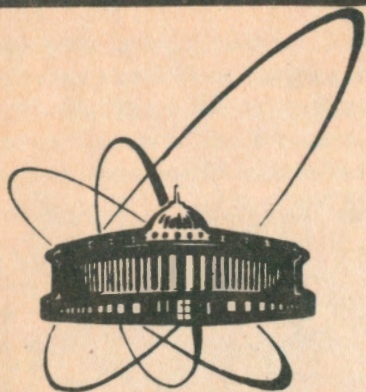


92-562



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

**P9-92-562**

**А.А.Мальцев**

**ИНФРАКРАСНАЯ СИНХРОТРОННАЯ  
ДИАГНОСТИКА ПУЧКОВ  
ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ**

**Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»**

**1992**

Мальцев А.А.

**Инфракрасная синхротронная диагностика пучков  
электрон-позитронных накопителей**

Представлены методы и системы измерения токовых, геометрических и оценки энергетических параметров пучков по синхротронному излучению инфракрасного диапазона (0,4+10 мкм) для комплекса электрон-позитронных накопителей (с-тау фабрики).

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1992

**Перевод автора**

Mal'tsev A.A.

P9-92-562

**Infrared Synchrotron Diagnostics of Beams for Electron-Positron  
Storage Rings**

Methods and measuring systems for current and geometric beam characteristics and evaluation of beam energy parameters are presented for synchrotron radiation of IR range (0.4+10  $\mu\text{m}$ ) at the electron-positron storage rings (C-Tau factory).

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.



Качество современного ускорительного эксперимента непосредственно зависит от точного и строгого выполнения требований, предъявляемых к ускоряемому пучку. Проблема контроля и регулирования пучка в процессе ускорения является весьма актуальной для всех ускорителей, а для вновь создаваемых — особенно. Она требует разработки различных новых методов диагностики пучков (отдается предпочтение неразрушающим методам), а также разработки и создания информационно-измерительных систем для реализации этих методов.

В настоящее время большое распространение приобретают циклические ускорители — генераторы синхротронного излучения. Такими генераторами являются и накопительные комплексы электронов и позитронов как ныне существующие, так и вновь создаваемые или проектируемые, к которым относится и с-тау фабрика ОИЯИ. Именно работа над проектом электрон-позитронного коллайдера — с-тау фабрики ОИЯИ — стимулировала получение результатов, положенных в основу данной статьи.

Синхротронное или магнитотормозное излучение возникает при отклонении частицы от прямолинейного пути магнитным полем, когда частица проходит в поле поворотных магнитов накопителя или в специально создаваемом пространственно-периодическом магнитном поле. Эффект синхротронного излучения хорошо изучен и подробно описан во многих работах. Благодаря своим уникальным свойствам синхротронное излучение нашло применение в промышленности (особенно в микроэлектронике), широко используется в различных научных исследованиях и экспериментах, в том числе и в ускорительной практике для неразрушающей диагностики пучков заряженных частиц.

Целью настоящей работы является краткое описание методов и информационно-измерительных систем, основанных на использовании синхротронного излучения в качестве носителя объективной информации о параметрах пучка в ускорителе. Эти методы и информационно-измерительные системы могут быть предложены в разрабатываемые в ИЯФ СО РАН (Новосибирск), ИТЭФ (Москва) и ОИЯИ (Дубна) проекты накопительных комплексов электронов и позитронов (с-тау фабрики). Методы позволяют обеспечить контроль и измерение мгновенных (в пределах 1 мкс) значений следующих параметров и характеристик пучка: числа частиц (тока) пучка, геометрических параметров пучка и его положения в пространстве

ускорителя, распределения частиц в пространстве и времени, а также сделать оценку величины энергии частиц и частоты аксиальных бетатронных колебаний. Реализацию методов неразрушающей синхротронной диагностики предлагается проводить путем регистрации излучения в широкой спектральной области длин волн оптического диапазона  $\sim 0,4 - 10$  мкм, которая больше чем на порядок превышает ширину спектральной области, используемой в основном для диагностики пучков по синхротронному излучению в современной ускорительной практике. Расширение рабочего спектрального диапазона позволяет диагностировать пучки с такими энергиями частиц и радиусами их орбит, которые обычная, широко применяемая в современном физическом эксперименте регистрирующая аппаратура (ФЭУ, ЭОП, диссектор, ТВ-камера, ПЗС-матрицы и т.п.) наблюдать не может.

