



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

9-96-132

На правах рукописи

УДК 621.384

621.391

681.3

M-215

**МАЛЬЦЕВ**

**Анатолий Андреевич**

**МЕТОДЫ**

**ИНФРАКРАСНОЙ СИНХРОТРОННОЙ ДИАГНОСТИКИ  
В УСКОРИТЕЛЬНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ**

**Специальность: 01.04.01 — техника  
физического эксперимента, физика приборов,  
автоматизация физических исследований**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

Дубна 1996

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Ускорители заряженных частиц являются неременным инструментом для исследования в области ядерной физики и физики элементарных частиц. Они используются во многих смежных областях науки и находят широкое применение в промышленности. Задача создания новых ускорителей с высокой энергией, большими токами ускоренных частиц и более широким спектром ускоренных ядер находится в центре внимания многих ускорительных лабораторий мира. Один из исследовавшихся в ОИЯИ путей решения этой проблемы - разработка ускорителя коллективного типа - ускорителя электронно - ионных колец. Создание методов и систем измерения токовых, энергетических и геометрических параметров электронных (электронно-ионных) колец, являлось обязательной частью работ над проектом коллективного ускорителя. Именно работа над проектом коллективного ускорителя стимулировала получение результатов, положенных в основу данной диссертации, связанных с разработкой и реализацией методов и детектирующих систем для неразрушающей, бесконтактной диагностики пучков релятивистских заряженных частиц и исследования быстропротекающих процессов без какого - либо нарушения их режима. Эти методы в дальнейшем нашли свое продолжение и развитие в работе над проектом систем диагностики пучка С-тау фабрики ОИЯИ. Последнее обстоятельство дает основание утверждать, что область применения полученных результатов значительно шире. Большинство описанных в диссертации методов и детектирующих систем может быть использовано в том же или же с небольшими изменениями виде и на других кольцевых ускорителях. В основе этих методов лежит использование эффекта син-

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,  
профессор

ПАНАСЮК  
Вадим Семенович

доктор технических наук,  
профессор

КУШИН  
Виктор Владимирович

доктор технических наук,  
профессор

ЗАЙЦЕВ  
Лев Николаевич

Ведущая организация - Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, г. Москва.

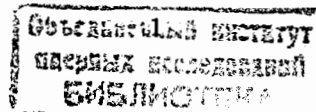
Защита диссертации состоится " " 1996 года  
в " " часов на заседании диссертационного совета  
Д-047.01.02 в Лаборатории высоких энергий Объединенного  
института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан " " 1996 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук,  
профессор

М.Ф. Лихачев



хротронного излучения, возникающего в электронном кольцевом ускорителе - компрессоре (адгезаторе) сильноточных колец коллективного ускорителя на стадии формирования кольцевого сгустка, когда инжектированный в компрессор электронный пучок отклоняется от прямолинейного пути магнитным полем нулевой ступени, и в процессе сжатия электронного кольца, когда заряженные частицы многократно проходят по сжимающейся спиральной орбите в поле магнитных ступеней. Сложность проблемы заключалась в том, что из-за низкой энергии электронов спектр синхротронного излучения, генерируемого в адгезаторе коллективного ускорителя, находился в основном в инфракрасном диапазоне длин волн, кроме этого, к моменту начала работ над проектом диагностики коллективного ускорителя полностью отсутствовали какие-либо известные методы инфракрасной синхротронной диагностики, которые можно было бы использовать на коллективном ускорителе, не было также измерительных систем, которые можно было бы применить для получения необходимой информации.

Целью диссертационной работы является: дальнейшее развитие и совершенствование методов неразрушающей диагностики ускоряемых пучков, в частности, разработка и исследование методов инфракрасной синхротронной диагностики как нового направления в физическом и ускорительном эксперименте; разработка и исследование оптических систем, интегральных и координатных детекторов, обеспечивающих реализацию методов инфракрасной синхротронной диагностики и повышение информативности регистрирующих систем; наиболее полная реализация возможностей, особенностей и явлений, возникающих при генерации синхротронного излучения различными сгустками заряженных частиц, а также обусловленных особенностями ускорительного эксперимента.

### Научная новизна и практическая значимость

1. Впервые выполнено теоретическое и экспериментальное исследование физического механизма и особенностей излучения кольцевого сгустка электронов в процессе его сжатия в компрессоре коллективного ускорителя ОИЯИ.

2. Впервые предложены, разработаны и реализованы на практике бесконтактные методы исследования пространственных и временных характеристик электронных сгустков, основанные на проведенных исследованиях особенностей кольцевого сгустка в компрессоре, проанализированы возможности таких методов, разработана техника физических экспериментов для их реализации.

3. Впервые сформулированы общие и конкретные требования к системам вывода, транспортировки и регистрации инфракрасного синхротронного излучения, способным обеспечить с необходимой точностью и в требуемом объеме диагностику электронного (электронно-ионного) кольцевого сгустка.

4. Впервые разработаны рекомендации по новейшим инфракрасным оптическим материалам и приемникам, удовлетворяющим требованиям ускорительного эксперимента.

5. Впервые разработаны, созданы, исследованы и внедрены в ускорительную практику уникальные элементы и системы широкополосной, длиннофокусной инфракрасной оптики:

5.1. Решена проблема вывода синхротронного излучения в широком интервале длин волн оптического спектра из вакуумной камеры ускорителя, в том числе и длительно прогреваемой до температуры  $\sim 400^\circ\text{C}$ , для чего разработана методика создания прогреваемых инфракрасных окон.

5.2. Создана длиннофокусная зеркально-линзовая оптическая система для инфракрасной области  $\sim 1-8$  мкм.

5.3. Построен двухметровый длиннофокусный зеркальный



оптический тракт для спектральной области  $\sim 0.3-40$  мкм (инфракрасный телескоп).

6. Впервые решена проблема юстировки и исследования разрешающей способности оптических систем и объективов, предназначенных для работы в средневолновой и длинноволновой инфракрасных областях оптического диапазона, благодаря разработанному способу юстировки, основанному на использовании эффекта термического гашения люминисценции.

