

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

П-542

13-95-497

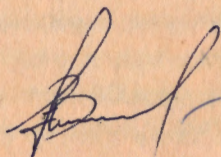
На правах рукописи
УДК 537.533.3

ПОЛЯКОВ
Владимир Николаевич

ВЫСОКОПЕРВЕАНСКАЯ ПУШКА
СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных
частиц и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Дубна 1995

Работа выполнена в Объединенном Институте ядерных исследований.

НАУЧНЫЕ РУКОВОДИТЕЛИ:

МЕШКОВ
Игорь Николаевич доктор физико-математических наук,
профессор, член-корреспондент РАН,
Объединенный Институт
ядерных исследований, г.Дубна

СЫРЕСИН
Евгений Михайлович кандидат физико-математических
наук, Объединенный Институт
ядерных исследований, г.Дубна

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ПЕРЕВОДЧИКОВ
Владимир Иннокентьевич доктор технических наук, академик
Академии электротехнических наук,
Всероссийский электротехнический
институт, г.Москва

ПЕРЕЛЬШТЕЙН
Элкуно Аврумович доктор физико-математических
наук, Объединенный Институт
ядерных исследований, г.Дубна

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: Институт теоретической и
экспериментальной физики, г.Москва

Защита диссертации состоится << ___ >> _____ 1996 г. в << ___ >>
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

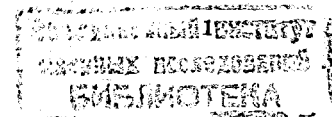
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан << 18 >> декабрь 1995 г.

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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Применение накопительных колец тяжелых заряженных частиц - протонов, антипротонов, ионов играет в настоящее время важную роль в экспериментальных исследованиях в ядерной и атомной физике, физике элементарных частиц. При этом огромное значение имеет качество получаемых в накопителях пучков. Требования как можно более низкой температуры и высокой интенсивности последних дало толчок развитию методов охлаждения заряженных частиц и, в частности, метода электронного охлаждения. Предложенный Г.И.Будкером еще в 1966 году метод электронного охлаждения, с конца 80-х годов становится наиболее значимым средством формирования и накопления пучков заряженных частиц с большой плотностью пространственного заряда. Метод позволяет создать в пучке тяжелых ионов эффективное трение, уменьшающее его фазовый объем (эмиттанс) и разброс его частиц по энергии. Идея метода электронного охлаждения заключается в следующем. Непосредственно на прямолинейном участке накопителя создается интенсивный электронный пучок, обладающий малым разбросом поперечных скоростей, а средние скорости ионов и электронов выбираются равными. При кулоновском взаимодействии частиц происходит выравнивание температур ионов и холодных электронов, в результате чего ионный пучок сжимается и монохроматизируется. При этом существенные требования предъявляются к рабочим параметрам электронного пучка. Для более эффективного охлаждения требуются моноэнергичные электронные пучки с предельной плотностью тока и минимальной поперечной температурой. Поэтому центральной проблемой в методе электронного охлаждения, определяющей одно из его направлений развития, является формирование холодного электронного пучка высокой интенсивности. В свою очередь температура электронов существенно зависит от способа формирования электронного пучка и свойств выбранной оптической системы. В последнее время при построении источников электронов используют так называемую адиабатическую схему ускорения, когда начальное формирование электронного пучка производится в электронных пушках с электростатическим ускорением под действием медленно меняющейся силы. Для выполнения условия адиабатичности масштаб изменения компонент



электрического поля должен быть гораздо больше длины ларморовской спирали электронной траектории. При оптимальном выборе геометрии электронной пушки поперечная скорость электронов, определяемая оптикой пушки, много меньше дрейфовой скорости, характерной для "заряженного" пучка, движущегося в сопровождающем магнитном поле.

Таким образом, построение электронно-оптических устройств, позволяющих повысить эффективность метода электронного охлаждения и расширить область его применения, является актуальной темой физических исследований.

