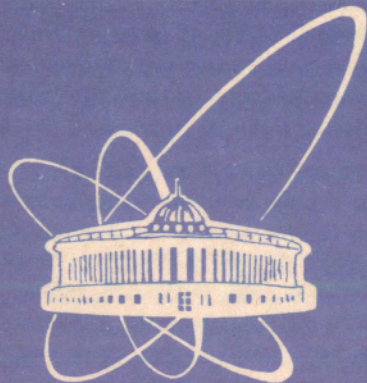


472-95



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P9-95-472

А.А.Мальцев, М.А.Мальцев

ШИРОКОПОЛОСНАЯ ДЛИННОФОКУСНАЯ
ОПТИКА СИНХРОТРОННОЙ ИНФРАКРАСНОЙ
ДИАГНОСТИКИ ПУЧКОВ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ
ЭЛЕКТРОНОВ

Направлено в журнал «Оптика и спектроскопия»

1995

ВВЕДЕНИЕ

Оптика информационно-измерительной системы регистрации синхротронного излучения должна обеспечивать решение двух основных экспериментальных задач: 1) измерение интенсивности синхротронного излучения, генерируемого релятивистскими заряженными частицами, для последующего определения полного числа (тока) ускоряемых или накапливаемых частиц; 2) измерение геометрии пучка, его поперечных и продольных размеров, плотности распределения частиц по сечению. Эти требования превращают создание оптики для информационно-измерительной системы диагностики синхротронного излучения в серьезную проблему, связанную с большими затратами сил и средств. Особенно эта проблема усложняется для низкоэнергетических электронных ускорителей, спектр синхротронного излучения которых занимает в основном инфракрасную область, и когда невозможно использовать обычную оптику оптического диапазона, рассчитанную на работу в узком спектральном интервале длин волн, ограниченном ближней инфракрасной зоной. По крайней мере, для компрессора электронных колец ОИЯИ [1] (энергия электронов до 20 МэВ, радиус кольца ~ 4 см) использование традиционных методов оптической синхротронной диагностики оказалось невозможным, что потребовало разработки методов инфракрасной синхротронной диагностики и информационно-измерительных систем для их реализации. В связи с этим особое значение приобретает создание информационно-измерительных систем, позволяющих регистрировать в условиях высокого уровня импульсных (с частотой до 10 кГц) электромагнитных и радиационных помех ускорителя очень слабые световые потоки с максимальной эффективностью.

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

С точки зрения оптики рассматриваемая в представленной работе проблема интересна тем, что необходимо регистрировать в широком диапазоне длин волн $\Delta\lambda/\lambda \gg 1$ оптического спектра узконаправленное инфракрасное излучение от малоинтенсивного источника меняющейся конфигурации, линейные размеры которого составляют несколько миллиметров, перемещающегося в пространстве, имеющем размеры $X \times Y \times Z = 5 \times 30 \times 20$ мм. Источник — сжимающийся кольцевой сгусток релятивистских электронов, генерирующих

синхротронное излучение в основном в инфракрасном диапазоне длин волн $\Delta\lambda = 1+8$ мкм. За время сжатия, продолжающееся ~ 1 мс, средний, или равновесный, радиус кольцевого сгустка R уменьшается с 6 до 4 см, что соответствует максимуму спектрального распределения синхротронного излучения $\lambda_m \approx 1$ мкм при энергии электронов $E \approx 20$ МэВ.

При сжатии кольца энергия электронов растет, при этом возрастает интенсивность синхротронного излучения, а максимум его спектрального распределения смещается в ближнюю инфракрасную область, где становится доступным для регистрации достаточно простыми в эксплуатации (не требующими сложных криогенных систем) интегральными и координатными детекторами инфракрасного излучения, способными обеспечить диагностику быстропротекающих процессов, измерение мощности синхротронного излучения и размеров сгустка.

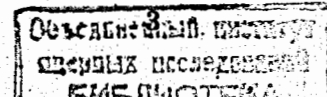
Так как синхротронное излучение сосредоточено в узком конусе вокруг направления распространения, то по касательной, проведенной из центра оптической системы к окружности, описываемой заряженной частицей, будет видно сечение кольцевого сгустка, точнее, некоторая ~ 1/60 часть кольца, условно принимаемая за поперечное сечение, наблюдение за которым необходимо осуществлять. По мере сжатия кольца это сечение перемещается в плоскости YZ по радиусу R вдоль оси Y . Это так называемая $R(t)$ -траектория, характеризующая динамику сжатия кольца. Большая часть интенсивности синхротронного излучения сосредоточена в узком конусе вблизи плоскости орбиты и содержит широкий спектр длин волн, максимум которого приходится на длину волны

$\lambda_m = 1,76R\gamma^3$, (1)
где R — радиус орбиты; $\gamma = E/m_0c^2$ — релятивистский фактор. Угол раствора конуса θ зависит от энергии электронов, как

$$\theta \approx \frac{1}{\gamma} \quad (2)$$

Используется система координат, в которой оси X и Y направлены по оси расходящегося пучка синхротронного излучения и вертикали (радиусу R электронного кольца) соответственно. Ось кольцевого электронного сгустка, а также магнитное и электрическое поля в ускорительной камере направлены по оси Z . Детектирующий блок с оптической системой может быть размещен относительно исследуемого объекта — источника синхротронного излучения на расстоянии около одного метра.

Требования к оптической системе определяются условиями ускорительного эксперимента, рабочим спектральным диапазоном длин волн излучения, интенсивность которого необходимо регистрировать, размерами приемника и



областью его спектральной чувствительности. Исходя из требований физического ускорительного эксперимента при проектировании и расчете оптической системы были заданы следующие начальные условия:

- 1) источник излучения — сечение кольцевого сгустка электронов, находится в поле зрения диаметром ~ 20 мм (угол поля зрения $\beta \simeq 45^\circ$);
- 2) синхротронное излучение распространяется в узком конусе с углом раствора $\theta \simeq 2^\circ$;
- 3) рабочий спектральный диапазон $\Delta\lambda = 1+8$ мкм;
- 4) рабочая длина волны, которая соответствует максимуму спектральной характеристики чувствительности приемника и относительно которой проводится расчет радиуса кривизны оптических элементов системы $\lambda_{\text{пр}} = 5,5$ мкм;
- 5) расстояние от объектива до источника $a \simeq 1$ м;
- 6) диаметр входного зрачка оптической системы $D_{\text{вх}} = 60$ мм;
- 7) фокусное расстояние объектива $f_{\text{об}} = 320$ мм;
- 8) линейный размер интегрального фотоприемника $d_{\text{пр}} = 2$ мм.

Таким образом, основные требования к оптической системе определяются размерами фотоприемника и областью его спектральной чувствительности.

