

На правах рукописи

ИВАНОВ Андрей Вячеславович

РАСЧЕТ
ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
НОВЫХ ПОКОЛЕНИЙ
ЭЛЕКТРОННЫХ ОХЛАДИТЕЛЕЙ

01.04.20 - физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

НОВОСИБИРСК – 2008

Работа выполнена в Институте ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Тиунов — кандидат физико-математических наук.
Михаил Александрович

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Винокуров — доктор физико-математических наук,
Николай Александрович профессор.

Корчуганов — доктор физико-математических наук.
Владимир Николаевич

ВЕДУЩАЯ — Объединенный институт ядерных
ОРГАНИЗАЦИЯ исследований, г. Дубна.

Защита диссертации состоится « _____ » _____ 2008 г.
в « _____ » часов на заседании диссертационного совета Д.003.016.03
Института ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, Новосибирск-90,
проспект академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯФ
им. Г.И.Будкера СО РАН.

Автореферат разослан: « _____ » _____ 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

А.А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одним из основных направлений развития физики высоких энергий является улучшение качества пучков заряженных частиц в ускорителях. Особенно важным является уменьшение фазового объема, занимаемого пучком, т.е. получение пучков высокой плотности с малым разбросом импульсов. Этого можно добиться при помощи диссипативных сил, которые вызывают потери энергии относительного движения частиц. Такое охлаждение позволяет решить сразу несколько задач ускорительной физики:

- охлаждение уменьшает фазовый объем пучка, инжектированного из предшествующего кольца или линейного ускорителя в накопитель, что дает возможность путем накопления значительно увеличить токи пучков редких частиц в кольце;
- увеличение токов и уменьшение эмиттанса во встречных пучках позволяет существенно увеличить светимость установок со встречными пучками;
- охлаждение позволяет компенсировать эффекты, приводящие к нагреву пучка, такие как внутripучковое рассеяние, рассеяние на остаточном газе, внутренней мишени и т.д.;
- при экспериментах с внутренней мишенью охлаждение позволяет добиться высокого разрешения по энергии.

В 1966г. Г.И. Будкером была предложена идея охлаждать пучки заряженных тяжелых частиц при помощи электронного пучка, движущегося с такой же средней скоростью. Этот метод, основанный на том, что кулоновское взаимодействие частиц сильно возрастает при малых относительных скоростях, был назван методом электронного охлаждения. В настоящее время метод электронного охлаждения стал эффективным инструментом экспериментальных исследований в различных областях ускорительной физики.

Одной из основных проблем, связанных с применением электронного охлаждения, является возникновение сильных потерь в интенсивном ионном пучке на начальных стадиях охлаждения. Одним из предлагаемых вариантов решения этой проблемы является использование электронных пучков с изменяемым профилем. Полюй пучок позволит проводить охлаждение равномерно, без образования сверхплотного ядра ионного пучка; также уменьшатся рекомбинационные потери. Переключение же на режим однородного пучка позволит достичь максимального охлаждения. При этом для пушки с изменяемым профилем пучка сохраняются общие требования,

такие как достижение максимального первеанса электронного пучка при достаточно малой (~ 1 эВ) его поперечной температуре.

Для разработки подобной пушки необходим комплекс программ, который бы обеспечил максимально точный расчет прикатодной области, возможность расчета катодов сложной формы, возможность учета влияния магнитного поля на катод на эмиссию, а также развитые средства постпроцессора, такие как вывод всех параметров пучка, в том числе и его поперечной температуры в любом сечении. В процессе работы над этой пушкой появилась необходимость точно рассчитывать влияние объемного заряда пучка и моделировать режим виртуального катода. Естественно, подобный комплекс программ оказывается полезным не только для расчетных задач электронного охлаждения, но и многих других, к примеру, для разработки инжекционных узлов СВЧ-генераторов со сверхвысокой компрессией пучка.

