

СЗ45л + СЗ93и

Т-986



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

14-99-84

На правах рукописи
УДК 621.384.6; 538.945

ТЮТЮННИКОВ
Сергей Иванович

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ
ПЛОТНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ
ЭЛЕКТРОН-ИОННЫХ КОЛЕЦ,
СОЗДАНИЕ НА ЕГО ОСНОВЕ УСТАНОВКИ
ДЛЯ ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ**

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных
частиц и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Дубна 1999

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность.

В течение многих лет разрабатываются теоретические и экспериментальные вопросы формирования плотных релятивистских электрон-ионных сгустков для целей новых методов ускорения с повышенным темпом набора энергии, источников многозарядных ионов, накопителей ионов, источников синхротронного излучения с высокой яркостью. В развитии этих научных направлений важное значение приобретают методы измерения основных параметров двухкомпонентных сгустков на всех стадиях его формирования. Одно из основных требований, предъявляемых к подобным методам – не вносить искажений в измеряемый объект. Поэтому привлекательным является направление, связанное с измерением электромагнитного излучения 2^x -компонентных электрон-ионных сгустков в широкой области спектра: от дальнего инфракрасного до жесткого рентгеновского излучения. Кроме диагностических целей собственное излучение релятивистских плотных электронных колец может служить основой для создания на его основе спектрометров для научных приложений. Одно из таких приложений – это исследование оптических свойств высокотемпературных сверхпроводящих металлооксидов (ВТСП). С их появлением инфракрасная спектроскопия стала одним из основных методов исследования электронных и фононных свойств, так как из-за малой длины когерентности для ВТСП по сравнению с классическими сверхпроводниками очень затруднена интерпретация методов туннельной спектроскопии.

Необычные физико-химические свойства новых материалов приводили к противоречивым результатам в исследовании оптических свойств, прежде всего это связано с большим поглощением их излучения в металлооксидных купратах и влиянием поверхностных свойств на спектры отражения. Из-за этого полученные результаты по измерению величины энергетической щели колебались в широком пределе $2\Delta kT_C$ – от 1,7 до 7. Прямые измерения

Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ

Работа выполнена в Лаборатории сверхвысоких энергий
Объединенного института ядерных исследований

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор

ОГАНЕСЯН
Рубен Цолакович

доктор физико-математических наук,
профессор

ЛАЗИЕВ
Эдуард Мкртычевич

доктор физико-математических наук

МАКСИМЕНКО
Сергей Афанасьевич

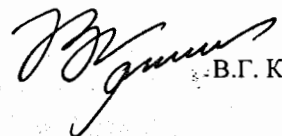
Ведущая организация:
Институт общей физики РАН, г. Москва

Защита диссертации состоится "_____" _____ 1999 г. в
_____ час. на заседании диссертационного совета Д-047.01.06 при
Лаборатории сверхвысоких энергий Объединенного института ядерных
исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан "_____" _____ 1999 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук


В.Г. Кривохижин

спектров пропускания ВТСП пленок были затруднены тем, что ограничена яркость существующих источников СИ в области длинноволнового инфракрасного диапазона. В связи с этим большое значение имеет разработка новых, более ярких источников излучения в инфракрасном диапазоне.

Основные цели работы.

Основными целями работы явились:

1. Исследование электромагнитного излучения электрон-ионных колец, разработка на этой основе новых методов и устройств для целей неразрушающей диагностики 2^{x} компонентных плотных релятивистских электрон-ионных колец, проведение с их помощью экспериментов по коллективному ускорению ионов.
2. Физическое обоснование метода и создания установки для исследований в области инфракрасной спектроскопии с высокой импульсной яркостью.
3. Проведение измерений оптических свойств ВТСП в широкой области спектра.

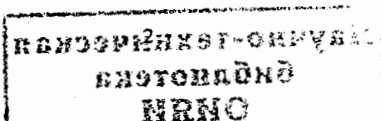
Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Она изложена на 239 страницах машинописного текста и включает в себя 198 рисунков, список работ автора по теме диссертации и список литературы из 180 наименований.

На защиту выносятся основные положения,

составляющие научную новизну и практическую ценность диссертации

- 1.1 Экспериментальные исследования тормозного излучения электронов в атомах остаточного газа и ионах, находящихся в электронном кольце, методики измерения параметров ионов, измерения зависимостей накопления ионов из остаточного газа и импульсной струи нейтралов;

- 1.2 Теоретические расчеты сечения тормозного излучения с учетом изменения кратности ионов, метод измерения среднего ионного заряда по одновременному измерению интенсивности тормозного и характеристического излучения;
- 1.3 Методика измерения абсолютной интенсивности электронов на начальном этапе формирования электронного кольца.
- 2.1 Методы и устройства для измерения пространственных размеров слабосветящихся объектов на уровне мощностей до $10^{-10} \div 10^{-11} \text{ Вт/см}^2$;
- 2.2 Экспериментальные результаты по оптимизации магнитной системы установки для получения электронных колец с максимальной напряженностью электрического поля, достаточной для ускорения ионов;
- 2.3 Экспериментальные результаты по измерению пространственного распределения черенковского излучения протонов в микробанче за время $\Delta t \approx 40 \text{ нс}$, с числом протонов в банче $\sim 10^7$;
- 2.4 Вакуумный монохроматор по схеме Сейфа-Номиока для исследования излучения возбужденных ионов в электронном кольце, экспериментальные исследования накопления ионов.
- 3.1 Экспериментальные результаты по измерению углового распределения синхротронного излучения в электрон-ионном кольце;
- 3.2 Методы измерения частот бетатронных колебаний и распределения электрических полей ионной компоненты по сечению электронного кольца;
- 3.3 Методы и экспериментальные результаты измерения динамики накопления ионов в электронное кольцо;
- 3.4 Устройства для измерения пространственных размеров сечения электронного кольца в СИ в широкой области времен ($10^{-9} \div 10^{-2} \text{ сек}$) с высоким пространственным разрешением до 20 мкм . Экспериментальные результаты по оптимизации электрон-ионных колец по максимальной



напряженности электрического поля для ускорения тяжелых ионов в электронных кольцах.

- 4.1 Экспериментальные исследования спектрального распределения СИ плотного электрон-ионного кольца в широкой области спектра (0,4÷300мкм);
- 4.2 Результаты экспериментальных исследований мощности СИ в ИК диапазоне электрон-ионного кольца;
- 4.3 Метод ИК спектроскопии, использующий синхротронное излучение от электрон-ионного кольца;
- 4.4 Способ ИК спектроскопии с импульсной перестройкой по длинам волн за счет эволюции спектра СИ, возникающего при сжатии электронного кольца. Оптический канал для реализации данного метода, детектор для длинноволнового диапазона, с определенной спектральной характеристикой.
- 5.1 Устройства на пучке СИ для оптических измерений высокотемпературных сверхпроводящих пленок, включающие прокачанной оптический криостат с областью температур 4,7÷300К, контроллер для управления, набор криогенных детекторов для дальнего ИК диапазона;
- 5.2 Экспериментальные результаты по измерению энергетической щели 2Δ и ее температурной зависимости для ВТСП пленки $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$.
6. Экспериментальные исследования оптических характеристик ВТСП пленок типа $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ в широком спектральном интервале;

Практическая ценность.

1. Результаты исследований тормозного излучения электрон-ионного кольца позволяют в накопителях электроны измерить количество накопленных ионов и их влияние на яркостные характеристики СИ.

2. Результаты по созданию комплекса аппаратуры по измерению пространственного распределения слабосветящихся объектов позволяют оценить размеры электронных и ионных пучков по свечению остаточного газа в различных ускорительных устройствах.
3. Экспериментальные обоснования метода ИК-спектроскопии на пучке СИ импульсного накопителя электронов позволяют создать новое поколение источников СИ повышенной яркости для ИК-диапазона, а также создать станцию для ИК-спектроскопии на пучке традиционного источника СИ.
4. Обнаруженный фотохромный эффект в ВТСП материалах создает основу для бесконтактных методов измерения качества сверхпроводящих пленок.

Апробация диссертации и публикации.

Результаты диссертации представлялись и докладывались на X Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц 1987, на совещаниях по проблемам коллективного метода ускорения 1982 г., на III Международной конференции по коллективным методам ускорения Laguna Beach 1978, на международной конференции СИ-95 в Новосибирске 1995 г., на международной конференции SPIE Riga-1995, на международной конференции в Польше ISSRNS-96, 1996, на международной конференции SPIE San-Diego 1998, USA, на XXX конференции по физике низких температур, Дубна, 1995 г. Результаты также докладывались на научных семинарах в ОНМУ ОИЯИ, на совместном русско-французском семинаре 1991 г. Основные результаты, вошедшие в диссертацию, отражены в 29 публикациях и 5 изобретениях. Работы опубликованы в сообщениях ОИЯИ, журналах технической физики, журнале экспериментальной и теоретической физики, Nuclear Instruments and Methods, Acta Physica Polonica.

Содержание работы.

Введение. Во введении раскрыта основная тема работы, сформулированы цели и задачи диссертации, кратко изложено содержание работы по главам.

В первой главе представлены результаты по исследованию тормозного излучения (ТИ) 2-х компонентного электрон-ионного кольца [1]. На основе теоретического рассмотрения эволюции зарядностей ионов в кольце приведен расчет сечения тормозного излучения электронов [2]. В первом параграфе представлены эти расчеты, которые определяют функциональную зависимость сечения тормозного излучения от заряда ионов [1]. На рис.1 показан расчет $\sigma_m(Z_i)$ для ионов азота для разных энергий γ -квантов.