7. Впервые разработаны, созданы и исследованы интегральные и координатные многоэлементные инфракрасные детекторы, удовлетворяющие условиям и требованиям физического эксперимента на ускорителе.

8. Впервые разработан и создан базовый автоматизированный комплекс инфракрасных детекторов синхротронного излучения, проведена его настройка и калибровка.

9. Впервые разработана и реализована методика калибровки измерителей инфракрасного синхротронного излучения на тепловом эталонном источнике, с использованием широкого диапазона длин волн ( $\Delta\lambda/\lambda \gg 1$ ), обеспечившая прецизионные измерения абсолютного числа ускоряемых заряженных элементарных частиц в пучке.

10. Впервые в ОИЯИ на коллективном ускорителе тяжелых ионов обнаружено и зарегистрировано синхротронное излучение, измерена его интенсивность и угловая расходимость, измерены токовые и геометрические параметры кольцевого сгустка, сделана оценка энергии частиц, исследован процесс сжатия кольца, проведена обработка экспериментальных результатов и их анализ, с целью определения возможности использования сформированных кольцевых электронных сгустков для захвата, удержания и коллективного ускорения тяжелых ионов электронными кольцами.

11. Впервые получены экспериментальные результаты, давшие большой и важный вклад в развитие коллективного ме-

тода ускорения в ОИЯИ.

12. Выполнена оценка возможности использования результатов исследований в ускорительном эксперименте и технике, в том числе и для прикладных целей.

### На защиту выносятся:

1. Методы неразрушающей, бесконтактной диагностики пучков элементарных заряженных частиц и исследования быстропротекающих процессов, основанные на использовании синхротронного, преимущественно инфракрасного излучения широкого спектрального диапазона. Анализ характеристик инфракрасного синхротронного излучения низкоэнергетичных релятивистских электронов в компрессоре позволяет эффективно получать информацию о параметрах пучков и может быть положен в основу бесконтактных, неразрушающих методов исследования характеристик пучков и быстропротекающих при ускорении процессов. Такой анализ позволяет отдельно определять: число электронов; пространственное положение кольцевого сгустка и его размеры; пространственное и угловое распределение электронов в пучке, оценить энергию электронов и число ионов.

2. Теория и принципы построения детектирующих систем с использованием синхротронных инфракрасных методов определения параметров и характеристик ускоряемых пучков.

3. Результаты разработки интегральных и координатных детекторов, предназначенных для реализации методов синхротронной инфракрасной диагностики в ускорительном эксперименте.

4. Методы калибровки и результаты разработки метрологического обеспечения синхротронных инфракрасных измерительных систем, включая анализ их точности. Измерение в широком температурном интервале и совместный анализ экспериментальных температурных зависимостей спектраль-

ной чувствительности различных типов фотоприемников, позволяет определять абсолютное число электронов в широком интервале их энергий и радиусов орбит вращения.

5. Результаты разработки и исследований элементов и систем инфракрасной оптики. Инфракрасное синхротронное излучение позволяет исследовать ступки заряженных частиц без использования специальных оптических систем с высокой прозрачностью и разрешающей способностью. Использование последних повышает чувствительность синхротронной диагностики, но значительно сужает рабочий спектральный диапазон и ужесточает требования к оптическому качеству окон и элементов оптических систем.

6. Способ юстировки и проверки разрешающей способности инфракрасной оптики, работающей в длинноволновом инфракрасном спектральном диапазоне.

7. Способ создания высоковакуумных прогреваемых окон.

8. Оригинальные устройства, имеющие самостоятельную ценность, в том числе: инфракрасные высоковакуумные окна, широкополосные длиннофокусные оптические тракты, прецизионные измерители температуры, координатные детекторы наблюдения мгновенной конфигурации теплового объекта и его перемещения в пространстве, формы потока.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на научных конференциях в нашей стране и за рубежом. В частности, на Международной конференции "Температура 89" (г. Зуль, Германия, 1989 г.), Всесоюзной научно-технической конференции "Измерительные и информационные системы" (С-Петербург, 1991 г.).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 17 печатных работах, в том числе в двух авторских свидетельствах на изобретения.