Еще одним решением, позволяющим улучшить работу установок электронного охлаждения, является компенсация центробежного дрейфа электрическим полем. Из-за U-образной формы охладителей при вводе электронного пучка в секцию охлаждения происходит его поворот в сопровождающем магнитном поле. Возникающий при этом повороте центробежный дрейф частиц пучка можно компенсировать дополнительными катушками коррекции, но при этом вторичные электроны, движущиеся от коллектора в противоположном основному пучку направлении, испытывают двойное смещение и оседают на стенках. Это приводит к возрастанию токов утечек и ухудшению вакуума. Если же на участке поворота ввести поперечное электрическое поле, то можно добиться компенсации дрейфа как для прямого, так и для обратного движения электронов. Потери частиц при этом значительно сокращаются. Но конденсаторные пластины, создающие это электрическое поле, сами могут негативно влиять на электронный пучок. Динамика пучка в этой трехмерной системе должна быть рассчитана и оптимизирована для сохранения его минимальной температуры.

Актуальной задачей для метода электронного охлаждения также является продвижение в область высоких энергий электронного пучка. В центре GSI (Дармштадт, Германия) совместно с ИЯФ и другими научными центрами разрабатывается проект электронного охладителя на высокую энергию для охлаждения антипротонов в кольце HESR (High Energy Storage Ring). Максимальная энергия электронов в этом проекте составляет 8 МэВ. Для обеспечения надлежащего качества электронного пучка в секции охлаждения необходим тщательный расчет и оптимизация ускоряющей секции, секции согласования полей и поворотов. Следует отметить, что для моделирования поворотной секции с электростатической компенсацией необходим комплекс программ для расчета трехмерных электро- и магнитостатических систем, и динамики частиц в них.

Численные методы, применяющиеся для расчетов электронно-оптических систем (ЭОС) с объемным зарядом, можно разделить на два основных класса: разностные и интегральные. Разностные методы включают в себя метод конечных разностей и метод конечных элементов. В них решается уравнение Пуассона в дифференциальном виде или минимизируется эквивалентный ему функционал. Эти методы требуют задания сетки, покрывающей всё рассчитываемое пространство, и дают решение в виде значений потенциала в узлах сетки. Для вычисления электрического поля требуется численное дифференцирование потенциала, снижающее точность расчетов.

В методе граничных интегральных уравнений (ГИУ), который относится к интегральным методам, используется представление решения уравнения Пуассона в виде:

$$\varphi(\vec{r}_0) = \int_{S_e + S_d} \frac{\sigma(\vec{r}) dS}{|\vec{r}_0 - \vec{r}|} + \int_{V_b} \frac{\rho(\vec{r}) dV}{|\vec{r}_0 - \vec{r}|},$$

где S_e и S_d – поверхности электродов и диэлектриков, V_b – объем, занятый пучком. Подставляя это выражение в граничные условия на электродах и диэлектриках, можно получить граничные интегральные уравнения относительно неизвестной плотности поверхностного заряда на электродах и на границах раздела диэлектриков. Особенности этого метода:

- а) решение находится для поверхностных и объемных зарядов, для нахождения потенциалов и полей необходимо вычислять соответствующие интегралы;
- б) в отличие от разностных методов задача ставится с открытыми границами – пространство расчёта не ограничивается, не накладываются нефизические условия на границах области расчёта;
- в) сеткой необходимо покрывать только область, занятую пучком;
- г) потенциал и поле рассчитываются с одинаковой точностью.

Простота задания и модификации геометрии системы, высокая точность расчёта электрического поля и, как следствие, эмиссии с катода и траекторного анализа обусловили выбор этого метода как основы создаваемых в ИЯФ программ для высокоточного моделирования ЭОС. Развитие метода ГИУ в этих программах позволило им в полной мере соответствовать сформулированным выше требованиям – обеспечивать максимально точный расчет прикатодной области, возможность расчета катодов сложной формы, возможность расчета виртуального катода, и т.д.

Цели и задачи работы:

Основной целью данной работы является численное моделирование электронно-оптических систем установок электронного охлаждения и оптимизация динамики электронного пучка в них. Сюда входят разработка высокоперевансной электронной пушки с управляемым профилем пучка,

расчёт динамики пучка в секциях ускорения и транспортировки, расчёт коллектора с учётом вторичных электронов. Таким образом, расчёты должны охватывать все этапы движения электронного пучка в охладителе за исключением соленоида охлаждения.

Для решения этих задач потребовалось создать комплексы программ для точного расчета аксиально-симметричных электронных пушек и коллекторов, и для расчета трехмерных электро- и магнитостатических систем.