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

В связи с отсутствием готовых широкополосных, длиннофокусных и светосильных инфракрасных объективов, пригодных для реализации поставленных физическим экспериментом задач, был произведен расчет достаточно простой линзовой оптической системы, которая может быть использована для работы в двух вариантах: 1 — в измерительной системе с прецизионным интегральным детектором (система измерения числа электронов с сгустке по интенсивности их синхротронного излучения); 2 — в системе измерения геометрических параметров кольцевого сгустка (равновесного радиуса, размеров поперечного сечения, распределения электронов по сечению) с помощью координатного детектора синхротронного инфракрасного излучения. При этом для системы с прецизионным интегральным детектором главной задачей является регистрация всего синхротронного излучения от электронного сгустка (независимо от места его положения в поле зрения оптической системы), приходящего к входному зрачку оптической системы, что обеспечивается высокой прозрачностью оптической части измерительной системы в диапазоне спектральной чувствительности детектора. Для оптики системы измерения геометрии сгустка главным требованием является получение максимального пространственного разрешения во всем исследуемом объеме ускорительной камеры, соответствующего разрешению координатного детектора.

Проблему вывода синхротронного излучения инфракрасного диапазона из вакуумной камеры ускорителя и его передачи на регистрирующее устройство измерительной системы с помощью ее оптической части с минимальными потерями по интенсивности позволяют успешно решать современные оптические материалы, в частности, оптические керамики [2], обладающие высокой прозрачностью в широком интервале длин волн в инфракрасной области спектра.

Для оптической части высокоточной измерительной системы, способной быть использованной для работы вместе с интегральным или координатно-чувствительным детекторами синхротронного излучения, была выбрана обобщенная оптическая схема (схема с коллективом), которая содержит объектив 1 (см. рис.1) и конденсор 2 (линзу Фабри). Кроме того, конструкция оптического тракта разработана таким образом, что позволяет без особых проблем трансформировать оптическую схему для работы либо с координатным, либо с интегральным детекторами.

При работе с координатным детектором используется только объектив 1, строящий изображение источника излучения в плоскости приемника $d_{\text{пр}}$. При работе с прецизионным интегральным детектором используется объектив 1 и конденсор 2. Линза Фабри 2 образует уменьшенное изображение входного зрачка системы $D_{\text{вх}}$, которым является объектив 1, в плоскости приемника $d_{\text{пр}}$. Методика расчета подобных схем достаточно хорошо разработана и представлена в деталях и подробностях в ряде работ [3—5].

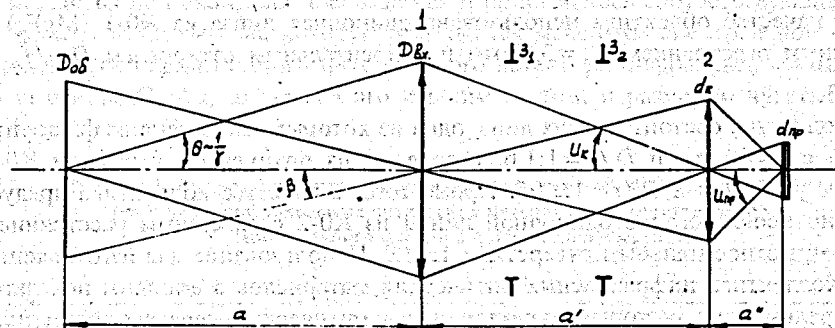


Рис.1. Принципиальная оптическая схема: $D_{\text{об}}$ — плоскость объекта, θ — угол расходимости синхротронного излучения, β — угол поля зрения, $D_{\text{вх}}$ — входной зрачок, $d_{\text{к}}$ — апертурная диафрагма коллектива, $d_{\text{пр}}$ — линейный размер приемника, $U_{\text{к}}$ — апертурный угол коллектива, $U_{\text{пр}}$ — апертурный угол приемника, Z_1 и Z_2 — плоские зеркала, a — расстояние от объекта до входного зрачка, a' — расстояние между объективом и коллективом, a'' — расстояние между коллективом и приемником

Выбор основных параметров оптической системы с коллективом осуществлялся с учетом инварианта Лагранжа — Гельмгольца:

$$D_{dx} \sin \beta = d_k \sin U_k = d_{пр} \sin U_{пр}, \quad (3)$$

где d_k — апертурная диафрагма коллектива, U_k — апертурный угол коллектива, $U_{пр}$ — апертурный угол приемника.

Для нормальной работы оптической системы необходимо выполнить условие $U_{пр} \leq 1$, которое, исходя из заданных начальных условий (угол поля зрения $\beta \approx 45^\circ$ и диаметр входного зрачка $D_{вх} = 60$ мм), полностью выполняется.

При заданных расстоянии a между объектом исследования $D_{об}$ и входным зрачком $D_{вх}$ системы и фокусным расстоянием объектива $f_{об}$ из уравнения отрезков находится расстояние a' от объектива до изображения источника излучения, в плоскости которого располагается либо координатный детектор, либо главная плоскость коллектива. Фокусное расстояние коллектива f_k определяется исходя из заданных входного зрачка $D_{вх}$ и линейного размера интегрального фотоприемника $d_{пр}$ при рассчитанном расстоянии a' между входным зрачком $D_{вх}$ и главной плоскостью коллектива d_k . Апертурной диафрагмой коллектива d_k является его оправа. Интегральный приемник устанавливается в плоскости выходного зрачка $d_{пр}$ оптической системы.

В качестве объектива использована одиночная линза из K0-1 (MgF_2) с фокусным расстоянием $f_{об} = 320$ мм и относительным отверстием $D_{вх}/f_{об} = 1:5,3$.

Коллектив состоит из двух линз, одна из которых выполнена из флюорита (CaF_2) с $f = 40$ мм и $D/f = 1:1,6$, вторая — из оптической керамики K0-2 (ZnS) с $f = 22$ мм и $D/f = 1:1,05$. Кроме того, в качестве коллектива предусмотрено использование одиночной линзы из K0-2 с фокусным расстоянием 17,5 мм и относительным отверстием 1:1,09. Использование для изготовления линз коллектива инфракрасных оптических материалов с высоким показателем преломления, который характерен для оптических керамик, позволило получить короткофокусный коллектив со световым диаметром ~ 20 мм. При подборе оптических материалов для линз предпочтение было отдано поликристаллическим оптическим керамикам именно потому, что наряду с другими достоинствами они обладают еще и высоким показателем преломления.

Все линзы, использованные в оптической системе, имеют сферическую поверхность. Радиусы кривизны поверхностей, образующих линзу, зависят от

ее фокусного расстояния f , а также показателя преломления n оптического материала, из которого линза изготовлена, и связаны соотношением

$$1/f = (n-1)(1/R_1 - 1/R_2), \quad (4)$$

где R_1 и R_2 — радиусы кривизны поверхностей линзы.

При выборе радиусов кривизны пропускающих поверхностей каждой из линз учитывалось условие, при котором увеличение, вносимое в размер изображения объекта наблюдения за счет сферической аберрации, является минимальным [6 и 7].