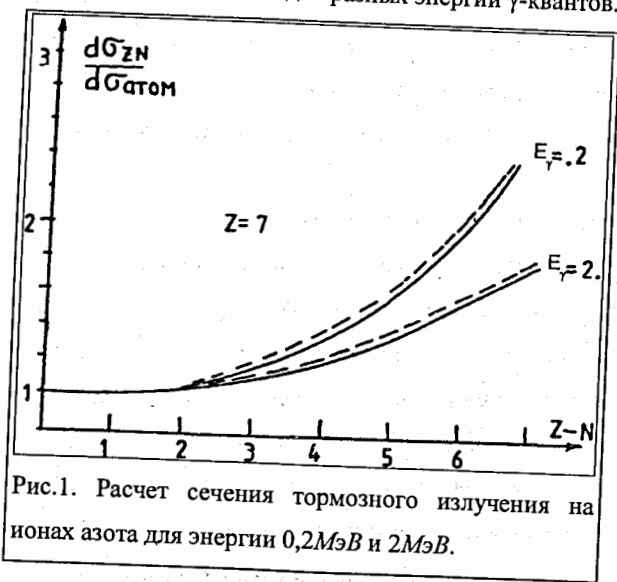


Рис.1. Расчет сечения тормозного излучения на ионах азота для энергии 0,2МэВ и 2МэВ.

Были введены функции распределения ионов и электронов по поперечным координатам a_i, a_e с учетом изменяющегося сечения тормозного излучения при эволюции заряда ионов при последовательной ионизации. С их помощью получены значения

геометрических факторов G , которые используются для вычисления абсолютных значений $N_e \cdot N_i$, где N_e – число электронов, N_i – число ионов в кольце.

Было получено выражение для определения абсолютной интенсивности ионов в кольце [2]

$$N_e \cdot N_i = \frac{N_\gamma}{c\tau G} \left\{ \int_{E_1}^{E_2} d\sigma_\tau(E, Z_i) P(E_\gamma) dE_\gamma \right\}, \quad (I-1)$$

где N_γ – измеряемая интенсивность (ТИ), $P(E_\gamma)$ – спектральная чувствительность детектора, τ – время измерения; $d\sigma_\tau(E, Z_i)$ – сечение тормозного излучения с учетом заряда ионов.

Во втором параграфе представлены экспериментальные результаты по выделению тормозного излучения от остаточного газа, от фоновых эффектов, связанных с тормозным излучением со стенок вакуумной камеры. Было показано, что при надлежащем выборе геометрии удастся выделить ТИ от остаточного газа. Приводится описание экспериментальной аппаратуры для измерения интенсивности тормозного излучения во времени в заданном энергетическом интервале. Приводятся результаты по измерению спектральной чувствительности детекторов в зависимости от выбранного энергетического поворота.

В третьем параграфе приводятся экспериментальные результаты по измерению интенсивности электронов на начальном этапе формирования электронного кольца, когда ТИ в основном идет на атомах остаточного газа. Измеряемое число электронов составляло $N_e \approx (3 \pm 10) \cdot 10^{12}$ в зависимости от настройки кольца. Сравнение разных методов измерения дает абсолютную погрешность в определении числа электронов данным методом не более 50%.

Впервые были исследованы процессы накопления ионов в электронное кольцо коллективного ускорителя тяжелых ионов по описанной выше методике. По формуле (I-1) определялась загрузка ионами электронного кольца. На рис.2 показано поведение фактора $N_e \cdot N_i$ при накоплении ионов из остаточного газа. Максимальное значение фактора $N_e \cdot N_i$ для накопления из остаточного газа $N_e \cdot N_i \approx (1,5 \pm 0,2) \cdot 10^{24}$. при импульсном напуске азота эта величина составляет $(6 \cdot 10^{24})$, при накоплении из струи ксенона $N_e \cdot N_i \approx 3 \cdot 10^{24}$.

Было исследовано накопление ионов в двух режимах из остаточного газа и из струи. На основании этих исследований был выбран оптимальный процесс

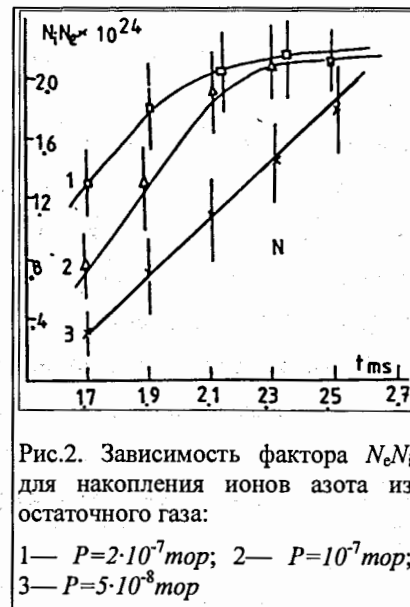


Рис.2. Зависимость фактора $N_e N_i$ для накопления ионов азота из остаточного газа:

1 — $P = 2 \cdot 10^{-7}$ тор; 2 — $P = 10^{-7}$ тор; 3 — $P = 5 \cdot 10^{-8}$ тор

загрузки электронного кольца ионами, при котором наблюдалось коллективное ускорение ионов в спадающем магнитном поле.

На основании теоретических расчетов, которые показали, что сечение тормозного излучения зависит от заряда иона, был предложен способ измерения заряда ионов по поведению во времени отношения интенсивности ТИ к характеристическому [3]. Этот способ защищен авторским свидетельством.

Разработанные для кольцевых пучков методики измерения ионной компоненты могут быть применимы к линейным 2-х компонентным системам

таким, как электронно-лучевой источник ионов, источник, основанный на электронном циклотронном резонансе (ЭЦР).

Вторая глава посвящена исследованию спектров излучения ионной компоненты электрон-ионного кольца [4].

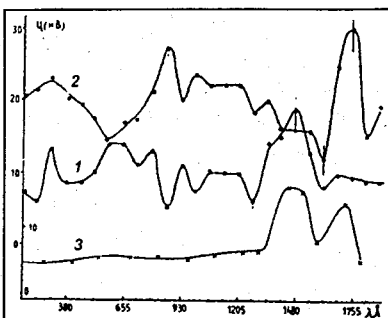


Рис.4. Спектры ВУФ излучения электрон-ионного кольца для разных режимов.

прогрева узла, включающего в себя блок дифракционной решетки. Последняя



Рис.3 Фотография вакуумного монохроматора с детектором на микроканальных пластинках

В первом параграфе описан созданный в Лаборатории вакуумный монохроматор по схеме Сейя-Намиоки для регистрации спектров излучения с детектором для регистрации излучения, состоящим из шевронной сборки 2-х микроканальных пластин (МКП).

На рис.3 фото монохроматора. В спектрометре применялась безмасляная откачка до давления $P \approx 10^{-8}$ тор без

являлась диспергирующим и фокусирующим элементом с радиусом кривизны поверхности $R=500$ мм и с покрытием поверхности составом из алюминия и вольфрама или алюминия и окиси магния. Рабочий диапазон длин волн $100\text{Å} < \lambda < 2000\text{Å}$, монохроматор снабжен устройством поворота решетки с точностью установки длин волн $\Delta\lambda = \pm 1\text{Å}$. Калибровка осуществлялась с помощью набора спектральных ламп. Медленно регистрируемый поток излучения в режиме счета фотонов составляет $\sim 10^3 \div 10^4$ фот/сек для $\lambda = 1750\text{Å}$. Монохроматор мог в «0» порядке фокусировать падающее на него излучение и направлять все излучение на МКП детектор.

Во втором параграфе представлены результаты по исследованию излучения электрон-ионного кольца в области вакуумного ультрафиолета.

На рис.4 представлен измеренный монохроматором спектр излучения ионов. В области ВУФ были выделены спектральные интервалы шириной 100Å в районе длин волн 500Å , 860Å , 1750Å , в которых излучают ионы остаточного газа (азот, углерод, аргон) от первой до третьей зарядности.

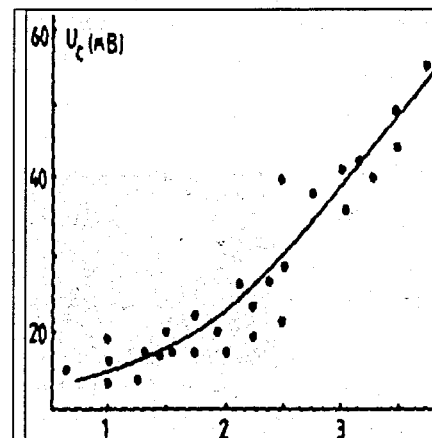


рис.5 Зависимость амплитуды сигнала с МКП детектора от относительного числа электронов $N_e \approx U_i$; одно деление равно $1,5 \cdot 10^{12}$ электронов, $\lambda = 1750\text{Å}$

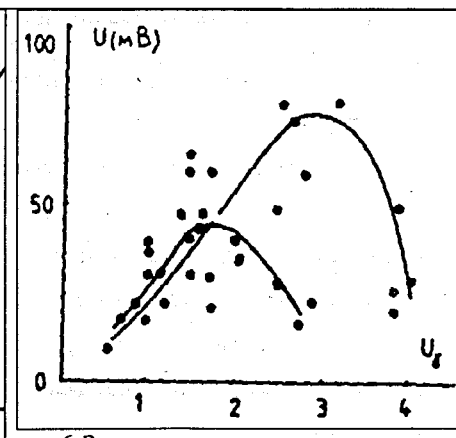


рис.6 Зависимость амплитуды сигналов с МКП детектора от относительного числа электронов в кольце; одно деление равно $1,5 \cdot 10^{12}$ электронов, $\lambda = 500\text{Å}$

При этом зависимости мощности излучения однозарядных ионов от числа электронов в кольце близки к параболической, что иллюстрируется на рис.5. этот факт свидетельствует о накоплении однозарядных ионов в

электронное кольцо. В то же время в более жесткой области длин волн $\lambda=400-600\text{Å}$, соответствующей излучению Z^x зарядных ионов, наблюдалось резкое уменьшение сигнала с детектора с увеличением числа электронов, рис.6. объяснение этому эффекту было найдено при исследовании интегрального излучения в ВУФ-области. В этих экспериментах с целью увеличения амплитуды сигнала МКП детектора устанавливался без монохроматора в непосредственной близости от электрон-ионного кольца.

Проведенные исследования показали, что ионов с большей зарядностью возникают условия для возникновения неустойчивостей, при которых происходят потери высокозарядных ионов. Было выяснено, что увеличение показателя спада магнитного поля приводит к уменьшению потерь ионов [5].

