

02;07;10;12

# Синхротронная инфракрасная диагностика

## I. Широкополосная длиннофокусная оптика

© А.А. Мальцев

Объединенный институт ядерных исследований,  
141980 Дубна, Московская область, Россия  
e-mail: amaltsev@c.v.jinr.dubna.su

(Поступило в Редакцию 14 марта 2001 г. В окончательной редакции 30 октября 2001 г.)

Разработан оптический канал для вывода, транспортировки и передачи на детектор синхротронного инфракрасного излучения широкого спектрального диапазона. Представлены результаты расчета и исследования оптических систем с длиннофокусными линзовыми и зеркальными входными объективами, а также полевым конденсором. Приведены примеры практического использования инфракрасной оптики совместно с интегральными и координатными позиционно-чувствительными детекторами в ускорительных экспериментах с синхротронным излучением.

### Введение

Магнитно-тормозное синхротронное излучение (краевое, ондуляторное, когерентное, тормозное на встречных пучках) — хорошо известный, широко используемый и очень перспективный эффект. Синхротронное излучение позволяет бесконтактно диагностировать пучки и сгустки элементарных частиц без какого-либо влияния на процесс их ускорения.

Существует ряд ускорителей, генерирующих магнитно-тормозное излучение в основном в инфракрасной области длин волн [1–3], что затрудняет или делает практически невозможным использование традиционных методов и устройств оптической диагностики. Для решения этой задачи необходима разработка и развитие методов синхротронной инфракрасной диагностики, а также создание детектирующих измерительно-информационных систем.

В Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) генератором инфракрасного синхротронного излучения является компрессор (адгезатор) тороидальных (кольцевых) сильнотоочных сгустков низкоэнергетических релятивистских электронов [1]. Для компрессора ОИЯИ важность проводимых экспериментов с синхротронным излучением заключается в том, что оно — единственный источник прямой объективной (количественной и качественной) информации об электронном (электронно-ионном) кольцевом сгустке в процессе его формирования, сжатия (компрессии) и ускорения. Только синхротронная инфракрасная диагностика гарантирует наблюдение сгустка заряженных частиц без его нарушения и оказания какого-либо влияния на исследуемые быстропротекающие процессы.

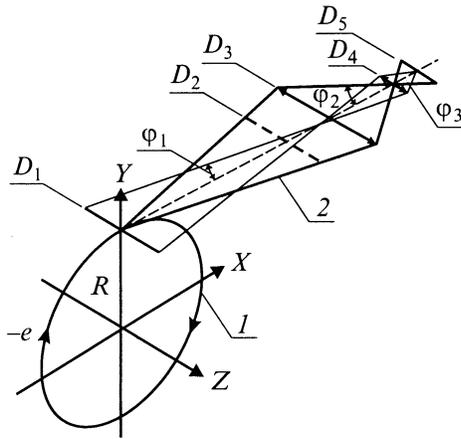
Основное требование к детектирующим измерительно-информационным системам невозмущающей диагностики сгустков релятивистских заряженных частиц в ускорителе или накопителе — обнаружение и регистрация синхротронного излучения, генерируемого частицами, и на основе его анализа получение информации

об основных параметрах сгустков (токовых, энергетических, геометрических) и о протекающих процессах. Жесткие условия ускорительного эксперимента превращают создание систем синхротронной диагностики в серьезную проблему, связанную с большими затратами сил и средств.

Особое значение приобретает разработка и создание детектирующей аппаратуры, позволяющей регистрировать с максимальной эффективностью очень слабые световые потоки от источника, быстро меняющего спектр излучения и свое положение в пространстве ускорительной камеры. В такой аппаратуре важное место занимает оптический канал, способный обеспечить наблюдение за объектом исследования. Канал должен содержать окно вывода инфракрасного синхротронного излучения из ускорителя и оптический тракт (систему) для транспортировки и передачи излучения на детектор. Описанию такого оптического канала и его основных элементов, специально разработанных в ОИЯИ и проверенных в ускорительных экспериментах, посвящена данная работа.

### Условия эксперимента

Особенности разработки специальной оптики и ее использования в экспериментах с инфракрасным синхротронным излучением показаны на примере диагностики адгезатора ОИЯИ. На рис. 1 представлена схема, поясняющая геометрию испускания синхротронного излучения и его регистрации. Объект диагностики и исследования, он же источник инфракрасного излучения, — тороидальный (кольцевой) сгусток низкоэнергетических релятивистских электронов 1. Вращаясь под действием нарастающего во времени импульсного магнитного поля по спиральной сжимающейся орбите в медианной плоскости цилиндрической камеры ускорителя-компрессора электронных колец, электроны испускают узконаправленный пучок синхротронного излучения 2.



**Рис. 1.** Схема распространения синхротронного излучения и его регистрации: 1 — электронное кольцо; 2 — синхротронное излучение.  $D_1$  — поле зрения (плоскость объекта);  $D_2$  — окно;  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$  — апертурные углы;  $D_3$  — входной зрачок объектива;  $D_4$  — конденсатор;  $D_5$  — выходной зрачок.

За время ускорения равновесный (средний) радиус  $R$  кольцевого сгустка уменьшается с 40 до 4 см, энергия электронов  $E$  увеличивается с 2.5 до 20 MeV, а максимум спектрального распределения синхротронного излучения  $\lambda_m$  смещается из радиочастотного диапазона в инфракрасную область длин волн  $\Delta\lambda_m \simeq 1-8 \mu\text{m}$ . Для этой области существует большой выбор высокочувствительных быстродействующих детекторов, не требующих сложного и дорогостоящего криогенного оборудования.

