

Ш-189

9-91-130

ШАЛЯПИН
Валерий Николаевич

УДК 621.384.6

ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭЛЕКТРОННЫХ И ИОННЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ПУЧКОВ

Специальность: 01.04.20 - физика пучков
заряженных частиц и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории сверхвысоких энергий
Объединенного института ядерных исследований

Научные руководители:

доктор физико-математических наук,
профессор

В.П.Саранцев

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
кандидат физико-математических наук

Н.М.Гаврилов

В.А.Веретенников

Ведущая организация: Институт ядерной физики СО АН СССР
Новосибирск

Защита состоится "___" _____ 1991 г. в ___ часов
на заседании Специализированного совета Д - 047.01.03 при
Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных
исследований, Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан "___" _____ 1991 г.

Ученый секретарь Специализированного совета
доктор физико-математических наук



Ю.А.Батусов

Актуальность проблемы. Исследование динамических характеристик пучков заряженных частиц в современных ускорителях является важным в связи с необходимостью решения проблем повышения их интенсивности и устойчивости. При этом необходимо максимально стремиться к использованию методов неразрушающего контроля параметров пучков, т.к. именно такие методы дают возможность проследить динамику формирования пучков и развития различных процессов, в том числе неустойчивостей и найти способы подавления последних. В частности, неразрушающие методы позволяют контролировать влияние возмущений, вносимых в динамические процессы основного пучка фоновыми частицами, какими являются, например, ионы для электронных пучков. Точное измерение параметров пучков необходимо также при использовании их в прикладных целях. Поэтому проблема измерения динамических характеристик электронных и ионных кольцевых пучков, ряд аспектов которой рассмотрен в диссертационной работе, является актуальной.

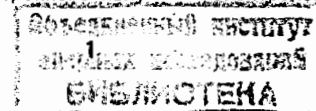
В коллективном ускорителе тяжелых ионов (КУТИ-20) генерируются мощные электронные кольцевые пучки, в которых происходит накопление ионов. Для этого ускорителя задача измерения параметров пучков особенно важна в связи с большой интенсивностью и сложностью динамических процессов в пучках. При этом такие параметры, как число частиц и размеры пучков требуют особого внимания, так как именно они определяют возможность использования электронно-ионного кольца для различных приложений, в том числе в качестве источника ионов и как мощного генератора синхротронного излучения (СИ) в инфракрасной (ИК) области спектра для исследований в области физики твердого тела и, в частности, высокотемпературных сверхпроводников. Ряд таких вопросов рассмотрен в диссертации.

Диссертация является обобщением работ, выполненных в соответствии с проблемно-тематическим планом ЛСВЭ ОИЯИ.

Цель работы:

1. Создание методов измерения и контроля параметров электронных и ионных кольцевых пучков без их разрушения.
2. Измерение и исследование динамических характеристик кольцевых пучков.
3. Исследование свойств синхротронного излучения электронного кольца в длинноволновом ИК-диапазоне.

Научная новизна. Предложены оптические методики, позволяющие измерять параметры электронных и ионных кольцевых пучков без их разрушения. Предложен метод измерения размеров электронного кольцевого пучка по свечению остаточного газа. Прямыми измерениями доказано, что когерентные колебания электронной компоненты электронно-ионных колец ускорителя КУТИ-20 являются радиальными. Предложены методы измерения параметров ионов в электронно-ионных кольцах по излучению ионов в области вакуумного ультрафиолета, по рассеянному синхротронному излучению, по параметрам покидающих кольцо электронов, по одновременному измерению интенсивности характеристического излучения ионов и геометрии синхротронного излучения электронов. Экспериментально пока-



зано, что мощность синхротронного излучения электронного кольца ускорителя КУТИ-20 в длинноволновом инфракрасном диапазоне существенно превышает мощность известных источников излучения.

Практическая ценность

1. Реализованные многоканальные системы измерений параметров электронных и ионных кольцевых пучков позволили оптимизировать режимы работы ускорителя КУТИ-20.

2. Реализация устройства, состоящего из электронно-оптического преобразователя и диссектора, позволила оперативно контролировать размер электронного кольца ускорителя КУТИ-20 на ранних этапах его формирования. Использование этого устройства на синхротроне ОИЯИ доказало принципиальную возможность измерения в каждом макроимпульсе длительностью 40 мкс энергии протонного пучка по излучению Вавилова-Черенкова при средних параметрах пучка протонов: интенсивность $\approx 10^7$ протонов·с⁻¹, энергия ≈ 640 МэВ.

3. Найден режимы работы ускорителя КУТИ-20, при которых удается существенно уменьшить потери ионов, возникающих вследствие электронно-ионной дипольной неустойчивости. Экспериментально доказано, что в электронно-ионных кольцах происходит накопление ионов до третьей зарядности из остаточного газа.

4. Измерена мощность синхротронного излучения электронного кольца ускорителя КУТИ-20 в длинноволновом ИК-диапазоне. Экспериментально показана возможность создания ИК-спектрометра на основе ускорителя КУТИ-20 с уникальными параметрами: мощность излучения в длинноволновом ИК-диапазоне не менее 10^{-4} Вт·мкм⁻¹, эффективность сбора мощности излучения не менее 1%.