Эти факты позволяют предположить, что в электрон-ионном кольце на радиусе $R_k=6\text{см}$ развивается радиальная дипольная неустойчивость, условие возбуждения которой определяются уравнением $Q_{ie} + \sqrt{1-n+Q_{ei}^2} = 1$, где $Q_{ie}^2 = Q_{ei}^2 / \xi$, Q_{ie}^2 - частота колебаний ионов в поле электронов, ξ - фактор загрузки кольца ионами, определяющий отношение суммарной массы ионов и электронов в кольце.

С ростом числа электронов и соответственно числа ионов в кольце и величина времени неустойчивости должна сдвигаться в сторону увеличения показателя спада вдоль n-траектории, что соответствует экспериментальному факту. Развитие неустойчивости может быть существенно уменьшено подбором n-траектории. В этом режиме существенно уменьшаются потери ионов, возрастает интенсивность излучений после пика потерь. При этом параметры электронной компоненты на $R_k=4\text{см}$ не ухудшаются. Серия экспериментов по измерению ВУФ излучения стыкуется с измерениями колебаний электронной компоненты по синхротронному излучению и еще раз подтверждает вывод о сильном влиянии способа загрузки кольца ионами на динамику развития электрон-ионной

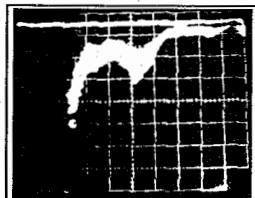


Рис.7 Оциллограмма излучения РbII; $\lambda=2170\text{Å}$, $\tau=5\text{мкс/кл}$

дипольной неустойчивости и практически однозначно свидетельствует о необходимости учета нелинейности сил.

В третьем параграфе приводится описание метода [6] определения параметров ионной компоненты по измерению теряемых электронным кольцом электронов за счет многократного рассеивания. Приводятся формулы по определению заряда ионов за счет многократного рассеяния.

Экспериментально показано появление “потерянных” электронов из кольца при его загрузке ионами как из атомов остаточного газа, так и из импульсной струи нейтралов из лазерного источника нейтральных атомов. Было также зафиксировано излучение однозарядных ионов свинца $Pb II$, рис.7, в момент начального накопления из лазерного источника нейтральных атомов. Была получена оценка среднего заряда ионов азота в электронном кольце. При накоплении из остаточного газа она составляет $\bar{Z}_i = 3$ при числе электронов в кольце $N_e = (4 \div 5) \cdot 10^{12}$.

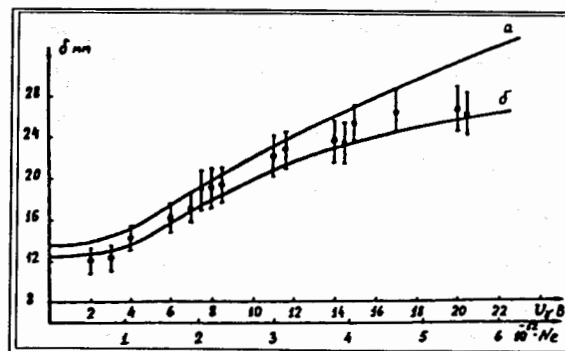


Рис.8 Зависимость полуширины углового аксиального распределения интенсивности СИ от числа электронов в кольце. Точки — экспериментальные данные, (а,б) — расчеты для двух моделей поведения электронов в кольце.

В третьей главе

диссертации приведены результаты по исследованию синхротронного излучения 2^x компонентного электрон-ионного кольца [7,8].

В параграфе 1 приводятся теоретические расчеты углового распределения СИ в 2^x

компонентном электрон-ионном кольце с учетом фокусирующих свойств внешнего магнитного поля и ионной компоненты.

Для σ компоненты поляризации получено выражение углового распределения π и σ компонент

$$I_{\sigma}(\theta) = \frac{I_0(\xi)N_e}{2\sqrt{2\pi}(\theta_z^2 + \Psi_{\lambda}^2)^{\frac{1}{2}}} \exp\left\{-\frac{\theta^2}{2(\theta_z^2 + \Psi_{\lambda}^2)}\right\},$$

где $\xi = \frac{\lambda_c}{\lambda}$; $\lambda_c = \frac{4,2R}{\gamma^3}$; λ - длина волны наблюдения; $\gamma = \frac{E_e}{m_0c^2}$ -

релятивистский фактор электронов, $\Psi_{\lambda}^2 = \frac{1}{6\xi\gamma^2}$ - собственная ширина углового распределения СИ;

$\theta_z^2 = \frac{b_e^2}{R^2}(n + \Delta V_{zi}^2)$, где ΔV_{zi}^2 - добавка к частоте бетатронных колебаний электронов за счет накопленных ионов.

В § 2 приводятся экспериментальные результаты по экспериментальному исследованию углового распределения синхротронного излучения σ и π компонент в видимой области спектра [7].

Впервые было обнаружено значительное уширение углового распределения π и σ компонент в присутствии ионов в электронном кольце. На рис.8 представлены результаты по измерению ширины углового распределения σ компоненты в зависимости от числа ионов в кольце, которое пропорционально числу электронов N_e .

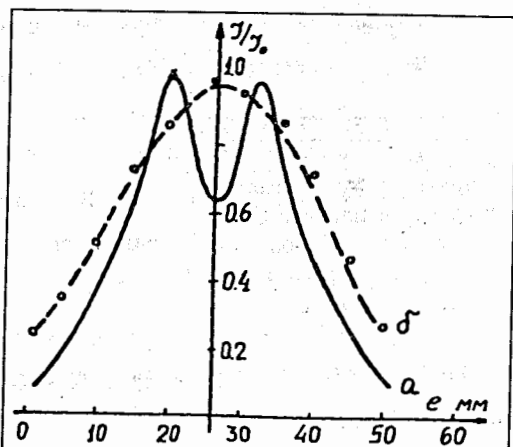


Рис.9. Аксиальное распределение СИ π -компонента при малом числе электронов $N_e \approx 8 \cdot 10^{11}$: а - эксперимент; б - расчет

Характер углового распределения π компоненты для электронов с минимальным значением $\theta_z \ll \Psi_{\lambda}$ будет иметь вид двугорбой кривой, рис.9, которое с увеличением количества ионов при $\theta_z \gg \Psi_{\lambda}$ переходит в гауссовское, рис.10.

На основании проведенных исследований впервые предложен и реализован способ измерения частот бетатронных колебаний кольцевых электронных пучков с большим угловым разбросом [9] $\theta_z > \Psi_{\lambda}$, в соответствии с которым производится одновременное измерение углового распределения СИ и параметров кольца γ , R , b_e . Частота бетатронных колебаний определяется по формуле:

$$\theta_z^2 = (\theta_{cu}^2 - \Psi_{\lambda}^2) \frac{R^2}{b_e^2},$$

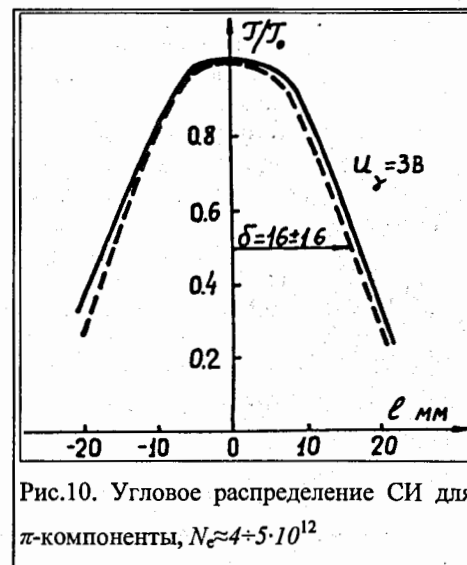


Рис.10. Угловое распределение СИ для π -компоненты, $N_e \approx 4 \cdot 5 \cdot 10^{12}$

на рис. 11 представлена блок-схема оптических измерений параметров электрон-ионных колец по синхротронному излучению.

В третьем параграфе приводятся экспериментальные результаты по исследованию процессов накопления ионов как из остаточного газа, так и из лазерного источника. Измерения временной зависимости $\bar{\theta}_z$ дисперсии углового распределения синхротронного излучения во времени проводилось с помощью двух ФЭУ, регистрирующих интенсивность излучения под двумя значениями азимутального углами $\theta = \theta_1, \theta = \theta_2, I = I_1, I = I_2$.

На рис. 12 представлены временные зависимости значений накопленного ионного заряда по измерениям величин θ_z и теоретических значений из работы [7].

При исследовании накопления ионов из импульсного источника нейтральных атомов при некоторой критической плотности нейтралов обнаружена резкая потеря ионов и отрыв части электронов кольца.

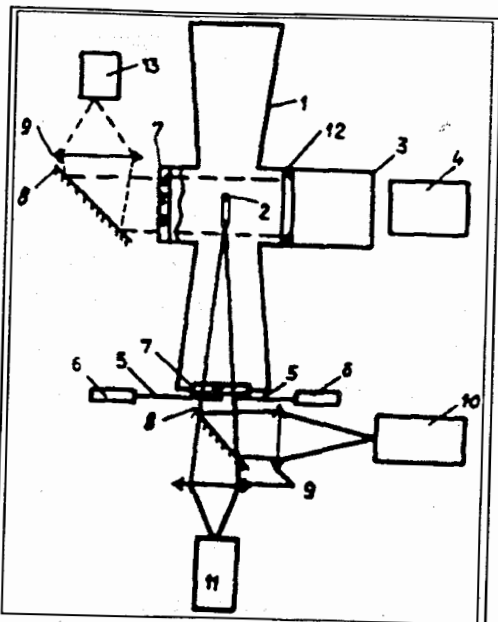


Рис.11 Блок-схема экспериментальной установки для оптической диагностики параметров электронного кольца: 1— камера ускорителя; 2— электрон-ионное кольцо; 3— сцинтилляционная фольга; 4— детектор характеристического излучения; 5— световоды; 6— фотоэлектронные умножители; 7— оптические окна; 8— полупрозрачное зеркало; 9— объективы; 10,11— диссекторы; 12— конические зеркала

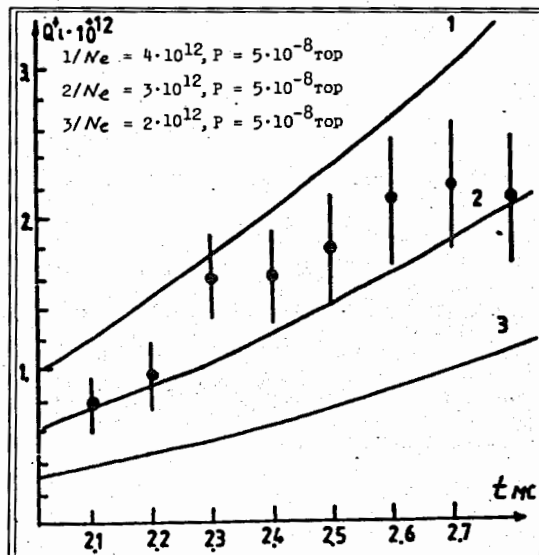


Рис.12 Зависимость накопленного ионного заряда от времени (точки — экспериментальные данные)

распределения СИ по сечению электронного кольца [10].