Требования к детектирующей части измерительной системы синхротронной ускорительной диагностики определяются параметрами кольца, радиационными и техническими условиями ускорителя, задачами проводимых ускорительных экспериментов. Параметры кольца на заключительном этапе его сжатия для реализации электронным сгустком тяжелых ионов должны быть такими: радиус  $R \simeq 4 \text{ см}$ , линейные размеры малого поперечного сечения кольцевого электронного сгустка  $a_R, a_Z \simeq 2-4 \text{ мм}$ , энергия электронов  $E \simeq 20 \text{ MeV}$ , число электронов в кольце  $N_e \gtrsim 10^{13}$ . Эти параметры и необходимо измерять в процессе ускорения с помощью синхротронного излучения с точностью 20%. Детектирующая аппаратура должна располагаться в непосредственной близости от ускорителя и работать в условиях высокого уровня постоянных и импульсных (с частотой до 10 kHz) электромагнитных и радиационных помех. Основные задачи проводимых с синхротронным излучением экспериментов связаны: 1) с выводом синхротронного излучения из высоковакуумной камеры ускорителя (в том числе и прогреваемой) в рабочем спектральном диапазоне  $\Delta\lambda = 1-8 \mu\text{m}$ ; 2) с измерением геометрии тороидального сгустка: его радиуса  $R \simeq 4-6 \text{ см}$  размеров малого поперечного сечения  $a_R, a_Z \simeq 2-6 \text{ мм}$ , плотности распределения по сечению  $a_R, a_Z$  элементарных

частиц и их углового распределения; 3) с определением по измеренной абсолютной величине интенсивности синхротронного излучения полного числа (тока) электронов в диапазоне  $N_e \gtrsim 10^8-10^{13}$ . Детектирующая часть должна включать в себя окно, промежуточную фокусирующую оптику, интегральные и многоэлементные координатные детекторы. Исходя из перечисленных задач и требований, а также на основании предварительных расчетов параметров и характеристик кольцевого сгустка электронов и их синхротронного излучения, был проведен выбор детекторов излучения, оптических материалов для окон и линз, расчет и проектирование оптических систем.

## Оптический канал

Процесс дистанционной неразрушающей бесконтактной синхротронной диагностики кольцеобразного сгустка 1 (рис. 1) по его излучению 2 в инфракрасной части спектра включает в себя операции вывода этого излучения из вакуумной камеры ускорителя через окно диаметром  $D_2$ , транспортировки по оптическому тракту (системе) и передачи этого излучения на детектор с минимально возможными потерями по интенсивности во всем рабочем спектральном диапазоне.

Основная задача детектирующей системы абсолютных измерений интенсивности синхротронного излучения заключалась в сборе и регистрации максимально возможного количества излучаемой энергии независимо от места положения источника (малого поперечного сечения в заданном пространстве диаметром  $D_1$  ускорительной камеры). Это может быть реализовано с помощью оптики, обладающей высокой прозрачностью в диапазоне спектральной чувствительности детектора и обеспечивающей передачу всего излучения, приходящего к входному зрачку  $D_3$  системы из плоскости источника, ограниченной полем зрения оптической системы  $D_1$ , с помощью полевого конденсатора  $D_4$  в плоскость выходного зрачка  $D_5$ , где находится детектор. Такую передачу может осуществить оптическая система с полевым конденсором (линзой Фабри). Методика расчета подобных систем достаточно хорошо разработана и описана [4,5]. В схеме с полевым конденсором  $D_4$  (рис. 1), когда приемник расположен в выходном зрачке системы  $D_5$ , при изменении угла падения лучей на входной зрачок  $D_2$  не происходит перемещения изображения по чувствительной поверхности приемника, а весь выходной зрачок  $D_5$  постоянно облучен.

Выбор основных параметров оптической системы с полевым конденсором осуществлялся с учетом инварианта Лагранжа–Гельмгольца, при котором изображение объекта исследования передается без искажений,

$$D_3 \sin \phi_1 = D_4 \sin \phi_2 = D_5 \sin \phi_3, \quad (1)$$

где  $\phi_{1-3}$  — апертурные углы объектива, конденсора и приемника соответственно.

Для нормальной работы оптической системы необходимо соблюдение условия, при котором апертурный угол приемника  $\phi_3 \leq 1$ .

В связи с отсутствием инфракрасных окон и оптики, способных обеспечить реализацию задач, поставленных физическим экспериментом, были разработаны специальные окна [6] и проведен расчет достаточно простых оптических систем с объектами из линз [5] и зеркал [7]. Каждая из этих систем может быть использована для работы в двух вариантах: а) в системе измерения геометрических параметров кольцевого сгустка (равновесного радиуса  $R$ , размеров поперечного сечения  $a_R$  и  $a_Z$ , распределения электронов по сечению и т.д.) с помощью многоэлементного координатного детектора; б) в измерительной системе с прецизионным одноэлементным интегральным детектором для обнаружения синхротронного излучения и определения числа электронов в сгустке по измеренной абсолютной величине интенсивности зарегистрированного излучения.

**1.** Достоинства и отличительные особенности инфракрасной синхротронной диагностики (с точки зрения оптики) по сравнению с ультрафиолетовой и оптической диагностикой следующие: радиационные микроповреждения окна (внешние и внутренние) не влияют на его прозрачность в инфракрасном диапазоне; невысокие требования к разрешающей способности инфракрасных оптических систем (менее 10 lines/mm) по сравнению с высокими требованиями к оптике видимого диапазона (около 100 lines/mm); необходимость регистрации пучка синхротронного излучения в широком диапазоне длин волн  $\Delta\lambda/\lambda \gg 1$  инфракрасного спектра (где  $\Delta\lambda \simeq 1-8 \mu\text{m}$ ) в отличие от  $\Delta\lambda/\lambda \ll 1$  оптической диагностики; излучение синхротронное (узконаправленное, поляризованное); малая интенсивность ( $\sim 10^{-6} \text{ W}$ ) и малые габариты ( $\sim 2 \text{ mm}$ ) источника; неопределенность местонахождения и формы источника в плоскости поля зрения.

