



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9-97-97

На правах рукописи

С-952

СЫРЕСИН

Евгений Михайлович

**ИНТЕНСИВНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК
В МЕТОДЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ**

Специальность: 01.04.20 — физика пучков
заряженных частиц и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Дубна 1997

Работа выполнена в Объединенном институте ядерных исследований

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ДОНЕЦ доктор физико-математических наук,
Евгений Денисович Объединенный институт
ядерных исследований, г. Дубна

ЛЕБЕДЕВ доктор физико-математических наук,
Андрей Николаевич ФИАН им. Лебедева, г. Москва

ПЕРЕЛЬШТЕЙН доктор физико-математических наук,
Элкумо Аврумович Объединенный институт
ядерных исследований, г. Дубна

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: Всероссийский электротехнический
институт, г. Москва

Защита диссертации состоится « 10 » сентября 1997 г. в
« 10 » часов на заседании Диссертационного совета Д-047.01.03 при
Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных
исследований.
Адрес: 141980, г. Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан « 4 » августа 1997 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета Д-047.01.03 доктор
физико-математических наук, профессор Ю.А. Батусов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Уменьшение шестимерного фазового объема - эмиттанта и разброса по импульсу ионных пучков, циркулирующих в накопителе, - одна из основных проблем при достижении требуемой светимости с помощью различных методов охлаждения.

Вступление в строй нового поколения ускорительно-накопительных колец тяжелых ионов в конце 80-х годов открыло перспективы в исследованиях по ядерной и атомной физике, физике промежуточных энергий и физике пучков. С их появлением стало возможным проведение прецизионных экспериментов с монохроматическими ионными пучками на сверхтонких внутренних мишенях, осуществление масс-спектрометрии сверхвысокого разрешения, накопление долгоживущих изотопов и изомеров. Исследование взаимодействия охлажденных ионов с электронами и атомами позволило определить на новом качественном уровне сечения диэлектронной и радиационной рекомбинаций, дадо толчок к развитию лазерного охлаждения. Возникло новое направление в физике пучков - кристаллические пучки.

Для формирования монохроматических ионных пучков в накопителях Г.И. Буджером предложен метод электронного охлаждения. Основой метода электронного охлаждения является теплообмен между пучком ионов, циркулирующим в накопителе, и пучком электронов, движущимся с той же скоростью. В результате такого теплообмена, вызванного кулоновским взаимодействием частиц, ионы охлаждаются до тех пор, пока их температура не станет равной эффективной температуре электронов.

Время охлаждения и равновесная температура охлажденного ионного пучка определяются параметрами электронного пучка: его энергией, плотностью тока, продольной и поперечной температурой электронов. Благодаря "сплощенности" функции распределения электронов и их замагниченности, возможно глубокое охлаждение ионов до продольной температуры электронов $T_{\parallel} \approx 10^{-4}$ эВ.

Формирование интенсивного электронного пучка с малым угловым и энергетическим разбросом - главная проблема в методе электронного охлаждения. Одним из основных направлений решения этой задачи является выбор оптики электронной пушки, которая способна обеспечить формирование интенсивного пучка с малым угловым разбросом. Вторая проблема связана с энергетическим разбросом электронов пучка по радиусу, возникающим из-за провисания потенциала в дрейфовой камере вследствие пространственного заряда пучка. Ее решение возможно при

Объединенный институт
ядерных исследований
ЕМС ПЛОТНОСТИ

нейтрализации пространственного заряда ионами, возникающими при ионизации атомов остаточного газа электронами пучка. Формирование интенсивных электронных пучков ограничено развитием пучково- дрейфовой неустойчивости. Создание активных методов подавления этой неустойчивости - одна из актуальных задач.

Формирование стационарных электронных пучков в системе электронного охлаждения реализуется в режиме рекуперации их энергии. Одной из основных характеристик в экспериментах по рекуперации энергии является ток потерь электронов пучка. В системе электронного охлаждения величина тока потерь должна быть менее 10^{-4} от тока пучка. Это накладывает жесткие требования на эффективность коллектора электронов, особенно для интенсивных широкоапертурных пучков с первеансом 1- 5 $\mu\text{A}/\text{B}^{3/2}$. Разработка высокоэффективного коллектора является актуальной задачей в методе электронного охлаждения, в СВЧ - системах, при решении проблемы управляемого термоядерного синтеза.

Дальнейшее развитие идеи формирования интенсивных электронных пучков с малым угловым и энергетическим разбросом, предложенной в первых работах по электронному охлаждению в ИЯФ СО РАН им. Будкера, было реализовано при создании электронно-оптической системы электронного охлаждения антипротонного накопителя LEAR (ЦЕРН). Найденные физические решения по формированию холодных моноэнергичных пучков позволили осуществить эффективное охлаждение на LEAR как антипротонных и протонных пучков, так и ионов свинца, требуемых для ЛНС. Актуальность этих работ связана с реализацией проекта по использованию LEAR в ионном ускорительном комплексе ЦЕРН для охлаждения и накопления ионных пучков свинца, чтобы достичь требуемой светимости в ЛНС.

Охлаждение ионов интенсивными электронными пучками, нейтрализованными по пространственному заряду, планируется при реализации проекта системы электронного охлаждения ускорительно-накопительного комплекса ОИЯИ К4-К10. С этой целью создан ряд прототипов основных ее элементов, проведены экспериментальные исследования с нейтрализованными электронными пучками с параметрами, соответствующими проектным.

Основные цели работы.

1. Разработка метода формирования интенсивных электронных пучков с малым угловым и энергетическим разбросом в методе электронного охлаждения.
2. Создание системы электронного охлаждения нового поколения, включающей электронную пушку с перестраиваемым первеансом 0,1- 5 $\mu\text{A}/\text{B}^{3/2}$, высокоэффективный коллектор электронов с током потерь

$10^{-4}-10^{-6}$, систему нейтрализации и диагностики пространственного заряда пучка.

3. Разработка активных методов подавления пучково- дрейфовой неустойчивости, ограничивающей формирование интенсивных нейтрализованных пучков.

4. Реализация разработанных методов (п.1-3) в системе электронного охлаждения накопителя LEAR при охлаждении пучков антипротонов, протонов и ионов свинца интенсивными электронными пучками.

Научная новизна.

Разработаны методы формирования интенсивных электронных пучков с малым угловым и энергетическим разбросом. На их основе создана система электронного охлаждения нового поколения в диапазоне энергий 2-30 кэВ, токов 0.01-3 А, первеансов пучка 0,1-5 $\mu\text{A}/\text{B}^{3/2}$.

Предложена схема широкоапертурной электронной пушки (диаметр пучка 50 мм) с адиабатической оптикой в магнитном поле низкой напряженности (600 Г). На её основе разработана электронная пушка с изменяемым первеансом 0,1-5 $\mu\text{A}/\text{B}^{3/2}$, энергией электронов 2-30 кэВ. Показано, что первеанс пушки ограничен влиянием вторичных электронов, возникающих при ионизации атомов остаточного газа. Найденны способы, позволяющие избежать снижения первеанса пучка из-за объемного заряда вторичных электронов в области пушки. С этой целью использован генератор ("blower"), с помощью которого периодически подавалось отрицательное напряжение на управляющий электрод и осуществлялось удаление вторичных электронов из пушки. Разработан специальный управляющий электрод с поперечным электрическим полем, исключаящий накопление вторичных электронов.

Развиты оптический и энергетический методы диагностики поперечной температуры электронов в интенсивных пучках с первеансом до 5 $\mu\text{A}/\text{B}^{3/2}$ и энергией электронов до 15 кэВ.

Разработан высокоэффективный коллектор электронов типа цилиндра Фарадея с первеансом 20 $\mu\text{A}/\text{B}^{3/2}$ при относительном токе потерь $3 \cdot 10^{-6}-10^{-4}$, позволяющий рекуперировать широкоапертурные электронные пучки диаметром 50 мм с первеансом до 5 $\mu\text{A}/\text{B}^{3/2}$.

Развит метод формирования интенсивных электронных пучков, нейтрализованных по пространственному заряду, в ультравысоком вакууме 10^{-11} Торр. Для этого создана система нейтрализации, включающая в себя электростатические пробки, диагностику нейтрализованных электронных пучков: время-пролетный метод, диагностический электронный пучок, Шоттки-диагностику.

Разработаны методы подавления пучково-дрейфовой неустойчивости, ограничивающей предельный ток нейтрализованного пучка: очистка вторичных электронов специальными электродами, нагрев ионов в поперечном высокочастотном электрическом поле (шейкер), нагрев ионов при возбуждении продольных волн.

Экспериментально показано, что использование в системе электронного охлаждения LEAR элементов, созданных на основе разработанных методов, позволяет осуществить охлаждение ионов свинца, требуемых для проекта LHC, за время менее 100 мсек, обеспечивающее нужную скорость их накопления.

