

УДК 621.384.6, 533.9.082.5

ОПТИКА ШИРОКОПОЛОСНОЙ ИНФРАКРАСНОЙ УСКОРИТЕЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ

А. А. Мальцев

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

ВВЕДЕНИЕ	245
ОПТИКА СИНХРОТРОННОЙ ДИАГНОСТИКИ. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ	250
ИНФРАКРАСНАЯ СИНХРОТРОННАЯ ОПТИКА. ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ	263
ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФРАКРАСНОЙ ОПТИКИ	284
ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНОЙ ОПТИКИ	290
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	298
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	300

УДК 621.384.6, 533.9.082.5

ОПТИКА ШИРОКОПОЛОСНОЙ ИНФРАКРАСНОЙ УСКОРИТЕЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ

А. А. Мальцев

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Проводится анализ свойств и оптических возможностей каналов синхротронной диагностики, являющейся в настоящее время наиболее универсальным средством изучения сгустков (пучков) релятивистских заряженных частиц в процессе их ускорения, накопления и взаимодействия. Кратко описаны история развития и основные черты оптических систем различных экспериментальных установок, предназначенных для исследования синхротронного излучения, начиная с работ ФИАН (1950-е гг.). Более подробно рассмотрен инфракрасный синхротронный метод ускорительной диагностики, разработанный в ОИЯИ и являющийся продолжением и развитием оптических методов ФИАН–МГУ. Основное внимание уделено разработке, созданию и практическому использованию в экспериментах специальной инфракрасной оптики, включая высоковакуумные прогреваемые окна, широкополосные длиннофокусные зеркальные и линзовые системы. На реальных примерах показаны достоинства инфракрасной синхротронной диагностики и ее преимущества по сравнению с диагностикой в оптическом диапазоне.

The review is given of the analysis of properties and optical resources of channels of synchrotron diagnostics, which is, at present, the most universal method of studying bunches and beams of relativistic charged particles during their acceleration (accumulation) and interaction. There is a brief description of a history of development and of main features of optical systems of various experimental techniques of synchrotron radiation research, since the work of FIAN. The method of infrared synchrotron accelerator diagnostics, which is developed in JINR and is the continuation and development of FIAN–MGU optical methods, is considered in more detail. Main attention is rendered to development, creation and practical use in experiments of special infrared optics, including special high-vacuum high-thermal window, broadband long-focus mirrors and lenses system. The advantages of infrared synchrotron diagnostics over the optical-region diagnostics are shown with real examples.

ВВЕДЕНИЕ

Представленный обзор является вторым из планируемого цикла обзоров, посвященных диагностике пучков релятивистских заряженных частиц по их магнитно-тормозному (синхротронному) излучению инфракрасного диапазона. Предыдущий обзор опубликован в ЭЧАЯ в 1996 г. [1]. Тогда впервые была широко освещена тема синхротронной инфракрасной диагностики как нового перспективного направления в физике и технике ускорительного эксперимента. В связи с полученными положительными откликами на первый

обзор и перспективой использования на других ускорителях разработанных в ОИЯИ методов и детектирующих систем дистанционной бесконтактной инфракрасной диагностики релятивистских пучков, тепловых полей и быстропротекающих процессов в жестких условиях ускорительного эксперимента (в частности, в ЦЕРН в рамках проекта LHC [2]) работа по данной теме была продолжена. В настоящем обзоре дано подробное описание простой для расчета и изготовления оптики, способной обеспечить диагностику частиц по их излучению в широком диапазоне длин волн. Изготовление оптики требует минимальных затрат, но она имеет большой научный и экономический эффект.

Магнитно-тормозное (синхротронное) излучение релятивистских заряженных частиц (возникающее при отклонении частицы от прямолинейного пути магнитным полем) — хорошо известный эффект, широко используемый как источник информации о параметрах и характеристиках пучков и ступков электронов и протонов в процессе их ускорения, накопления и взаимодействия. Свойства синхротронного излучения хорошо изучены теоретически и экспериментально. Большой вклад в теоретические исследования свойств магнитно-тормозного излучения внесли отечественные ученые И. Я. Померанчук, Д. Д. Иваненко, А. А. Соколов, И. М. Тернов, В. В. Михайлин, что же касается экспериментального изучения этих свойств, то нужно отметить исследования Ф. А. Королева, О. Ф. Куликова и работы ФИАН–МГУ [3–6]. Результаты одних из первых экспериментальных исследований свойств синхротронного излучения, проведенных в ФИАН, обобщены и подробно описаны в обзоре О. Ф. Куликова [3]. Применению магнитно-тормозного излучения посвящены работы В. В. Михайлина [5, 6], в которых на различных примерах хорошо показаны возможности и перспективы использования излучения релятивистских частиц для решения научных и прикладных задач.

Несомненный прогресс в изучении синхротронного излучения заряженных частиц связан с работами ФИАН, в которых экспериментально исследованы свойства излучения и рассеяния света релятивистскими электронами [3]. Ранее в работах [7–9] ФИАН–МГУ были описаны оптические схемы устройств диагностики электронных ступков в видимой области спектра, которые в дальнейшем нашли свое развитие в физических экспериментах многих ведущих отечественных и мировых ускорительных лабораторий [10–19].

Однако современные электронные ускорители и накопители с энергией электронов в сотни МэВ и более применяются исключительно как источники синхротронного излучения для различных спектроскопических исследований в ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра. Для таких машин нет необходимости использовать инфракрасную синхротронную диагностику пучков, что подтверждается практически полным отсутствием работ

на эту тему. Тем не менее инфракрасный синхротронный метод неразрушающей диагностики заряженных частиц может применяться и на современных ускорителях и электрон-позитронных коллайдерах [20], с максимумом спектрального распределения электромагнитного синхротронного излучения в рентгеновской области или в области вакуумного ультрафиолета, так как в спектре излучения этих машин присутствует и инфракрасная составляющая. Логика достаточно проста: поскольку синхротронное инфракрасное излучение на ускорителе существует, то его следует использовать, и желательно — с максимально возможной эффективностью.

Для ускорителей и накопителей-генераторов магнитно-тормозного излучения (синхротронного, краевого, ондуляторного, *bremsstrahlung*), спектральное распределение которого занимает в основном инфракрасную область спектра, применение традиционных методов и устройств оптического детектирования является либо невозможным, либо весьма проблематичным и требует разработки методов инфракрасной диагностики, а также создания детектирующих измерительно-информационных систем, реализующих эти методы. Из современных ускорителей к числу таких источников инфракрасного магнитно-тормозного излучения относятся, например, низкоэнергетичные компрессоры электронных (электронно-ионных) колец ОИЯИ [1], протонные синхротроны ЦЕРН [14, 21], а также встречные пучки в экспериментах с когерентным тормозным (*bremsstrahlung*) излучением [22, 23].

Проблема бесконтактной дистанционной диагностики ускоряемых сгустков наиболее актуальна для ускорителей, в которых заряженные частицы проходят по траектории сжимающейся плоской спирали. Примером такого ускорителя является адиабатический генератор заряженных торов (АДГЕЗАТОР) ОИЯИ — компрессор сильноточных тороидальных сгустков низкоэнергетичных релятивистских электронов [24, 25]. Для подобных ускорителей проводимые с синхротронным излучением эксперименты важны еще и потому, что это излучение — основной и единственный источник прямой и объективной (количественной и качественной) информации об исследуемом электронном (электронно-ионном) кольцевом сгустке в процессе его формирования и сжатия. Только синхротронная диагностика гарантирует наблюдение сгустка заряженных частиц без его разрушения и оказания какого-либо влияния на исследуемые быстропротекающие процессы.

Основные требования к детектирующим измерительно-информационным системам невозмущающей диагностики сгустков релятивистских заряженных частиц по их электромагнитному излучению — это обеспечение обнаружения и регистрации генерируемого частицами излучения, а затем — на основе анализа его параметров и характеристик — получения информации об основных параметрах сгустков (токовых, энергетических, геометрических и т. д.) и протекающих физических процессах. Для изучения процесса захвата и ускорения (накопления) частиц необходимо знать величину впускаемого тока,

угловую расходимость и поперечные размеры сгустка, его энергию и энергетический разброс, положение и угол на выходе из ускорителя. К сожалению, технические сложности реализации этих требований в жестких условиях ускорительного эксперимента превращают создание систем диагностики магнитно-тормозного излучения в серьезную проблему, которая особенно усложняется:

- при малой интенсивности излучения, когда его необходимо регистрировать в широком спектральном диапазоне;

- когда спектр этого излучения занимает (в основном) инфракрасную область,

т. е. в тех случаях, когда невозможно использовать устройства и системы, детектирующие излучение оптического диапазона, с обычными (стандартными и серийными) элементами — оптикой и фотоприемниками. Системы для видимого диапазона, как правило, рассчитаны для работы в узком спектральном интервале длин волн, ограниченном ближней инфракрасной зоной (приблизительно до 1,1 мкм).

Таким образом, очевидна актуальность разработки и создания детектирующей аппаратуры с инфракрасной оптикой, способной обеспечить с максимальной эффективностью регистрацию очень слабых потоков электромагнитного излучения от источника, быстро меняющего спектр излучения и свое положение в пространстве ускорительной камеры. В настоящее время эти работы достаточно уникальны, так как связаны с большими затратами сил и средств.

В такой детектирующей аппаратуре важное место занимает оптический канал, позволяющий осуществить наблюдение за объектом исследования, управление и контроль параметров пучков в ускорителе (накопителе). Канал должен содержать окно вывода излучения из высоковакуумной (возможно, прогреваемой) камеры ускорителя и оптическую систему для транспортировки и передачи этого излучения на детектирующий блок.

В настоящем обзоре основное внимание уделено расчетам линзовой оптики, прозрачной для излучения в области длин волн 1–8 мкм, и зеркальной оптики для спектрального диапазона 0,4–40 мкм. На основании этих расчетов в ОИЯИ был разработан и создан ряд оптических систем, нашедших практическое применение в ускорительных экспериментах.

С помощью специально разработанных инфракрасных оптических каналов были изучены траектории сжатия кольцевых электронных сгустков, их параметры и общие свойства. Впервые был обнаружен теоретически предсказанный эффект синхротронного света в компрессоре [25], измерены токовые, энергетические и геометрические параметры кольцевых электронных (электронно-ионных) сгустков [15]. Первые результаты по разработке и созданию инфракрасной оптики для применения в детектирующих системах синхротронной диагностики представлены в работах [26–28].

Исследованию сгустков релятивистских заряженных частиц с применением оптических систем видимого света посвящено большое число публикаций начиная с работ О.Ф. Куликова [3, 8]. По-видимому, удобным методом таких исследований является развиваемый в ОИЯИ подход, основанный на использовании инфракрасного диапазона магнитно-тормозного излучения частиц [1, 29].

Материал обзора распределен следующим образом. В разд. 1 сформулированы требования к специальной оптике синхротронной диагностики пучков и изложена история развития методов исследования релятивистских сгустков, основанных на использовании синхротронного света как источника информации о процессах ускорения (накопления) и взаимодействия (обзор не претендует на полноту охвата методов и оптических устройств, встречающихся в литературе). В разд. 2 на примере решения задачи неразрушающей диагностики сжатия сильнооточного кольцевого сгустка низкоэнергетичных релятивистских электронов, излучающих в инфракрасной области спектра, показан весь процесс разработки и создания специальной оптики синхротронной ускорительной диагностики. В разд. 3 рассмотрены способы юстировки инфракрасной оптики и исследования ее характеристик, приведены результаты исследований. В разд. 4 приведены примеры практической реализации инфракрасной оптики в ускорительных экспериментах, включая обнаружение синхротронного излучения и исследование электронных (электронно-ионных) кольцевых сгустков.

Проверка соответствия описанной в обзоре инфракрасной оптики реальным условиям, целям и задачам ускорительного эксперимента проводилась на кольцевых электронных ускорителях ОИЯИ и ЛИЯФ (Ленинградского института ядерной физики, г. Гатчина). В экспериментах на ускорителях ОИЯИ инфракрасная оптика использовалась в базовых устройствах для диагностики электронных (электронно-ионных) кольцевых сгустков. Она позволила впервые обнаружить и исследовать синхротронное излучение на прототипе коллективного ускорителя тяжелых ионов электронными кольцами, частью которого является компрессор тороидальных электронных сгустков, провести прецизионные абсолютные измерения числа электронов в каждом импульсе ускорения, измерить размеры (геометрические параметры) сгустка, исследовать плотность распределения заряженных частиц в сгустке в процессе ускорения. Сводка приведенных результатов является итогом исследований и позволяет сделать вывод о том, что маловероятно получить кольцевые электронные сгустки с параметрами, удовлетворяющими условиям коллективного ускорения электронов и тяжелых ионов. В заключение обсуждаются достоинства метода инфракрасной синхротронной ускорительной диагностики и оптики, реализующей этот метод, и его преимущества по сравнению с исследованиями в видимой части спектра.

1. ОПТИКА СИНХРОТРОННОЙ ДИАГНОСТИКИ. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ

Постановка задачи. Требования к оптике детектирующей части высокоскоростного фоторегистратора мгновенных (в пределах 0,1–10 мкс) импульсных процессов — измерительной системы синхротронной ускорительной диагностики — определяются параметрами объекта исследования (пучка или сгустка релятивистских частиц) — источника излучения, техническими условиями ускорителя и задачами проводимых ускорительных экспериментов. Детектирующая часть должна включать в себя: окно, промежуточную фокусирующую оптику, интегральные и позиционно-чувствительные координатные детекторы.

Комплекс детектирующей аппаратуры, предназначенной для обнаружения, регистрации и исследования синхротронного излучения в условиях высокоинтенсивных постоянных и импульсных электромагнитных и радиационных помех ускорителя, должен обеспечивать:

- вывод синхротронного света из высоковакуумной камеры ускорителя (в том числе и прогреваемой);
- измерение геометрических параметров источника излучения (поперечных и продольных размеров сгустка);
- определение по измеренной абсолютной величине интенсивности излучения полного числа (тока) частиц, участвующих в ускорении;
- определение энергии частиц и их углового распределения по угловой расходимости пучка синхротронного излучения.

Исходя из перечисленных задач и требований, а также на основании предварительных расчетов параметров и характеристик сгустков заряженных частиц и их синхротронного излучения проводится поиск соответствующих детекторов излучения и оптических материалов для окон и линз, расчет и проектирование детектирующих и оптических систем фоторегистратора. При этом необходимо учитывать задаваемые начальные условия и технические требования.

1. Диаметр поля зрения в плоскости объекта наблюдения и исследования $D_{ПЗ}$ задается с учетом размеров источника излучения и возможности его перемещения в пространстве вакуумной камеры ускорителя (см. рис. 1).

2. Синхротронное излучение из вакуумной камеры выводится через окно, пропускающее излучение в рабочем спектральном диапазоне длин волн и обеспечивающее сохранение вакуума, при минимальном натекании и газовой делении, в том числе и в случае длительного прогрева окна.

3. Рабочая длина волны, относительно которой должен проводиться расчет радиусов кривизны образующих линзы поверхностей, должна соответствовать максимуму спектральной характеристики чувствительности приемника.

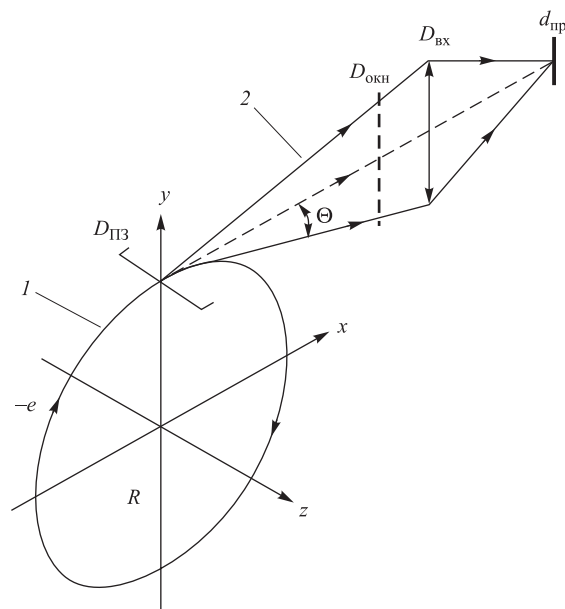


Рис. 1. Принцип расположения детектора-приемника синхротронного света и распространение излучения в пространстве: 1 — электронное кольцо; 2 — синхротронное излучение; $D_{ПЗ}$, $D_{окн}$, $D_{вх}$ и $d_{пр}$ — диаметры: поля зрения, окна, входного зрачка и выходного зрачка (детектора) оптической системы соответственно; Θ — угловая расходимость синхротронного излучения

4. Линзовая оптика (объектив) интегрального прецизионного детектора, монитора синхротронного излучения, должна находиться в непосредственной близости от окна вывода излучения и с минимальными потерями передавать на чувствительную поверхность детектора $d_{пр}$ все излучение, попавшее на ее входной зрачок $D_{вх}$ (см. рис. 1). Световой диаметр объектива определяется исходя из величины угла раствора конуса расходящегося пучка синхротронного излучения. Диаметр выходного зрачка оптической системы должен быть соизмеримым с линейным размером интегрального одноэлементного фотоприемника: $D_{вых} \leq d_{пр}$.

5. Для случая, когда детектор должен находиться на значительном расстоянии (более 3 м) от источника излучения, вне зоны действия высокоинтенсивных постоянных и импульсных электромагнитных и радиационных помех ускорителя, необходим длиннофокусный оптический тракт, обеспечивающий транспортировку и передачу излучения на детектор, в область относительного

отсутствия наводок. Оптический тракт должен формировать на детекторе изображение объекта исследования в натуральную величину (в масштабе 1:1).

Таким образом, основные требования к оптической части детектирующего устройства определяются параметрами объекта наблюдения и исследования — источника синхротронного излучения, техническими условиями ускорителя и характеристиками инфракрасных детекторов (размерами, чувствительностью, быстродействием, поляризационными свойствами).