Использование инфракрасной части спектра электромагнитного излучения для диагностики ускоряемых пучков дает существенное преимущество в точности абсолютных измерений интенсивности синхротронного излучения по сравнению с диагностикой в видимом диапазоне, что особенно важно при прецизионных измерениях, в частности в метрологии. Это преимущество связано с тем, что изменение оптических характеристик окна под действием облучения, вызывающего радиационные повреждения (потемнение), не влияет на пропускающую способность окна в инфракрасной области, так как размеры радиационных повреждений на поверхности и внутри окна, как правило, меньше длины волны проходящего инфракрасного излучения и на них не происходит поглощения или рассеяния интенсивности излучения. Фоновое излучение окна в ультрафиолетовой и видимой области устраняется нечувствительностью фотоприемников в этой области или специальными отсекающимися фильтрами. В результате заметно упро-

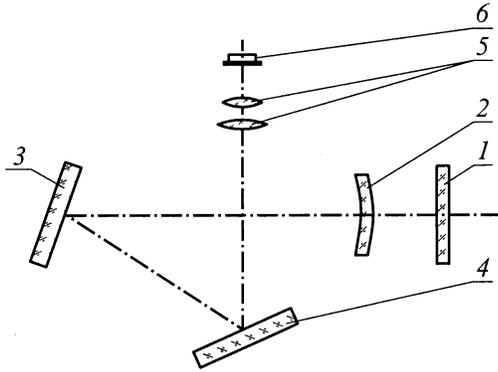
щается (а значит, и удешевляется) решение проблемы окон на ускорителе.

В инфракрасном диапазоне линейные размеры приемника становятся соизмеримыми с длиной волны регистрируемого излучения (особенно в длинноволновой области). Минимальные линейные размеры чувствительных элементов координатных детекторов, работающих в области  $\lambda > 1 \mu\text{m}$ , не превышают в основном  $d_n \gtrsim 0.1 \text{ mm}$ . Это обстоятельство существенно (примерно в 10 раз) снижает требование к разрешающей способности оптики, предназначенной для работы с позиционно-чувствительными инфракрасными детекторами. Такая особенность позволяет избежать сложных расчетов оптических систем и кривизны образующих линзы поверхностей, что в свою очередь значительно упрощает и удешевляет разработку и изготовление линз и оптических систем в целом. Это важные достоинства инфракрасной диагностики показывают ее несомненное преимущество по сравнению с диагностикой в ультрафиолетовой и видимой области.

**2.** Проблема окон и их уплотнений всегда была важной в вакуумной технике и криогенике, в том числе и для ускорителей заряженных частиц. Глубокий стабильный вакуум — одно из необходимых условий работы ускорителя. Получение вакуума лучше, чем  $10^{-9} \text{ Torr}$ , предусматривает в ряде случаев возможность длительного прогрева при температуре  $\sim 350-400^\circ \text{C}$  конструкций (элементов и узлов, в том числе и узла с окном для синхротронного излучения), устанавливаемых на вакуумной камере ускорителя, а все соединительные уплотнения должны производиться через металлическую прокладку. Разумеется, что при этом герметичность уплотнения окна с оправой не должна нарушаться.

Сложность проведения диагностики по магнитнотормозному излучению состоит в обеспечении целого ряда требований к окнам: хорошая спектральная прозрачность в широком диапазоне длин волн, высокая радиационная и термостойкость, пластичность и механическая прочность, минимальное газопропускание и собственное газовыделение. Все это делают проблему окон одной из главных, если не решающей, при разработке оптического канала. Немаловажное значение имеют стоимость оптического материала и возможность его приобретения.

С учетом перечисленных требований разработаны и опробованы в ускорительной практике окна из различных оптических материалов [6,8]: плавленого кварца для видимой и ближней (до  $3.5 \mu\text{m}$ ) инфракрасной части спектра: фтористого кальция ( $\text{CaF}_2$ ) для видимой и средней (до  $9 \mu\text{m}$ ) инфракрасной области; оптической керамики из поликристаллического фтористого магния ( $\text{MgF}_2$ ) для длин волн  $\lambda \sim 1-8 \mu\text{m}$ ; оптической керамики на основе поликристаллического сульфида цинка ( $\text{ZnS}$ ) для длин волн  $\lambda \sim 1-14 \mu\text{m}$ ; оптической керамики из селенида цинка ( $\text{ZnSe}$ ) и оптического бескислородного стекла на основе селенида германия ( $\text{GeSe}$ ) для спектрального диапазона до  $20 \mu\text{m}$ . Эти материалы имеют



**Рис. 2.** Схема расположения основных элементов системы с линзовым объективом.

хорошую прозрачность в рабочих участках спектра и удовлетворяют требованиям по вакууму. Диаметр окон от 60 до 115 mm.

Для прогреваемой ускорительной камеры разработано и создано окно из фтористого магния, диффузионно сваренного с оправой из нержавеющей стали [6]. Окно предназначено для многократного использования в прогреваемых установках со сверхвысоким вакуумом. Область прозрачности  $\Delta\lambda = 1-8\ \mu\text{m}$ . Световой диаметр 70 mm при толщине окна 4 mm. Газовыделение с поверхности окна при прогреве до  $600^\circ\text{C}$  и вакууме  $\sim 10^{-9}$  Торр не превышает  $7 \cdot 10^{-7}$  Торр/с.

3. Линзовая система [5] разрабатывалась с учетом возможности ее установки непосредственно на канале вывода синхротронного излучения из ускорителя и двойного применения для измерения геометрии электронного сгустка (источник–объектив–координатный детектор) и для абсолютных измерений интенсивности излучения (источник–объектив–конденсор–интегральный детектор). Оптическая часть системы с прозрачными преломляющими элементами (линзами) выполнена согласно схеме, представленной на рис. 1. На рис. 2 показана схема расположения основных элементов системы с линзовым объективом и конденсором. Канал содержит: 1 — инфракрасное окно  $D_2$  (рис. 1); 2 — объектив, являющийся одновременно входным зрачком системы  $D_3$ ; 3 и 4 — отклоняющие плоские зеркала; 5 — полевой конденсор  $D_4$ , располагающийся в плоскости изображения, создаваемого объективом; 6 — детектор, расположенный в плоскости выходного зрачка  $D_5$ .