Создание электронных пушек нового поколения потребовало одновременного развития методик измерения температуры электронов. При этом высокая интенсивность электронных пучков требует развития ранее известных и создание новых способов измерения. Соответствующие разработки по развитию диагностики интенсивных электронных пучков также составили часть данной работы.

Основные цели работы. Работа посвящена задачам создания электронных пушек нового поколения и изучения методов измерения их электронно-оптических характеристик и имела следующие главные цели:

1. Создание адиабатической электронной пушки для системы электронного охлаждения накопителя LEAR (ЦЕРН) (рис.1), позволяющей получать пучки электронов с изменяемым первеансом в диапазоне до $5 \mu A/V^{3/2}$, что в 10 раз превышает прежнее значение; с энергией $2.5+30 \text{ кэВ}$, током до 3 А и с температурой электронов менее 0.3 эВ в относительно низком магнитном поле (до 600 Гс).

2. Разработка проекта электронной пушки для системы электронного охлаждения ускорительно-накопительного комплекса К4-К10 (рис.2).

3. Развитие методик измерения поперечной скорости частиц в интенсивном электронном пучке с разрешающей способностью по угловому разбросу электронов 2 мрад .

4. Получение с помощью разработанной электронной пушки эффективного охлаждения антипротонов и ионов свинца в рабочем диапазоне параметров накопителя LEAR (ЦЕРН).

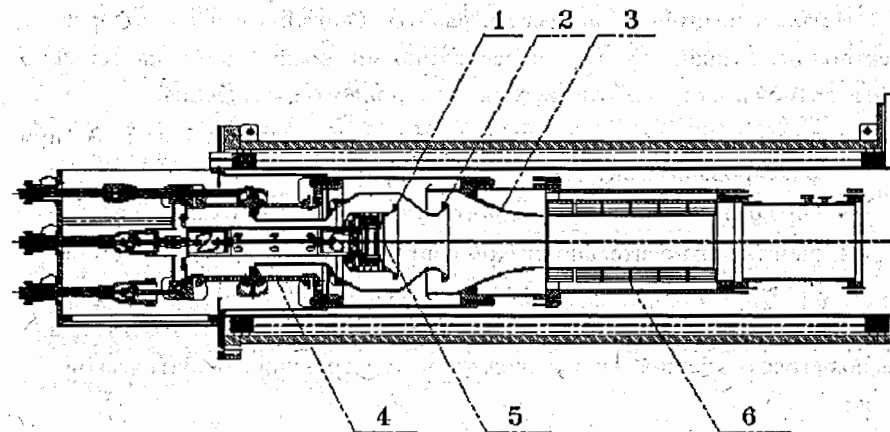


Рис.1. Конструкция электронной пушки LEAR. 1 - фокусирующий электрод, 2 - управляющий электрод, 3 - анод, 4 - высоковольтные металлокерамические изоляторы, 5 - катод, 6 - насос типа "нераспыляемый геттер".

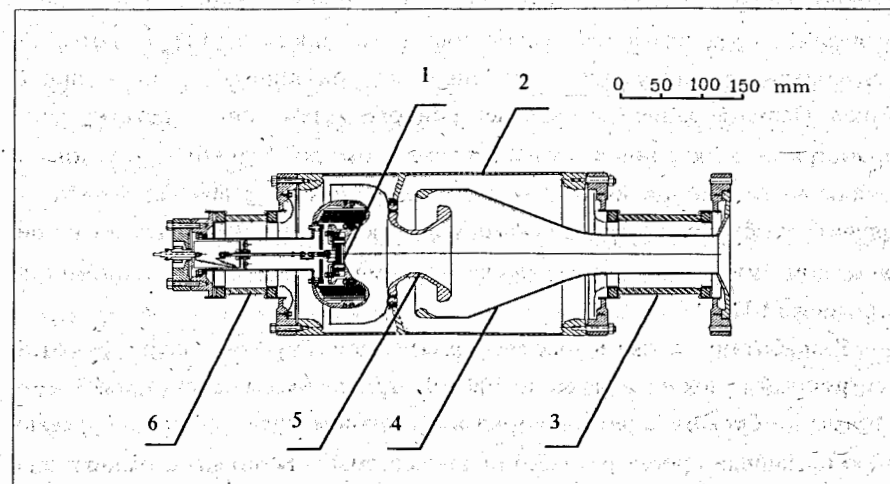


Рис.2. Схема электронной пушки накопителя К-4: 1 - катод, 2 - камера управляющего электрода, 3 - изолятор потенциала управляющего электрода, 4 - анод, 5 - управляющий электрод, 6 - изолятор катодного потенциала.