Расчет характеристик синхротронного излучения электронных сгустков, сделанный исходя из значений основных параметров, ответственных за возникновение синхротронного излучения (энергии частиц и радиусы их орбит), проектируемых в ускорительных лабораториях страны и мира накопительных комплексов электронов и позитронов, показывает, что ожидаемый спектр синхротронного излучения занимает широкий интервал длин волн в диапазоне от  $\sim 1 \text{ \AA}$  и длиннее, захватывая и длины волн от 0,4 до 10 мкм и, таким образом, обеспечивая возможность реализации предлагаемых методов диагностики.

Процесс неразрушающей диагностики в накопителе пучка заряженных частиц по их синхротронному излучению включает в себя следующие основные операции.

1. *Вывод синхротронного излучения из вакуумной камеры ускорителя с минимально возможными потерями по интенсивности во всем рабочем спектральном диапазоне (длины волн в пределах от 0,4 до 10 мкм, соответствующие спектральной чувствительности большинства используемых в предлагаемых измерительных системах детекторов), при сохранении глубокого вакуума в камере (лучше чем  $10^{-9}$  торр). Необходимость столь глубокого вакуума предусматривает возможность длительного отжига при высокой температуре конструкции элементов и узлов (в том числе и узла с окном для синхротронного излучения), устанавливаемых на вакуумную камеру накопителя, а все соединительные уплотнения должны производиться через металлическую прокладку. Проблема окон и их уплотнений всегда была важной в вакуумной технике и криогенике, в том числе и для ускорителей. Хорошая спектральная прозрачность в широком диапазоне длин волн, высокая термостойкость, пластичность и механическая прочность, при минимальном газопроницании и собственном газовыделении, делают проблему окна одной из главных, если не решающей, для обеспечения неразрушающей диагностики по синхротронному излучению. Нема-*

ловажное значение имеют стоимость оптического материала и его доступность. С учетом перечисленных требований разработаны и апробированы в ускорительной практике три варианта окон, пропускающих более 90% интенсивности синхротронного излучения в спектральной области своей прозрачности (в своем рабочем спектральном диапазоне):

1) окно из плавленного кварца для спектральной области от 0,3 мкм до 3,5 мкм, диаметром 100 мм при толщине 10 мм,

2) окно из поликристаллического фтористого кальция (флюорита), пропускающее излучение с длинами волн от 0,2 до 10 мкм, диаметром 70 мм, толщиной 8 мм,

3) окно из поликристаллического фтористого магния — оптической керамики КО-1 (аналог ИРТРАН-1), специально разработанное и созданное для прогреваемой вакуумной камеры, пропускающее излучение с длинами волн 0,7 — 9 мкм (световой диаметр 60 мм, толщина 5 мм). Окно закреплено с помощью диффузионной сварки в оправе из нержавеющей стали с упругодеформируемым гофром, что позволяет крепить его на вакуумную камеру через металлическую прокладку, не нарушая герметичности перехода «окно — оправа». Окно испытывалось при многократном длительном (более 24 часов) прогреве при температуре 400—600 °С.

2. *Транспортировка и передача излучения по оптическому каналу* на заданное расстояние (возможно более двух метров) с минимальными поляризационными и абберационными искажениями и потерями по интенсивности, с фокусировкой синхротронного излучения на детектирующий блок. Для транспортировки и передачи синхротронного излучения на детектор специально разработаны и реализованы в ускорительной практике два варианта оптических систем — зеркально-линзовая и зеркальная. В зеркально-линзовой системе все активные элементы (линзы) выполнены из оптических керамик ( $MgF_2$ ,  $ZnS$ ,  $CaF_2$ ,  $BaF_2$ ,  $LiF$ ) и бескислородных стекол. Рабочий диапазон длин волн 1—8 мкм, максимальное фокусное расстояние объектива 320 мм, относительное отверстие 1:5,3, габариты оптической системы — 290×300×100 мм. Активные элементы зеркальной оптической системы выполнены в виде сферических зеркал, у которых отражение излучения происходит от слоя Ag, нанесенного путем напыления в вакууме на стеклянную поверхность сферической формы, что позволило обеспечить спектральную широкополосность оптического канала в пределах 0,3—20 мкм. Максимальное фокусное расстояние объектива — 1850 мм при относительном отверстии 1:26, фотографическая разрешающая способность в фокальной плоскости —  $7 \text{ мм}^{-1}$ , габариты — 2000×360×370 мм.

3. *Регистрация излучения детектирующими блоками* — измерительными преобразователями интенсивности синхротронного излучения в электрический сигнал.