Все линзы, использованные в оптической системе, имеют сферическую поверхность. Радиусы кривизны  $R_1$  и  $R_2$  зависят от фокусного расстояния  $f$ , толщины  $h$ , а также показателя преломления  $n$  оптического материала, из которого линза изготовлена, и связаны соотношением [9]

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + (n-1)^2 \frac{h}{n} \frac{1}{R_1 R_2}. \quad (2)$$

Толщиной линзы можно пренебречь, если отношение фокусного расстояния к диаметру больше единицы. Тогда формула линзы (2) примет вид

$$1/f = (n-1)(1/R_1 - 1/R_2).$$

При выборе радиусов кривизны поверхностей линз, учитывалось условие, при котором увеличение, вносимое в размер изображения за счет сферической аберрации, является минимальным. Значение показателя преломления принималось соответствующим длине волны  $\lambda = 5.5\ \mu\text{m}$ . Значение сферической аберрации для простой линзы минимально, когда радиусы кривизны, образующих линзу поверхностей, связаны соотношением [4]

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{2n^2 + n}{2n^2 - n - 4}, \quad (3)$$

которое соблюдается при

$$R_1 = \frac{2f(n-1)(n+2)}{n(2n+1)}. \quad (4)$$

В таблице приведены основные характеристики линз из различных инфракрасных материалов, рассчитанные с учетом минимального значения сферической аберрации. Знак „минус“ у радиуса  $R_2$  означает, что центр окружности находится в обратном направлении относительно объекта наблюдения или исследования (справа от линзы).

Материалом для линз послужили опытные разработки оптических керамик. При подборе оптических материалов предпочтение было отдано поликристаллическим оптическим керамикам потому, что они обладают высоким показателем преломления, от которого зависит величина сферической аберрации. Использование оптических материалов с высоким показателем преломления позволило увеличить световой диаметр конденсорной линзы до 19 и 23 mm соответственно. Вследствие этого диаметр поля зрения в плоскости малого поперечного сечения тора стал более 30 mm.

Длиннофокусные линзы предназначались для использования в качестве объективов или промежуточных линз, короткофокусные в основном использовались как полевые конденсоры.

Проведены детальные исследования всех линз, представленных в таблице, и оптической системы (с окном, зеркалами, объективом и конденсором), касающиеся аберраций, разрешающей способности, поля зрения и спектра пропускания.

Исследование инфракрасной оптики, изготовленной из непрозрачных оптических материалов, является более сложной задачей по сравнению с такими же исследованиями, но в видимой части оптического спектра длин волн. Для решения этой проблемы была разработана специальная методика [5], основанная на использовании эффекта температурного гашения фотолюминесценции,

Характеристики линз, изготовленных из различных инфракрасных оптических материалов

Оптический материал	Характеристики линз					
	$\Delta\lambda, \mu\text{m}$	$n_{\lambda=5.5\mu\text{m}}$	$f, \text{mm}$	$R_1, \text{mm}$	$R_2, \text{mm}$	$D, \text{mm}$
MgF <sub>2</sub>	1–8.5	1.3282	320.0	144.8	–394.0	60
ZnS	1–14.5	2.2416	320.0	288.0	1050.0	60
ZnS	1–14.5	2.2416	17.5	14.57	47.02	19
ZnS	1–14.5	2.2416	22.0	19.0	61.34	23
CaF <sub>2</sub>	0.13–12	1.3952	40.0	21.0	–74.5	27

при которой результат воздействия инфракрасного излучения становится видимым. Эта методика включает в себя несколько операций. Первоначально визуализируется пространственное распределение интенсивности пучка инфракрасного излучения с помощью плоского люминесцирующего экрана. Свечение люминофора предварительно возбуждено от ультрафиолетового источника. При прохождении пучка инфракрасного излучения через поглощающую поверхность ее температура повышается, а свечение (яркость) люминофора падает. По степени потемнения светящегося экрана в месте прохождения инфракрасного потока можно судить о характере пространственного распределения интенсивности излучения, размерах и конфигурации пучка. Сам термогазый люминесцирующий экран является неселективным детектором, чувствительным к излучению от СВЧ до ближней инфракрасной области. Рабочий спектральный диапазон задается специальными полосовыми фильтрами, коэффициентом пропускания или отражения оптических элементов на пути излучения, спектральной характеристикой чувствительности детектора.

Разрешающая способность линз определяется дифракцией и абберациями. Эффективный диаметр кружка рассеяния от точечного источника, обусловленный дифракцией, определяется выражением

$$d_{\text{dif}} = 1.22N \cdot \lambda, \quad (5)$$

где  $N = f/D$  — фокусное число ( $f$  — фокусное расстояние,  $D$  — световой диаметр линзы).

Наибольшее влияние на увеличение размера изображения оказывает сферическая абберация. Диаметр изображения, которое создается простой линзой, образованной двумя сферическими поверхностями, с учетом увеличения, вносимого сферической абберацией, приближенно выражается формулой [4]

$$d_{\text{sph}} = 7.8 \cdot 10^{-3} N^{-3} A, \quad (6)$$

где коэффициент сферической абберации

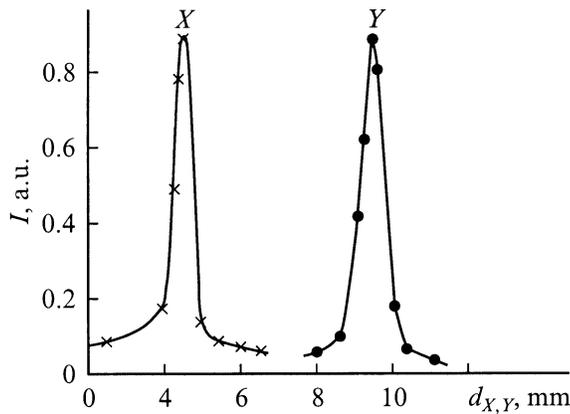
$$A = \frac{n+2}{n(n-1)^2} \sigma^2 - \frac{4(n+1)}{n(n-1)} \sigma + \frac{3n+2}{n} + \frac{n^2}{(n-1)^2},$$

$$\sigma = (R_2 + R_1)/(R_2 - R_1).$$

Проведен анализ влияния дифракции и различных видов аббераций (сферической, комы, астигматизма) на