Практическая ценность работы.

Проведенные исследования по формированию интенсивных холодных пучков электронов с первеансом до $5 \mu\text{A/V}^{3/2}$ открывают новые возможности по быстрому охлаждению ионных пучков с высоким начальным эмиттансом. В ходе первых экспериментов по охлаждению ионов свинца Pb^{54+} с энергией 4.2 МэВ/н на LEAR, достигнуты достаточно малые времена охлаждения (менее 100 мсек) и продемонстрирована реальность проекта по использованию антипротонного накопителя LEAR для их охлаждения и накопления в ионном комплексе LHC.

Найденные физические решения по формированию интенсивных электронных пучков с малым угловым и энергетическим разбросом реализованы при создании электронно - оптической системы электронного охлаждения антипротонного накопителя LEAR, включающей коллектор электронов, электронную пушку, систему нейтрализации и диагностики пространственного заряда пучка.

Разработанные методы подавления пучково-дрейфовой неустойчивости практически важны как в методе электронного охлаждения, так и для ионных источников с электронными пучками.

Апробация работы.

Результаты, изложенные в диссертации, докладывались на Международной конференции "Электронное охлаждение и новая электронная техника" (Легнаро, Италия, 1990); на Международной конференции "Охлаждение пучков и сопутствующие проблемы" (Монре, Швейцария, 1992); на Международной конференции "Физические эксперименты и первые результаты на накопителях тяжелых ионов с электронным охлаждением (Смоленице, Словакия 1992); на Международном семинаре по физике тяжелых ионов (Дубна, 1993); на II Международном симпозиуме "Ядерная физика в накопительных кольцах" (Санкт-Петербург, 1994); на IV Европейской ускорительной конференции (Лондон, Англия, 1994); на XIV-XV совещаниях по ускорителям заряженных частиц (Протвино, 1994, 1996);

на Международной ускорительной конференции (Даллас, США, 1995); на V Европейской ускорительной конференции (Барселона, Испания, 1996); на II Международном совещании ICFA "Методы охлаждения и подавления колебаний пучков заряженных частиц" (Москва-Нижний Новгород, 1996), а также обсуждались на научных семинарах Объединенного Института ядерных исследований, ЦЕРН, Института ядерной физики им. Будкера СО РАН, Физико-технологического центра ИЯФ. СО РАН, Всероссийского электротехнического института.

По теме диссертации опубликовано 39 работ.

Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения. Текст диссертации изложен на 269 страницах, включает 112 рисунков, 27 таблиц и список литературы из 127 наименований.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, дан краткий анализ проблем, решаемых в диссертации, и сформулированы цели исследований, вошедших в работу.

В первой главе обсуждаются основные принципы физики электронного охлаждения (§1.1), представлены требования к параметрам интенсивных электронных пучков (§1.2). Там же обсуждается влияние поперечной температуры электронов и их монохроматичности, обусловленной пространственным зарядом пучка, на эффективность электронного охлаждения.

Описана система электронного охлаждения антипротонного накопителя LEAR в ЦЕРН (см §1.3). Приведены параметры интенсивных электронных пучков в реконструированной системе электронного охлаждения. Обсуждаются основные элементы вновь созданной электронно-оптической системы электронного охлаждения: электронная пушка с изменяемым первеансом, коллектор электронов, система нейтрализации пространственного заряда электронного пучка и система его диагностики.

В §1.4 приведены основные параметры антипротонного накопителя LEAR и рассматриваются основные направления физических экспериментов с охлажденными антипротонными и ионными пучками. Здесь же обсуждается возможность использования LEAR для охлаждения и накопления ионов свинца Pb^{54+} с энергией 4.2 МэВ/н, требуемых для ускорительного комплекса LHC.

Проектные параметры ускорительно-накопительного комплекса ОИЯИ К4-К10 с радиоактивными ионными пучками представлены в §1.5, здесь же приведены проектные параметры системы электронного охлаждения К4.

Во второй главе обсуждаются методы формирования интенсивных пучков электронов с малой поперечной температурой в системах электронного охлаждения нового поколения. Представлены сравнительные характеристики электронных пушек основных ионных накопителей (§2.1). В §2.1 описаны факторы, влияющие на величину поперечной температуры, и определены условия, снижающие ее. В первую очередь, это оптимальный выбор оптики пушки. Дано обоснование выбора адиабатической оптики широкоапертурной электронной пушки (диаметр пучка 50мм), позволяющей в широком диапазоне перестраивать ток пучка и энергию электронов без увеличения их поперечной температуры в относительно низком магнитном поле (600 Г). Обсуждаются результаты численного моделирования геометрии пушек LEAR (Рис.1) и К4 (Рис.2) (§2.2).

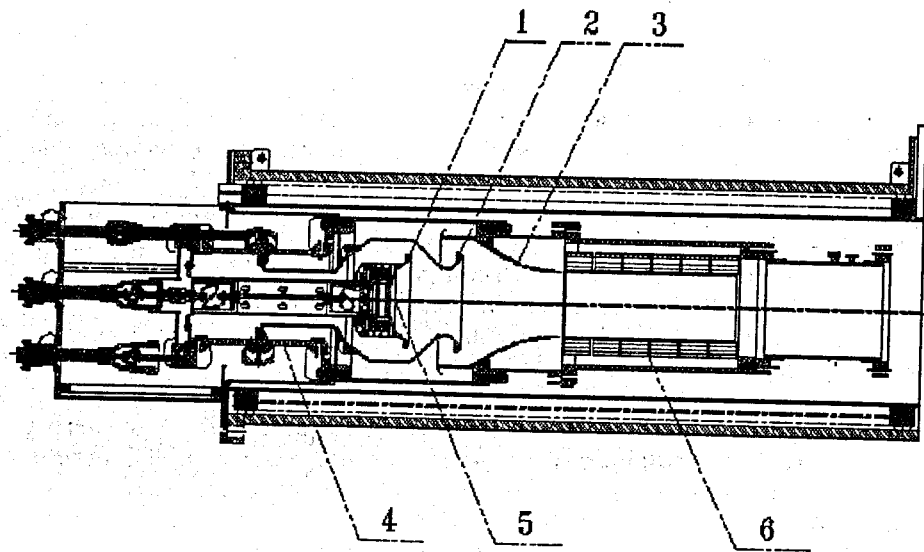


Рис.1. Конструкция электронной пушки LEAR.
1 - фокусирующий электрод, 2 - управляющий электрод, 3 - анод, 4 - высоковольтные металлокерамические изоляторы, 5 - катод, 6 - насос типа "нераспыляемый геттер".

Формирование интенсивных электронных пучков с первансом до $5 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$ накладывает жесткие требования на оптику электронной пушки. Для получения пучков такой интенсивности необходима высокая напряженность электрического поля. Однако, оно не должно

приводить к росту поперечной температуры электронов пучка, уровень которой должен составлять 0,1-0,2 эВ.

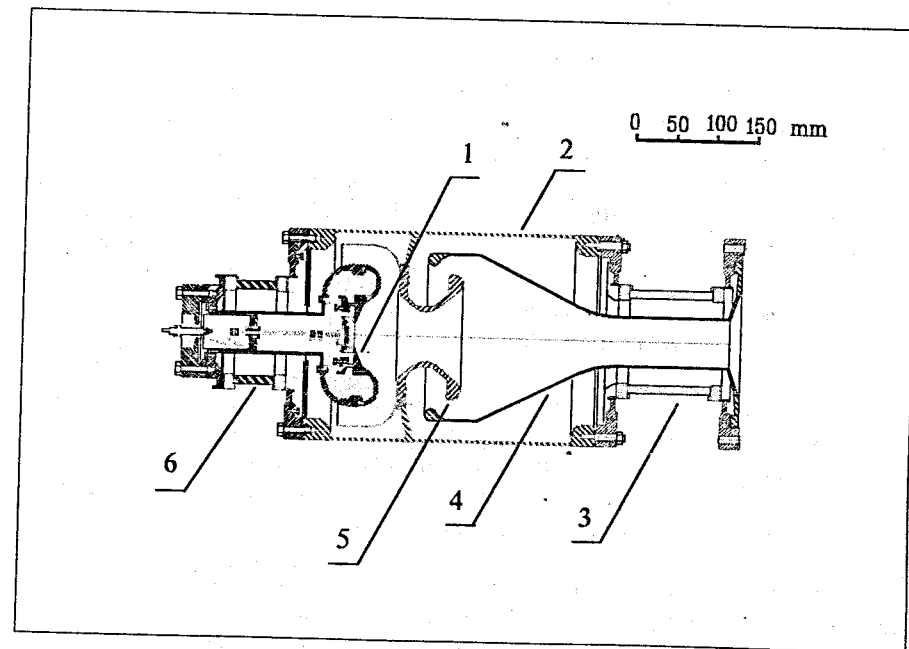


Рис.2.Схема электронной пушки накопителя К-4:
1 - катод, 2 - камера управляющего электрода, 3 - изолятор потенциала управляющего электрода, 4 - анод, 5 - управляющий электрод, 6 - изолятор катодного потенциала.