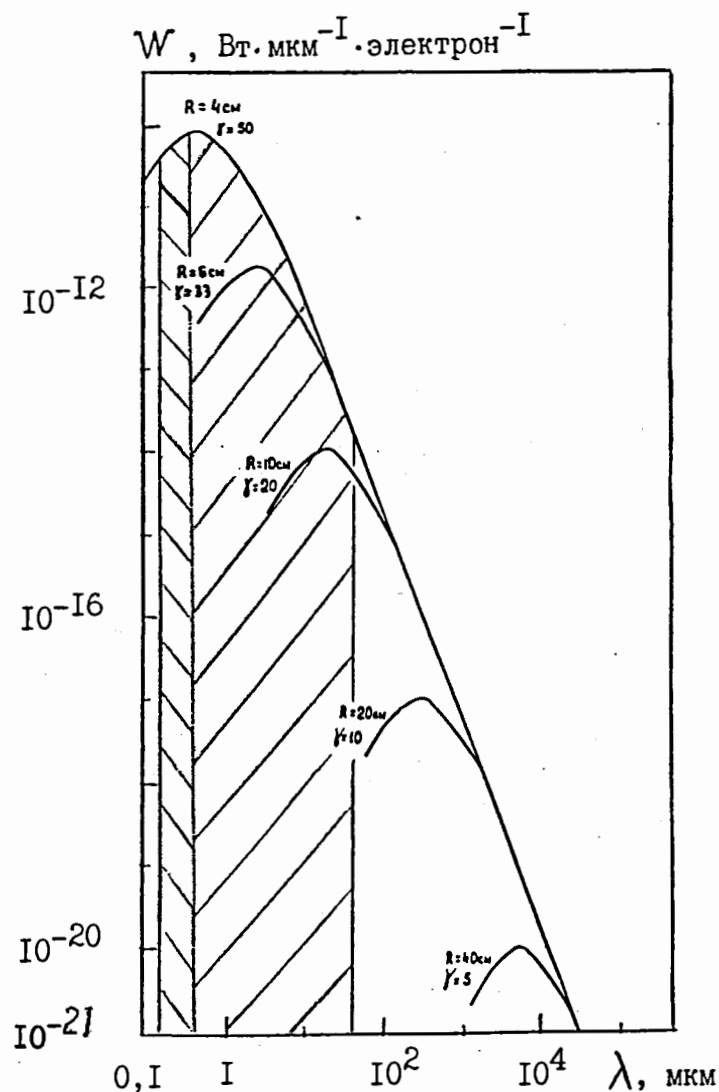


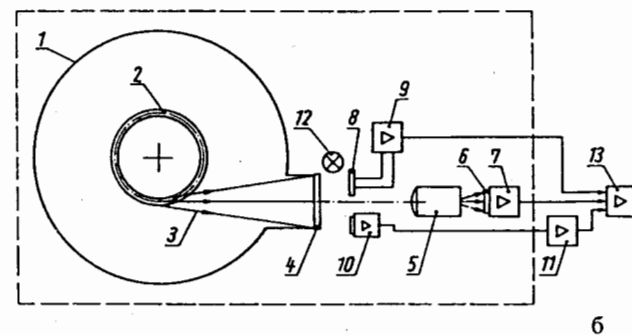
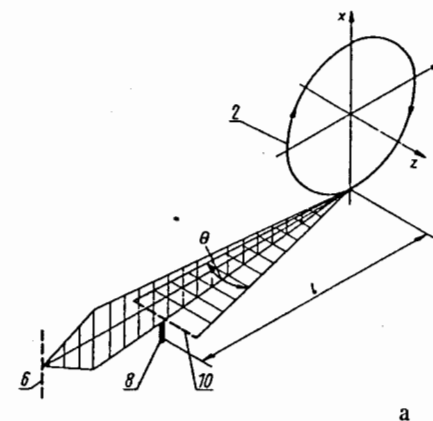
Рис. 1. Рассчитанное спектральное распределение мощности синхротронного излучения электронного кольца в процессе его сжатия в адгезаторе с радиуса 40 см до 4 см при начальной энергии электронов  $\gamma = 5$ . Штриховкой отмечены видимая (0,3-0,7 мкм) и инфракрасная (0,7-40 мкм) спектральные области.

и протонных, с  $E \sim 200$  ГэВ,  $R \sim 100$  м), которые невозможно диагностировать с помощью аппаратуры видимого диапазона, в основном используемой в практике физического эксперимента.

Следует отметить, что методы диагностики протонных пучков находятся в стадии разработки. Известны только примеры видимой синхротронной диагностики, реализованной на кольцевом протонном ускорителе. Поэтому практически оправданным представляется использование методов инфракрасной синхротронной диагностики электронных пучков и для протонных пучков, несмотря на определенный формализм подхода и произвольность некоторых допущений. Основные результаты, изложенные в главе, опубликованы в работах /1-3/.

Во второй главе кратко излагаются методы измерения токовых, геометрических и энергетических параметров кольца заряженных частиц, угловой расходимости синхротронного излучения. Рассматривается общая схема компрессора электронных колец и информационно-измерительных систем диагностики параметров кольцевого пучка. Приводятся рисунки, поясняющие пространственную структуру испускания синхротронного излучения и его регистрации детектирующими блоками (рис.2,а), а также схема размещения этих блоков на ускорителе (рис.2,б).

Поскольку пучок заряженных частиц в ускорителе можно рассматривать как набор осцилляторов с тремя степенями свободы: продольной (синхротронной) и двумя поперечными (бетатронными) - радиальной и аксиальной, то система измерения геометрических параметров пучка должна обеспечивать измерение соответствующих размеров пучка, а также возможность наблюдения динамики развития этих величин.



**Рис. 2.** Схемы: а - поясняющая пространственную структуру испускания синхротронного излучения и его регистрации, б - экспериментальной установки.

1 - компрессор (адгезатор) электронных колец, 2 - электронное кольцо, 3 - синхротронное излучение, 4 - окно, 5 - оптический тракт, 6 ("Короткая линейка") и 10 ("Длинная линейка") - многоэлементные детектирующие блоки; 7, 9 и 11 - усилители, 8 - приемник-монитор ("СИ-монитор") с чувствительной площадью  $S'$ , 12 - контрольный источник (светодиод), 13 - блоки обрабатывающей электроники.

Метод измерения геометрических параметров пучка и его положения в пространстве ускорителя, а также исследование динамики развития пучка в процессе сжатия основан на использовании инфракрасных средств вывода синхротронного излучения из камеры ускорителя, его транспортировки и регистрации. Метод заключается в том, что изображение сечения пучка, попавшего в поле зрения оптического канала, фокусируется в требуемом масштабе на детектирующий блок с линейным расположением чувствительных элементов и регистрируется им. Метод обеспечивает пространственное разрешение с требуемой точностью (в ближней инфракрасной области разрешающая способность  $\sim 7 \text{ мм}^{-1}$ ), временное разрешение лучше 1 мкс, измерение равновесного радиуса  $R$  кольца и  $R(t)$ -траектории (для случая сжимаемого кольцевого сгустка) с точностью  $\sim 2,5\%$ .

Важным параметром для диагностики ускоряемых пучков является угловая расходимость синхротронного излучения в направлении, перпендикулярном плоскости орбиты вращения электронов. Измерение угловой расходимости синхротронного излучения позволяет не только более точно оценить интенсивность синхротронного излучения, но и дает информацию об энергии ускоряемых частиц и их угловом распределении (аксиальные бетатронные колебания). Известно, что в сильно-точных, загруженных ионами, электронных кольцах характер распределения синхротронного излучения по углу в направлении, перпендикулярном плоскости электронной орбиты, определяется в основном бетатронными колебаниями электронов в кольце. Частота бетатронных колебаний зависит от положительного заряда ионов, накопленного в кольце. Таким образом, измерив угловое распределение потока синхротронного излучения многоэлементным однокоординатным детектором, длина которого перекрывает большую часть потока синхротронного излучения в направлении, перпендикулярном

плоскости вращения частиц, можно получить информацию об ионной компоненте кольца, тогда как интеграл от этого распределения прямо связан с числом электронов в кольце. Метод измерения функции распределения потока синхротронного излучения относительно орбитальной плоскости ускоряемых частиц многократно за цикл ускорения основан на использовании скоростного ( $\sim 1 \text{ мкс}$ ) интегрального координатно-чувствительного детектора, установленного перпендикулярно орбитальной плоскости ускоряемых частиц и перекрывающего весь поток синхротронного излучения.