размер изображения. Установлено, что для спектральной области  $\Delta\lambda \approx 1-8 \mu\text{m}$  основную роль играют дифракция и сферическая абберация. Кроме того, дифракция также накладывает ограничение на разрешающую способность оптической системы. При расчете кривизны поверхностей линз оптической системы учитывали только сферическую абберацию. Влияние других видов аббераций на разрешающую способность несущественно, а их учет лишь усложняет расчет и изготовление линз. Для длиннофокусной линзы из фтористого магния с фокусным числом  $N = 5.3$  для длины волны  $\lambda = 5.5 \mu\text{m}$  диаметр кружка рассеяния в плоскости изображения точечного источника, обусловленный дифракцией и сферической абберацией и рассчитанный по (5) и (6), составляет  $d_{\text{cal}} = 0.43 \text{ mm}$ . Результат исследований разрешающей способности линзы из MgF<sub>2</sub> с  $f = 320 \text{ mm}$  представлен на рис. 3, где показан размер точечного источника, измеренный по двум координатам  $X$  и  $Y$ . По вертикальной оси отложена в относительных единицах величина сигнала, снимаемого с детектора по мере его перемещения в плоскости изображения точечного источника. По горизонтальной координате отложен реальный размер изображения точечного источника, обусловленный дифракцией и абберациями. Диаметр кружка рассеяния на полувысоте составляет  $d_{\text{real}} \approx 0.45 \text{ mm}$ . Таким образом, разрешающая способность длиннофокусной линзы из MgF<sub>2</sub> с  $f = 320 \text{ mm}$  полностью соответствует разрешающей способности использованных многоэлементных позиционно-чувствительных фотоспротивлений на основе сурьмянистого индия с шагом (ценой деления)  $0.4-1.2 \text{ mm}$ .

Необходимо подчеркнуть особенность методики, использованной для исследования влияния дифракции и аббераций на увеличение размера изображения наблюдаемого объекта, создаваемого реальный инфракрасной линзой. Эта особенность заключается в следующем. Как правило, разрешающую способность отдельных линз и оптической системы в целом исследуют для узкого диапазона длин волн  $\Delta\lambda/\lambda \ll 1$ , где  $\lambda$  — длина волны излучения, которой соответствует определенный показатель преломления  $n$  оптического материала, из которого линза изготовлена. Показатель преломления учитывают при расчете линзы и от него зависят кривизна преломляющих поверхностей и увеличение размера изображения, вносимое сферической абберацией исходя



**Рис. 3.** Разрешающая способность объектива из фтористого магния.

из формул (3), (4) и (6). В отличие от традиционной методики в данном конкретном случае использовали широкую полосу длин волн  $\Delta\lambda/\lambda \gg 1$ , где  $\Delta\lambda \approx 1-9 \mu\text{m}$ . Ширина диапазона зависит от спектра пропускания оптических элементов (окно, линзы), входящих в ту или иную оптическую схему, и характера спектральной чувствительности детекторов излучения.

Несмотря на столь широкий спектральный диапазон и простоту преломляющих поверхностей линз, результаты исследований, приведенные на рис. 3, показывают, что дифракция и сферическая аберрация не оказывают существенного влияния на увеличение размера изображения точечного источника, а значит, не играют заметной роли при формировании изображения в плоскости чувствительных элементов координатного детектора.

Для обнаружения синхротронного излучения наиболее важно было знать линейный размер поля зрения  $D_1$  (рис. 1) в плоскости перемещения наблюдаемого объекта, на пересечении медианной  $XY$ -плоскости кольцевого сгустка с  $YZ$ -плоскостью его поперечного сечения. Такие исследования были проведены и поле зрения измерено. Методика измерения заключалась в том, что точечный источник инфракрасного излучения перемещался в фокальной плоскости объектива, а поток инфракрасного излучения фокусировался конденсором в плоскости фотоприемника, преобразующего инфракрасное излучение в электрический сигнал. Предварительно плоскость изображения входного зрачка системы определялась с помощью люминесцентного термогосящего экрана. Размер поля зрения для системы с полевым конденсором из фтористого кальция с  $f = 40 \text{ mm}$  составляет  $D_1 = 24 \text{ mm}$ , а конденсором из сернистого цинка с  $f = 17.5 \text{ mm}$  —  $D_1 = 32 \text{ mm}$ , что полностью соответствует условиям ускорительного эксперимента. Таким образом, измерения параметров и исследования характеристик отдельных линз и оптической системы в целом, выполненные по методике, основанной на использовании люминесцентного экрана с температурным

гашением, показали хорошее соответствие экспериментальных результатов расчету.

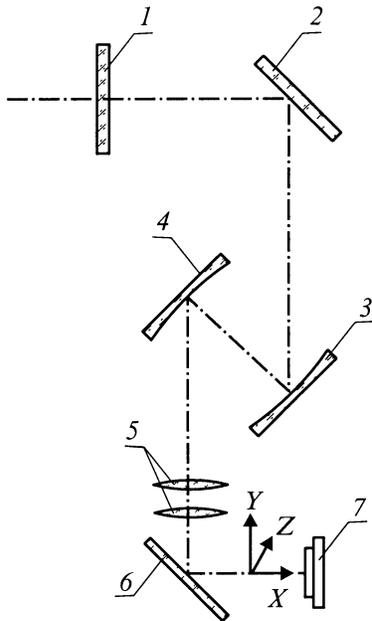
Исследована эффективность оптической системы с объективом из фтористого магния с  $f = 320 \text{ mm}$  и полевым конденсором из сернистого цинка с  $f = 17.5 \text{ mm}$ , обусловленная потерями излучения при прохождении через окно, линзы и отражении от зеркал. Как показали проведенные измерения, рабочий спектральный диапазон находится в ближней и средней инфракрасной области  $\Delta\lambda \approx 1-8 \mu\text{m}$ , что полностью соответствует условиям ускорительного эксперимента. Максимум пропускания оптической системы соответствует спектральным характеристикам используемых в экспериментах на ускорителе инфракрасных фотоприемников.

Основные характеристики базовой модели оптической системы с линзовым объективом (рис. 2): спектральная область применения  $\Delta\lambda = 1-8 \mu\text{m}$ ; фокусное расстояние объектива из  $\text{MgF}_2$   $f_{\text{obj}} = 320 \text{ mm}$ ; диаметр входного зрачка  $D_{\text{in}} = 60 \text{ mm}$ ; относительное отверстие объектива  $D_{\text{in}}/f_{\text{obj}} = 1 : 5.3$ ; фокусное расстояние конденсора из  $\text{ZnS}$  —  $f_k = 17.5 \text{ mm}$ ; диаметр выходного зрачка —  $D_{\text{out}} = 2 \text{ mm}$ ; поле зрения в плоскости объекта  $D_{\text{f.v.}} = 32 \text{ mm}$ ; габариты —  $290 \times 300 \times 100 \text{ mm}$ .