В §2.3-§2.5 рассмотрены особенности генерации интенсивных пучков электронов для системы электронного охлаждения LEAR: энергия 2-30 кэВ, перванс до $5 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$ в относительно низком магнитном поле до 600 Г. Ток электронного пучка в трехэлектродной пушке LEAR определяется ускоряющим напряжением между катодом и управляющим электродом, а энергия электронов - потенциалом катода относительно земли. Пушка позволяет формировать пучки с заданной энергией электронов и требуемым током.

При положительном потенциале управляющего электрода относительно земли в пушке возможно накопление вторичных электронов. Их пространственный заряд приводит к снижению тока пучка. Теоретический анализ данной проблемы содержится в §2.4.

Эксперименты по формированию интенсивных электронных пучков на стенде электронного охлаждения приведены в §2.3, а исследование влияния вторичных электронов описано в §2.4. Там же обсуждается метод, позволяющий устранить это влияние, для чего используется специальный генератор, подающий импульс отрицательного напряжения на управляющий электрод. В результате, происходит удаление вторичных электронов из пушки.

В §2.5 представлены результаты по формированию интенсивных пучков с энергией электронов 7 кэВ, током до 3 А в системе электронного охлаждения LEAR. Показано, что в условиях ультравысокого вакуума LEAR 10^{-11} Торр, период следования импульсов составляет около 10 минут, что достаточно для проведения экспериментов по охлаждению ионных пучков.

Другой способ устранения вторичных электронов - их очистка в пушке специальной конструкции с "разрезным" управляющим электродом (§2.6). В области управляющего электрода создается дополнительное поперечное поле, которое приводит к быстрому удалению вторичных электронов из системы. Влияние поперечного электрического поля на угловые характеристики пучка в этом режиме работы пушки в настоящее время еще не исследовано.

В третьей главе представлены результаты по измерению поперечной температуры электронов пучка. Она определяется тремя составляющими: тепловым движением электронов на катоде, дрейфом в собственных полях пучка и продольном магнитном поле, а также оптикой электронной пушки. Это одна из основных характеристик качества пучка в методе электронного охлаждения.

Формирование стационарных пучков с продольной энергией электронов 10-50 кэВ и их поперечной энергией 0,1-0,2 эВ потребовало развития специальных методов диагностики для измерения поперечной энергии электронов (§3.1). Одним из простых и надежных методов измерений является оптический метод, предложенный в ИЯФ им. Будкера (Рис.3). Он основан на известном принципе магнитной фокусировки: частицы в магнитном поле, стартующие из одной точки с различными поперечными скоростями, через период циклотронного вращения вновь собираются в точку. Каждые полпериода изображение точки имеет максимальный размер. В §3.2 дана физическая интерпретация метода и обсуждается схема оптического анализатора. В нем из электронного пучка с помощью диафрагмы вырезается тонкий пучок диаметром 30 мкм, который затем анализируется на основе принципа магнитной фокусировки. В данной работе удалось четко проанализировать оптическое изображение вырезающего отверстия, переносимого на люминесцентный экран электронами пучка, и различить эффекты, позволившие измерить

поперечную энергию электронов пучка, обусловленную оптикой пушки, и некогерентный угловой разброс, связанный с температурой катода.

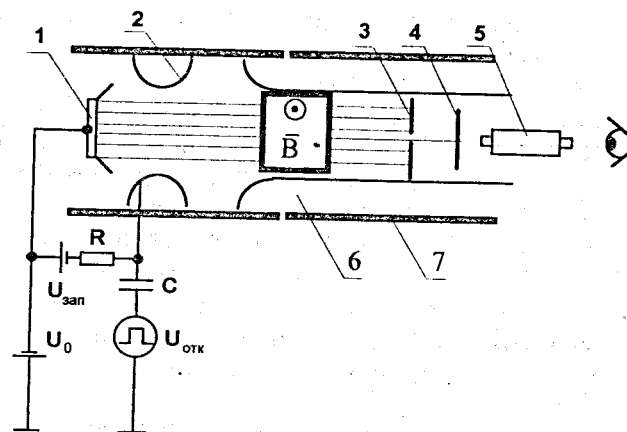


Рис.3.Схема оптического анализатора: 1 - катод пушки, 2 - управляющий электрод, 3 - вырезающая диафрагма, 4 - люминесцентный экран, 5 - микроскоп, 6-соленоиды, 7- катушки поперечного магнитного поля.

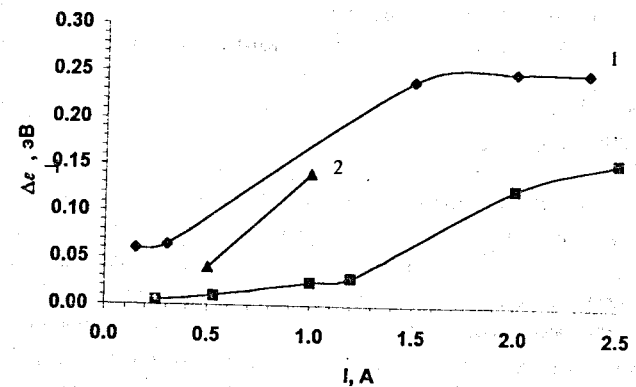


Рис.4.Зависимость разности поперечной энергии для осевых краевых электронов от тока пучка, формируемого пушкой LEAR в магнитном поле $B=600$ Г, эксперимент: 1- $\epsilon_0 = 5.7$ кэВ, 2 - $\epsilon_0 = 13$ кэВ; расчет: 3 - $\epsilon_0 = 5.7$ кэВ.

В §3.3 приведены стендовые эксперименты по измерению поперечной температуры в интенсивных электронных пучках с

первеансом до $5 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$, формируемых пушкой LEAR. Измеренная величина поперечной энергии составляет 0,1-0,3 эВ для пучков с энергией электронов до 12 кэВ в магнитном поле 600 Г (Рис.4). Здесь же проанализирована точность результатов этих экспериментов и разрешение метода. Надежно измеряется поперечная температура, величина которой составляет 0,1 эВ.

В §3.4 представлен энергетический метод измерения поперечной и разброса продольной энергии, предложенный в ИЯФ им. Будкера СО РАН и развитый в работах, представленных в диссертации. Метод основан на анализе продольной энергии электронов в тормозящем электрическом поле. Особенность использования метода в данной работе состояла в том, что измерения проведены в энергичных интенсивных пучках с первеансом $1-5 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$, в которых существенно влияние пространственного заряда пучка и эффектов неадиабатичности движения электронов в тормозящем анализирующем поле.

Схема энергетического анализатора приведена в §3.5. Расчеты вольт-амперной характеристики анализатора представлены в §3.6. В §3.7 обсуждается разрешающая способность метода и влияние различных факторов, приводящих к снижению точности измерений. Результаты экспериментов по измерению поперечной энергии в интенсивных высокоэнергичных пучках представлены в §3.8

Эксперименты по измерению поперечной энергии электронов непосредственно на LEAR выполнены с помощью анализатора быстрых атомов водорода, образующихся при рекомбинации охлажденных протонов и электронов пучка. По результатам измерений скорости рекомбинации, поперечная температура электронов пучка составляет менее 0,2 эВ (см. §3.9).

В четвертой главе представлены результаты по рекуперации широкоапертурных пучков электронов в системе электронного охлаждения (§ 4.1). Для формирования стационарных электронных пучков диаметром 50 мм с первеансом до $5 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$ в режиме рекуперации их энергии разработан высокоэффективный коллектор электронов (Рис.5) с первеансом $20 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$ при относительном токе потерь $3 \cdot 10^{-6} - 10^{-4}$ (Рис.6). Реализация метода электронного охлаждения в условиях ультравысокого вакуума LEAR (10^{-11} Торр.) впервые потребовала разработки коллектора с таким уровнем потерь для интенсивных электронных пучков с первеансом до $5 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$ (§ 4.2). Коллектор системы электронного охлаждения LEAR представляет собой цилиндр Фарадея с супрессорным электродом (репеллером). Он конструктивно прост, его эффективность определяется магнитной пробкой на входе в коллектор и электростатическим барьером,

создаваемым супрессорным электродом и пространственным зарядом пучка.