Научная новизна диссертационной работы

Разработана электронно-оптическая система двуханодной электронной пушки, формирующей высокоперевансный пучок с изменяемым профилем и низкой поперечной температурой.

Проведена численная проверка методов минимизации поперечной энергии частиц электронного пучка на этапах ускорения и транспортировки в высокоэнергетических электронных охладителях.

Осуществлено развитие метода граничных интегральных уравнений, позволяющее при моделировании электронно-оптических систем значительно повысить точность расчетов, особенно при расчете областей с существенным влиянием объемного заряда, и расширить круг решаемых задач.

Практическая ценность диссертационной работы

Для повышения эффективности электронного охлаждения разработана двуханодная электронная пушка с изменяемым профилем пучка. Управление осуществляется потенциалом первого анода, что позволяет достаточно быстро и эффективно изменять профиль пучка и микропереванс пушки. Подобные пушки могут быть применены в уже существующих или проектируемых установках электронного охлаждения для существенного уменьшения потерь в охлаждаемом пучке при сохранении темпа охлаждения.

Создан комплекс программ UltraSAM для высокоточного расчета широкого круга аксиально-симметричных статических электронно-оптических систем с интенсивными пучками. Этот комплекс может быть использован при разработке различных высокоперевансных электронных пушек и коллекторов, в частности, при разработке инжекционных узлов СВЧ-генераторов со сверхвысокой компрессией пучка, электронных пушек и коллекторов установок электронного охлаждения, источников ионов с электронным пучком, и т.д.

Основные положения работы, выносимые на защиту

1. Комплекс программ UltraSAM для расчета аксиально-симметричных статических электронных пушек и коллекторов, в котором реализованы следующие численные методы и алгоритмы:
 - a. криволинейная сетка, которая может быть согласована с геометрией электродов и формой пучка;
 - b. аналитическое выделение особенности при нахождении потенциалов и полей, наводимых объемным зарядом пучка;
 - c. модель эмиссии с учетом влияния магнитного поля, с возможностью задавать несколько эмиттеров сложной формы учитывать тепловой разброс поперечных скоростей частиц пучка;
 - d. модель динамики пучка, позволяющая описывать повороты и отражения частиц.
2. Комплекс программ Elec3D для решения задач трехмерной электростатики. Метод граничных интегральных уравнений, реализованный в этом комплексе, позволяет отказаться от трехмерной сетки и осуществлять разбиение на элементы только поверхности электродов и диэлектриков. Аналитическое нахождение потенциалов и полей, наводимых поверхностным зарядом отдельных элементов, значительно повышает точность и сокращает время расчетов.
3. Результаты численного проектирования и расчеты высокоперевансной электронной пушки с изменяемым профилем пучка; расчет зависимостей эффективности управления профилем, переванса и поперечной температуры пучка от геометрических параметров пушки; расчет основных режимов работы пушки; расчет режима виртуального катода; сравнение расчетных и экспериментальных данных.
4. Расчеты динамики электронного пучка в секциях ускорения и транспортировки электронных охладителей, а именно:
 - a. Численная минимизация поперечной температуры пучка на выходе ускоряющей трубки электронного охладителя ЭХ-300.
 - b. Расчет возрастания поперечной энергии пучка в ускоряющей трубке электронного охладителя HESR, численная проверка предложенного способа минимизации поперечной энергии пучка.
 - c. Расчет поворотов пучка с учетом электростатической компенсации центробежного дрейфа для электронного охладителя HESR, модификация конденсатора для согласования нарастания электрического поля с кривизной силовых линий магнитного поля.
5. Расчет коллектора установок электронного охлаждения ЭХ-35 и ЭХ-300; разработка модели вторичных электродов; расчет электростатических барьеров на входе и внутри коллектора; расчет основных параметров вторичного потока электронов.

Апробация работы

Основные материалы диссертационной работы докладывались на международных ускорительных конференциях EPAC'02 (Париж, 2002), RuPAC'02 (Обнинск, 2002) и EPAC'04 (Люцерн, 2004), на международном семинаре по охлаждению пучков частиц ESOOL'03 (Япония, 2003), на международной конференции по вычислениям в физике ускорителей ICAR'04 (Санкт-Петербург, 2004), и опубликованы в работах [1-8].