Синхротроны ФИАН. Экспериментальное исследование синхротронного излучения началось с работ Ф. А. Королева и О. Ф. Куликова (1958 г.), в которых проводилась скоростная киносъемка процесса ускорения электронов в синхротроне ФИАН на 280 МэВ [30, 31]. Был предложен и разработан экспериментальный метод обработки данных скоростной киносъемки, позволявший получать сведения об изменении амплитуды вертикальных и радиальных колебаний электронов в процессе их ускорения.

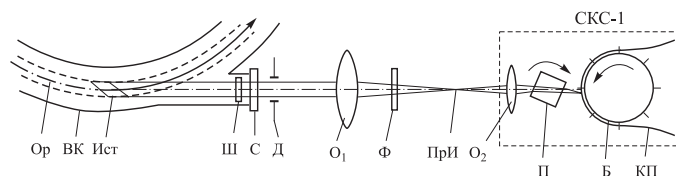


Рис. 2. Оптическая схема экспериментальной установки для исследования амплитуды колебаний ускоряемых электронов [3]

Оптическая схема установки, применявшаяся для исследований, показана на рис. 2. Буквами на рисунке обозначены: Ор — орбита сгустка ускоряемых электронов; ВК — вакуумная камера синхротрона; Ист — источник излучения — часть сгустка электронов; Ш — защитная прозрачная плексигласовая шторка, предохраняющая стекло С касательного патрубка камеры от загрязнения парами масла и удалявшаяся во время съемки; Д — диафрагма, O_1 — объектив, создававший промежуточное изображение При; Ф — светофильтры (спектральные и нейтральные) и кинокамера типа СКС-1. Основные элементы кинокамеры: O_2 — объектив кинокамеры; П — obturatorная призма; Б — лентопротяжный барабан; КП — киноплёнка.

Данная установка позволяла получать снимки поперечного сечения электронного сгустка в достаточно крупном масштабе при минимальных ошибках измерения размеров на микрофотограммах.

Световое излучение от электронов, испускаемое по касательной к орбите, выводилось через стекло касательного патрубка С и диафрагму Д из вакуумной камеры синхротрона. Диафрагма Д служила для ограничения углового раствора пучка излучения в плоскости орбиты, определяя глубину резко изо-

бражаемого пространства. Размер диафрагмы подбирался таким, чтобы при достаточной светосиле системы получить возможно меньшую расфокусировку радиальных краев изображения поперечного сечения сгустка электронов. Через эту диафрагму, не ограничивающую излучение по вертикали, проходило излучение, испускаемое цилиндрическим объемом сгустка, сечение которого определялось чисто геометрическими факторами и показано на рис. 2. Этот цилиндрический объем сгустка имел основания, скошенные под углом 24° к касательной, совпадающей с осью пучка, и боковые поверхности, совпадающие с поверхностью сгустка. При диафрагме шириной (по радиусу) 16 мм, использовавшейся в основных экспериментах, основания этого цилиндрического объема находились друг от друга на расстоянии 38 мм.

Затем с помощью объектива O_1 создавалось промежуточное изображение При, которое и фотографировалось скоростной кинокамерой СКС-1. Объектив O_1 выбирался таким, чтобы на нем не происходило диафрагмирования излучения, вышедшего из вакуумной камеры ускорителя, и чтобы не слишком уменьшался размер изображения. Лучше всего для этой цели подходил объектив типа «Индустар 52Д» с относительным отверстием 1:5 и фокусным расстоянием 500 мм.

Кинокамера СКС-1 позволяла снимать со скоростью до 4500 кадр/с. Для исследования процесса ускорения электронов в синхротроне ФИАН на 680 МэВ было достаточно скорости съемки 500 кадр/с. В конструкции кинокамеры был предусмотрен отметчик времени — неоновая лампочка. При съемке процесса ускорения неоновая лампочка питалась от звукового генератора ЗГ-10 током с частотой 500 Гц. Съемка производилась на стандартной 16-мм киноплёнке типа МЗ-2. Привязка кадров киносъемки по времени к определенным моментам процесса ускорения производилась либо по последнему кадру фильма, который соответствовал сбросу электронов на мишень, либо по включению генератора ЗГ-10 с помощью специальной электронной схемы, запускавшейся от импульса, соответствующего началу работы высоко-частотного ускоряющего напряжения.

Синхротрон «Сириус» и установка ТРЭК НИИ ЯФ ТПИ. Работы ФИАН–МГУ по экспериментальному методу исследования колебаний электронов в синхротроне были продолжены [32] на синхротроне «Сириус» НИИ ЯФ при Томском политехническом институте. Для экспериментального исследования динамики электронного пучка в синхротроне на 1,5 ГэВ было проведено раздельное измерение амплитуды синхротронных и бетатронных колебаний и исследовано влияние синхротронного излучения на эти колебания.

Проведенное исследование бетатронных и синхротронных колебаний оказалось возможным благодаря совместному использованию скоростной киносъемки и электронно-оптического преобразователя (ЭОП) с круговой разверткой изображения. ЭОП, работающий в режиме электрооптического хро-

нографа, позволял определить амплитуду фазовых колебаний. Синхронное измерение поперечных размеров электронного сгустка методом скоростной киносъемки [3] позволяло определить, какая часть полного радиального размера электронного сгустка обусловлена радиальными бетатронными колебаниями, а какая — радиально-фазовыми колебаниями.

Оптическая схема установки для исследования квантового возбуждения колебаний электронов приведена на рис. 3. Синхротронное излучение от электронного сгустка 1 выводится из вакуумной камеры через касательный патрубков 2. Пройдя через щелевую диафрагму 3, излучение попадает на промежуточный объектив 4, который создает благодаря полупрозрачному зеркалу 5 два промежуточных изображения 6 поперечного сечения электронного пучка 1. Объектив 7 фокусирует изображение сечения пучка на фотокатод ЭОП 8, и изображение регистрируется фотокамерой 9. Второе промежуточное изображение 6 регистрируется скоростной кинокамерой 10 на киноплёнку 11.

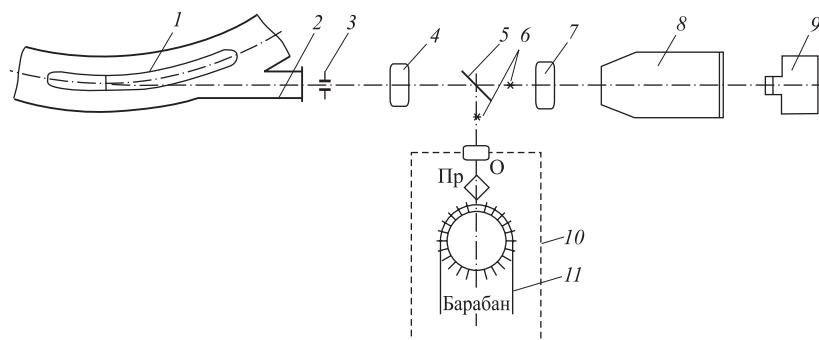


Рис. 3. Оптическая схема установки для измерения амплитуды фазовых колебаний [32]

Для установки ТРЭК НИИ ЯФ ТПИ [33] была разработана методика проведения эксперимента по диагностике кольца релятивистских электронов по синхротронному излучению с помощью ЭОП. Оптическая схема установки, предназначенной для исследований, включает окно вывода видимого света из вакуумной камеры синхротрона, апертурную диафрагму перед объективом и объектив, фокусирующий излучение на фотокатод ЭОП. Таким образом, оптическая схема [33] повторяет оптическую схему [3], представленную на рис. 2. Проведенные расчеты показали, что синхротронное излучение электронных колец, используемых в коллективном методе ускорения, является достаточно мощным, чтобы его можно было применять для диагностики.

Электрон-электронный накопитель ВЭП-1 ИЯФ СО АН. Для изучения процесса захвата и накопления частиц в электрон-электронном накопителе ВЭП-1 [34] необходимо было знать величину впускаемого тока, угловую расходимость и поперечные размеры сгустка, его энергию и энергетический разброс, положение и угол на выходе из электронно-оптического канала.

На рис. 4 показана схема оптической системы, позволяющей проводить диагностику в установке со встречными пучками [35].

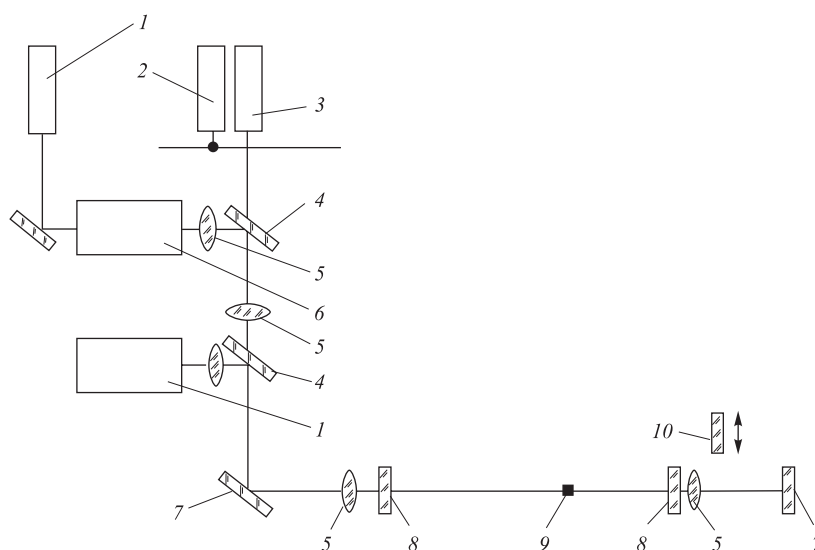


Рис. 4. Схема оптической системы: 1 — ТВ-камера; 2 — диск со щелью; 3 — фотоумножитель; 4 — разделительное зеркало; 5 — линза; 6 — ЭОП; 7 — зеркало; 8 — окно; 9 — область взаимодействия; 10 — съемное зеркало [34]

Положение орбит в месте встречи грубо контролируется оптической системой с телевизором с точностью 0,5 мм и более точно — дистанционно управляемой диафрагмой, расположенной в месте встречи. Критерием пересечения пучков служит одновременность гибели их при движении диафрагмы; взаимное положение пучков при этом выставляется с точностью 0,1 мм. Аналогичные диафрагмы, расположенные на других азимутах, позволяют контролировать положение равновесных орбит с точностью 1 мм.

Контроль и первоначальная настройка установки производились с помощью оптической системы и электронно-оптического преобразователя. Преобразователь работает в режиме непрерывной круговой развертки, напряжение которой берется от тракта питания резонаторов.

Для измерения светимости и сравнения ее с расчетной необходимо знать кроме значения накопленных токов геометрические размеры встречающихся

пучков. Возможность управления размерами пучков оказалась полезной для увеличения времени их жизни и изучения эффектов встречи.

Поперечные размеры грубо можно определить по изображению на экране телевизора. Точные измерения производятся с помощью фотоумножителя и расположенного перед ним вращающегося диска со щелью 0,2 мм, на который спроектировано увеличенное изображение наблюдаемого пучка.

Электрический импульс с фотоумножителя соответствует по форме закону распределения плотности электронов по сечению пучка в выбранном направлении. При этом разрешение имеет значение не хуже 0,1 мм. Хорошее представление о форме и размерах сгустков дает фотографирование пучка с последующим фотометрированием.

Фазовые размеры сгустков определяются с помощью электронно-оптического преобразователя. Временное разрешение составляет $3 \cdot 10^{-11}$ с, что соответствует 1 см длины сгустка.

Оптика синхротронной метрологии. Синхротронное излучение электронных ускорителей широко используется в качестве радиометрического стандарта [36, 37]. В работе [36] описана методика и приведены результаты использования зеркальной отражающей и фокусирующей оптики для спектральных исследований синхротронного излучения на ускорителе DESY в области длин волн 0,22–0,55 мкм. Синхротронное излучение сравнивалось с излучением стандартных источников — лампы накаливания с вольфрамовой лентой и ртутной лампы высокого давления. Обнаружено хорошее согласие экспериментальных данных с данными теории: отклонение составило 2% для относительного спектрального распределения и 1,5% для абсолютной величины потока излучения. Для применения в качестве радиометрического стандарта в большинстве случаев важно относительное спектральное распределение. Если предположить, что теория справедлива и в далекой ультрафиолетовой (инфракрасной) области, то, откалибровав синхротронное излучение в видимой области с помощью стандартного источника, можно получить известный поток в далекой ультрафиолетовой (инфракрасной) области.

В нашей стране, во Всесоюзном научно-исследовательском институте оптико-физических измерений (ВНИИОФИ) под руководством В.С. Панасюка была создана измерительная установка — компаратор [37] для воспроизведения и передачи единицы спектральной плотности энергетической яркости в области вакуумного ультрафиолета (ВУФ) в диапазоне длин волн 0,05–0,25 мкм от циклического электронного ускорителя [38] с сильным магнитным полем к образцовым излучателям. Такой ускоритель (синхротрон) удобно использовать в качестве эталонного излучателя, так как спектральное и угловое распределение мощности синхротронного излучения, а также его поляризационные характеристики могут быть вычислены теоретически, если измерены параметры пучка электронов: энергия, радиус равновесной релятивистской орбиты и число электронов в цикле ускорения.

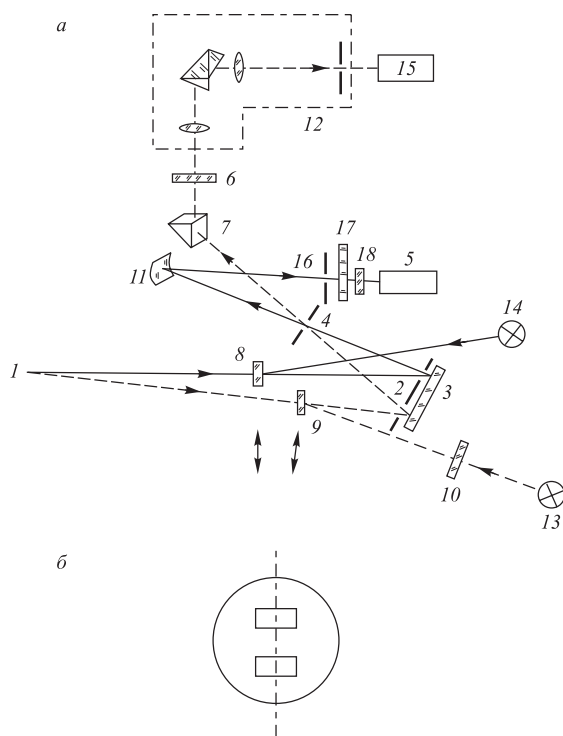


Рис. 5. Оптическая схема компаратора [37]

Оптическая схема компаратора (рис. 5, а) для измерения числа ускоряемых электронов оптическим методом и передачи единицы спектральной плотности энергетической яркости образцовым излучателям основана на принципе «дифференциального фотометра» [39]. Конструкция компаратора позволяет измерять число электронов в импульсе ускорения путем сравнения на длине волны 0,55 мкм синхротронного излучения с излучением ленточной вольфрамовой лампы СИ-10-300У, прокалиброванной по модели черного тела. Передача единицы спектральной плотности энергетической яркости от синхротрона к образцовому ВУФ-излучателю и измерение тока ускорителя осуществляется на компараторе яркости в один и тот же цикл ускорения. Синхротронное излучение с электронной орбиты 1 (зеркала 8, 9 из пучка выведены) фокусируется на входную щель 4 (диаметром 0,5 мм) спектрального прибора компаратора с помощью сферического зеркала 3 (радиус кривизны 0,5 м), создающего уменьшенное изображение электронного сгустка диаметром 0,1 мм в плоскости входной щели. Диафрагма 2 перед зеркалом определяет телесный угол используемого пучка (диафрагма и ее ориентация относительно плоско-

сти орбиты показана на рис. 5, б). Две одинаковые прямоугольные прорези выделяют два пучка, равных по размерам и по интенсивности. Верхний пучок (сплошная линия) попадает на сферическую решетку 11 с радиусом кривизны 0,5 м вакуумного монохроматора, построенного по схеме Сейя–Намиоки. В монохроматоре применены две сменные решетки с числом штрихов на 1 мм 1200 и 600, работающие в первом порядке и дающие преимущественную концентрацию света соответственно на длинах волн 0,08 и 0,18 мкм. Для отсеечения волн высших порядков используются пластины из сапфира, кварца, фтористого лития и фтористого кальция, устанавливаемые в поворотном диске 17 за выходной щелью 16 монохроматора. Монохроматизированное излучение на длине волны ВУФ регистрируется фотоумножителем ФЭУ 5 с люминофором 18. Для уменьшения влияния рассеянного длинноволнового света использованы тонкие металлические пленки, нанесенные на слой люминофора, и экраны, поглощающие рассеянный свет в камере. Нижний пучок (пунктирная линия) выводится из вакуумной камеры компаратора через окно 6 с помощью призмы полного внутреннего отражения 7 на призменный монохроматор 12, выделяющий излучение с длиной волны 0,55 мкм. На выходе 12 излучение регистрируется ФЭУ 15. Излучение калибруемой ВУФ-лампы 14 и вольфрамовой ленточной лампы 13 вводится в оптический тракт компаратора плоскими зеркалами 8, 9, дающими мнимые изображения излучающих областей ламп, совпадающие с тангенциальной точкой 1 орбиты. Углы падения пучков света на фокусирующее и плоские зеркала близки к нормальным, что практически исключает возможность внесения дополнительной поляризации света. Входная щель 4 выделяет из излучения ламп пучок диаметром 1,6 мм. Таким образом, сравнение интенсивности синхротронного излучения с излучением ламп осуществляется в течение одного и того же импульса ускорения на двух длинах волн, выделяемых двумя монохроматорами с одной общей входной щелью. При использовании общей щели ее размеры не нужно знать точно, также исключается неконтролируемая систематическая погрешность из-за возможной нечеткой фокусировки изображений электронного сгустка на входных щелях и регистрации вследствие этого синхротронного излучения на двух длинах волн от разного числа электронов. Оптические пути для излучения ламп и синхротрона различаются наличием дополнительного зеркала для ввода в оптический тракт излучения калибруемой ВУФ-лампы и коэффициентами пропускания спектральных приборов (синхротронное излучение и излучение ламп имеют разную степень поляризации). Калибровка излучения ленточной вольфрамовой лампы на длине волны 0,55 мкм осуществляется вместе с плоским зеркалом 9 и оптическим окном вакуумной камеры компаратора 10. Телесный угол для синхротронного излучения немного отличается от угла для излучения ламп и синхротрона (в видимой и ВУФ-областях эта разница одна и та же). В пределах используемого телесного угла интенсивность излучения синхротрона и ламп постоянна.