В §4 рассматриваются вопросы создания аппаратуры для измерения поперечных размеров электронного кольца.

Для исследования процессов коллективного ускорения ионов собственным полем электронной компоненты необходимо в процессе формирования электронного кольца контролировать его поперечные размеры: R, a_e, b_e . Поэтому создание методик для этих измерений является одной из важнейших задач, которая рассмотрена в работе [11,12].

На рис. 13 показаны осциллограммы, иллюстрирующие поведение сигналов с ФЭУ, по которым определяется временное поведение величины дисперсии углового распределения при импульсной нагрузке.

Был впервые предложен и реализован метод определения собственного электрического поля ионов по измерению дисперсии углового



Рис.13 Осциллограммы мощности СИ под разными аксиальными углами, 200 мкс/кл.; 2— оптическое излучение, измеренное ФЭУ перпендикулярно плоскости орбиты

* Н.Ю.Казаринов, Э.А.Перельштейн, Г.Д.Ширков «Метод моментов в динамике кольцевых пучков заряженных частиц, ЖТФ, ст.549-556, 1980.

На основе анализа существующих фотоэлектронных приемников с учетом требований, предъявляемых со стороны СИ электронного кольца, а именно, высокое пространственное и временное разрешение, большой динамический диапазон, большая помехозащищенность, высокое пространственное разрешение, выбран диссектор – прибор, представляющий комбинацию электронного оптического преобразователя с электромагнитным сканированием электронного изображения и ВЭУ для усиления электронного сигнала.

Для измерения пространственного распределения СИ разработаны приборы с диссекторами с разными системами развертки.

- 1 – тип с разверткой магнитным полем,
- 2 – тип с разверткой электрическим полем.

Были созданы генераторы, осуществляющие сканирование электронного изображения сечения кольца со скоростью, существенно превышающей скорость сжатия электронного кольца, и скорость его продольного движения на этапе ускорения. Для выбора режимов питания диссекторов проведены калибровочные измерения со световыми потоками в широком диапазоне освещенностей, пространственное разрешение приборов в рабочих условиях в режиме регистрации импульсного светового потока той же длительности, что и СИ составило $10 \mu\text{тр/мм}$. Максимальная рабочая апертура прибора для измерения размеров сжатого кольца составила 80мм .

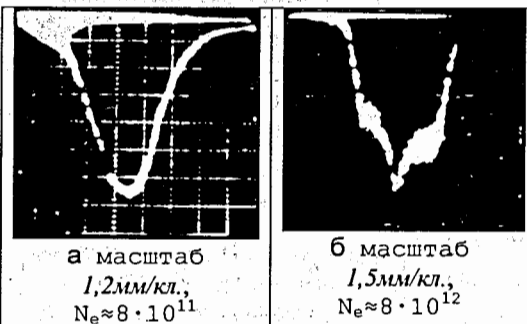


Рис.14 Осциллограммы аксиального профиля плотности электронов в зависимости от интенсивности электронов

На рис.14 показаны измеренные профили сечения электронного кольца в аксиальном направлении при разном числе электронов в кольце.

Для исследования динамических процессов в электронном кольце на конечной стадии сжатия и

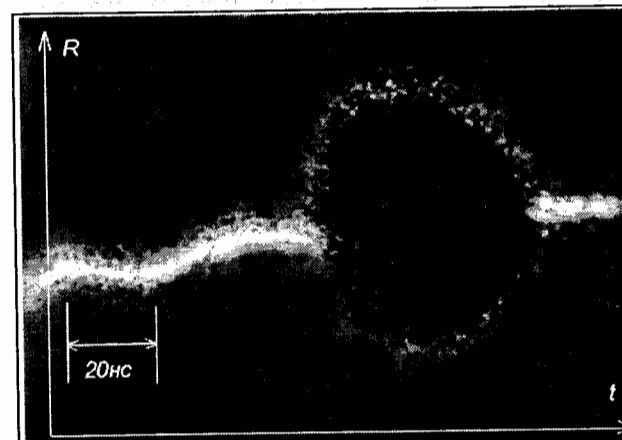


Рис.15 Фотохронограмма временной зависимости радиального размера; развертка 20нсек/см

приводящих к увеличению эффективного размера сечения кольца и к уменьшению собственного электрического поля.

На рис.15 показана фотохронограмма поведения радиального размера кольца. Высокоскоростная съемка позволила впервые зафиксировать образования ядра в сечении электронного кольца за счет ионной фокусировки, рис.16, время измерения $\tau = 2 \text{нсек}$.

Для исследований поведения электронного кольца на начальном этапе было разработано устройство [14], защищенное авторским свидетельством, которое позволяло следить за размерами сечения кольца вплоть до $Z = 6 \text{см}$, до точки снятия ямы. С его помощью было впервые обнаружено, что при начале ускорения электроны сходят в режим ускорения с разных радиусов по частям и лишь иногда стартуют как единое целое. Для режимов ускорения целого кольца были обнаружены времена пролета нагруженного ионами кольца [15].

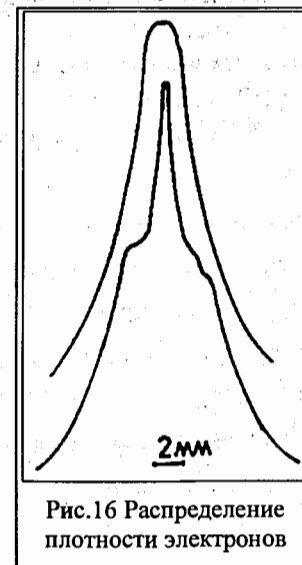


Рис.16 Распределение плотности электронов

накопления ионов были проведены измерения с временным разрешением $\tau \leq 200 \text{псек}$ с помощью фотохронографа «Агат СР» [13], которые показали наличие когерентных радиальных колебаний,

В процессе оптимизации системы инжекции на начальном этапе формирования электронных колец потребовалось создание сверхчувствительной аппаратуры для измерений поперечных размеров электронного кольца по свечению остаточного газа. Как показали измерения с ФЭУ, абсолютная интенсивность излучения составляла $\sim 10^{10} \text{ вт/см}^2$. Для этих измерений, был создан измерительный прибор [11] на основе диссектора с прямым оптическим контактом - волоконной шайбой (опытный экземпляр), к которому оптически стыковался усилитель яркости на микроканальных пластинах. Этот прибор обеспечивал предельную чувствительность при освещенности 10^{12} вт/см^2 , позволил оптимизировать формирования электронных колец на начальном этапе. С его помощью впервые были проведены измерения конуса черенковского излучения протонов на синхроциклотроне ЛЯП в микробанче протонов с длительностью $\tau=40 \text{ мкс}$ и интенсивностью 10^7 прот/имп [16].

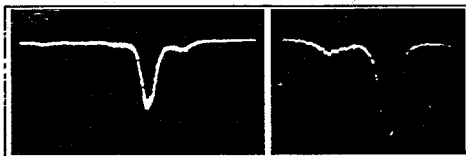


Рис.17. Осциллограмма с прибора, соответствующего регистрации прямого конуса ИВЧ от протонов

На рис.17 показан профиль сечения дуги кольца черенковского излучения. Время измерения - 4 мкс . Таким образом была впервые экспериментально показана возможность оперативного измерения (без фотопленки)

пространственного распределения (ИВЧ).

В IV главе рассматриваются вопросы исследования спектральной яркости синхротронного излучения для целей инфракрасной спектроскопии конденсированных тел. В первом параграфе приводятся сравнения яркостных характеристик источников СИ. В настоящее время активно развивается направление ИК-спектроскопии с использованием СИ на стандартных накопителях [*].

Экспериментально показано, что яркость источника в ИК диапазоне для длин волн $\lambda \geq 100 \text{ мкм}$ более чем в 10 раз больше, чем при использовании

непрерывных источников (АЧТ), глобар, лампа накаливания, ртутная лампа [17]. Яркость источника СИ

$$B(\lambda) = \frac{P(\lambda)}{S_{CH} \Psi_{CH}} = \frac{P(\lambda)}{S_{CH} \Psi(\lambda)}; \quad (IV-1)$$

где $P(\lambda)$ - мощность синхротронного излучения электронного кольца с электронным током $I_e(A)$; S_{CH} - поперечная площадь сечения электронного кольца $\Psi_{CH}(\lambda)$ - полуширина углового распределения СИ для длины волны λ в аксиальном направлении.

Мощность излучения в инфракрасном диапазоне для длин волн $\lambda \gg \lambda_c$:

$$\lambda \gg \lambda_c = 4,2 \frac{R}{\gamma^3}$$

$$\text{где } \lambda_c = \frac{4,2R}{\gamma^3}; P(\lambda) \approx I_e(A) \left(\frac{\lambda_c}{\lambda} \right)^3 \frac{\Delta\lambda}{\lambda};$$

Полуширина углового распределения для $\lambda \gg \lambda_c$:

$$\Psi_{CH} = \text{const} \left(\frac{\lambda}{R} \right)^{\frac{1}{3}}$$

для типичных параметров электронных колец $R \sim 4 \text{ см}$ и $\lambda = 100 \text{ мкм}$.

$$\Psi(\text{рад}) = 1,66 \left(\frac{\lambda}{R} \right)^{\frac{1}{3}} = 225 \text{ мрад};$$

Таким образом яркость СИ в инфракрасном диапазоне электронного кольца с радиусом R

$$B(\lambda) \gg \lambda_c \approx I_e \left(\frac{R}{\lambda} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (IV-2)$$

Как показывают оценки, яркость СИ электронного кольца в ускорителе КУТИ-20 более чем в 100 раз превосходит в длинноволновом диапазоне, для $\lambda = 100 \text{ мкм}$ известный источник СИ в Беркли NSLS ($I_e = 1A$, $R = 200 \text{ см}$), который имеет в своем составе станцию для инфракрасной спектроскопии. Отличительной особенностью СИ, которое генерируется в установке КУТИ-20, является то, что оно обладает в соответствии с формулой (IV-2) большой

* Carr.G, Hanfland M, Williams G, Rev Sci.Instrum, 66.1643.(1995)

импульсной яркостью, длительность импульса излучения составляет от 2 до 10 мсек в зависимости от режима магнитной системы.