Структура диссертации и ее объем

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Работа изложена на 152 страницах, содержит 96 рисунков и 2 таблицы. Список литературы включает 61 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность настоящей работы, сформулированы её задачи и цели. Приводятся краткое содержание глав диссертации и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе описаны установки электронного охлаждения, рассмотрение отдельных узлов которых будет проводиться в дальнейшем, и сформулированы основные расчетные задачи, возникающие при их проектировании.

В первом разделе первой главы описываются установки электронного охлаждения ЭХ-35 и ЭХ-300 с максимальной энергией электронов 35 кэВ и 300 кэВ соответственно, разработанные в ИЯФ для Института Современной Физики (Ланжоу, Китай). Приводятся параметры этих установок, описываются те новшества, которые обеспечивают высокую эффективность работы этих установок.

Второй раздел посвящен описанию проекта установки электронного охлаждения для кольца HESR, максимальная энергия электронов в которой составляет 8 МэВ. Приведен вариант компоновки этой установки.

Третий раздел первой главы посвящен описанию эффекта “электронного нагрева”, возникающего при использовании электронного охлаждения в экспериментах с интенсивными ионными пучками. Этот эффект, впервые проявившийся на накопительном кольце CELSIUS (Uppsala, Sweden), приводит к сильным потерям в ионном пучке на начальных стадиях охлаждения. Представлено возможное объяснение причин этого явления, состоящее в том, что на начальном этапе электронного охлаждения в ионном пучке образуется сверхплотное ядро, в котором при взаимодействии с электронным пучком развиваются когерентные колебания.

В четвертом разделе рассматривается идея управления профилем электронного пучка для предотвращения образования плотного ядра ионного пучка и, таким образом, уменьшения потерь ионного пучка. Показано, что

использование электронного пучка с уменьшенной плотностью в центральной части приводит к более равномерному охлаждению всего ионного пучка, а так же к уменьшению рекомбинационных потерь.

Пятый раздел посвящен рассмотрению основных задач расчета динамики пучка в установках электронного охлаждения. Рассмотрены требования, предъявляемые к программному комплексу, с помощью которого можно было бы рассчитывать электронную пушку с управляемым профилем пучка. Описываются основные задачи расчета динамики пучка на этапах ускорения, транспортировки пучка к секции охлаждения, и торможения.

Вторая глава посвящена комплексу программ UltraSAM, созданному для проектирования и расчета стационарных аксиально-симметричных электронно-оптических систем и электронных пушек. Этот комплекс является глубоким развитием созданного в ИЯФ комплекса программ SAM.

В первом разделе второй главы приведено описание реализации в комплексе SAM метода граничных интегральных уравнений. Последовательно рассматриваются основные уравнения электромагнитного поля и получение из них граничных интегральных уравнений относительно неизвестной плотности поверхностного заряда на поверхностях электродов и границах раздела диэлектриков. Рассмотрен метод коллокации со сплайн-интерполяцией решения. Описано выделение особенности ядра интегральных уравнений, выделение особенности решения на углах металлов и диэлектриков. Описаны модель эмиссии пучка и модель динамики пучка в комплексе SAM. Рассмотрено описание распределения объемного заряда прямоугольными сетками. Сформулированы причины, по которым стало необходимым развитие комплекса SAM.

Второй раздел посвящен развитию комплекса SAM путем перехода к криволинейным сеткам для описания объемного заряда пучка. Форма криволинейных сеток может быть согласована с геометрией электродов и формой пучка, возможно сгущение ячеек внутри сетки. Данные меры позволяют кардинально повысить точность расчета прикатодной области пушки, а также уменьшить численные aberrации при траекторном анализе из-за неточного описания собственных полей пучка на его границе.

Каждая ячейка криволинейной сетки задается девятью точками, которые называются узлами ячейки. Для интерполяции внутри ячейки строится ее отображение на квадрат, лежащий в логической области XY, с узлами в вершинах и серединах сторон. В этом квадрате интерполяция строится при помощи биквадратичных базисных функций:

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^9 f_i \cdot \psi_i(x, y),$$

где x, y – координаты в логической области, f_i – значение функции f в i -ом узле ячейки; суммирование производится по всем узлам ячейки.

Подобным образом по значениям в узлах ячейки интерполируются все искомые величины, такие как потенциал, компоненты электрического и магнитного поля, плотность заряда пучка.

