \times 10^{-4} \text{ см}^2$. Таким образом, средняя плотность тока равна 123.4 А/см^2 . Соответственно, компрессия пучка по площади примерно равна 6.4 ед.

⁵ Программный модуль разработан В.В. Емельяновым.

На Рис. 3.15 приведены ВАХ пушки, т.е. зависимости тока катода, анодного тока и тока коллектора от сеточного напряжения U_g при анодном напряжении 21.4 кВ. При $U_g < 1.0$ кВ происходит перефокусировка пучка, когда плоскость кроссовера расположена плоскости анода. В результате происходит значительный перехват тока пучка анодом. С увеличением U_g кроссовер смещается к аноду. В диапазоне напряжений $U_g = 1.3-1.5$ кВ пучок полностью фокусируется в пролетный канал. Однако с увеличением напряжения на сетке компрессия ослабевает и внешняя часть пучка вновь начинает оседать на аноде. Ток коллектора начинает падать. Оседание электронов на диафрагму не наблюдается ни при каких значениях U_g . Более подробно ситуация обсуждается в разделе 3.4 на примере пушки с повышенной компрессией.

Также из Рис. 3.15 видно, что при $U_g \approx 1.6$ кВ происходит переход из режима ограничения пространственным зарядом в режим температурного ограничения эмиссии. Как уже отмечалось выше, в качестве рабочего было выбрано значение $U_g = 1.45$ кВ, при этом пушка работает в режиме ограничения пространственным зарядом.

Рассмотрим сечения частиц многолучевого пучка, построенные на Рис. 3.16. Различные цвета (как и на Рис. 3.14) соответствуют различным значениям заряда частиц. Распределение плотности заряда сильно неоднородно. Видно, что, как и в случае однолучевого пучка (разд. 1.3), парциальные пучки имеют плотное центральное «ядро», частицы которого переносят примерно 99% полного тока. Остальные частицы в «гало» пучка формируют сложные пульсирующие структуры, которые демонстрируют изгибание краев пучка. Такое поведение частиц в пучке обусловлено неравномерностью распределения поля пространственного заряда и неравномерностью электрических полей вблизи поверхности катода. Известно, что распределение напряженности электрического поля на поверхности катода может иметь сложную неоднородную конфигурацию. Данное утверждение иллюстрирует Рис. 3.17, на

котором видно, что в центре парциальных катодов расположены зоны с наибольшим значением напряженности поля. Максимальное значение поля в центральной зоне катода составляет примерно $4.5 \div 5.5 \times 10^4$ В/см, а вблизи края катода $\sim 1.2 \times 10^4$ В/см. Такое различие можно объяснить влиянием теневой сетки, которая экранирует торцевую зону катода. Поскольку частицы, образующие «гало» пучка, эмитируются вблизи краевой поверхности катода, ток, переносимый этими частицами, незначителен.

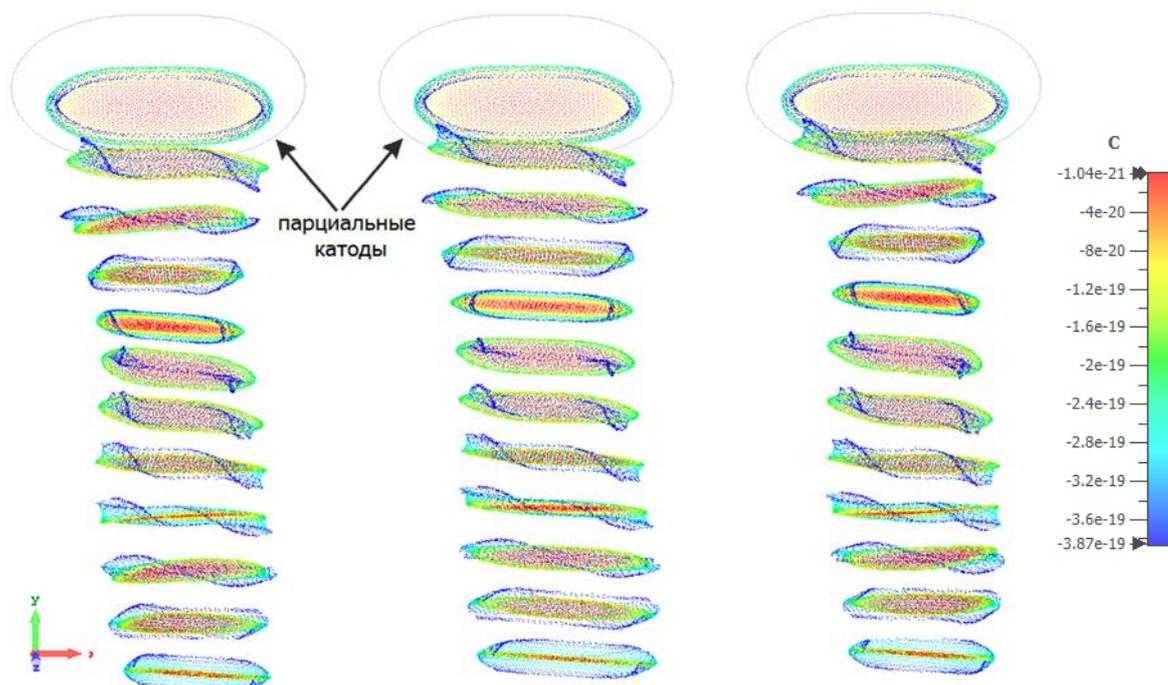


Рис. 3.16. Распределение плотности тока частиц в области формирования пучка. Сечения пучка построены через каждые 0.39 мм от катода

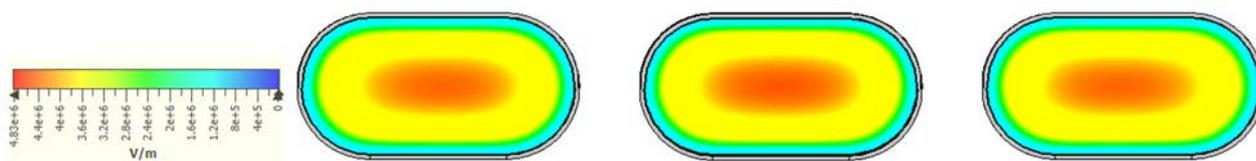


Рис. 3.17. Распределение напряженности электрического поля на поверхности катода

Также были проведены расчеты транспортировки многолучевого ЭП в пролетном канале сечением $0.1 \text{ мм} \times 2.4 \text{ мм}$ и длиной в продольном направлении 25 мм. Такое значение длины соответствует 50 периодам ЗС, что, согласно

оценкам [118], должно обеспечивать усиление порядка 25 дБ. Токопрохождение составило 85 мА, т.е. 95% от общего тока. На Рис. 3.18 представлены изображения профиля многолучевого пучка в плоскостях xz и yz .

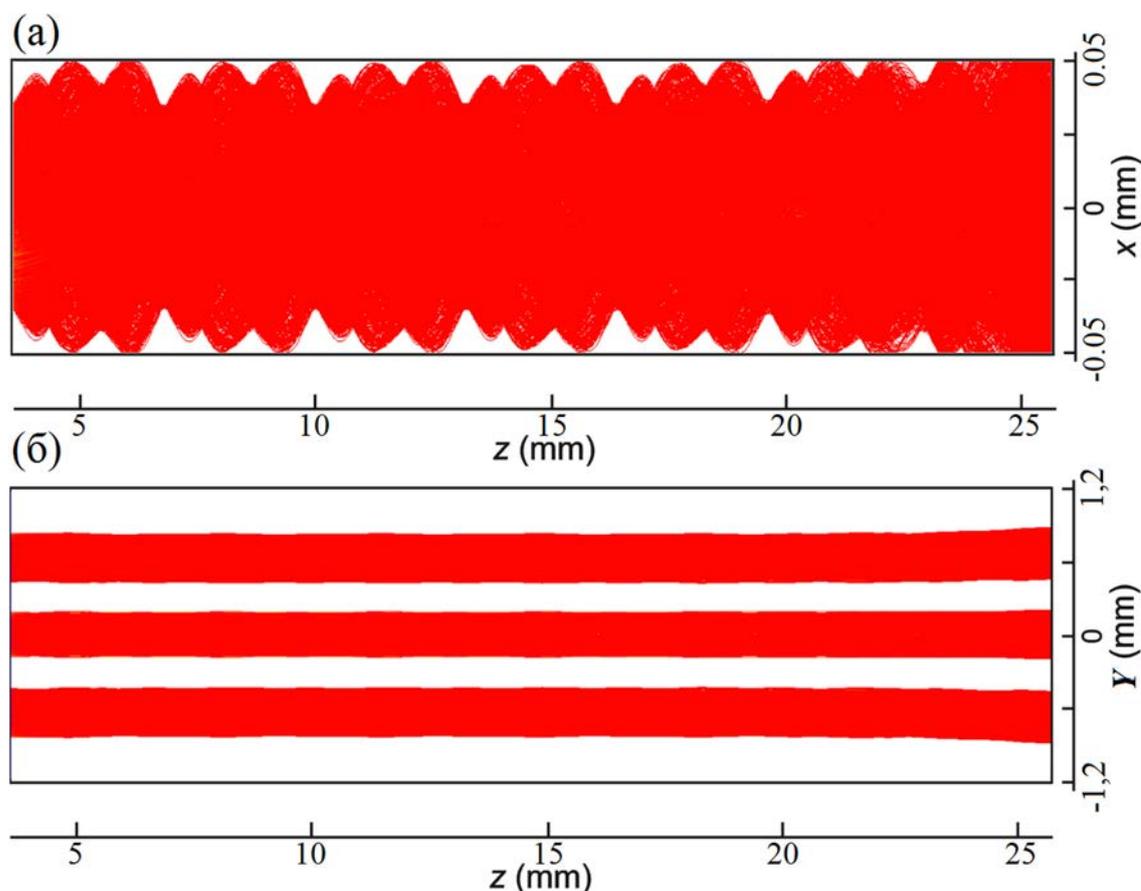


Рис. 3.18. Профиль многолучевого пучка, проекция в плоскостях: (а) xz , (б) yz

Отметим, что в самое последнее время появились работы, в которых рассматривались близкие по конструкции многолучевые ЭОС с компрессией цилиндрического пучка для ЛБВ W-диапазона [91, 92]. Компрессия составляет ~ 4–5 единиц по площади. Однако эти работы носят исключительно теоретический характер.

3.4. Увеличение компрессии в ЭОС с многолучевым эллиптическим пучком

Описанная в предыдущем разделе ЭОС обеспечивает суммарный ток пучка 93 мА с коэффициентом компрессии 6.4 единицы. Представляет очевидный интерес повышение суммарного тока, что позволит повысить

выходную мощность прибора. В данном разделе представлена ЭОС с улучшенными параметрами, удовлетворяющими этим требованиям. Общий вид электронной пушки и размерная схема приведены на Рис. 3.19. По сравнению с ЭОС, рассмотренной в п. 3.3, вертикальный размер катода был существенно увеличен. Катодные выступы представляют собой эллипсы с осями $0.5 \text{ мм} \times 0.6 \text{ мм}$. Исследования показали, что эллиптическая форма предпочтительнее круглой, поскольку обеспечивает меньшее токооседание на анод пушки и стенки пролетного канала. Отверстия сетки имеют размеры, равные размерам эмитирующих областей катода. Продольные размеры (расстояние катод – диафрагма и диафрагма – анод) не изменились по сравнению с предыдущим случаем.

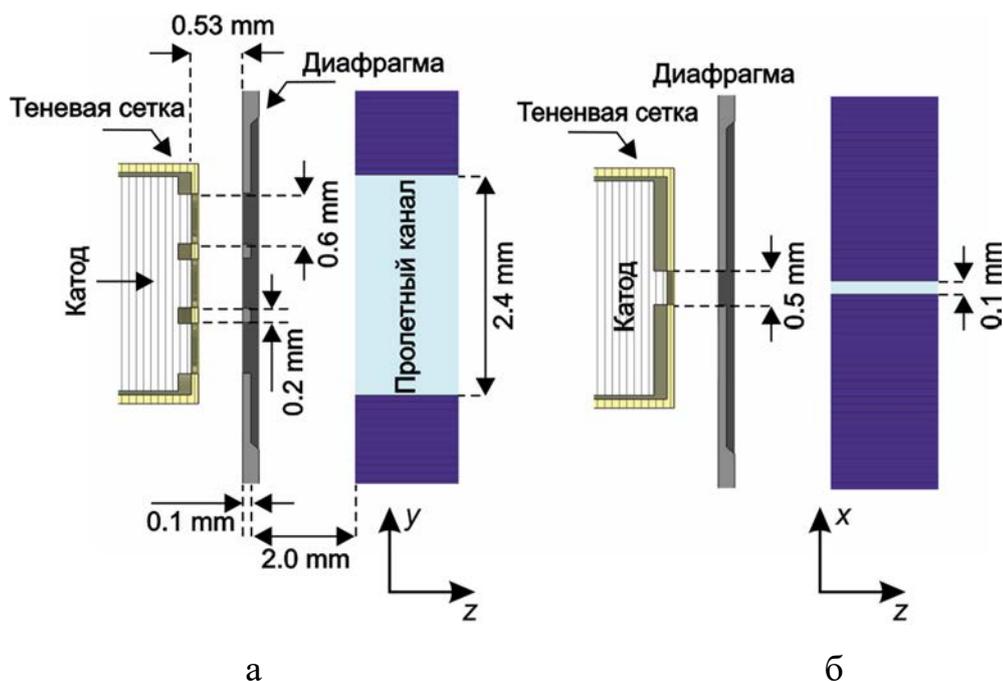


Рис. 3.19. Размерная схема пушки: (а) сечение в плоскости yz ; (б) сечение в плоскости xz

Поскольку трёхлучевой ЭП должен взаимодействовать с полем моды TE_{30} [87], парциальные пучки должны располагаться в максимумах поля рабочей моды (по оси y). Соответственно, расстояния между краями катодных выступов и равные им размеры перемычек сетки были увеличены до 200 мкм .

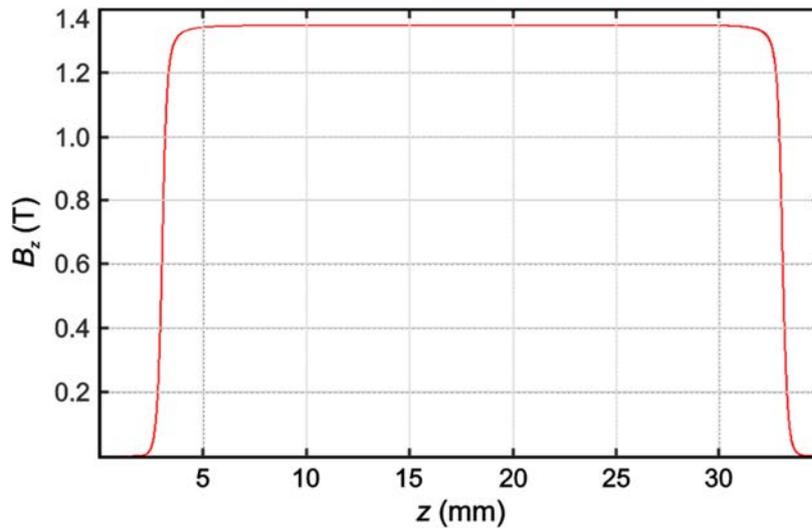


Рис. 3.20. Продольная компоненты индукции магнитного поля B_z

Параметры эмиссии были выбраны аналогичными предыдущему разделу, за исключением того, что температура катода была увеличена до 1250°C.

Предполагается, что в ЭОС используется магнитная фокусирующая система на постоянных магнитах, конструкция которой в целом аналогична описанной в разделе 3.3, однако была доработана с целью увеличения компрессии. Величина фокусирующего магнитного поля в области пролетного канала возросла до величины 1.345 Тл. Распределение продольной компоненты индукции магнитного поля B_z показано на Рис. 3.20, где виден почти однородный участок поля протяженностью 25 мм.

Размерная схема магнитной системы приведена на Рис. 3.21. Конструкция была модифицирована следующим образом: зазор между магнитами для размещения пакета ЗС уменьшен до 4.2×3.75 мм². Размеры отверстий в полюсных наконечниках составляют 0.5×12 мм². Также была увеличена намагниченность материала магнитов до 1.48 Тл.

Рис. 3.22(а) иллюстрирует процесс формирования пучка в области пушки. На нем приведена проекция пучка в плоскости xz и профиль магнитного поля. В расчетах выбрано анодное напряжение 21.4 кВ (как и в п. 3.3), а напряжение сетки составляет 1480 В.

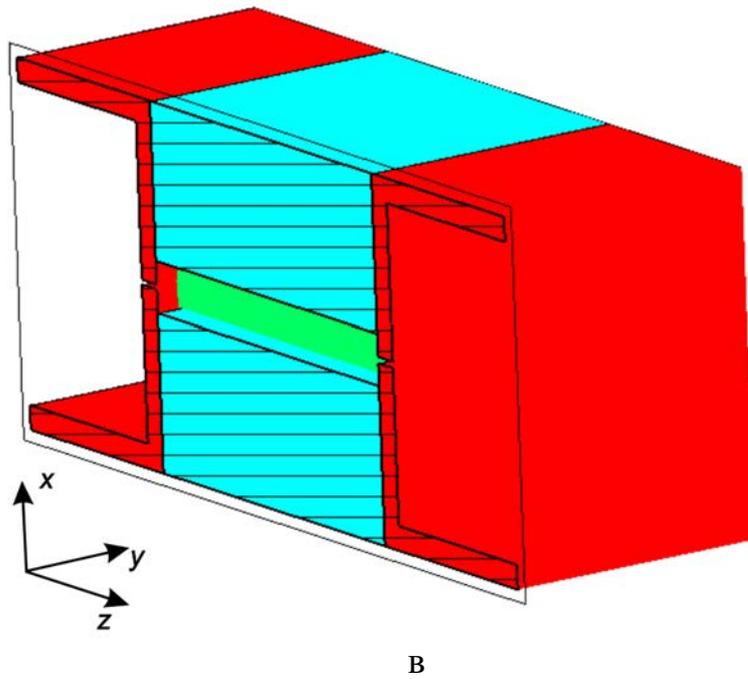
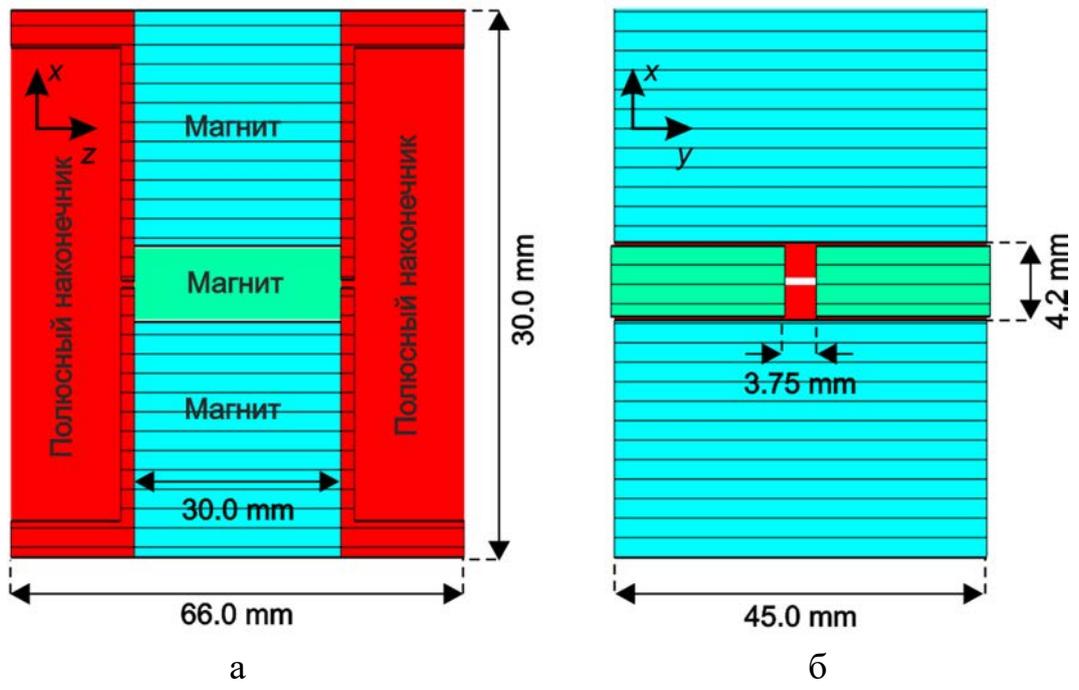
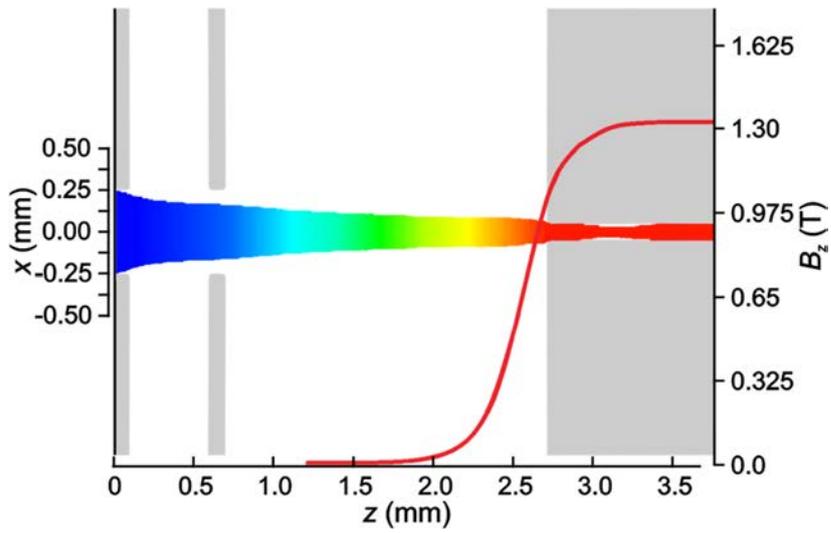