**4.** Зеркальный перископ — специальный оптический тракт [7] с входным объективом из сферических зеркал, обеспечивающих широкополосность всего устройства и позволяющих регистрировать синхротронное излучение в спектральной области  $\Delta\lambda \sim 0.3-40 \mu\text{m}$ . Он разработан и создан для тех случаев, когда детектор должен быть вынесен из зоны действия электромагнитных и радиационных полей ускорителя.

Одним из основных условий работы многоэлементных детектирующих систем является необходимость в обеспечении их защиты от помех ускорителя. Главными источниками помех являются импульсные магнитные поля и гамма-излучение. Для устранения влияния помех необходимо, чтобы координатный детектор, на котором фокусируется изображение источника излучения в масштабе 1:1, находился от источника излучения на расстоянии не ближе 2 м. Это потребовало создания оптического тракта с зеркальным длиннофокусным входным объективом.

Оптическая широкополосность тракта обеспечивается использованием в нем только отражающих элементов (зеркал). Отражающие элементы изготовлены из оптического стекла с поверхностью заданной кривизны, на которую наносится слой серебра путем испарения в вакууме. Так как оптический тракт используется в лабораторных условиях при постоянной температуре и влажности, то для уменьшения потерь при прохождении защитное покрытие на напыленный металл не наносится. Коротковолновая граница спектрального диапазона обусловлена качеством обработки отражающих поверхностей зеркал и материалом отражающего покрытия. В длинноволновой области диапазон ограничен дифракцией, причем граница зависит от величины относитель-



**Рис. 4.** Принципиальная оптическая схема перископического тракта с зеркальным объективом.

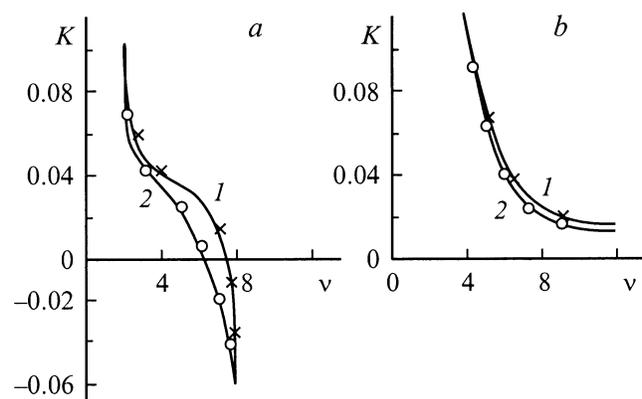
ного отверстия системы и длины волны, формирующей изображение.

На рис. 4 показана принципиальная оптическая схема перископа с зеркальным объективом. Так как синхротронное излучение распространяется в узком конусе, то видимым будет не все электронное кольцо, а только его сечение, перпендикулярное оптической оси системы. Излучение от малого поперечного сечения ( $\sim 1/60$  части) электронного кольца из вакуумной камеры компрессора выводится через инфракрасное окно 1, в непосредственной близости от которого расположено плоское зеркало 2, отклоняющее расходящийся пучок синхротронного в горизонтальном направлении. Первое сферическое зеркало 3 установлено так, чтобы объект наблюдения находился в его фокусе, что позволяет расходящийся пучок излучения сделать параллельным оптической оси и передать таким образом на любое заданное расстояние. Изображение сечения тора строится в фокальной плоскости второго сферического зеркала 4, где расположена чувствительная поверхность регистрирующего устройства 7 или конденсор 5. Зеркало 6 отклоняет оптическую ось на  $90^\circ$  в вертикальной плоскости. Фокусное расстояние обоих сферических зеркал одинаково и равно 1850 мм. Для ограничения влияния бликов и постороннего излучения на всем пути фокусируемого пучка расположены диафрагмы.

Отклоняющее зеркало 2 меняет направление оптической оси на  $90^\circ$ . Его поверхности первоначально для исправления астигматизма сферических зеркал, работающих в наклонных пучках лучей, была придана цилиндрическая форма. В дальнейшем для получения оптимального качества изображения оптическая схема установки

была исследована методом частотно-контрастных характеристик с помощью ЭВМ. При этом было установлено, что наилучшее качество изображения получается при отклоняющем зеркале не цилиндрической формы, а плоской. По-видимому, астигматизм в оптической системе установки действует слабее, чем другие aberrации (сферическая, кома и т. д.). Соответствующие частотно-контрастные характеристики показаны на рис. 5, *a*, *b*. По оси абсцисс отложена пространственная частота  $\nu$  — количество линий на 1 мм изображения; по оси ординат  $K$  — относительное изменение контраста изображения по сравнению с объектом. Из рисунка можно видеть, что если принять за критерий снижения контраста в изображении уровень 0.02 (визуальное разрешение), то при использовании цилиндрического зеркала в меридианальной плоскости установки (плоскость чертежа) разрешающая способность оптической системы составляет 5–6 lines/mm. Судя по результатам расчетов, это лучший вариант разрешения цилиндрического зеркала. При использовании плоского зеркала 3 разрешающая способность установки составляет 9–10 lines/mm. На рис. 5 верхние кривые (отмечены крестиками) относятся к центру поля зрения, нижние (отмечены кружками) — к краю поля зрения. Отсутствие хроматической aberrации позволяет вести наладку прибора и его юстировку в видимой области спектра.

Одно из достоинств выбранной схемы — малые потери излучения при прохождении через оптический тракт. Они составляют менее 4%. Это достигается благодаря высокому коэффициенту отражения серебра в спектральной области 0.3–40  $\mu\text{m}$  и отсутствию защитного покрытия на отражающих поверхностях. В основном потери интенсивности синхротронного излучения определяются материалом инфракрасного окна (до 40% величины потерь) и материалом окна приемника.