В третьем разделе рассказывается о методике расчета потенциала и поля объемного заряда пучка, описываемого криволинейными сетками. Описывается аналитическое выделение особенности подынтегральной функции.

Четвертый раздел посвящен модели эмиссии пучка в криволинейных сетках. Вводится понятие эмиттера – одного сегмента или объединения нескольких соседних сегментов, описывающих поверхность электрода или диэлектрика. Для каждого эмиттера задается свой режим эмиссии – эмиссия с ограничением плотности тока объемным зарядом (для моделирования термокатодов), или эмиссия с заданной плотностью тока. В пушках с термокатадами используется закон Чайлда-Ленгмюра, записанный в разных формах для случаев плоского, сферического или цилиндрического катодов. Для случая присутствия сильного магнитного поля на катоде используется модификация закона Чайлда-Ленгмюра, позволяющая корректно вычислять плотность тока при произвольном направлении поля к поверхности катода.

Для преодоления ограничений, накладываемых квазиламинарной моделью трубок тока и для совместимости с моделью криволинейных сеток, была разработана новая модель динамики пучка. В ней пучок описывается набором траекторий отдельных частиц, причем каждая траектория несет свою часть полного тока. Выбор шага интегрирования осуществляется автоматически, с учетом текущей энергии частицы и величин электрического и магнитного полей.

Расчет траекторий пучка при ограничении эмиссии объемным зарядом нельзя вести непосредственно с катода – в этом случае скорости частиц и электрическое поле на катоде равны нулю. Чтобы обойти эту особенность, принимается, что несколько первых ячеек частицы пучка летят как в плоском диоде, т.е. по прямой.

Следствием нагрева катода является тепловой разброс поперечных скоростей частиц пучка при вылете с катода. Для моделирования этого разброса из каждой точки старта траектории начинается расчет ансамбля траекторий, которые имеют разные поперечные скорости.

В пятом разделе описана структура комплекса программ UltraSAM, в который входят препроцессор, несколько модулей вычислительной части, и постпроцессор.

В качестве аналитического теста комплекса UltraSAM проводился расчет сферической пушки Пирса с углом раствора 40° . Исследовалась зависимость расчетного тока и неоднородности эмиссии от используемой сетки и числа траекторий. Показано, что даже довольно грубой сетки достаточно для описания объемного заряда пучка, если число траекторий, проходящих через каждую ячейку, не будет слишком мало.

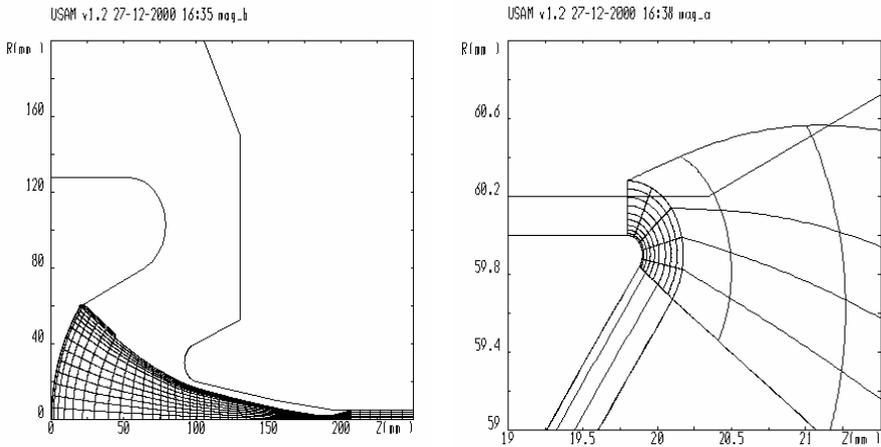


Рис. 1. Электронная пушка СВЧ-генератора “Магникон”. Общий вид геометрии и используемая сетка (слева), закругление края катода и сетка вблизи его (справа).

Для тестирования комплекса программ UltraSAM с использованием его возможностей по описанию катодов сложной формы и точному расчету прикатодной области проводился расчет электронной пушки разработанного в ИЯФ СВЧ-генератора “Магникон” (см. рисунок 1). Эта диодная пушка с рекордной электрической компрессией пучка предназначена для получения однородного электронного пучка с большой плотностью, высокой энергией и малым эмиттансом. Проектное напряжение этой пушки составляет 430 кВ, ток пучка 233А.