Научная новизна и значимость работы. Описанные в данной работе электронные пушки, наряду с перечисленными выше, дают качественно новые возможности в работе системы электронного охлаждения:

- ♦ получение тока электронного пучка в пределах до 3 А при фиксированной энергии;
- ♦ управление током электронного пучка в процессе охлаждения;
- ♦ работа в относительно низком сопровождающем магнитном поле (до 600 Гс) с низкой поперечной температурой электронов.

Данные возможности обеспечиваются наличием управляющего электрода, являющегося особенностью предложенной конструкции адиабатической пушки.

Практическая ценность работы. Одна из разработанных электронных пушек в настоящее время является штатным элементом системы электронного охлаждения антипротонного накопителя LEAR (ЦЕРН) и практически используется для накопления моноэнергичных протонных, антипротонных пучков и многозарядных ионов свинца Pb^{52+} - Pb^{54+} . Последние предполагается использовать в проекте LHC, который предусматривает получение встречных протон-ионных и ион-ионных пучков. Использование системы электронного охлаждения с достигнутыми параметрами электронной пушки: первансом до $5 \mu A/V^{3/2}$ и угловым разбросом электронов менее 3 мрад в магнитном поле 600 Гс, позволяет получить требуемое время охлаждения ионов свинца в пределах 0.1 с при начальном эмиттансе ионного пучка 40 п.мм-мрад и высокую светимость коллайдера LHC.

Разработан также проект электронной пушки, формирующей электронный пучок с энергией до 100 кэВ, током до 5 А, диаметром 3 см и угловым разбросом порядка 1 мрад в магнитном поле с напряженностью 1-2 кГс. Данный проект разработан для системы электронного охлаждения ускорительно-накопительного комплекса К4-К10 в ОИЯИ. Этот комплекс позволит значительно расширить возможности исследований ядерной физики тяжелых ионов за счет увеличения энергии и существенного улучшения параметров пучков ионов.

Апробация работы. Материалы, положенные в основу диссертации, представлялись на международном совещании по методам охлаждения пучков (Монре, Швейцария, 1993); на 4 Европейской ускорительной конференции (Лондон, 1994); на 14 (1-м Всероссийском) совещании по ускорителям (Протвино, 1994); на Международной ускорительной конференции (Даллас, США, 1995); а также обсуждались на научных семинарах в Всероссийском электротехническом институте (Москва, 1994); в Физико-технологическом центре Института ядерной физики СО РАН (Липецк, 1994); в Объединенном Институте ядерных исследований (Дубна, 1995); в Европейском центре ядерных исследований (Женева, 1994). По теме диссертации опубликовано 12 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из Введения, пяти глав и Заключения. Текст диссертации изложен на 108 страницах, включая 56 рисунков и 10 таблиц. Список литературы содержит 65 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении дается краткое описание роли накопительных колец тяжелых заряженных частиц с электронным охлаждением в современной ядерной физике и формулируются задачи исследований, вошедших в диссертацию.

В первой главе обсуждаются основные положения физики электронного охлаждения и требования к параметрам охлаждающего электронного пучка, определяющие критерии построения источников электронов. Изложены также существующие схемы формирования электронных пучков в устройствах электронного охлаждения и представлены их сравнительные характеристики на примерах крупнейших действующих накопителей мира.