5. На основе предложенных методов контроля параметров электронных и ионных кольцевых пучков разработаны и включены в состав измерительно-вычислительного комплекса ускорителя КУТИ-20 следующие устройства: телевизионная камера с оптическим затвором на основе ПЗС-матрицы (прибор с зарядовой связью), оптические каналы фокусировки и сбора мощности СИ, спектрометр для диапазона вакуумного ультрафиолетового излучения, ряд диссекторов.

Апробация работы. Результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на тринадцатой Международной конференции по ускорителям частиц высоких энергий (Новосибирск, 1987), десятом Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1987), Международном совещании по проблемам коллективного метода ускорения (Дубна, 1982) и на семинарах в ЛСВЭ, ЛВТА, ЛЯП ОИЯИ и ИАЭ им. И.В.Курчатова, г.Москва.

Публикации. Основные результаты диссертации отражены в 9 печатных работах и защищены 4 авторскими свидетельствами на изобретение.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем составляет 105 страниц, включая 73 рисунка. Список литературы насчитывает 56 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы задачи, являющиеся предметом работы, кратко изложено содержание всех глав, выделены научная новизна и практическая ценность.

В первой главе рассматриваются вопросы измерения параметров электронных кольцевых пучков по оптическому излучению в видимой области спектра. Схема экспериментальной установки показана на рис.1. Электронный пучок с током $I \approx 500$ А, энергией электронов $E_e \approx 2 \pm 3$ МэВ и длительностью $\tau \approx 100$ нс инжектируется в камеру адгезатора 1, сворачивается в кольцо радиусом $R_k \approx 35$ см в слабофокусирующем магнитном поле с показателем спада $n \approx 0.2 \pm 0.5^{**}$ ($n = -R/B_z \cdot \partial B_z / \partial r$, где B_z - аксиальная компонента напряженности магнитного поля). Затем электронное кольцо сжимается в нарастающем во времени магнитном поле до радиуса $R_k = 8 \pm 4$ см, при этом энергия электронов возрастает до $E_e \approx 20$ МэВ. Параллельно идет процесс загрузки электронного кольца ионами за счет последовательной ионизации атомов электронным ударом. Накопление ионов происходит либо из остаточного газа при давлении $P \approx 10^{-7} \pm 10^{-8}$ Тор, либо из специального лазерного источника атомов^{**}. Типичные n - и R -траектории (зависимости $n(\tau)$ и $R(\tau)$) при сжатии электронного кольца показаны на рис.2.

Многоканальная система измерений параметров электронного кольца, схема которой представлена на рис.1, состояла из каналов регистрации свечения остаточного газа^{1,2/}, возбуждаемого электронным пучком и каналов регистрации СИ электронов^{3,6/}. Эта система позволяла контролировать ток пучка I_k (число частиц N_e), размеры поперечного сечения электронного кольца $a_{r,z}$ (полуразмер на полувысоте распределения плотности пучка), радиус кольца при $R_k \approx 4 \pm 5$ см и динамические характеристики этих параметров при сжатии кольца и его ускорении. Оптическое излучение (свечение остаточного газа, синхротронное излучение электронов) выводилось через окно 11 (рис.1) и фокусировалось оптической системой 13 на детекторы 14. Сигнал с приемников поступал либо в аналоговой форме на осциллограф для оперативного контроля параметров пучка, либо оцифровывался аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и обрабатывался ЭВМ. В качестве приемников излучения использовались позиционно-чувствительные детекторы, параметры которых приведены в таблице I.

Кроме этого, использовались стандартные фотоэлектронные умножители типа ФЭУ-87, ФЭУ-100, ФЭУ-30. Прибор, состоящий из электронно-оптического преобразователя (ЭОП), состыкованного с помощью волоконно оптического контакта с диссектором, был специально разработан для регистрации размеров электронного кольца по свечению остаточного газа.

^{*}) В.С.Александров, П.Ф.Белошицкий, Л.Н.Беляев и др. Ускорительный комплекс тяжелых ионов ОИЯИ. Сообщение ОИЯИ, Р9-83-613, Дубна, 1983.

^{**}) Ю.А.Быковский, В.Е.Миронов, В.П.Саранцев и др. О создании лазерного источника нейтральных атомов для коллективного ускорителя. Препринт ОИЯИ, Р9-83-501, Дубна, 1983.

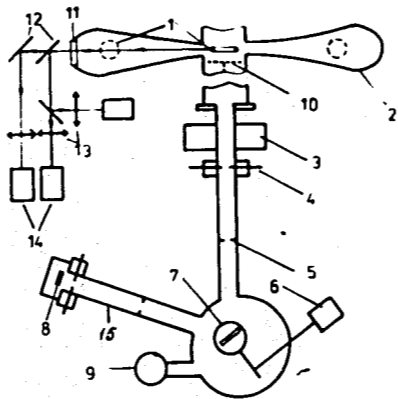


Рис.1. Схема экспериментальной установки. 1 - электронное кольцо, 2 - камера адгезатора, 3 - азотная ловушка, 4 - щель монохроматора, 5 - диафрагма, 6 - механизм поворота дифракционной решетки, 7 - дифракционная решетка, 8 - детектор МКП, 9 - цеолитовый насос, 10 - коллектор, 11 - окно, 12 - зеркала, 13 - система фокусирующей оптики, 14 - детекторы, 15 - корпус спектрометра.