Во втором параграфе представлены экспериментальные результаты по измерению спектров СИ электрон-ионного кольца [18]. Как показали проведенные исследования в ускорителе КУТИ-20, существует разброс параметров от цикла к циклу, влияющих на абсолютную мощность СИ. Этот разброс в числе электронов N_e , который достигает 50-60%, а также отклонение в средней энергии электронов на 2-3% от импульса к импульсу. В связи с тем, что для использования СИ для спектроскопических целей необходимо обеспечить абсолютное мониторингирование интенсивности с точностью не хуже 1%, был разработан метод определения энергии электронов в сжатом кольце в

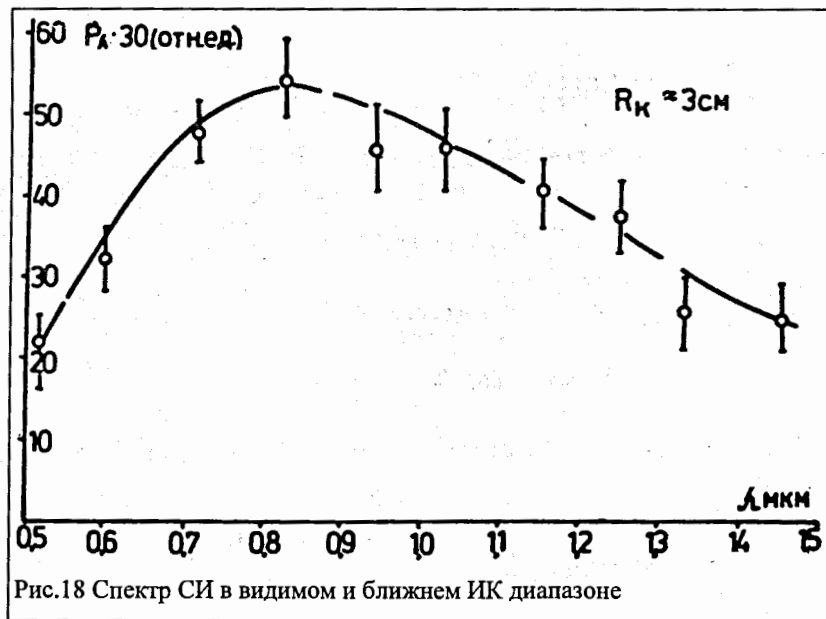


Рис.18 Спектр СИ в видимом и ближнем ИК диапазоне

каждом цикле сжатия по спектру СИ.

Этот метод основан на одновременном измерении интенсивности СИ на двух длинах волн $P(\lambda_1)$ и $P(\lambda_2)$ для λ_1 и λ_2 значительно меньше λ_c . Величина релятивистского фактора γ находится по формуле:

$$\gamma^3 = \frac{4,2R}{\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\Delta \lambda} \ln \left\{ \frac{P(\lambda_1) \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^{\frac{1}{2}}}{P(\lambda_2) \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{\frac{1}{2}}} \right\}} \quad (IV 3)$$

Были проведены измерения спектров СИ в видимом и ближнем ИК-диапазоне с помощью спектрографа и монохроматора, которые дают совпадающие результаты. На рис.18 представлен спектр СИ электронного кольца. Был разработан метод мониторингирования абсолютной мощности СИ, в котором одновременно происходит одновременное измерение числа электронов N_e и значение энергии электронов в конце цикла сжатия γ . При таком подходе удается определять абсолютную мощность СИ на уровне 1-1,5%, что вполне достаточно для приложений.

В третьем параграфе описаны результаты, которые были очень важны для коллективного метода ускорения – это повышение точности в определении числа электронов в кольце по измерению абсолютной мощности СИ [18]. Поскольку коллективное ускорение ионов собственным электрическим полем электронной компоненты является пороговым эффектом, то необходимо было точно определять величину N_e , необходимую для начала процесса ускорения ионов.

Как было уже сказано выше, на определение абсолютной мощности СИ влиял разброс энергии электронов от цикла к циклу, который надо было определить от отклонения числа электронов от цикла к циклу. Для каждого цикла сжатия производилось измерение энергии γ . С целью получения более достоверных данных измерение мощности СИ проводилось разными детекторами в разных спектральных интервалах. Абсолютная чувствительность детекторов калибровалась по излучению калиброванного излучателя, вольфрамовой лампы с известной температурой T . Определение числа электронов проводилось по формуле:

$$N_e = \frac{U_{СИ}}{U_{кал}} \frac{P(\lambda_1 T)}{P_{СИ}(\lambda_1)} 4 \left(\frac{L_{СИ}}{L_{кал}} \right) \theta_{СИ}(\lambda_{ш}) \quad (IV 4)$$

где $U_{СИ}$, $U_{кал}$ – амплитуда сигнала с детектора при измерении мощности СИ и при калибровке источником излучения на длине волны λ_i , определяемой узкополостными фильтрами. $P(\lambda T)$, $P_{СИ}$ – рассчитанная мощность излучения калибровочного источника с температурой T , и мощность СИ для данного значения релятивистского фактора γ . $\theta_{СИ}$ – полуширина углового распределения СИ в аксиальном направлении.

Табл.1

Спектральный интервал λ [мкм]	0,2÷0,8	2÷12	20÷100	100÷100 0
Тип детектора	ФЭУ	Ge:Au	Ge:Ga	InSb
Временное разрешение [$\tau 10^6$ сек]	0,01	10	1	1
Рабочая температура [K]	300K	77K	4,7K	4,7K

Значение θ_z для определения числа электронов бралось экспериментальное, оно было шире из-за эффектов накопления ионов. Максимально измеренное количество электронов в кольце составило $(8\div 10)10^{12}$. Для обеспечения контроля за процессом ускорения ионов были разработаны различные мониторы, которые контролировали интенсивность электронов как в режиме сжатия, так и при ускорении электронного кольца.

Табл.2

Источник излучения	Дубненский накопитель	Ртутная лампа	UVSOR, Япония	NSLS, США
Геометрический эффект	10^{-3}	10^{-2}	10^{-2}	10^{-2}
Мощность излучения $P(\lambda)$ [Вт]	$10^{-5}\div 4\cdot 10^{-5}$	10^{-8}	10^{-7}	$4\cdot 10^{-7}$

В четвертом параграфе приводятся результаты по измерению абсолютной мощности СИ в среднем и дальнем ИК диапазоне [19,20]. В табл.1 приводятся основные параметры детекторов, использовавшихся для этих целей.

В табл.2 приводятся данные по сравнению результатов измерений абсолютной мощности в электронном кольце и сравнению с известными источниками, где установлены станции для ИК спектроскопии твердых тел.

Следующим обстоятельством, которое определяет возможность создания спектроскопической станции на коллективном ускорителе, является надлежащий выбор оптического канала, согласование с ним экспериментальной установки: монохроматора, спектрографа, криостатов и т.д.

Основная задача канала: иметь как можно больший акцептанс, определяемый диаметром входного окна и иметь изображение светящейся поверхности кольца с минимальными искажениями. Акцептанс канала на источнике СИ NSLS составляет $\epsilon_x=90$ мрад.

В §5 приведены описания двух оптических каналов, которые были испытаны для формирования пучка СИ от электронного кольца КУТИ-20. Первый канал состоял из набора внутренних зеркал с напылением, установленных внутри камеры ускорителя, радиусы кривизны зеркал рассчитывались по работе [*]. Второй канал состоял из 3-х сферических зеркал. Результаты испытаний оптических каналов приведены в табл.3. С точки зрения яркостных характеристик более предпочтительна 3-хзеркальная система, дающая изображение сечения электронного кольца без искажений, в то время как в многозеркальной системе не удастся получить изображение.

Табл.3

Сигнал с детектора [мВ]	Геометрия оптической системы	Режим сжатия	Примечание
$U_0=100$	точечный детектор	$\gamma=22$; $R=8$ см; $\lambda_{крит.}=31$ мкм	$\lambda_{изм}=7$ мкм
$U_1=8\cdot 10^3$	Оптическая 3-х зеркальная система	$\lambda_{крит.}=31$ мкм	$\lambda_{изм}=7$ мкм

* R, Lopes-Delgado, H.Szwarc. Optic communications, V19, №2 p.286-291, 1976.

С использованием 3^{-х}зеркального канала были проведены измерения спектров пропускания высокотемпературного сверхпроводящего металлооксида $YBa_2Cu_3O_{7.8}$ на подложке из кремния. Образец находился на оптическом криостате с изменяемой температурой.

На источнике синхротронного излучения коллективного ускорителя был

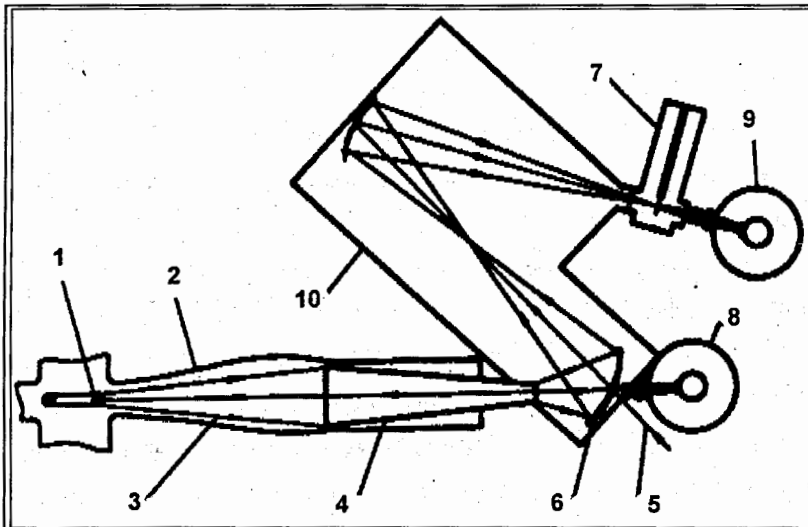


Рис.19 Блок-схема двухканального спектрометра.