Методика определения числа электронов в кольцевом сгустке по измеренной мощности их синхротронного излучения основана на:

- прямой зависимости интенсивности синхротронного излучения от числа частиц,
- регистрации излучения в спектральной области  $\lambda \geq \lambda_c$ , когда интенсивность излучения практически не зависит от энергии заряженных частиц;
- регистрации излучения на двух и более участках спектрального распределения при  $\Delta\lambda/\lambda \geq 1$ ;
- использовании детекторов с разными характеристиками спектральной чувствительности и природой фотоэффекта;
- измерении интенсивности потока синхротронного излучения с учетом характера его угловой расходимости;
- сравнении интегральных потоков синхротронного излучения и излучения эталонного теплового источника, регистрируемых в одинаковой, широкой спектральной области  $\Delta\lambda/\lambda \geq 1$ , с учетом подобия спектров синхротронного и теплового излучений;

Разработано два метода измерения интенсивности синхротронного излучения: приближенный, когда измерения ведутся одноэлементными детекторами, и точный, когда система датчиков охватывает большую часть потока. В простоте аппаратуры - достоинство первого способа измерений, недостаток - отсутствие оперативной, для каждого импульса ускорителя, информации о характере распределения электронов в сгустке и угловой расходимости потока синхротронного излучения. Необходимость использования измеренного ранее, в других сеансах работы ускорителя, углового распределения для оценки интеграла синхротронного излучения с неизбежностью ухудшает точность измерения числа электронов в кольце в простом однодатчиковом варианте измерений.

Для реализации методов синхротронной инфракрасной диагностики электронного (электронно-ионного) кольцевого сгустка были разработаны инфракрасные оптические системы для вывода из адгезатора синхротронного излучения, его каналирования на заданное расстояние и передачи на детектирующий блок, а также разработаны и созданы ряд интегральных и координатных детекторов, явившихся основой информационно - измерительных систем синхротронной инфракрасной диагностики.

При выборе детекторов основными требованиями являлись:

1. Высокая спектральная чувствительность в области длин волн  $\lambda = 0,6 \div 40$  мкм.
2. Временное разрешение (быстродействие)  $\tau \leq 0,1 \div 5 \cdot 10^{-6}$  с.
3. Простота в эксплуатации (отсутствие сложных криогенных систем).

Были рассмотрены различные типы инфракрасных приемников и с учетом выше названных требований было выбрано

пять основных - фотодиод - *Si*; фотосопротивления - *PbSe*, *GeAu*, *InSb*; пироэлектрик - *LiNbO<sub>3</sub>*, спектральная чувствительность которых перекрывает широкий диапазон длин волн оптического спектра от видимой до далекой инфракрасной области. Эти приемники были использованы в автоматизированных измерительно-информационных системах в различных модификациях одноэлементных и координатных детектирующих блоков, выполняющих конкретную задачу и чувствительных в заданном участке инфракрасной области спектра.

Регистрация синхротронного излучения электронов могла вестись всеми измерительными системами одновременно либо каждой в отдельности. Интенсивность излучения регистрировалась детекторами и выдавалась на выходе в виде аналогового сигнала, который предварительно усиливался до необходимой величины и по кабельной линии связи подавался на пульт управления ускорителем, где преобразовывался в цифровой вид и обрабатывался на ЭВМ. Измерительные каналы позволяли многократно (до 10 раз) в течение цикла сжатия кольца в компрессоре коллективного ускорителя регистрировать интенсивность синхротронного излучения. Длительность stroba измерений - 0,1 мкс. Интервал времени между соседними измерениями мог меняться от 60 мкс и более при полной длительности импульса синхротронного излучения около одной мсек. Выделенная пунктиром на рис. 2,6 часть блок-схемы относится к детектирующей аппаратуре, размещенной в ускорительном зале в непосредственной близости от адгезатора. Основные результаты, изложенные в главе, опубликованы в работах /2-8/.

В третьей главе описаны разработанные инфракрасные широкополосные оптические системы, обеспечивающие вывод из вакуумной камеры компрессора синхротронного излучения, с последующей его транспортировкой на заданное расстояние и фокусировкой на детектор. Для вывода инфракрас-



сного синхротронного излучения из прогреваемой вакуумной камеры ускорителя специально разработан способ создания высоковакуумных окон, реализованный на практике в виде окна из поликристаллического фтористого магния (оптическая керамика КО-1). Окно закреплено в оправе из нержавеющей стали с помощью диффузионной сварки и выдерживает многократный длительный (более 24 часов) прогрев при температуре 400-600 °С. Представлена конструкция оправы, позволяющая снимать механические напряжения и обеспечивающая крепление окна на вакуумной камере через металлическую прокладку, не нарушая герметичности перехода "окно-оправа".

Для транспортировки и передачи синхротронного излучения широкого спектрального диапазона на детектор специально разработаны, созданы и реализованы в ускорительной практике два варианта длиннофокусных широкополосных оптических систем - зеркально-линзовая и зеркальная.

В зеркально-линзовой системе (см. рис.3) все активные элементы (линзы) выполнены из разных видов оптической керамики ( $MgF_2$ ,  $ZnSe$ ,  $CaF_2$ ,  $BaF_2$ ,  $LiF$ ) и безкислородных стекол. Рабочий диапазон длин волн - 1-8 мкм, фокусное расстояние - 320 мм, относительное отверстие - 1:5,3, габариты оптической системы - 290 × 300 × 100 мм.