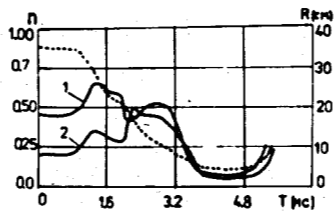


Рис.2. n -траектории (сплошная линия) и R -траектории режимов сжатия электронно-ионных колец.

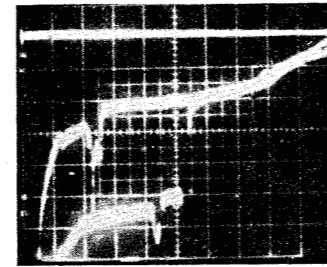
Таблица I

Тип прибора	Размер фотокатода, мм	Динамический диапазон	Пороговая освещенность	Пространственное разрешение, линий·мм ⁻¹	Временное разрешение, нс
Диссекторы: ЛИ-605-3 ЛИ-613 ЛИ-614	25 40 80	10^4	10^{-9} Вт·см ⁻²	10 50 10	50
ЭОП с диссектором ЛИ-605-3	25	10^2	10^{-12} Вт·см ⁻²	5	1
Фотхронограф "Агат-СФ" с диссектором ЛИ-605-3	7	10^2	10^{-14} Дж·см ⁻²	7	0.01
Матрица ПЗС (ЦМ-1) с затвором ЦТСЛ	4x5	10^3	$5 \cdot 10^{-9}$ Дж·см ⁻²	30	500

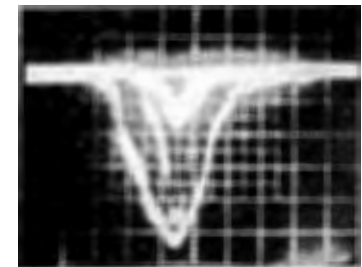
Совокупность методов регистрации позволяла измерять геометрические параметры пучка в диапазоне мощности излучения в видимой области спектра от 10^{-4} Вт (остаточный газ) до 100 Вт (СИ).

Измерение абсолютного количества электронов по СИ проводилось по методике работы*), относительное количество электронов контролировалось по сигналу тормозного излучения при разрушении кольца (сигнал U_{γ}).

На рис.3,4 представлены характерные сигналы, иллюстрирующие работу системы.



а)



б)

Рис.3. Осциллограммы сигналов с детекторов, регистрирующих свечение остаточного газа.

а) детектор - ФЭУ-100, развертка 0.2 мс/дел.

б) детектор - ЭОП-диссектор, сканировка аксиального размера электронного кольца пространственный масштаб - 4,8 мм/мкс, развертка - 10 мкс/дел.

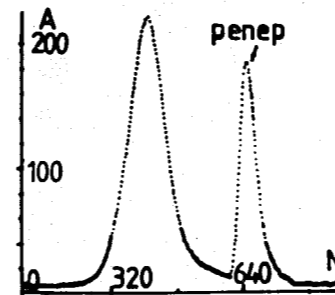


Рис.4. Сигнал с диссектора в цифровом виде, сканировка размера электронного кольца по СИ, А - амплитуда канала, N - номер канала АЦП, 3,6 мм/100 каналов, время сканировки - 10 мкс.

С помощью оперативного контроля размеров пучка проводилась настройка режимов работы ускорителя КУТИ-20 (подбор энергии инжекции, n -траектории и т.д.). Это позволило уменьшить, в частности, аксиальный размер сечения электронного кольца на радиусе $R = 4$ см с

$$a_x = 8 \text{ мм до } a_z = 2 \pm 3 \text{ мм (рис.4)}.$$

*) Г.В.Долбиллов, В.П.Саранцев, А.П.Сумбаев и др. Определение абсолютного количества электронов в кольце на прототипе КУТИ, ЖТФ, т.55, в.7, 1985, с.1211.

При этом удалось добиться стабилизации величины размера a_z с увеличением количества электронов в кольце до $5 \cdot 10^{12}$ (рис.5).

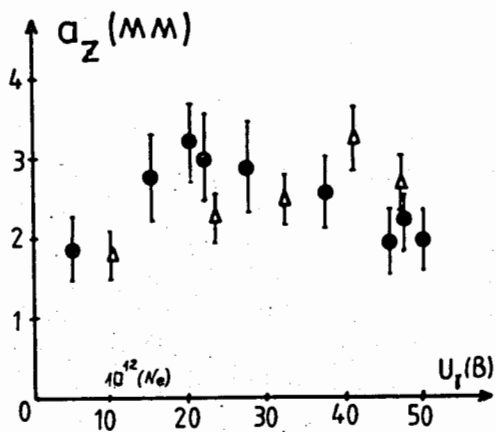


Рис.5. Зависимость аксиального размера a_z от числа электронов в кольце (сигнал U_x).

Δ — сканировка размера диссектором за 10 мкс.
● — сканировка фотохронографом за 2 нс.

Контроль размеров электронного кольца в режиме его ускорения вдоль аксиальной оси осуществлялся с помощью многозеркального устройства^{/4/}, позволявшего выводить СИ из плоскости кольца на систему регистрации. Испол-

зовалась также времяпролетная методика^{/5/}, которая позволяла регистрировать СИ электронного кольца при его движении в режиме ускорения. Было показано, что в отдельных режимах кольцо движется компактно со скоростью, соответствующей скорости загруженного ионами кольца.