Одним из важных достоинств синхротронной инфракрасной диагностики и ее преимуществом, по сравнению с диагностикой в видимом диапазоне длин волн оптического спектра, является тот факт, что для оптической системы, работающей в инфракрасной области спектра, значительно снижены требования, предъявляемые к размеру изображения, то есть к разрешающей способности системы. Разрешающая способность инфракрасной оптики непосредственно связана с разрешающей способностью инфракрасных координатных детекторов, которая для длин волн более одного микрона, как правило, составляет ≥ 100 мкм. Эта особенность позволяет значительно упростить оптические элементы системы, избежать сложных расчетов кривизны поверхностей линз и, в свою очередь, упростить их изготовление. Кроме того, дифракция также накладывает ограничение на разрешающую способность оптической системы.

При расчете радиусов кривизны линз, используемых в оптической системе, значение показателя преломления n принималось соответствующим длине волны $\lambda = 5,5$ мкм, на которую приходится максимум спектральной чувствительности прецизионного интегрального детектора инфракрасного излучения на основе Ge:Au, охлаждаемого жидким азотом, и размером чувствительной поверхности $d_{пр} = 2 \times 2$ мм.

Таблица 1. Радиусы кривизны преломляющих поверхностей линз, изготовленных из различных инфракрасных оптических материалов, рассчитанные с учетом минимального значения сферической аберрации

Оптич. мат-л		$n_{\lambda=5,5 \text{ мкм}}$	f , мм	R_1 , мм	R_2 , мм
MgF_2	K0-1	1,3282	320,0	144,0	-409,0
ZnS	K0-2	2,2416	17,5	14,57	47,02
ZnS	K0-2	2,2416	22,0	19,0	61,34
CaF_2	флюорит	1,3952	40,0	21,0	-74,3

Был проведен анализ влияния на размер изображения дифракции и различных видов аберраций (сферической, комы, астигматизма). Установлено, что для спектральной области $\Delta\lambda = 1+8$ мкм основную роль играет дифракция.

Вклад, вносимый в разрешающую способность оптической системы абберациями, несущественен, и их исправление особой роли не играет, кроме как усложняет всю систему. В расчете параметров оптической системы учитывалась только сферическая абберация. В таблице 1 представлены радиусы кривизны используемых в оптической системе с коллективом линз из различных оптических материалов для инфракрасной области спектра, рассчитанные с учетом минимального значения сферической абберации.

Линзовая оптическая система выполнена согласно ее оптической схеме, представленной на рис.1, и исходя из требований и условий физического ускорительного эксперимента. Элементы, из которых образована оптическая система, и их расположение относительно друг друга показаны на рис.2. Синхротронное инфракрасное излучение проходит через высоковакуумное окно [8] (дет. 1), попадает на объектив из оптической керамики КО-1 (дет.2) с фокусным расстоянием $f_{об} = 320$ мм и световым диаметром $D_{вх} = 60$ мм, являющимся одновременно входным зрачком системы, чтобы обеспечить максимальное количество собираемой энергии. Коллектив (дет.5), располагающийся в плоскости изображения, создаваемого объективом, переносит изобра-

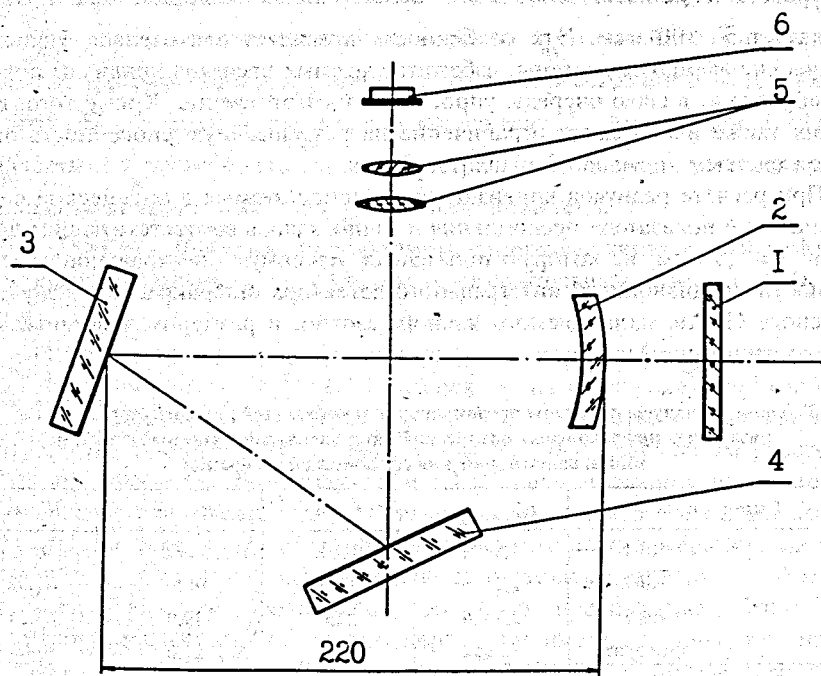


Рис.2. Элементы оптической системы: 1 — окно, 2 — объектив, 3 и 4 — отклоняющие зеркала, 5 — коллектив, 6 — инфракрасный детектор

жение входного зрачка в плоскость чувствительного слоя приемника (дет. 6). В схеме с коллективом, обеспечивающей расположение приемника в выходном зрачке, при изменении угла падения лучей на входной зрачок системы не происходит перемещения изображения по площадке приемника, а весь зрачок постоянно облучен. Неравномерность чувствительности приемника по поверхности в этом случае не может вызвать нежелательные эффекты резкого изменения сигнала, вырабатываемого приемником, при перемещении малоразмерного источника излучения в поле зрения системы.

Используемые в эксперименте охлаждаемые жидким азотом детекторы синхротронного инфракрасного излучения имеют заливной сосуд Дьюара. Чувствительный элемент детектора крепится к нижней торцевой части дьюара. Так как приемник может работать только в вертикальном положении, то необходимо изменять направление оптической оси на 90° . Это осуществляется с помощью зеркал (дет. 3 и 4). Кроме того, применение системы зеркал позволяет уменьшить габариты системы и сделать ее компактной, а также позволяет преобразовывать оптическую систему для работы по схеме объектив — координатный детектор.

Детектирующий блок измерительной системы, основу которого составляет оптическая часть, выполнен в виде отдельного съемного узла и может быть закреплен на вакуумной камере ускорителя непосредственно на фланце канала вывода синхротронного излучения. Общий вид детектирующего блока с высоковакуумным окном из оптической керамики КО-1 в металлической оправе на входе линзовой системы и с прецизионным интегральным охлаждаемым детектором Ge:Аи с предусилителем на выходе представлен на рис.3.

Конструкция системы позволяет размещать все оптические элементы согласно оптической схемы.

Все металлические детали выполнены из немагнитного материала.

Все оптические детали (дет. 1,2,3,4,5) выполнены согласно предъявленным требованиям и условиям эксперимента.

Крепление оптических деталей в оправы предусматривает соответствующие прокладки с тем, чтобы стекло не соприкасалось непосредственно с металлом.