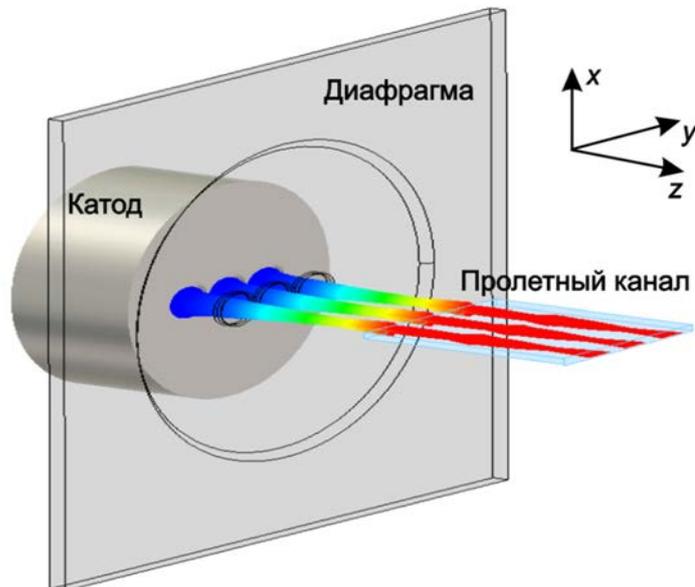
Рис. 3.21. Схема магнитной системы: (а) сечение в плоскости xz ; (б) сечение в плоскости xy ; (в) вид в изометрии



а



б



в

Рис. 3.22. Проекция электронного пучка на плоскость xz и профиль магнитного поля (а); проекция пучка на плоскость yz (б); Общий вид электронной пушки в изометрии (в)

На Рис. 3.22(б) приведена проекция пучка в плоскости yz , а на Рис. 3.22(в) — общий вид пушки в изометрии. Из этих рисунков видно, что обеспечивается устойчивая фокусировка и слияния парциальных пучков не происходит.

Рис. 3.23 иллюстрирует процесс компрессии в пушке. На нем приведены сечения пучка через 0.39 мм по оси z . Как и на Рис. 3.16, различные цвета соответствуют различным значениям заряда частиц. На Рис. 3.24 показано расположение пучков в пролетном канале (на расстоянии 2.7 мм от поверхности катода).

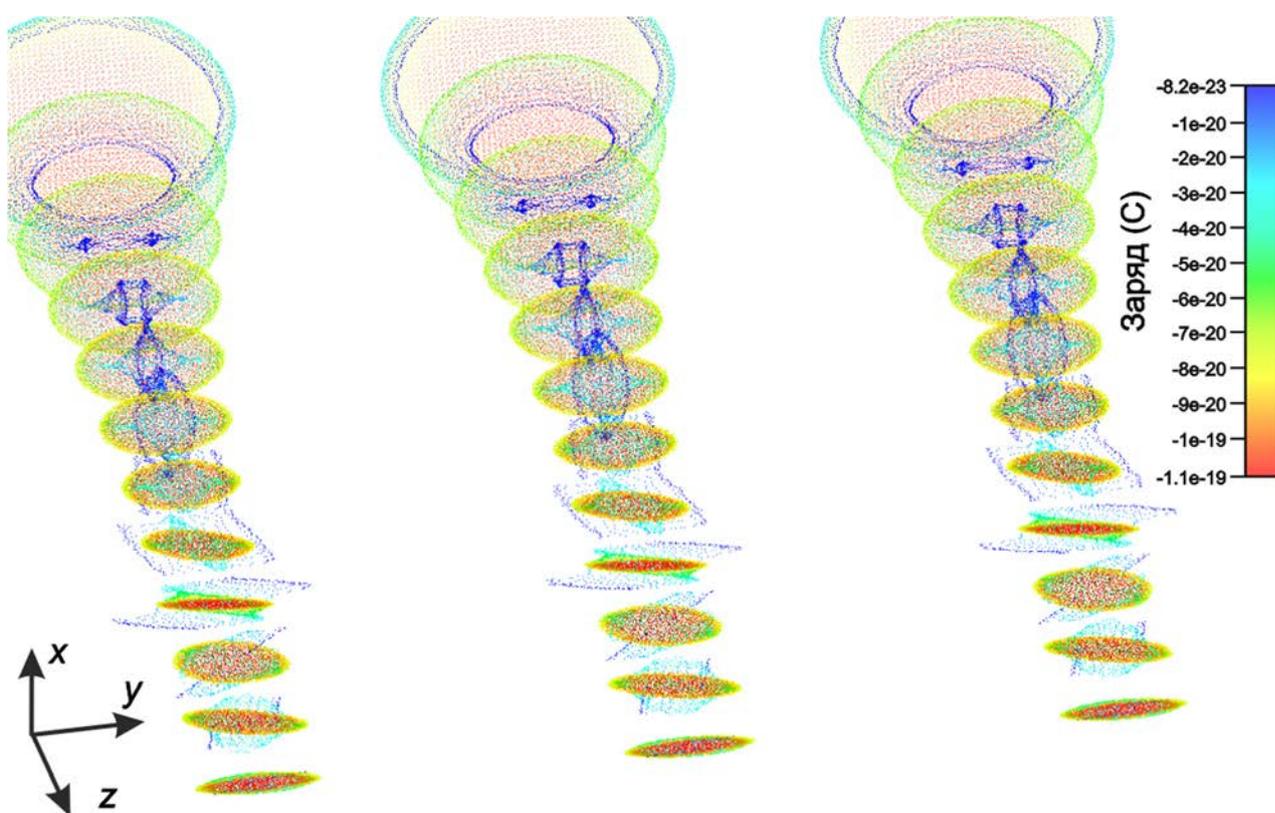


Рис. 3.23. Распределение заряда частиц в области формирования пучка

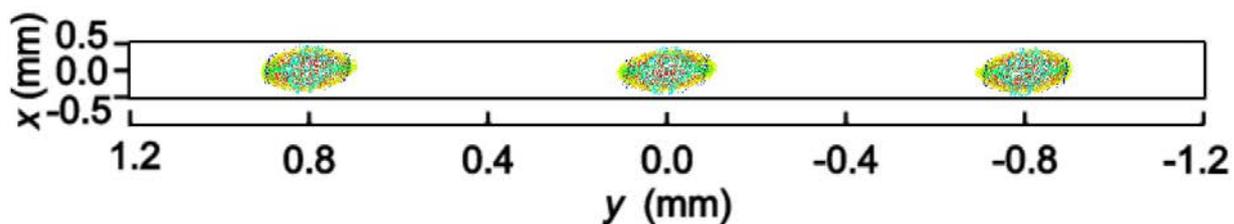


Рис. 3.24. Расположение пучков в пролетном канале ($z = 5.46$ мм)

Видно, что пучок имеет достаточно сложную структуру, аналогичную описанной в разд. 3.3. В частности, видно низкоплотное гало, которое создается частицами, эмитированными с краев катода. Оно пульсирует сложным образом, однако не оказывает заметного влияния на токпрохождение, поскольку частицы имеют малый заряд.

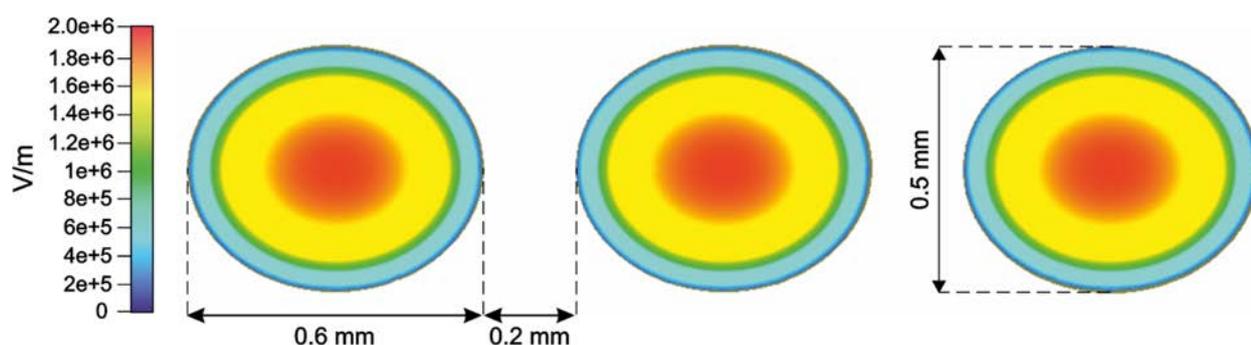


Рис. 3.25. Распределение напряженности электрического поля на поверхности катода

За счет увеличения площади катода и его температуры полный эмитируемый ток в ЭОС повысился до ~ 186 мА, первеанс 0.59×10^{-7} А/В^{3/2}, т.е. примерно в два раза больше по сравнению с конфигурацией, рассмотренной в п. 3.3. При этом ток каждого парциального пучка составляет 62 мА. В то же время, из-за увеличения отверстий в фокусирующем электроде (которые совпадают с размерами катодных выступов) в данной конфигурации напряженность поля на катоде уменьшается, что показано на Рис. 3.25. Максимальные значения поля в центрах парциальных катодов составляют $\sim 2.0 \times 10^4$ В/см, что примерно в 2.5 раза меньше, чем в разд. 3.3. Средняя плотность токоотбора составила 26.31 А/см². Несмотря на то, что это выше, чем в разд. 3.3, где плотность токоотбора составляла ≈ 19 А/см², такая величина вполне достижима для существующих термоэмиссионных катодов. В частности, на предприятии АО «НПП «Алмаз» разработаны электронные пушки, способные выдерживать токовые нагрузки до 40 А/см² в квазинепрерывном режиме [103].

Размеры парциального пучка на Рис. 3.24 составляют 75 мкм \times 250 мкм. Таким образом, компрессия по площади составляет 16 раз, а средняя плотность тока в пучке ~ 400 А/см².

Также представляет интерес анализ структуры плотности тока в пучке. На Рис. 3.26 показано сечение электронного пучка в плоскости yz . Видно, что пучок сильно пульсирует, при этом распределение тока по сечению существенно неоднородно. Существенные пульсации ЭП с высокой компрессией обусловлены тем, что электроды пушки являются планарными.

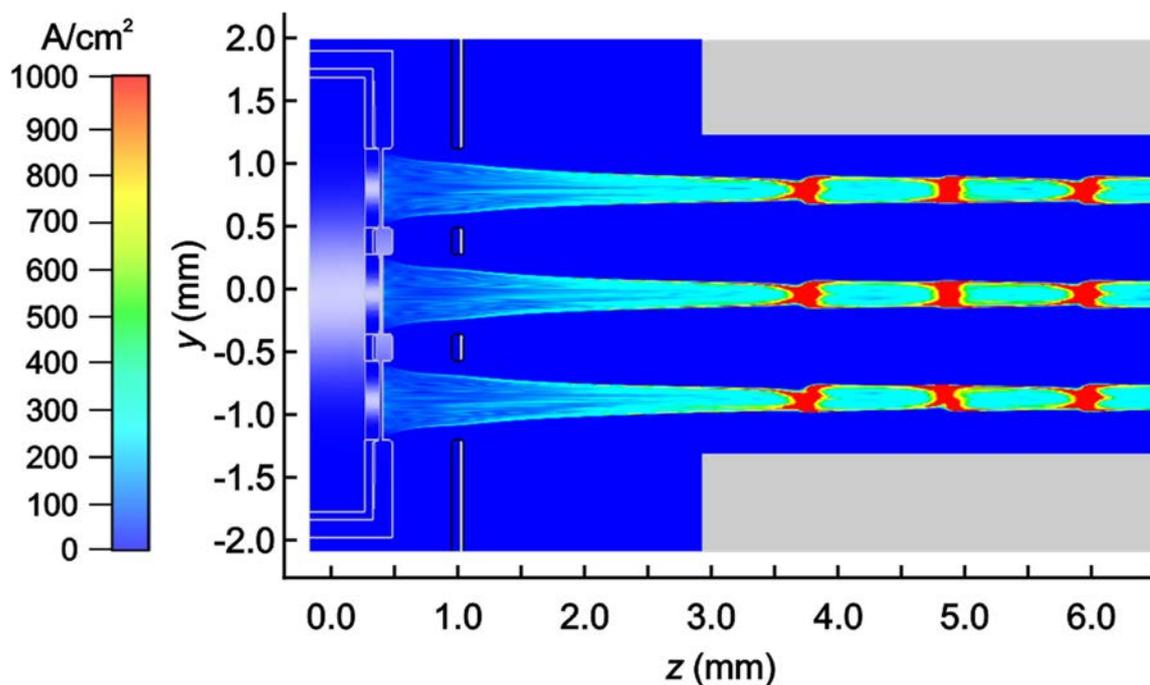


Рис. 3.26. Распределение плотности тока в сечении yz . Потенциал сетки $U_g = 1.48$ кВ, потенциал анода $U_a = 21.4$ кВ

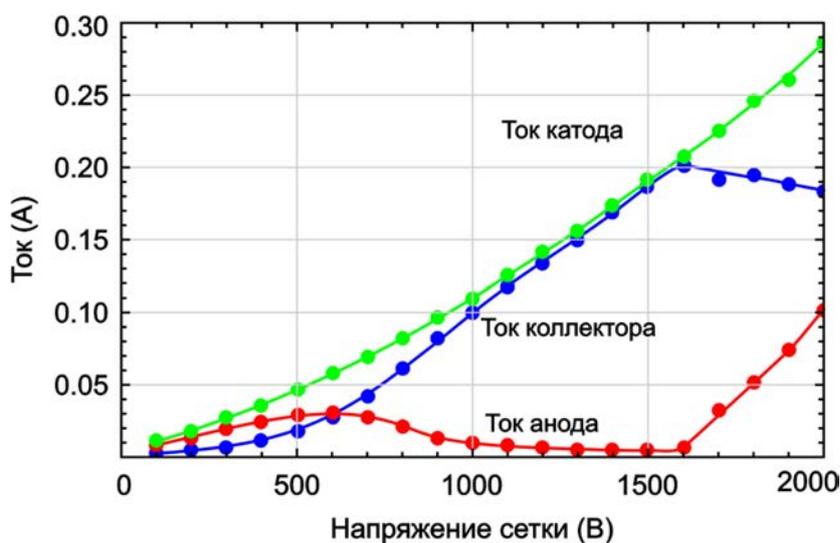


Рис. 3.27. Результаты расчета ВАХ пушки с многолучевым ЭП при потенциале анода $U_a = 21.4$ кВ

На Рис. 3.27 представлены ВАХ пушки. Показаны зависимости общего тока катода, тока коллектора и тока, оседающего на стенки пролетного канала, в зависимости от напряжения диафрагмы U_g . Анодное напряжение по-прежнему равно 21.4 кВ, что определяется условиями синхронизма с волной в ЗС [87].

В целом ВАХ на Рис. 3.27 аналогичны исследованным в разделе 3.3 для пушки с меньшей компрессией (см. Рис. 3.15). В частности, при напряжении диафрагмы ниже 1000 В происходит значительный перехват пучка на аноде. При $U_g = 1.0 - 1.6$ кВ ток, осевший на стенки пролётного канала, очень мал, т. е. наблюдается хорошая фокусировка пучка. Однако при $U_g > 1.6$ кВ токооседание начинает быстро увеличиваться. Максимальный ток коллектора $I_{col} = 0.2$ А достигается при напряжении сетки 1.6 кВ. При напряжении диафрагмы 3.2 кВ происходит переход в режим температурного ограничения эмиссии, при этом ток насыщения превышает 550 мА.

Такое поведение объясняет Рис. 3.28, на котором представлены профили плотности тока в плоскости xz , рассчитанные при различных напряжениях диафрагмы. При низком напряжении диафрагмы происходит перефокусировка пучка, как показано на Рис. 3.28(а). Кроссовер расположен до плоскости анода. В результате большая часть тока пучка перехватывается анодом. С увеличением U_g кроссовер смещается к аноду. В диапазоне напряжений $U_g = 1.0 - 1.6$ кВ пучок полностью фокусируется в пролетный канал, см. Рис. 3.28 (б). Заметим, что на краях пучка появляется граничная высокоплотная область, плотность тока в которой значительно выше, чем в центре ЭП. С увеличением напряжения на сетке компрессия ослабевает и эта часть пучка начинает оседать на аноде Рис. 3.28 (в). Это приводит к быстрому увеличению анодного тока.

На Рис. 3.29 приведены сечения пучка в плоскости xu на различных расстояниях от катода. Хорошо видно, как пучок пульсирует в вертикальном направлении. Также на Рис. 3.29 видны упомянутые выше кольцеобразные высокоплотные области с большой плотностью тока на краю пучков. В точках максимального сжатия, например, при $z = 4.8$ мм или при $z = 6.0$ мм, плотность

тока достигает очень высоких значений $\sim 10^3$ А/см².