1— электронное кольцо, 2— вакуумная камера, 3— пучок СИ, 4— конический световод, 5— пучок лазера, 6— сферическое зеркало, 7— криостат с образцом, 8,9— ИК детекторы зеркала, 7— криостат с образцом, 8,9— ИК детекторы

предложен и реализован метод импульсной инфракрасной спектроскопии, который основан на том обстоятельстве, что в процессе сжатия электронного кольца во времени, происходит «перемещение» по длинам волн спектра СИ [21,22].

В параграфе 6 представлены результаты по обоснованию метода импульсной спектроскопии с перестройкой по длинам волн.

На рис.19 представлена геометрия экспериментальной установки: вывод СИ с камеры ускорителя осуществляется коническим медным световодом, один конец которого входит в оптический криостат, на выходе которого стоит

детектор $Ge:Ga$ для регистрации прошедшего излучения сквозь ВТСП пленку, установленную в оптическом криостате. На рис.20 представлены спектры СИ в разные моменты сжатия электронного кольца. Таким образом в каждый момент времени сквозь пленку образца происходит разный спектральный состав.

Временная зависимость $I(t)$ сигнала с детектора будет связана с мгновенным спектром СИ, $P(\lambda)$ функцией пропускания образца $T(\lambda)$, спектральной чувствительностью детектора $D(\lambda)$ соотношением:

$$I(t) = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_+} P\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right) D(\lambda) T(\lambda) d\lambda \quad (IV 5)$$

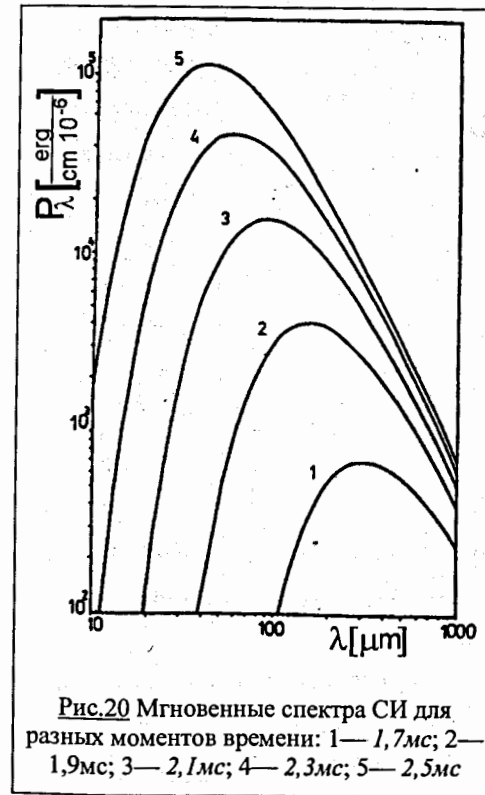


Рис.20 Мгновенные спектра СИ для разных моментов времени: 1— 1,7мс; 2— 1,9мс; 3— 2,1мс; 4— 2,3мс; 5— 2,5мс

верхний предел интегрирования $\lambda_+(t)$ зависит от времени сжатия. Спектр СИ в каждый момент времени t_i рассчитывается с высокой точностью, зная величину $\lambda_c = \frac{4,2R}{\gamma^3}$; приводятся результаты по определению зависимости λ_c во времени сжатия по зависимости величин R и γ от величины магнитного поля, а также по независимым измерениям λ_c по измерению «наклона» спектра СИ в интервале длин волн $\lambda_1, \lambda_2 \ll \lambda_c$. Амплитуда наклона измерялась по отношению интенсивностей на двух длинах волн $P(\lambda_1), P(\lambda_2)$

$$\lambda_c = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \ln \frac{P(\lambda_1)}{P(\lambda_2)} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

использовались для измерений интенсивностей СИ два детектора с фильтрами:

$$\lambda_1 = 12 \text{ мкм} \quad \Delta\lambda = 2 \text{ мкм}$$

$$\lambda_2 = 6 \text{ мкм} \quad \Delta\lambda = 2 \text{ мкм}$$

Для измерений временного отклика синхротронного излучения в среднем и дальнем ИК диапазоне был выбран примесный приемник Ge:Ga, у которого чувствительность находилась в диапазоне $20 \text{ мкм} \ll \lambda < 100 \text{ мкм}$. Временное разрешение составляет $\tau \approx 10^{-6} \text{ сек}$. Детектор находился в криостате с рабочей температурой $T = 4,2 \text{ K}$. Для восстановления функции пропускания исхода из интегрального уравнения надо с высокой точностью знать функцию спектральной чувствительности $D(\lambda)$, которая измерялась для данного детектора на Фурье-спектрометре "Brucker". На рис.21 представлена зависимость D как функция длины волны.

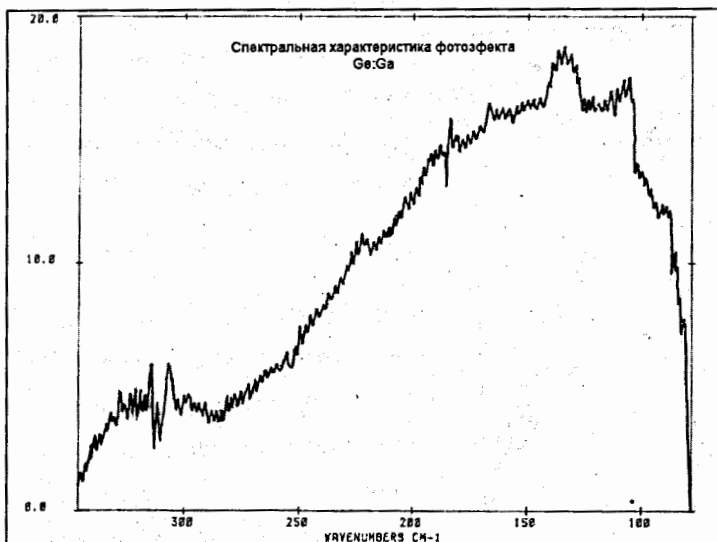


Рис.21 Спектральная чувствительность от инфракрасного детектора Ge:Ga при рабочей температуре $T = 4,7 \text{ K}$

спектра.

В первом параграфе приводится постановка задачи по измерению оптических свойств ВТСП. Одной из основных задач спектроскопических исследований является доказательство существования энергетической щели в сверхпроводящем состоянии. Выполненные работы по обнаружению энергетической щели, напимер, на источнике СИ, были из-за недостаточной

В пятой главе представлены результаты по измерению оптических свойств высокотемпературных сверхпроводящих оксидных пленок в широкой области

яркости проведены в режиме измерения спектров отражения и дали отрицательный результат. Многие эксперименты, доказывающие проявление энергетической щели в спектрах отражения в сверхпроводящем состоянии, были выполнены с использованием Фурье-спектрометра с источником излучения типа ртутной лампы, у которой мощность излучения в длинноволновом диапазоне составляет $\sim 10^7 \text{ Вт}$ в полосу $\Delta\lambda/\lambda \approx 10^{-2}$. Поэтому проведение измерений энергетической щели в схеме на пропускание является более эффективным методом по сравнению со схемой на отражение, где величина изменения отражения составляет несколько процентов.

Однако, для этих исследований требуется большая яркость источника излучения в силу того, что пленка ВТСП является сильно поглощающей. Поэтому созданный нами метод исследований на пучке СИ ускорительного комплекса КУТИ-20 [19,20], используется благодаря большой импульсной яркости для измерений спектров пропускания ВТСП пленок.

Представленный в главе IV перестраиваемый спектрометр обладает большой импульсной яркостью и следующими характеристиками: перестройкой по длинам волн в интервале $(20 \div 100 \text{ мкм})$, время перестройки $\Delta T \approx 2 \div 3 \text{ мсек}$. Он позволяет восстановить функцию пропускания объекта с разрешением по длинам волн $\Delta V \sim (2 \div 30) \text{ см}^{-1}$.

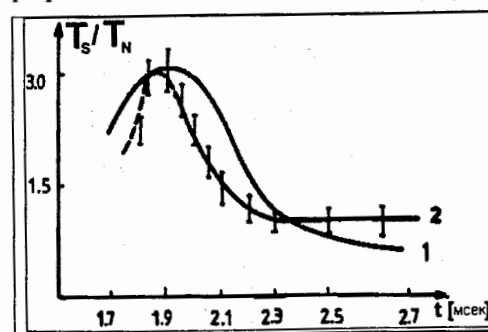


Рис.22 Временная зависимость $\frac{U_s}{U_n}$ сигналов с детектора, регистрирующего прошедшее сквозь $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ излучения, $T_{\text{изм}} = 20 \text{ K}$

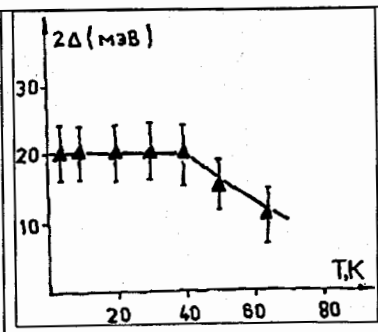


Рис.23 Зависимость энергетической щели от температуры

Измерения были проведены на поликристаллических образцах $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ на подложках из MgO с температурой перехода $T_c=82\pm 84K^\circ$. Исследования оптических свойств ВТСП проводилось в специально разработанном прокачанном оптическом криостате, в котором диапазон изменения температур $T=(4,8\pm 300)K^\circ$, точность поддержания температуры $\Delta T=0,1K^\circ$.