Крепление зеркал (дет. 3 и 4) дает возможность их движения вдоль оптической оси и изменения угла наклона в широких пределах. Это перемещение необходимо для точной установки плоскости изображения, создаваемого объективом в главной плоскости коллектива или на чувствительной поверхности координатного детектора.

Сборка, юстировка и исследование характеристик оптической системы производились на отдельном стенде и на оптической скамье.

Объектив, зеркала и коллектив имеют следующие юстировочные движения:

- а) объектив (дет. 2) — движение вдоль оптической оси на ± 20 мм;

б) зеркало (дет. 3) — движение вдоль оптической оси на ± 50 мм и поворот на $\pm 30^\circ$;

в) зеркало (дет. 4) — движение вдоль оптической оси на ± 30 мм и поворот на $\pm 30^\circ$;

г) коллектив (дет. 5) — движение вдоль оптической оси на ± 15 мм.

Одно из основных и важных требований к оптической части измерительной системы — возможность ее длительного использования без настройки и юстировки, что может быть обеспечено только закреплением всех оптических деталей в жестком (как правило, литом) корпусе. Исходя из имевшихся возможностей (типичных для экспериментатора, вынужденного своими силами разрабатывать и создавать необходимые приборы и аппаратуру), выбор конструкции корпуса оптической системы оказался для разработчиков серьезной проблемой, из которой был найден достаточно простой и эффективный выход. Корпус оптического тракта был изготовлен из плиты сплава алюминия Д16т толщиной 50 мм путем ее обработки на фрезерном и токарном станках. Тем самым была обеспечена высокая оптическая точность. Кроме того, обеспечен свободный доступ ко всем оптическим деталям, что позволяет легко и просто осуществлять юстировку и регулировку (а также перестройку оптической схемы) оптической системы. Предусмотрено жесткое закрепление и штифтовка всех оптических деталей и механических узлов после сборки и юстировки.

Корпус и узлы крепления оптических деталей имеют черное матовое покрытие, исключаяющее посторонние блики и образование рассеянного света. От внешнего воздействия (светового и механического) оптическая система закрыта съемным кожухом из листового алюминиевого сплава.

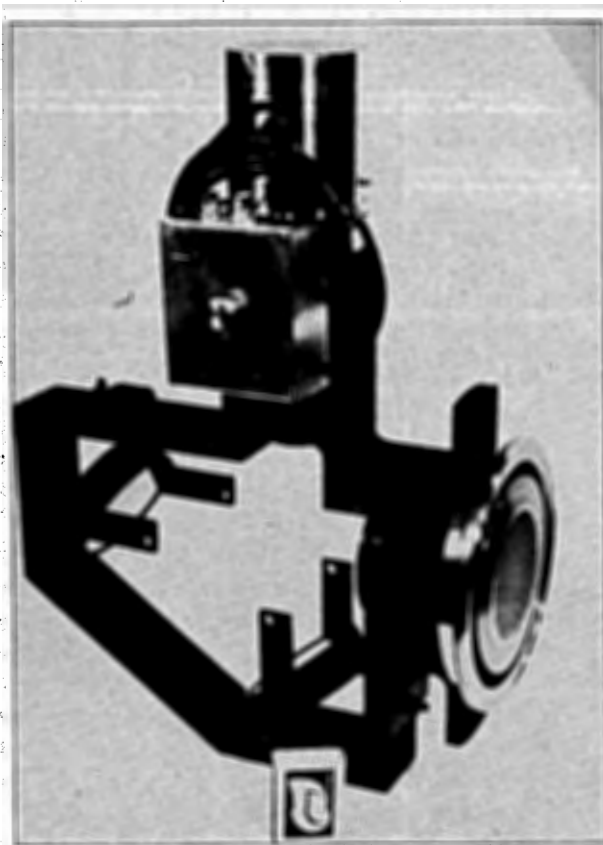


Рис.3. Внешний вид оптической системы с интегральным инфракрасным детектором на выходе

Основные характеристики инфракрасной оптической системы приведены в таблице 2.

Таблица 2. Основные технические данные и характеристики

Область применения	$\Delta\lambda = 1 + 8$ мкм
Фокусное расстояние объектива	$f_{об} = 320$ мм
Относительное отверстие объектива	1:5,3
Фокусное расстояние коллектива	$f_k = 17,5$ мм
Поле зрения в плоскости объекта	$\varnothing 32$ мм
Диаметр выходного зрачка	$d_{пр} \approx 2$ мм
Габариты, мм	290x300x100

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследование аберраций линз, а также параметров и характеристик оптических систем, предназначенных для транспортировки и передачи на детектор инфракрасного излучения, формирования в плоскости детектора изображения объекта исследования — источника инфракрасного излучения, представляет собой большую проблему, реализация которой является достаточно сложной задачей по сравнению с такими же исследованиями, но в видимой части оптического спектра длин волн. Для решения этой проблемы была разработана специальная методика, основанная на использовании эффекта температурного гашения фотолюминесценции активированных кристаллофосфатов при оказании на них термического воздействия, передаваемого с помощью инфракрасного излучения. Этот эффект подробно и хорошо рассмотрен и представлен в работе [9]. Методика включает в себя несколько операций. Первоначально пространственное распределение пучка инфракрасного излучения визуализируется (т.е. результат воздействия инфракрасного излучения становится видимым) с помощью плоского люминисцирующего экрана. Детектором инфракрасного излучения служит слой температурно-чувствительного $ZnS \cdot CdS - Ag, Ni$ -люминофора, предварительно возбужденного ультрафиолетовым излучением. Затем, перемещая экран вдоль оптической оси, определяется плоскость изображения источника излучения (объекта исследования). Получив достаточно четкое изображение источника, экран убирается, а на его место, в плоскость изображения, помещается координатно-чувствительный детектор инфракрасного излучения, пространственное разрешение которого достаточно, чтобы обеспечить проведение исследования разрешающей способности как отдельных линз, так и оптической системы в целом в заданном инфракрасном спектральном диапазоне длин волн. Сам термогасящийся люминисцирующий экран для инфракрасного излучения является неселек-

тивным детектором, и рабочий спектральный диапазон задается полосовыми специальными фильтрами, коэффициентом пропускания (отражения) оптических элементов, через которые проходит (отражается) излучение, спектральной характеристикой чувствительности детектора измерительной системы.

