

На правах рукописи

СТАРОСТЕНКО Александр Анатольевич

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО
ПУЧКА НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ
КАК СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ
ДИАГНОСТИКИ ИНТЕНСИВНЫХ ПУЧКОВ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

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 – 2006

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

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Логачев Павел Владимирович – кандидат физико-математических наук,
Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН,
г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Мезенцев Николай Александрович – доктор физико-математических наук,
Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН,
г. Новосибирск.

Терехов Александр Сергеевич – доктор физико-математических наук,
профессор, Институт физики
полупроводников СО РАН,
г. Новосибирск.

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

Защита диссертации состоится « _____ » _____ 2006 г.
в « _____ » часов на заседании диссертационного совета Д.003.016.01
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: « _____ » _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

А.А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Современное развитие ускорителей заряженных частиц идёт в направлении увеличения интенсивности пучков, что в свою очередь требует разработки новых методов диагностики. Эти методы, во-первых, должны быть неразрушающими, т. е. не ухудшающими качество исследуемого пучка, во-вторых, они должны работать при огромных плотностях мощности в изучаемом пучке (до 10^{15} Вт/см²). Такую плотность мощности не может выдержать ни одно известное твёрдое тело. Неразрушающие методы могут быть основаны на взаимодействии интенсивного пучка с веществом или излучением достаточно низкой плотности, чтобы не возмущать существенно исследуемый объект. Агентом взаимодействия может быть поток нейтральных атомов, а также электронный пучок. Для тех же целей может использоваться и луч мощного лазера.

Данная работа посвящена новому методу определения пространственного распределения заряда сгустков, в котором инструментом исследования интенсивных сгустков заряженных частиц является электронный пучок низкой энергии. Применение электронного пучка в качестве пробника позволяет проводить измерения в однопролётном режиме. Здесь можно выделить два предельных случая: когда поперечные размеры пробного пучка в области взаимодействия значительно меньше размеров исследуемого сгустка, и когда поперечные размеры пробного пучка значительно превосходят поперечные размеры изучаемого сгустка. В первом случае возможности метода могут быть реализованы в полной мере, во втором случае возможно измерение поперечного положения сгустка и наклона сгустка в плоскости, проходящей через траекторию его движения. Полная реализация возможностей метода подразумевает измерение продольного распределения заряда в сгустке, если его продольный размер превышает максимальный поперечный, так же возможно измерение поперечного размера и поперечного профиля исследуемого сгустка в любом, заранее заданном сечении.

Цель проведения работы

Основной целью проведенной работы являлось исследование возможности применения электронного пучка для неразрушающей диагностики интенсивных пучков заряженных частиц. Исследование включает в себя:

1. Теоретический анализ возможностей метода.
2. Экспериментальное изучение практической применимости метода на ускорительно-накопительных комплексах ИЯФ СО РАН.

Положения, выносимые на защиту

1. В экспериментах отработана технология применения прецизионного электронного пучка низкой энергии для неразрушающей диагностики интенсивных релятивистских сгустков, в частности:
 - предложена и успешно испытана электронно-оптическая схема импульсного источника электронов с малым фазовым объемом пучка в широком диапазоне рабочих напряжений;
 - предложен и успешно испытан импульсный режим работы детектора на основе микроканальной пластины с большим коэффициентом усиления;
 - разработан и успешно испытан способ калибровки детектирующей системы, необходимой для проведения измерений.
2. Создано и успешно испытано в экспериментах необходимое для работы пучкового датчика программное обеспечение, а именно:
 - управляющее программное обеспечение, реализующее все необходимые режимы работы прибора;
 - программное обеспечение, моделирующее динамику тестирующего пучка с учетом всевозможных особенностей исследуемого сгустка.
3. Разработаны, изготовлены и успешно испытаны опытные образцы прибора, рассчитанные на различные приложения, в частности:
 - пучковый датчик, рассчитанный на работу в циклическом накопителе электронов ВЭПП-3 (ИЯФ СО РАН);
 - пучковый датчик, оптимизированный для работы в составе линейного ускорителя электронов инжекционного комплекса ВЭПП-5 (ИЯФ СО РАН);
 - пучковый датчик, приспособленный к работе в циклическом коллайдере ВЭПП-4 (ИЯФ СО РАН).

Научная новизна работы

- Впервые электронный пучок низкой энергии был успешно применен для неразрушающей диагностики интенсивных пучков высокой энергии.
- Впервые была экспериментально продемонстрирована возможность наблюдения с помощью пучкового датчика полей излучения коротких интенсивных сгустков.
- Впервые пучковый датчик был успешно применен для измерения длин коротких интенсивных сгустков.
- Впервые разработана и реализована в эксперименте технология применения пучкового датчика в системе диагностики пучка циклического коллайдера.