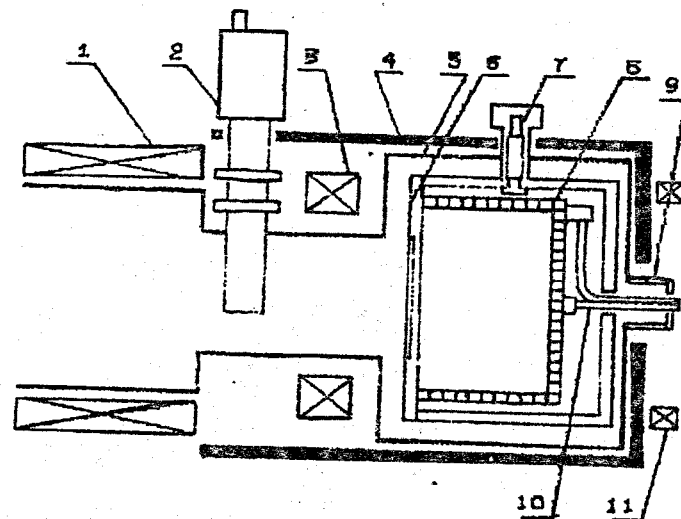


Рис.5. Схема коллектора: 1 - соленоид; 2 - вакуумный шибер; 3 - коллекторная катушка; 4 - магнитный экран; 5 - вакуумная камера; 6 - репеллер; 7 - поддерживающий изолятор; 8 - коллектор; 9 - вакуумный изолятор; 10 - система водяного охлаждения; 11 - катушка встречного поля.

В экспериментах с нейтрализованными электронными пучками важную роль играет плотность быстрых вторичных электронов, отраженных от коллектора. Существуют две группы таких электронов: электроны, совершающие многократные колебания между пушкой и коллектором, и электроны, возвращающиеся в коллектор после первого отражения от потенциального барьера в области пушки. Параметры вторичных электронов обсуждаются в § 4.3.

Результаты численного моделирования и выбор геометрии коллектора LEAR содержатся в § 4.4. Данные экспериментов по рекуперации широкоапертурных пучков диаметром 5 см с энергией электронов до 30 кэВ, током до 3 А на стенде и на LEAR приведены в §4.5 - §4.6. Эффективность рекуперации по току потерь пучка составляет $10^{-4} - 3 \cdot 10^{-6}$. Предельный ток потерь в этих экспериментах определяется ионизацией электронами пучка атомов остаточного газа.

Низкая эффективность прежнего коллектора LEAR по току потерь 10^{-3} была недостаточна для обеспечения вакуума 10^{-11} Торр и являлась одной из причин нестабильной работы системы электронного охлаждения. Установка нового коллектора в 1991 г. позволила

использовать электронное охлаждение в "штатном" режиме при проведении экспериментов с пучками антипротонов с импульсом ниже 308 МэВ/с.

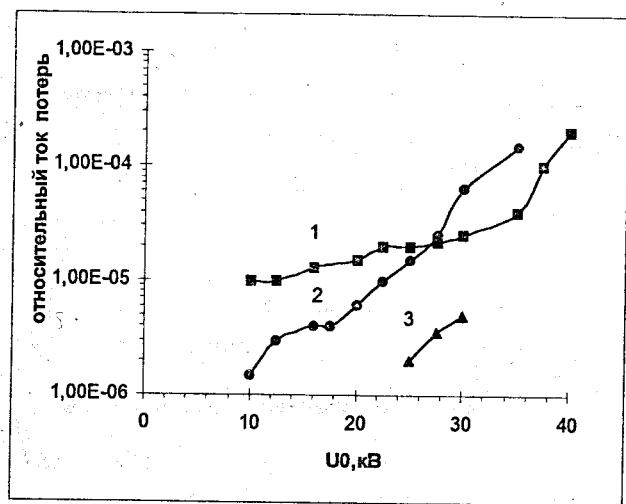


Рис.6. Зависимость тока потерь в стендовых экспериментах от потенциала катода для пучка с первансом $0.52 \mu A/V^{3/2}$:

1) напряженность магнитного поля в вакуумной камере $B = 420$ Г, напряженность магнитного поля в коллекторной катушке $B_{max} = 828$ Г, $P = 2.4 \times 10^{-8} \div 1.5 \times 10^{-7}$ Торр; 2) $B = 516$ Г, $B_{max} = 1050$ Г, $P = 1.5 \times 10^{-8}$ Торр; 3) $B = 516$ Г, $B_{max} = 1050$ Г, $P = 5 \times 10^{-8} \div 6.7 \times 10^{-7}$ Торр.

В пятой главе обсуждается метод формирования интенсивных электронных пучков с малым энергетическим разбросом, предложенный в первых работах по электронному охлаждению. Пространственный заряд электронного пучка приводит к провисанию потенциала в дрейфовой камере системы охлаждения и к зависимости энергии электронов от радиуса их траекторий. Вследствие бетатронных колебаний неохлажденные ионы пучка взаимодействуют с электронами пучка с разной энергией и на разном расстоянии от оси. Это, в конечном счете, приводит к существенному увеличению времени охлаждения ионов интенсивными электронными пучками (см. §5.1). Для нейтрализации пространственного заряда электронного пучка использованы электростатические "пробки Пархомчука". Электроды пробок представляют два полуцилиндра, между которыми вставлено

проводящее стекло. К электродам приложено положительное напряжение разной величины, так что в пространстве между ними возникает поперечное электрическое поле. Пробки запирают ионы, образующиеся при ионизации электронами пучка атомов остаточного газа, и удаляют вторичные электроны. Формирование нейтрализованных электронных пучков с помощью электростатических пробок рассмотрено в §5.2.

Динамика процессов нейтрализации обсуждается в §5.3. Нейтрализованный электронный пучок в системе электронного охлаждения представляет четырехкомпонентную систему, состоящую из электронов пучка, ионов остаточного газа, вторичных электронов и волн, возбуждаемых пучком. Поперечные электрон-ионные колебания (см. §5.4) определяют как параметры стационарного состояния электронного пучка (см. §5.5), так и его предельный пороговый ток. Возбуждение поперечных электрон-ионных колебаний при определенных условиях может привести к развитию конвективной (сносовой) пучково- дрейфовой неустойчивости. Она переходит в абсолютную неустойчивость при наличии обратной связи. Одним из каналов обратной связи являются вторичные электроны, отраженные от коллектора. Параметры вторичных электронов в системе с электростатическими пробками обсуждаются в §5.6.

Для диагностики нейтрализованных электронных пучков разработан ряд методов: диагностический электронный пучок, время-пролетный метод, охлажденный ионный пучок. Идея диагностического пучка (Рис.7) основана на измерении его азимутального смещения под действием электрического поля основного пучка (§5.7).

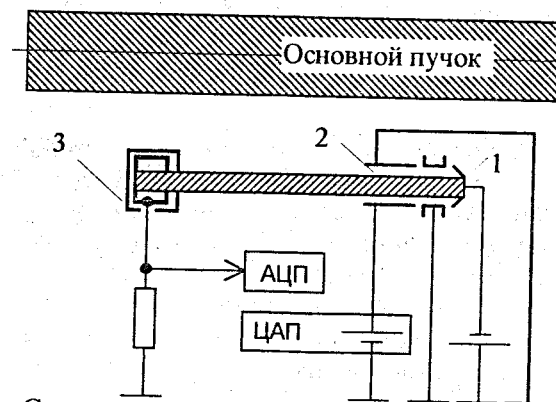


Рис.7. Схема измерения степени нейтрализации с помощью диагностического электронного пучка. 1 - пучка диагностического пучка, 2 - электроды компенсирующего поля, 3 - коллектор

С этой целью вдоль основного пучка на некотором расстоянии от его оси инжектируется диагностический электронный пучок. С помощью этого метода диагностики измеряется суммарный заряд частиц, находящихся внутри цилиндра с диаметром, на который смещен диагностический пучок. Диагностический пучок эффективно использован в стендовых измерениях степени нейтрализации. Во время-пролетном методе (§5.8), предложенном в ИЯФ им.Будкера, измеряется разность фаз между двумя пиками электродов при модуляции тока пучка. Величина разности фаз определяется скоростью электронов, а та, в свою очередь, зависит от провисания потенциала в дрейфовой камере. Время-пролетный метод эффективно использован как в экспериментах на Стенде электронного охлаждения, так и в экспериментах на LEAR. Заметим, что как диагностический электронный пучок, так и время-пролетный метод позволяют определять интегральную степень нейтрализации, усредненную по радиусу пучка. Локальная степень нейтрализации в экспериментах на LEAR измерена охлажденным ионным пучком с помощью диагностики Шоттки (см. §5.9).

Результаты экспериментов по исследованию нейтрализованного состояния электронного пучка при ультравысоком вакууме 10^{-11} Торр представлены в §5.10. (Таблица 1, рис.8).