**Рис. 5.** Частотно-контрастная характеристика оптического тракта: *a* — с цилиндрическим отклоняющим зеркалом, *b* — с плоским отклоняющим зеркалом;  $\nu$  — количество линий на 1 мм изображения,  $K$  — относительное изменение контраста изображения по сравнению с объектом; 1 — для центра поля зрения, 2 — на краю поля зрения.

Тракт предназначен для работы с различными типами инфракрасных охлаждаемых и неохлаждаемых фотоприемников, но в основном с координатными многоэлементными фотоприемниками из кремния, антимоноида индия (рабочая температура  $T_w = 77\text{ К}$ ), селенида свинца ( $T_w = 250\text{ К}$ ), пироэлектриков и др. Широкополосность зеркал позволяет использовать тракт для ультрафиолетовой и видимой области. Предусмотрена возможность работы оптического тракта в видимой и ближней инфракрасной области с высокоскоростным фоторегистратором типа СФР.

Оптический тракт с зеркальным объективом и конденсором позволил впервые на ускорителе-компрессоре ОИЯИ зарегистрировать синхротронное излучение. Интенсивность излучения (т.е. число электронов) в первых экспериментах оказалась столь мала, а спектр излучения столь неопределен, что без оптического усиления и возможности регистрации в широком диапазоне длин волн обнаружить синхротронное излучение было невозможно.

Основные технические данные и характеристики оптического тракта с зеркальным объективом: область применения — установка работает в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра (ограничение спектрального диапазона связано только с покрытием зеркал и дифракцией); фокусное расстояние сферических зеркал —  $f = 1850\text{ мм}$ ; относительное отверстие — 1:21; увеличение 1:1; фотографическая разрешающая способность  $7\text{ мм}^{-1}$ ; габариты, мм  $2000 \times 360 \times 370$ .

5. Конструкция оптических систем позволяет использовать их как в базовых устройствах ускорительной диагностики, так и в экспериментах, не связанных с ускорителем. Конструктивно линзовая оптическая система (рис. 2) выполнена в виде отдельного устройства. Предусмотрено его крепление непосредственно на фланце специального патрубка канала вывода синхротронного излучения из вакуумной камеры ускорителя.

Перископический тракт, оптическая схема которого представлена на рис. 4, в виде отдельного устройства крепится на жесткой трубчатой опоре к бетонной стене или на бетонном кубе, т.е. закрепляется на подставке или основании, свободном от вибраций.

Все узлы и детали оптических систем выполнены согласно требованиям и условиям физического ускорительного эксперимента из немагнитных материалов. Оправа линз и зеркал выполнена из латуни. Крепление оптических деталей в оправы предусматривает соответствующие прокладки для того, чтобы оптический материал не соприкасался непосредственно с металлом. Корпус линзовой системы изготовлен из плиты сплава алюминия Д16т толщиной  $50\text{ мм}$  путем ее обработки на фрезерном и токарном станках. Тем самым получена монолитность, обеспечивающая прочность крепления в корпусе всех деталей и элементов, отвечающих за высокую оптическую точность. Кроме того, при такой конструкции есть возможность свободного доступа ко

всем основным оптическим элементам, что позволяет легко и просто осуществлять юстировку, регулировку, а также перестройку оптической схемы для работы с разными детекторами.

Предусмотрена возможность перемещения линз и зеркал вдоль оптической оси, а для зеркал — изменения угла наклона в широких пределах. Это необходимо для точной установки плоскости изображения, создаваемого объективом в главной плоскости конденсора или на чувствительной поверхности детектора.

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, исключая блики и образование рассеянного света. От внешнего воздействия (светового и механического) юстировочные узлы оптических систем закрыты съемными кожухами из листового алюминиевого сплава.

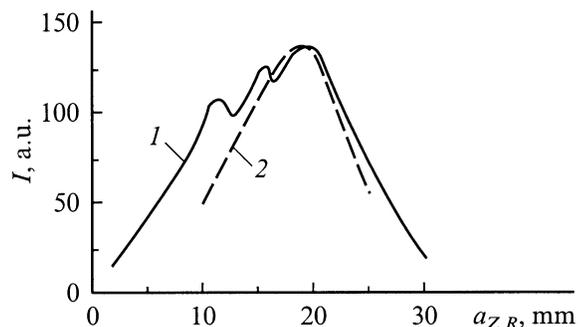
## Практическое применение

Разработанная инфракрасная оптика сыграла важную роль при исследовании возможности получения кольцевых ступков заряженных частиц (электронных и электронно-ионных) с оптимальными (для реализации метода коллективного ускорения электронов и тяжелых ионов) параметрами в различных типах компрессоров ОИЯИ [1].

Для решения проблемы обнаружения синхротронного излучения автором была предложена и реализована методика, позволившая обеспечить прохождение с минимальными потерями всего спектра синхротронного излучения в диапазоне чувствительности инфракрасных детекторов за счет использования соответствующих оптических материалов; обеспечить оптическое усиление ( $\sim 20$  раз) плотности потока синхротронного излучения на чувствительном элементе приемника (и соответственно сигнала с детектора) за счет использования оптической схемы с полевым конденсором; использовать в экспериментальной аппаратуре прецизионные детекторы, имеющие максимально высокую чувствительность в рабочей спектральной области  $\Delta\lambda \simeq 1-8\text{ }\mu\text{м}$ ; регистрировать синхротронное излучение во всем диапазоне чувствительности этих детекторов ( $\Delta\lambda/\lambda \gg 1$ ).

Методика позволила впервые обнаружить синхротронное излучение и провести с его помощью необходимые исследования ступков релятивистских электронов. Для иллюстрации приведены некоторые результаты, характеризующие практическое использование длиннофокусной широкополосной зеркально-линзовой оптики в ускорительных экспериментах.

По максимальному сигналу синхротронного излучения определено положение кольцевого ступка относительно медианной плоскости  $YZ$  и оси  $Z$  ускорителя, измерен равновесный радиус  $R$ , профиль ступка ( $a_R, a_z$ ) и исследовано распределение электронов по



**Рис. 6.** Профиль ( $I$  —  $a_Z$ ,  $2$  —  $a_R$ ) и характер распределения плотности электронов в плоскости поперечного сечения кольцевого сгустка.