В экспериментах по исследованию сжатия электронно-ионного кольца были обнаружены эффекты, которые можно описать в рамках взаимного влияния электронной и ионной компонент. По измерениям с помощью фотохронографа и диссектора по СИ были обнаружены интенсивные колебания электронной компоненты с частотой ≈ 20 МГц на радиусе кольца $R = 4$ см. При этом было доказано, что эти колебания являются радиальными. В этих экспериментах электронные кольца удерживались магнитным полем с малым показателем спада ($n \leq 0.2$). Согласно линейной теории, при накоплении ионов в таком поле кольца становятся неустойчивыми уже при малом числе ионов, причем амплитуда колебаний последних может превышать амплитуду колебаний электронов, не позволяя сформировать компактные двухкомпонентные кольца. Однако, если захват ионов происходит во время сжатия в магнитном поле с большим $n \approx 0.5$, то область параметров, в которых возможна неустойчивость и возбуждение колебаний, будет достигнута лишь после того, как будет накоплен значительный ионный заряд, создающий поле с сильной нелинейностью^{/6/}. Анализ СИ сжатого до радиуса $R_c = 4$ см электронного кольца показал^{/7/}, что по сравнению с режимом сжатия в магнитном поле с показателем спада $n \leq 0.2$ амплитуда когерентных радиальных колебаний электронной компоненты в режиме с $n \leq 0.5$ уменьшилась в 3 ± 5 раз и не превосходила $0,2 a_r$. При этом амплитуда когерентных колебаний ионов, согласно теоретическим оценкам^{/8/}, еще меньше.

*) Ю.И.Алексахин. О возможностях электронно-кольцевой техники. Депонированное сообщение ОИЯИ, Б1-9-87-573, Дубна, 1987.

В экспериментах также было обнаружено, что в ряде случаев аксиальное распределение плотности электронов существенно отличается от гауссовского с образованием локального максимума плотности ("керна") в центре распределения^{/3/} (рис.6).

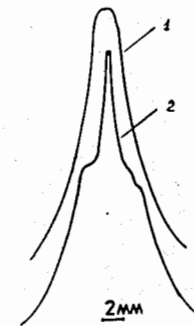


Рис.6. Распределение плотности электронов, измеренное фотохронографом. 1 — гладкое распределение, 2 — распределение с "керном"; время сканировки — 2 нс.

При этом kern существовал не менее 100 нс, а амплитуда пика составляла до 50% от амплитуды основного пучка. Существование такого керна столь длительное время ($\approx 10^3$ оборотов электрона по орбите) можно объяснить образованием локального максимума плотности ионов в центре электронного пучка и дальнейшим пинчеванием группы присоединенных электронов за счет появления дополнительной фокусирующей силы, что подтверждается расчетами^{/9/}.

Вторая глава содержит описание методов измерения параметров ионных кольцевых пучков и результаты экспериментального исследования их динамических характеристик. Исследование параметров ионной компоненты в электронно-ионных кольцах проводилось по излучению ионов в видимой, ультрафиолетовой и вакуумно-ультрафиолетовой (ВУФ) областях спектра. Возбуждение излучательных переходов ионов происходит за счет резонансного поглощения СИ электронов (видимая область)^{/8/}, либо за счет электронно-ионных и ион-ионных столкновений^{*} (ультрафиолет, ВУФ). В экспериментах исследовался спектральный состав излучения. Аппаратура для измерений в области длин волн излучения $\lambda = 6500 \pm 2000 \text{ \AA}$ состояла из стандартного монохроматора МДР-2 с кварцевой и зеркальной фокусирующей оптики и детектора ФЭУ-100. Для измерений в ВУФ-области ($\lambda = 2000 \pm 300 \text{ \AA}$) использовался специально разработанный спектрометр^{/9/}, построенный по схеме Сейя-Намиока. В спектрометре применялась безмасляная откачка объема, позволившая получить давление остаточного газа на уровне $P \approx 10^{-8}$ Тор без прогрева узла, включающего дифракционную решетку. Последняя являлась диспергирующим и фокусирующим элементом с радиусом кривизны поверхности $R = 500$ мм и с покрытием поверхности составом из алюминия и вольфрама или алюминия и фтористого магния. Детектором излучения являлся датчик из двух микроканальных пластин (МКП) в шевронной сборке. Схема экспериментов показана на рис.1. Монохроматор МДР-2 устанавливался на место вакуумного монохроматора.

В видимой и ультрафиолетовой областях было выделено излучение нейтральных атомов и однозарядных ионов. В области ВУФ-излучения были выделены спектральные интервалы

*) Э.А.Перельштейн, В.Ф.Шевцов, Г.Д.Ширков, Б.Г.Щинов. Моделирование процесса накопления ионов в электронных пучках. Препринт ОИЯИ, Р9-82-532, Дубна, 1982.