Таблица 1. Параметры нейтрализованного электронного пучка в системе электронного охлаждения LEAR

Энергия электронов, кэВ	27.5	11.5	3.2
Ток пучка, А	1.5	0.5	0.13
Степень нейтрализации η	0.9	0.85	0.75
Первеанс пучка, $\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$	0.32	0.41	0.65
Магнитное поле, Г	600		

В ходе экспериментов на LEAR получены нейтрализованные электронные пучки с энергией электронов 2,5- 27 кэВ, током 0,03-1,5А, первеансом 0,35-0,6 $\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$ со степенью нейтрализации $\eta=0,75-0,95$. Здесь же приводятся результаты экспериментов по формированию нейтрализованных пучков с энергией электронов 2,5-10 кэВ, током пучка 0,01-2,5А на Стенде электронного охлаждения ЛЯП при давлении $10^{-7}-10^{-9}$ Торр. Результаты экспериментов на стенде и в системе электронного охлаждения LEAR находятся в хорошем согласии друг с другом.

В §5.11 проведен анализ процессов нейтрализации и устойчивости нейтрализованных электронных пучков в системах электронного охлаждения LEAR и МОСОЛ, а также в ионных источниках с электронными пучками, таких как КРИОН.

Здесь обсуждаются основные физические процессы, влияющие на параметры стационарных нейтрализованных пучков и их устойчивость. Они, в значительной мере, определяются плотностью электронов пучка ($10^7-10^8 \text{ см}^{-3}$ -МОСОЛ и LEAR, $10^{11}-10^{12} \text{ см}^{-3}$ - КРИОН) и давлением остаточного газа (10^{-10} Торр - МОСОЛ, 10^{-11} Торр -LEAR, 10^{-12} Торр - КРИОН). В результате различия параметров этих установок, реализуются разные механизмы нагрева ионов. Если в экспериментах КРИОН и МОСОЛ основным механизмом нагрева являются кулоновские столкновения ионов с электронами пучка, то на LEAR этот механизм нагрева практически выключен. Нагрев ионов здесь происходит при возбуждении поперечных электрон-ионных колебаний.

Заметную роль в этих трех системах играют ион-ионные столкновения. Особенно они существенны в экспериментах МОСОЛ и КРИОН. В результате сильных ион-ионных столкновений возможен уход ионов при температуре, в 5-10 раз более низкой, чем энергия потенциального барьера. Уход ионов здесь связан с быстрыми частицами, находящимися в хвостах функции распределения ионов по энергии. В экспериментах КРИОН ион-ионные столкновения настолько сильны, что приводят к стабилизации неустойчивостей нейтрализованных электронных пучков.

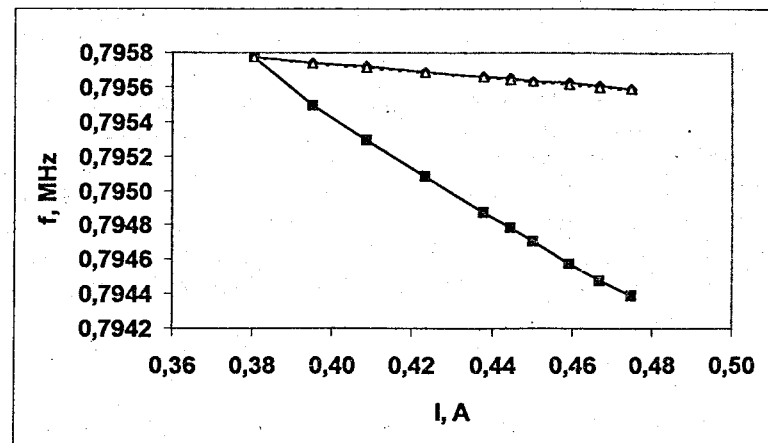


Рис.8. Зависимость частоты обращения протонного пучка от тока электронного пучка. $B=600$ Г, напряжение на электродах пробки $U_{ir1}=U_{ir3}=6$ кВ, $U_{ir2}=U_{ir4}=0$. Δ - нейтрализованный пучок, \blacksquare - заряженный пучок. $U_0=11.7$ кВ.

Шестая глава посвящена проблемам нейтрализации, пучково-дрейфовой неустойчивости и активным методам её подавления. Развитие пучково-дрейфовой неустойчивости обусловлено возбуждением поперечных электрон-ионных колебаний. В §6.1- §6.2 обсуждаются теоретические модели пучково-дрейфовой неустойчивости и приведен анализ экспериментальных данных по её исследованию. Результаты которого показывают, что величина порогового тока в экспериментах может существенно отличаться при высоком вакууме для систем электронного охлаждения с низким током потерь в коллекторе и экспериментов, где вакуум относительно невысок 10^{-5} - 10^{-7} Торр, а ток потерь достаточно велик 10^{-2} - 10^{-3} .

Амплитудно-частотные характеристики свободных и вынужденных поперечных колебаний представлены в §6.3 - §6.4. Резонансная частота колебаний находится в диапазоне 150-450 кГц и соответствует ионным когерентным частотам. Они не зависят от степени нейтрализации и определяются плотностью электронов пучка, зарядовым составом ионов Z/A и величиной напряженности магнитного поля. Относительная ширина спектра для стабильных нейтрализованных пучков составляет 0,05-0,15. При развитии неустойчивости относительная ширина спектра возрастает до 0,2-0,5. Одной из основных характеристик поперечных волн является их коэффициент усиления вдоль распространения пучка. В стендовых экспериментах величина коэффициента усиления амплитуды поперечных волн на резонансных частотах составляет 10-15 на длине 1,7 м. По результатам не прямых измерений величина коэффициента усиления на LEAR соответствует 20-50 на длине 3,2 м для стабильных нейтрализованных пучков. При развитии неустойчивости не зарегистрировано увеличение амплитуды поперечных волн в зависимости от продольной координаты.

При токе пучка выше порогового амплитуда поперечных колебаний быстро возрастает во времени. Длительность всплесков неустойчивости составляет 0,05-0,2 мсек и фактически определяется декрементом затухания Ландау. Величина пороговой плотности тока определяется соотношением

$$j_{neutr} \sim \frac{v_e^2 B}{kLc}$$

Здесь L - длина области нейтрализации, B - напряженность магнитного поля, v_e - скорость электронов пучка, k - численный коэффициент, величина которого зависит от коэффициента обратной связи, давления остаточного газа и ряда других параметров. Величина численного коэффициента k оказывается различной как в разных теоретических моделях ($k=8$ (Незлин М.В.); $k=2$ (Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А.); $k \approx 2-3$ (Буров А.В.)), так и полученная в результате экспериментальных

исследований ($k=8-12$ (Незлин М.В.); $k=3.8$ (МОСОЛ); $k=1.2$ (НАП - М)).

Анализ экспериментальных результатов с нейтрализованными пучками и обсуждение проблемы пучково - дрейфовой неустойчивости представлены в §6.6. Здесь обсуждаются основные физические процессы, влияющие на устойчивость электронных пучков в экспериментах на LEAR, на стенде ОИЯИ, на КРИОН и МОСОЛ.

Для стабилизации нейтрализованных пучков в экспериментах на LEAR и Стенде электронного охлаждения ОИЯИ разработаны активные методы подавления пучково- дрейфовой неустойчивости. Они позволяют поднять пороговый ток в 2-4 раза (Рис.9, Таблица 2).

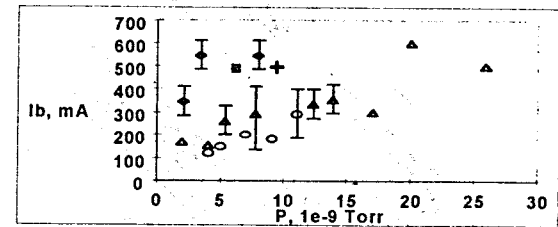


Рис.9. Зависимость порогового тока на стенде от давления остаточного газа: O - с пробками, без использования активных методов неустойчивости; с пробками и активными методами подавления неустойчивости: Δ - чистящими электродами, ■ - разрезным управляющим электродом, ◆ - чистящими электродами и шейкером, + - чистящими электродами и продольной модуляцией.

Таблица 2. Отношение плотности порогового тока, полученной в различных экспериментах, к расчетной плотности порогового тока по Незлина.

Эксперимент	J_{thresh} / J_{Neslin}
Эксперименты Незлина	0.7-1
НАП-М	4
МОСОЛ	2.1
LEAR, пассивный режим	0.2-0.3
Стенд ОИЯИ, пассивный режим	0.7-1.4
LEAR, активный режим	1
Стенд ОИЯИ, активный режим	3.2

К числу таких методов относится удаление вторичных электронов чистящими электродами (см. §6.8, рис.10); нагрев ионов кикером с

гармоническим электрическим полем в поперечном направлении (шейкер) (§6.9); нагрев ионов при продольной модуляции пучка и возбуждении продольных волн (§6.10). В §6.11 обсуждаются причины подавления пучково-дрейфовой неустойчивости при использовании трехэлектродной пушки с "разрезным" управляющим электродом. В §6.12 проведено сравнение результатов экспериментов на LEAR и на стенде, а также на КРИОН и МОСОЛ с результатами расчетов, и сделан анализ основных процессов, определяющих нейтрализацию и устойчивость электронных пучков в условиях ультравысокого вакуума.