Также приведён расчет электронной пушки, используемой в литографической установке, в котором используется возможность учета начальных тепловых скоростей.

Третья глава посвящена комплексу программ Elec3D. Комплекс программ ELEC3D был создан для решения трехмерных задач электростатики. Для их решения используется метод граничных интегральных уравнений, что позволяет значительно упростить ввод геометрии, отказавшись от трехмерной сетки, и расширить спектр решаемых задач.

В первом разделе третьей главы приведено построение граничных интегральных уравнений для решения задач 3D электростатики, описан метод их решения путем разбиения поверхности электродов и диэлектриков на ячейки с кусочно-постоянной плотностью поверхностного заряда. Описано получение аналитических формул для нахождения потенциалов и полей, наводимых поверхностным зарядом отдельных ячеек.

Во втором разделе описаны структура комплекса программ ELEC3D. Подробно описан методика задания геометрии электродов и диэлектриков, разбиения их поверхности на ячейки.

Приведен пример расчета 3D задачи электронной голографии. Рассмотрен периодический массив чередующихся p и n областей, лежащих в полу-бесконечной области. Приведены распределения потенциала для различных разбиений, сравнение с теоретически рассчитанным потенциалом.

Четвертая глава посвящена электронной пушке с управляемым профилем пучка.

Первый раздел четвертой главы посвящен выбору конструкции и численному расчету электронной пушки с управляемым профилем пучка. Описан вариант конструкции такой пушки с управлением профилем пучка при помощи раздельного накала центральной и внешней частей катода. Показаны недостатки такой конструкции. Представлен вариант конструкции пушки с профилем пучка, управляемым потенциалом специального управляющего электрода (Рис. 2).

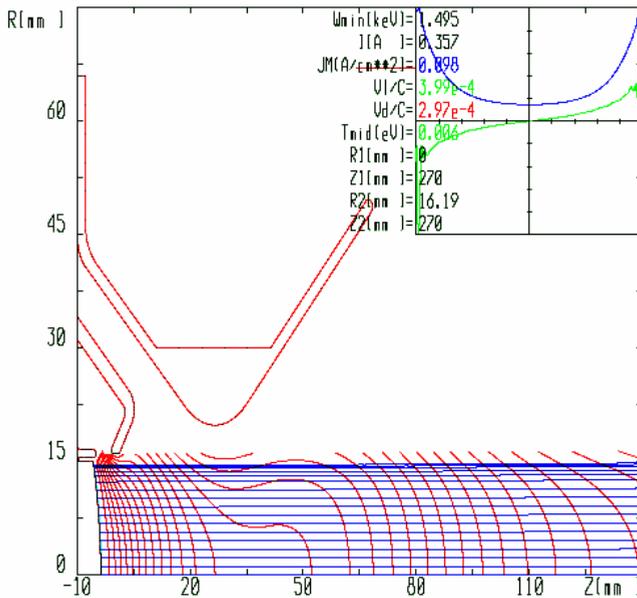


Рис. 2. Пушка с управляемым профилем пучка. Показаны траектории пучка и эквипотенциали, в правом верхнем углу – распределение плотности тока в поперечном сечении пучка.

Магнитное поле порядка 1 – 2 кГс, в которое погружена эта пушка, играет основную роль при формировании траекторий электронов, предотвращая его расхождение за анодом. Кроме того, использование выпуклого катода,

погруженного в достаточно сильное магнитное поле, позволяет существенно увеличить перванс пушки при сохранении низкой температуры пучка.

Рассчитаны зависимости эффективности управления профилем, перванса и средней температуры пучка от зазора катод – первый анод, радиуса кривизны катода и величины выдвижения фокусирующего электрода. Произведен расчет основных режимов работы пушки, в том числе режима виртуального катода.

Во втором разделе представлено сравнение результатов численного моделирования пушки и экспериментов на созданном для испытания пушки и коллектора стенде и на установке ЭХ-35. На стенде, кроме вольтамперной характеристики пушки, был измерен профиль пучка при помощи тонкой вольфрамовой нити, перемещавшейся поперек пучка. При этом измерялось свечение нити и оседающий на нее ток. Измеренные вольтамперная характеристика пушки и профили пучка при различных напряжениях на управляющем электроде очень хорошо совпали с расчетными данными.