Процесс калибровки ламп в ВУФ-области состоит в измерении четырех сигналов на компараторе, коэффициента отражения зеркала в ВУФ-области и относительных коэффициентов пропускания спектральных приборов компаратора для синхротронного излучения и излучения ламп. Система регистрации компаратора обеспечивает линейность измерения интенсивности излучения и стабильность чувствительности ФЭУ в процессе измерений.

Синхротронное мониторингирование протонного пучка. В проектах УНК (ИФВЭ) и ЛНС (ЦЕРН) важная роль отводится высокочувствительному мониторингированию продольного распределения протонного пучка [40–42]. Синхротронный свет, излучаемый релятивистскими протонами в видимой области, был исследован и представлен в работе [14]. Экспериментальная установка собрана по схеме, показанной на рис. 1. Синхротронное излучение от протонов с энергией 250 ГэВ фокусировалось на CCD-матрице телевизионной камеры и наблюдалось на ТВ-мониторе. Измерение интенсивности синхротронного излучения производилось с помощью фотоэлектронного умножителя.

В проекте оптического тракта (телескопа) для высокочувствительного монитора профиля протонного пучка ЛНС (ЦЕРН) использован [2] опыт, полученный в процессе эксплуатации мониторов синхротронного света LEP (ЦЕРН) [17]. Общее расположение зеркального оптического тракта показано на рис. 6. Компоненты телескопа установлены на стандартной оптической скамье длиной 3,2 м. В телескопе используются только зеркала, чтобы исключить влияние хроматических aberrаций (т.е. обеспечить полную ахро-

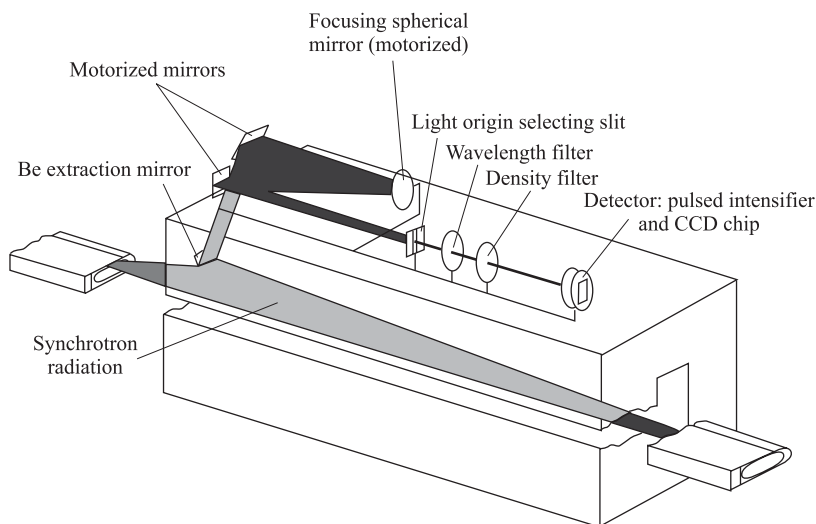


Рис. 6. Схема зеркальной оптической системы синхротронного мониторингирования частиц, используемой на LEP [17]

матичность — передачу всего спектра синхротронного излучения на детектор). На пути пучка синхротронного излучения, в фокальной плоскости собирающего зеркала, расположена щель, ограничивающая пучок, полосовые и нейтральные оптические фильтры. На выходе оптического канала синхротронное излучение регистрируется CCD-матрицей или другим сложным фотоприемником.

Подобная оптическая схема может быть применена и на электронных ускорителях и накопителях. В работе [43] продемонстрированы результаты мониторинга электронного пучка в накопительном кольце APS с использованием в детектирующем устройстве широкополосной длиннофокусной зеркальной оптики.

Компрессор электронных колец ОИЯИ. Компрессор кольцевых электронных (электронно-ионных) сгустков ОИЯИ [25] по заложенным в него техническим возможностям является уникальным источником синхротронного излучения [1]. Спектр этого излучения из-за низкой энергии электронов (относительно синхротронов и накопительных колец, перечисленных выше) занимает всю инфракрасную область оптического диапазона и часть видимой области и не может быть конкурентом современных накопителей и синхротронов в спектроскопических опытах, где обычно используется вакуумный ультрафиолет и более жесткие фотоны. Здесь принимается во внимание только оптический диапазон синхротронного излучения. СВЧ-диапазон излучения, где значительную роль могут играть когерентные механизмы излучения, связанные с возникновением разного рода неустойчивостей электронного или электронно-ионного колец, не рассматривается. Но особенностью компрессора является большой ток электронного кольца, способный достигать 1 кА, тогда как токи пучков в синхротронах и накопительных кольцах обычно не превышают 1 А. Это обеспечивает компрессору электронных колец ОИЯИ, как источнику синхротронного излучения в инфракрасной области, первенство в ряду ускорительных установок. Более того, если говорить о яркости источника $\eta \approx 1,5 \cdot 10^{22}$ фотон/(с · см² · ср) (число фотонов, испускаемых в единицу телесного угла с единицы площади поперечного сечения кольцевого электронного сгустка), то компрессор ОИЯИ не имеет себе равных и среди обычных источников излучения [44]. Понятно, что такие свойства синхротронного излучения компрессора нельзя было не использовать при проведении исследований и экспериментов по физике коллективного метода ускорения, для которых были разработаны прогреваемые окна [45] и специальные длиннофокусные широкополосные инфракрасные оптические системы [46, 47].

Общая схема измерительной системы с оптическим каналом представлена на рис. 7. Из вакуумной камеры компрессора 1 синхротронное излучение от электронного кольца 2 выводится через инфракрасное окно 3, передается по оптическому каналу 4 на заданное расстояние и попадает на детектирующий

блок 5 с блоком питания 6. Сигналы с детектора через регистрирующую и обрабатывающую электронику передаются для анализа в реальном масштабе времени на ЭВМ. В непосредственной близости от ускорителя находится только аппаратура, образующая детектирующий блок, который включает в себя: многоэлементный координатный инфракрасный детектор с предусилителем на каждом регистрирующем канале, криогенную систему (в случае использования детектора, охлаждаемого до температуры жидкого азота) и блок питания. Детектирующий блок может перемещаться в плоскости изображения при помощи электромеханического привода 7. Управление перемещением осуществляется дистанционно блоком БДУ. Обрабатывающая электроника вынесена за пределы радиационно опасной зоны.

Оптический канал вывода и транспортировки синхротронного излучения включает в себя окно вывода излучения из компрессора и длиннофокусный широкополосный зеркальный оптический тракт, на выходе из которого излучение фокусируется на чувствительную поверхность координатного детектора.

Для вывода синхротронного излучения из высоковакуумной камеры компрессора использованы окна для видимого и инфракрасного излучения, в том числе для варианта прогреваемой вакуумной камеры ускорителя разработано специальное окно [45] из оптической керамики КО-1, выдерживающее длительный (многочасовой) прогрев при температуре $T \sim 400\text{--}600^\circ\text{C}$. Окно прозрачно для излучения в спектральном диапазоне $\Delta\lambda \sim 1\text{--}8$ мкм.

Длиннофокусный широкополосный оптический тракт [46] включает в себя плоские и сферические зеркала с отражающей поверхностью из серебра, напыленного в вакууме на диски из кварцевого стекла. Отражение от металла обеспечивает широкополосность оптического тракта и позволяет использовать весь спектр излучения, пропускаемого окном. Исследуемый объект находится в фокусе одного из сферических зеркал, а в фокусе другого размещается однокоординатный детектор. Фокусное расстояние сферических зеркал составляет 1800 мм. Расстояние между объектом исследования — малым поперечным сечением кольцевого электронного сгустка и координатным детектором равняется $\sim 3,2$ м. Длина самого оптического тракта составляет 2,5 м. Фокусное расстояние сферических зеркал было выбрано исходя из требования вынести детектирующий блок из зоны действия импульсных электромагнитных и радиационных полей большой мощности, образующихся при срабатывании магнитных систем ускорителя, а также в результате сброса электронного кольца на стенки вакуумной камеры компрессора.

Оптический тракт позволяет передать изображение малого поперечного сечения кольцевого сгустка электронов в плоскость детектора синхротронного излучения в натуральную величину. В случае необходимости, когда требуется уменьшить размер изображения источника синхротронного излучения, используется набор специально разработанных инфракрасных линз [19, 47], изготовленных из различных инфракрасных оптических материалов:

оптической керамики, флюорита, сапфира и бескислородного стекла. Линзы устанавливаются на выходе зеркального оптического тракта, перед фотоприемником. Диаметр поля зрения оптического тракта в плоскости источника излучения составляет ~ 30 мм. Предусмотрена возможность оперативного контроля юстировки оптического тракта с помощью источника — имитатора электронного кольца. Чтобы не искажать конфигурацию магнитных полей ускорителя, все элементы конструкции оптического тракта выполнены из немагнитных материалов. Тракт смонтирован в непосредственной близости от компрессора электронных колец на специальной массивной бетонной подставке, исключающей вибрации при срабатывании импульсных магнитных систем ускорителя.

Вышеописанная оптика использовалась в базовых устройствах ускорительной диагностики ОИЯИ и сыграла особую, определяющую роль [15] при исследовании возможности получения кольцевых электронных и электронно-ионных сгустков с параметрами, оптимальными для коллективного ускорения тяжелых ионов электронными кольцами.

2. ИНФРАКРАСНАЯ СИНХРОТРОННАЯ ОПТИКА. ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ

Особенности разработки специальной оптики и ее использования в экспериментах с инфракрасным синхротронным излучением покажем на примере диагностики компрессора кольцевых сгустков ОИЯИ. Для диагностики электронных кольцевых сгустков по их синхротронному излучению в инфракрасной области разработаны и применены на практике окна [45] для вывода излучения из вакуумной камеры ускорителя и два варианта широкополосных длиннофокусных оптических систем, обеспечивающих фокусировку инфракрасного излучения на чувствительные элементы детектирующего блока. Варианты различаются тем, что в одном в качестве объектива использованы линзы [27, 29], а в другом — сферические зеркала [47]. Обе системы могут работать как с позиционно-чувствительными детекторами (по схеме с объективом), так и с интегральными одноэлементными фотоприемниками (по схеме с объективом и конденсором). Объектив позволяет получить на чувствительной поверхности многоэлементного приемника изображение сечения электронного кольца с целью определения его размеров. Совместное использование объектива и конденсора обеспечивает оптическое усиление полезного сигнала и предназначено для работы с высокочувствительным прецизионным интегральным одноэлементным приемником, с помощью которого можно измерить минимальное число электронов в сгустке. Таким образом, полностью удовлетворяются разные требования к оптическим системам, работающим с интегральными и координатными детекторами.

Условия эксперимента. На рис. 1 представлена схема, поясняющая геометрию испускания синхротронного излучения и его регистрации. Объект диагностики и исследования, он же источник инфракрасного излучения, — тороидальный (кольцевой) ступок низкоэнергетических релятивистских электронов I . 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.

За время ускорения равновесный (средний) радиус R кольцевого ступка уменьшается с 40 до 4 см, энергия электронов E увеличивается с 2,5 до 20 МэВ, а максимум спектрального распределения синхротронного излучения λ_m смещается из радиочастотного диапазона в инфракрасную область длин волн $\Delta\lambda_m \simeq 1-8$ мкм. 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 метода коллективного ускорения (захвата и удержания электронным ступком тяжелых ионов) должны быть такими: радиус $R \simeq 4$ см, линейные размеры малого поперечного сечения кольцевого электронного ступка $a_R, a_Z \simeq 2-4$ мм, энергия электронов $E \simeq 20$ МэВ, 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 кГц) 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 $\Delta\lambda = 1-8$ мкм;

2) с измерением геометрии тороидального ступка: его радиуса $R \simeq 4-6$ см, размеров малого поперечного сечения $a_R, a_Z \simeq 2-6$ 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 детек-

торы. 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.

Инфракрасная оптика. С точки зрения оптики рассматриваемая в представленном обзоре проблема интересна рядом отличительных особенностей.

Во-первых, излучение необходимо регистрировать в широком диапазоне длин волн $\Delta\lambda/\lambda \gg 1$ инфракрасного спектра.

Во-вторых, излучение синхротронное (узконаправленное, поляризованное).

В-третьих, источник излучения малоинтенсивный ($\sim 10^{-6}$ Вт), малогабаритный (~ 2 мм), произвольно меняющий свою конфигурацию и положение в пространстве.

В связи с отсутствием широкополосных инфракрасных окон и длиннофокусной светосильной оптики, способной обеспечить решение задач, поставленных физическим экспериментом, были разработаны специальные окна и проведен расчет достаточно простых оптических систем, которые могут быть использованы для работы в двух вариантах:

- в измерительной системе с прецизионным интегральным детектором для обнаружения синхротронного излучения и определения числа электронов в сгустке по измеренной абсолютной величине интенсивности зарегистрированного излучения;
- 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 позиционно-чувствительного однокоординатного детектора.

Вывод синхротронного излучения из ускорителя. Процесс дистанционной неразрушающей бесконтактной диагностики кольцеобразного сгустка по его электромагнитному излучению в инфракрасной части спектра включает в себя операцию вывода этого излучения из вакуумной камеры ускорителя через специальное окно с минимально возможными потерями по интенсивности во всем рабочем спектральном диапазоне. Окно является частью конструкции ускорительной камеры и находится в непосредственной близости от сильноточного кольца низкоэнергетичных релятивистских электронов. При срабатывании ускорителя электроны и в особенности гамма-излучение оказывают на окно значительное радиационное воздействие, которое приводит к изменению электронных свойств оптического материала окна с возникновением свободных носителей заряда, захват которых внутренними точечными дефектами оптического материала вызывает появление центров окраски и люминесценции с образованием полос поглощения и появлением фонового излучения окна в ультрафиолетовой и видимой областях спектра. Синхро-

тронное излучение, выводимое из ускорителя, также влияет на окно. Под воздействием электронов и пучка синхротронного излучения происходит эрозия поверхности окна с нарушением ее микрорельефа, приводящая к рассеянию падающего излучения и снижению коэффициента отражения. Экспериментаторам, работающим с синхротронным излучением, хорошо известен эффект потемнения окна в том месте, где постоянно проходит пучок излучения. На внутренней поверхности окна со временем образуется желтоватое пятно, соответствующее угловой расходимости синхротронного излучения.

Таким образом, радиационное облучение приводит к изменению оптических характеристик окон, существенно влияющих на результаты измерений в видимой области и требующих постоянной калибровки аппаратуры и корректировки экспериментальных результатов.

Проблема окон и их уплотнений всегда была важной в вакуумной технике и криогенике, в том числе и для ускорителей заряженных частиц. Хорошая спектральная прозрачность в широком диапазоне длин волн, высокая термостойкость, пластичность и механическая прочность, при минимальном газопротекании и собственном газовыделении, делают проблему окон одной из главных, если не решающей, для обеспечения диагностики по магнитно-тормозному излучению. Немаловажное значение имеют стоимость оптического материала и возможность его приобретения.

С учетом перечисленных требований разработаны и апробированы в ускорительной практике окна из различных оптических материалов [48, 49]: плавленого кварца марки КВ для видимой и ближней (до 3,5 мкм) инфракрасной части спектра; фтористого кальция (CaF_2) для видимой и средней (до 9 мкм) инфракрасной части спектра; оптической керамики КО-1 из поликристаллического фтористого магния (MgF_2) для длин волн $\lambda \sim 1-8$ мкм; оптической керамики КО-2 на основе поликристаллического сульфида цинка (ZnS) для длин волн $\lambda \sim 1-14$ мкм; оптической керамики КО-4 из селенида цинка (ZnSe) и оптического бескислородного стекла марки ИКС-25 (GeSe) для спектрального диапазона до 20 мкм. Эти материалы имеют хорошую прозрачность в рабочих участках спектра и удовлетворяют требованиям по вакууму. Диаметр окон составляет от 60 мм (при толщине от 4–5 мм для КО-1 и 7 мм для CaF_2) до 115 мм при толщине 19 мм для КВ.

Глубокий стабильный вакуум — одно из необходимых условий работы ускорителя. Получение вакуума лучше чем 10^{-9} Торр предусматривает в ряде случаев возможность длительного прогрева при температуре $\sim 350-400$ °С конструкций (элементов и узлов, в том числе и узла с окном для синхротронного излучения), устанавливаемых на вакуумной камере ускорителя, а все соединительные уплотнения должны осуществляться с использованием металлической прокладки. Естественно, что при этом герметичность уплотнения окна с оправой не должна нарушаться.

В работах [50–55] рассмотрено несколько конструкций высоковакуумных прогреваемых окон для вывода инфракрасного излучения. К сожалению, ни одна из этих конструкций не может быть использована в условиях прогреваемой вакуумной камеры. В указанных работах описаны окна небольшого диаметра (~ 30 мм), тогда как для выведения пучка синхротронного излучения диаметром ~ 40 – 60 мм с минимальными потерями по интенсивности требовалось окно диаметром ~ 70 мм при толщине 4–6 мм. Такое окно за счет перепада атмосферного давления подвергается значительно большим напряжениям. Кроме того, в предлагаемых конструкциях герметизация окон в оправках осуществляется с помощью легкоплавких припоев или органических смол, нестойких при температуре обезгаживания вакуумной системы ускорителя (~ 300 – 400 °С).

В силу специфических условий работы ускорителя были предъявлены жесткие требования к выбору материалов как окна, так и оправы. Для изготовления оправы необходим немагнитный термостойкий металл. В качестве материала окна была выбрана оптическая керамика — поликристаллический материал, сочетающий высокие конструкционные характеристики (изотропность механических свойств) с хорошей прозрачностью в инфракрасной области спектра. Требуемую прозрачность в области длин волн 1–8 мкм имеет оптическая керамика КО-1 [48] на основе фтористого магния. Она имеет механическую прочность ~ 10 кг/см² (в несколько раз превосходящую прочность монокристаллического фтористого лития и очень близкую к прочности оптического стекла К-8), высокую термостойкость. КО-1 способна длительное время работать при температуре 300–400 °С и перепаде давления ~ 1 кг/см². В качестве материала оправы была выбрана нержавеющая сталь.