Практическая значимость работы

Новые возможности данного метода диагностики, оказались особо востребованы в проектируемых сегодня установках с интенсивными релятивистскими пучками: Международном линейном коллайдере и супер В-фабрике. В текущем году прототип пучкового датчика для Международного линейного коллайдера будет поставлен в КЕК (Япония), где планируется проведение экспериментов с короткими интенсивными сгустками.

В конце 2007 года планируется установка двух пучковых датчиков для измерения горизонтального и вертикального профилей поперечного сечения протонного пучка в накопительном кольце SNS (Окридж, США).

Так же этот метод оказывается незаменимым в диагностике интенсивных ионных пучков большой мощности, которые планируется применять в будущем для дожигания радиоактивных отходов.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены на 7-й Европейской Конференции по Ускорителям Заряженных Частиц (EPAC-2000, Вена, Австрия), на 18-й Международной Конференции по Ускорителям Высокой Энергии (HEACC'01, Цукуба, Япония), на Конференции по Ускорителям Заряженных Частиц (PAC'99, Нью-Йорк, США), на XIX Всероссийской Конференции по Ускорителям Заряженных Частиц (RUPAC-2004, Дубна).

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений и списка литературы. Объем диссертации составляет 93 страницы и включает: 60 рисунков, 2 таблицы и список литературы из 18 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложено существо и современное состояние исследуемых вопросов, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели работы.

Первая глава содержит описание альтернативных неразрушающих методов диагностики. Параграф 1.1 посвящен описанию лазерного комптоновского измерителя поперечного размера пучка. Для измерения малого поперечного размера интенсивного релятивистского сгустка в данном методе используется интерференционная картина, образующаяся при пересечении двух лазерных лучей. Сканирование электронным пучком поперек полос интерференционной картины приводит к модуляции интенсивности потока жестких комптоновских квантов, рожденных энергичными электронами в электромагнитном поле лазерного излучения.

Глубина модуляции интенсивности потока комптоновских гамма-квантов несёт информацию о поперечном размере электронного пучка. Далее, за общим описанием метода, следуют основные результаты его применения в эксперименте.

Параграф 1.2 содержит описание метода и основные экспериментальные результаты по монитору геометрии интенсивного релятивистского пучка на основе ионизации остаточного газа. Данный метод основан на измерении времяпролетного спектра и азимутального распределения ионов, рожденных в интенсивном пучке. Эти ионы ускоряются электрическим полем интенсивного сгустка и детектируются при помощи микроканальных пластин и секционированного цилиндра Фарадея.

В параграфе 1.3 представлен неразрушающий сканирующий измеритель профиля интенсивных ионных пучков. Данная методика основана на использовании прецизионного электронного пучка низкой энергии для сканирования интенсивного ионного пучка. Этот метод был успешно реализован в Национальной лаборатории Беркли (США).

Вторая глава посвящена принципу действия и основным возможностям пучкового датчика – устройства, основанного на использовании электронного пучка низкой энергии для измерения некоторых параметров интенсивного сгустка заряженных частиц.

В параграфе 2.1 представлена методика измерения продольного распределения заряда в интенсивном релятивистском сгустке. Рассмотрены основные эффекты, определяющие точность такого измерения, и представлены экспериментальные результаты, полученные на пучковых датчиках в ИЯФ СО РАН.

Параграф 2.2 содержит описание возможных применений пучкового датчика для измерения параметров интенсивных сгустков с предельно малыми размерами. Данная задача актуальна в связи с проектами Международного линейного коллайдера и супер В-фабрики. Представлены результаты численного моделирования взаимодействия тестирующего пучка с очень малым, но интенсивным сгустком электронов.

Параграф 2.3 посвящен измерению геометрических параметров исследуемого сгустка. Представляемая методика может быть основана как на приближенных аналитических расчетах, так и на более точных результатах численного моделирования. Здесь представлены характерные зависимости, которые могут быть использованы в косвенных измерениях, а также приведены изображения, полученные в экспериментах на линейном ускорителе электронов инжекционного комплекса ВЭПП-5.

В параграфе 2.4 обсуждается экспериментальное наблюдение полей излучения, сделанное при помощи пучкового датчика. Кратко описана методика измерения частот наблюдаемых электромагнитных колебаний.

Параграф 2.5 посвящен томографии интенсивных протонных пучков высокой энергии, в приложении к накопительному кольцу SNS (Окридж, США). Здесь представлена методика измерения профиля поперечного сечения длинного протонного сгустка высокой интенсивности. Даны предложения по быстрому измерению поперечных размеров сгустка в определенном сечении по его длине. Рассмотрена возможность измерения продольного распределения заряда длинного протонного сгустка. Представлены результаты численного моделирования работы пучкового датчика во всех указанных режимах.

Третья глава содержит описание экспериментальной установки – пучкового датчика, работающего в составе линейного ускорителя электронов инжекционного комплекса ВЭПП-5 в ИЯФ СО РАН.