шириной 100 \AA в районе длин волн 500 \AA , 860 \AA , 1750 \AA , в которых излучают ионы остаточного газа (азот, углерод, аргон) от первой до третьей зарядности. При этом зависимость мощности излучения однозарядных ионов от числа электронов в кольце близка к параболической, что иллюстрируется рис.7. Этот факт свидетельствует о накоплении одно-, двухзарядных ионов в электронном кольце. В то же время, в более жесткой области длин волн $\lambda \approx 400 \pm 600 \text{ \AA}$, соответствующей излучению трехзарядных ионов, наблюдалось резкое уменьшение сигнала с детектора с увеличением числа электронов ($U_g > 40 \text{ В}$, рис.8). При этом колебаний электронной компоненты на радиусе $R_k \approx 4 \text{ см}$ не наблюдалось и размеры сечения были на уровне $q_{r, \lambda} \approx 2 \pm 3 \text{ мм}$.

Объяснение этому эффекту было найдено при исследовании интегрального излучения в ВУФ-области. В этих экспериментах с целью увеличения амплитуды сигнала МКП-детектор устанавливался без монохроматора в непосредственной близости от электрон-ионного кольца. Сигналы с детектора приведены на рис.9.

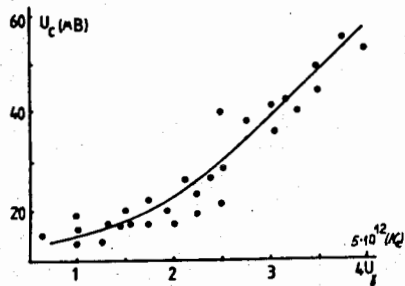


Рис.7. Зависимость амплитуды сигнала с МКП-детектора (U_c) от числа электронов (сигнал U_g , 17 В/дел) на длине волны ВУФ-излучения $\lambda = 1750 \text{ \AA}$.

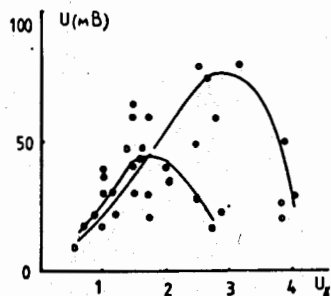


Рис.8. Зависимость амплитуды сигнала с МКП-детектора от числа электронов в кольце на длине волны $\lambda = 500 \text{ \AA}$.

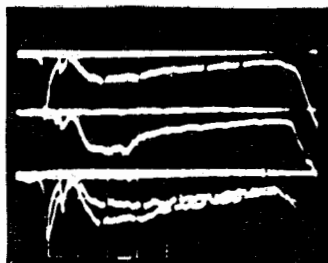
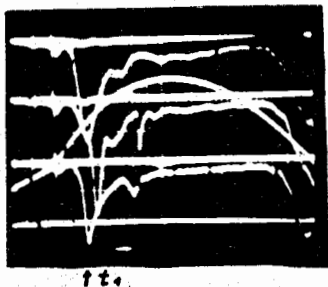


Рис.9. Сигнал с МКП-детектора без монохроматора.

а) $P = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Тор}$, $U_g = 50 \text{ В}; 40 \text{ В}; 50 \text{ В}$ (сверху вниз)
 б) $P = 3 \cdot 10^{-7} \text{ Тор}$, $U_g = 35 \text{ В}; 42 \text{ В}; 25 \text{ В}; 35 \text{ В};$

Сигнал в виде полусинусоиды - ток в катушках системы сжатия.

Анализ осциллограмм рис.9 показывает, что в момент времени t_i (появление кольца в зоне видимости датчика при радиусе электронного кольца $R_k = 6 \text{ см}$) идет мощный сигнал длительностью $\approx 200 \text{ мкс}$. Интенсивность этого сигнала растет очень быстро в зависимости от числа электронов (рис.10, кривая 2).

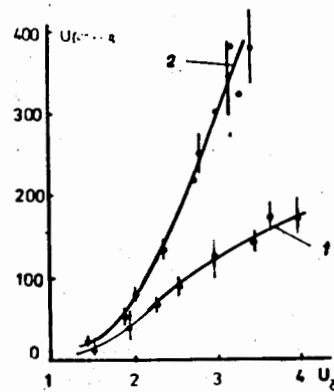


Рис.10. Зависимость интеграла по времени первого пика ВУФ-излучения от числа электронов в кольце в двух режимах сжатия.

В мягком свете (фильтр MgF_2 с пропусканием при $\lambda > 1400 \text{ \AA}$) этот сигнал отсутствует. Дополнительные измерения с помощью коллектора частиц и измерений ВЧ-активности кольца показали, что в этот момент времени происходит мощная вспышка ВЧ-активности кольца с частотой $20 \pm 50 \text{ МГц}$ и регистрируются потери ионов, что и обуславливает пик ВУФ-излучения за счет рекомбинации ионов на стенках камеры адгезатора, а не за счет их накопления в кольце.

Время появления пика излучения соответствует изменению показателя спада магнитного поля n в диапазоне $0.1 < n < 0.18$ (рис.2). К этому моменту в электронном кольце может накапливаться значительное количество ионов^{*}, так что поправка собственной частоты колебаний электронов в поле ионов Q_{ei} (в единицах частоты обращения электронов) может также достигать величины $Q_{ei} = 0.1 \pm 0.18$. Эти факты позволяют предположить, что в электронно-ионном кольце на радиусе $R_k \approx 6 \text{ см}$ развивается радиальная дипольная неустойчивость, условие возбуждения которой определяется уравнением:

$$Q_{ie} + \sqrt{1 - n + Q_{ei}^2} = 1$$

где: $Q_{ie}^2 = Q_{ei}^2 / \xi$ - частота колебаний ионов в поле электронов, ξ - фактор загрузки, определяющий отношение суммарной массы ионов и электронов в кольце.