Герметичное сочленение окна с металлической оправой выполнено методом диффузионной сварки. При этом опробованы два способа [45, 56, 57]:

1) диффузионная сварка с оправой готового, прошедшего механическую обработку диска из керамики КО-1;

2) совмещение операции изготовления оптической керамики из высокодисперсионного порошка с диффузионной сваркой получаемой керамики с металлической оправой.

Второй способ оказался более эффективным и надежным.

Технология получения оптической керамики традиционна для многих видов керамики и основана на методе горячего прессования поликристаллического материала. Потери излучения при его прохождении через чистый поликристаллический материал определяются присущей ему абсорбцией и рассеянием излучения пустотами. Пропускание излучения через изотропный материал приближенно можно представить в виде

$$I_r = I_0 e^{-kt} \exp \left[-at_\nu d_\nu \left(\frac{n - n_\nu}{\lambda} \right)^2 \right],$$

где I_r — интенсивность светового потока, прошедшего через материал; I_0 — интенсивность падающего потока; k (см^{-1}) — коэффициент поглощения изотропного материала; t (см) — толщина материала; d_ν ($\mu\text{м}$) — средний диаметр пустот; t_ν ($\mu\text{м}$) — эффективная толщина пустот; n — коэффициент преломления материала; n_ν — коэффициент преломления пустот (~ 100); λ ($\mu\text{м}$) — длина волны; a — константа, равная 7.

Чтобы довести до минимума размер и число пустот или полностью их исключить, необходима одновременная обработка поликристаллического материала теплом и давлением. Полученная таким способом керамика имеет внешнее сходство со стеклом и может подвергаться механической обработке, соответствующей оптическим и вакуумным требованиям.

Оптическая керамика КО-1 получается из поликристаллического фтористого магния, относящегося к группе фторидов щелочно-земельных элементов. Исходный материал может быть в виде гранул или порошка. В нашем случае сырьем служил высокодисперсионный порошок. Заготовки окон в оправках получены при температуре прессования $640\text{--}670^\circ\text{C}$, давлении $1000\text{--}2000$ кг/см и вакууме 10^{-1} Торр. Материал матрицы при рабочих температурах должен быть достаточно прочен и инертен, чтобы не реагировать с прессуемым материалом. В данном случае матрица была изготовлена из вольфрама.

В процессе горячего прессования, длительность которого определяется временем, необходимым, чтобы связать частицы массы исходного сырья и создать когезивно-формованное тело, могут образоваться окислы металлов, способствующие слипанию элементов матрицы и оправы окна. Для исключения сцепления на соприкасающиеся поверхности накладывают разделяющее покрытие — высокотемпературную смазку, например окись хрома, нитрид бора и др.

Прочность герметичного сочленения прессовки из фтористого магния с металлической оправой при их охлаждении от температуры изготовления до температуры $\sim 20^\circ\text{C}$ определяется соотношением их коэффициентов теплового расширения (КТР). В случае, когда КТР оправы был ниже КТР керамики (КТР для титанового сплава ОТ-4 [58] и КО-1 в диапазоне температур $20\text{--}400^\circ\text{C}$ соответственно равны $9 \cdot 10^{-6}$ и $12,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), вакуумно-плотное сочленение при охлаждении разрушалось в силу хрупкости оптической керамики КО-1 при комнатных температурах и возникающих при остывании значительных растягивающих напряжениях, величина которых может быть оценена соотношением

$$\sigma = \delta E = E\alpha\Delta T,$$

где σ — напряжение растяжения; E — модуль Юнга; δ — относительное удлинение; α — коэффициент линейного расширения; ΔT — изменение температуры.

На основе результатов проведенных исследований был сделан вывод о необходимости соблюдения таких условий, чтобы при охлаждении окно постоянно находилось под воздействием пусть небольших, но обязательно сжимающих напряжений. Соблюдение этого условия потребовало выбора материала для изготовления оправы окна с несколько большим КТР, чем у КО-1. Для ускорительной техники таким подходящим конструкционным материалом является нержавеющая сталь.

Были изготовлены и испытаны оправы различной конструкции из нержавеющей диамагнитной стали марки 1Х18Н9Т [59] (КТР при температуре 20–400 °С равен $17 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Проведенные испытания показали отсутствие нарушения герметичности в области диффузионно-сварного шва. Однако наблюдались случаи, когда окна разрушались вдоль плоскости диска под действием значительных сжимающих напряжений. Так как отсутствует возможность подбора состава нержавеющей легированных диамагнитных сплавов, для уменьшения напряжений, вызываемых разностью КТР оправы и окна, а также для устранения напряжений, возникающих при уплотнении оправы окна металлической прокладкой на вакуумной системе ускорителя, на кольцевой оправе вытачивается тонкостенный упругодеформируемый разгрузочный гофр. Окна из фтористого магния в оправках такой конструкции, как показывает опыт, допускают многократный длительный прогрев при температуре 400–600 °С без нарушения герметичности.



Рис. 8. Внешний вид инфракрасного прогреваемого окна

На рис. 8 показан общий вид окна со стороны его крепления к вакуумной системе. На рис. 9 представлен разрез окна в собранном виде. Конструктивно

окно представляет собой плоскопараллельный диск *1* из оптической керамики в оправе *2* из нержавеющей стали с тонкостенным гофром.

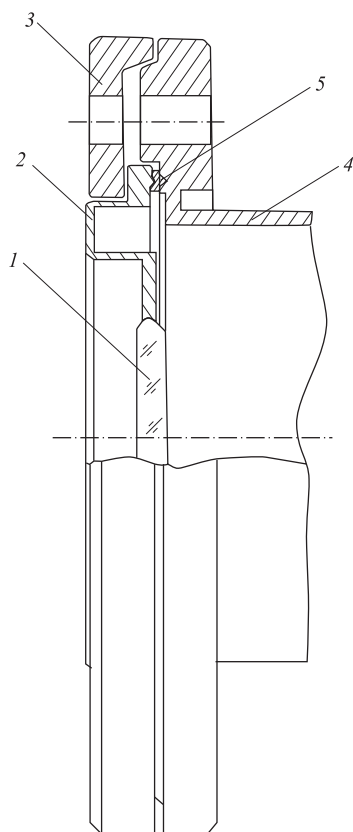


Рис. 9. Конструкция окна, установленного на патрубке вакуумной системы: *1* — плоскопараллельный диск из фтористого магния (оптической керамики КО-1); *2* — оправка из нержавеющей стали с тонкостенным гофром; *3* — прижимной фланец; *4* — патрубок вакуумной системы ускорителя; *5* — металлическая прокладка из отожженной медной фольги

обработка оправы перед прессованием нецелесообразна, так как в процессе горячего прессования оправка может быть повреждена или деформирована. Кроме

Световой диаметр окна равен 70 мм при толщине 4 мм. Внешний диаметр оправы составляет 155 мм. Крепление на патрубке вакуумной системы *4* осуществляется через металлическую прокладку *5* с помощью прижимного фланца *3*. Кроме уменьшения механических напряжений в оправе тонкостенный разгрузочный гофр позволяет устранить воздействие крутящего момента на светопропускающий диск при креплении окна к вакуумной системе. Первоначально оправка окна *2* и прижимной фланец *3* с крепежными отверстиями составляли единое целое, но в последующих вариантах эти детали были разделены, что позволило при одном прижимном фланце иметь целый набор разных окон. Таким образом, были существенно снижены сроки и затраты на изготовление окон.

Вакуумные испытания проводились в два этапа. Первоначально окна испытывались сразу же после горячего прессования керамики в оправе. Фланец с окном устанавливался на вакуумной установке ВА-05-4ПР [60], и проводилась откачка до давления $1,5 \cdot 10^{-5}$ Торр, которое потом поддерживалось в течение 8 ч при температуре окружающей среды. Испытания были нацелены на выявление микротрещин и повреждений, не обнаруженных при визуальном осмотре.

При отсутствии микротрещин проводилась чистовая механическая обработка оправы и окна. Окно шлифовалось и полировалось. Оправка обрабатывалась по 7-му классу чистоты, и протачивался тонкостенный гофр. Более тщательная обработка оправы перед прессованием

того, под воздействием температуры на поверхности оправы образуется слой окислов и появляются посторонние частицы, диффузионно-сваренные с металлом оправы. В заготовке оправы тщательно обрабатывалась только полукруглая или конусная канавка — место непосредственной диффузионной сварки окна и оправы. Таким образом экономилось время и расходы на изготовление окна.

После чистовой механической обработки оправы и окна последнее испытывалось на вакуумном стенде в жестком температурном режиме с прогревом до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 24 ч. Проверка герметичности сочленения окна с оправой проводилась с помощью гелиевого течеискателя ПТИ-7А [60] с чувствительностью $4 \cdot 10^{-12}$ Торр/с. Как правило, все окна, не имевшие видимых дефектов, возникших при горячем прессовании, проверку на стенде проходили успешно.

Газовыделение с поверхности оптической керамики на основе фтористого магния при прогреве образца до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ и вакууме порядка 10^{-9} Торр не превышает $7 \cdot 10^{-6}$ Торр/с, что позволяет достигать вакуума $\sim 10^{-9}$ Торр в вакуумной системе ускорителя.

Кроме вакуумных испытаний проводились испытания окон при охлаждении до температуры жидкого азота ($\sim 77\text{ K}$). Испытания прошли успешно, что позволяет надеяться на возможность использования таких окон и в криогенных системах.

Пропускание спектра излучения окном из оптической керамики КО-1 показано на рис. 10. Кривая на рисунке иллюстрирует измеренную на инфракрасном спектрометре ИКС-29 спектральную характеристику типичного окна из фтористого магния в оправе из нержавеющей стали, изготовленного согласно описанной технологии и прошедшего полную механическую обработку и вакуумные испытания. Окно имеет толщину 4 мм и изготовлено при оптимальных условиях прессования [61]: температуре $640\text{ }^{\circ}\text{C}$, давлении 2000 кг/см^2 и вакууме 10^{-1} Торр. Измерение проводилось в инфракрасной области $\lambda = 2\text{--}5\text{ мкм}$, области спектральной чувствительности инфракрасных детекторов из селенида свинца и антимонида индия, используемых в ускорительном эксперименте для регистрации синхротронного излучения. Следует отметить, что в области максимума спектральной чувствительности детекторов пропускание инфракрасного излучения превышало 90%. На рисунке не показано спектральное пропускание окна в видимой части спектра, где оно также весьма высоко ($\sim 40\%$).

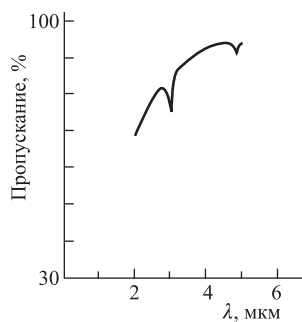


Рис. 10. Спектральная характеристика окна из фтористого магния толщиной 4 мм

Кроме окон в оправках из нержавеющей стали 1Х18Р9Т были испытаны окна таких же размеров, но в оправе из обычной углеродистой стали Ст-3, КТР которой близок КТР КО-1. Вакуумные испытания также показали полную работоспособность таких окон в высоковакуумных установках.

Расчет линзовой оптики. Выведенное из ускорителя синхротронное излучение передается с помощью оптического канала на заданное расстояние (возможно, на несколько метров) с минимальными абберационными и поляризационными искажениями, а также минимальными потерями по интенсивности и фокусируется оптической системой на детектор.

Основная задача детектирующей системы абсолютных измерений интенсивности синхротронного излучения заключалась в сборе и регистрации максимально возможного количества излучаемой энергии независимо от места положения источника в заданном пространстве ускорительной камеры. Эта задача может быть выполнена с помощью оптики, обладающей высокой прозрачностью в диапазоне спектральной чувствительности детектора и обеспечивающей передачу всего излучения, приходящего к входному зрачку $D_{\text{вх}}$ системы (см. рис. 11) из плоскости источника $D_{\text{ПЗ}}$, ограниченной полем зрения оптической системы, в плоскость приемника $d_{\text{пр}}$.

Для оптики, предназначенной для использования в измерительной системе с одноэлементным интегральным детектором синхротронного излучения, была выбрана оптическая схема с полевым конденсором (линзой Фабри). Методика расчета подобных схем достаточно хорошо разработана [19, 29, 62, 63]. Принципиальная оптическая схема показана на рис. 11.

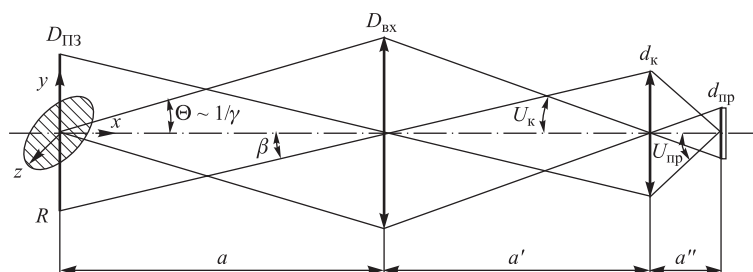


Рис. 11. Принципиальная оптическая схема с полевым конденсором для интегрального детектора — монитора синхротронного излучения: $D_{\text{ПЗ}}$ — плоскость объекта исследования; Θ — угол расходимости синхротронного излучения; β — угол поля зрения; $D_{\text{вх}}$ — входной зрачок объектива; $d_{\text{к}}$ — апертурная диафрагма полевого конденсора; $U_{\text{к}}$ — апертурный угол конденсора; $d_{\text{пр}}$ — линейный размер приемника; $U_{\text{пр}}$ — апертурный угол приемника; a — расстояние от объекта до входного зрачка; a' — расстояние между объективом и конденсором; a'' — расстояние между конденсором и приемником

В схеме с полевым конденсором, когда приемник расположен в выходном зрачке системы, при изменении угла падения лучей на входной зрачок не происходит перемещения изображения по чувствительной поверхности приемника, а весь выходной 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.

Выбор основных параметров оптической системы с полевым конденсором осуществляется с учетом инварианта Лагранжа–Гельмгольца

$$D_{\text{вх}} \sin \beta = d_{\text{к}} \sin U_{\text{к}} = d_{\text{пр}} \sin U_{\text{пр}}, \quad (1)$$

где $d_{\text{к}}$ — апертурная диафрагма; $U_{\text{к}}$ — апертурный угол конденсора; $U_{\text{пр}}$ — апертурный угол приемника.

Для нормальной работы оптической системы необходимо соблюдение условия, при котором апертурный угол приемника $U_{\text{пр}} \leq 1$. При заданных значениях $D_{\text{ПЗ}}$ и a угол поля зрения $\beta \simeq 45'$. При диаметре входного зрачка $D_{\text{вх}} = 60$ мм и размере приемника $d_{\text{пр}} = 2$ мм $U_{\text{пр}} \simeq 0,5 \leq 1$, т.е. условие (1) полностью выполняется.

Зная расстояние a между объектом исследования $D_{\text{ПЗ}}$ и входным зрачком $D_{\text{вх}}$ системы, а также фокусное расстояние объектива $f_{\text{об}}$, из уравнения отрезков

$$a' = \frac{af_{\text{об}}}{a - f_{\text{об}}} \quad (2)$$

можно найти расстояние a' от объектива до изображения источника излучения, в плоскости которого располагается либо однокоординатный детектор, либо главная плоскость конденсора.

Фокусное расстояние конденсора $f_{\text{к}}$ определяется из выражения линейного увеличения системы

$$\frac{f_{\text{к}}}{a' + f_{\text{к}}} = \frac{d_{\text{пр}}}{D_{\text{вх}}}. \quad (3)$$

При заданных размерах входного зрачка $D_{\text{вх}}$ и фотоприемника $d_{\text{пр}}$, а также рассчитанном расстоянии a' можно вычислить $f_{\text{к}}$.

Апертурной диафрагмой полевого конденсора $d_{\text{к}}$ является его оправа. Для угла поля зрения $\beta = 45'$ из выражения $d_{\text{к}} = 2a' \operatorname{tg} \beta$ следует, что она должна быть равной ~ 14 мм.

Приемник установлен в плоскости выходного зрачка. Расстояние между главной плоскостью конденсора и плоскостью выходного зрачка рассчитывается по формуле

$$a'' = \frac{a' f_{\text{к}}}{a' - f_{\text{к}}}. \quad (4)$$

Общая длина оптического пути системы составляет $L = a' + a''$.

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

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + (n - 1)^2 \frac{t}{n R_1 R_2}. \quad (5)$$

При $f/D = N > 1$ (где D — световой диаметр линзы, а N — ее фокусное число) точность расчета возрастает и толщиной линзы можно пренебречь. Тогда формула линзы (4) примет вид

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right). \quad (6)$$

При расчете радиусов кривизны поверхностей линз, примененных в оптической системе, учитывалось условие, при котором увеличение, вносимое в размер изображения за счет сферической аберрации, является минимальным. При заданных фокусном расстоянии f и показателе преломления n только одно из значений R_1 и R_2 можно выбрать произвольно. Поэтому возможности исправлений аберраций линзы весьма ограничены.

Значение сферической аберрации для простой линзы будет минимальным, когда радиусы кривизны образующих линзу поверхностей связаны соотношением [64–66]

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{2n^2 + n}{2n^2 - n - 4}, \quad (7)$$

которое соблюдается при

$$R_1 = \frac{2f(n - 1)(n + 2)}{n(2n + 1)}. \quad (8)$$

При подборе оптических материалов предпочтение было отдано поликристаллическим оптическим керамикам именно потому, что наряду с другими достоинствами (спектральными и механическими характеристиками) они обладают еще и высоким показателем преломления, от которого зависит величина сферической аберрации.

Основные характеристики линз (предназначенных для оптической системы с полевым конденсором) из различных инфракрасных материалов, рассчитанные по формулам (4) и (8) с учетом минимального значения сферической аберрации, приведены в таблице. Знак минус у значений радиуса R_2 означает, что центр окружности находится в обратном направлении относительно объекта исследования (справа от линзы). Значение показателя преломления принималось соответствующим длине волны 5,5 мкм.