На установке ЭХ-35 был получен режим виртуального катода – управляющий электрод вытягивает настолько большой ток, что он не может полностью пройти за анод. Потенциал в центре пучка становится равным потенциалу катода и часть пучка отражается обратно. Ток в этом режиме зависит от полного потенциала катода; расчетные данные полностью совпадают с экспериментом.

В пятой главе приводятся результаты расчета динамики пучка в секциях ускорения и транспортировки электронных охладителей. Основная задача расчетов – минимизация поперечной энергии пучка на каждом из этапов.

В первом разделе рассмотрено подавление пульсаций пучка на выходе ускоряющей трубки электронного охладителя ЭХ-300 при помощи катушки коррекции. Показано, что основной нагрев пучка происходит из-за резкого уменьшения поля при вылете из ускоряющей трубки, а поле катушки коррекции делает этот вылет более адиабатичным.

Второй раздел посвящен минимизации поперечной энергии пучка в ускоряющей колонне электронного охладителя HESR. В длинной ускоряющей колонне неизбежно присутствуют провалы ускоряющего поля в местах стыковки отдельных секций. Численно показано, что пульсаций пучка сильно возрастают, когда пространственная длина ларморовского вращения становится сопоставимой с шагом между провалами поля. Предложен механизм минимизации пульсаций пучка путем нанесения неадиабатического удара по пучку локальным изменением магнитного поля. Это локальное изменение достаточно просто создать путем уменьшения токов в двух соседних катушках магнитной системы (рис. 3).

В третьем разделе приведен расчет поворотов пучка с электростатической компенсацией центробежного дрейфа для электронного охладителя HESR. Конденсатор, создающий электрическое поле для компенсации дрейфа, может сам служить причиной увеличения пульсаций огибающей

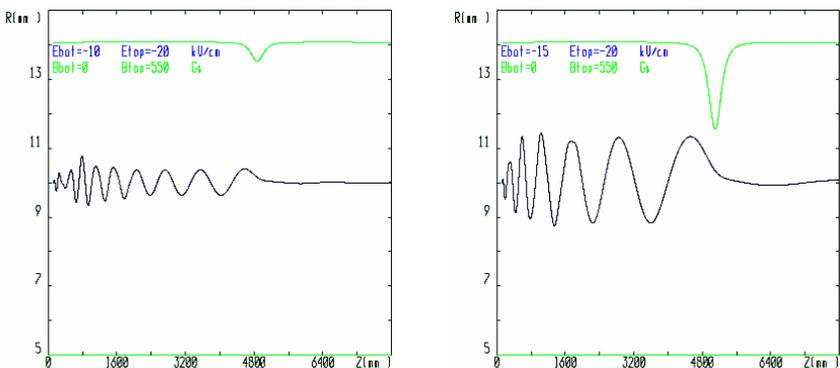


Рис. 3. Минимизация колебаний огибающей пучка уменьшением тока в двух соседних катушках при ускоряющих потенциалах 4 МВ (слева) и 8 МВ (справа).

электронного пучка из-за разности в нарастании кривизны силовых линий магнитного поля и увеличении электрического поля на краях конденсатора. Рассчитана модификация конденсатора с изменённой геометрией краев, обеспечивающая значительное уменьшение пульсаций огибающей пучка после прохождения им поворота.

Четвёртый раздел посвящен расчету динамики пучка в согласующей секции электронного охладителя HESR. В электростатической колонне электронного охладителя для кольца HESR величина сопровождающего магнитного поля была выбрана равной 500 Гс. В поворотах же и в охлаждающей секции это поле в десять раз сильнее, 5 кГс. Для обеспечения перехода электронного пучка из области со слабым магнитным полем в область более сильного поля без возбуждения колебаний огибающей пучка требуется включение специальной согласующей секции. Показано, что достаточно короткая (~1 м) четвертьволновая переходная секция вполне способна обеспечить влет частиц в сильное магнитное поле без особого возбуждения поперечной энергии пучка.

Шестая глава посвящена расчету коллектора установок электронного охлаждения ЭХ-35 и ЭХ-300.

В первом разделе приведено общее описание коллектора, описана его последующая модернизация.