С ростом числа электронов и, соответственно, числа ионов в кольце и величины время развития неустойчивости должно сдвигаться в сторону увеличения показателя спада вдоль n -траектории, что соответствует экспериментальному факту более раннего появления первого пика ВУФ-излучения. Дополнительным аргументом является факт значительного уменьшения первого пика с увеличением давления остаточного газа в камере адгезатора (рис.9б).

В экспериментах обнаружено, что развитие неустойчивости может быть существенно уменьшено подбором n -траектории (режим 1 рис.2). В этом режиме существенно уменьшаются потери ионов (кривая 1 рис.10), возрастает интенсивность излучения после пика

^{*}) См. ссылку на стр. 7

потерь и в жесткой области ВУФ-спектра. При этом параметры электронной компоненты на радиусе $R_k = 4$ см не ухудшаются.

Серия экспериментов по измерению ВУФ-излучения стыкуется с измерениями колебаний электронной компоненты по СИ и еще раз подтверждает вывод о сильном влиянии способа загрузки кольца ионами на динамику развития электронно-ионной дипольной неустойчивости и практически однозначно свидетельствует о необходимости учета нелинейности сил.

С целью проверки возможности использования разработанных методов измерения на других ускорителях, был поставлен эксперимент^{/10/} по регистрации излучения Вавилова-Черенкова (ИВЧ), генерируемого протонным пучком синхротрона ОИЯИ с параметрами: энергия протонов $E_n \approx 640$ МэВ, интенсивность $\approx 10^7$ протонов·с⁻¹, длительность макроимпульса $\tau \approx 40$ мкс. Для регистрации ИВЧ использовалось устройство ЗОП-диссектор (см. табл. I), установленное в прибор для измерения средней энергии пучка протонов по ИВЧ^{*}) (рис. 11). На рис. 12 приведена типичная осциллограмма импульса с диссектора, полученная в одном макроимпульсе пучка протонов. Амплитудно-временные характеристики импульса позволяют осуществить обработку с целью определения энергии протонного пучка в одном макроимпульсе.

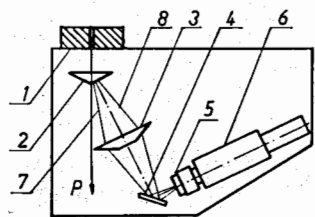


Рис. 11. Схема регистрации излучения Вавилова-Черенкова: 1 - коллиматор; 2 - призма-радиатор; 3 - призма-компенсатор; 4 - зеркало; 5 - объектив "Гелиос-40"; 6 - ЗОП-диссектор; 7 - дважды отраженный луч; 8 - прямой луч.

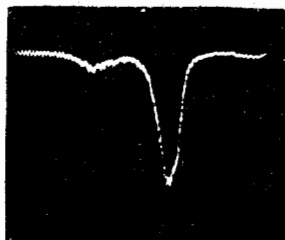


Рис. 12. Осциллограмма сигнала с прибора ЗОП-диссектор. Развертка - 2 мкс/дел, чувствительность - 20 мВ/дел.

^{*}) В.П.Зрелов, Е.С.Кузьмин, В.П.Лупильцев, Я.Ружичка. Испытание комбинированного черенковского метода измерения средней энергии протонов. Препринт ОИЯИ, 13-87-835, Дубна, 1987.

В третьей главе приводится описание перспективных методов измерения параметров многозарядных ионов в электронно-ионных кольцах и результаты экспериментальных исследований свойств СИ электронного кольца в дальней ИК-области спектра. Эти вопросы объединены стремлением расширить спектр возможных приложений интенсивных электронно-ионных колец. В частности, при увеличении плотности колец открываются перспективы получения многозарядных ионов, к физике которых проявляется очень большой интерес. При этом уже достигнутая интенсивность позволяет осуществить ряд экспериментов с использованием СИ в физике твердого тела.

Сущность предложенных способов измерения параметров ионов^{/11,12/} сводится к одновременному измерению таких параметров, как мощность характеристического излучения ионов и ширины углового распределения СИ электронов, либо измерения характеристик электронов, покидающих электронное кольцо в результате процесса многократного упругого рассеяния на ионах. При этом показано, что данные способы измерений среднего заряда ионов и их количества особенно эффективны в случае накопления многозарядных ионов тяжелых элементов.

Измерение свойств СИ электронного кольца в ИК-области спектра проводилось по схеме рис. 1^{/13/}. Были разработаны оптические каналы сбора мощности СИ, которые устанавливались либо вместо диагностических каналов, либо вдоль оси ускорителя внутрь ускорительной трубки. В последнем случае излучение собиралось многозеркальной оптической системой, входная часть которой показана на рис. 13.