Характеристики линз, изготовленных из различных инфракрасных оптических материалов

Оптический материал	Характеристики линз					
	$\Delta\lambda$, мкм	n ($\lambda = 5,5$ мкм)	f , мм	R_1 , мм	R_2 , мм	D , мм
MgF ₂ КО-1	1–8,5	1,3282	320,0	144,0	–409,0	60
ZnS КО-2	1–14,5	2,2416	17,5	14,57	47,02	19
ZnS КО-2	1–14,5	2,2416	22,0	19,0	61,34	23
CaF ₂	0,13–12	1,3952	40,0	21,0	–74,5	27
ИКС-29	1–15,5	2,6351	16,0	147	341	60

Конструктивно детектирующий блок с линзовой оптикой представляет собой отдельный съемный узел (см. рис. 12 и 13). Оптическая часть оптоэлектронной системы фоторегистратора выполнена согласно схеме, представленной на рис. 11 исходя из требований и условий физического ускорительного эксперимента.

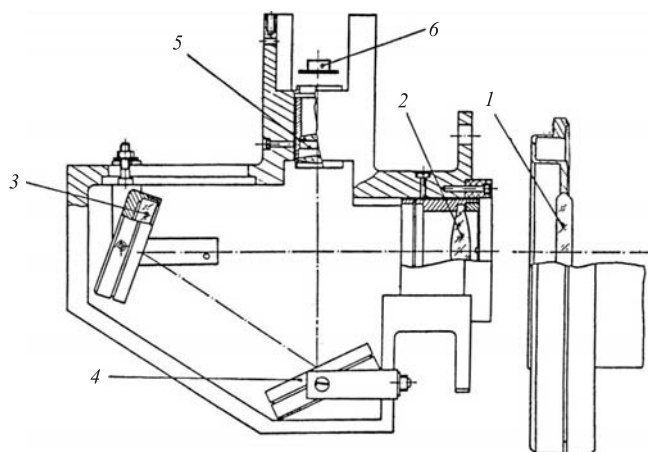


Рис. 12. Конструкция линзово-зеркальной системы инфракрасного фоторегистратора: 1 — высоковакуумное окно; 2 — объектив; 3, 4 — отклоняющие плоские зеркала; 5 — полевой конденсор; 6 — приемник (инфракрасный детектор)

В ускорительном эксперименте использовались преимущественно высокочувствительные прецизионные инфракрасные детекторы, работающие при температуре 77 К. Чувствительный элемент детектора крепится к нижней, торцевой части стеклянной колбы с жидким азотом — заливному сосуду Дьюара. Так как, согласно начальным условиям, охлаждаемый жидким азотом

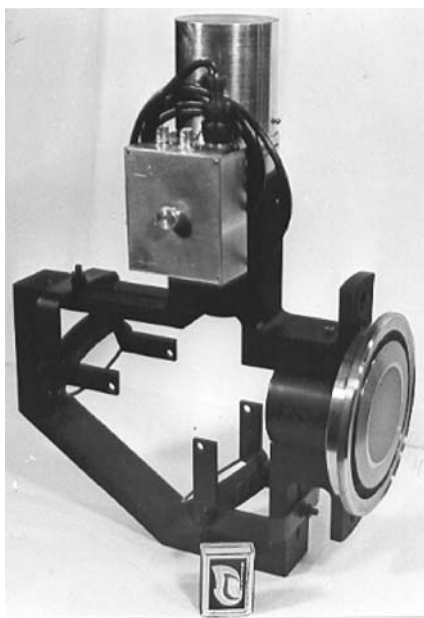


Рис. 13. Внешний вид инфракрасной линзово-зеркальной оптической системы с окном из КО-1 на входе и охлаждаемым жидким азотом интегральным GeAu-детектором на выходе

который находится в плоскости изображения, создаваемого объективом; 6 — приемник $d_{пр}$. Конденсор 5 образует уменьшенное изображение входного зрачка системы $D_{вх}$, которым является объектив 2, в плоскости $d_{пр}$ приемника 6.

В качестве объектива использована одиночная линза из оптической керамики КО-1, поликристаллического фтористого магния, с относительным отверстием $D_{вх}/f_{об} = 1 : 5,3$. Начальными условиями заданы фокусное расстояние объектива $f_{об} = 320$ мм, его световой диаметр $D_{вх} = 60$ мм и значение показателя преломления n , соответствующее длине волны $\lambda = 5,5$ мкм, на которую приходится максимум спектральной чувствительности прецизионных интегральных детекторов инфракрасного излучения, предназначенных для абсолютных измерений интенсивности синхротронного излучения.

Полевым конденсором служит двухкомпонентный коллектив из линз, одна из которых выполнена из синтетического фтористого кальция, имеет фокусное расстояние $f = 40$ мм и относительное отверстие $D/f = 1 : 1,6$, вторая — из КО-2, оптической керамики на основе поликристаллического

интегральный детектор может работать только в вертикальном положении, то необходимо изменять направление оптической оси на 90° относительно направления распространения синхротронного излучения. Это осуществляется с помощью плоских зеркал. Кроме того, применение системы зеркал позволяет уменьшить габариты системы.

Конструкция системы позволяет работать либо с позиционно-чувствительным (источник–объектив–детектор), либо с интегральным (источник–объектив–конденсор–детектор) детекторами. На рис. 12 показано взаимное расположение всех основных оптических элементов, из которых состоит оптический канал вывода и передачи синхротронного излучения на детектор. Канал содержит: 1 — высоковакуумное прогреваемое окно; 2 — объектив, являющийся одновременно входным зрачком системы $D_{вх}$; 3, 4 — отклоняющие плоские зеркала; 5 — полевой конденсор d_k , располагающийся

сернистого цинка, с $f = 22$ мм и $D/f = 1 : 1,05$. Кроме того, рассчитана одиночная линза из КО-2 с $f = 17,5$ мм и относительным отверстием $1 : 1,09$.

Использование для изготовления линз полевого конденсора инфракрасных оптических материалов с высоким показателем преломления, который характерен для оптических керамик, позволило получить короткофокусный конденсор со световым диаметром ~ 20 мм.

Все оптические детали выполнены согласно предъявленным требованиям и условиям эксперимента. Крепление оптических деталей в оправы предусматривает соответствующие прокладки, с тем чтобы оптический материал не соприкасался непосредственно с металлом. Крепление зеркал дает возможность их перемещения вдоль оптической оси и изменения угла наклона в широких пределах. Это перемещение необходимо для точной установки плоскости изображения, создаваемого объективом в главной плоскости конденсора или на чувствительной поверхности однокоординатного детектора. Все металлические детали оптической системы выполнены из немагнитного материала. Корпус оптического тракта изготовлен из плиты сплава алюминия Д16т толщиной 50 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.

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, исключающее посторонние блики и образование рассеянного света. От внешнего воздействия (светового и механического) оптическая система закрыта съемным кожухом из листового алюминиевого сплава. Сборка, юстировка и исследование характеристик оптической системы проводились на оптической скамье.

Основные характеристики линзово-зеркальной инфракрасной оптической системы фоторегистратора синхротронного излучения следующие:

Рабочая спектральная область $\Delta\lambda$, мкм	1–8
Фокусное расстояние объектива $f_{об}$, мм	320
Диаметр входного зрачка $D_{вх}$, мм	60
Фокусное число N	5,3
Фокусное расстояние конденсора f_k , мм	17,5
Диаметр выходного зрачка $D_{вых}$, мм	2
Поле зрения в плоскости объекта $D_{ПЗ}$, мм	24
Габариты, мм	$290 \times 300 \times 100$

Общий вид детектирующего блока с высоковакуумным прогреваемым окном из пресованного поликристаллического фтористого магния (оптической керамики КО-1, диффузионно-сваренной с металлической оправой) на входе линзово-зеркальной оптической системы и прецизионным интегральным охлаждаемым детектором на ее выходе представлен на рис. 13.

Зеркальная оптика. Для исследования быстропротекающих ускорительных процессов с помощью синхротронного излучения в настоящее время все больший интерес стала представлять регистрация и изучение параметров физических явлений не только в видимом свете, но и в других спектральных диапазонах. Расширение регистрируемого спектрального диапазона синхротронного излучения требует дальнейшего развития высокоскоростной аппаратуры в этом направлении, с одной стороны, и повышения точности и удобства работы с прибором — с другой. Разработанный в ОИЯИ синхротронный широкодиапазонный высокоскоростной фоторегистратор быстропротекающих ускорительных процессов [15] с зеркальным оптическим трактом и охлаждаемым жидким азотом инфракрасным многоэлементным фотоприемником и служит для решения вышеуказанных задач. Для этой же цели, например, может быть использован разработанный во Всероссийском НИИ оптико-физических измерений и получивший широкое распространение высокоскоростной фоторегистратор СФР с зеркальной оптической системой, имеющий модификации для работы в ультрафиолетовой и инфракрасной частях спектра. Соответствующие варианты прибора СФР-ИК и СФР-УФ серийно выпускаются отечественной промышленностью.

Оптическая система [67] зеркального фотохронографа включает в себя только зеркальные элементы, благодаря чему регистрируемая им спектральная область значительно расширена и оптическое изображение свободно от хроматических aberrаций. Как известно, отражающие поверхности с серебряным или алюминиевым покрытием имеют высокий коэффициент отражения в ультрафиолетовой, видимой, инфракрасной и радиоволновой частях спектральной шкалы. В связи с этим использование зеркальной оптики для указанных областей спектра ограничивается лишь дифракционной разрешающей способностью, которая падает с ростом длины волны регистрируемого излучения, а также небольшим набором приемников, чувствительных к соответствующим длинам волн. Отсутствие хроматизма в оптической системе позволяет производить полностью точную наводку и фокусировку на объект съемки в видимом свете независимо от рабочего участка спектра.

Принципиальная оптическая схема зеркального фотохронографа представлена на рис. 14. Входной объектив, состоящий из сферического зеркала 1 и плоского зеркала 2, строит изображение наблюдаемого объекта на щели 3. Затем промежуточное изображение из плоскости 3 переносится последующей оптической системой 4–8 на поверхность светочувствительного материала. Компоненты 5–7 представляют собой вогнутые сферические зеркала, в

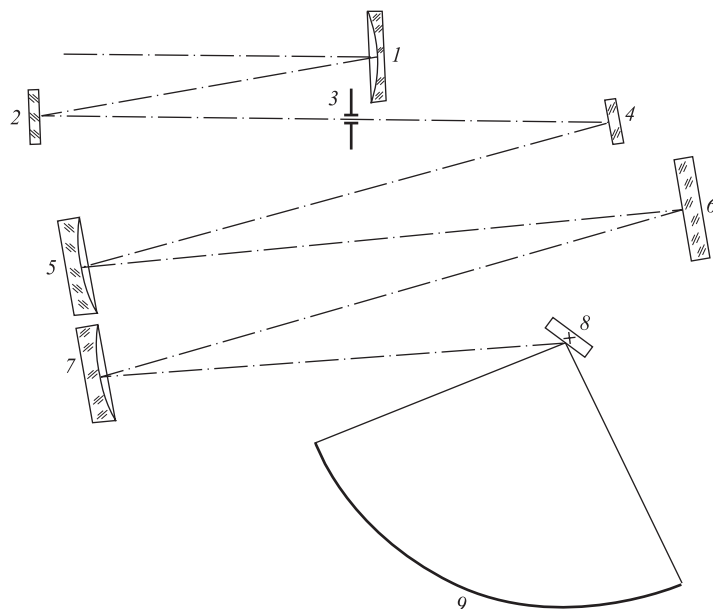


Рис. 14. Принципиальная оптическая схема высокоскоростного фотохронографа и спектрографа для широкого спектрального диапазона [67]

фокальных плоскостях которых расположены щель 3 и изображение, перемещаемое по цилиндрической поверхности 9 при вращении зеркала 8. Цилиндрическое зеркало 4 служит для компенсации астигматизма сферических зеркал, работающих в наклонных пучках лучей. Компонент 6 является съемным: в варианте фотохронографа здесь устанавливается плоское зеркало, а в варианте спектрографа — дифракционная решетка. Кроме того, в последнем случае вместо щели 3 помещается точечная диафрагма. В приборе предусмотрено два режима работы в каждом из вариантов. В «неждущем» режиме в качестве вращающегося зеркала используется деталь с одной отражающей поверхностью, в «ждущем» режиме применяется восьмигранное зеркало. Переход от одного режима к другому производится заменой вращающегося зеркала 8 и небольшим смещением фокальной поверхности 9. Прибор может иметь фокусное расстояние 600 и 1400 мм, что соответствует двум видам входных объективов. Конструкция входного объектива с фокусом 600 мм включает в себя зеркала 1 и 2, строящие изображение наклонных к оптической оси пучков лучей. Длиннофокусный вариант имеет на входе объектив, состоящий из вогнутого и выпуклого сферических зеркал, центры поверхностей которых находятся на оптической оси объектива.

Основные характеристики высокоскоростного зеркального фотохронографа и спектрографа:

Разрешение во времени при скорости вращения зеркала до 75000 об/мин, с	до 10^{-6}
Полное время регистрации, мкс	от 2000 до 100
Фокусное расстояние, мм	600 и 1400
Относительное отверстие	
— с плоским зеркалом	1/10
— с 8-гранным зеркалом	1/15
Пределы фокусировки, м	до 2,5
Размер кадра, мм	24×375
Радиус развертки, мм	239

Для тех случаев, когда детектор синхротронного излучения должен быть вынесен из зоны действия электромагнитных и радиационных полей ускорителя (особенно это касается высокочувствительных детекторов с заливным сосудом Дьюара), разработан и создан специальный оптический тракт [26, 46, 68] с отражающими активными элементами (сферическими зеркалами), обеспечивающими широкополосность всего устройства и позволяющими регистрировать синхротронное излучение в спектральной области $\Delta\lambda \sim 0,3\text{--}40$ мкм.

Одним из основных условий работы многоэлементных детектирующих систем является необходимость обеспечения их помехозащищенности от импульсных электромагнитных и радиационных помех ускорителя. Главным источником помех являются импульсные магнитные поля ускорителя. Для устранения влияния наводок необходимо позиционно-чувствительный детектор, на котором фокусируется изображение источника излучения в масштабе 1:1, устанавливать на расстоянии менее 2 м от этого источника. Это потребовало создания оптического канала с длиннофокусными зеркальными элементами.

Оптическая широкополосность тракта обеспечивается использованием в нем только отражающих элементов (зеркал). Отражающие элементы изготовлены из оптического стекла К-8 с поверхностью заданной кривизны, покрытой слоем серебра, нанесенного путем испарения в вакууме. Так как работа с оптическим трактом проводится в лабораторных условиях, при постоянной температуре и влажности, то для уменьшения потерь при прохождении излучения 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 относительного отверстия системы и длины волны, фор-

мирующей изображение. Кроме того, длинноволновая граница связана с ограниченным набором окон для вывода синхротронного излучения из ускорителя и зависит от спектральной чувствительности приемников.

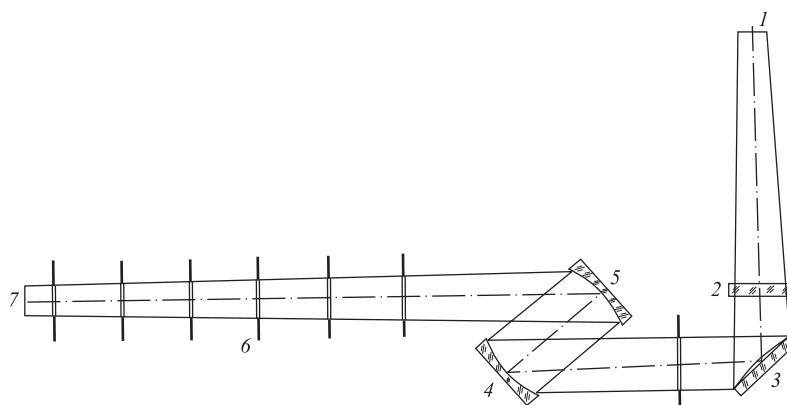


Рис. 15. Принципиальная оптическая схема зеркального оптического тракта широкодиапазонного фоторегистратора: 1 — сечение электронного кольца; 2 — высоковакуумное защитное окно, работающее в инфракрасной области; 3 — отклоняющее зеркало; 4, 5 — сферические зеркала; 6 — диафрагма; 7 — плоскость изображения

На рис. 15 показана принципиальная оптическая схема зеркального оптического тракта. Так как синхротронное излучение распространяется в узком конусе, то видимым будет не все электронное кольцо, а только его сечение, перпендикулярное оптической оси системы. Синхротронное излучение от малого поперечного сечения электронного кольца 1 из вакуумной камеры компрессора выводится через инфракрасное окно 2, в непосредственной близости от которого расположено плоское зеркало 3, отклоняющее расходящийся пучок синхротронного излучения. Первое сферическое зеркало 4 установлено так, чтобы объект наблюдения находился в его фокусе, что позволяет сделать расходящийся пучок излучения параллельным оптической оси и передать таким образом на любое заданное расстояние. Изображение наблюдаемого объекта (в нашем случае — сечения тороидального электронного ступка) строится в фокальной плоскости 7 второго сферического зеркала 5, где расположена чувствительная поверхность регистрирующего устройства. Фокусное расстояние обоих зеркал одинаково и равно 1850 мм. В фокальных плоскостях вогнутых сферических зеркал 4, 5 расположены объект исследования и его изображение, перемещаемое по поверхности позиционно-чувствительного координатного многоэлементного фотоприемника в процессе сжатия элек-

тронного кольца в ускорителе-компрессоре. Диафрагмы *б* ограничивают влияние бликов и постороннего излучения.