Были проведены исследования болометрических характеристик ВТСП пленок с целью учета влияния их нагрева поглощенной частью спектра СИ. Максимально возможное изменение температуры составило $\Delta T=2K^\circ$ [23,24] при энергии излучения, близкой к источнику СИ. Были проведены измерения спектров пропускания пленок $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ при $T=20K$ [25]. На рис.22 представлены спектры пропускания при $T=20K$. Временной шкале соответствует шкала по длинам волн спектра во времени по длинам волн, которая была получена способом, изложенным в IV главе. Измеренная величина энергетической щели составляет $2\Delta(T=2K)\sim 20\text{мэВ}$.

Были приведены измерения зависимости энергетической щели от температуры, которая близка к той, которую дает теория БКШ, рис.23. [26,27,22].

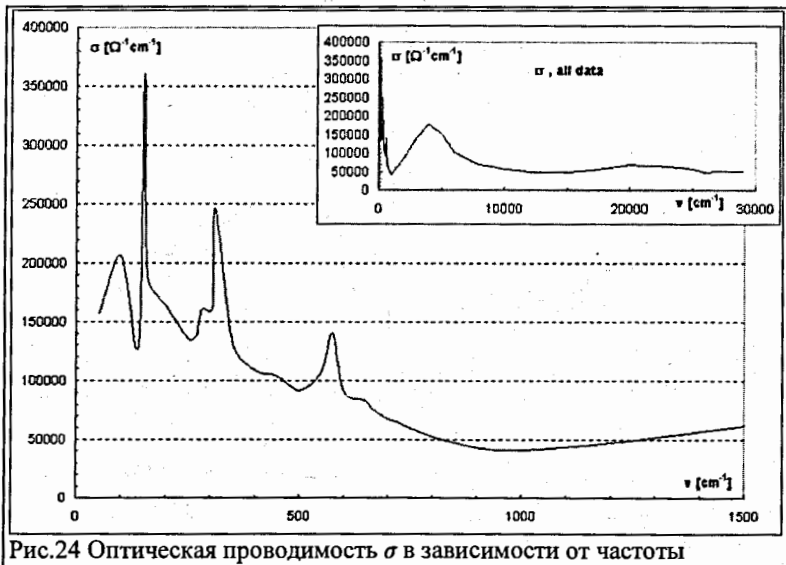


Рис.24 Оптическая проводимость σ в зависимости от частоты

В третьем параграфе приводятся экспериментальные результаты [28,29,30,31] по измерению оптических характеристик ВТСП материалов в средне- и длинноволновом ИК диапазоне с помощью Фурье-спектрометра ЛАФС-1000 и ИКС-31.

Табл.4

$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$	
частота [cm^{-1}]	Возможная мода
155	ν_1
325	ν_2
573	ν_3
606	ν_4
621	$2\nu_2$
632	
641	
700	$\nu_1+\nu_2$
709	
724	
$YBa_2Cu_3O_{6+\delta}$	
180	
220	
250	
606	
653	

На рис.24 представлена зависимость обработки экспериментальных результатов и получения зависимости проводимости от длины волны для пленки $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ с температурой перехода $T_c=82K^\circ$. Полученные результаты хорошо совпадают с измерениями, выполненными другими группами, и являются характерными для орторомбической сверхпроводящей фазы $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. Были проведены измерения в средней области ИК спектра ($2\div 15$)мкм с монохроматором ИКС-

31 [29]. На образцах, состоящих из одного процента $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ в матрице из KBr , обнаружены в спектрах пропускания сверхпроводящей фазы линии поглощения, которые близки к суммовым частотам основных фоновых мод, т.е. в табл.4 представлены измеренные линии поглощения.

Были обнаружены линии поглощения в сверхпроводящем состоянии, интенсивность поглощения которых зависела от температуры, $\lambda_1=4,26\mu\text{км}$, $\lambda_2=5,26\mu\text{км}$. Наиболее общей закономерностью в поглощении в ближнем ИК диапазоне – это наблюдение неселективного поглощения, которое для ВТСП с разной температурой перехода имеет разный характер поглощения.

Чем выше температура перехода, тем меньше изменение поглощения с изменением температуры.

В четвертом параграфе приводятся исследования оптических свойств ВТСП пленок в видимой области спектра [32,33,34]. Впервые нами был обнаружен фотоиндуцированный эффект в ВТСП пленках, который выражался в том, что под действием падающего видимого излучения, превышающего определенный порог на уровне $P \sim 10^{-4} \text{ вт}$, происходит возникновение поглощения на длинах волн $\lambda \approx 0,6 \text{ мкм}$.

Была создана 2-канальная установка для исследований оптических процессов в видимой области спектра, в которое возбуждение ВТСП пленки осуществлялось широким спектральным распределением, а поглощение измерялось на длине волны HeNe лазера $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$.

Были измерены времена нарастания и релаксации индуцированного поглощения, а также их зависимость от температуры. На рис.25 представлена временная зависимость фотоиндуцированного поглощения в ВТСП пленке (ТВССО). Были проведены спектральные исследования фотоиндуцированного

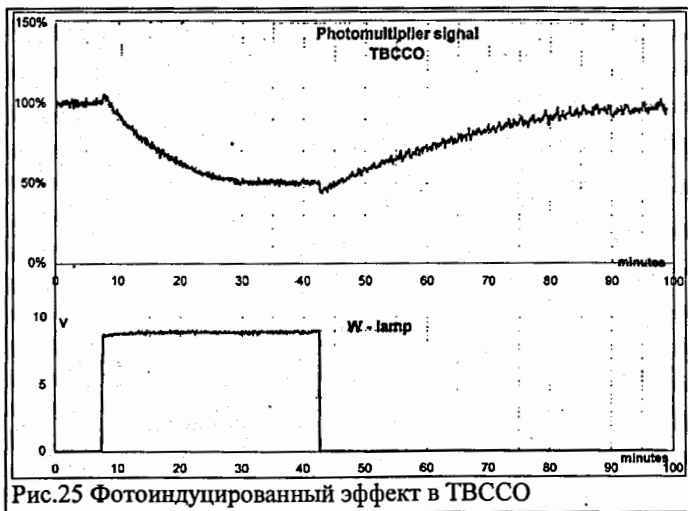


Рис.25 Фотоиндуцированный эффект в ТВССО

поглощения, которые показали, что оно зависит от температуры. В измерении оптического поглощения для $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.5}$ в диапазоне $(0,4 \div 1) \text{ мкм}$ было подтверждено наличие коротковолновой гранулы поглощения, которая

отождествляется с оптической щелью между валентной зоной и зоной проводимости. Величина оптической щели E_g составляет по результатам измерений $E_g = 2,05 \text{ эВ}$. При измерениях при $T < 150 \text{ К}$ было обнаружено появление линии поглощения вблизи оптической щели на $\lambda = 0,67 \text{ мкм}$ [31].

Положение этой линии поглощения и зависимость величины поглощения от температуры позволяют сделать предположение о наличии экситонной линии поглощения. Обнаружение экситонных мод может позволить в объяснении механизмов высокотемпературной сверхпроводимости, привлечь механизмы повышения температуры перехода, высказанные В.Л.Гинзбургом.

Основные результаты диссертации

1. Впервые проведено экспериментальное исследование тормозного излучения электронов на ионах в 2-х компонентном электрон-ионном кольце.
2. Впервые проведен теоретический расчет сечения тормозного излучения электронов в 2^х компонентном релятивистском электрон-ионном кольце с учетом изменения заряда ионов, на этой основе был предложен и реализован метод измерения среднего заряда ионов в электрон-ионном кольце.
3. Проведены исследования процесса накопления ионов в электрон-ионном кольце. При разных способах загрузки кольца ионами из остаточного газа и из атомной струи. С точки зрения повышения зарядности ионов предпочтителен I способ накопления ионов из остаточного газа.
4. Впервые созданы приборы для измерения пространственных характеристик слабо светящихся, на уровне $\sim 10^{-11} \div 10^{-12} [\text{Вм/см}^2]$, объектов. На основе созданных приборов проведена оптимизация магнитной системы, в

- которой происходило формирование электрон-ионных колец для коллективного ускорения. Получены электронные кольца с числом электронов $N_e \approx 10^{13}$, $a_z \approx 0,15 \div 0,2 \text{ см}$. Впервые с помощью созданной системы было проведено измерение пространственного распределения черенковского излучения протонов с энергией $E_p = 660 [\text{Мэв}]$ в микробанче с числом протонов $\sim 10^7$.
5. Для исследования излучения электрон-ионного кольца в области вакуумного ультрафиолета был разработан и изготовлен вакуумный монохроматор по схеме Сейда-Намиока. На его основе были проведены измерения спектров излучения, возбужденных нейтронов и ионов из кольца. Впервые были обнаружены ограничения по заряду ионов, накопленных в электронном кольце, из-за когерентных неустойчивостей, приводящих к потере ионов.
 6. Проведены экспериментальные исследования углового распределения синхротронного излучения в видимой области спектра двухкомпонентного электрон-ионного кольца в результате которых:

Впервые обнаружен эффект значительного уширения углового распределения си за счет накопленных ионов; на основе этого эффекта предложены и реализованы методы измерения частот бетатронных колебаний и пространственного распределения электрического поля ионного компонента.
 7. Проведено экспериментальное исследование динамики накопления ионов в электронное кольцо, проведено сравнение с расчетом.
 8. Созданы и внедрены устройства для измерения пространственных размеров электронной компоненты по синхронному излучению в интервалах времен $10^{-9} \div 10^{-2} \text{ сек}$ с большим динамическим диапазоном. На этапах сжатия и поперечного вывода электрон-ионного кольца. С их

помощью было проведено формирование электрон-ионных колец с параметрами, необходимыми для коллективного ускорения ионов, а также проведено ускорение ионов азота до энергии $\frac{\Delta E}{L} = 2,5 \frac{\text{Мэв}}{\text{нукл.} \cdot \text{м}}$.