Во втором разделе рассмотрено влияние супрессора и объемного заряда пучка на образование электростатических барьеров на входе в коллектор и внутри его (рис. 4). Показано, что при номинальных токах (порядка 1А) супрессор создает достаточно однородный по радиусу потенциальный барьер. Приведена расчетная зависимость максимального тока для однородного и полого пучков, который может войти в коллектор, от потенциала супрессора, и от потенциала открытого коллектора (когда потенциалы супрессора и коллектора равны).

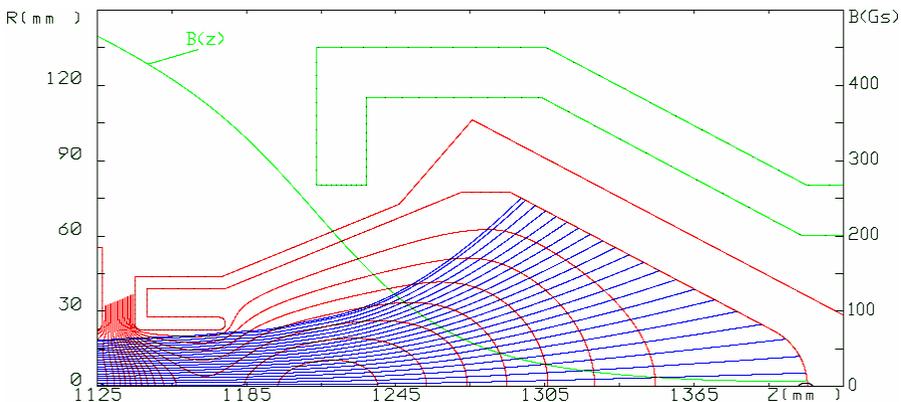


Рис. 4. Внутреннее пространство коллектора. Показаны траектории пучка и эквипотенциалы, распределение магнитного поля.

Третий раздел посвящен моделированию вторичной эмиссии электронов внутри коллектора. Приведены эмпирические формулы для расчетов коэффициентов истинно вторичной эмиссии, упругого и неупругого отражения, а так же для описания спектров этих типов вторичной эмиссии. Описана разработанная модель вторичной эмиссии, к которой каждый падающий на поверхность коллектора электрон порождает несколько вторичных электронов, описывающих энергетический и угловой разбросы. Приведены найденные с помощью этой модели основные параметры вторичного потока электронов, а именно коэффициент вторичной эмиссии коллектора, зависимость распределения плотности тока и средней энергии вылетающих из коллектора электронов от потенциала супрессора.

В заключении сформулированы научные и практические результаты работы.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ivanov A.V., Tiunov M.A. ULTRASAM-2D Code for Simulation of Electron Guns with Ultra High Precision // Proc. 8th European Particle Accelerator Conference, Paris, 2002, 1634-1636.
2. Ivanov A., Bublely A., et al. The electron gun with variable beam profile for optimization of electron cooling // Proc. 8th European Particle Accelerator Conference, Paris, 2002, 1356-1358.
3. Бочаров В.Н., Иванов А.В., и др. Испытание электронного охладителя на энергию 35 кэВ для Института Современной Физики (Ланжоу, КНР) // XVIII Российская конференция по ускорителям заряженных частиц, RUPAC-2002, Обнинск, Россия. - Том 2, стр.699-704.

4. Bocharov V., Ivanov A., et al. HIRFL-CSR Electron Cooler Commissioning // Nucl. Instr. and Meth. A 532 (2004), 144-149.
5. Бочаров В.Н., Иванов А.В., и др. Запуск установки электронного охлаждения ЭХ-300 // Препринт ИЯФ 2004-4.
6. Ivanov A.V., Panasyuk V.M., et al. Simulation of electron beam dynamics in a high-energy electron cooler // Nucl. Instr. and Meth. A 558 (2006), 227-234.
7. Бублей А.В., Иванов А.В., и др. Электронная пушка с управляемым профилем пучка для оптимизации электронного охлаждения ионов // Вестник НГУ. Серия: Физика. - Том 2 (2007), выпуск 1, стр.65-68.
8. Иванов А.В., Тиунов М.А. Применение метода граничных интегральных уравнений при моделировании формирования и динамики пучка в установках электронного охлаждения // Вестник НГУ. Серия: Физика. Том 3 (2008), выпуск 1, стр.56-61.