Люминисцентный детектор с температурным гашением представляет собой поглощающую поверхность в виде тонкой металлизированной пленки с покрытием из термогасящегося люминофора, свечение которого предварительно возбуждено от источника ультрафиолетового излучения. При прохождении инфракрасного излучения через поглощающую поверхность ее температура повышается, а свечение (яркость) люминофора падает. Московский электроламповый завод (объединение МЭЛЗ) совместно с ФИАН разработал прибор «Радиовизор», опытный экземпляр которого был получен ОИЯИ для детектирования синхротронного излучения (диапазон от инфракрасного до СВЧ). Из-за своей инерционности (постоянная времени ~ 1 с) прибор был малоприспособен для диагностики быстропротекающих процессов, но оказался незаменимым при исследовании оптики инфракрасного излучения. Конструктивно термочувствительный экран выполнен в виде обруча с натянутой на нем пленкой из металлизированного лавсана. На поверхность пленки путем химического осаждения из раствора нанесен равномерный слой люминофора $ZnS \cdot CdS$, активированного Ag и Ni . Толщина пленки с покрытием составляет ≈ 10 мкм. По степени потемнения светящегося экрана в месте прохождения инфракрасного излучения можно судить об интенсивности излучения и конфигурации пучка, т.е., перемещая экран вдоль главной оптической оси, можно добиться получения изображения источника излучения с максимальной четкостью.

Исследование характеристик отдельных линз и оптической системы в целом осуществлялось на стенде с расположением основных элементов на оптической скамье по традиционной схеме: источник излучения, модулятор потока, исследуемая фокусирующая оптика, детектор. В качестве широкополосного источника инфракрасного излучения была использована эталонная лампа накаливания с кремниевым окном ИК 4—12 (3,9 В, 1,1 Вт), разработанная НИИИС и выпускаемая объединением «Светотехника» в г. Саранске. Размер излучающей поверхности задавался диафрагмой с диаметром отверстия 0,8 мм. Этой же диафрагмой задавался апертурный угол $\theta = 1^\circ 20'$, соответствующий угловой расходимости синхротронного излучения электронного сгустка. На стенде моделировались условия, приближенные к условиям работы на ускорителе. В качестве детекторов (преобразователей интенсивности инфракрасного излучения в электрический сигнал) использовались работающие при температуре жидкого азота фотосопротивления $GeAu$ (линейный размер $d_{пр} = 3$ мм, рабочий спектральный диапазон $\Delta\lambda = 2—8,5$ мкм) и $InSb$ ($d_{пр} = 0,15$ мм, $\Delta\lambda = 0,7—5,9$ мкм).

Материалом для линз послужили опытные разработки оптических керамик филиала № 1 (ЛЕНЗОС) Государственного оптического института (г.С.-Петербург). Расчет линз проведен разработчиками детектирующей аппаратуры для ускорителя, а их изготовление осуществлено в условиях механических мастерских ОИЯИ. После изготовления линз были проведены их детальные исследования: спектральные — на высокоточной спектральной аппаратуре ГОИ, aberrации и разрешение — в условиях ОИЯИ. Исследование aberrаций проведено для всех линз, представленных в таблице 1. В измерительной системе с интегральным одноэлементным фотоприемником от оптического тракта не требуется высокой разрешающей способности, что и позволило использовать линзы со сферической кривизной поверхности, что, в свою очередь, значительно упростило оптическую систему.

Разрешающая способность оптической системы, работающей с координатным детектором, определяется дифракцией и aberrациями. Эффективный диаметр кружка рассеяния от точечного источника, обусловленный дифракцией, определяется выражением

$$d_{\text{диф}} = 1,22 \frac{f_{\text{об}}}{D_{\text{вх}}} \lambda, \quad (5)$$

где $f_{\text{об}} = 320$ мм, $D_{\text{вх}} = 60$ мм и $\lambda = 5,5$ мкм.

Из aberrаций наибольший вклад в увеличение размера изображения вносит сферическая aberrация. Размер изображения, создаваемого простой линзой, образованной двумя сферическими поверхностями, с учетом вносимой ею сферической aberrацией, дается приближенно формулой

$$\delta = \frac{7,8 \cdot 10^{-3}}{N^3} A, \quad (6)$$

где $N = f_{\text{об}} / D_{\text{вх}}$ — фокусное число, A — коэффициент сферической aberrации, где

$$A = \frac{n+2}{n(n-1)^2} \sigma^2 - \frac{4(n+1)}{n(n-1)} \sigma + \frac{3n+2}{n} + \frac{n^2}{(n-1)^2} \quad (7)$$

и

$$\sigma = \frac{R_2 + R_1}{R_2 - R_1} \quad (8)$$

Для длиннофокусного объектива из фтористого магния с фокусным числом $N = 5,3$ для длины волны $\lambda = 5,5$ мкм расчетный кружок рассеяния в плоскости изображения точечного источника, обусловленный дифракцией и

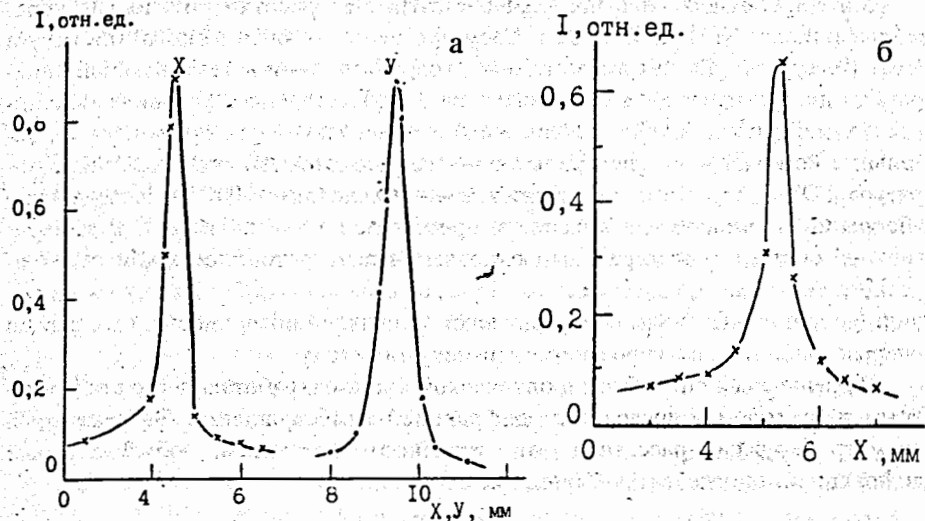


Рис.4. Разрешающая способность объектива (а) из К0-1 с $f=320$ мм и коллектива (б) из К0-2 с $f=17,5$ мм

сферической аберрацией, $d_{\text{рас}} = 0,43$ мм. Практическое измерение кружка рассеяния, проведенное по методике с использованием люминисцентного экрана с температурным гашением, показало хорошее соответствие расчетных и экспериментальных результатов. Результат исследований разрешающей способности объектива из К0-1 с $f=320$ мм представлен на рис.4,а. По горизонтальной координате отложен эффективный диаметр кружка рассеяния — изображение точечного источника, обусловленного дифракцией и аберрациями, измеренного по осям X и Y , перпендикулярных друг другу. Диаметр кружка на полувысоте составляет $d_{\text{раб}} \approx 0,5$ мм. На рис.4,б представлен размер кружка рассеяния, измеренный для линзы из поликристаллического сернистого цинка К0-2 с фокусным расстоянием $f=17,5$ мм. Для измерения размеров кружка рассеяния использовался одноплощадочный инфракрасный детектор на основе антимолибдита индия, работающий при температуре жидкого азота в режиме фотосопротивления. Размер чувствительной поверхности детектора $d_{\text{пр}} = 0,15 \times 2,5$ мм. Первоначально плоскость приемника совмещалась с плоскостью изображения точечного источника, ориентируясь длинной стороной вдоль одной из координатных осей, а затем приемник перемещался вдоль перпендикулярной координатной оси, проходящей через центр приемной площадки, с помощью микрометрического винта. По вертикальной оси на рис.4 отложена в относительных единицах величина сигнала, снимаемого с детектора по мере его перемещения в плоскости кружка рассеяния.