Активные элементы зеркальной оптической системы, фотография которого показана на рис.4, выполнены в виде сферических зеркал, у которых отражение излучения происходит от слоя серебра, нанесенного путем напыления в вакууме на стеклянную поверхность сферической формы, что позволило обеспечить спектральную широкополосность оптического канала в пределах 0,3-40 мкм. Фокусное расстояние 1800 мм при относительном отверстии 1:26, разрешающая способность - 7 мм<sup>-1</sup>, габариты - 2000 × 360 × 370 мм. Основные результаты, изложенные в главе, опубликованы в /9-14/.

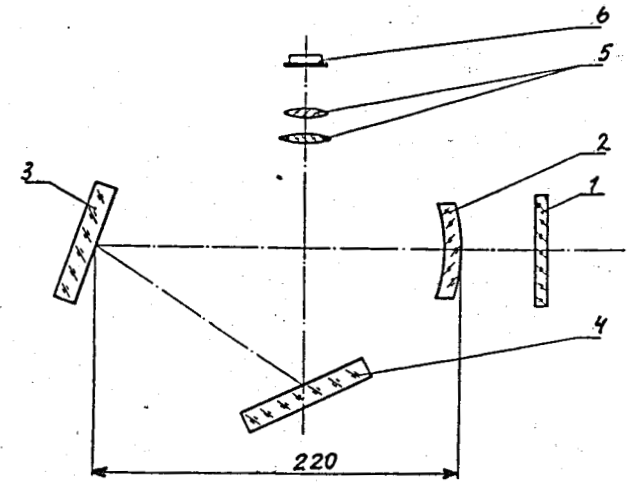


Рис. 3 Оптическая схема зеркально-линзовой системы: 1 - окно; 2 - объектив; 3, 4 - отклоняющие зеркала; 5 - коллектив; 6 - инфракрасный детектор.

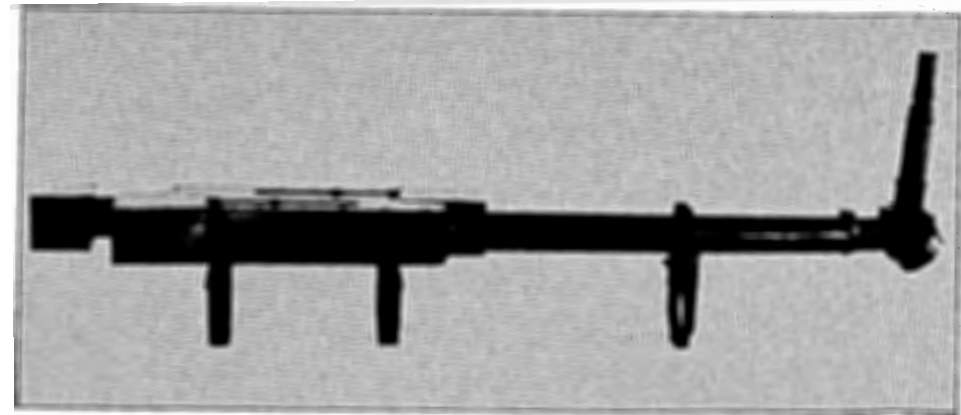


Рис. 4 Общий вид инфракрасной оптической системы с детектором на выходе.

В четвертой главе представлены примеры результатов практической реализации метода инфракрасной синхротронной диагностики геометрических параметров ускоряемых пучков.

Система измерения геометрических параметров кольца и динамики его сжатия (рис.5) - это многоканальный регистратор синхротронного излучения, предназначенный для измерений (рис.6) радиуса кольца  $R$  в процессе сжатия ( $R$  - траектории), размеров малого сечения ( $a_z, a_R$ ) кольцевого сгустка и распределения плотности частиц в кольце. Детектор выполнен в виде многоэлементного однокоординатного блока. В состав системы входит инфракрасный оптический тракт, который разработан и создан специально для ускорителя электронно-ионных колец. Основная задача для координатно - чувствительной детектирующей системы - измерение радиуса кольца, как параметра, определяющего точность измерения интенсивности синхротронного излучения. Кроме того, система позволяет контролировать в динамике плотность распределения электронов в кольце и пространственные особенности кольцевого сгустка в зависимости от радиуса орбиты, энергии электронов, числа электронов и ионов в сгустке.

В работе дается описание двух координатных многоканальных детектирующих автоматизированных информационно - измерительных систем, позволивших измерять геометрические параметры кольца в адгезаторе и исследовать динамику его формирования на заключительной стадии сжатия. В системах использованы многоэлементные инфракрасные фотоприемники из  $InSb$  и  $PbSe$ . Конструктивно детекторы существенно отличаются друг от друга. Отличие обусловлено тем, что один из детекторов ( $InSb$ ) имеет криогенную систему для охлаждения элементов до температуры жидкого азота ( $T_{раб.} = 77^{\circ}K$ ), а другой ( $PbSe$ ) - охлаждается с помощью термо - электрического микрохолодильника ( $T_{раб.} = 260^{\circ}K$ ).