Отклоняющее зеркало *з* меняет направление оптической оси на 90° . Первоначально для исправления астигматизма сферических зеркал, работающих в наклонных пучках лучей, их поверхности была придана цилиндрическая форма. В дальнейшем для получения оптимального качества изображения оптическая схема тракта была исследована методом частотно-контрастных характеристик с помощью ЭВМ. При этом было установлено, что наилучшее качество изображения получается при отклоняющем зеркале не цилиндрической, а плоской формы. По-видимому, астигматизм в оптической системе тракта действует слабее, чем другие aberrации (сферическая, кома и т. д.). Соответствующие частотно-контрастные характеристики показаны на рис. 16 и 17. По оси абсцисс отложена пространственная частота ν — количество линий на 1 мм изображения; по оси ординат — k — относительное изменение контраста изображения по сравнению с объектом. Из рисунков можно видеть, что если принять в качестве критерия снижения контраста в изображении уровень 0,02 (визуальное разрешение), то при использовании цилиндрического зеркала в меридиональной плоскости тракта (плоскость чертежа) разрешающая способность оптической системы составляет 5–6 лин./мм. По результатам расчетов, это лучший вариант разрешения цилиндрического зеркала.

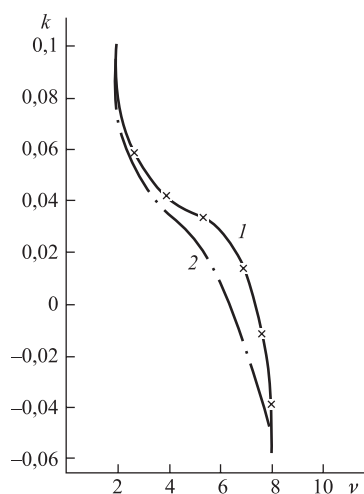


Рис. 16. Частотно-контрастная характеристика оптического тракта с цилиндрическим отклоняющим зеркалом: 1 — в центре поля зрения; 2 — на краю поля зрения

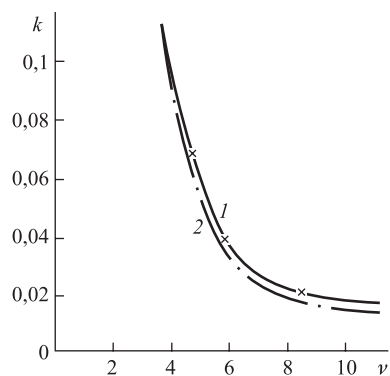


Рис. 17. Частотно-контрастная характеристика оптического тракта с плоским отклоняющим зеркалом: 1 — в центре поля зрения; 2 — на краю поля зрения

При использовании плоского зеркала $З$ разрешающая способность тракта составляет 9–10 лин./мм.

На рис.16 и 17 кривые 1 (отмечены крестиками) относятся к центру поля зрения, кривые 2 (отмечены точками) — к краю поля зрения. Фотографическая способность тракта показана на рис.18. Приведем основные технические данные и характеристики зеркального длиннофокусного широкополосного оптического тракта. Область применения — тракт работает в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра ($\Delta\lambda \sim 0,3\text{--}40$ мкм) (ограничение спектрального диапазона связано только с покрытием зеркал и дифракцией).

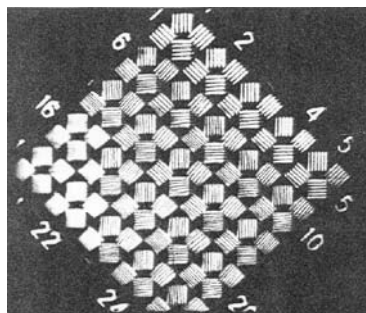


Рис. 18. Фотографическая способность тракта

Фокусное расстояние сферических зеркал f , мм	1850
Относительное отверстие	1 : 21
Увеличение	1 : 1
Фотографическая разрешающая способность, мм ⁻¹	
— в фокальной плоскости тракта	7
— при смещении на ± 5 мм	7
— при смещении на ± 10 мм	7
— при смещении на ± 15 мм	7
— при смещении на ± 20 мм	5
Поле зрения в плоскости объекта, мм	$\varnothing 34$
Габариты, мм	2000 × 360 × 370

В зеркальном оптическом тракте сферические зеркала имеют юстировочные движения вдоль оптической оси на ± 70 мм и поворачиваются вокруг точки пересечения зеркальной поверхности с оптической осью на $\pm 5^\circ$. Плоские зеркала могут поворачиваться на $\pm 5^\circ$. Для точного совмещения фокальной поверхности регистрирующего устройства (например, фотокамеры) с фокальной поверхностью второго сферического зеркала предусмотрено юстировочное движение фоторегистратора вдоль оптической оси на ± 70 мм. Отсутствие хроматической аберрации 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 мкм и отсутствию защитного покрытия на отражающих

поверхностях. В основном потери интенсивности синхротронного излучения определяются материалом инфракрасного окна (до 40 % потерь) и материалом окна приемника.

Все детали и узлы конструкции тракта выполнены из неметаллических, токонепроводящих и немагнитных материалов. Оправа зеркал выполнена из латуни. Конструкция зеркальной системы представлена на рис. 19. Оптический тракт в виде отдельного узла крепится на жесткой трубчатой опоре к бетонной стене или на бетонном кубе, т. е. закрепляется на подставке или основании, свободном от вибраций.

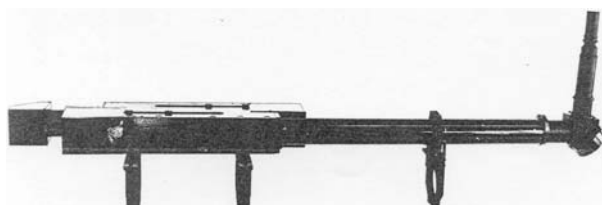


Рис. 19. Внешний вид зеркального оптического тракта с заливным инфракрасным детектором на выходе

Тракт предназначен для работы с различными типами инфракрасных охлаждаемых и неохлаждаемых фотоприемников, но в основном с мозаичными многоэлементными фотоприемниками из кремния, антимонида индия (рабочая температура $T_{\text{раб}} = 77 \text{ К}$), селенида свинца ($T_{\text{раб}} = 250 \text{ К}$), пироэлектриков. Широкополосность зеркал позволяет использовать тракт для ультрафиолетовой и видимой области. Предусмотрена возможность работы оптического тракта в видимой и ближней инфракрасной областях с высокоскоростным фоторегистратором типа СФР. Для регистрации излучения в инфракрасной области конструкция тракта позволяет использовать заливные (охлаждаемые жидким азотом) фотосопротивления. Такой охлаждаемый детектор виден на выходе оптического тракта на рис. 19.

Зеркальный оптический тракт позволил впервые на ускорителе-компрессоре ОИЯИ обнаружить и зарегистрировать синхротронное излучение, интенсивность которого (т. е. число электронов) в первых экспериментах оказалась столь малой, а спектр излучения — столь неопределенным, что без оптического усиления и возможности регистрации в широком диапазоне длин волн обнаружить синхротронное излучение было бы невозможно.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФРАКРАСНОЙ ОПТИКИ

Методика. Исследования инфракрасной оптики (аббераций отдельных линз и оптической системы в целом) с пропускающими элементами, изготовленными из непрозрачных оптических материалов, представляют собой

более сложную задачу по сравнению с такими же исследованиями, но в видимой части спектра длин волн.

Для решения этой задачи была специально разработана методика [29], основанная на использовании эффекта температурного гашения фотолуминесценции, при котором результат воздействия инфракрасного излучения становится видимым [69]. Детектором-визуализатором инфракрасного излучения служит слой температурно-чувствительного люминофора из кристаллофосфатов $ZnS \cdot CdS$, активированных Ag и Ni .

Люминесцентный детектор с температурным гашением представляет собой поглощающую поверхность в виде тонкой пленки из металлизированного лавсана, на поверхность которой путем химического осаждения из раствора нанесен равномерный слой люминофора. Толщина пленки с покрытием составляет 10 мкм.

Свечение люминофора предварительно возбуждено от источника ультрафиолетового излучения. При прохождении пучка инфракрасного излучения через поглощающую поверхность ее температура повышается, а свечение (яркость) люминофора падает.

По степени потемнения светящегося экрана в месте прохождения потока инфракрасного излучения можно судить о характере пространственного распределения интенсивности излучения, размерах и конфигурации пучка. Сам термогасящийся люминесцирующий экран является неселективным (чувствительным в широком диапазоне длин волн: от СВЧ до ближнего инфракрасного) детектором, и рабочий спектральный диапазон задается специальными полосовыми фильтрами, коэффициентом пропускания или отражения оптических элементов на пути излучения, спектральной характеристикой чувствительности детектора. Постоянная времени люминофорного детектора $\tau \sim 1$ с, и он, к сожалению, не мог быть использован для диагностики и исследования динамики быстропротекающих при ускорении процессов, однако оказался незаменимым при исследовании оптики инфракрасного излучения.

Стенд. Исследование характеристик отдельных линз и оптической системы в целом осуществлялось на стенде, на котором моделировались условия, приближенные к условиям работы на ускорителе с источником синхротронного излучения (спектр, интенсивность, частота следования импульсов и т. д.). Основные элементы располагались на оптической скамье по традиционной схеме: источник излучения, модулятор потока, исследуемая фокусирующая оптика, детектор.

В качестве широкополосного источника инфракрасного излучения использовалась эталонная лампа накаливания ИК 4-12 (3,9 В, 1,1 Вт) с кремниевым окном в торцевой части цилиндрической колбы из плавленого кварца, разработанная НИИИС и выпускаемая производственным объединением «Светотехника» в г. Саранске. Лампа применялась как источник излучения в инфракрасном диапазоне $\Delta\lambda \simeq 1,2\text{--}22$ мкм (через кремниевое окно) и в види-

мой области $\Delta\lambda \simeq 0,12-4,5$ мкм (через боковую стенку кварцевой колбы). Размер излучающей поверхности задавался диафрагмой с диаметром отверстия 0,8 мм. Этой же диафрагмой задавался апертурный угол, соответствующий угловой расходимости синхротронного излучения электронного сгустка.

Проведены детальные исследования всех линз, представленных в таблице, и линзовой оптической системы с объективом и конденсором, касающиеся aberrаций и разрешающей способности, поля зрения и спектра пропускания. Исследуемая линза устанавливалась от точечного источника инфракрасного излучения на таком расстоянии, чтобы получить на термочувствительном экране изображение этого источника в натуральную величину. Перемещая экран вдоль главной оптической оси, добивались получения изображения источника с максимальной четкостью. Таким образом измерялось фокусное расстояние линзы и определялись ее главные фокальные плоскости. После получения достаточно четкого изображения источника экран убирался, а на его место, в плоскость изображения, устанавливался детектор инфракрасного излучения, пространственное разрешение которого было достаточным, чтобы обеспечить проведение исследования разрешающей способности в заданном инфракрасном спектральном диапазоне длин волн как отдельных линз, так и оптической системы в целом.

Дисковый модулятор обеспечивал длительность импульса излучения, соответствующую длительности импульса синхротронного излучения ($t \sim 1$ нс).

В качестве детекторов (преобразователей интенсивности инфракрасного излучения в электрический сигнал) использовались предназначенные для синхротронной диагностики, работающие при температуре жидкого азота фотосопротивления из германия, легированного золотом (окно из просветленного германия, линейный размер чувствительной площадки $d_{\text{пр}} = 2$ и 3 мм, рабочий спектральный диапазон $\Delta\lambda \simeq 1,8-8,6$ мкм), и сурьмянистого индия (окно из сапфира, $d_{\text{пр}} = 0,15$ мм, $\Delta\lambda \simeq 0,7-5,9$ мкм).

Разрешающая способность. Для оптики системы измерения геометрии сгустка главным требованием является получение максимального пространственного разрешения, соответствующего разрешению многоэлементного координатного позиционно-чувствительного детектора. Разрешающая способность оптики определяется дифракцией и aberrациями. Эффективный диаметр кружка рассеяния от точечного источника, обусловленный дифракцией, определяется выражением

$$d_{\text{диф}} = 1,22N\lambda, \quad (9)$$

где N — фокусное число.

Из aberrаций наибольший вклад в увеличение размера изображения вносит сферическая aberrация. Диаметр изображения, которое создается простой линзой, образованной двумя сферическими поверхностями, с учетом увеличения, вносимого сферической aberrацией, приближенно выражается

формулой [66]

$$d_{\text{сф}} = \frac{7,8 \cdot 10^{-3}}{N^3} A, \quad (10)$$

где A — коэффициент сферической аберрации, который определяется как

$$A = \frac{n+2}{n(n-1)^2} \sigma^2 - \frac{4(n+1)}{n(n-1)} \sigma + \frac{3n+2}{n} + \frac{n^2}{(n-1)^2}, \quad (11)$$

где

$$\sigma = \frac{R_2 + R_1}{R_2 - R_1}.$$

Минимальное значение коэффициента A в формуле (11) и, следовательно, наименьший размер изображения будет при выполнении условия (8), согласно которому чем больше величина показателя преломления, тем меньше сферическая аберрация.

Проведен анализ влияния на размер изображения дифракции и различных видов аберраций (сферической, комы, астигматизма). Установлено, что для спектральной области $\Delta\lambda \simeq 1\text{--}8$ мкм основную роль играют дифракция и сферическая аберрация. Кроме того, дифракция также накладывает ограничение на разрешающую способность оптической системы.

При расчете кривизны поверхностей линз учитывалась только сферическая аберрация. Проведенные расчеты и исследования показали, что вклад, вносимый в разрешающую способность другими аберрациями, несущественен и их исправление особой роли не играет, а только усложняет расчет и изготовление линз. Для длиннофокусной линзы из КО-1 с фокусным числом $N = 5,3$ для длины волны $\lambda = 5,5$ мкм кружок рассеяния $d_{\text{рас}}$ в плоскости изображения точечного источника, обусловленный дифракцией и сферической аберрацией, рассчитанный по формулам (10) и (11), равен $d_{\text{рас}} = 0,43$ 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 соответствует свой, конкретный показатель преломления n оптического материала, из которого эта линза изготовлена. Величина показателя преломления n учитывается при расчете линзы по формулам (6) и (8). От n зависит кривизна преломляющих поверхностей и увеличение размера изображения, вносимое сферической аберрацией (см. (11)).

В отличие от описанной выше традиционной методики в данном конкретном случае использовали широкую полосу длин волн $\Delta\lambda/\lambda > 1$, где $\Delta\lambda$ изменяли от 1,1 до 5,5–8,6 мкм. Ширина диапазона зависит от спектра

пропускания оптических элементов (окна, линз), 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 исследования, приведенные на

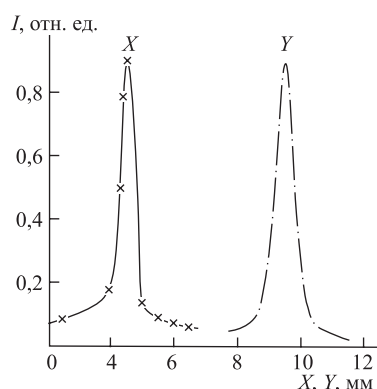


Рис. 20. Разрешающая способность объектива из КО-1 с $f_{об} = 320$ мм

рис. 20, показывают, что дифракция и сферическая aberrация не оказывают существенного влияния на увеличение размера изображения точечного источника, а значит, не играют заметной роли при формировании изображения в плоскости чувствительных элементов однокоординатного детектора при работе по схеме источник–объектив–детектор.

Результат исследований разрешающей способности линзы из КО-1 с $f_{об} = 320$ мм представлен на рис. 20. По вертикальной оси отложена в относительных единицах величина сигнала, снимаемого с детектора по мере его перемещения в плоскости изображения точечного источника. По горизонтальной оси отложен реальный размер изображения точечного источника, обусловленный дифракцией и aberrациями, измеренный по осям X и Y , перпендикулярным друг другу. Судя по результатам измерения, диаметр кружка рассеяния на полувысоте составляет $d_{реал} \approx 0,45$ мм. Как было сказано ранее, требования к разрешающей способности инфракрасной оптики непосредственно связаны с разрешающей способностью (линейным размером чувствительного элемента) инфракрасного позиционно-чувствительного детектора, которая для длин волн более 1 мкм, как правило, составляет ≈ 100 мкм. В нашем ускорительном эксперименте использовались однокоординатные детекторы с шагом 0,4–0,7 мм (большая точность не требовалась). Таким образом, разрешающая способность длиннофокусной инфракрасной линзы из КО-1 с $f_{об} = 320$ мм полностью соответствует разрешающей способности многоэлементных детекторов на основе сурьмянистого индия и селенистого свинца, использованных для измерения геометрии электронного сгустка (измеренное реальное малое поперечное сечение кольца имело линейный размер ~ 8 –22 мм). Практическое измерение кружка рассеяния, выполненное по методике, основанной на использовании эффекта гашения люминесценции под воздействием инфракрасного излучения, показало хорошее соответствие расчетных и экспериментальных результатов.

Поле зрения. Для системы абсолютных измерений интенсивности синхротронного излучения с прецизионным одноэлементным инфракрасным детектором (оптическая схема с полевым конденсором) разрешающая способ-

ность линз оптического тракта не имеет особого значения, так как размер чувствительной поверхности фотоприемника $d_{\text{пр}} = 2 \times 2$ и 3×3 мм, т.е. заведомо больше кружка рассеяния, обусловленного дифракцией и аберрациями. При проведении измерений интенсивности наиболее важно было знать линейный размер поля зрения $D_{\text{ПЗ}}$ в плоскости объекта исследования на пересечении медианной XU -плоскости кольцевого ступка с YZ -плоскостью его поперечного сечения. Такие исследования были проведены, и поле зрения было измерено. Методика измерения заключалась в том, что точечный источник инфракрасного излучения перемещался в плоскости объекта исследования, 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 термогасящегося экрана.

Измерение размеров поля зрения оптической системы и кружка рассеяния проводилось одноплощадочным инфракрасным детектором на основе антиминода индия, работающим 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, причем его длинная сторона располагалась вдоль одной из координатных осей, а затем приемник перемещался с точностью 0,1 мм вдоль перпендикулярной координатной оси, проходящей через центр приемной площадки.

Результат измерения для системы с полевым конденсором из CaF_2 с $f = 40$ мм представлен на рис. 21. Размер поля зрения $D_{\text{ПЗ}} > 20$ мм, что соответствовало требованиям ускорительного эксперимента. По горизонтальной оси отложено расстояние в миллиметрах, по вертикальной — сигнал с детектора в относительных единицах.