Условиями физического ускорительного эксперимента от координатного детектора инфракрасного излучения не требовалось пространственного разрешения лучше, чем ~ 1 мм. И хотя разрешающая способность использованного в эксперименте 50-элементного, охлаждаемого жидким азотом детектора из InSb с линейным расположением элементов была 0,4 мм (размер элемента — $0,4 \times 0,2$ мм при общей длине линейки ~ 20 мм), чувствительные элементы детектора были объединены по три элемента на один измерительный канал (в целях уменьшения количества используемых каналов до оптимально-необходимого и повышения надежности работы координатной измерительной системы). Таким образом, разрешающая способность длиннофокусного инфракрасного объектива из поликристаллического фтористого магния (К0-1) с $f_{\text{об}} = 320$ мм полностью соответствовала разрешающей способности координатного инфракрасного детектора, использованного для измерения геометрии электронного сгустка, поперечное сечение которого имело линейный размер ~ 6 мм.

Необходимо подчеркнуть особенность методики, использованной для исследования влияния дифракции и аберраций на увеличение размера изображения наблюдаемого объекта, создаваемого реальной инфракрасной линзой. Эта особенность заключается в следующем. Как правило, исследование разрешающей способности отдельных линз и оптической системы в целом проводится для узкого диапазона длин волн $\Delta\lambda/\lambda < 1$, где λ — определенная длина волны излучения, которой со-

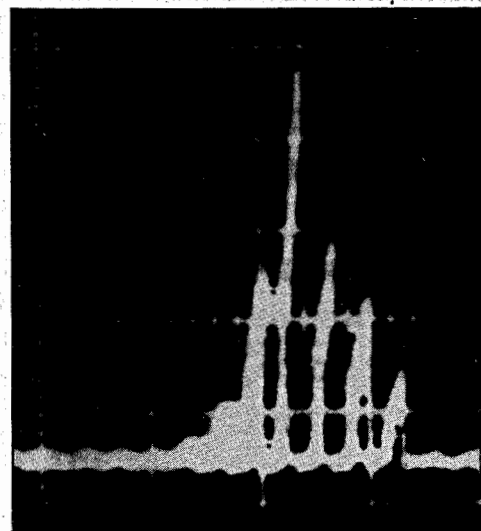


Рис.5. Осциллограмма сигналов координатного детектора, характеризующая размер поперечного сечения сгустка и распределение электронов по сечению

ответствует определенный показатель преломления n , того оптического материала, из которого линза изготавливается. Величина показателя преломления учитывается при расчете линзы по формуле (4) и от него зависит кривизна преломляющих поверхностей линзы. В отличие от этой традиционной методики в данном конкретном случае использовалась широкая полоса длин волн $\Delta\lambda \approx 1+5,5$ мкм оптического инфракрасного спектра при выполнении условия $\Delta\lambda/\lambda > 1$, определяемая спектром пропускания оптических элементов (окно, линзы), входящих в ту или иную оптическую схему, и харак-

тером спектральной чувствительности детектора излучения. Несмотря на столь широкий спектральный диапазон и простоту линз оптики синхротронного инфракрасного излучения результаты исследования этих линз, приведенные на рис.4, показывают, что дифракция и сферическая aberrация существенного влияния на увеличение размера изображения точечного источника не оказывают, а значит, не играют заметной роли при формировании изображения в плоскости чувствительных элементов координатного детектора. На рис.5 представлен результат, иллюстрирующий работу измерительной системы с однокоординатным 50-элементным инфракрасным детектором на основе InSb. Оптическая ось измерительной системы ориентирована по касательной к орбите вращения электронов радиуса $R = 5$ см. Так как синхротронное излучение распространяется в узком конусе, угол раствора которого θ равен $\sim 1/\gamma$, то видимым будет не все электронное кольцо, а только его сечение, перпендикулярное оптической оси системы. Изображение сечения кольцевого сгустка строится в плоскости детектора. На рис.5 показана осциллограмма распределения сигналов по чувствительным элементам координатного детектора, по которой можно визуальнo оценить размер поперечного сечения кольцевого сгустка электронов и характер их распределения по сечению.

Для измерительной системы с интегральным одноэлементным детектором синхротронного инфракрасного излучения (оптическая схема с коллективом) разрешающая способность оптического тракта особой роли не играла, но важно было знать линейный размер поля зрения $D_{об}$ тракта на пересечении ме-

дианной плоскости кольцевого сгустка с плоскостью его поперечного сечения (размер по радиусу кольца), т.е. в плоскости объекта исследования. Поле зрения было измерено, и результат измерения представлен на рис.6. По горизонтальной оси отложено расстояние в миллиметрах, по вертикальной — сигнал с детектора в относительных единицах. Методика измерения заключалась в том, что точечный источник инфракрасного излучения ИК 4-12 перемещался по радиусу кольца

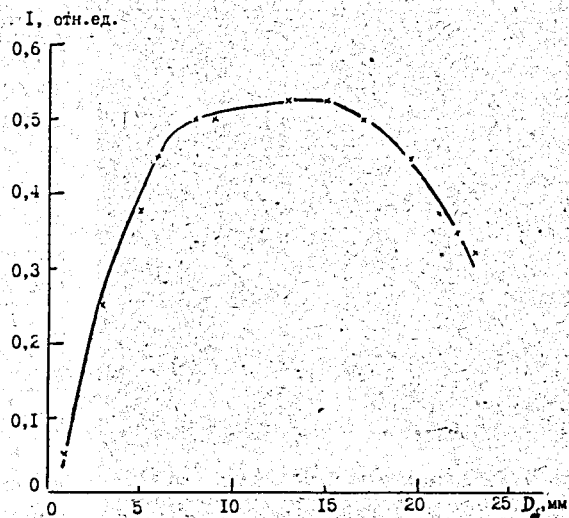


Рис.6. Линейный размер поля зрения оптической системы с коллективом в плоскости объекта исследования — поперечного сечения кольца.