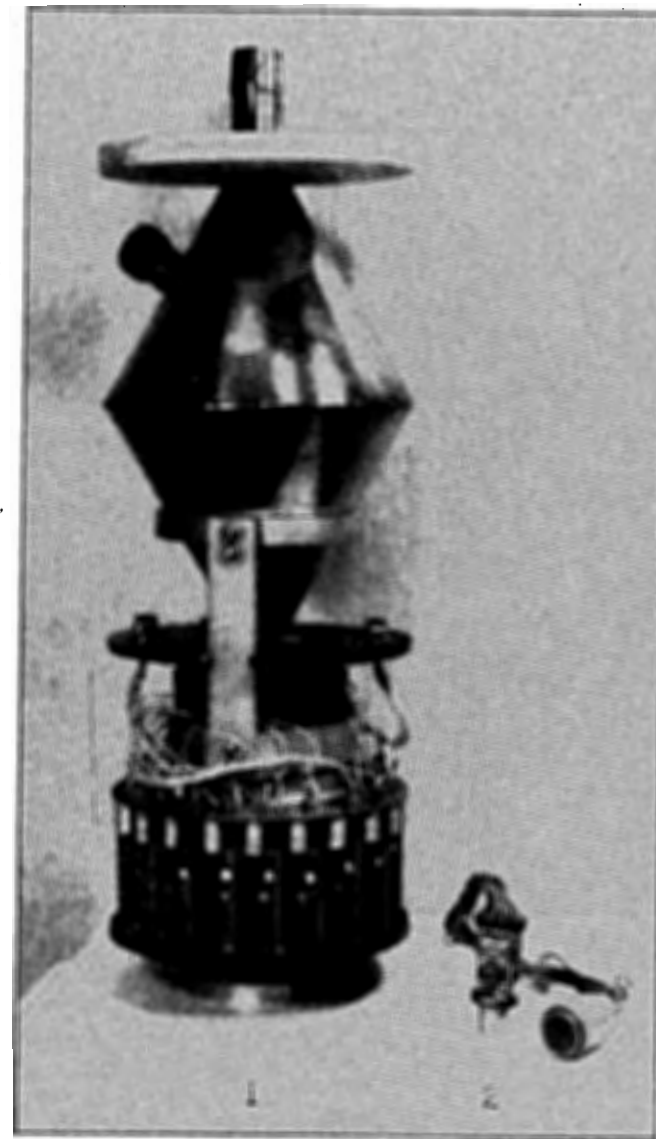


Рис. 5. Многоэлементные детекторы из  $InSb$  (1) и  $PbSe$  (2) с блоками предусилителей и криогенной системой.

Измерительные системы входили в число основных (базовых) устройств неразрушающей диагностики пучка и находились в постоянной эксплуатации на прототипе коллективного ускорителя тяжелых ионов (ПКУТИ) и КУТИ-20. С помощью этих систем регулярно проводились измерения геометрических параметров кольцевого сгустка и исследовалась динамика его развития. Работа систем иллюстрируется результатами экспериментов и исследований, один из которых представлен на рис.6. Основные результаты, изложенные в главе, опубликованы в работах /2-4,6,7/.

**Пятая глава** посвящена описанию координатного инфракрасного детектора, разработанного и созданного для реализации метода высокоточного измерения интенсивности синхротронного излучения (а значит и определения числа электронов в сгустке), а также определения энергии, углового распределения электронов в сгустке и числа ионов, с учетом характера угловой расходимости потока относительно орбитальной плоскости электронов в направлении, перпендикулярном медианной плоскости кольцевого сгустка.

В системе оперативного контроля компонент электронно-ионного кольца по его синхротронному излучению в качестве детектора синхротронного излучения была использована многоэлементная линейка из фотосопротивлений на основе селенида свинца. Такая линейка из быстрых фотоприемников с временным разрешением  $\sim 1 \div 3$  мкс, работающая на линии с ЭВМ, позволяет обеспечивать получение оперативной информации о различных параметрах электронного и электронно-ионного кольцевого сгустка в процессе его развития в каждом цикле срабатывания ускорителя, что, в свою очередь, позволяет использовать эту информацию при настройке ускорителя, поддержании и контроле оптимального режима его работы.

Особенностью детектора является то, что он модульный. Всего имеется 6 модулей. Такая конструкция позволяет проводить оперативную замену при возникающей неисправности элементов.

Разработанная система позволила повысить точность измерения интенсивности синхротронного излучения и тем самым точность определения числа частиц в кольцевом сгустке. Геометрический фактор  $G_{СИ}$ , входящий в формулу регистрируемой мощности синхротронного излучения, определяется со средней квадратичной погрешностью 1.8 % и измеряется одновременно с регистрируемой интенсивностью. С вводом системы автоматизировался процесс измерения электронно-ионных компонент в кольце, его токовых и энергетических параметров. В системе в основном использовались серийные блоки ЗЦП и буферной памяти. Детектирующий блок светочувствительных элементов, блок усилителей и блок управления разработаны специально для данной задачи. Настройка и калибровка каналов системы осуществлялась на стенде с тепловым источником, в качестве которого была применена светоизмерительная лампа СИРШ 6-100. С помощью модулятора имитировался импульс излучения, близкий по длительности, интенсивности и спектральному составу к синхротронному излучению ускорителя. Основные результаты, изложенные в главе, опубликованы в работах /7-8/.

**Шестая глава** посвящена описанию примера реализации метода измерения числа электронов, который основан на использовании интегральных измерений потоков синхротронного излучения и излучения вольфрамовой ленточной лампы, предварительно прокальброванной по модели абсолютно черного тела (АЧТ). Число электронов определяется по интенсивности синхротронного излучения, регистрируемого в диапазоне длин волн  $\lambda \geq \lambda_c$ , причем  $\lambda_c > 1$  мкм. Основным достоин-

ством этого метода является минимизация ошибок измерения числа электронов в кольце, т.к. интенсивность синхротронного излучения в области  $\lambda \geq \lambda_c$  слабо зависит от энергии электронов, погрешность определения которой вносит основной вклад в ошибку измерений.

В формулу для вычисления абсолютного числа электронов  $N_e$  в кольце

$$N_e = UK^{-1}f(E, R, G, \lambda), \quad (2)$$

измеряемого с помощью синхротронного излучения, входит калибровочная константа (интегральная чувствительность) детекторов  $K$ ,  $U$  - величина сигнала на выходе измерительной системы, а также  $f$  - функция, зависящая от энергии электронов  $E$ , равновесного радиуса  $R$ , геометрии регистрации  $G$ , спектрального диапазона  $\lambda$ .

В общем случае электрический сигнал на приемнике излучения будет:

$$U_{\text{СИ}} = N_e K G_{\text{СИ}}^{-1} \int_0^{\infty} w(\lambda) \varepsilon(\lambda) \tau_{\lambda} d\lambda, \quad (3)$$

где  $\varepsilon(\lambda)$  - относительная спектральная чувствительность приемника,  $\tau_{\lambda}$  - пропускание промежуточных оптических сред.