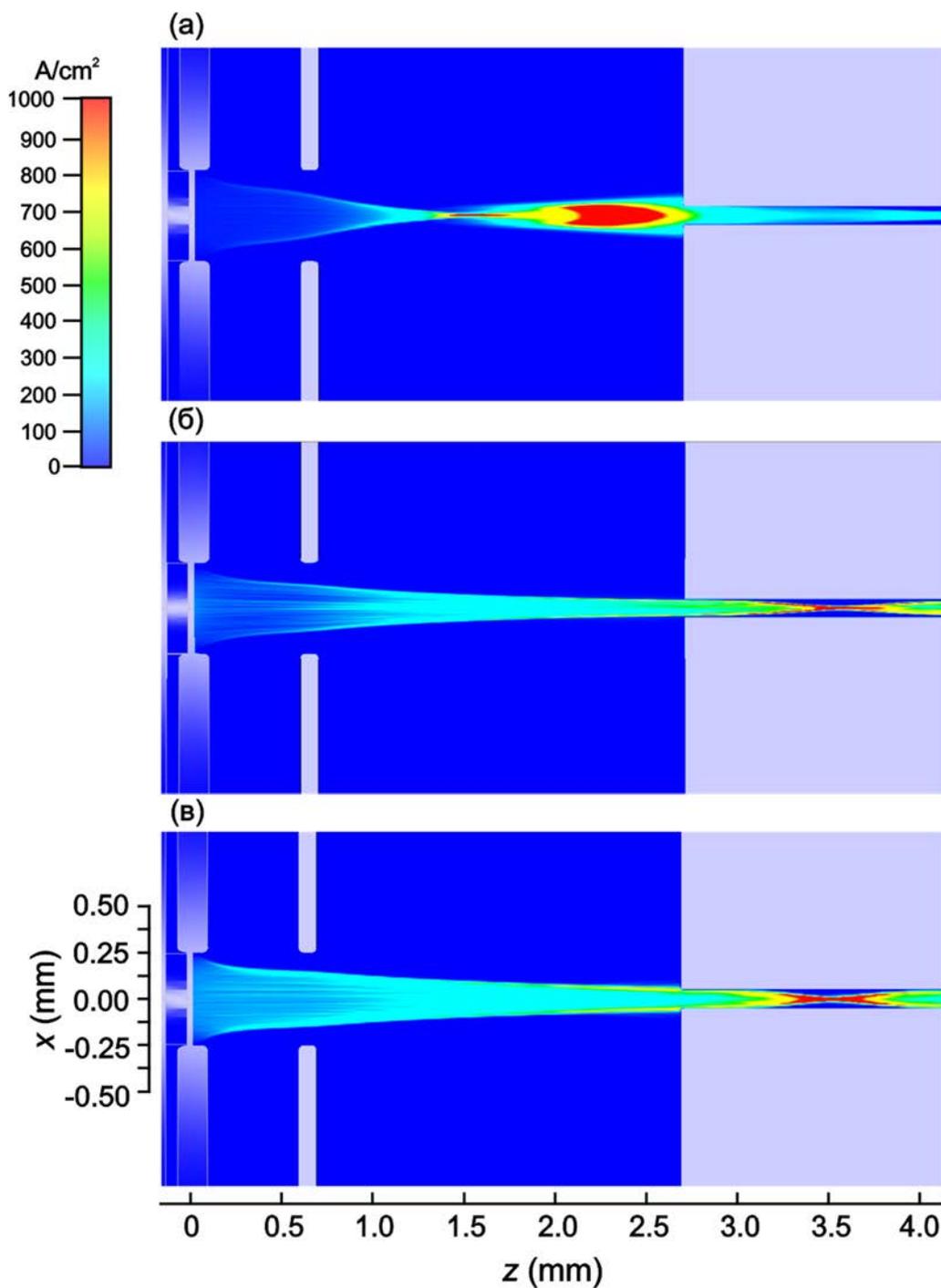


Рис. 3.28. Распределение плотности тока в сечении xz . Потенциал анода $U_a = 21.4$ кВ, потенциал сетки $U_g = 0.5$ кВ (а), 1.48 кВ (б) и 1.7 кВ (в)

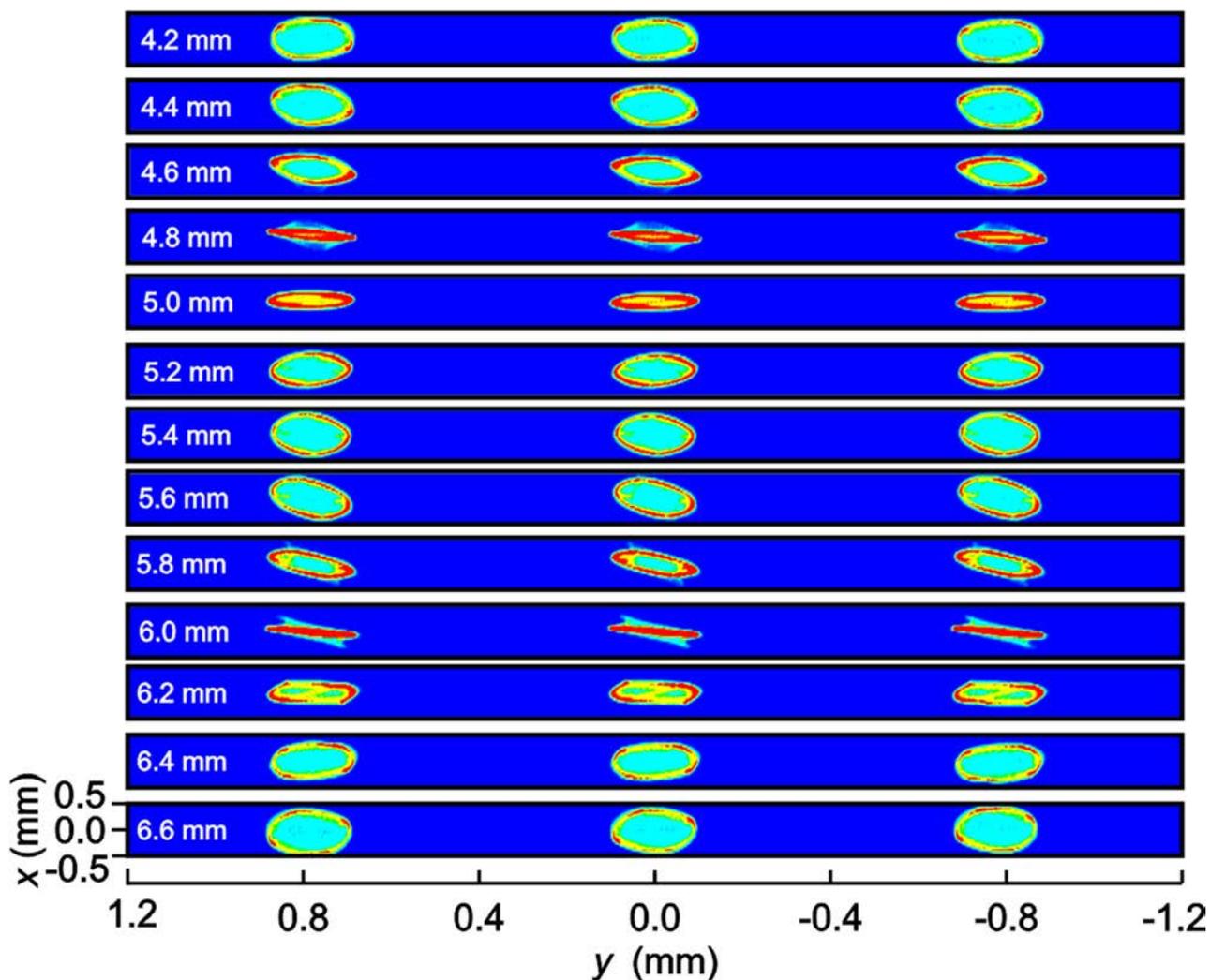


Рис. 3.29. Распределение плотности тока в сечениях x - y внутри пролетного канала на различных расстояниях от катода. Потенциал сетки $U_g = 1.48$ кВ, потенциал анода $U_a = 21.4$ кВ

Также было проведено моделирование транспортировки пучка в канале ЗС в поле разработанной магнитной системы [99]. Размеры пролетного канала, как и в разд. 3.3, составили $0.1 \text{ мм} \times 2.4 \text{ мм} \times 25 \text{ мм}$. На Рис. 3.30 приведены проекции пучка в плоскостях xz и yz . Расчеты показывают, что в пролетном канале имеет место токоосаждение 4.91 мА , а ток коллектора равен 180.97 мА . Таким образом, токопрохождение составляет 97.3% .

Также на Рис. 3.30 видны пульсации пучка с пространственным периодом, определяемым циклотронной длиной волны $\lambda_c = 2\pi v_{0z}/\omega_c \approx 2.4 \text{ мм}$, где v_{0z} — скорость пучка, ω_c — циклотронная частота. Причем в плоскости xz пучок имеет более сложную, практически бипериодическую форму (Рис. 3.30(а)). Это объясняется движением частиц, формирующих разреженное гало пучка

(подробнее см. разд. 1.3). Эти частицы имеют высокие поперечные скорости, которые могут достигать 10% от продольной скорости. Соответственно, в поперечной плоскости они совершают колебания практически от верхней стенки канала до нижней, ср. Рис. 1.19.

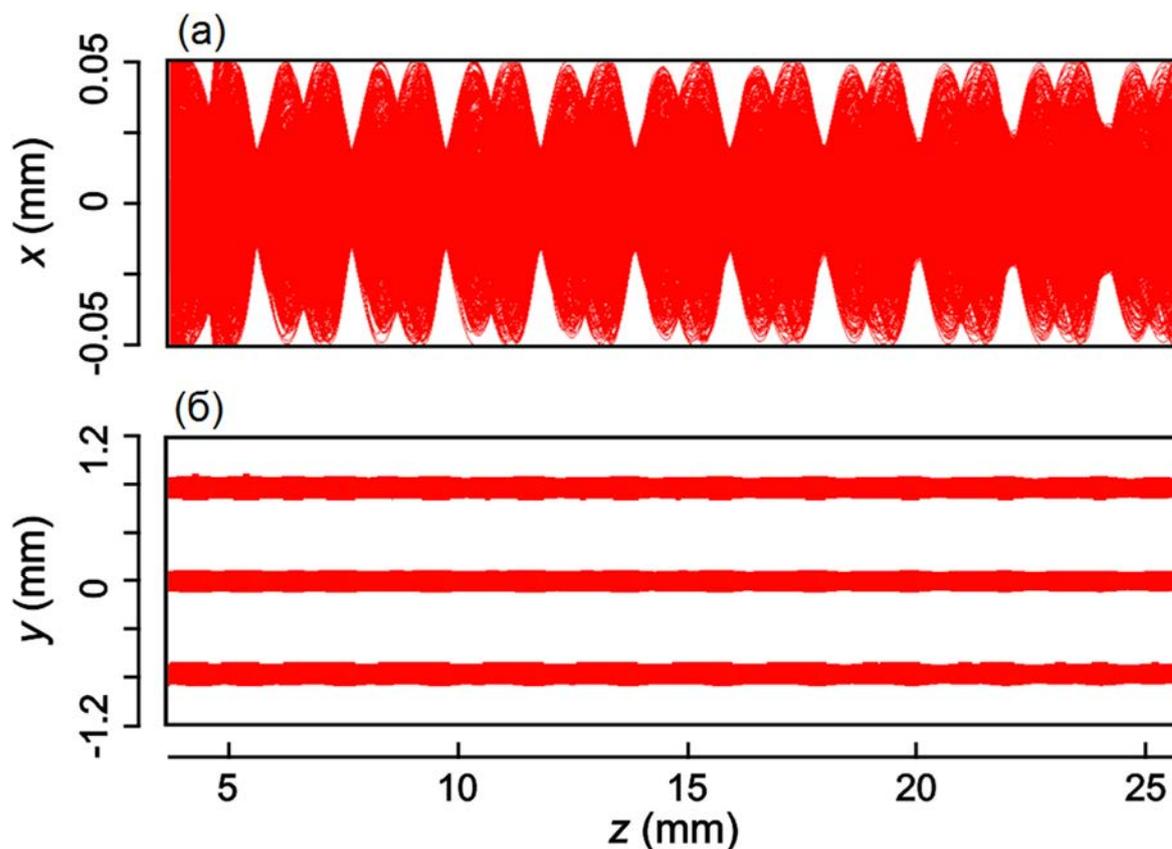


Рис. 3.30. Профиль многолучевого пучка, проекция в плоскостях: (а) xz , (б) yz

3.4. Выводы

В данной главе представлены результаты исследований ЭОС с трехлучевым эллиптическим электронным потоком. Эллиптическая форма лучей обеспечивает меньшую деформацию пучка при его транспортировке в однородном магнитном поле. Анализ эквипотенциальных контуров многолучевого пучка показал, что он испытывает значительно меньшие деформации и менее чувствителен к нарушениям симметрии. Напротив, для одиночного эллиптического пучка с высокоаспектным соотношением сторон поле пространственного заряда возмущается сильнее.

Разработаны конструкции электронных пушек с компрессией многолучевого ЭП для ЛБВ диапазона 0.2 ТГц, где рабочей является высшая поперечная мода ЗС. Пушка содержит три эллиптических катода, теньевую сетку и управляющую сетку (диафрагму). Размеры эллиптических отверстий в диафрагме и теневой сетке совпадают с размерами парциальных катодов.

Выбор триодной электронной пушки с планарными электродами и одинаковыми отверстиями в них обусловлен тем, что такая конструкция упрощает технологический процесс изготовления и сборки (см. раздел 4.2). Варьирование напряжения управляющей диафрагмы позволяет управлять процессом фокусировки пучка.

Первый вариант конструкции обеспечивает формирование трёхлучевого ЭП с током 93 мА (т.е. ток каждого парциального луча 31 мА). Коэффициент компрессии составляет 6.4 единицы по площади, характерные размеры луча 75 мкм×450 мкм. Средняя плотность тока в пролетном канале составляет 123.4 А/см². При этом токовая нагрузка на катод равна 19.29 А/см².

Далее ЭОС была доработана с целью увеличения плотности тока пучка. За счет увеличения размеров катода и незначительного увеличения его температуры ток был повышен до 186 мА (ток парциального луча 62 мА). Компрессия была увеличена до 16 единиц, характерные размеры одного луча 75 мкм×250 мкм. При этом плотность тока на катоде составляет 26.3 А/см², а средняя плотность тока в канале превышает 400 А/см².

Оба варианта ЭОС показывают устойчивую транспортировку пучка в канале высотой 0.1 мм на расстояния порядка 25 мм без заметного оседания на стенки канала.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭОС

Данная глава содержит результаты разработки и экспериментальных исследований ЭОС, описанных в предыдущих главах. В п. 4.1.1 представлена пушка с прямоточным пучком, погруженная в однородное магнитное поле. В п. 4.1.2 изложены результаты исследований пушки с компрессией ленточного ЭП, которая рассматривалась в разд. 1.2, 1.3. В разделе 4.2 рассматривается электронная пушка с трёхлучевым эллиптическим пучком, конструкция которой описана в разд. 3.3. Кроме этого, в разделе 4.3 приведены результаты разработки двух конструкций ЗС для ЛБВ миллиметрового диапазона.

4.1. Пушки с однолучевым ленточным пучком

4.1.1. Пушка с прямоточным пучком, погруженная в однородное магнитное поле

При непосредственном участии автора диссертации созданы и исследованы компактные электронные пушки с ленточными электронными пучками. Исследования проводились совместно с сотрудниками АО «НПП «Алмаз» и СФ ИРЭ РАН (Ю.А. Григорьев, А.А. Бурцев, В.Г. Пименов, К.В. Шумихин). При разработке пушек ориентировались на параметры ЛБВ, которые рассматривались в работах [62-64].

Вначале была создана прямоточная пушка с планарным катодом и фокусирующим электродом, погруженная в однородное магнитное поле. Фотография пушки приведена на Рис. 4.1(а). Пушка состоит из импрегнированного катода с размерами $0.1 \times 0.7 \text{ мм}^2$ с рабочей температурой 1200°C . Планарный катод представляет собой прямоугольный выступ, который вырезается из катодной таблетки (диска) при помощи метода электроэрозии. Катодный диск изготовлен из пористой вольфрамовой матрицы, импрегнированной оксидом бария, на поверхность которой методом магнетронного напыления наносится пленка из осмия, иридия и алюминия

катода — 80 мА. При этом ускоряющее напряжение обеспечивалось высоковольтным модулятором и составило 20 кВ.

Ввиду высокой плотности тока на катоде измерения проводились в импульсном режиме при длительности импульса $\tau=10$ мкс, периодом $T=20$ мс и скважностью $Q=2000$.

4.1.2. Пушка с компрессией ленточного пучка

С целью снижения токовой нагрузки и увеличения тока пучка были созданы пушки с компрессией ЭП по вертикали. Как и в предыдущем случае, пушки имеют импрегнированный катод с рабочей температурой 1200°C . Всего было изготовлено три варианта пушек, причем коэффициент компрессии последовательно увеличивался. Для проектирования пушек вначале использовалась методика синтеза (см. раздел 1.2), а затем полученные результаты уточнялись при помощи моделирования в пакетах Lorenz-3EM и CST Particle Studio.

В первом варианте размер катода был увеличен до 0.2×0.7 мм², а для сжатия пучка использовались фокусирующие электроды в виде двух лепестков, расположенных у верхнего и нижнего края катода. Эти лепестки должны выдерживать высокие термические нагрузки. Поэтому они были изготовлены из тугоплавкого металла — гафния, который широко апробирован в производстве. Электроды сложной формы получены методом электроэрозии. Заготовка фокусирующего электрода устанавливалась в специальной цанге. Затем при помощи проволоки толщиной 20 мкм в плоскости детали вырезались тонкостенные лепестки.

Как и в первом случае, исследования в вакуумной камере проводились в импульсном режиме ($\tau=10$ мкс, $T=20$ мс, $Q=2000$). Однако в данном случае вместо коллектора к пушке поводился зонд-анализатор, который представляет собой диафрагму с малым отверстием. Она располагается на подвижной штанге внутри камеры, а ее перемещение по осям x и y осуществляется при помощи шаговых электродвигателей с точностью до 1 мкм.

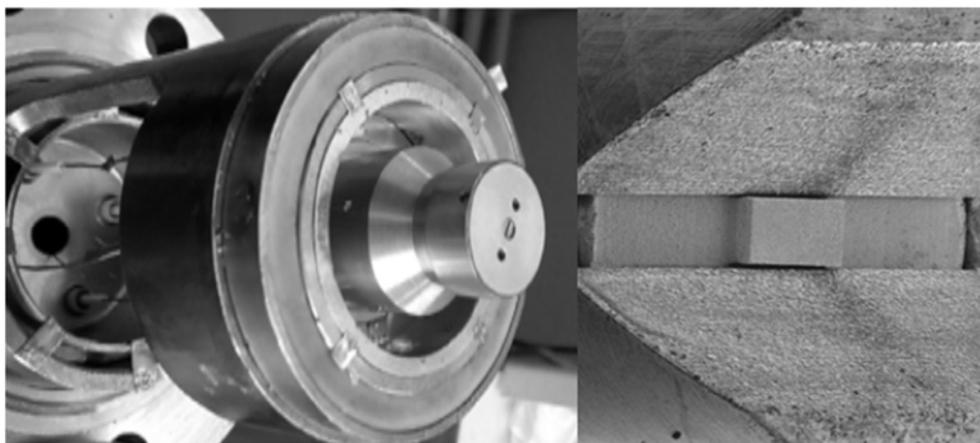
Диафрагма состоит из двух электрически изолированных друг от друга электродов, выполненных из графита, так как этот материал обладает низким коэффициентом вторичной эмиссии (<3% от общего тока). Электронный пучок частично осаждается на диафрагме, а частично проходит через отверстие малого диаметра и попадает на пластину коллектора. Таким образом можно провести измерение распределения плотности тока по сечению пучка.

Макет пушки состоял из катодного узла, анода толщиной 0.2 мм, в котором имеется отверстие 0.3×0.7 мм² и подвижной диафрагмы диаметром $D_{\text{внеш}} = 2$ мм с отверстием $D_{\text{диафр}} = 0.05$ мм. Анод и диафрагма находились под потенциалом 1200 В.

До начала эксперимента диафрагма установлена на плоскость анода, причем ее касание подтверждается наличием электрического контакта между выводами электродов на фланце вакуумной камеры. Такое положение электродов служит нулевой точкой отсчета в координатной системе зонда. После включения электронной пушки выполняется кратковременное срабатывание шагового двигателя на оси z и электроды размыкаются. Теперь зонд перемещается по осям x и y для поиска границ пучка, а его перемещение вдоль оси z позволяет изучать стадии формирования пучка.