Пропускание, %

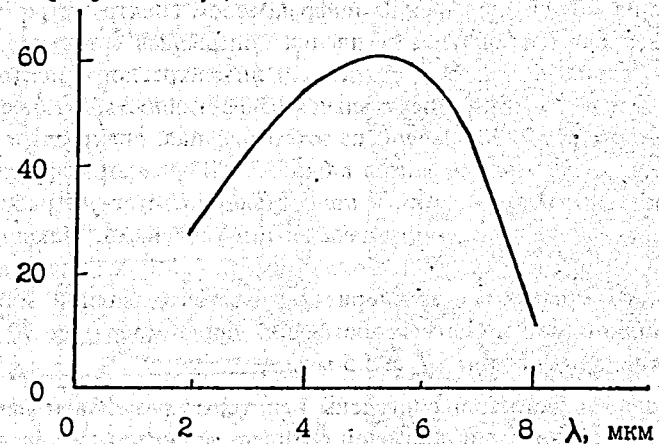


Рис.7. Спектральная характеристика оптической системы

электронов, а поток инфракрасного излучения фокусировался в плоскости фотоприемника, преобразующего инфракрасное излучение в электрический сигнал. Предварительно плоскость изображения входного зрачка системы определялась с помощью люминисцентного термогасящегося экрана. После чего экран убирался, а на его место устанавливался инфракрасный детектор. В качестве детектора были использованы охлаждаемые жидким азотом фотоспротивления на основе германия, легированного золотом, с размером чувствительной площадки $d_{пр} = 2 \times 2$ мм и 3×3 мм, с входным окном из просветленного германия и с рабочим спектральным диапазоном чувствительности $\Delta\lambda = 2-8,5$ мкм. Детектор имел заливной дьюар с входным окном в торцевой части и мог работать только в вертикальном положении.

После изготовления зеркально-линзовой оптической системы с коллективом была исследована ее эффективность, обусловленная потерями излучения при его прохождении через окна и линзы и при отражении излучения от зеркал. Расчет эффективности оптической системы проводился по формуле

$$\tau = \prod_{k=1}^{k=p+1} (1 - \rho_k) \prod_{m=1}^{m=p} (1 - \alpha_m)^l \rho_3^{N_3}, \quad (9)$$

где τ — коэффициент пропускания оптической системы, ρ — коэффициент отражения, α — коэффициент поглощения, p — число прозрачных сред, l — толщина среды, N_3 — число зеркал, \prod — произведение.

Пропускание окна из оптической керамики КО-1, объектива из КО-1 и коллектива из КО-2 измерялось на инфракрасном спектрометре ИКС-29. Серебряные зеркала (металлическая пленка напылялась в вакууме на диск из кварцевого стекла) в диапазоне длин волн инфракрасного спектра отражают ~98,9% ($\Delta\lambda \approx 1 + 10$ мкм). Спектральная эффективность оптического тракта представлена на рис.7. Как видно из этого рисунка, спектральное пропускание оптической системы находится в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне длин волн $\Delta\lambda \approx 1 + 8$ мкм и полностью соответствует рабочему спектральному диапазону, задаваемому начальными условиями. Максимум пропускания оптической системы приходится примерно на ту же длину волны, что и максимумы спектральных характеристик чувствительностей инфракрасных фотоприемников InSb и Ge:Аu, работающих при температуре 77°К, которые приходится на длину волны $\lambda_{пр} \approx 5,5$ мкм.

Ниже для иллюстрации приведены некоторые результаты использования широкополосной зеркально-линзовой оптической системы с коллективом, созданной для обнаружения и регистрации синхротронного излучения инфракрасного диапазона, генерируемого кольцевым сгустком релятивистских низкоэнергетичных электронов в компрессоре электронных колец Объединенного института ядерных исследований.

Работу канала измерения абсолютного значения интенсивности синхротронного инфракрасного излучения, по которой определяется число электронов в кольцевом сгустке, иллюстрируют рис.8, 9 и 10. Детектирующая часть измерительного канала образована из инфракрасной оптической системы с коллективом и прецизионного, охлаждаемого жидким азотом инфракрасного детектора из германия, легированного золотом. Оптический тракт отъюстирован таким образом, что его оптическая ось проходит по касательной к электронным орбитам радиуса $R = 4$ см.

На рис.8 представлены осциллограммы сигналов с детектора синхротронного инфракрасного излучения, снятых при работе ускорителя в разных режимах. Время развертки 0,5 мс/деление, величина сигнала 1 В/деление. Осциллограммы импульсов синхротронного излучения характеризуют распределение интенсивности этого излучения по времени, соответствующему разным радиусам орбит электронов в процессе сжатия кольцевого сгустка в компрессоре электронных колец коллективного ускорителя тяжелых ионов. Верхние импульсы на осциллограммах соответствуют режимам работы ускорителя, когда электронное кольцо сжимается до его равновесного или среднего радиуса (соответствующего центру малого поперечного сечения кольцевого сгустка) $R < 4$ см и сгусток начинает уходить (рис.8, а) либо совсем уходит (рис.8, б) из поля зрения оптического тракта. Нижние импульсы на осциллограммах соответствуют одному режиму, когда кольцо сжимается до конечного радиуса $R = 4,2$ см и электронный сгусток (его малое сечение) полностью на-

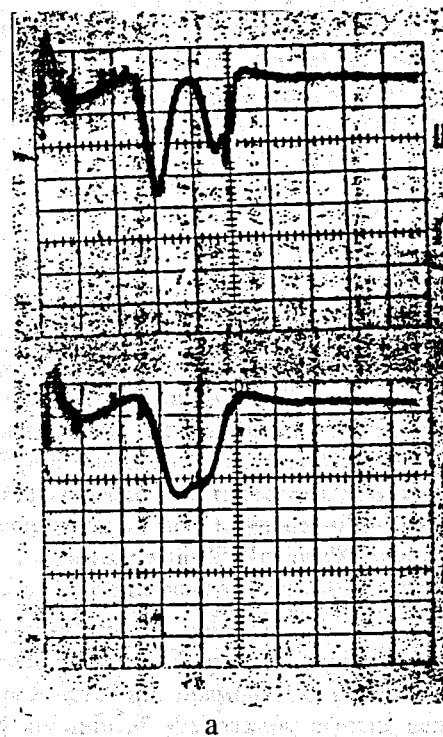


Рис.8. Осциллограммы сигналов с интегрального детектора синхротронного инфракрасного излучения, соответствующие разным режимам работы ускорителя

ходится в поле зрения оптической системы, показанном на рис.6. Максимум импульса синхротронного излучения говорит о том, что кольцо дожато до своего конечного минимального радиуса, которому соответствует заданный определенный режим работы ускорителя. На конечной стадии сжатия кольца (время ~250 мкс) оно начинает загружаться тяжелыми ионами и выталкивается через выводной патрубок на оси камеры компрессора на липейный участок ускорителя для реализации коллективного метода ускорения электронов и ионов. Для абсолютных измерений интенсивности синхротронного инфракрасного излучения была исследована временная структура импульсного сигнала с детектора. На рис.9 приведено распределение в относительных единицах интенсивности синхротронного излучения в процессе сжатия электронного кольца в компрессоре через интервал времени 40 мкс. На рис.10 показаны результаты измерения числа электронов в кольцевом сгустке, полученные за 8-часовой сеанс работы ускорителя. По вертикальной оси отложено число событий, по горизонтальной — число электронов в сгустке, которому данное число событий соответствует. Измерения проводились в режиме работы ускорителя, когда электронное кольцо сжималось до радиуса $R = 4$ см, которому соответствовала энергия электронов $E = 20$ МэВ. Судя по приведенной гисто-