Для определения абсолютного числа электронов необходимо, чтобы измерительный канал с приемником синхротронного излучения был прокалиброван на эталонном источнике с известной интенсивностью и спектральными характеристиками, желательно близкими к спектральному распределению синхротронного излучения коллективного ускорителя. Таким эталонным источником может быть либо кольцевой электронный ускоритель; например синхротрон, с известной спектральной плотностью синхротронного излучения, либо тепловой источ-

ник, у которого, как известно, характер спектрального распределения близок характеру распределения синхротронного излучения и имеется хорошо разработанная теория расчета его параметров. Были исследованы и реализованы оба варианта /5,15/.

Для калибровки на тепловом источнике был использован вольфрамый излучатель. При калибровке на светоизмерительной лампе с вольфрамый излучателем для практических расчетов интенсивности используются законы излучения абсолютно черного тела, но вводится коэффициент "серости", зависящий от материала излучателя. Для проведения калибровки был рассчитан энергетический спектр излучения вольфрама при температурах 1270, 1770 и 2680 °K в диапазоне длин волн от 0,3 до 6 мкм. Выбор температурных значений определялся условием соответствия спектров теплового излучения вольфрама и синхротронного излучения электронов в адгезаторе на радиусах 4,42; 4,02 и 3,58 см.

Главная задача диагностики кольцевого сгустка в адгезаторе коллективного ускорителя - нахождение величин, определяющих темп ускорения: напряженности собственного электрического поля (которая определяется из числа электронов) и геометрических параметров кольца. Наиболее важно знать эти параметры на заключительной стадии сжатия электронного кольца (на радиусе  $R = 4 \div 4,5$  см), где должна осуществляться загрузка электронного кольца ионами, вывод нагруженного кольца в область линейно спадающего магнитного поля и ускорение ионов до энергии  $1 \div 5$  МэВ/нуклон.

Для измерения интенсивности синхротронного излучения использовались интегральные приемники Si, PbSe, InSb, GeAu,  $LiNbO_3$ , но для прецизионных измерений были использованы только два приемника из Si и PbSe, с особой тщательностью откалиброванные и установленные в непосредственной близости от окна адгезатора (~1м от малого сечения кольца) под



нулевым углом к медианной плоскости кольцевого сгустка. Перед приемником из  $PbSe$  был установлен отрезающий фильтр - ослабитель из просветленного германия, прозрачный для излучения в спектральном диапазоне 2 - 2,5 мкм. Влияние атмосферы (плотность воздуха, влажность, запыленность) не учитывалось из-за малого расстояния между детекторами и окном адгезатора. Результат измерения  $N_e$  в одном цикле ускорения показан на рис.6.

Работу автоматизированного измерительного комплекса инфракрасной синхротронной диагностики токовых, геометрических и энергетических параметров ускоряемого пучка заряженных частиц иллюстрирует рис.6. На рисунке в виде таблицы представлены результаты 10 измерений, проводимых через 100 мкс тремя различными информационно - измерительными системами в течение 1 мс (за один цикл ускорителя). "Короткая линейка" характеризует работу системы измерения геометрических параметров кольца. "Длинная линейка" измеряет интенсивность синхротронного излучения и его угловое распределение относительно орбитальной плоскости частиц. "СИ-монитор" измеряет абсолютное число электронов. На нижних гистограммах можно видеть размер малого сечения кольцевого сгустка и характер распределения электронов по сечению (левая гистограмма) и угловое распределение синхротронного излучения (правая гистограмма) в один из 10 моментов времени сжатия кольца. По оси абсцисс отложен линейный размер детектирующих блоков. У "короткой линейки" шаг  $\sim 1$  мм. У "длинной линейки" шаг  $\sim 4$  мм. По оси ординат отложена величина сигнала с каждого элемента детекторов в каналах. Программные возможности позволяют строить корреляционные зависимости между различными переменными.

При анализе экспериментальных результатов были изу-

$\lambda_c$ , и на сравнении интегральных потоков синхротронного и теплового излучений, регистрируемых на нескольких участках их спектрального распределения в широком диапазоне длин волн при  $\Delta\lambda/\lambda \geq 1/2,5,16/$ .

2.2. Метод измерения числа электронов и их углового распределения в пучке, оценки энергии электронов, а также измерения числа понов, основанный на измерении угловой расходимости потока синхротронного излучения относительно медианной плоскости кольцевого сгустка /2-4,7/.

2.3. Метод измерения геометрических параметров кольцевого сгустка - профиля пучка, распределения частиц в пучке, равновесного радиуса кольца и его положения в пространстве ускорителя, основанный на использовании инфракрасных средств вывода из ускорителя синхротронного излучения, его транспортировки и регистрации /3,4,7,15/.

3. Для реализации методов инфракрасной синхротронной диагностики впервые разработан, создан и использован на коллективном ускорителе ОИЯИ в качестве базового детектирующий автоматизированный комплекс прецизионных измерительно - информационных систем, обеспечивший проведение коррелированных измерений параметров электронного (электронно - ионного) кольцевого сгустка в процессе его сжатия /3,4,6,7/.

4. Впервые для кольцевых ускорителей, спектр синхротронного излучения которых в основном находится в инфракрасной области, решены проблемы вывода, оптического канализирования и детектирования этого излучения:

4.1. Разработан и реализован способ создания высоковакуумных прогреваемых инфракрасных окон, защищенный двумя авторскими свидетельствами /9-11/.

4.2. Разработаны, созданы и исследованы линзовые и зеркальные широкополосные длиннофокусные оптические системы, позволяющие обеспечить с минимальными потерями ка-

налирование и передачу на одноэлементные и координатные детекторы синхротронного излучения в спектральном диапазоне  $\Delta\lambda \sim 0,3 - 40$  мкм /12-14/.

4.3. Решена проблема юстировки и исследования разрешающей способности оптических систем и объективов, предназначенных для работы в средневолновой и длинноволновой инфракрасных областях оптического диапазона, благодаря впервые разработанному способу юстировки, основанному на использовании эффекта термогашения люминисценции /13,14/.

4.4. Разработаны, созданы, исследованы и внедрены в ускорительную практику в качестве базовых интегральные и координатные детекторы синхротронного, преимущественно инфракрасного излучения /2-7/.