Использование инфракрасных оптических материалов с высоким показателем преломления позволило увеличить световой диаметр конденсорной линзы до 19 и 23 мм (см. таблицу). Вследствие этого диаметр поля зрения в плоскости сечения тора оказался равным ~ 30 мм. Поле зрения реальной оптической системы с конденсором из КО-2 с $f = 17,5$ мм оказалось больше ($D_{\text{ПЗ}} \simeq 32$ мм), чем требовалось начальными условиями.

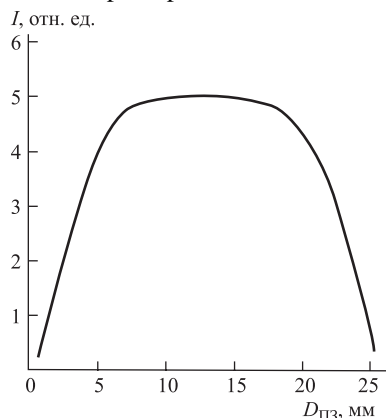


Рис. 21. Поле зрения оптической системы с конденсором

Эффективность. Исследована эффективность зеркально-линзовой оптической системы с полевым конденсором, обусловленная потерями излучения при его прохождении через окно, линзы и при отражении излучения от зеркал. Расчет эффективности системы проводился по формуле

$$\tau = \prod_{k=1}^{k=p+1} (1 - \rho_k) \prod_{m=1}^{m=p} (1 - \alpha_m)^{l_m} \rho_3^{N_3}, \quad (12)$$

где τ — коэффициент пропускания; ρ — коэффициент отражения; α — коэффициент поглощения; p — число прозрачных сред; l — толщина среды; N_3 — число зеркал.

Пропускание окна из оптической керамики КО-1, сферических линз из КО-1, КО-2+CaF₂ измерялось на инфракрасном спектрометре ИКС-29.

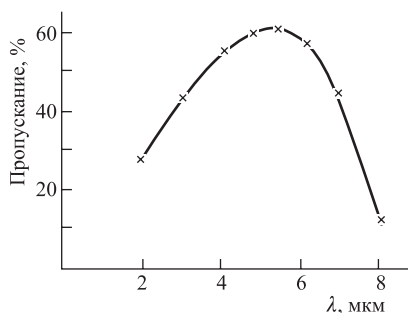


Рис. 22. Спектральная характеристика линзового оптического канала

Серебряные зеркала (слой Ag напылялся в вакууме на плоскую поверхность диска из кварцевого стекла) в диапазоне длин волн инфракрасного спектра отражают $\sim 98,9\%$ излучения ($\Delta\lambda \simeq 1-10$ мкм). Результат исследования спектральной эффективности оптической системы представлен на рис. 22. Как видно из этого рисунка, спектр длин волн, пропускаемый оптической системой, находится в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне ($\Delta\lambda \simeq 1-8$ мкм), что полностью соответствует заданному начальными условиями рабочему спектральному диапазону. Макси-

мум пропускания оптической системы приходится примерно на ту же длину волны, что и максимумы спектральных характеристик чувствительности, используемых в экспериментах на ускорителе инфракрасных фотоприемников.

Таким образом, проведенные исследования разработанной инфракрасной оптики показали соответствие ее параметров и характеристик ускорительным техническим условиям и требованиям физических экспериментов.

4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНОЙ ОПТИКИ

Обнаружение синхротронного излучения. Первые опыты по обнаружению и регистрации синхротронного излучения в компрессоре ОИЯИ, проведенные по схеме: источник — окно — фокусирующая линза — приемник, оказались неудачными, несмотря на ожидавшуюся (согласно расчетам) очень

большую (порядка нескольких ватт) плотность потока излучения на чувствительной поверхности детектора. Поэтому главным требованием к проектируемой инфракрасной оптической системе было обеспечить обнаружение синхротронного излучения как единственного источника прямой информации о параметрах сгустка (источника, позволяющего вести бесконтактную неразрушающую диагностику импульсных быстропротекающих процессов) при его формировании и сжатии, чтобы на основе анализа полученной информации объективно подтвердить или опровергнуть возможность получения стабильных электронных сгустков с заданными токовыми, энергетическими и геометрическими параметрами ($N_e \gtrsim 10^{13}$ электронов, $E_e \simeq 20$ МэВ, $R \simeq 4$ см, a_z и $a_R \simeq 2-4$ мм), соответствующими условиям коллективного ускорения электронов и тяжелых ионов. Так как первоначально не ставилось под сомнение наличие в компрессоре кольцевого сгустка с необходимыми размерами и числом электронов, соответствующими или близкими расчетным, то был сделан вывод о непригодности для реальных условий ускорительного эксперимента впервые разработанной и предложенной автором, еще не имевшей аналогов в мировой практике синхротронной инфракрасной методики неразрушающей диагностики и созданной для реализации этой методики детектирующей аппаратуры.

Результаты первых экспериментов были проанализированы, были определены возможные причины отсутствия ожидаемого сигнала с детектора и намечены пути решения проблемы. Основными причинами отсутствия сигнала могли быть следующие:

- помехи от ускорителя существенно превышают полезный сигнал в момент его появления;
- неизвестно время появления синхротронной вспышки в процессе ускорения;
- неизвестно положение источника синхротронного излучения в пространстве ускорительной камеры (малое поперечное сечение кольца находится вне поля зрения детектора), т. е. медианная плоскость кольцевого сгустка или его ось (либо и то и другое) не совпадают с медианной плоскостью и осью ускорителя, а поэтому, из-за острой направленности пучка синхротронного излучения, оно не проходит через предназначенный для этого специальный канал и не попадает на детектор;
- токовые, энергетические и геометрические параметры реального кольца и, соответственно, спектральные и энергетические параметры синхротронного излучения не совпадают с расчетными и существенно от них отличаются.

Для решения проблемы автором был предложен и реализован на практике ряд первоочередных мероприятий, связанных:

- с созданием широкополосных длиннофокусных оптических систем, способных сфокусировать всю энергию синхротронного излучения, прошедшего через окно, на чувствительной поверхности детектора, в том числе и

расположенного вне зоны действия радиационных и электромагнитных полей ускорителя;

- обеспечением усиления сигнала с детектора за счет увеличения (\sim в 20 раз) плотности синхротронного излучения на чувствительной поверхности детектора с помощью соответствующей оптической системы;
- использованием в экспериментальной аппаратуре прецизионных детекторов, имеющих максимально высокую чувствительность в рабочей спектральной области $\Delta\lambda \simeq 1-8$ мкм и позволяющих регистрировать синхротронное излучение во всем диапазоне чувствительности этих детекторов ($\Delta\lambda/\lambda \gg 1$);
- обеспечением прохождения всего спектра синхротронного излучения в диапазоне чувствительности инфракрасных детекторов за счет использования окон и линз из соответствующих оптических материалов.

Впервые на основе анализа параметров электронного кольца в компрессоре построена модель синхротронного излучения в коллективном ускорителе тяжелых ионов ОИЯИ, проведены оценки предельных возможностей оптических методов диагностики кольцевых сгустков с помощью синхротронного, преимущественно инфракрасного излучения. На основе проведенного анализа были предложены, разработаны и созданы две широкополосные длиннофокусные оптические системы (зеркальная [26] и линзовая [27]), а для оптического усиления сигнала с детектора была предложена и реализована оптическая схема с полевым конденсором. В разработанной инфракрасной оптике были учтены все требования, определенные условиями ускорительного эксперимента, что позволило обнаружить, измерить и изучить синхротронное излучение в компрессоре. Благодаря инфракрасной оптике впервые в ОИЯИ на компрессоре сильноточных низкоэнергетичных электронных колец коллективного ускорителя обнаружено и зарегистрировано синхротронное излучение и с его помощью осуществлена неразрушающая диагностика и исследование электронных и электронно-ионных кольцевых сгустков в процессе их сжатия.

Ниже для иллюстрации практических возможностей применения разработанной инфракрасной оптики приведены некоторые результаты экспериментов с синхротронным излучением, проведенных на ускорителе тяжелых ионов ОИЯИ. Эти результаты были получены только благодаря использованию широкополосной длиннофокусной зеркально-линзовой оптики, позволившей впервые обнаружить и зарегистрировать синхротронное излучение, генерируемое сгустком релятивистских низкоэнергетичных электронов в компрессоре электронных колец. В первых экспериментах была измерена интенсивность излучения, размеры кольцевого сгустка, определено его положение в пространстве вакуумной камеры относительно медианной плоскости и оси ускорителя. В детектирующем блоке измерительной системы, обнаружившей синхротронное излучение, была использована оптическая схема с полевым

конденсором. Схема детектирующего блока с инфракрасной оптикой представлена на рис. 23. Оптический тракт был отъюстирован таким образом, чтобы его оптическая ось совпала с осью специального канала вывода синхротронного излучения из вакуумной камеры ускорителя, проходящей по касательной к электронным орбитам с радиусом $R = 5$ см. В этом случае поле зрения оптической системы позволяло вести наблюдение кольцевых сгустков с радиусами от 6,5 до 3,5 см. Высокочувствительные прецизионные детекторы — фотосопротивления из германия, легированного золотом, и антимонида индия — перекрывали рабочий спектральный диапазон $\Delta\lambda \approx 0,7\text{--}8,6$ мкм. Работу измерительного канала инфракрасной диагностики с результатами экспериментов с синхротронным излучением иллюстрируют рис. 24–32.

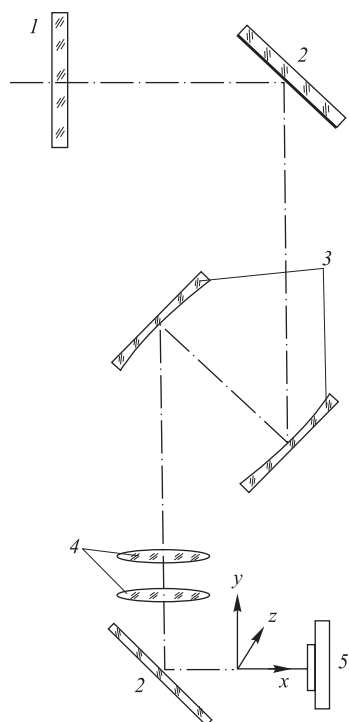


Рис. 23. Зеркальный тракт с конденсором: 1 — окно; 2 — отклоняющие плоские зеркала; 3 — сферические зеркала; 4 — полевой конденсор; 5 — приемник

касательной к электронным орбитам с радиусом $R = 5$ см. В этом случае поле зрения оптической системы позволяло вести наблюдение кольцевых сгустков с радиусами от 6,5 до 3,5 см. Высокочувствительные прецизионные детекторы — фотосопротивления из германия, легированного золотом, и антимонида индия — перекрывали рабочий спектральный диапазон $\Delta\lambda \approx 0,7\text{--}8,6$ мкм. Работу измерительного канала инфракрасной диагностики с результатами экспериментов с синхротронным излучением иллюстрируют рис. 24–32.

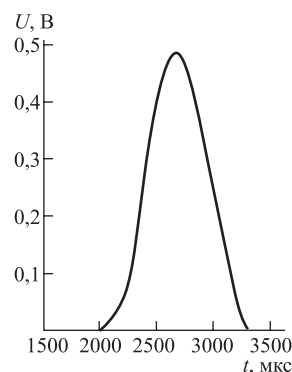


Рис. 24. Изменение интенсивности синхротронного излучения в процессе сжатия электронного кольца

После обнаружения синхротронного излучения была исследована его временная структура. На рис. 24 приведено распределение интенсивности синхротронного излучения в процессе сжатия электронного кольца в компрессоре.

Следующим этапом было определение положения сгустка в пространстве ускорительной камеры относительно ее оси и медианной плоскости. Эксперимент проводился по схеме: источник—объектив—детектор. Одноэлементный фотоприемник перемещался в плоскости изображения источника и регистри-

ровал излучение при каждом срабатывании ускорителя. В этих измерениях в качестве монитора использовался детектор гамма-излучения. Величина сигнала с гамма-детектора была пропорциональна числу ускоряемых электронов.

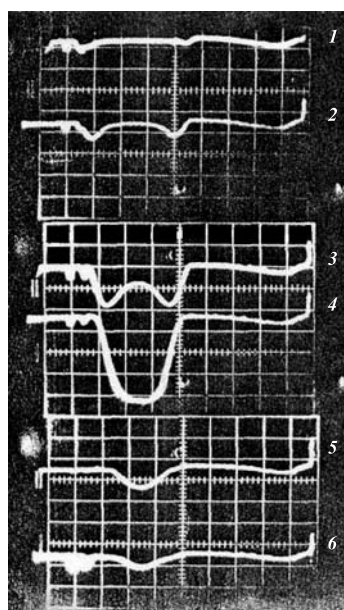


Рис. 25. Осциллограммы сигналов с интегрального детектора синхротронного инфракрасного излучения при разных радиусах сжатия кольца: 1 — 5,25 см; 2 — 5,00 см; 3 — 4,50 см; 4 — 4,25 см; 5 — 4,00 см; 6 — 3,75 см

сгусток (его малое сечение) полностью находится в поле зрения оптического тракта, размер которого показан на рис. 21.

Измерение размеров сгустка. Исследование геометрических параметров (размеров) кольца в компрессоре сводилось к измерениям его радиуса R , $R(t)$ -траектории, профиля и размеров малого поперечного сечения a_Z и a_R . В первых экспериментах с синхротронным излучением (см. рис. 24) измерение профиля и размеров кольца проводилось одноэлементным интегральным фотодетектором. С детектором использовался только объектив (см. рис. 11), строивший изображение источника излучения в плоскости приемника $d_{пр}$. Детектор размером 0,15 мм перемещался в фокальной плоскости объектива (в плоскости изображения) с точностью 0,1 мм. Так как синхро-

На рис. 25 показаны одни из первых осциллограмм импульсов синхротронного излучения, зарегистрированного в компрессоре электронных колец коллективного ускорителя тяжелых ионов, по которым можно судить о динамике сжатия кольца и числе электронов, участвующих в ускорении. Время развертки 0,5 мс/деление, величина сигнала 1 В/деление. Осциллограммы импульсов характеризуют распределение интенсивности синхротронного излучения по времени ускорения, соответствующему разным радиусам орбит электронов в процессе сжатия кольцевого сгустка в компрессоре. Максимум импульса синхротронного излучения говорит о том, что кольцо дожато до своего конечного минимального радиуса, которому соответствует заданный режим работы ускорителя. Отсутствие сигнала в средней части осциллограммы 1 объясняется тем, что по мере сжатия кольца его малое поперечное сечение уходит из поля зрения детектора, а затем снова возвращается при декомпрессии сгустка, с последующей высадкой электронов на внутренние стенки ускорительной камеры. Импульсы на осциллограмме 4 соответствуют режиму ускорения, когда кольцо сжато до конечного радиуса $R = 4,2$ см и электронный

тронное излучение распространялось в узком конусе, угол раствора которого Θ равен $\sim 1/\gamma$, то видимым было не все электронное кольцо, а только его сечение, перпендикулярное оптической оси системы. Результат измерения $R(t)$ -траектории на заключительном этапе сжатия кольцевого сгустка в компрессоре показан на рис. 26. Этот результат характеризует динамику сжатия кольца.

В первых экспериментах по бесконтактному измерению с помощью синхротронного излучения геометрических параметров электронного кольца на заключительном этапе его формирования и сжатия, проводимых на ускорителе тяжелых ионов ОИЯИ, малые поперечные размеры реального сгустка отличались от требуемых в два-три раза, что иллюстрируют рис. 27 и 28, на которых показано поперечное сечение сгустка (профиль тора по осям $Y(R)$ и Z соответственно), измеренное при различных значениях вакуума в камере ускорителя-компрессора. По оси ординат отложена относительная величина сигнала синхротронного излучения. Судя по распределению плотности электронов в сечении по оси Z (рис. 28), можно сделать вывод о том, что сформированный в ускорителе электронный сгусток имел не кольцевую, а спиралеобразную форму.

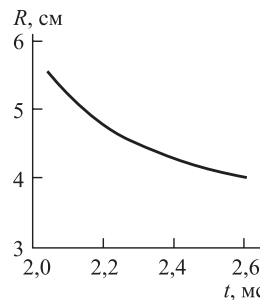


Рис. 26. $R(t)$ -траектория, характеризующая динамику сжатия кольца

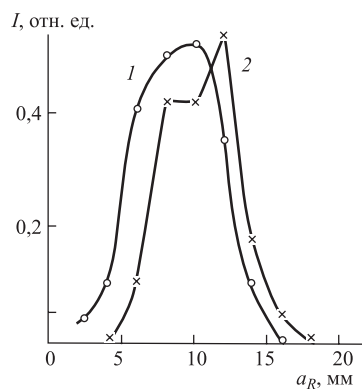


Рис. 27. Результат измерения размера поперечного сечения кольца по радиусу при значениях вакуума в ускорительной камере: 1 — $1,5 \cdot 10^{-5}$ Торр; 2 — $2 \cdot 10^{-6}$ Торр

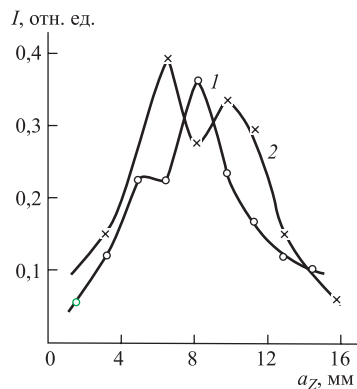


Рис. 28. Усредненный характер распределения плотности электронов в плоскости поперечного сечения a_Z кольцевого сгустка. Измерения проводились при значениях вакуума в ускорительной камере: 1 — $1,5 \cdot 10^{-5}$ Торр; 2 — $2 \cdot 10^{-6}$ Торр

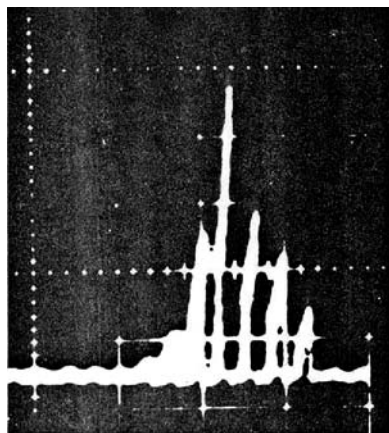


Рис. 29. Осциллограмма сигналов с чувствительных элементов однокоординатного детектора, показывающая мгновенный размер a_z малого поперечного сечения электронного кольцевого сгустка (цена деления 1,2 мм) и характер распределения плотности электронов по сечению на радиусе электронного кольца $R = 4$ см

В последующих экспериментах для измерения размеров кольца (равновесного радиуса R , профиля малого поперечного сечения a_R, a_Z , плотности рас-

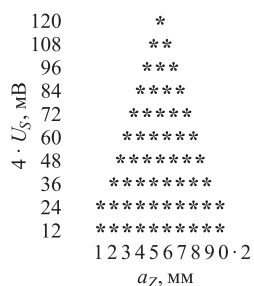


Рис. 30. Мгновенный размер поперечного сечения электронного кольцевого сгустка

пределения частиц) использовались специально разработанные многоканальные измерительно-информационные системы с координатными позиционно-чувствительными инфракрасными детекторами. На рис. 29 представлен результат, иллюстрирующий работу измерительной системы с однокоординатным 50-элементным инфракрасным детектором на основе сурьмянистого индия [70]. На этом рисунке показана осциллограмма распределения сигналов по чувствительным элементам координатного детектора, по которой можно визуально оценить размер поперечного сечения кольцевого сгустка электронов и характер их распределения по сечению. На рис. 30 показан результат измерения геометрии электронного кольцевого сгустка многоэлементным однокоординатным детектором из селенистого свинца, характеризующий мгновенный размер поперечного сечения кольца a_Z и распределение электронов по сечению при сжатии кольца до $R = 3,2$ см [71].