При помощи этого метода было установлено, что лепестки обеспечивают линейную компрессию пучка в 4.4 раза. При этом плотность тока на катоде была равна 64 А/см², ток пучка равен 84 мА. В плоскости кроссовера экспериментально найденная толщина пучка составила ~ 45 мкм, плотность тока составила 264 А/см².

Во втором варианте пушки размер катода был увеличен до 0.5×0.8 мм². Для сжатия пучка по-прежнему использовались фокусирующие электроды в виде двух лепестков, расположенных у верхнего и нижнего края катода. Процесс формирования таких лепестков описан выше. Пушка, собранная с анодом, показана на Рис. 4.2 (а), а катод с фокусирующими лепестками — на Рис. 4.2 (б). По сравнению с предыдущим случаем высота анодного отверстия уменьшена до 0.2 мм, а ширина увеличена до 2 мм.



а

б

Рис. 4.2. Пушка с компрессией пучка по вертикали с планарным катодом $0.5 \times 0.8 \text{ мм}^2$: (а) макет электронной пушки с анодом; (б) СЭМ-изображение катода с фокусирующим электродом

Экспериментальные исследования проводились в импульсном режиме ($\tau=10 \text{ мкс}$, $T=20 \text{ мс}$, $Q=2000$) при напряжении на аноде 10 кВ, в связи с ограниченными возможностями имевшегося на момент проведения этих исследований высоковольтного модулятора. Соответственно, расстояние катод-анод было уменьшено до 2 мм. Увеличение размеров катода позволило увеличить максимальный ток пучка до 130 мА. Зондовое устройство перемещалось за анодным отверстием, при этом потенциал его диафрагмы составил 1200 В. Измерение компрессии пучка в вертикальном направлении при помощи зонда-диафрагмы показало, что на расстоянии 3 мм от анода пушки его толщина не превышала 100 мкм, т.е. компрессия была увеличена до ~ 5 ед.

Дальнейшим развитием этих исследований стало создание электронной пушки с четырьмя фокусирующими лепестками. Схема электронной пушки изображена на Рис. 4.3(а). Фотография электронной пушки представлена на Рис. 4.3(б), где виден катод, расположенный на держателе, поверх которого размещается фокусирующий электрод с лепестками.

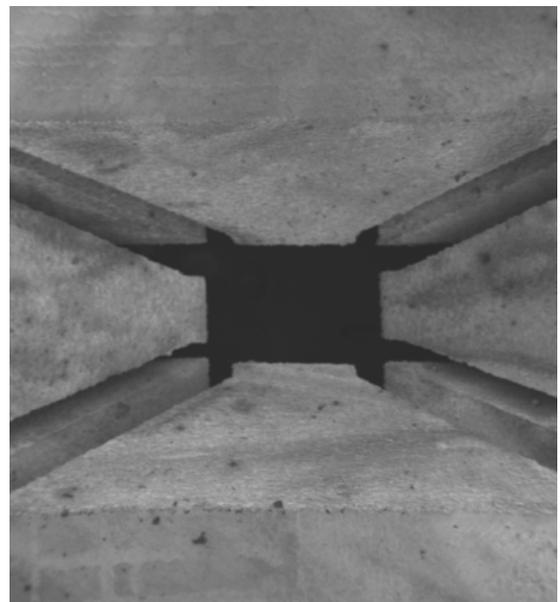
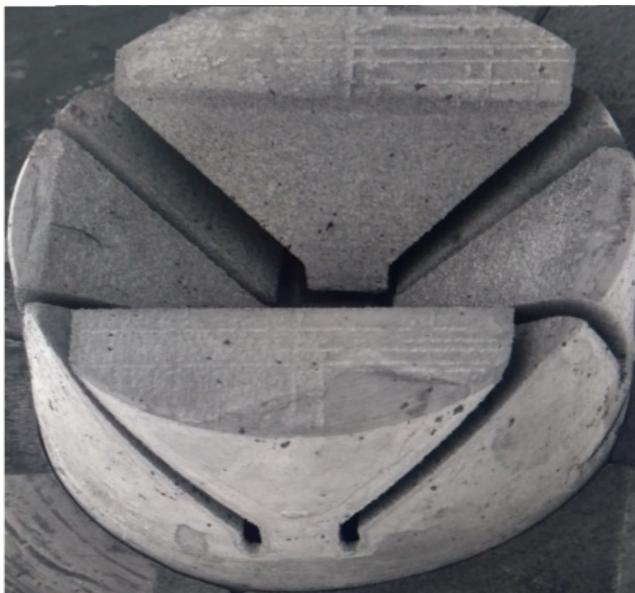
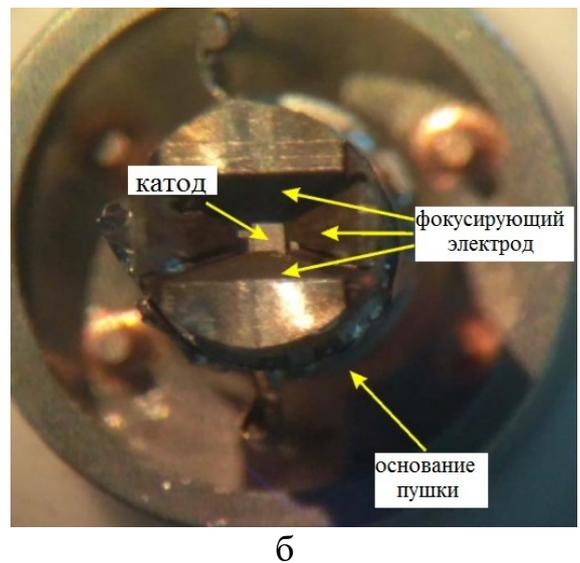
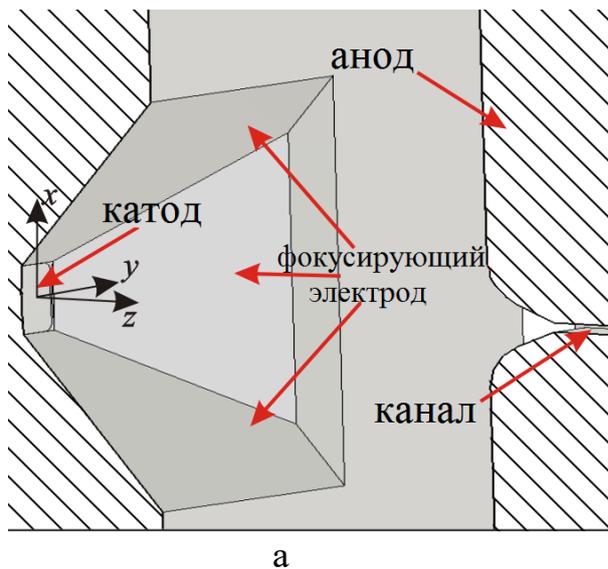


Рис. 4.3. Пушка с компрессией пучка с четырьмя фокусирующими лепестками: (а) схема пушки; (б) фотография катода, собранного с фокусирующим электродом и металлокерамическим блоком; (в,г) СЭМ-изображения фокусирующего электрода изготовленного в результате процесса электроискровой обработки

В данном случае был изготовлен катод прямоугольной формы с размерами $0.8 \times 0.8 \text{ мм}^2$, а фокусирующий электрод выполнен в виде «рупора». В отличие от предыдущих случаев катод имел не плоскую, а криволинейную цилиндрическую поверхность с радиусом кривизны 4.93 мм. Такая форма получена методом электроэрозии с помощью круглого медного прутка диаметром 9.86 мм, который подводился к поверхности катодной таблетки.

Ещё одна особенность состояла в том, что заготовка «рупора» располагается в цанге, которая поворачивается на 90° . Тем самым обеспечиваются вырезы лепестков, расположенных под разными углами. Сложность изготовления фокусирующего электрода заключается еще и в том, что лепестки соединяются между собой при помощи тонких «ножек» которые образуются в процессе электроискровой резки. Поэтому они дополнительно свариваются между собой точечной лазерной сваркой со стороны основания. СЭМ-изображения фокусирующего электрода приведены на Рис. 4.3 (в,г).

Процесс установки пушки в камеру и ее тренировки аналогичен предыдущим вариантам. Экспериментальные исследования по-прежнему проводились в импульсном режиме $\tau=10$ мкс, $T=20$ мс, $Q=2000$.

Поскольку данная пушка позволила достигнуть наилучших характеристик пучка, остановимся на результатах ее экспериментального исследования наиболее подробно. Прежде всего следует отметить два основных отличия от конструкции, представленной в разделе 1.3. Во-первых, как уже отмечалось, в экспериментальном исследовании анодное напряжение было снижено до 10 кВ из-за ограниченных возможностей доступного высоковольтного модулятора. Соответственно, расстояние между катодом и анодом было уменьшено до 2 мм, чтобы напряженность поля на катоде осталась неизменной. Во-вторых, измерения плотности тока пучка зондовым методом проводились в отсутствие магнитной фокусирующей системы, т.е. в эксперименте компрессия пучка осуществлялась только электростатическим полем. Ввиду этого высота отверстия в аноде пушки была увеличена по сравнению с расчетной, чтобы обеспечить прохождение пучка без оседания на анод. В итоге размеры отверстия составили 0.2×0.85 мм², толщина анода 0.2 мм.

На Рис. 4.4 (а) приведена экспериментальная ВАХ пушки, где показаны зависимости тока коллектора I_c и тока анода I_a от анодного напряжения U_a . Также на графике приведена кривая I_{CST} , показывающая зависимость тока катода от анодного напряжения U_a , рассчитанная в программном пакете CST.

Видно, что оседание на анод незначительно. ВАХ демонстрирует выход в режим температурного насыщения при напряжениях свыше 7 кВ. Исходя из результатов этих измерений, была оценена работа выхода электрона $W_e = 2.055$ эВ.

На графике отчетливо наблюдается расхождение между расчетной и экспериментальной ВАХ, включая плавный переход между режимами ограничения тока пространственным зарядом и температурным ограничением. Расхождения, очевидно, связаны с неоднородностью эмиссии. Их анализ проводился, например, в работах М.Ю. Глявина и соавторов [93, 94], где были описаны основные причины, которые объясняют расхождения с расчетами:

- Размытие переходной области связано с переходом различных участков катода в режим насыщения при разных значениях ускоряющего потенциала;
- В этой переходной области с ростом потенциала часть площади катода, работающая в режиме ограничения пространственным зарядом, уменьшается, а часть площади катода, работающая в режиме насыщения, увеличивается;
- Напряжение перехода каждого элементарного участка площади катода зависит от его эмиссионных свойств, т.е. чем более однороден катод по эмиссии, тем меньше будет зона перехода (по напряжению) из режима пространственного заряда в режим насыщения, и наоборот.

Отметим, что численные методики, позволяющие корректно учитывать эти факторы, были предложены в недавних работах [95, 96].

На Рис. 4.4 (б) представлены результаты экспериментального исследования структуры распределения плотности тока пучка в вертикальном направлении. В отличие от предыдущих случаев, отверстие в диафрагме зонда уменьшено до $D_{\text{диафр}}=0.02$ мм. Отверстие было изготовлено при помощи метода лазерной абляции. Результаты показывают, что кроссовер находится на расстоянии 6 мм от катода. В этом сечении толщина пучка не превышает 100 мкм. Таким образом, компрессия в вертикальном направлении достигает 16.

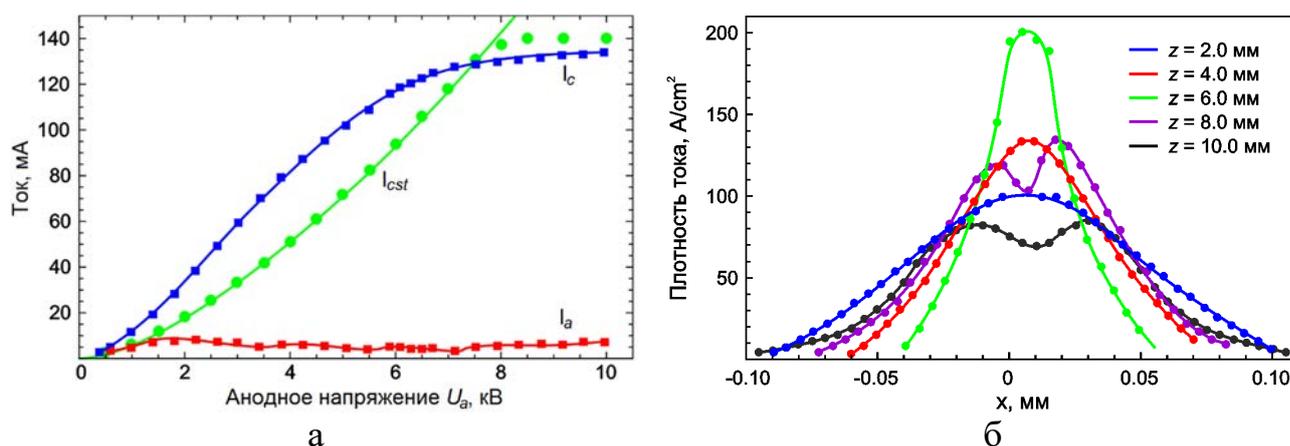


Рис. 4.4. Результаты экспериментального исследования пушки: ВАХ (а) и распределения плотности тока на различных расстояниях от катода (б)

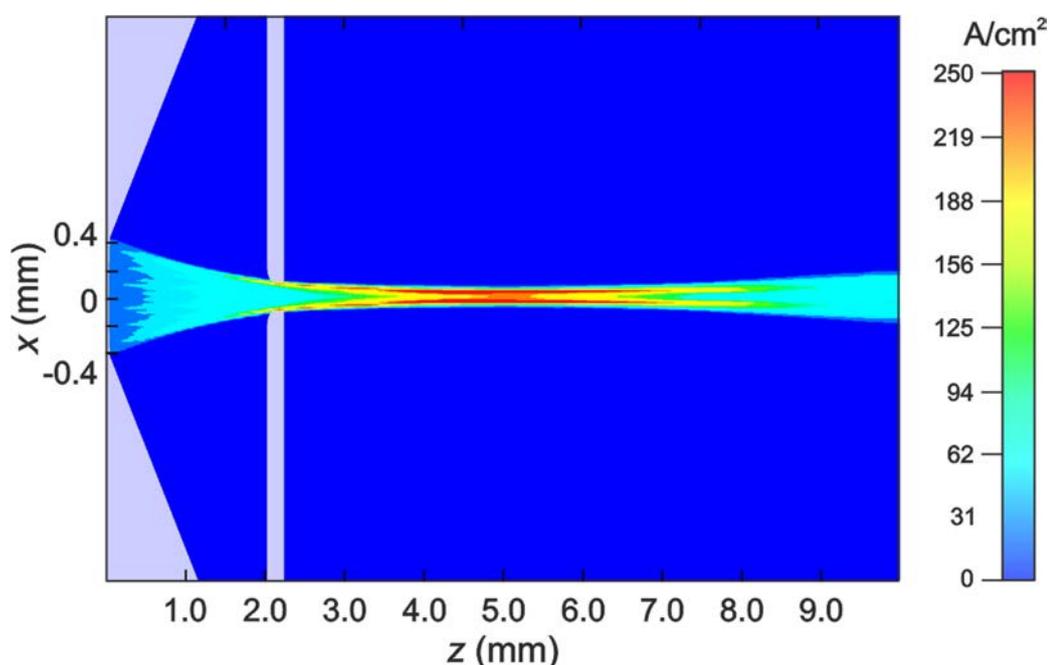


Рис. 4.5. Моделирование экспериментального макета пушки. Профиль плотности тока (вид сбоку) при анодном напряжении $U_a = 10$ кВ

За кроссовером пучок вновь начинает расширяться и плотность тока на его краях увеличивается. Это объясняется отсутствием фокусирующего магнитного поля.

Поскольку геометрия пушки отличается от рассмотренной в разд. 1.3 в части размеров и положения анода, было также проведено моделирование экспериментальной геометрии в пакете CST. На Рис. 4.5 приведен профиль плотности тока пучка. В целом результаты расчетов плотности тока достаточно

хорошо согласуются с экспериментальными, однако наблюдаются некоторые различия. В расчетах на расстоянии $z=2\div 4$ мм от катода наблюдается увеличение плотности тока на краях пучка. При $z=5\pm 0.2$ мм появляется кроссовер. При $z=6\div 9$ мм пучок расплывается и плотность тока на его краях увеличивается.

Структура ЭП, представленная на Рис. 4.5, также демонстрирует некоторые отличия от измеренной экспериментально. Так, в расчетах на расстоянии $z=2\div 4$ мм (до кроссовера) на краях пучка располагаются зоны с высокой плотностью тока. Напротив, в эксперименте при $z=2\div 4$ мм зона с высокой плотностью тока располагается в центре пучка. Положение кроссовера в эксперименте $z \approx 6$ мм от катода, а в расчете приведенном на Рис. 4.5, он находится на расстоянии $z = 5.0 \pm 0.2$ мм. В данном случае, расхождение расчета с экспериментом объясняется следующими причинами:

- «Тонкие» детали структуры пучка затруднительно исследовать при помощи обычного анализатора-диафрагмы. Проблема в том, что для более достоверной картины пучка необходимо применять не плоскую диафрагму с отверстием, а подвижный анод с криволинейной геометрией. При этом в нем необходимо сделать маленькое отверстие (~ 10 мкм) для более детального исследования «тонкой» структуры пучка;
- Диафрагма-анализатор неизбежно возмущает «тонкую» структуру пучка при передвижении по координатам;
- Тепловая деформация лепестков фокусирующих электродов (изменение углов их наклона) и тепловые уходы катода влияют на фокусировку ЭП, величину тока и первеанса пушки;
- Неравномерный отбор тепла лепестками фокусирующих электродов по торцам катода может влиять на ток эмиссии по его периметру;
- Ограниченная точность измерений.

4.2. Пушка с многолучевым пучком

4.2.1. Технологическая реализация многолучевой пушки

В данном разделе представлен процесс создания макета ЭОС с многолучевой электронной пушкой, которая была описана в разделе 3.3.

Как и в разделе 4.1.1, катод изготавливался при помощи метода электроэрозии. Однако для многолучевых пушек эта методика имеет свою специфику. Для пояснения всего процесса рассмотрим Рис. 4.6. Для прошивки катодной поверхности изготавливается дополнительный электрод, в котором размещается несколько отверстий под парциальные катоды. Это позволяет изготовить несколько катодов за один технологический цикл на катодной таблетке (диске). Однако электрод, который отвечает за формирование катодной поверхности (Рис. 4.6, поз. 4), имеет отверстия, которые изготавливаются одиночным цилиндрическим электродом, который поочередно формирует каждое отверстие (Рис. 4.6 поз. 1, 3). Так же изготавливаются отверстия в теневой сетке, диафрагме и аноде. Диаметр отверстий можно регулировать, изменяя электроискровой зазор между электродом и деталью. Такая технология использовалась, например, для изготовления электронной пушки, описанной в работах [103, 109, 131].

Однако, поскольку процесс позиционирования электрода имеет ограниченную точность, затруднительно обеспечить concentricность большого числа отверстий, которые изготавливаются поочередно в различных электродах. Из Рис. 4.6 видно, что concentricность отверстий значительно нарушается, что в свою очередь негативно сказывается на общей симметрии оптических элементов прибора негативно влияет на процесс формирования электронных пучков.