5. Исследованы вопросы точности интегральных и координатных синхротронных инфракрасных детекторов и разработано их метрологическое обеспечение. Разработан метод калибровки прецизионных детекторов абсолютного числа электронов /2,15-17/.

6. Впервые в ОИЯИ на компрессоре коллективного ускорителя обнаружено и зарегистрировано синхротронное излучение и с его помощью осуществлена неразрушающая диагностика и исследование электронного (электронно-ионного) кольцевого сгустка в процессе его формирования /4/.

7. Получены новые методические и практические результаты в области неразрушающей диагностики и исследования ускоряемых пучков, внесшие существенный вклад в развитие коллективного метода ускорения тяжелых ионов электронными кольцами, а также в области разработки и создания новых приборов и автоматизированных систем для физических исследований /1-7/.

8. Намечены и предложены пути решения ряда существующих проблем создания автоматизированных систем неразрушающей диагностики пучков электрон-позитронных и протон-

ных ускорителей при помощи разработанных и представленных в диссертационной работе методов и средств инфракрасной синхротронной диагностики /1,3,7,8/.

Использование этих инфракрасных синхротронных методов и средств для диагностики и исследований на протонных кольцевых ускорителях, для научных и прикладных целей, в частности, в таких областях как метрология, высокотемпературная сверхпроводимость и биология - открывает новую страницу в практическом применении синхротронного излучения, указывает пути дальнейшего развития результатов диссертационной работы как нового научного направления.

Важными достоинствами детекторов инфракрасной диагностики, особенно по сравнению с традиционными детекторами оптического излучения на основе ФЭУ, являются: 1 - спектральная и динамическая широкополосность; 2 - компактность и высокая помехозащищенность от интенсивных импульсных электромагнитных, радиационных и световых помех, что позволяет устанавливать детектирующие блоки в непосредственной близости от ускорителя; 3 - высокая стабильность параметров (чувствительности) во времени (год и более); 4 - высокий темп набора информации, позволяющий вести диагностику и исследование ускоряемых пучков в динамике их развития, вести регистрацию быстропротекающих процессов.

9. Разработанные методы прецизионных измерений потока теплового излучения и реализующие эти методы инфракрасные автоматизированные детектирующие системы, а также их отдельные узлы и элементы имеют самостоятельную ценность и значение и могут быть использованы в различных областях науки и промышленности, например: в медицине, для создания инфракрасного томографа, абсолютно безопасного для пациента; металлургии; в системах, отслеживающих технологические процессы и экологический контроль окружающей среды /3,9-17/.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

1. Мальцев А.А. Использование ИК-методов для диагностики пучков заряженных частиц. - В кн.: Тез. докл. Всесоюзной научно-технической конференции "Измерительные и информационные системы (ИИС-91)". С.-Петербург, 1991, с.149.
2. Мальцев А.А. Методика измерения тока электронных колец КУТИ по синхротронному излучению в ИК-области. - Сообщение ОИЯИ 9-86-289. Дубна, 1986.
3. Мальцев А.А. Инфракрасная синхротронная диагностика пучков электрон-позитронных накопителей. - Препринт ОИЯИ Р9-92-562. Дубна, 1992.
4. Голутвин И.А., Мальцев А.А., Саранцев В.П., Свиридов В.А. Методы исследования электронных колец по синхротронному излучению. - ЖТФ, 1982, т.52, N3, с. 469-471.
5. Волков Ю.М., Мальцев А.А., Свиридов В.А., Фоминенко В.П., Чижов В.П. Измерение числа электронов в электронных кольцах по синхротронному излучению в инфракрасной области. - ПТЭ, 1982, N5, с. 40-43.
6. Malzew A., Tragner P. Zur bewertung von synchronstrahlung mit pyroelektrischen sensoren. - Tagungsband 92 der KDT Suhl zur Tagung "Temperatur'89", Suhl (DDR). 1989. T.2. S.311-320.
7. Mal'tsev A.A., Mal'tsev M.A. Methods and Systems For Diagnostics of Electron Beams By Synchrotron Infrared Radiation. - Preprint JINR E9-95-489. Dubna, 1995.
8. Кондрашов В.Д., Кузьмичев А.Р., Ларин А.А., Лустов Н.М., Мальцев А.А., Мальцев М.А., Федун А.Г. Сцин-

тилляционный годоскоп для ускоряемых пучков. - Сообщение ОИЯИ Р3-93-420. Дубна, 1993.

9. Смирная Е.П., Мальцев А.А., Волынец Ф.К. Способ получения высоковакуумного соединения. - А.с. 164540 (СССР). Заявлено 13.06.1980.
10. Смирная Е.П., Мальцев А.А. Высоковакуумное соединение. - А.с. 213459 (СССР). Заявлено 02.03.1984.
11. Мальцев А.А. Окно для инфракрасного излучения. ПТЭ, 1994, N3, с.177-181.
12. Мальцев А.А., Мальцев М.А. Широкодиапазонный длиннофокусный оптический тракт. ПТЭ, 1995, N4, с.210-211.
13. Мальцев А.А. Оптическая система для регистрации синхротронного излучения в ИК-области. - Сообщение ОИЯИ 13-9663. Дубна, 1976.
14. Мальцев А.А., Мальцев М.А. Широкополосная длиннофокусная оптика синхротронной инфракрасной диагностики пучков низкоэнергетичных электронов. Препринт ОИЯИ Р9-95-472. Дубна, 1995.
15. Мальцев А.А. Калибровка измерителей синхротронного излучения электронных колец в адгезаторе на тепловом стенде. - Сообщение ОИЯИ 9-86-12. Дубна, 1986.
16. Мальцев А.А., Мальцев М.А. Методика измерения интенсивности теплового излучения и его пространственного распределения. - Атомная энергия, 1995, т.79, вып.2, с.121-125.
17. Мальцев А.А., Мальцев М.А. К методике измерения чувствительности прецизионных детекторов видимого и инфракрасного синхротронного излучения. - Измерительная техника, 1995, N.10, с.67-69.

Рукопись поступила в издательский отдел  
15 апреля 1996 года.