На рис. 31 и 32 показано распределение электронов в сгустке по радиусу R и оси Z в одном из последних сеансов комплексных коррелированных измерений, проведенных на коллективном ускорителе.

Исследования электронных колец показали, что медианные плоскости тора и ускорителя совпадают, энергия и радиус орбиты электронов и, соответственно, спектр и интенсивность синхротронного излучения близки к

расчетным, а вот размеры кольцевого сгустка и плотность распределения электронов по его сечению отличаются от заявленных в начальных условиях.

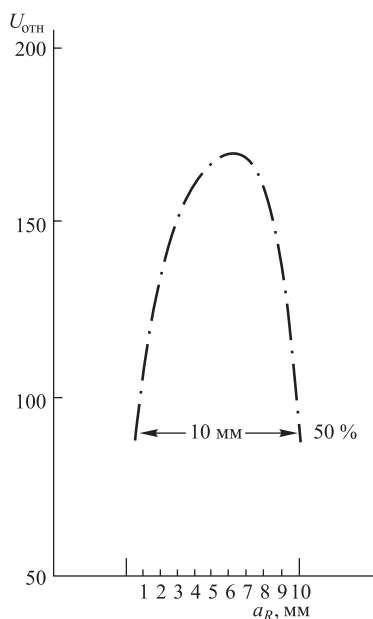


Рис. 31. Профиль малого поперечного сечения кольца по радиусу

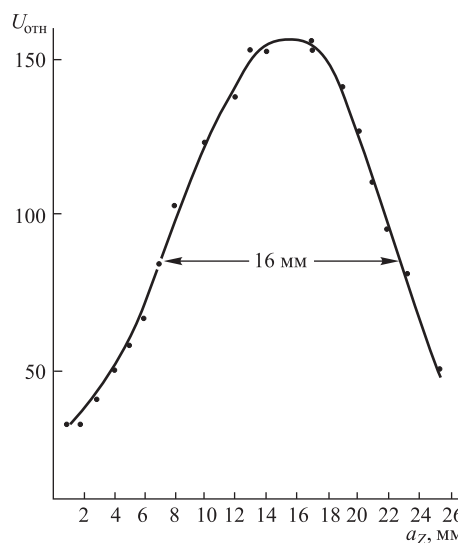


Рис. 32. Профиль сгустка по оси Z

Таким образом, разработка комплекса инфракрасной оптики в ОИЯИ оказалась мерой вынужденной, так как иным путем обнаружить и зарегистрировать синхротронное излучение было невозможно ввиду отсутствия доступных аналогов необходимой оптики. Только благодаря широкополосному инфракрасному окну, оптической схеме с коллективом, позволившей получить на приемнике максимально возможную плотность синхротронного излучения, и линзам из оптических материалов — новейших разработок оборонной отрасли, обладающих высокой прозрачностью в широком диапазоне длин волн инфракрасного оптического спектра, впервые в ОИЯИ удалось обнаружить и зарегистрировать синхротронное излучение в камере компрессора электронных колец, как оказалось, от малоинтенсивного, спиралеобразного сгустка низкоэнергетических релятивистских электронов.

Но, несмотря на значительные усилия, получить электронный сгусток с устойчивыми, оптимальными для коллективного ускорения электронов и тяжелых ионов параметрами (числом электронов и плотностью их распреде-

ления) оказалось достаточно трудной задачей. В настоящее время работы по исследованию коллективного метода ускорения приостановлены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы могут быть сформулированы следующим образом.

1. Было показано, что для кольцевых ускорителей, спектр синхротронного излучения которых в основном находится в инфракрасной области, решены проблемы вывода, оптического каналирования и детектирования данного излучения. Это подтверждается тем, что: 1) разработан и реализован способ создания высоковакуумных прогреваемых инфракрасных окон; 2) разработаны и созданы линзовые и зеркальные длиннофокусные оптические системы, позволившие обеспечить с минимальными потерями каналирование и передачу на одноэлементные и координатные детекторы синхротронного излучения в спектральном диапазоне $\Delta\lambda \sim 0,3\text{--}40$ мкм; 3) разработана методика стендовых испытаний и исследования инфракрасной оптики, не пропускающей излучение видимого спектрального диапазона, основанная на использовании эффекта гашения люминесценции при термическом воздействии на люминесцирующий материал. Только благодаря такой возможности визуализации инфракрасного излучения удалось решить проблему измерения характеристик и исследования разрешающей способности активных оптических элементов, предназначенных для работы в спектральной области длин волн $\Delta\lambda = 1\text{--}8$ мкм.

2. Отмечены достоинства и преимущества инфракрасной диагностики, которые связаны с рядом присущих ей отличительных особенностей и которые особенно важны при прецизионных измерениях, в частности, в метрологии. Эти особенности состоят в следующем: 1) внутренние и внешние радиационные повреждения оптики (окон, линз и зеркал), возникающие под действием жесткого ионизирующего излучения, практически не влияют на ее пропускающую и отражающую способность в инфракрасном диапазоне спектра; 2) значительно (примерно в 10 раз) снижены требования на разрешающую способность оптических систем, работающих в инфракрасной области длин волн, по сравнению с оптикой видимого диапазона; 3) отмечается существенное преимущество в точности абсолютных измерений интенсивности излучения по сравнению с диагностикой в видимом диапазоне за счет стабильности оптических параметров пропускающих и отражающих элементов.

Одно из основных преимуществ использования инфракрасной части спектра синхротронного излучения связано с тем, что внутренние и поверхностные радиационные повреждения, вызывающие изменение оптических характеристик окон, зеркал и линз под действием потоков ионизирующего излу-

чения, как правило, меньше длины волны проходящего или отраженного инфракрасного излучения. В узлах и точках этих повреждений не происходит поглощения или рассеяния интенсивности излучения, а фоновое излучение оптики в ультрафиолетовой и видимой области устраняется нечувствительностью фотоприемников в указанной области или специальными отрезающими фильтрами. В частности, потемнение окон не влияет на их пропускающую способность в инфракрасной области. Такое достоинство заметно упрощает (а значит, и удешевляет) решение проблемы окон, линз и зеркал на установках с ионизирующими излучениями.

Следующая важная особенность инфракрасной оптики заключается в том, что линейные размеры чувствительных элементов приемников инфракрасного излучения соизмеримы с длиной волны регистрируемого излучения (особенно в длинноволновой области). Минимальные линейные размеры чувствительных элементов координатных детекторов, работающих в области длин волн более 1 мкм, обычно не превышают 0,1 мм. В связи с этим для оптики, предназначенной для работы с многоэлементными инфракрасными детекторами, разрешающая способность которых, как правило, не превышает 10 лин./мм, значительно снижены требования, предъявляемые к размеру изображения, т. е. к ее разрешающей способности, которая также может не превышать 0,1 мм. Такая особенность позволяет избежать сложных расчетов оптических систем, упрощает расчет кривизны образующих линзы поверхностей, что, в свою очередь, позволяет значительно упростить и удешевить разработку и изготовление линз и оптических систем в целом.

Использование инфракрасной части спектра электромагнитного излучения для диагностики пучков дает существенное преимущество в точности абсолютных измерений интенсивности по сравнению с диагностикой в видимом диапазоне, что особенно важно в метрологии.

Эти важные достоинства инфракрасной диагностики показывают ее несомненное преимущество по сравнению с диагностикой в ультрафиолетовой и видимой областях спектра.

3. Необходимо отметить, что область применения представленных в работе результатов значительно шире. Многие описанные методики и оптические устройства могут быть использованы в описанном виде или с небольшими изменениями и на обычных кольцевых электронных, электрон-позитронных и высокоэнергетичных протонных ускорителях и накопителях. В ОИЯИ исследования инфракрасной оптики получили свое продолжение и развитие в работе над проектами систем диагностики для электрон-позитронного коллайдера (*C₇*-фабрики) [28] и для ядерно-энергетической установки с протонным ускорителем и подкритическим реактором для получения электроэнергии и утилизации промышленных радиоактивных продуктов и отходов и ядерного оружия [72–75].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мальцев А. А. // ЭЧАЯ. 1996. Т. 27, вып. 3. С. 797.
2. Bosser J. et al. CERN/LHC Project Report 370. 2000.
3. Куликов О. Ф. // Тр. ФИАН. 1975. Т. 80. С. 3.
4. Соколов А. А., Тернов И. М. Релятивистский электрон. М.: Наука, 1974.
5. Михайлин В. В. и др. Синхротронное излучение и его применения. М.: Наука, 1980.
6. Тернов И. М., Михайлин В. В. Синхротронное излучение. Теория и эксперимент. М.: Энергоатомиздат, 1986.
7. Адо Ю. М., Черенков П. А. // Докл. АН СССР. 1956. Т. 10. С. 35.
8. Королев Ф. А. и др. // Там же. С. 542.
9. Адо Ю. М. // Тр. ФИАН. 1963. Т. 19. С. 66.
10. Синхротронное излучение: Сб. ст. / Под ред. А. А. Соколова и И. М. Тернова. М.: Наука, 1966.
11. Синхротронное излучение в исследовании твердых тел: Сб. ст. / Под ред. А. А. Соколова. М.: Мир, 1970.
12. Базылев В. А., Жеваго Н. К. Излучение быстрых частиц в веществе и во внешних полях. М.: Наука, 1987.
13. Синхротронное излучение, свойства и применение: Сб. ст. / Под ред. К. Кунца. М.: Мир, 1981.
14. Bossart R. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1979. V. 164. P. 375.
15. Беспалова Т. В. и др. // Тр. X Междунар. симп. по ядерной электронике, Дрезден, ГДР, 1980 г. ZFK-433. Rossendorf, 1981. С. 44.
16. Волков Ю. М. и др. // ПТЭ. 1982. № 5. С. 40.
17. Bovet C. et al. // Proc. of the PAC Conf., San Francisco, 1991. P. 1160.
18. Мальцев А. А., Мальцев М. А. // ЖТФ. 1997. Т. 67, № 4. С. 60.
19. Мальцев А. А. // ЖТФ. 2002. Т. 72, вып. 6. С. 125.
20. Мальцев А. А., Мальцев М. А. // Измерительная техника. 1996. № 3. С. 63.
21. УНК (Физическое обоснование). Препринт ИФВЭ 93-27. Протвино, 1993.
22. Гинзбург И. Ф. и др. // ЯФ. 1992. Т. 55, вып. 12. С. 3310.
23. Кураев Э. А., Мальцев А. А. Препринт ОИЯИ Р9-97-242. Дубна, 1997.
24. Векслер В. И. и др. Препринт ОИЯИ Р9-3440-2. Дубна, 1967.
25. Саранцев В. П. // Тр. Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. М., 1972. Т. 1. С. 201.
26. Белинская Г. И. и др. Препринт ОИЯИ Р9-9281. Дубна, 1975.
27. Мальцев А. А. Сообщение ОИЯИ 13-9663. Дубна, 1976.
28. Мальцев А. А. Сообщение ОИЯИ 13-81-603. Дубна, 1981.
29. Мальцев А. А., Мальцев М. А. // Измерительная техника. 2000. № 11. С. 17.
30. Королев Ф. А. и др. // Тр. X Всесоюз. совещ. по спектроскопии. Львов, 1958. Т. 2. С. 24.
31. Королев Ф. А. и др. // Докл. АН СССР. 1960. Т. 133. С. 554.

32. Воробьев А. А., Диденко А. Н., Кожевников А. В. // АЭ. 1970. Т. 28, вып. 3. С. 260.
33. Гинзбург М. И., Кожевников А. В., Скрипников А. А. // Тр. НИИЯФ ТПИ. М., 1974. Вып. 4. С. 58.
34. Будкер Г. И. и др. // АЭ. 1965. Т. 19, № 3. С. 498.
35. Зинин Э. И. и др. // АЭ. 1966. Т. 20, № 3. С. 220.
36. Letke D., Labs D. // Appl. Opt. 1967. V. 6, No. 6. P. 1043.
37. Великанов С. П. и др. // Измерительная техника. 1976. № 9. С. 34.
38. Панасюк В. С., Соколов А. А., Степанов Б. М. // АЭ. 1972. Т. 33, № 5. С. 907.
39. Pitz E. // Appl. Opt. 1968. V. 8. P. 247.
40. Смоляков Н. В. // ЖТФ. 1986. Т. 56, № 7. С. 1262.
41. The LHC Study Team. Design study of the Large Hadron Collider (LHC), a multiparticle collider in the LEP tunnel. CERN/AC/DI/FA/90-06. 1990.
42. Bosser J., Bovet C., Jung R. LHC/Note 192. 1992.
43. Yang B. X. et al. // Proc. Part. Acc. Conf. PAC-97. Vancouver, 1997. P. 2215.
44. Долбилов Г. В. и др. // Тр. X Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1987. Т. 1. С. 390.
45. Мальцев А. А. // ПТЭ. 1994. № 3. С. 177.
46. Белинская Г. И. и др. // ПТЭ. 1977. № 4. С. 279.
47. Мальцев А. А., Мальцев М. А. Препринт ОИЯИ Р9-95-472. Дубна, 1995.
48. Вольнец Ф. К. // Оптико-мех. пром-сть. 1973. № 10. С. 47.
49. Воронкова Е. М. и др. Оптические материалы для инфракрасной техники. М.: Наука, 1965.
50. Kottke M., Greenler R. G. // Rev. Sci. Instr. 1971. V. 42, No. 8. P. 1235.
51. Roberts R. W., Harrad J. F., Poran H. A. // Rev. Sci. Instr. 1967. V. 38, No. 8. P. 1105.
52. Eisenstadt M. // Rev. Sci. Instr. 1967. V. 38, No. 1. P. 134.
53. Schkolnick L. // Rev. Sci. Instr. 1968. V. 39, No. 1. P. 122.
54. Hannum S. et al. // Ibid. V. 40, No. 9. P. 1254.
55. Bogart L. et al. // Rev. Sci. Instr. 1974. V. 45, No. 5. P. 713.
56. Смирная Е. П., Вольнец Ф. К., Мальцев А. А. // Отраслевой сб. 1981. Сер. X. Вып. 154. С. 13.
57. Смирная Е. П., Мальцев А. А., Вольнец Ф. К. // Тр. V Всесоюз. совещ. по поликристаллическим оптическим материалам. М., 1982. С. 107.
58. Сальников Г. П. Краткий справ. машиностроителя. Киев: Техника, 1971.
59. Общетехнический справочник / Под ред. А. Н. Малова. М.: Машиностроение, 1971.
60. Вакуумные системы и их элементы / Под ред. В. Д. Лубенца. М.: Машиностроение, 1968.
61. Смирная Е. П., Шошина П. П. // Оптико-мех. пром-сть. 1981. № 4. С. 30.
62. Волосов Д. С., Цивкин М. В. Теория и расчет светооптических систем. М.: Искусство, 1960.
63. Якушенко Ю. Г. Основы теории и расчета оптико-электронных приборов. М.: Сов. радио, 1971.
64. Вафиади В. Г. Фотоэлектрическая автоматика. Минск: Высш. шк., 1966.
65. Скотт Р. М. // Зарубежная радиоэлектроника. 1960. № 6. С. 122.

66. *Пейсахсон И. В.* Оптика спектральных приборов. Л.: Машиностроение, 1970.
67. *Дубовик А. С., Кепель А. А., Сицинская Н. М.* // Всесоюз. науч.-техн. конф. «Современное состояние и перспективы высокоскоростной фотографии и кинематографии и метрологии быстропротекающих процессов»: Тез. докл. М., 1972. С. 64.
68. *Мальцев А. А., Мальцев М. А.* // ПТЭ. 1995. №4. С. 210.
69. *Бажулин А. П. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 1968. Т. 8, №5. С. 261.
70. *Беспалова Т. В. и др.* // ПТЭ. 1979. № 1. С. 22.
71. *Мальцев А. А.* // Физика плазмы. 1997. Т. 23, №5. С. 419.
72. *Мальцев А. А., Мальцев М. А.* // АЭ. 1996. Т. 80, вып. 3. С. 190.
73. *Maltsev A. A.* // Abstr. of the 6th Asian Symp. on Visualization (ASV6), Pusan, Korea, 2001. P. 462.
74. *Мальцев А. А.* // Измерительная техника. 2002. №7. С. 62.
75. *Мальцев А. А., Мальцев М. А., Маслова М. В.* Препринт ОИЯИ Р1-2004-70. Дубна, 2004.