9. Впервые проведены экспериментальные исследования спектральной мощности СИ в плотных электрон-ионных кольцах в широкой области спектра $0,4 \div 300 \text{ мкм}$, показано, что в длинноволновом диапазоне $\lambda > 100 \text{ мкм}$ мощность излучения линейно зависит от числа электронов, вплоть до $N_e \approx 10^{13}$.
10. Было показано, что мощность СИ в инфракрасном диапазоне на два порядка превосходит известные специализированные источники СИ, созданные для ИК-спектроскопии.
11. Впервые разработан метод ИК-спектроскопии на основе временной перестройки спектра СИ при сжатии электронного кольца в камере ускорителя.
 - 11.1 На этой основе создан импульсный спектрометр со сканированием спектра за время нескольких миллисекунд с частотным разрешением в длинноволновой ($\nu \approx 100 \text{ см}^{-1}$, $\Delta \nu \approx 5 \text{ см}^{-1}$) области;
 - 11.2 Создан комплекс аппаратуры на пучке СИ для оптических исследований в интервале $4,7 \div 300 \text{ К}$.
12. Впервые были проведены измерения спектров пропускания поликристаллических пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ на подложке из MgO на импульсном спектрометре на пучке СИ в широком интервале температуры $4,7 \div 300 \text{ К}$. Обнаружено проявление энергетической щели. Получено абсолютное значение ее величины $2\Delta(T=0) = 20 [\text{мэв}]$, а также зависимость от температуры, которая близка к зависимости Бардина-Купера-Шриффера.

13. Проведены исследования спектров отражения и пропускания ВТСП пленками в широком интервале длин, волн и температур. Получены оптические постоянные для этих материалов $\text{Re}\epsilon$; $\text{Im}\epsilon$ как функция частот, полученные фононные моды совпадают с результатами других авторов. Впервые обнаружены в спектрах пропускания пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ частоты, соответствующие комбинации основных фононных мод.
14. Впервые обнаружен и исследован процесс фотоиндуцированного поглощения в видимой области спектра в ВТСП пленках, показана корреляция сверхпроводящих свойств материалов с величиной фотоиндуцированного поглощения.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Г.В.Долбилов, В.Д.Инкин, А.К.Красных, А.А.Мозелев, В.П.Саранцев, А.П.Сумбаев, С.И.Тютюнников, А.А.Фатеев, Экспериментальное исследование методики измерения накопления ионов по тормозному излучению электронов, Сообщение ОИЯИ Р9-12963, Дубна, 1980 г.
2. Н.Ю.Казаринов, А.И.Курсков, Э.А.Перельштейн, С.И.Тютюнников, Тормозное излучение релятивистских электронов в электрон-ионных кольцах, ЖТФ, т.56, в.1, ст.195, 1986 г.
3. А.И.Курсков, С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин, Способ измерения среднего заряда ионов в электрон-ионных кольцах, АС СССР № 1132374 от 1 сентября 1984 г., бюлл.ОИПОТЗ 1984 № 48 с.201.
4. А.П.Сумбаев, С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин, А.С.Щеулин, Исследование излучения электрон-ионных колец в области вакуумного ультрафиолета, Сообщение ОИЯИ Р9-90-13, Дубна, 1990 г.
5. Ю.И.Алексахин, В.К.Антропов, А.А.Мальцев, В.И.Миронов, В.Н., В.П.Саранцев, В.А.Свиридов, С.И.Тютюнников и др., Исследование

- влияния ионов на устойчивость электронного кольца при сжатии в аргезаторе КУТИ-20, Сообщение ОИЯИ Р-9-88-424, Дубна, 1988.
6. С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин, Способ определения параметров ионного компонента в электрон-ионных кольцах, АС СССР № 1220556, бюлл.ОИПОТЗ, 1988 г., №14, ст.287.
 7. Н.Ю.Казаринов, Э.А.Перельштейн, А.П.Сумбаев, С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин, Угловое распределение синхротронного излучения электрон-ионного кольца в видимой области спектра, Сообщение ОИЯИ Р9-81-428, Дубна, 1981г.
 8. Н.Ю.Казаринов, Э.А.Перельштейн, А.П.Сумбаев, С.И.Тютюнников, Диагностика электрон-ионных колец по оптическому излучению. Труды совещания по проблемам коллективного метода ускорения, ОИЯИ Д-9-82-664, Дубна, 1982.
 9. Н.Ю.Казаринов, Э.А.Перельштейн, С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин, Способ определения частот бетатронных колебаний кольцевых пучков заряженных частиц, АС СССР № 1032991 от 1 апреля 1983 г., бюлл.ОИПОТЗ, 1984 г., № 44, ст.195.
 10. С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин, Способ диагностики электрон-ионных колец, АС СССР № 1225652, бюлл. ОИПОТЗ, 1986г., № 14, ст.271.
 11. С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин, Устройство для оперативного контроля размеров электронного кольца по свечению остаточного газа, Краткие сообщения ОИЯИ № 18-86, Дубна, 1986 г., ст.57.
 12. Ю.Даниш, В.А.Дроздов, С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин, Применение ПЗС телекамеры для измерения размеров электронных колец по синхротронному излучению, Сообщение ОИЯИ Р9-90-114, Дубна, 1990 г.
 13. С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин, А.С.Щеулин, Фотохронография электрон-ионного кольца ускорителя КУТИ с камерой «АГАТ-СР», Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц Т.1, Дубна, 1987 г., ст.406.

14. С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин, Устройство для диагностики параметров электрон-ионных колец, АС СССР № 1148550, бюлл. ОИПОТЗ, 1986 г., № 7, ст.274.
15. Г.В.Долбилов, В.А.Петров, В.П.Саранцев, А.П.Сумбаев, С.И.Тютюнников, А.А.Фатеев, Измерение параметров электрон-ионного кольца коллективного ускорителя тяжелых ионов методом времени пролета, Сообщение ОИЯИ Р9-80-126, Дубна, 1980 г.
16. 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 г.
17. Г.В.Долбилов, А.П.Мальцев, В.П.Саранцев, А.П.Сумбаев, С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин, Характеристики синхротронного излучения электрон-ионного кольца и перспектива использования, Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц Т.1, Дубна, 1987 г. ст.390-393.
18. Г.В.Долбилов, В.П.Саранцев, А.П.Сумбаев, С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин, Определение абсолютного количества электронов в кольце на прототипе КУТИ, ЖТФ, т.55, в.7, ст.1211, 1985 г.
19. С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин, А.С.Щеулин, Экспериментальная проверка возможности использования синхротронного излучения для инфракрасной спектроскопии высокотемпературных сверхпроводников, Сообщение ОИЯИ Р14-91-144, Дубна, 1991 г.
20. С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин, В.С.Швецов, А.С.Щеулин, Экспериментальная проверка возможности использования синхротронного излучения электронного кольца для инфракрасной спектроскопии твердых тел, ЖТФ, т.62, вып.3, 1992 г., ст.146.
21. Е.С.Кузьмин, Н.Н.Скынтее, С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин, Перестраиваемый источник синхротронного излучения с высокой яркостью в ИК-диапазоне для спектроскопических исследований ВТСП-материалов, Сообщение ОИЯИ Е14-91-542, Дубна, 1991 г.

22. N.N.scintee, S.I.Tiutiunnikov, V.N.Shaliapin, Tunable source of the high-power synchrotron radiation In the Infrared region. SPIE proceedings, vol.3153, 1997, p.253.
23. В.П.Саранцев, С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин, Первые эксперименты по исследованию взаимодействий пленки $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ с синхротронным излучением импульсного накопителя электронов, Сообщение ОИЯИ Р14-92-576, Дубна, 1992 г.
24. Н.И.Балалыкин, С.И.Тютюнников, С.Хромик, В.Н.Шаляпин, Эффекты взаимодействия квазиимпульсного излучения с пленками $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ в видимой и ближней инфракрасной областях спектра, Сообщение ОИЯИ Р14-92-575, Дубна, 1992 г.
25. Н.И.Балалыкин, С.И.Тютюнников, Н.Н.Скынтее, В.Н.Шаляпин, Измерение пропускания синхротронного излучения инфракрасного диапазона пленкой $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ в сверхпроводящей фазе, Сообщение ОИЯИ Р14-93-911, Дубна, 1993 г.
26. Н.И.Балалыкин, С.И.Тютюнников, Н.Н.Скынтее, В.Н.Шаляпин, Измерение пропускания синхротронного излучения инфракрасного диапазона пленкой $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ в сверхпроводящем состоянии, ЖТФ, т.64, вып.8, 1994 г., ст.184.
27. S.I.Tiutiunnikov, V.N.Shaliapin, Measurement of the infrared transmission spectrum of synchrotron radiation through a superconducting $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, NIM sec A. A359 (1995), p.265.
28. Н.И.Балалыкин, Ш.Бенечка, С.И.Тютюнников, С.Хромик, В.Н.Шаляпин, Спектры поглощения тонких пленок $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, Сообщение ОИЯИ Е14-91-207, Дубна, 1991 г.
29. С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин, Поглощение инфракрасного излучения в сверхпроводящем металлооксиде, Сообщение ОИЯИ Р14-91-208, Дубна 1991 г.
30. Н.Н.Скынтее, С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин, С.Н.Шашков, Лабораторный инфракрасный спектрометр для исследований в физике конденсированных сред, Сообщение ОИЯИ Р14-97-150, Дубна, 1997 г.

31. Н.Н.Скынтее, С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин, С.Н.Шашков, Оптические постоянные высокотемпературного сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ в широком спектральном интервале, Сообщение ОИЯИ Р14-97-299, Дубна, 1997 г.
32. Н.И.Балалыкин, С.И.Тютюнников, Ю.Бух, В.Н.Шаляпин, М.Эртель, Обнаружение фотохромного эффекта в высокотемпературных сверхпроводящих пленках в видимой области спектра, Краткие сообщения ОИЯИ №5(68)-94, Дубна, 1994 г.
33. Н.Н.Скынтее, С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин, Исследование ВТСП пленок в области инфракрасной спектроскопии на пучке синхротронного излучения, Сообщение ОИЯИ Р14-95-211, Дубна, 1995 г.
34. S.I.Tiutiunnikov, V.N.Shaliapin, Photochromatic and other optical Effects in the HTSC Films, SPIE-proceeding vol 2967, p.255, 1996.

Рукопись поступила в издательский отдел
2 апреля 1999 года.