сечению. Проведенные исследования показали, что медианные плоскости тора и ускорителя совпадают, энергия и радиус орбиты электронов (соответственно спектр и интенсивность синхротронного излучения) близки к расчетным, а вот размеры сгустка, число электронов и плотность их распределения по сечению существенно отличаются от требуемых.

По измеренной интенсивности синхротронного излучения было впервые определено абсолютное число электронов в кольцевом сгустке, сформированном в компрессоре электронных колец ОИЯИ. Реальное число электронов в сгустке оказалось меньше, чем ожидалось, и составило  $N_e \sim 10^7 - 10^8$  частиц, а сам сгусток имел форму не кольца, а цилиндрической спирали размытой неустойчивой формы.

Метод измерения мгновенных ( $\tau < 0.1 \mu\text{s}$ ) геометрических параметров кольца в компрессоре основан на использовании достижений в инфракрасной оптике и инфракрасной многоканальной регистрирующей технике [7]. Он заключается в том, что изображение малого сечения кольца, попавшего в поле зрения оптического тракта, фокусируется объективом на чувствительную поверхность детектора с линейным расположением элементов. На рис. 6 показаны мгновенные размеры ( $1$  —  $a_Z$ ,  $2$  —  $a_R$ ) малого поперечного сечения электронного кольцевого сгустка (цена деления  $1.2 \text{ mm}$ ) и характер распределения плотности электронов по сечению.

Таким образом, проблемы с обнаружением синхротронного излучения прежде всего были связаны с его малой плотностью на чувствительной поверхности детектора, поэтому полезный сигнал с детектора было трудно выделить на фоне высокоинтенсивных электромагнитных и радиационных полей работающего ускорителя. Только благодаря разработанной методике диагностики, уникальным свойствам инфракрасной оптики и высокой чувствительности детекторов удалось решить данную проблему. На основании полученной объективной информации была проведена необходимая доработка соответствующих узлов и систем ускорителя, что позволило существенно увеличить ток кольца с

$N_e \sim 10^8$  до  $\sim 10^{12}$  электронов. Абсолютные измерения интенсивности синхротронного излучения позволяют определить число электронов в сгустке на конечной стадии его сжатия погрешностью с менее 20%.

На заключительном этапе работ по исследованию коллективного метода ускорения был получен кольцевой сгусток с числом  $N_e \sim 10^{12}$  электронов и достаточно равномерным распределением плотности электронов. Однако, несмотря на значительные усилия, связанные, в частности, с доработкой магнитных систем ускорителя, оказалось невозможным получить электронный сгусток с устойчивыми, оптимальными для коллективного ускорения параметрами кольца. В настоящее время на основании результатов инфракрасной синхротронной диагностики работы по исследованию коллективного метода ускорения приостановлены, хотя сам по себе компрессор ОИЯИ по заложенным в него (и до сих пор не превзойденным) техническим возможностям является уникальным источником синхротронного излучения [10].

## Заключение

Инфракрасная диагностика имеет ряд преимуществ по сравнению с диагностикой в видимой области оптического спектра. Основное достоинство состоит в том, что для оптических систем, работающих в инфракрасной области  $\lambda > 1 \mu\text{m}$ , значительно снижены требования к размеру изображения, т.е. к разрешающей способности системы.

Современные оптические материалы, в частности оптические керамики, которые использованы при изготовлении окон и линз, имеют хорошие радиационные, механические и вакуумные свойства при высокой прозрачности в широком интервале длин волн в инфракрасной области спектра, что позволяет успешно решать проблему вывода синхротронного излучения инфракрасного диапазона из вакуумной камеры ускорителя и его передачи на регистрирующее устройство с минимальными потерями по интенсивности.

Разработан уникальный способ соединения окна с оправой с помощью диффузионной сварки. Предложена конструкция оправы, обеспечивающая вакуумное уплотнение окна на вакуумной системе через металлическую прокладку.

Несмотря на относительную простоту разработанных систем зеркальной и линзовой оптики, их применение в оптическом канале позволило впервые в ОИЯИ обнаружить и зарегистрировать синхротронное излучение (при числе электронов в кольце  $N_e \approx 10^8$  электронов); обеспечило проведение с необходимой точностью измерений различных параметров сжимаемых кольцевых сгустков по их синхротронному излучению в широком спектральном диапазоне ближней и средней инфракрасной области длин волн; показало оптимальную разрешающую способность, соответствующую разрешающей способности применяемых детекторов.

Оптический канал полностью удовлетворяет предъявляемым к нему требованиям физического ускорительного эксперимента и его можно использовать в различных детектирующих устройствах широкополосной инфракрасной диагностики, разрабатываемых и создаваемых для научных исследований и прикладных целей.

Еще одним важным результатом представленной работы является разработка методики стендовых испытаний инфракрасной оптики, основанной на использовании эффекта термолюминесценции. Только благодаря этой методике удалось решить проблему снятия характеристик и исследования параметров оптических систем с линзами, не пропускающими видимое излучение.

## Список литературы

- [1] Мальцев А.А., Мальцев М.А. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 4. С. 60–67.
- [2] Мальцев А.А., Мальцев М.А. // Атомная энергия. 1996. Т. 80. Вып. 3. С. 190–197.
- [3] Кураев Э.А., Мальцев А.А. Препринт ОИЯИ. № Р9-97-242. Дубна, 1997. 6 с.
- [4] Воронкова Е.М., Гречушников Б.Н. и др. Оптические материалы для инфракрасной техники. М.: Наука, 1965. 335 с.
- [5] Мальцев А.А., Мальцев М.А. // Измерительная техника. 2000. № 11. С. 17–22.
- [6] Мальцев А.А. // ПТЭ. 1994. № 3. С. 177–181.
- [7] Мальцев А.А. // Физика плазмы. 1997. Т. 23. № 5. С. 419–426.
- [8] Эберт Г. Краткий справочник по физике. М.: Физматгиз, 1963. 552 с.
- [9] Scott K.M. // Proc. IRE. 1959. N 9. P. 1530–1536.
- [10] Мальцев А.А. // Физика элементарных частиц и атомного ядра (ФЭЧАЯ). 1996. Т. 27. Вып. 3. С. 797–848.