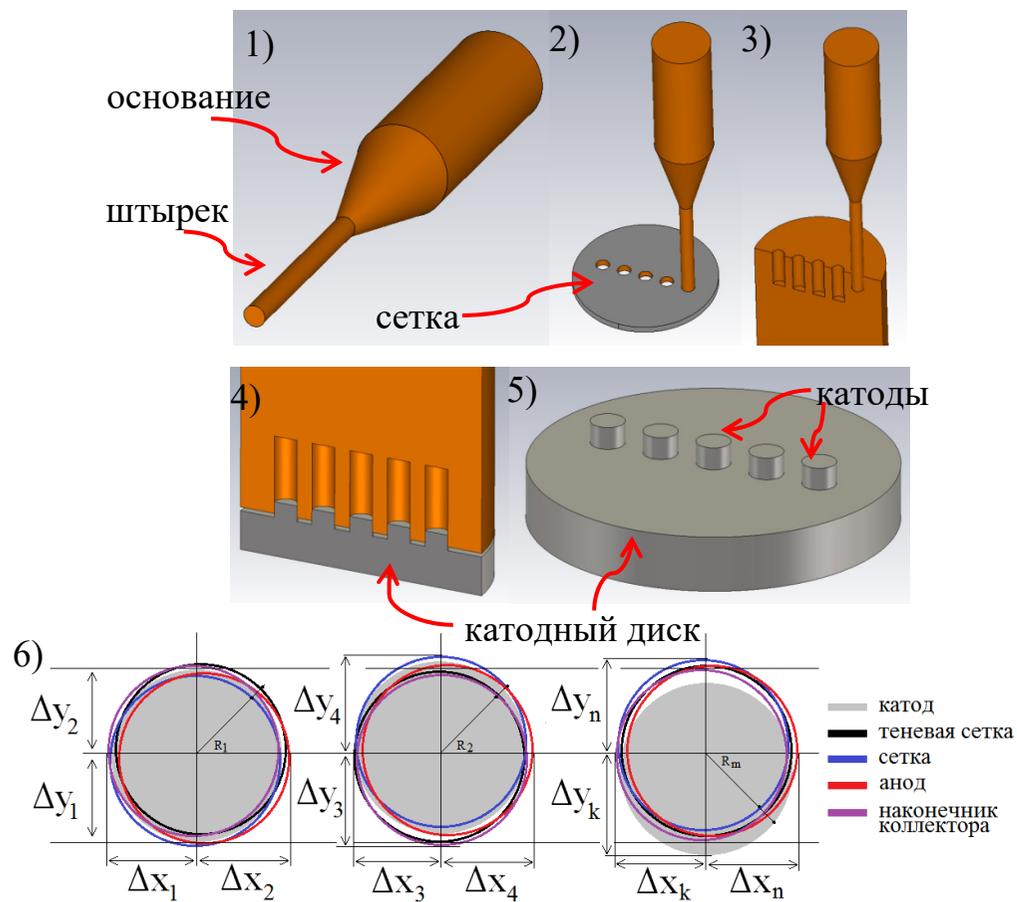


Рис. 4.6. К пояснению процесса прошивки катодной поверхности и электродов пушки методом электроэрозии

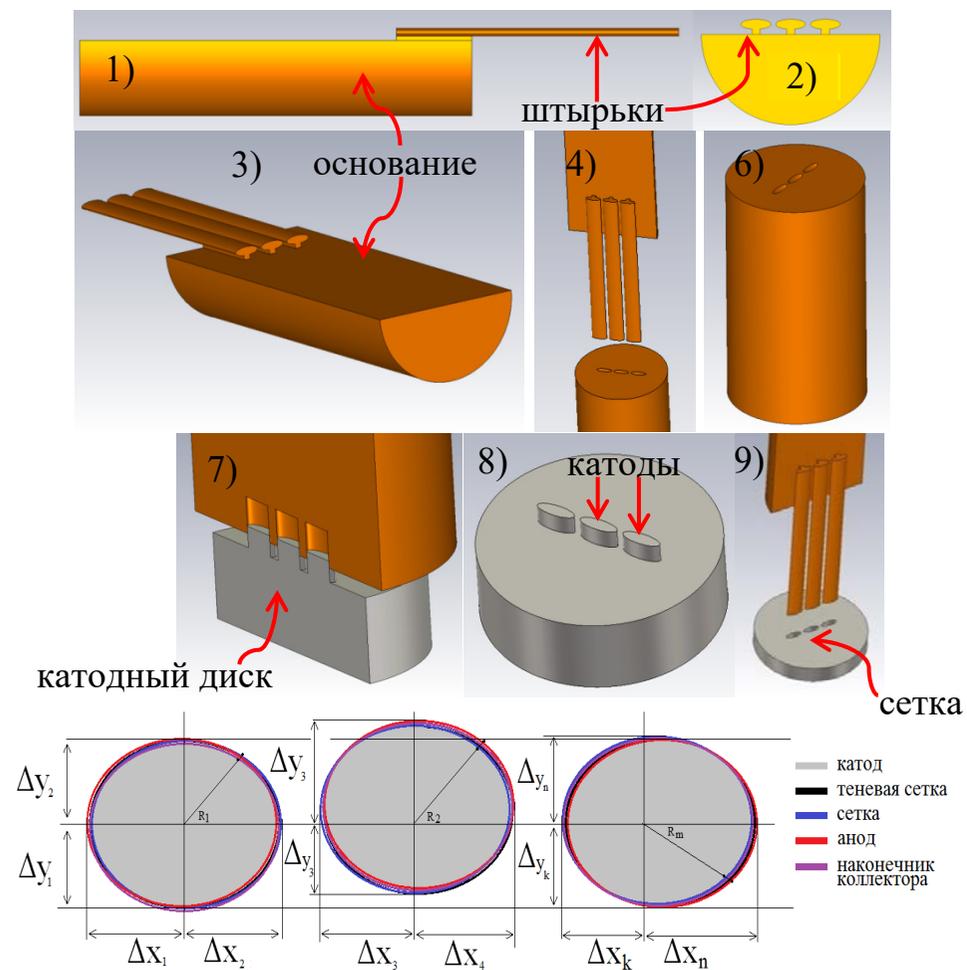


Рис. 4.7. К объяснению процесса прошивки многоштырьковым электродом

В связи этим, в диссертации предлагается новая технологическая методика, которая позволяет обеспечить более точное изготовление деталей многолучевых ЭОС и решить проблему совмещения нескольких отверстий и парциальных катодов. Методика проиллюстрирована на Рис. 4.7. Она отличается от обычной тем, что сразу на единой базе изготавливается несколько штырьков, которыми можно прошивать теневою и тянущую сетки. Таким образом, парциальный катод будет формировать пучок с оптической осью, совпадающей с осью отверстий остальных электродов.

Точность электроискровой обработки позволила изготовить электроды для прошивки с допусками по поперечным размерам ± 4 мкм. На Рис. 4.8 показаны фотографии электрода с тремя эллиптическими штырьками и цилиндрического электрода с тремя отверстиями для прошивки катодной поверхности.

Электронная пушка, созданная при помощи данного электрода, представлена на Рис. 4.9. Пушка располагается внутри цилиндрического держателя из ковара, который, в свою очередь, закреплен лазерной сваркой внутри металлокерамического изолятора. В керамику изолятора впаяны металлические кольца, на которых расположены выводы электродов пушки. В данном макете анодный вывод должен выдерживать напряжение величиной 20 кВ относительно катода.

Анод пушки представляет собой стальную чашку с отверстиями для электронных пучков, которая в то же время выполняет функцию полюсного наконечника магнитной системы. В анодном электроде предусмотрены реперные точки для его точной юстировки с пушкой и высокочастотным блоком (корпусом).

Данная электронная пушка защищена патентом РФ №179616 [134].

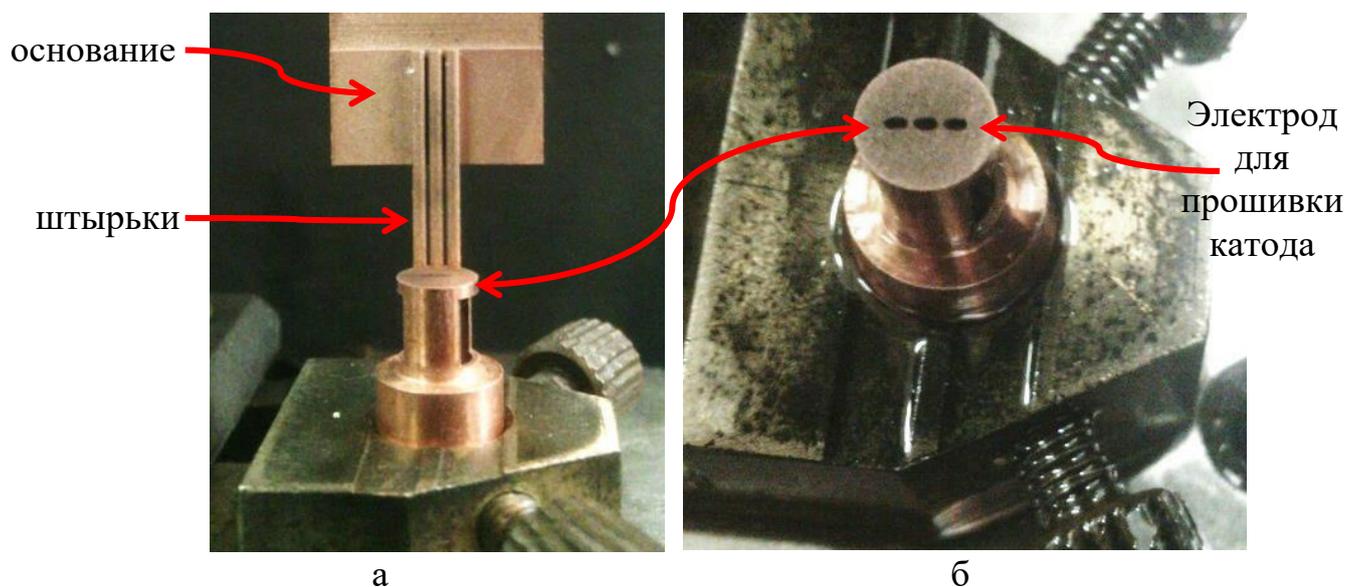


Рис. 4.8. Процесс изготовления электрода для прошивки катодных выступов: электрод с тремя эллиптическими штырьками, которыми прошивается теневая и управляющая сетки (а); электрод для прошивки парциальных катодов с эллиптическими отверстиями (б)

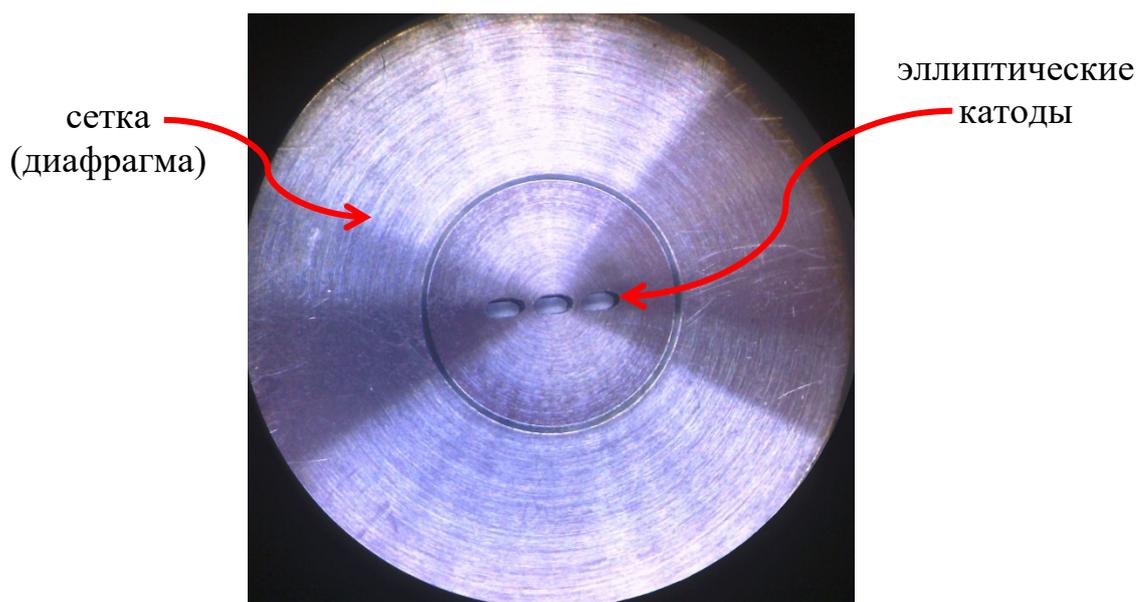


Рис. 4.9. Фотография электронной пушки

4.2.2. Результаты эксперимента

Для экспериментального исследования процесса транспортировки пучка был собран макет ЭОС, основным элементом которого является трехлучевая электронная пушка, описанная в разд. 4.2.1. Транспортировка пучка осуществлялась в прямоугольном пролетном канале с размерами $2.5 \times 0.4 \times 25$ мм³. Он выполнен из двух половинок медной заготовки, в которых методом микрофрезерования изготовлен канал с указанными выше размерами. В качестве материала корпуса выбрана бескислородная медь, которая прошла релаксационный отжиг во влажном водороде.

Для упрощения эксперимента в данном случае мы ограничились одноступенчатым коллектором. Он представляет собой цилиндр, внутри которого на керамическом изоляторе расположена медная чашка. На ее поверхность должен осаждаться электронный пучок.

Магнитная система обеспечивает в пролетном канале макета пиковое значение индукции магнитного поля $B_z = 0.55$ Тл. Она состоит из дюралюминиевой арматуры, в которую устанавливаются магниты из сплава Nd₂Fe₁₄B. Крепление деталей арматуры между собой осуществляется при помощи винтов, поэтому эту систему легко собирать на готовом макете. Магниты Nd₂Fe₁₄B покрыты пленкой никеля, и они просто размещаются вакуумной камере в отличие от магнитов из SmCo₅. В то же время, некоторые внутренние детали вакуумной камеры изготовлены из дюралюминия. Поэтому предполагалось, что дюралюминиевая арматура магнитной системы может ухудшать вакуум, но этот эффект будет нивелироваться мощными форвакуумными насосами.

Макет, собранный из вышеперечисленных элементов, представлен на Рис. 4.10. Видны металлокерамические выводы пушки — траверсы (1). Оболочка пушки состоит из изолятора (2) и анода (3). К аноду присоединен полюсный наконечник (4), а корпус пролетного полностью закрыт арматурой магнитной системы (5). В области выхода электронного пучка установлены полюсный наконечник (6) и коллектор (7).

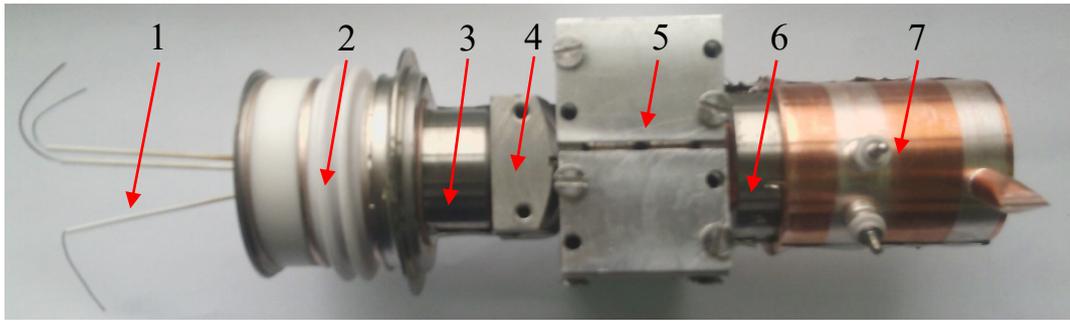


Рис. 4.10. Макет ЭОС: 1 – траверсы пушки; 2 – высоковольтный изолятор; 3 – анод; 4 – полюсный наконечник пушки; 5 – магнитная система NdFeB; 6 – полюсный наконечник коллектора; 7 – коллектор.

Макет фиксируется на прямоугольном металлическом основании манжетами из никеля. Выводы подогревателя, катода, диафрагмы, анода и коллектора подключаются к выводам в камере при помощи механического обжатия. Каждый вывод подведен к своей металлокерамической ножке, которая располагается на фланце камеры, отделяющей вакуум от атмосферы. К этим ножкам подключены выводы от высоковольтного модулятора.

Затем при помощи мультиметра каждый вывод проверяется на наличие токовых утечек. Исключение составляют выводы подогревателя и катода, которые соединены между собой в пушечном узле. Процесс установки макета ЭОС в вакуумную камеру демонстрируется на Рис. 4.11.

После установки крышка камеры закрывается и начинается процесс откачки. Экспериментальные исследования транспортировки пучка проводились в импульсном режиме с длительностью импульса $\tau=10$ мкс, периодом $T=20$ мс, давление в макете составляло $3 \cdot 10^{-7}$ Торр. Напряжение на аноде равнялось 10 кВ ввиду отсутствия доступа к более высоковольтному модулятору.

По результатам экспериментальных исследований общий ток пучка составил 93 мА при напряжении на диафрагме 900-1000 В и температуре катода 1100°C. В ходе эксперимента было найдено запирающее напряжение, которое равнялось -100 В.

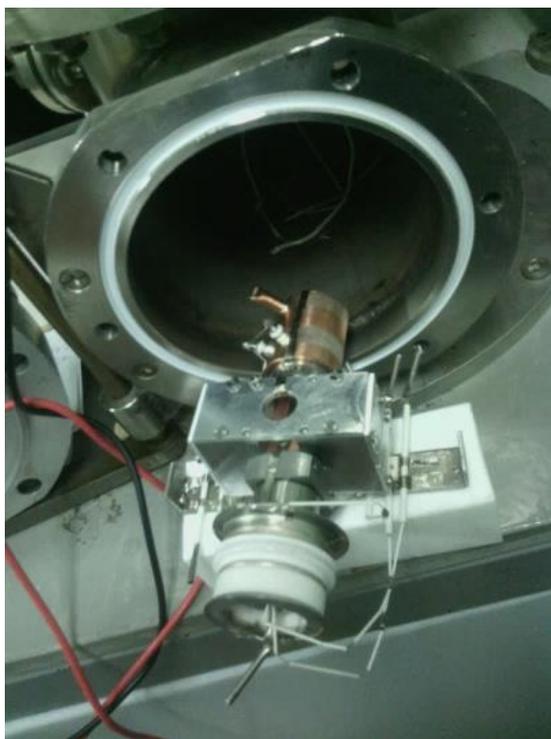


Рис. 4.11. Процесс установки макета ЭОС

В ходе эксперимента также было показано, что ток каждого отдельного луча можно увеличить до 70 мА за счет повышения рабочей температуры катода до 1200°C. Общий ток с катода, полученный в режиме температурного ограничения, в этом случае составил 210 мА. При этом токопрохождение в канале составило 60%. Однако наблюдалось ухудшение уровня вакуума, т.к. измерения проводились внутри вакуумной камеры с непрерывной откачкой.

Измерения токопрохождения через диафрагму проводились при более низких токах с одного луча до ≈ 30 мА (в режиме ограничения пространственным зарядом). Напряжение на аноде составило 10 кВ, при этом в пролетном канале сечением 2.5×0.4 мм² достигнуто токопрохождение 60%.

Предложенная и реализованная конструкция макета ЭОС с эллиптическими пучками предназначена для создания ЛБВ диапазона 0.2 ТГц с замедляющей системой «сдвоенная гребенка». В такой ЭОС предполагается взаимодействие ЭП с высшей поперечной модой, имеющей три вариации ВЧ поля вдоль широкой стенки канала [87].