Во второй главе описываются методы и результаты проектирования электронных пушек, формирующих интенсивные электронные потоки низкой температуры в достаточно слабом сопровождающем магнитном поле. Описаны факторы, оказывающие влияние на величину поперечной

скорости электронов и определены условия, снижающие ее: оптимальный выбор геометрии и распределения потенциалов электродов пушки. Дано обоснование выбора адиабатической оптики пушки, позволяющей в широком диапазоне перестраивать энергию электронного пучка без существенного снижения его качества. Обсуждаются полученные численными методами результаты моделирования геометрии пушек и расчеты их характеристик.

В третьей главе содержится краткое описание существующих методов диагностики электронного пучка: микроволнового и лазерного. Основное внимание уделяется рассмотрению развитого в работе и наиболее эффективного оптического метода измерения температуры интенсивного электронного пучка. Дана физическая интерпретация метода и схема оптического анализатора поперечной скорости. Экспериментально исследована ее зависимость от радиальной координаты электронов, параметров электронного пучка и магнитного поля. Для электронных пучков с первансом $1 \div 5 \text{ } \mu\text{A/V}^{3/2}$ и энергией до 12 кэВ измеренная величина поперечной энергии составляет $0.1 \div 0.3 \text{ эВ}$ в магнитном поле 600 Гс (рис.3).

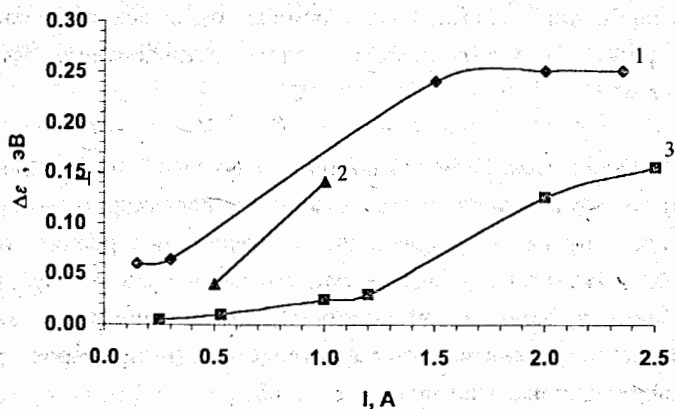


Рис.3. Зависимость разности поперечной энергии для осевых и краевых электронов от тока пучка, формируемого пушкой LEAR в магнитном поле $B=600 \text{ Гс}$, эксперимент: 1 - $\epsilon_0=5.7 \text{ кэВ}$ (перванс от 0.35 до $5.45 \text{ } \mu\text{A/V}^{3/2}$), 2 - $\epsilon_0=13 \text{ кэВ}$ (перванс от 0.35 до $0.7 \text{ } \mu\text{A/V}^{3/2}$); расчет: 3 - $\epsilon_0=5.7 \text{ кэВ}$.

Проанализированы результаты эксперимента с целью определения точности метода. Надежно измеряется угловой разброс, величина которого составляет $2 \div 3 \text{ мрад}$.

В четвертой главе описан метод измерения поперечной скорости (энергии) и разброса продольной энергии электронов, основанный на анализе их продольной энергии в тормозящем электрическом поле. Особенность использования метода в данной работе состояла в том, что измерения проводились в интенсивном пучке с первансом $1 \div 5 \text{ } \mu\text{A/V}^{3/2}$, в котором существенно влияние пространственного заряда. Приводится схема анализатора энергии, обсуждаются разрешающая способность метода и влияние различных факторов, приводящих к снижению точности измерения. Исследованы возможности использования анализатора для измерения поперечной энергии и разброса продольной энергии в интенсивных высокоэнергичных пучках. Приведены сравнительные характеристики энергетического и оптического методов измерения поперечной энергии электронов.

В пятой главе приводятся описания экспериментального стенда "Рекуператор" и системы электронного охлаждения LEAR, на которых проводились основные эксперименты по измерению рабочих параметров новой пушки. Исследованы условия возникновения разряда Пеннинга при тестировании пушки на стенде "Рекуператор" и обсуждается метод так называемой высоковольтной тренировки, устраняющий его влияние. Обсуждается проблема получения полного перванса пушки при работе с положительным относительно земли управляющим электродом и способ, позволяющий устранить накопление в пушке вторичных электронов, приводящих к снижению перванса пушки. Приводятся основные параметры антипротонного накопителя LEAR и методы диагностики охлажденного пучка с использованием системы электронного охлаждения. Изложены экспериментальные результаты по эффективному охлаждению протонов и нонов свинца, подтверждающие высокое качество охлаждающего пучка электронов.