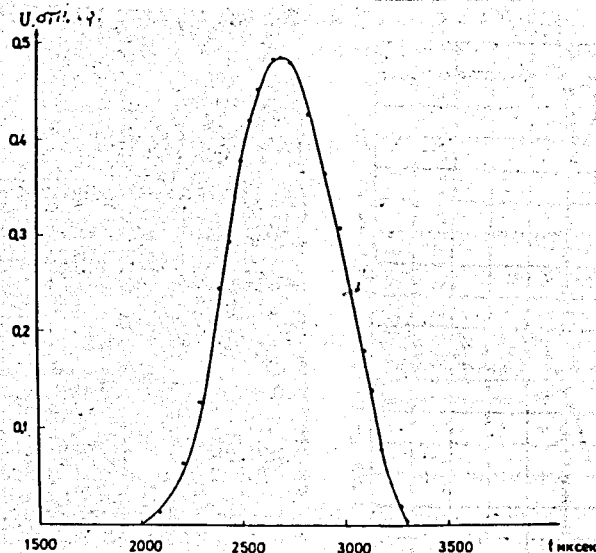


Рис.9. Изменение интенсивности синхротронного излучения в процессе сжатия электронного кольца

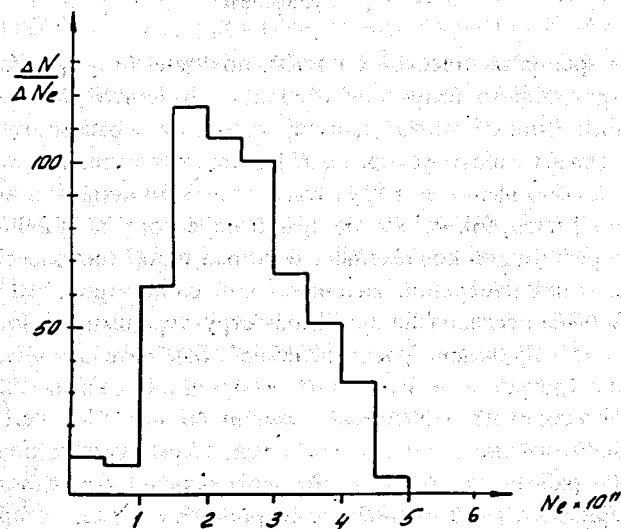


Рис.10. Результаты измерения числа электронов в кольцевом сгустке, характеризующие 8-часовой сеанс работы ускорителя

грамме, можно сделать вывод, что в рабочем (не форсированном) режиме ускорителя интенсивность электронных колец во время проводимых экспериментов составляла $N_e = 2 \cdot 10^{11}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптическая система с коллективом сыграла особую роль при создании в ОИЯИ коллективного ускорителя тяжелых ионов электронными кольцами. Разработка оптической системы была мерой вынужденной, так как иным путем обнаружить и зарегистрировать синхротронное излучение оказалось невозможным. Только благодаря оптической схеме с коллективом и линзам из оптических материалов новейших разработок филиала №1 ГОИ г.С.-Петербурга, обладающих высокой прозрачностью в широком диапазоне длин волн инфракрасного оптического спектра, впервые в ОИЯИ удалось обнаружить и зарегистрировать синхротронное излучение от малоинтенсивного кольца низкоэнергетических релятивистских электронов (энергия электронов $E \leq 20$ МэВ, радиус орбит их вращения $R > 4$ см). Важность проводимых экспериментов с синхротронным излучением заключалась в том, что для коллективного ускорителя синхротронное инфракрасное излучение — единственный источник прямой и объективной (количественной и качественной) информации об ускоряемом сгустке релятивистских электронов в процессе его формирования и сжатия. Только метод синхротронной инфракрасной диагностики (являющейся продолжением и развитием методов оптической, т.е. неразрушающей диагностики) позволяет вести наблюдение электронного кольца без его разрушения и оказания какого-либо влияния на исследуемые быстропротекающие процессы. Кроме того, этот метод позволяет проводить измерение абсолютного числа электронов в кольцевом сгустке как одного из наиболее важных параметров, от которого зависит возможность осуществления коллективного метода ускорения. По интенсивности синхротронного излучения было впервые определено абсолютное число электронов в кольцевом сгустке, сформированном в компрессоре электронных колец коллективного ускорителя ОИЯИ, которое оказалось не $N_e > 10^{13}$, как это предсказывалось в работе [11], а всего-навсего $N_e \sim 10^8$ электронов в кольце. Результаты, представленные на рис.10, были получены лишь спустя несколько лет после значительной доработки соответствующих узлов и систем ускорителя.

Несмотря на относительную простоту оптической системы она обеспечила необходимую оптическую точность проводимых измерений, показала хорошую разрешающую способность в широком спектральном диапазоне в ближней и средней инфракрасных областях длин волн. Оптическая система

полностью удовлетворяет предъявленным к ней требованиям, определяемым условиями физического ускорительного эксперимента и может быть использована в различных детектирующих устройствах широкополосной инфракрасной диагностики, разрабатываемых и создаваемых для научных исследований и прикладных целей.

Необходимо отметить разработанную методику стендовых испытаний инфракрасной оптической системы и исследования разрешающей способности инфракрасных оптических элементов, основанную на использовании эффекта гашения люминисценции при термическом воздействии на люминисцирующий материал и являющуюся развитием и продолжением сцинтилляционной методики. Только благодаря этой методике удалось решить проблему снятия характеристик и исследования параметров оптической системы, предназначенной для работы в спектральной области $\Delta\lambda = 1 - 8$ мкм инфракрасного диапазона длин волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мальцев А.А. — Сообщение ОИЯИ 9-86-289, Дубна, 1986.
2. Воынец Ф.К. — Оптико-механическая промышленность. 1973, № 10, с.47.
3. Волосов Д.С., Цивкин М.В. — Теория и расчет светооптических систем. М.: Искусство, 1960, с.151.
4. Якушенков Ю.Г. — Оптико-механическая промышленность. 1962, № 8, с.31.
5. Якушенков Ю.Г. — Основы теории и расчета оптико-электронных приборов. М.: Сов. радио, 1971.
6. Скотт Р.М. — Зарубежная радиоэлектроника. 1960, № 6, с.31.
7. Пейсахсон И.В. — Оптика спектральных приборов. Л.: Машиностроение, 1970.
8. Мальцев А.А. — ПТЭ, 1994, № 3, с.177.
9. Бажулин А.П. и др. — Письма в ЖЭТФ, 1968, т.8, № 5, с.261.
10. Бажулин А.П. и др. — ПТЭ, 1970, № 6, с.152.
11. Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. — Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. М.: Атомиздат, 1979.