4.3. Изготовление замедляющих систем субтерагерцевого диапазона

4.3.1. ЗС типа одиночной и сдвоенной гребенки

Наиболее распространенной методикой изготовления любых тонкостенных миниатюрных деталей вакуумных приборов является бесконтактная электроэрозионная обработка. Данный метод, в отличие от механической обработки, позволяет формировать сложные микроструктуры (отверстия, пазы, ламели) не повреждая кристаллическую решетку детали. Следовательно, деталь обработанная таким образом при нагреве не будет испытывать деформирующих aberrаций кристаллической решетки. Применение электроискровой технологии обусловлено возможностью изготовления деталей в одном технологическом цикле с достаточно точными размерами, возможностью изготовления сложных трехмерных конфигураций электродов и электродинамических частей ЗС. Последующая химическая обработка позволяет получать гладкие, полированные поверхности, в отличие от процессов и технологий, основанных на высокоэнергетическом воздействии на поверхность материала.

На Рис. 4.12 представлены фотографии двух типов ЗС, предназначенных для широкополосных ЛБВ диапазона 0.2 ТГц, которые изготовлены при помощи электроискровой обработки. Данные образцы ЗС изготавливались на АО «НПП Алмаз» при непосредственном участии автора диссертации.

Заготовка ЗС размещалась в специально разработанной оснастке, погруженной в ванну с деионизированной водой. Затем проволока электроискрового станка последовательно подводилась к нескольким сторонам заготовки для поиска базовой поверхности. Это достигалось при помощи электрического контакта между проволокой и деталью. Далее начиналось формирование ламелей ЗС. Толщина проволоки составляла от 30 до 50 мкм. Среднеквадратичное значение тока процесса 0.02 А. Средняя линейная скорость перемещения проволоки составила 0.01 м/мин. Шероховатость поверхности изготавливаемой структуры после процесса электрохимической полировки

соответствовала 12 классу. Среднее значение электроискрового зазора между проволокой и деталью может варьироваться в зависимости от тока и напряжения подаваемых на проволоку. Как правило, при обработке микроразмерных деталей величину такого зазора можно регулировать в диапазоне 10-40 мкм, он зависит от скорости процесса и величины тока, подаваемого на образец.

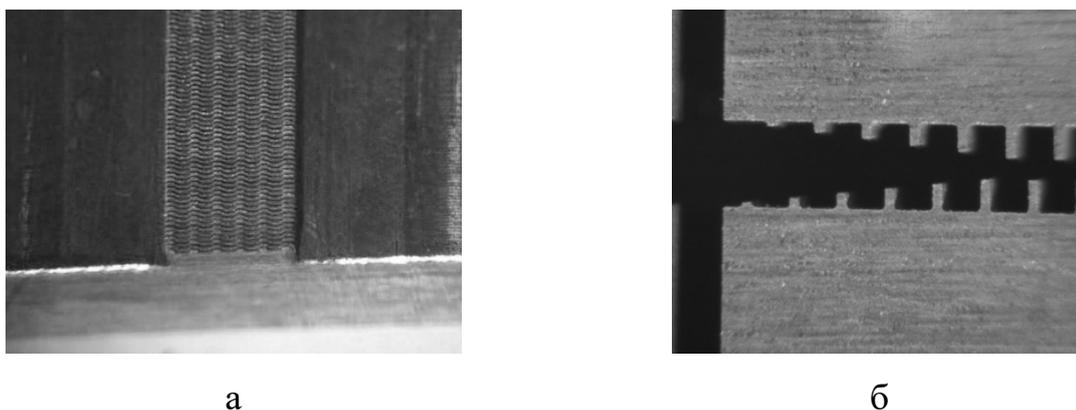


Рис. 4.12. Образцы ЗС изготовленные методом электроискровой обработки: а – одиночная гребенка; б – двойная гребенка

Данные измерений оптической микроскопии показали, что уровень среднеквадратичного отклонения размеров изготовленных элементов периодической структуры гребенки изменяется в пределах 3-5 мкм в начале структуры и 5-8 мкм в конце структуры. Здесь требуется некоторое пояснение. Дело в том, что при работе шаговых двигателей станка с каждым новым технологическим циклом изменяется величина допуска из-за того, что неизбежно растет «убегание» от базовой поверхности и проволока проходит через сложную систему направляющих роликов, которые подвержены трению и затирке на микроуровне.

4.3.2. Многоэтажный меандр

В данном разделе рассматривается технология изготовления ЗС типа «многоэтажный меандр» V-диапазона (50-70 ГГц). Подобная ЗС была предложена в работах [97, 98]. Она представляет собой ВЧ-пакет на основе изогнутой металлической ленты, которая упакована между двумя

диэлектрическими подложками в прямоугольном волноводе (см. Рис. 4.13). Изогнутая лента поочередно образует диафрагмы с отверстиями для пролета электронных пучков, а перемычки между диафрагмами опираются на торцы диэлектрических подложек.

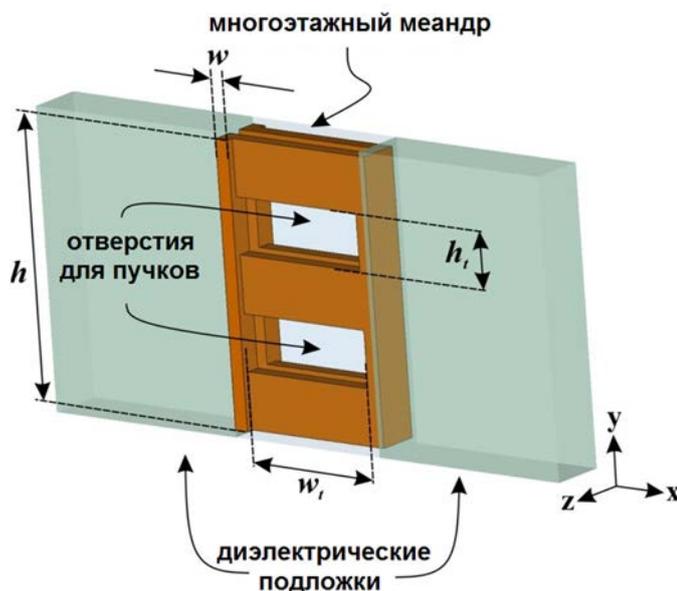


Рис. 4.13. Схема ЗС типа «многослойный меандр»

Кроме того, многослойный меандр позволяет устранить некоторые известные недостатки микрополосковых ЗС на диэлектрических подложках: проблемы с теплоотводом, возможное накопление объемного заряда на поверхности диэлектрика, сильно неравномерное распределение продольной компоненты электрического поля вблизи металлической пленки ЗС.

В соответствии с результатами, представленными в [98], толщина ленты меандра равна $w=50$ мкм, его высота $h=1$ мм, период 100 мкм, а размеры прямоугольных отверстий для электронных пучков $h_t \times w_t$ равны 0.2×0.5 мм² (см. Рис. 4.13). При этом, согласно расчетам электронно-волнового взаимодействия, при суммарном токе пучков 200 мА и ускоряющем напряжении 18 кВ выходная мощность на частоте 68 ГГц составляет 250 Вт в режиме насыщения.

Автором диссертации совместно с А.В. Стародубовым был предложен способ формирования подобной структуры. В качестве материала ЗС была выбрана полоса из бескислородной меди толщиной 50 мкм. Планарная лента

меандра с прямоугольными отверстиями для электронных пучков изготавливалась методом лазерной абляции при помощи импульсного волоконного лазера (YAG:Nd) с длиной волны 1064 нм.

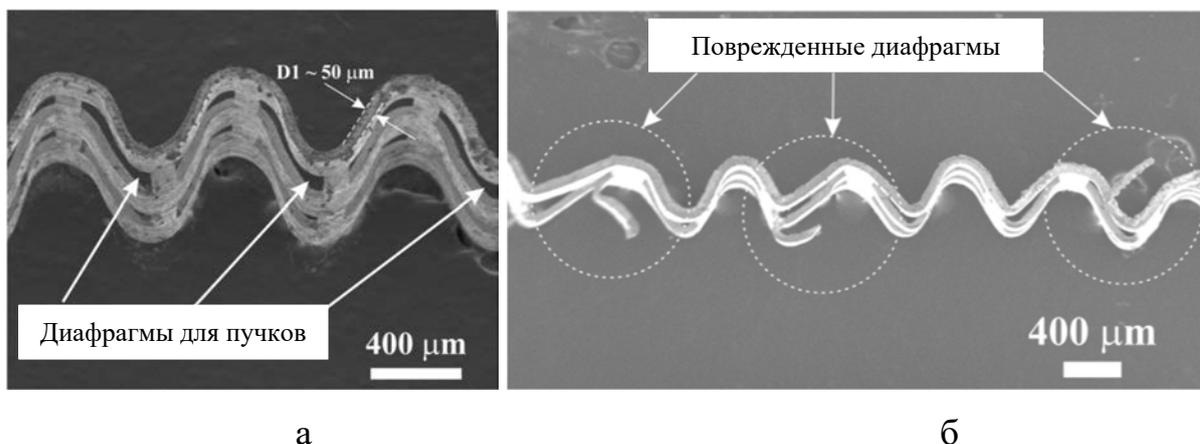


Рис. 4.14. Влияние релаксационного отжига на формовку ЗС: (а) цельные диафрагмы, (б) поврежденные диафрагмы

Было изготовлено несколько полос ЗС с двумя каналами для электронных пучков на 50 периодов. Размеры полосы и прямоугольных отверстий измерялись с помощью электронной микроскопии MIRA II Tescan LMU и JEOL-7100. Измерения показали, что обеспечивается требуемая точность изготовления.

Формовка меандра с периодом порядка 100 мкм является сложным технологическим процессом, который находится в стадии оптимизации, поэтому мы ограничились периодом 750 мкм. В данном случае изгиб ленты обеспечивался специальными зубчатыми вальцами, через которые пропусклась полоса ЗС, при этом она приобретала синусоидальную форму.

На Рис. 4.14 показан результат изгиба медной полосы с рядом прямоугольных отверстий в виде меандра. Видно, что серия прямоугольных отверстий образовала диафрагмы для пролета электронных пучков. Следует отметить, что релаксационный отжиг медной полосы перед гибкой имеет важное значение. Без отжига после изгиба появляются деформации и разрывы структуры (Рис. 4.14, б).

Затем после формовки проходит процесс плазменной очистки. СЭМ-фотографии полученных образцов представлены на Рис. 4.15. Видно, что структуры имеют регулярный период и обеспечивается соосность отверстий для электронных пучков.

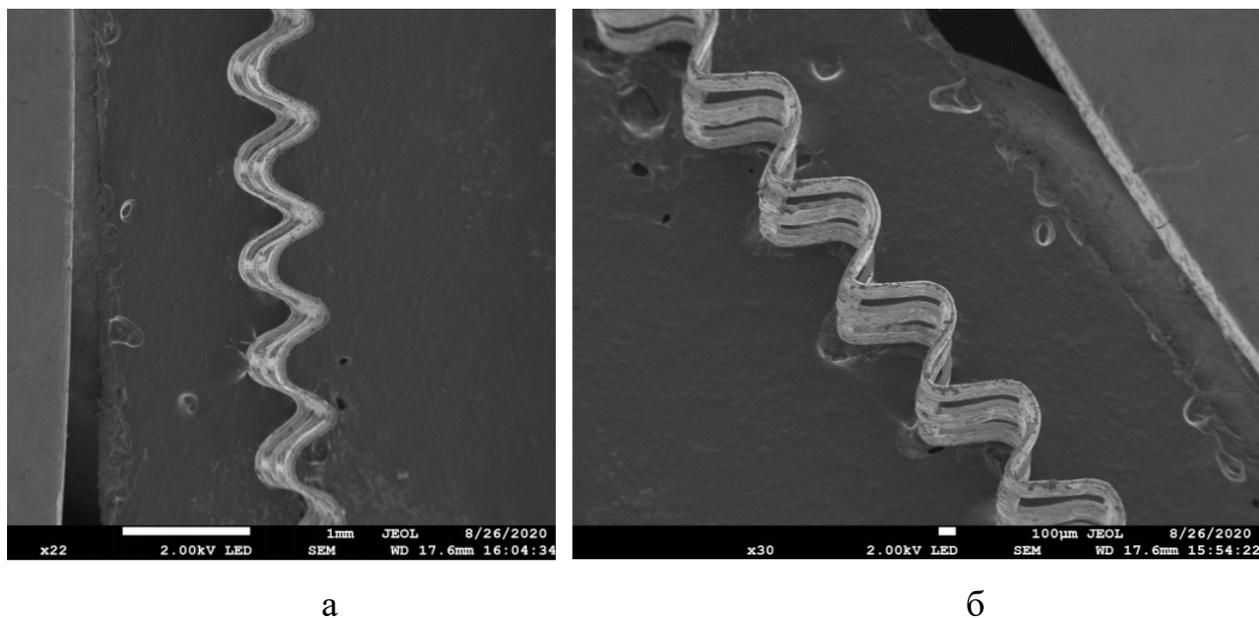


Рис. 4.15. СЭМ-изображения фрагментов ЗС, изготовленных методом формовки: (а) вид сверху, (б) вид в изометрии

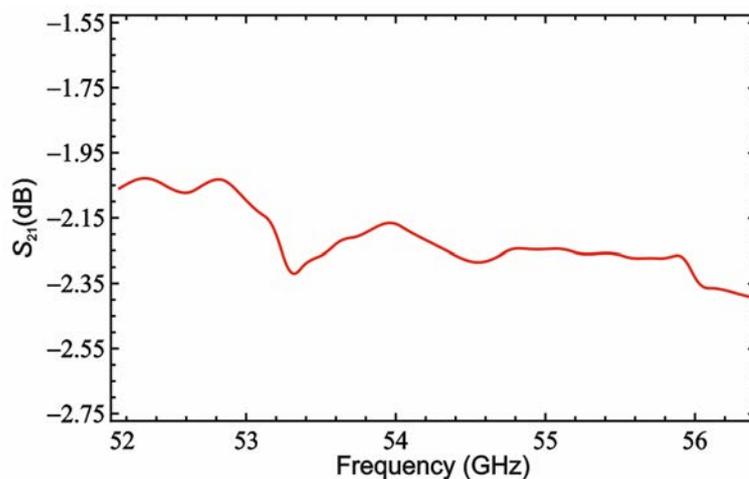


Рис. 4.16. Результаты измерений электродинамических параметров ЗС

Для холодных измерений на боковые стороны ЗС накладывались диэлектрические подложки из кварцевого стекла которые прижимались к системе при помощи манжет из синтетического каучука. Потом система

опускалась в прямоугольный волновод с размерами $3.60 \times 1.8 \text{ мм}^2$, и манжеты последовательно удалялись. Таким образом ВЧ-пакет был размещен в волноводе, к фланцам которого присоединялись измерительные головки анализатора цепей. Измерения проводились с помощью двухпортового панорамного измерителя КСВН Р2-69. Результаты измерений, представленные на Рис. 4.16, показывают, что потери ВЧ-пакета в полосе частот 52–56 ГГц не превышают -2.5 дБ .⁶ На более высоких частотах не удалось добиться согласования ЗС.

4.4. Выводы

В результате проведенных исследований были созданы пушки с компрессией ленточного ЭП по вертикали, которые позволяют снизить токовую нагрузку на катод и увеличить ток пучка в пролетном канале ЭОС. Был изготовлен ряд вариантов пушек с ленточными пучками, в которых последовательно увеличивался коэффициент компрессии. Вначале была создана прямоточная пушка на основе импрегнированного катода лезвийной формы с размерами $0.1 \times 0.7 \text{ мм}^2$, рабочей температурой 1200 C° и плотностью тока с поверхности катода 114 А/см^2 .

Для формирования пучка с компрессией в первом варианте размер катода был увеличен до $0.2 \times 0.7 \text{ мм}^2$, а для сжатия пучка использовались фокусирующие электроды в виде двух лепестков, расположенные у верхнего и нижнего края катода. В результате экспериментальных исследований характерная компрессия ЭП составила $\sim 4.4 \text{ ед}$.

Во втором варианте пушки размер катода был увеличен до $0.5 \times 0.8 \text{ мм}^2$. Измерение компрессии пучка в вертикальном направлении, как и в первом случае проводилось при помощи зонда-диафрагмы. Оно показало, что на расстоянии 3 мм от анода пушки толщина ЭП не превышала 100 мкм, т.е. компрессия была увеличена до $\sim 5 \text{ ед}$.

⁶ Холодные измерения ВЧ-пакета ЗС проводились автором совместно с В.В. Емельяновым.

Дальнейшим развитием этих исследований стало создание электронной пушки с четырьмя фокусирующими лепестками и катодом прямоугольной формы с размерами $0.8 \times 0.8 \text{ мм}^2$. В данном варианте фокусирующий электрод выполнен в виде «рупора». В отличие от предыдущих случаев катод имел не плоскую, а криволинейную цилиндрическую поверхность с радиусом кривизны 4.93 мм. Исследование структуры распределения плотности тока пучка при помощи зонда-диафрагмы показало, что плотность тока в кроссовере составляет 200 А/см^2 , а компрессия в вертикальном направлении достигает ~ 16 ед.

Были разработаны и исследованы ЭОС с трехлучевым эллиптическим ЭП. Предложена методика, позволяющая создавать многолучевую электронную микропушку с эллиптическими катодами, защищенная патентом РФ [134]. Пушка и макет ЭОС создаются с помощью прошивки отверстий специальным электродом, представляющим собой основание, от которого отходят эллиптические штыри. Данный электрод позволяет формировать парциальные катоды и идентичные им отверстия в электродах пушки и наконечниках ЭОС с высокой точностью. Были проведены экспериментальные исследования транспортировки пучка в макете ЭОС, в котором достигнуто токопрохождение 60%.

Также были апробированы методики создания ЗС субтерагерцового диапазона. Был предложен способ формирования структуры ЗС типа «многоэтажный меандр». Он заключается в изготовлении с помощью лазерной абляции периодической системы отверстий в медной пластине. Затем с помощью формовки пластине с отверстиями придается форма меандра. Предварительные холодные измерения электродинамических параметров структуры показывают, что потери ВЧ-пакета в полосе частот 52–56 ГГц не превышают -2.5 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям систем формирования низкоперевансных ленточных электронных пучков для вакуумных СВЧ приборов суб-ТГц диапазона.

Основные полученные результаты заключаются в следующем:

1. Разработана ЭОС формирования ленточного ЭП с компрессией ~ 16 ед. в вертикальном направлении и перевансом 0.35×10^{-7} А/В^{3/2}. Электронная пушка имеет четырехлепестковый рупорный фокусирующий электрод и катод с криволинейной цилиндрической поверхностью с радиусом кривизны 4.93 мм. При напряжении анода 19.75 кВ, ток пучка составляет 96 мА, толщина пучка в кроссовере около 50 мкм.

2. Предложена конструкция магнитной фокусирующей системы, которая состоит из двух полюсных наконечников, верхнего и нижнего магнитов и боковых магнитов-вставок для уменьшения влияния боковой компоненты магнитного поля. Магнитное поле на оси системы составляет 1.1 Тл, а протяженность однородного участка — 55 мм.

3. С помощью программного пакета CST Studio Suite исследован процесс длительной транспортировки ленточного ЭП с высокой компрессией в микроразмерном канале сечением 0.1×0.85 мм². Показано, что пучок имеет сложную структуру распределения частиц, а именно, высокоплотную центральную часть и краевую низкоплотную диффузную область с малым количеством частиц (гало). Несмотря на оседание незначительного количества краевых частиц на стенки канала, токопрохождение превышает 99%.

4. Изучено влияние асимметрии и несоосности на транспортировку ленточного пучка в ЭОС. Обнаружено, что наибольшее влияние оказывает поворот пушки относительно канала в плоскости xz (максимально допустимый угол поворота до 0.3°) и вертикальное смещение пушки относительно канала (до 20-25 мкм).