Параграф 3.1 посвящен устройству основных систем пучкового датчика, к которым относятся: источник электронов, система фокусировки и коррекции положения пробного электронного пучка, система импульсного высоковольтного питания, система горизонтальной развётки пучка, детектирующая система, система управления и синхронизации.

В параграфе 3.2 описывается процедура калибровки детектирующей системы, необходимая для проведения количественных измерений. Здесь же приводятся характеристики важнейших элементов детектора.

Четвертая глава включает в себя описание особенностей конструкции пучкового датчика для ряда конкретных приложений.

Параграф 4.1 посвящен особенностям прибора для диагностики пучков линейных ускорителей S-диапазона.

В параграфе 4.2 уделено внимание нюансам, связанным с регистрацией полей излучения коротких интенсивных сгустков.

Параграф 4.3 содержит рекомендации, которые важны при очень высокой интенсивности исследуемых пучков.

Параграф 4.4 представляет особые требования к устройству, работающему в составе циклического ускорителя, накопителя или коллайдера.

В **заключении** приводятся основные результаты проделанной работы, отмечается ее научная новизна и практическая значимость.

В **приложении А** приводится описание программы, симулирующей работу пучкового датчика, а также подробно изложен алгоритм моделирования движения электронов в электромагнитном поле.

В **приложении Б** дан краткий обзор комплекса программ, осуществляющих управление всеми системами пучкового датчика в ручном и автоматических режимах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Предложен и исследован ряд конкретных применений данного метода в диагностике интенсивных релятивистских сгустков, а именно:

- Измерение продольного распределения заряда в интенсивном релятивистском сгустке,
- Наблюдение полей излучения коротких интенсивных сгустков,
- Измерение поперечной координаты центра масс интенсивного сгустка, имеющего очень малые поперечные размеры,
- Измерение угла наклона оси такого сгустка к направлению его движения,
- Измерение поперечного профиля интенсивного протонного пучка.

Проведено экспериментальное изучение практической применимости метода на ускорительно-накопительных комплексах ИЯФ СО РАН, а именно:

- Создан и успешно испытан пучковый датчик, рассчитанный на работу в циклическом накопителе электронов ВЭПП-3 (ИЯФ СО РАН);
- Создан и успешно работает пучковый датчик, оптимизированный для работы в составе линейного ускорителя электронов инжекционного комплекса ВЭПП-5 (ИЯФ СО РАН);
- Создан и испытывается пучковый датчик, приспособленный к работе в циклическом коллайдере ВЭПП-4 (ИЯФ СО РАН).

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- [1] Non-destructive diagnostic tool for monitoring of longitudinal charge distribution in a single ultra-relativistic electron bunch, P.V. Logatchov, A.A. Starostenko, et al. - Proc. 1999 PAC, New York, 29 March -2 April 1999.
- [2] Non-destructive single pass monitor of longitudinal charge distribution, P.V. Logatchov, A.A. Starostenko. - Published in ICFA Beam Dyn.Newslett., 20: 105-109, 1999.
- [3] Non-destructive single-pass bunch length monitor: experiments at VEPP-5 pre-injector electron linac, A.A. Starostenko, et al. - Proc. EPAC-2000, Viena, 30 June – 4 July 2000.
- [4] Non-destructive single-pass monitor of longitudinal charge distribution, P.V. Logatchov, A.A. Starostenko, et al. - HEACC-2001, Tsukuba, Japan, March 2001.
- [5] Electron beam probe as a nondestructive single bunch diagnostic tool for circular colliders, P.V. Logatchov, P.A. Bak, A.A. Starostenko, N.S. Dikansky, Ye.A. Gusev, A.R. Frolov, D.A.Malutin. - BINP, Novosibirsk, Russia, 630090. - Proceedings of RuPAC XIX, Dubna, 2004.
- [6] Состояние работ на инжекционном комплексе ВЭПП-5, Авилов М.С., ..., Старостенко А.А. и др. - Атомная энергия, т.94, вып.1, январь 2003.
- [7] Feasibility study of using an electron beam for profile measurements in the SNS accumulator ring, A. Aleksandrov, S. Assadi, S. Cousineau, V. Danilov, S. Henderson, M. Plum (USA, Spallation Neutron Source, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831), P. Logatchov, A. Starostenko (Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia). - Proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, Tennessee, 2005.

Старостенко Александр Анатольевич

**Применение электронного пучка низкой энергии
как средства неразрушающей диагностики
интенсивных пучков заряженных частиц**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
физико-математических наук

Сдано в набор 21.11.2006 г.

Подписано к печати 22.11.2006 г.

Формат 60×90 1/16 Объем 0.5 печ.л., 0.4 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 56

Обработано на IBM PC и отпечатано
на ротапинтере ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11.