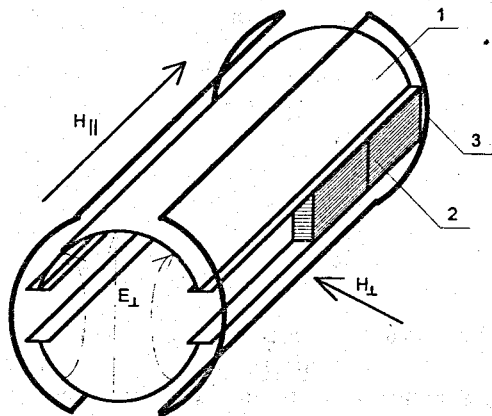


Рис.10. Чистящие электроды. 1 - электрод, 2 - проводящее стекло, 3 - катушка поперечного магнитного поля.

В седьмой главе представлены результаты экспериментов по охлаждению ионных пучков на LEAR интенсивными пучками электронов. В §7.1 приведены эксперименты по охлаждению антипротонных и протонных пучков с энергией до 50 МэВ электронными пучками с первансом $0,5 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$ в стандартных для LEAR режимах. При охлаждении антипротонов с начальным эмиттансом 40π мм мрад и относительным продольным разбросом 10^{-3} время охлаждения до равновесного эмиттанта $2-4 \pi$ мм мрад составляет несколько секунд (Рис.11). Здесь же приведены зависимости времени охлаждения и равновесного эмиттанта охлажденного пучка от тока электронного и интенсивности ионного пучков.

Эксперименты по охлаждению протонных пучков нейтрализованными электронными пучками также представлены в §7.1

Формирование интенсивных электронных пучков с первансом до $5 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$ на LEAR обусловлено необходимостью быстрого охлаждения ионов свинца Pb^{54+} с энергией 4,2 МэВ/н, требуемых для LHC. Стандартная схема ускорительного комплекса ионов CERN в

настоящее время не обеспечивает требуемой для LHC светимости. Для достижения необходимой величины светимости предполагается использовать охлаждение и накопление ионов свинца в накопителе LEAR. Время охлаждения должно быть достаточно быстрым и составлять около 0.2 сек. После 2 сек стекирования требуемая интенсивность должна составлять $1.2 \cdot 10^9$ ионов.

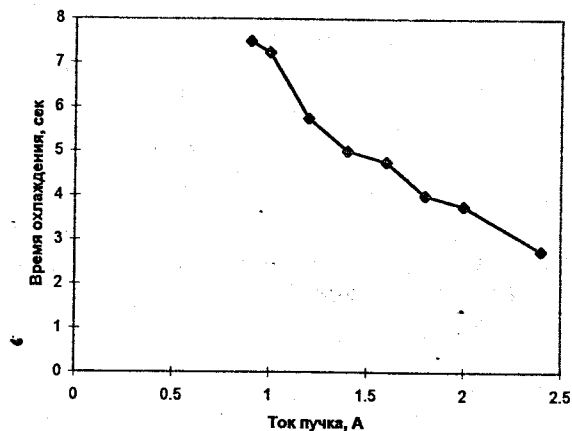


Рис.11. Зависимость горизонтального времени охлаждения протонов от тока электронного пучка. $U_0=27.8$ кВ, $N_p=10^9$ протонов.

Результаты экспериментов по охлаждению ионов свинца на LEAR интенсивными электронными пучками обсуждаются в §7.2. Начальный эмиттанс ионного пучка равен: $\epsilon_v = 7 \pi$ мм мрад, $\epsilon_h = 50 \pi$ мм мрад. Эмиттанс охлажденного ионного пучка равен $\epsilon_v \approx \epsilon_h \approx 2-3 \pi$ мм мрад. Время охлаждения ионов свинца в поперечном направлении при токе электронного пучка 350 мА (энергия электронов 2,5 кэВ, перванс пучка $3 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$) составляет менее 0,1 сек (Рис.12). Время охлаждения ионов в продольном направлении также равно менее 0,1 сек при относительном начальном разбросе импульсов $2 \cdot 10^{-3}$ и его равновесном значении $2 \cdot 10^{-4}$ (Рис.13).

Достигнутые времена охлаждения ионов свинца меньше, чем это рассмотрено в проекте LHC. Заметим, что интенсивность ионного пучка в настоящее время ниже в 10-100 раз, чем проектная величина интенсивности, поскольку режим многооборотной инжекции и стекирования ионов в сгустки в настоящее время еще не реализован.

Детальные исследования времени охлаждения ионов свинца для различной оптики LEAR приведены в §7.2. Оптимальной для

охлаждения ионов свинца является оптика с бета- функцией в секции охлаждения порядка $\beta \approx 5$ м.

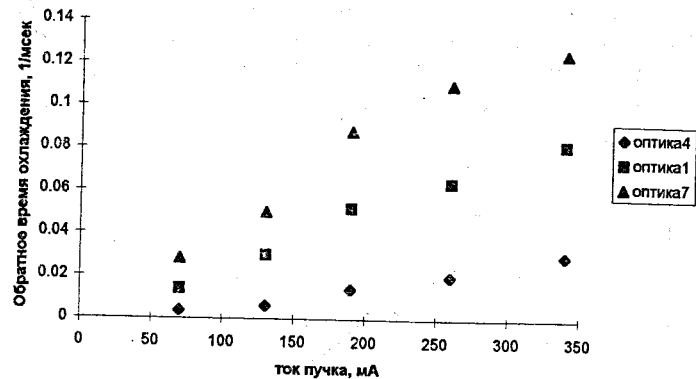


Рис.12 Зависимость обратного времени охлаждения ионов свинца Pb^{54+} от тока пучка для различных режимов оптики LEAR

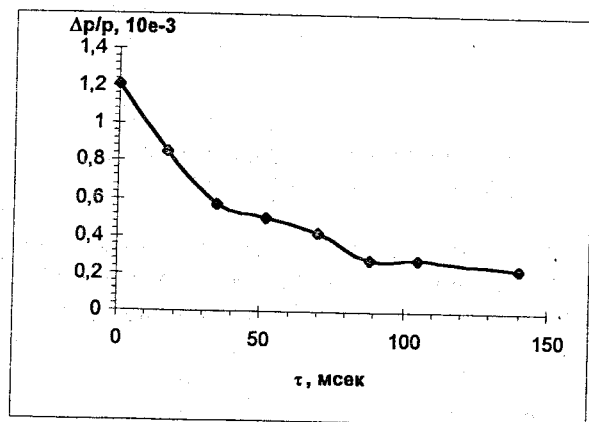


Рис.13. Зависимость продольного импульса ионов свинца Pb^{54} от времени. $I=120$ мА.

Стандартный цикл работы LEAR в проекте LHC по охлаждению, накоплению и ускорению ионов свинца должен составлять 3,5 сек. В связи с этим, время жизни ионов свинца в накопителе должно быть существенно выше, чем длительность цикла. Эксперименты по измерению времени жизни ионов представлены в §7.3. Время жизни ионов свинца в значительной мере определяется их рекомбинацией с электронами пучка. Аномально высокий коэффициент рекомбинации

зарегистрирован для ионов Pb^{53+} . Он в 30 раз превышает расчетное значение. Коэффициент рекомбинации для ионов Pb^{52+} , Pb^{54+} , Pb^{55+} в 5-6 раз ниже, в результате время жизни ионов свинца для них составляет около 15 сек, что вполне приемливо для проекта LHC. Исследованию времени охлаждения ионов свинца нейтрализованными электронными пучками посвящен §7.4. Здесь показано, что при "частичном выключении" пространственного заряда пучка время охлаждения снижается. Так, при охлаждении частично нейтрализованным электронным пучком с током 150 мА, время охлаждения было снижено в 1,5-2 раза и составило менее 0,2 сек.

В Заключении приведены основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту:

1. Впервые разработан метод формирования интенсивного широкоапертурного пучка электронов с малым угловым и энергетическим разбросом в диапазоне энергий 2-30 кэВ, токов 0,01-3А, первеансов 0,1-5 $\mu A/V^{3/2}$, используемого для быстрого охлаждения ионных пучков с высоким начальным эмиттансом в накопителях.

2. Создана и введена в действие, на основе разработанного метода, электронно - оптическая система электронного охлаждения антипротонного накопителя LEAR в CERN, позволившая использовать этот метод охлаждения в качестве штатной операции при работе на эксперимент по физике антипротонов в 1991-1996 г.г..