5. Изучена транспортировка ленточного ЭП с высокой компрессией в поле реверсной магнитной системы. Показано, что по сравнению с системой с

однородным полем использование реверсной магнитной системы позволяет уменьшить массу магнитов примерно в 3.5 раза. Увеличение веса магнитов во второй секции реверса повышает продольную компоненту магнитного поля на $\approx 40\%$ по сравнению с первой секцией. Это, в свою очередь, позволяет улучшить токопрохождение и полностью избавиться от токооседания на стенки канала. Положение реверса должно быть согласовано с областью минимальной вертикальной пульсацией пучка.

6. С помощью программного пакета Lorenz-3EM проведен анализ эквипотенциальных контуров для различных конфигураций ленточного ЭП. Показано, что ЭП, состоящий из трех лучей эллиптической формы, при транспортировке в однородном магнитном поле испытывает значительно меньшие деформации и менее чувствителен к нарушениям симметрии, чем одиночный пучок прямоугольной или эллиптической формы с высокоаспектным соотношением сторон.

7. Разработаны электронные пушки с компрессией многолучевого ЭП для ЛБВ диапазона 0.2 ТГц, где осуществляется взаимодействие с полем высшей поперечной моды замедленной волны. Пушка содержит три эллиптических катода, теньевую сетку и управляющую сетку (диафрагму). Размеры эллиптических отверстий в диафрагме и теневой сетке совпадают с размерами парциальных катодов. В ходе моделирования в пакете CST Studio Suite получен максимальный ток 186 мА, первеанс 0.59×10^{-7} А/В^{3/2} (ток парциального луча 62 мА). Компрессия по площади составляет 16 единиц, плотность тока на катоде — 26.3 А/см², средняя плотность тока в канале превышает 400 А/см².

8. Создана и экспериментально исследована прямоточная пушка на основе импрегнированного катода прямоугольной формы с размерами 0.1×0.7 мм², рабочей температурой 1200°С и плотностью тока с поверхности катода 114 А/см². В эксперименте получен ток до 80 мА.

9. Создана и экспериментально исследована электронная пушка с катодом прямоугольной формы размером 0.8×0.8 мм² и фокусирующим электродом в виде рупора из четырех «лепестков». Катод имеет криволинейную

цилиндрическую поверхность с радиусом кривизны 4.93 мм. В эксперименте получен ток до 135 мА. Анализ структуры распределения плотности тока пучка при помощи зонда-диафрагмы показал, что плотность тока в кроссовере составляет 200 А/см², а толщина пучка в кроссовере менее 0.1 мм.

10. Разработана и экспериментально исследована ЭОС, содержащая пушку с компрессией трехлучевого эллиптического ЭП, защищенную патентом РФ [134]. Предложена методика, позволяющая повысить точность формирования парциальных катодов и соответствующих им отверстий в электродах пушки и наконечниках ЭОС. Экспериментально получен ток 93 мА (т.е. ток каждого парциального луча 31 мА). Проведено экспериментальное исследование транспортировки пучка в макете ЭОС, достигнуто токопрохождение 60%.

11. Предложен способ формирования структуры ЗС типа «многоэтажный меандр». Он заключается в изготовлении с помощью лазерной абляции периодической системы отверстий в медной пластине. Затем с помощью формовки пластине с отверстиями придается форма меандра. Изготовлены образцы ЗС V-диапазона. Измерения электродинамических параметров структуры показывают, что потери ВЧ-пакета в полосе частот 52–56 ГГц не превышают –2.5 дБ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаю искреннюю признательность и благодарность Бурцеву Антону Александровичу и Рыскину Никите Михайловичу, за научное руководство данной работой, за помощь в расчетах, подготовке и проведению экспериментов.

Хочу поблагодарить Григорьева Юрия Алексеевича за неоценимую помощь в постижении основ создания и проектирования электронных пушек, за всевозможные наставления и помощь в постановке задач исследования, за помощь в расчетах, проектировании макетов, проведении экспериментов и становления меня как специалиста. Благодарю Григорьева Михаила Алексеевича за неоценимую помощь в постижении основ физических процессов, происходящих в мире вокруг нас — на земле, в космосе, в мире элементарных частиц и человеческом социуме.

Благодарю Пименова Владимира Григорьевича за помощь в подготовке и проведения экспериментов. Благодарю Гамаюнова Юрия Григорьевича за помощь в обсуждении работы и мудрые советы.

Хочу выразить глубокую благодарность Шалаеву Павлу Даниловичу и Золотых Дмитрию Николаевичу за поддержку в рутинных трудовых буднях и помощь в решении сложных научных задач.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВАХ – вольтамперная характеристика

ВЧ – высокочастотный

ЗС – замедляющая система

ЛБВ – лампа бегущей волны

ЛОВ – лампа обратной волны

КРВ – клистрон с распределенным взаимодействием

КСВ – коэффициент стоячей волны

РЛС – радиолокационная система

СВЧ – сверхвысокие частоты

СЭМ – сканирующая электронная микроскопия

ТГц – терагерц

ЭВП – электровакуумный прибор

ЭОС – электронно-оптическая система

ЭП – электронный пучок

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Викулов И.К. Вакуумная СВЧ-электроника. По материалам конференции IVEC 2009 // Электроника НТБ. - 2010. - №4. - С. 56-68.
2. Викулов И.К. Вакуумная СВЧ-электроника в 2010 году: к миллиметровому и терагерцевому диапазонам // Электроника НТБ. - 2011. - №2. - С. 108-119.
3. Исаев В.М. Современные радиоэлектронные системы терагерцового диапазона / В.М. Исаев, И.Н. Кабанов, В.П. Мещанов, и др. // Доклады ТУСУР. -2014. -№ 4 (34). -С. 5-21.
4. Srivastava A. Microfabricated terahertz vacuum electron devices: technology, capabilities and performance overview // European Journal of Advances in Engineering and Technology. -2015. -Vol. 2. -No. 8. -P. 54-64.
5. Booske J.H. Plasma physics and related challenges of millimeter-wave-to-terahertz and high power microwave generation // Phys. Plasmas. -2008. -Vol. 15. -No. 5. - P. 500502.
6. Booske J.H. Vacuum electronic high power terahertz sources / J.H. Booske, R.J. Dobbs, C.D. Joye, et al. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. -2011. -Vol. 1. -No. 1. -P. 54-75.
7. Grigoriev A.D. Microwave Electronics / A.D. Grigoriev, V.A. Ivanov, S.I. Molokovsky; edited by A.D. Grigoriev – Springer: Springer Series in Advanced Microelectronics. -2018. -P. 584.
8. Гершензон Е.М. Лампы обратной волны миллиметрового диапазона и субмиллиметрового диапазона длин волн / Е.М. Гершензон, М.Б. Голант, А.А. Негирев, К.С. Савельев; под. ред. Н.Д. Девяткова. – Москва: Радио и связь. -1985. -С. 135.
9. Borisov A.A., Budzinsky U.A., Bykovsky S.V., et al. The development of vacuum microwave devices in Istok // 12th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2011). February 21-24, Bangalore, India. - 2011. -P. 437-438.
10. Webster H.F. Breakup of hollow electron beams // J. Appl. Phys. -1955. -Vol. 26. -P. 1386-1387.

11. Cutler C.C. Instability in hollow and strip electron beams // J. Appl. Phys. -1955. -Vol. 27. -No. 9. -P. 1028-1029.
12. Pierce J.R. Instability of hollow beams // IRE Trans. Electron Dev. -1956. -Vol. 3. -No. 4. -P. 183-189.
13. Гамаюнов Ю.Г. Моделирование электронно-оптических систем формирования с высокой компрессией электронного пучка / Ю.Г. Гамаюнов, Е.В. Патрушева, А.И. Тореев, С.А. Шаталина // Радиотехника и электроника. -2008. -Т. 53. -№3. -С. 344-353.
14. Гамаюнов Ю.Г. Метод синтеза систем формирования сходящихся ленточных электронных пучков / Ю.Г. Гамаюнов, Е.В. Патрушева, Ю.А. Григорьев А.А., Бурцев А.А. // Радиотехника. -2016. -№ 7. -С. 38-40.
15. Гамаюнов Ю.Г., Патрушева Е.В. Синтез систем формирования сходящихся ленточных электронных пучков при частичной магнитной экранировке катода // Радиотехника и электроника. - 2017. - Т. 62. -№ 11. -С. 1126-1132.
16. Гамаюнов Ю.Г., Патрушева Е.В. О моделировании ленточных электронных пучков с учетом начальных поперечных тепловых скоростей электронов // Радиотехника и электроника. - 2019. -Т. 64. -№ 5. -С. 498-505.
17. Гамаюнов Ю.Г., Патрушева Е.В. О влиянии поперечных тепловых скоростей электронов в сходящихся ленточных электронных пучках, формируемых пушками с частичной магнитной экранировкой катода // Радиотехника и электроника. -2020. -Т. 65. -№ 5. -С. 507-512.
18. Овчаров В.Т. Приближенное решение внутренней задачи формирования электронных пучков / В.Т. Овчаров, В.В. Пензяков // Радиотехника и электроника. -1970. -Т. 15. -№ 8. -С.1651-1658.
19. Овчаров В.Т. Приближенное решение внешней задачи теории формирования электронных пучков / В.Т. Овчаров, В.В. Пензяков // Радиотехника и электроника. -1970. -Т. 15. -№ 9. - С.1897-1902.
20. Пензяков В.В. Расчет электронных пушек О-типа методом синтеза / В.В. Пензяков, А.И. Петросян // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. -1971. -Вып.4. -С. 36-43.

21. Сайт компании-производителя САПР «Lorentz-3EM». – 2020. – [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.integratedsoft.com/products/lorentz>
22. CST Studio Suite Electromagnetic Field Simulation Software. 2020. [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studiosuite/2020>.
23. Алямовский И.В. Электронные пушки и электронные пучки – Москва: Сов. радио. - 1966. - С. 453.
24. Астрелин В.Т. Двумерные равновесия электронного пучка в ведущем магнитном поле / В.Т. Астрелин, В.И. Ерофеев // ЖТФ. -1989. -Т. 59. -№ 2. - С. 135-141.
25. Nguyen K.T. Intense sheet electron beam transport in a uniform solenoidal magnetic field / K.T. Nguyen, J.A. Pasour, T.M. Antonsen, et al. // IEEE Tran. Electron Devices. -2009. -Vol. 56. -No 5. -P. 744-752.
26. Berry D. Practical aspects of EIK technology / D. Berry, H. Deng, R. Dobbs, et al. // IEEE Trans. Electron Devices. -2014. -Vol. 61. -No. 6. -P. 1830-1835.
27. Baik C.W., Ahn Y.H., Kim Y., et al. Experimental measurement of W-band backward wave amplifier driven by external pulsed signal // IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Paris, France. -2013.
28. Steer B., Roitman A., Dobbs R., et al. Advantages of extended interaction klystron technology at millimeter and sub-millimeter frequencies // 34th IEEE International Conference on Plasma Science. Albuquerque, USA. -2007.
29. Hyttinen M., Roitman A., Steer B., et al. Sub-millimeter waves from a compact, low voltage extended interaction klystron // Joint 32nd International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 15th International Conference on Terahertz Electronics. Cardiff, UK. -2007.
30. Joye C.D. Demonstration of a high power, wideband 220-GHz travelling wave amplifier fabricated by UV-LIGA / C.D. Joye, A.M. Cook, J.P. Calame, et al. // IEEE Trans. Electron Devices. -2014. -Vol.61. -No. 6. -P. 1672-1678.
31. Kreischer K.E., Tucek J.C., Basten M.A., et al. 220 GHz power amplifier testing

- at Northrop Grumman // IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Paris, France. -2013.
32. Tucek J.C., Basten M.A., Gallagher D., et al. A 100 mW, 0.670 THz power module // IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC-IVESC). Monterey, CA, USA. - 2012. – P. 31-32.
 33. Tucek J.C., Basten M.A., Gallagher D.A., et al. 0.850 THz vacuum electronic power amplifier // IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Monterey, CA, USA. -2014. -P. 153-154.
 34. Paoloni C. Design and realization aspect of 1-THz BWA based on corrugated waveguide / C. Paoloni, M. Mineo // IEEE Trans. Electron Devices. -2013. - Vol. 60. - No. 3. -P. 1236-1243.
 35. Siegel P.H., Fung A., Manohara H., et al. Nanoklystron: a monolithic tube approach to THz power generation // 12th International Symposium on Space Technology. San Diego, CA., USA. -2001. -P. 81-90.
 36. Иванов А.А. Исследование возможности улучшения выходных характеристик ламп бегущей волны W-диапазона // Изв. вузов. Радиофизика. -2016. -Т. 59. -№ 8-9. -С. 721-728.
 37. Григорьев А.Д. Проектирование усилительного клистрона W-диапазона // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. -2015. -Вып. 4. -С. 22-27.
 38. Галдецкий А.В. Проектирование и исследование технологии изготовления перспективной замедляющей системы для ЛБВ W-диапазона / А.В. Галдецкий, Е.А. Ракова, Г. Ф. Корепин, и др. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. -2016. -Вып. 3. -С. 8-13.
 39. Ракова Е.А., Галдецкий А.В., Корепин Г.Ф. и др. Проектирование и исследование технологии изготовления перспективной замедляющей системы ЛБВ W диапазона // V Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». С-Петербург, Россия. - 2016. - С. 148-152.
 40. Богомолова Е.А., Галдецкий А.В., Духновский М.И., Смирнова А.К., Смирнов В.А., Корчагин А.И. Замедляющая система на алмазном основании

- для ЛБВ миллиметрового диапазона и технология ее изготовления // Радиотехника. – 2019 – № 7(10) – С. 73-80.
41. Олейников В.И. Расчет магнитной фокусировки ленточных пучков конечной ширины / В.И. Олейников, В.В. Пензяков // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. - 1974. - Вып. 9. - С. 51-56.
 42. Батуев Ю.И. Фокусировка ленточного пучка конечной ширины / Ю.И. Батуев, В.В. Пензяков // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. - 1977. - Вып. 4. - С. 119-120.
 43. Олейников В.И. Синтез электронных пушек М-типа использующих ленточные пучки конечной ширины // Тезисы докладов, серия 1, «Электроника СВЧ». -1974. - Вып. 4(34). - С. 1.
 44. Олейников В.И. Приближенное решение задачи формирования эллиптических электронных пучков // Радиотехника и электроника. -1975. -Т.10. -№5. -С. 9-12.
 45. Олейников В.И. Программа синтеза трехмерных электронных пушек О-типа, формирующих криволинейные эллиптические в сечении пучки // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. -1978. -Вып. 7. -С. 122.
 46. Олейников В.И. Программа трехмерного анализа фокусировок неламинарных эллиптических электронных пучков в лучевых СВЧ-приборах О- и М-типов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. - 1979. -Вып. 11. -С. 99.
 47. Олейников В.И. Методика расчета в трехмерном приближении неламинарных эллиптических электронных пучков в пролетных каналах СВЧ-приборов О- и М-типов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. -1980. -Вып. 1. -С. 51.
 48. Золотых Д.Н., Роговин В.И. Замедляющая система для ЛБВ субтерагерцевого диапазона частот // Радиотехника. - 2016. - № 12. - С. 196-198.
 49. Григорьев М.А. Из истории становления кафедры электроники, колебаний и волн СГУ // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. -2013. - Т. 21, -

- № 1. -С. 112-122.
50. Booske J.H., McVey B.D., Antonsen T.M. Stability and confinement of nonrelativistic sheet electron beams with periodic cusped magnetic focusing // *J. Appl. Phys.* 1993. Vol. 73, No. 9. P. 4140–4155.
 51. Акимов П.И., Гаврилин А.А., Никитин А.П., Сыровой В.А. и др. Расчет эллиптических электронных пучков для приборов СВЧ // V Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург, Россия. -2016. - С. 210-214.
 52. Акимов П.И., Гаврилин А.А., Никитин А.П., Сыровой В.А. и др. Расчетные модели электронно-оптических систем с ленточными электронными пучками для мощных приборов СВЧ // IV Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург, Россия. - 2015. - С. 226-231.
 53. Акимов П.И. Транспортировка пучка с начальным эллиптическим сечением при сохранении его формы / П.И. Акимов, А.А. Гаврилин, А.П. Никитин, В.А. Сыровой, и др. // *Журнал радиоэлектроники.* - 2015. - № 11. - С. 1-15.
 54. Акимов П.И. Электронно-оптические системы с экранированным катодом и ленточным пучком эллиптического сечения / П.И. Акимов, А.А. Гаврилин, А.П. Никитин, В.А. Сыровой, и др. // *Радиотехника и электроника.* - 2018. - Т. 63. - № 11. - С. 1165–1180.
 55. Panda C.P. Pole-piece with stepped hole for stable sheet electron beam transport under uniform magnetic field / C.P. Panda, V. Srivastava, A. Vohra // *IEEE Trans. Plasma Sci.* -2015. -Vol. 43. -No. 8, -P. 2621-2627.
 56. Shi X. Study on wideband sheet beam traveling wave tube based on staggered double vane slow wave structure / X. Shi, Zh. Wang, X. Tang., et al. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* -2014. -Vol. 42. -No. 12. -P. 3996-4003.
 57. Shin Y.-M. Investigation of terahertz sheet beam traveling wave tube amplifier with nanocomposite cathode / Y.-M. Shin, L.R. Barnett, N.C. Luhmann, et al. // *Phys. Plasmas.* -2010. -Vol. 17. -No. 12. -P. 3996-4003.
 58. Shin Y.-M. System design analysis of a 0.22-THz sheet-beam traveling-wave tube

- amplifier / Y.-M. Shin, A. Baig, L.R. Barnett, et al. // IEEE Trans. Electron Devices. -2012. -Vol. 59. -No. 1. -P. 234-240.
59. Baig A. Performance of a nano-CNC machined 220-GHz traveling wave tube amplifier / A. Baig, D. Gamzina, T. Kimura, et al. // IEEE Trans. Electron Devices. -2017. -Vol. 64. -No. 5. -P. 2390-2397.
60. Zheng Y. 0.2-THz dual mode sheet beam traveling wave tube / Y. Zheng, D. Gamzina, N.C. Luhmann, et al // IEEE Trans. Electron Devices. -2017. -Vol. 64, -No. 4. -P. 1767-1773.
61. Field M. Development of a 100-W 200-GHz high bandwidth mm-wave amplifier / M. Field, T. Kimura, J. Atkinson, et al. // IEEE Trans. Electron Devices. -2018. -Vol. 65. -No. 6. -P. 2122-2128.
62. Каретникова Т.А. Моделирование лампы бегущей волны субтерагерцевого диапазона с замедляющей системой типа сдвоенной гребенки и ленточным электронным пучком / Т.А. Каретникова, А.Г. Рожнев, Н.М. Рыскин и др. // Радиотехника и электроника. -2016. -Т. 61. -№ 1. -С. 54-60.
63. Karetnikova T.A. Gain analysis of a 0.2-THz traveling-wave tube with sheet electron beam and staggered grating slow wave structure / T.A. Karetnikova, A.G. Rozhnev, N.M. Ryskin, et al. // IEEE Trans. Electron Devices. -2018. -Vol. 65. -No. 6. -P. 2129-2134.
64. Каретникова Т.А. Особенности распределения электромагнитных волн в замедляющих системах типа плоских гребенок и их взаимодействия с ленточным электронным потоком в терагерцевом диапазоне частот // дис. ... канд. физ.-мат. наук: СГУ, Саратов. -2016. -С. 144.
65. Морев С.П. Особенности формирования низкоперевансных электронных пучков / С.П. Морев, Г.А. Рехен // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. - 1983. - Вып. 1 (349). - С. 67-69.
66. Невский П.В. Обзоры по электронной технике // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. - 1989. - Вып. 15. - С. 48.
67. Бурцев А.А. Синтез электронно-оптических систем с компрессией ленточного пучка для ламп бегущей волны терагерцевого диапазона /

- Бурцев А.А., Данилушкин А.В., Сеницын Н.И. // Журнал технической физики. -2018. -Вып. 12. -С.1908-1911.
68. Бурцев А.А., Данилушкин А.В. Моделирование электронно-оптических систем со сходящимся ленточным пучком для ламп бегущей волны терагерцевого диапазона // Радиотехника и электроника. -2019. -Т. 64, - № 10. - С. 1002-1005.
69. Panda P.C. Analysis of sheet electron beam transport under uniform magnetic field / P.C. Panda, V. Srivastava, and A. Vohra. // IEEE Trans. Plasma Sci. -2013. -Vol. 41. -No. 3. -P. 461-469.
70. Ruan C. Theoretical and experimental investigation on intense sheet electron beam transport with its diocotron instability in a uniform magnetic field / C. Ruan, S. Wang, Y. Han, et al. // IEEE Trans. Electron Devices. -2014. -Vol. 61. -No.6. -P.1643-1650.
71. Tang X. Sheet electron beam transport in a metamaterial-loaded waveguide under the uniform magnetic focusing / X. Tang, Z. Duan, X. Shi, Y. Zhang, et al. // IEEE Trans. Electron Devices. -2016. -Vol. 63. -No. 5. -P.2132-2138.
72. Морев С.П. Методы расчета электронных пучков с ненулевым фазовым объемом / С.П. Морев, В.В. Пензяков // Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. -1984. -Вып. 2. -С. 89.
73. Joye C.D., Jaynes R.L., Calame J.P., et al. Monolithically integrated 140 GHz TWT arrays // 19th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Monterey, CA, USA. - 2018.
74. Акимов П.И. К вопросу об адекватности численных моделей при расчете электронно-оптических систем приборов СВЧ с осесимметричными и ленточными электронными пучками / П.И. Акимов, А.П. Никитин, В.А Сыровой // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. - 2018. - №1(536). -С. 32-42
75. Батуев Ю.И. Расчет неламинарных электронных пучков / Ю.И. Батуев, Ю.А. Григорьев, Г.А. Рехен // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. - 1971. -№7. -С. 26.