В Заключении приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Методом численного моделирования найдена оптимальная геометрия электронной пушки с адиабатической оптикой.

2. Спроектирована трехэлектродная адиабатическая электронная пушка LEAR, позволяющая получать пучки электронов с изменяемым первеансом в диапазоне $0.125 \pm 5 \mu\text{A}/\text{B}^{3/2}$, с энергией 2.5 ± 30 кэВ, током до 3 А и с температурой электронов менее 0.3 эВ в относительно низком магнитном поле (до 600 Гс).

3. Создан экспериментальный стенд "Рекуператор", на котором проведены измерения рабочих параметров разработанной пушки. Достигнуты расчетные значения параметров пушки.

4. Экспериментально исследован метод высоковольтной тренировки пучка Пеннинга при тестировании пушки LEAR.

5. Создана установка "Анализатор" для проведения экспериментов по измерению электронно-оптических характеристик электронной пушки LEAR.

Развит оптический метод измерения поперечной скорости частиц в интенсивном электронном пучке с разрешающей способностью по угловому разбросу электронов 2 мрад. Экспериментально измерены поперечные скорости и, соответственно, поперечная температура пучка, сформированного пушкой LEAR. В режимах с первеансом $1 \pm 5 \mu\text{A}/\text{B}^{3/2}$ она составляет 0.1 ± 0.3 эВ в магнитном поле 600 Гс.

6. Модернизирован метод измерения поперечной энергии и разброса продольной энергии электронов, основанный на анализе энергии быстрых электронов в тонких пучках, вырезанных из основного диафрагмой с отверстиями 0.03 ± 0.2 мм.

Проведены измерения температуры электронов в интенсивном электронном пучке с энергией 1 ± 10 кэВ и током до 3 А. Установлено, что температура составляет 0.3 ± 1 эВ для пучков с первеансом $1 \pm 5 \mu\text{A}/\text{B}^{3/2}$ в магнитном поле 350 ± 450 Гс.

7. Разработанная пушка введена в действие и используется как штатный элемент системы электронного охлаждения накопителя LEAR

(ЦЕРН). С помощью этой пушки получено эффективное охлаждение антипротонов и ионов свинца в рабочем диапазоне параметров накопителя.

Основные результаты диссертации излагались в следующих работах:

1. 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.
2. 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/PC 92-03 (AR), Geneva, Switzerland, 1992.
3. Агишев С.А., Быковский В.Ф., Завражнов М.А., Запуняко А.М., Лапик Р.М., Мешков И.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.
4. Agishev S.A., Bykovsky V.F., Meshkov I.N., Poljakov V.N., Seleznev I.A., Smirnov A.V., Syresin E.M. Electron cooling system of the K4-K10 complex // Heavy ion Physics Scientific report 1991-1992, JINR Dubna, 1992.
5. 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.
6. Lapik R., Meshkov I., Mozgunov V., Poljakov V., Seleznev I., Smirnov A., Syresin E., Zavrazhnov M. The Measurement of Transversal and Longitudinal Velocities of an Electron Beam // Workshop on Beam Cooling and Related Topics, 1993, Montreux, Switzerland, p164-168.
7. 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, p159-163.
8. 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.
 9. Мешков И.Н., Поляков В.Н., Смирнов А.В., Степашкин О.Г., Сыресин Е.М. Развитие техники электронного охлаждения, // Труды 14-ого совещания по ускорителям: - Протвино, 1994. - т.1.- с.5.
 10. 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.
 11. Bosser J., Lapik R., Ley R., Meshkov I., Poljakov V., Seleznev I., Smirnov A., Syresin E., 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.
 12. 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.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 декабря 1995 года.