3. В указанном диапазоне параметров найдены новые физические решения, реализованные при создании основных элементов системы электронного охлаждения нового поколения, и при развитии методов диагностики электронных пучков:

3.1 Широкоапертурная электронная пушка с адиабатической оптикой и управляемым первеансом 0,125-5 $\mu A/V^{3/2}$, током пучка 0,01-3А, диаметром пучка 50 мм, энергией электронов 2-30 кэВ.

3.2 Коллектор электронов с относительным током потерь 10^{-4} - 10^{-5} , первеансом до 20 $\mu A/V^{3/2}$, предназначенный для рекуперации интенсивных широкоапертурных пучков.

3.3 Методы и устройства диагностики параметров электронного пучка: оптический и энергетический анализаторы.

4. Развита метод формирования нейтрализованного интенсивного пучка электронов в вакууме до 10^{-11} Торр.

4.1 Создана система нейтрализации пространственного заряда электронного пучка на накопителе LEAR.

4.2 Разработаны и развиты методы диагностики нейтрализованного пучка: диагностический электронный пучок, время - пролетный метод, охлажденный ионный пучок.

4.3. Впервые экспериментально исследована нейтрализация пространственного заряда широкоапертурного электронного пучка

при ультравысоком вакууме 10^{-11} Торр. Получены нейтрализованные электронные пучки с энергией электронов 2,5- 27 кэВ, током 0,03-1,5А, первансом $0,35-0,6 \mu\text{A}/\text{В}^{3/2}$ со степенью нейтрализации $\eta=0,75-0,95$.

4.4. Впервые разработаны и реализованы активные методы подавления пучково-дрейфовой неустойчивости, позволяющие поднять в 2-4 раза пороговый ток пучка: очистка вторичных электронов специальными электродами, нагрев ионов в поперечном высокочастотном поле, возбуждение продольных колебаний пучка при продольной модуляции его тока. Получены стабильные нейтрализованные пучки с энергией электронов 2.5 кэВ, током 0.3 А, диаметром 50 мм, первансом $2.5 \mu\text{A}/\text{В}^{3/2}$, со степенью нейтрализации $\eta=0,4$ (LEAR) и пучки с энергией электронов 2.5 кэВ, током 0.5 А, диаметром 30 мм, первансом $4 \mu\text{A}/\text{В}^{3/2}$, со степенью нейтрализации $\eta=0,6$ (стенд).

4.5. Выделены и исследованы основные механизмы и условия, определяющие процессы нейтрализации и устойчивости широкоапертурных электронных пучков в условиях ультравысокого вакуума $10^{-9}-10^{-11}$ Торр. Построена общая картина процессов нейтрализации и устойчивости и показано, что разнообразие результатов, полученных в экспериментах, может быть описано в рамках единых представлений.

5. Методы, представленные в (п.3-4), реализованы в системе электронного охлаждения накопителя LEAR при охлаждении пучков антипротонов, протонов и ионов свинца интенсивными широкоапертурными пучками электронов с первансом до $3 \mu\text{A}/\text{В}^{3/2}$. При охлаждении ионов свинца $\text{Pb}^{52+} - \text{Pb}^{55+}$ с энергией 4,2 МэВ/н, требуемых для ЛНС, получено время охлаждения в продольном направлении 80 мсек, в поперечном - менее 100 мсек.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в работах:

1. Bosser J., Ley R., Tranquille G., Bykovsky V., Funtikov V., Meshkov I., Poljakov V., Rogosin A., Seleznev I., Sinitsky V., Smirnov A., Syresin E. The new electron beam collector for LEAR. Proc. Workshop Electron Cooling and New Cooling Techniques, Italy, 1990
2. Боссер Ж., Быковский В.Ф., Лей Р., Мешков И.Н., Поляков В.Н., Рогозин А.И., Селезнев И.А., Синецкий В.Б., Смирнов А.В., Сыресин Е. М., Транквиль Ж., Фунтиков В.П. Новый коллектор для электронного охлаждения ЛИР. Препринт ИЯФ СО АН СССР 91-25, Новосибирск, 1991
3. Oganessian Yu. Ts., Malyshev O.N., Meshkov I. N., Parkhomchuk V.V., Pororny P., Sery A.A., Stepantsov S. V., Syresin E. M., Ter-Akopian G.

- M., Timakov V.A. The project of the heavy ion storage ring complex K4-K10 an possibility of producing storing and cooling radioactive ion beams. Zeitschrift fur Physika A. Hadron and Nuclei, 1992, V.341, p.217
4. Bosser J., Tranquille G., Meshkov I., Poljakov V., Seleznev I., Smirnov A., Syresin E., Zapunjako A. Project for a Variable Current Electron Gun for The LEAR Electron Cooler. Preprint CERN/PS 92-03 (AR), Geneva, Switzerland, 1992.
5. Запуняко А.М., Мешков И.Н., Поляков В.Н., Селезнев И.А., Смирнов А.В., Сыресин Е.М., Боссер Ж., Транквиль Ж. Электронная пушка с регулируемым током пучка для системы электронного охлаждения накопителя LEAR. Препринт Института ядерной физики СО РАН 92-40, Новосибирск, 1992.
6. Агишев С.А., Быковский В.Ф., Завражнов М.А., Запуняко А.М., Лапик Р.М., Мешков И.Н., Павлов С.Н., Пархомчук В.В., Поляков В.Н., Селезнев И.А., Смирнов А.В., Сыресин Е.М. Система электронного охлаждения комплекса К4-К10. В кн. "Накопительный комплекс тяжелых ионов К4-К10", Дубна, 1992 г., с.87-99.
7. Malyshev O.N., Oganessian Yu.Ts., Rodin A.M., Sidorchuk S.I., Sokol Ye. A., Stepantsov S. V., Ter-Akopian G. M., Timakov V.A., V.I., Parkhomchuk V. V., Sery A.A., Shiltsev V.D., Meshkov I.N., Syresin E. M., Belov V.P., Makarov A.A., Shuckeylo I.A., Severgin Yu.P., Tarovik M.N. Structure and main functions of K4-K10 storage ring complex K4-K10 storage ring complex for heavy ions, P9-92-15, Dubna, 1992.
8. Golubev V., Meshkov I., Poljakov V., Seleznev I., Smirnov A., Syresin E. The Optical Analysis of The Electron Beam Temperature. Workshop on Beam Cooling and Related Topics, 1993, Montreux, Switzerland, p.159-163.
9. Lapik R., Meshkov I., Mozgunov V., Poljakov V., Seleznev I., Smirnov A., Syresin E., Zavrazhnov M., Bosser J., Tranquille G. The Measurement of Transversal and Longitudinal Velocities of an Electron Beam. Workshop on Beam Cooling and Related Topics, 1993, Montreux, Switzerland, p.164-168.
10. Bosser J., Caspers F., Chanel M., Ley R., Maccaferri R., Maury S., Meshkov I., Mohl D., Molinary G., Syresin E., Tranquille G., Varenne F. Neutralisation and servo-system on the LEAR electron cooler. Proc. Beam cooling and related topics, Montreux, Switzerland, 1993, p.175
11. Gorshkov V.A., Malyshev O.N., Oganessian Yu.Ts. Popeko G.S., Rodin A. M., Sarantsev V. P., Sidorchuk S.I., Sokol Ye. A., Stepantsov S. V., Ter-Akopian G. M., Timakov V.A., Averbukh I.I., Cherepanov V.P., Dementiev Ye. N., Kalinin A.M., Kudelainen V.I., Parkhomchuk V. V., Scrynsky A.N., Zelenin A.M., Byckovsky V.F., Lapik R.M., Meshkov I.N., Syresin E. M., Belov V.P., Makarov A.A., Shuckeylo I.A., Severgin Yu.P., Tarovik M.N. K4-K10 Project. TREBLE: two rings exotic beam