76. Григорьев Ю.А. Экспериментальное определение допусков на межэлектродные расстояния и питающие напряжения в электронной пушке с низковольтной модуляцией / Ю.А. Григорьев, Ю.И. Зотов, Б.С. Правдин, Г.А. Рехен // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. -1978. -№10. - С. 54.
77. Дармаев А.Н. Транспортировка интенсивных электронных потоков в магнитных фокусирующих системах со сложной периодической структурой поля в мощных электровакуумных приборах О-типа // Дисс. ... канд. тех. наук: СГТУ, Саратов. -2015. -С. 203.
78. Panda P.C. Sheet electron-beam transport analysis through closed short PCM for vacuum subterahertz devices / P.C. Panda, V. Srivastava, A. Vohra // IEEE Trans. Plasma Sci. -2012. -Vol. 40. -No. 9. -P. 2119-2125.
79. Zheng Y. Electron beam transport system for 263-GHz sheet beam TWT / Y. Zheng, D. Gamzina, N. C. Luhmann, et al. // IEEE Trans. Electron Devices. - 2016. -Vol. 63. -No. 11. -P. 4466-4472.
80. Shi X. Theoretical and experimental research on a novel small tunable PCM system in staggered double vane TWT / X. Shi, Z. Wang, T. Tang, et al. // IEEE Trans. Electron Devices. -2015. -Vol. 62. -No. 12. -P. 4258-4264.
81. Гилмор А.С.-мл. Лампы с бегущей волной / А.С. Гилмор. – Москва: Техносфера. -2013. -С. 615.
82. Shin Y.-M. Superimposed coherent terahertz wave radiation from mono-energetically bunched multi-beam // Phys. Plasmas. 2012. Vol. 19, No. 6. 063115.
83. Gee A., Shin Y.M. Gain analysis of higher-order-mode amplification in a dielectric-implanted multi-beam traveling wave structure // Phys. Plasmas. 2013. Vol. 20, No. 7. P. 073106.
84. Ulisse G., Krozer V. Parallel architecture of a sine waveguide traveling wave tube amplifier // 2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 9-14 Sept. 2018, Nagoya, Japan. pp. 1-2.
85. Shu G., Liu G., Chen L., Bambarandage H., Qian Zh. Terahertz backward wave radiation from the interaction of high-order mode and double sheet electron beams

- // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. Vol. 51, No. 5. P. 055107.
86. Shu G.X., Liu G., Qian Z.F. Simulation study of a high-order mode terahertz radiation source based on an orthogonal grating waveguide and multiple sheet electron beams // Opt. Express. 2018. Vol. 26, No. 7. P. 8040-8048.
 87. Плоских А.Э., Рыскин Н.М. Моделирование лампы бегущей волны суб-ТГц диапазона с многолучевым ленточным электронным пучком // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2019. Т. 19, №. 2. С. 113–121.
 88. Zhuravlev S.D. Study of miniature Ku-band multiple-beam klystron with built-in shadow grid of high-density pyrolytic graphite. / S.D. Zhuravlev, M.A. Manzhosin, V.I. Shesterkin, P.D. Shalaev, D.I. Kirichenko // 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering. Saratov, 2020. P. 65-67.
 89. Журавлев С.Д., Кириченко Д.И., Манжосин М.А., Шалаев П.Д., Шестеркин В.И. 400-Ваттный многолучевой импульсный клистрон Ку-диапазона с теневой сеткой из анизотропного пиролитического графита // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. 2020. Вып. 4(547). С.58-63.
 90. Григорьев Ю.А. Электронно-оптические системы с сеточным управлением / Ю.А. Григорьев, Б.С. Правдин, В.И. Шестеркин // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. -1987. -Вып. 7 (1264). -С. 71.
 91. Ruan C., Wang P., Zhang H., Su Y., Dai J., Ding Y., Zhang Z. Design of planar distributed three beam electron gun with narrow beam separation for W band staggered double vane TWT // Sci. Rep. 2021. Vol. 11. P. 940.
 92. Wang P., Su Y., Zhang Z., Wang W., Ruan C. Planar distributed three-beam electron optics system with narrow beam separation for fundamental-mode TWT in W-band // IEEE Trans. Electron Devices. -2021. - Vol. 68. - No. 10. - P. 5251-5259.
 93. Венедиктов Н.П. Экспериментальное исследование эмиссионной неоднородности катодов гиротронов по вольт-амперным характеристикам / Н.П. Венедиктов, М.Ю. Глявин, В.Е. Запечалов, А.Н. Куфтин, А.С. Постникова, М.В. Юлпатова // Изв. вузов. Радиофизика. - 1997. - № 4. –

С 506.

94. Глявин М.Ю. Гиротроны для технологических комплексов и диагностических систем // Дисс. ... д.ф.-м.н.: ИПФ РАН, Н. Новгород. -2009. - С. 319.
95. Chernin D. Effect of nonuniform emission on Miram curves / D. Chernin, Y.Y. Lau, J.J. Petillo, J.H. Booske, et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. -2020. - Vol. 48. - No. 1. - P. 146-157.
96. Sitek A. Space-charge effects in the field-assisted thermionic emission from nonuniform cathodes / A. Sitek, K. Torfason, A. Manolescu, A. Valfells // Physical Review Applied. -2021. -Vol. 15. -No. 1. -P.40401-40408.
97. Торгашов Г.В., Рыскин Н.М., Шалаев П.Д. Замедляющая система для лампы бегущей волны // Патент на полезную модель № 183912. Заявка № 2018117936. Приоритет 15.05.2018 г. Дата государственной регистрации 09.10.2018 г.
98. Torgashov G.V., Torgashov R.A., Titov V.N., Rozhnev A.G., Ryskin N.M. Meander-line slow-wave structure for high-power millimeter-band traveling-wave tubes with multiple sheet electron beam // IEEE Electron Device Lett. 2019. Vol. 40. No. 12. -P. 1980-1983.
99. Navrotsky I.A., Ryskin N.M. Electron-optic system with high compression of a multiple elliptic electron beam for a miniaturized THz-band vacuum electron device // IEEE Access. -2022. -Vol. 10. -P. 1334 - 1338.
100. Navrotsky I.A., Burtsev A.A., Emelyanov V.V., Titov V.N., Ryskin N.M. Electron-optic system with a converged sheet electron beam for a 0.2-THz traveling-wave tube // IEEE Transactions on Electron Devices. -2021. -Vol. 68. -No. 2. -P. 798-803.
101. Ploskih A.E. Performance improvement of a sub-THz traveling-wave tube by using an electron optic system with a converging sheet electron beam / A.E. Ploskih, N.M. Ryskin, A.A. Burtsev, A. V. Danilushkin, I.A. Navrotsky // Results in Physics. -2019. - Vol. 12. -No. 12. -P. 799-803.
102. Бурцев А.А. Особенности разработки электронно-оптических систем для

- импульсных терагерцовых ламп бегущей волны (Обзор) / А.А. Бурцев, Ю.А. Григорьев, А.В. Данилушкин, И.А. Навроцкий, А.А. Павлов, К.В. Шумихин // ЖТФ. -2018. -Т. 88. -Вып. 3. -С. 464-471.
103. Бурцев А.А. Экспериментальное исследование электронных пушек для вакуумных усилителей терагерцового диапазона / А.А. Бурцев, Ю.А. Григорьев, И.А. Навроцкий, В.И. Роговин, Г.В. Сахаджи, К.В. Шумихин // Письма в ЖТФ. -2016. -Т. 42. -№10. -С. 92-98.
104. Starodubov A.V., Atkin V.S., Torgashov R.A., Navrotsky I.A., Ryskin N.M. On the technological approach to microfabrication of a meander-line slow-wave structure for millimeter-band traveling-wave tube with multiple sheet electron beams // Proc. SPIE, Saratov Fall Meeting 2020: Laser Physics, Photonic Technologies, and Molecular Modeling. -2021. -Vol. 11846. -P. 118460M.
105. Бурцев А.А. Исследование электронной пушки с компрессией ленточного потока для вакуумных усилителей терагерцового диапазона / А.А. Бурцев, Ю.А. Григорьев, С.Д. Журавлев, И.А. Навроцкий, Г.В. Сахаджи, К.В. Шумихин // Радиотехника. -2016. -Вып. 7. -С. 97-100.
106. Бурцев А.А. Моделирование лампы бегущей волны субтерагерцового диапазона со сходящимся ленточным электронным пучком / А.А. Бурцев, А.В. Данилушкин, И.А. Навроцкий, А.Э. Плоских, Рыскин Н.М. // Радиотехника. -2018. -Вып. 9. -С. 8-13.
107. Навроцкий И.А. Технология получения микроразмерных замедляющих структур для вакуумных терагерцовых усилителей с ленточным электронным потоком / И.А. Навроцкий, А.А. Бурцев, Д.С. Денисов // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. -2013. -№4(519). -С.160-163.
108. Navrotskiy I.A., Ploskih A.E., Titov V.N., Burtsev A.A., Torgashov R.A., Ryskin N.M. Design study of a 0.2-THz traveling-wave tube with multiple sheet electron beam // 22nd International Vacuum Electronics Conference (IVEC). 27-30 April 2021. DOI: 10.1109/IVEC51707.2021.9722513.
109. Burtsev A.A., Bushuev N.A., Navrotsky I.A., Sakhadzhi G.V., Shalaev P.D., Grigoriev Y.A. Experimental study of electron guns for TWT of terahertz range

- // 16th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Beijing, China. -2015. DOI: 10.1109/IVEC.2015.7223751.
110. Bushuev N.A., Burtsev A.A., Navrotsky I.A., Sahajee G.V., Grigoriev Y.A. Forming of high current density sheet electron beams for sub-THz TWT vacuum amplifiers // 15th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Monterey, CA, USA. -2014. P. 171-172. DOI: 10.1109/IVEC.2014.6857545.
111. Burtsev A.A., Navrotsky I.A., Ryskin N.M., Danilushkin A.V., Ploskih A.E., Titov V.N. Studies on sub-THz sheet-beam TWT with staggered grating slow-wave structure // 20th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Busan, South Korea. -2019. DOI: 10.1109/IVEC.2019.8745213.
112. Burtsev A.A., Danilushkin A.V., Navrotsky I.A., Sakhadzhi G.V., Shumikhin K.V. Development of electron-optical system with convergent sheet beam for terahertz TWT // 19th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Monterey, CA, USA. -2018. P. 367-368. DOI: 10.1109/IVEC.2018.8391666
113. Karetnikova T.A., Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Burtsev A.A., Navrotsky I.A., Danilushkin A.V. Design and simulation of a 0.2-THz traveling-wave tube with a converging sheet electron beam // 19th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Monterey, CA, USA. -2018. P. 161-162. DOI: 10.1109/IVEC.2018.8391560.
114. Torgashov R.A., Starodubov A., Navrotsky I.A., Titov V.N., Emelyanov V.V., Rozhnev A.G., Ryskin N.M. Multiple-tunnel meander-line slow-wave structure for a high-power millimeter-band traveling-wave tube // 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Chengdu, China. -2021. DOI: 10.1109/IRMMW-THz50926.2021.9567187.
115. Navrotsky I.A., Ryskin N.M., Torgashov G.V., Torgashov R.A., Rozhnev A.G., Titov V.N., Starodubov A.V., Ploskih A.E., Zolotykh D.N., Emelyanov V.V. Development of high-power sub-THz traveling-wave tubes with multiple sheet electron beams // 45th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Buffalo, USA. -2020. DOI: 10.1109/IRMMW-

THz46771.2020.9370716.

116. Ryskin N.M., Rozhnev A.G, Ploskih A.E., Torgashov R.A., Titiv V.N., Burtsev A.A., Navrotsky I.A., Danilushkin A.V. Design and simulation of a 0.2-THz traveling-wave tube with sheet electron beam focused by reversal magnetic field // 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Paris, France. -2019. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2019.8873758.
117. Ryskin N.M., Rozhnev A.G., Ploskih A.E., Burtsev A.A., Navrotsky I.A., Danilushkin A.V. Investigations on 0.2-THz traveling-wave tubes with staggered grating slow-wave structure // 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2018). Nagoya, Japan. -2018. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2018.8510495.
118. Ryskin N.M., Torgashov G.V., Torgashov R.A., Ploskih A.E., Rozhnev A.G., Titov V.N., Starodubov A.V., Navrotsky I.A., Emelyanov V.V. Development of miniature millimeter-band traveling-wave tubes with sheet and multiple electron beams // 7th All-Russian Microwave Conference (RMC). Moscow, Russian Federation. -2020. - P. 94-97. DOI: 10.1109/RMC50626.2020.9312288.
119. Бурцев А.А., Бушуев Н.А., Григорьев Ю.А., Навроцкий И.А. Компьютерное моделирование низкопереванских электронных пушек для усилителей терагерцового диапазона // Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы международной научно-технической конференции. Саратов: СГТУ, 2012. С. 50-53.
120. Рыскин Н.М., Рожнёв А.Г., Стародубов А.В., Сердобинцев А.А., Павлов А.М., Галушка В.В., Кожевников И.О., Бурцев А.А., Данилушкин А.В., Навроцкий И.А., Плоских А.Э., Терентюк А.Г., Торгашов Р.А., Торгашов Г.В., Сеницын Н.И. Разработка ламп бегущей волны миллиметрового и терагерцового диапазонов с пространственно-развитыми замедляющими системами // Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы международной научно-технической конференции. Саратов: СГТУ, 2018. Т. 1. С. 126-130.

121. Бурцев А.А., Рыскин Н.М., Данилушкин А.В., Навроцкий И.А., Шумихин К.В. Экспериментальное исследование сходящегося ленточного пучка при разработке усилителя ТГц диапазона // Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы международной научно-технической конференции. Саратов: СГТУ, 2018. Т. 1. С. 206-208.
122. Навроцкий И.А., Бурцев А.А., Данилушкин А.В. Параметрическое 3D моделирование низкоперевансных эллиптических электронных пучков для приборов ТГц диапазона // Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы международной научно-технической конференции. Саратов: СГТУ, 2018. Т. 1. -Р. 166-169.
123. Навроцкий И.А., Бурцев А.А., Данилушкин А.В., Каретникова Т.А., Рыскин Н.М., Шумихин К.В. Разработка макета ЭОС с эллиптическими пучками для приборов ТГц диапазона // Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы международной научно-технической конференции. Саратов: СГТУ, 2018. Т. 1. С. 170-174.
124. Navrotsky I.A., Titov V.N., Ryskin N.M. Study of multivelocitv sheet-electron-beam transportation in uniform and reversal magnetic fields // International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). Saratov, Russian Federation. -2020. -P. 78-81.
125. Navrotsky I.A., Burtsev A.A., Kivokurtsev A.Y., Shumikhin K.V., Shalaev P.D., Karetnikova T.A., Ryskin N.M. Development of electron-optical system with three elliptic electron beams for a THz-band vacuum-tube device // 10th UK-Europe-China Workshop on Millimetre Waves and Terahertz Technologies (UCMMT). Liverpool, UK. -2017. DOI: 10.1109/UCMMT.2017.8068467.
126. Danilushkin A.V., Burtsev A.A., Navrotsky I.A., Shumikhin K.V., Ryskin N.M. Synthesis of a sheet beam electron optical system with a field emission cathode // 11th UK-Europe-China Workshop on Millimetre Waves and Terahertz Technologies (UCMMT). Hangzhou, China. - 2018. DOI: 10.1109/UCMMT45316.2018.9015915.
127. Bushuev N.A., Bourtsev A.A., Navrotsky I.A., Denisov D.S., Grigoriev Y.A.

- Forming of high current density electron beam for terahertz vacuum O-type amplifiers // 40th IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS 2013), Abstracts IEEE International Conference. CA, USA. -2013. DOI: 10.1109/PLASMA.2013.6633387.
128. Навроцкий И.А., Рыскин Н.М., Данилушкин А.В. Исследование низкоперевансных эллиптических пучков и их эквипотенциальных контуров, образованных пространственным зарядом // VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург, Россия. -2019. -С.102-107.
129. Данилушкин А.В., Бурцев А.А., Навроцкий И.А. Моделирование формирования и пространства взаимодействия ленточных электронных пучков в усилителях терагерцевого диапазона // Физика.СПб/2018. Санкт-Петербург, Россия. -2018. -С.205-206.
130. Каретникова Т.А., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Бурцев А.А., Навроцкий И.А., Данилушкин А.В. Исследование лампы бегущей волны суб-ТГц диапазона с ленточным электронным пучком // XVII Международная зимняя школа-семинар по радиофизике и электронике сверхвысоких частот. Саратов, Россия -2018. -С. 61.
131. Навроцкий И.А., Кивокурцев А.Ю., Бабанов А.Ж., Горева Т.А., Шумихин К.В. Технология создания ЭОС вакуумного терагерцевого усилителя // Электронные приборы и устройства СВЧ: Материалы науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Алмаз». Саратов, Россия. -2017. -С.129-132.
132. Навроцкий И.А., Бурцев А.А., Григорьев Ю.А. Моделирование ленточных электронных пучков высокой плотности при разработке вакуумных усилителей О-типа коротковолновой части миллиметрового диапазона // «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» тезисы докладов VIII Всероссийской конференции молодых ученых. Саратов, Россия. -2013. -С. 55-56.
133. Бабанов А.Ж., Навроцкий И.А., Конюшков Г.В., Бурцев А.А., Козлова О.В.

Прецизионная электроискровая микрообработка периодических структур замедляющих систем типа «гребенка» // Быстрозакаленные материалы и покрытия. Труды 11-й научно-технической конференции, МАТИ. Москва, Россия. -2012. -С. 294-296.

134. Пат. 179616 Российская Федерация, МПК H01J 3/02. Многолучевая электронная микропушка с эллиптическими катодами / Навроцкий И.А.; заявитель и патентообладатель АО «НПП «Алмаз». -№2017106416; заявл. 27.02.2017; опубл. 21.05.2018, Бюл. 15. -9 С.