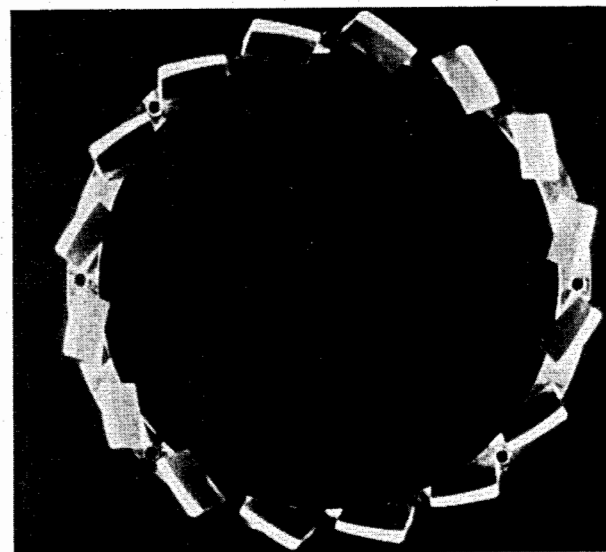


Рис. 13. Фотография входной части оптического канала.

Далее СИ фокусировалось на вход зеркального волновода длиной 2 м с входным конусным зеркалом и выводилось на детектор излучения. В качестве приемников ИК-излучения использовались фотосопротивление $Ge: Au$ при температуре жидкого азота $T = 77^\circ K$

на ближний ИК-диапазон (интервал длин волн $(1 \text{ мкм} < \lambda < 10 \text{ мкм})$ и детектор In Sb при температуре жидкого гелия $T \approx 4^\circ\text{K}$ на дальний ИК-диапазон (длина волны $\lambda > 200 \text{ мкм}$). В качестве окон, прозрачных для ИК-излучения, применялись: плавный кварц, керамика КРС-5, лавсановая пленка. Калибровка детекторов по абсолютной чувствительности осуществлялась с помощью теплового источника СИ-6-10 и лампы обратной волны. Выделение спектральных интервалов в дальней ИК-области осуществлялось с помощью пороговых и интерференционных фильтров. Типичные осциллограммы сигналов с детекторов показаны на рис.14.

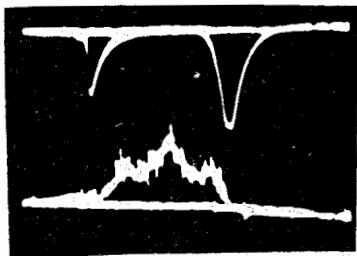


Рис.14. Осциллограмма сигнала СИ с датчика In Sb с пороговым фильтром ($\lambda > 250 \text{ мкм}$); 50 мВ/дел; 0,5 мс/дел.

Результаты измерений показали, что мощность излучения электронного кольца на длине волны $\lambda = 300 \text{ мкм}$ составляет $W = (5 \pm 3) \cdot 10^{-4} \text{ Вт} \cdot \text{мкм}^{-1}$ при числе электронов в кольце $N_e = (2 \pm 1) \cdot 10^{12}$, что в пределах ошибки измерений совпадает с расчетным значением. При этом эффективность передачи мощности СИ по оптическим каналам составляет не менее 1% от полной мощности излучения.

Основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы:

1. Предложены и реализованы оптические бесконтактные методики, позволяющие измерять параметры кольцевых пучков заряженных частиц. Разработанные методики применены на всех этапах формирования, сжатия и ускорения электронно-ионного кольца ускорителя КУТИ-20 без разрушения пучка и для измерения характеристик пучка протонов синхротрона ЛЯП ОИЯИ. Разработанные многоканальные системы позволили провести настройку и оптимизацию режимов работы ускорителя КУТИ-20. В частности, с помощью оперативной настройки уменьшен аксиальный размер электронного кольца с 8 мм до 3 мм и показано, что размер не растет с увеличением числа электронов до $5 \cdot 10^{12}$. Экспериментально показана возможность измерения энергетических параметров протонного пучка с энергией протонов 640 МэВ и интенсивностью 10^7 с^{-1} в одном макроимпульсе по излучению Вавилова-Черенкова.

2. Впервые прямыми измерениями доказано, что когерентные колебания электронной компоненты электронно-ионных колец являются радиальными. Эти колебания удается стабилизировать на уровне малых амплитуд при сжатии электронного кольца в магнитном поле с показателем спада $n \leq 0,5$ и переходе в малые значения показателя спада $n \approx 0,1$ в конце цикла сжатия. Предложено и реализовано многозеркальное устройство для исследования процесса ускорения электронно-ионных колец, с помощью которого экспериментально показано, что амплитуда когерентных радиальных колебаний при медленном перемещении кольца в аксиальном направлении не превышает 2 мм. Экспериментально обнаружено

пичевание электронной плотности в центре сечения электронного кольца за счет ионной фокусировки. Количество электронов в пинче может достигать 50% от полного количества частиц.

3. Предложена и реализована методика измерения параметров ионов в электронно-ионных кольцах по излучению ионов в области вакуумного ультрафиолета. Измерены спектры излучения ионов в диапазоне длин волн $300 \pm 2000 \text{ \AA}$. С помощью данного метода экспериментально показано, что когерентная радиальная дипольная неустойчивость приводит к потерям ионов, которые очень чувствительны к параметрам электронно-ионного кольца и внешнего магнитного поля и влияет на достижение максимальной зарядности ионов. Показано, что настройкой режимов сжатия электронного кольца удается уменьшить потери ионов и стабилизировать процесс накопления. Экспериментально показано, что в электронно-ионных кольцах накапливаются ионы до третьей зарядности из атмосферы остаточного газа.