- laboratory. Proc. Beam cooling and related topics, Montreux, Switzerland, 1993, p.422
12. Bosser J., Ley R., Tranquille G., Meshkov I., Poljakov V., Seleznev I., Smirnov A., Syresin E., Zapunjako A. The first results of electron cooling at LEAR with the variable current electron gun. Proc. Beam cooling and related topics, Montreux, Switzerland, 1993, p.169
 13. Лапик Р.М., Мешков И.Н., Поляков В.Н., Селезнев И.А., Смирнов А.В., Сыресин Е.М., Боссер Ж., Лей Р., Транквиль Ж. Электронная пушка с регулируемым током. Стендовые испытания и первые эксперименты. Препринт Института ядерной физики СО РАН 93-78, Новосибирск, 1993.
 14. Ступаков Г.В., Сыресин Е.М. Формирование облака осциллирующих электронов в диоде с тонкой анодной фольгой. Физика плазмы, 1986, т.12, N1
 15. Bosser J., Meshkov I., Mohl D., Parkhomchuk V., Syresin E., Tranquille G. Neutralisation of the LEAR-ECOOOL electron beam space charge. CERN PS/AR Note 93-08, 1993
 16. Завражнов М.А., Лапик Р.М., Мешков И.Н., Поляков В.Н., Селезнев И.А., Смирнов А.В., Сыресин Е.М., Боссер Ж., Транквиль Ж. Измерение поперечной энергии электронов в интенсивных холодных пучках. Препринт Института ядерной физики СО РАН 93-103, Новосибирск, 1993.
 17. Мешков И.Н., Поляков В.Н., Селезнев И.А., Смирнов А.В., Сыресин Е.М. Коллектор типа цилиндра Фарадея с транспортировочным электродом. Препринт ИЯФ СО АН СССР 93-79, Новосибирск.
 18. Agishev S.A., Bykovsky V.F., Meshkov I.N., Parkhomchuk V.V., Poljakov V.N., Seleznev I.A., Smirnov A.V., Syresin E.M., Zapunjako A.M., Zavraznov A.M. Electron cooling system of the K4-K10 complex. Heavy ion Physics Scientific report 1991-1992, JINR Dubna, 1992, E7-93-57, Dubna. 1993, p.311
 19. Malyshev O.N., Oganessian Yu.Ts., Rodin A.M., Sidorchuk S.I., Sokol Ye. A., Stepantsov S. V., Ter-Akopian G. M., Timakov V.A., V.I., Parkhomchuk V. V., Sery A.A., Shiltsev V.D., Meshkov I.N., Syresin E. M., Belov V.P., Makarov A.A., Shuckeylo I.A., Severgin Yu.P., Tarovik M.N. Present status and future development of the K4-K10 Heavy ion Storage ring Complex Heavy ion physics. Scientific report 1991-1992. E7-93-57, Dubna 1993, p.303,
 20. Gorshkov V.A., Malyshev O.N., Oganessian Yu.Ts., Popeko G.S., Rodin A. M., Sagaidak R.N., Sarantsev V. P., Sidorchuk S.I., Sokol Ye. A., Stepantsov S. V., Ter-Akopian G. M., Timakov V.A., Averbukh I.I., Cherepanov V.P., Dementiev Ye. N., Kalinin A.M., Kudelainen V.I., Parkhomchuk V. V., Skrynsky A.N., Zelenin A.M., Byckovsky V.F., Lapik R.M., Meshkov I.N., Syresin E. M., Belov V.P., Makarov A.A., Shuckeylo I.A., Severgin Yu.P., Tarovik M.N. K4-K10 Project. TREBLE: two rings exotic beam laboratory. Proc. Inter. School - seminar on heavy ion physics, Dubna, 1993, vol.2, p.417
 21. Bosser J., Ley R., Molinari G., Tranquille G., Varenne F., Meshkov I., Poljakov V., Smirnov A., Syresin E. Electron Cooling With Neutralised Electron Beams. Fourth European Particle Accelerator Conference. London, 1994, vol.1, p.1211-1213.
 22. Malyshev O.N., Meshkov I.N., Oganessian Yu.Ts., Rodin A.M., Sidorchuk S.I., Sokol Ye. A., Stepantsov S. V., Syresin E. M., Ter-Akopian G. M., Timakov V.A.. One ring mode of the storage ring complex K4-K10. Proc. EPAC. London, 1994, vol.1, p.52
 23. Быковский В.Ф., Лапик Р.М., Мешков И.Н., Поляков В.Н., Смирнов А.В., Степашкин О.Г., Сыресин Е.М., Боссер Ж., Лей Р., Транквиль Ж. Развитие техники электронного охлаждения. Труды 14-ого совещания по ускорителям. Протвино, 1994, т.1, с.5.
 24. Malyshev O.N., Meshkov I.N., Oganessian Yu.Ts., Rodin A. M., Sarantsev V. P., Sidorchuk S.I., Stepantsov S. V., Syresin E. M., Ter-Akopian G. M., Timakov V.A., Parkhomchuk V. V., Skrynsky A.N. K4-K10 Project. TREBLE: two rings exotic beam laboratory. Proc. II Inter. Symp. on nuclear physics and storage rings. S.Petersburg, 1994
 25. Syresin E. Comments about November 94 LEAR experiments and CAPT Test Bench experiments. CERN/PS/AR Note 94-24, Geneva, Switzerland, 1994
 26. Bosser J., Caspers F., Chanel M., Ley R., Maccaferri R., Mauri S., Meshkov I., Poljakov V., Smirnov A., Stepashkin O., Syresin E., Tranquille G., Varenne F. Neutralization of the LEAR Electron-cooling Beam: Experimental Results. The Particle Accelerator Conference, Dallas, USA, 1995. Preprint CERN/PS 95-17(AR), Geneva, Switzerland, 1995.
 27. Bosser J., Lapik R., Ley R., Meshkov I., Poljakov V., Seleznev I., Smirnov A., Syresin E., Tranquille G., Zapunjako A., Zavrazhnov M. The variable current gun: the parameter tests and the results of the first electron cooling experiments at LEAR. Nucl. Instr. and Meth., A355, 1995, p.208-222.
 28. Bosser J., Mauri S., Meshkov I., Mohl D., Mustafin E., Syresin E., Varenne F., Zenkevich P. Stability condition for a neutralised electron cooling beam. Proc. PAC. Dallas, USA, 1995, CERN/PS/AR 95-18
 29. Bosser J., Ley R., Molinari G., Tranquille G., Varenne F., Meshkov I., Poljakov V., Smirnov A., Syresin E. Electron Cooling With Neutralised Electron Beams. Heavy ion physics. Scientific report 1993-1994 of FLN. Dubna, 1995
 30. E. Syresin The secondary electron in the electron cooling system. CERN/PS/AR Note 95-14, 1995
 31. Bosser J., Korotaev Y., Ley R., Maccaferri R., Meshkov I., Molinary G., Smirnov A., Syresin E., Tranquille G., Varenne F. The experimental

- study of the electron beam neutralisation. The 11 th International Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on Beam Cooling & Instability Damping. p.14 Dubna, 1996
32. Baird S., Bosser J., Carli C., Chanel M., Ley R., Maccaferri R., Maury S., Meshkov I., Mohl D., Molinary G., Syresin E., Tranquille G., Varenne F. Injection, Storage and Cooling Test of Pb^{53+,54+} and 55+ Ions in LEAR. Geneva, 1996. Preprint/ CERN/PS/AR/Note 96-08.
 33. Meshkov I., Mustafin E., Syresin E., Zenkevich P. Stationary parameters of neutralised electron cooling system. The 11 th International Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on Beam Cooling & Instability Damping. Dubna, p.15, 1996
 34. Коротаев Ю. В., Мешков И. Н., Петров А. Л., Смирнов А.В., Сыресин Е.М., Боссер Ж., Лей Р., Транквиль Ж. Методы подавления пучково - дрейфовой неустойчивости в нейтрализованном электронном пучке. XV Совещание по ускорителям заряженных частиц, с.64. Протвино, 1996
 35. Baird S., Bosser J., Broere J., Carli C., Chanel M., Ley R., Lombardi A., Maccaferri R., Maury S., Meshkov I., Mohl D., Molinary G., Mulder H., Syresin E., Tanake E., Tranquille G., Varenne F., Recent results on lead-ion accumulation in LEAR for the LHC. The 11 th International Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on Beam Cooling & Instability Damping. Dubna, p.21, 1996, Preprint/CERN- PS/97-03, 1997
 36. Caspers F., Korotaev Y., Meshkov I., Petrov A., Rao Y., Smirnov A., Syresin E., Varenne V., Yang X. Diagnostics of the neutralised beam on the JINR test bench. The 11 th International Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on Beam Cooling & Instability Damping. Dubna, 1996
 37. Bosser J., Korotaev Y., Ley R., Maccaferri R., Meshkov I., Moehl D., Molinary G., Smirnov A., Syresin E., Tranquille G., Varenne F. The active methods of instability suppression in a neutralised electron beam. The 11 th International Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on Beam Cooling & Instability Damping. p.15 Dubna, 1996
 38. Syresin E. The parameters of the secondary electrons in the electron cooling system. The 11 th International Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on Beam Cooling & Instability Damping. p.16 Dubna, 1996
 39. Bosser J., Korotaev Y., Ley R., Maccaferri R., Meshkov I., Molinary G., Smirnov A., Syresin E., Tranquille G., Varenne F. The Experimental Study of the Neutralised Electron Beam for Electron Cooling. 5 th EPAC, p.1193, Barselona, Spain, 1996

Рукопись поступила в издательский отдел
25 марта 1997 года.