4. Впервые предложены способы измерения параметров ионов в электронно-ионных кольцах по: рассеянному синхротронному излучению; по параметрам электронов, вылетающих из кольца в результате многократного рассеяния на ионах; по одновременному измерению интенсивности характеристического излучения ионов и ширины углового распределения синхротронного излучения электронов. Данные способы пригодны для исследования всей динамики накопления многозарядных ионов в релятивистских электронных кольцевых пучках.

5. Впервые экспериментально измерена абсолютная мощность синхротронного излучения электронного кольца ускорителя КУТИ-20 в длинноволновом инфракрасном диапазоне, которая составляет $5 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} \cdot \text{мкм}^{-1}$ на длине волны 300 мкм. Разработанные оптические системы сбора мощности синхротронного излучения позволили получить эффективность на уровне 1% от полной мощности излучения. Экспериментально показана возможность создания на ускорителе КУТИ-20 спектрометра ИК-излучения с уникальными параметрами для прикладных исследований.

6. Впервые реализовано устройство с пороговой освещенностью $10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$ для измерения размеров слабосветящихся объектов на основе электронно-оптического преобразователя и диссектора, соединенных с помощью волоконно-оптического контакта. С помощью данного устройства экспериментально доказана возможность измерения интенсивности излучения Вавилова-Черенкова, генерируемого протонным пучком с интенсивностью 10^7 с^{-1} и энергией 640 МэВ в одном макроимпульсе длительностью 40 нс. Использование данного устройства позволило также измерять размеры электронного кольцевого пучка по свечению остаточного газа и провести их оптимизацию.

Содержание диссертации отражено в следующих основных работах:

1. Э.А.Перельштейн, Н.Ю.Казаринов, А.П.Сумбаев, С.И.Тютюнников, В.Н.Шалапин. Диагностика электронно-ионных колец по оптическому излучению. Труды совещания по проблемам коллективного метода ускорения. ОИЯИ, Д9-82-664, Дубна, 1982.

2. С.И.Тютюнников, В.Н.Шалапин. Устройство для оперативного контроля размеров электронного кольца по свечению остаточного газа. Краткое сообщение ОИЯИ, № 18-86, Дубна, 1986, с.57.

3. С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин, А.С.Щеулин. Фотохронография электронно-ионного кольца ускорителя КУТИ-20 камерой "Агат-СФ". Труды десятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.1, Дубна, 1987, с.406-409.
4. С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин. Устройство для диагностики параметров электронно-ионных колец. А.с. СССР № 1148550 от 04.02.82. Бюл.ОИПОТЗ, 1986, №7, с.274.
5. В.С.Александров, И.И.Голубев, Г.В.Долбилов, Л.В.Дубовик, В.Д.Инкин, Н.И.Лебедев, А.В.мажулин, В.И.Миронов, В.П.Николаев, В.А.Петров, В.Н.Разувакин, В.П.Рашевский, В.П.Саранцев, А.П.Сумбаев, А.И.Сидоров, В.А.Тимохин, С.И.Тютюнников, А.А.Фатеев, В.Н.Шаляпин, А.С.Щеулин. Первая очередь коллективного ускорителя тяжелых ионов КУТИ-20. Труды тринадцатой международной конференции по ускорителям частиц высоких энергий, т.1, Новосибирск, 1987, с.241.
6. Ю.Дамиш, В.А.Дроздов, С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин. Применение ПЭС-телекамеры для измерения размеров электронных колец по синхротронному излучению. Сообщение ОИЯИ, 9-90-14, Дубна, 1990.
7. Ю.И.Алексахин, В.К.Антропов, А.А.Мальцев, В.И.Миронов, В.Н.Разувакин, В.П.Саранцев, В.А.Свиридов, С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин, А.С.Щеулин. Исследование влияния ионов на устойчивость электронного кольца при сжатии в адгезаторе КУТИ-20. Сообщение ОИЯИ, Р9-88-424, Дубна, 1988.
8. С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин. Способ измерения параметров ионов в электронных кольцах коллективного ускорителя ионов А.с. СССР № 1163798 от 22.02.1985, Бюл.ОИПОТЗ, 1988, №14, с.288.
9. С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин, А.С.Щеулин, А.П.Сумбаев. Исследование излучения электронно-ионных колец в области вакуумного ультрафиолета. Препринт ОИЯИ, 9-90-13, Дубна, 1990.
10. В.П.Зрелов, Е.С.Кузьмин, С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин. Исследование возможностей фотоэлектронного регистратора для измерения интенсивности черенковского излучения. Сообщение ОИЯИ, Р13-89-208, Дубна, 1989.
11. С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин. Способ определения параметров ионного компонента в электронно-ионных кольцах. А.с. СССР № 1220556 от 22.11.1985. Бюл.ОИПОТЗ, 1988, №14, с.287.
12. С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин. Способ определения среднего заряда ионов в электронно-ионных кольцах. А.с. СССР № 1274602 от 1.08.1986. Бюл.ОИПОТЗ, 1988, №22, с.281.
13. Г.В.Долбилов, А.П.Мальцев, В.П.Саранцев, А.П.Сумбаев, С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин. Характеристики синхротронного излучения электронно-ионного кольца КУТИ-20 и перспектива использования. Труды десятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.1, Дубна, 1987, с.390-393.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 марта 1991 года.