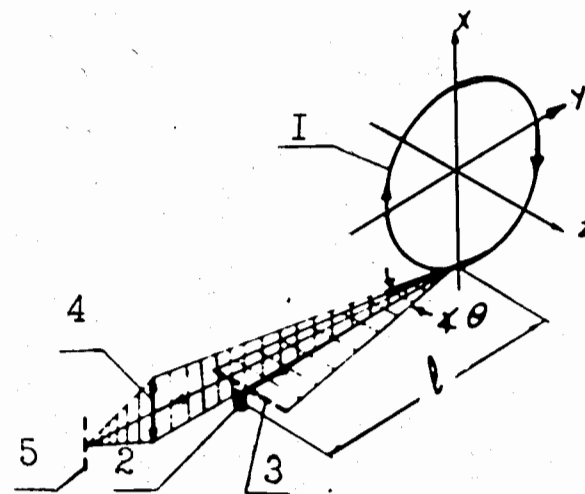


Рис.1. Схема измерения параметров пучка: 1 — пучок заряженных частиц — источник синхротронного излучения; 2 — однодатчиковый фотоприемник — измеритель числа частиц; 3 — модульный, координатно-чувствительный детектор — измеритель интенсивности и угловой расходимости синхротронного излучения; 4 — оптический канал; 5 — однокоординатный детектор-линейка для измерения геометрических параметров пучка и распределения частиц по сечению

4. *Выделение полезного сигнала* на фоне импульсных помех ускорителя (радиационных и электромагнитных), предварительное усиление выделенного полезного сигнала и его передача по кабельной магистрали на электронные блоки регистрации и накопления информации.

5. *Обработка полученной информации* и выдача результатов измерений в удобном для пользователя виде.

На рис.1 представлена схема измерения пучка.

В предлагаемых методах отражено стремление максимально учитывать требования и условия поставленной задачи по успешной реализации ускорительного эксперимента. Одним из основных условий является получение полной, точной и достоверной информации о параметрах и характеристиках пучков заряженных частиц в процессе их формирования и накопления. Большое значение придается простоте и надежности в реализации этих методов, стабильности параметров и характеристик информационно-измерительных систем на протяжении длительного периода эксплуатации (сеанс, квартал, год). В основном методы предназначены для измерения токовых, геометрических и энергетических параметров пучка.

Для измерения числа частиц (тока) по интенсивности синхротронного излучения разработан метод [1], прошедший длительную и успешную апробацию в ускорительном эксперименте. Метод основан на прямой зависимости интенсивности синхротронного излучения от числа частиц, причем регистрация излучения ведется в спектральной области  $\lambda \geq \lambda_c$ , где  $\lambda_c$  — критическая длина волны, когда интенсивность излучения

практически не зависит от энергии заряженных частиц. Разработано два варианта измерения интенсивности синхротронного излучения: приближенный, когда излучение измеряется только в медианной плоскости сгустка одним датчиком, и более точный, когда система датчиков охватывает телесный угол, где сосредоточена большая часть синхротронного излучения. Достоинство первого способа — в простоте измерительной системы. Недостаток — отсутствие оперативной для каждого цикла измерений информации об угловом распределении синхротронного излучения частиц.

Для реализации метода по первому варианту разработаны и созданы три типа измерительных систем с детекторами различной спектральной чувствительности, что позволяет обеспечить регистрацию синхротронного излучения в диапазоне длин волн от 0,4 до 8 мкм.

Для измерения излучения в спектральной области 0,4—1,1 мкм предназначена измерительная система со светочувствительным фотоприемником (состоящим из кремниевого фотодиода и усилителя, выполненных в одном корпусе по интегральной технологии), способным работать в непосредственной близости от окна вывода синхротронного излучения в условиях электромагнитных помех высокого уровня. Такой детектор обладает рядом преимуществ по сравнению с широко используемыми для этой цели в данной спектральной области фотоэлектронными умножителями (ФЭУ). Уступая ФЭУ в чувствительности, кремниевый фотоприемник имеет более широкий динамический диапазон и более равномерную характеристику спектральной чувствительности. Малые габариты фотоприемника (~1 см<sup>3</sup>), нечувствительность к внешнему магнитному полю, низковольтный источник питания (в пределах от 4 до 12 В) упрощают проблему компоновки прибора на ускорителе и обеспечивают простоту и надежность в эксплуатации.

Для спектральной области 0,8—4,6 мкм используется помехозащищенная измерительная система с детектором из селенида свинца, работающим при комнатной температуре. Измерительная система разрабатывалась с учетом возможности ее использования в условиях максимального уровня электромагнитных помех и может регистрировать излучение в непосредственной близости от окна, при минимальном количестве промежуточных элементов между излучателем и приемником. Промежуточные оптические элементы вносят трудно учитываемую погрешность в определение числа частиц, поэтому желательно, чтобы их число было минимально необходимым.

Для регистрации излучения в области длин волн 1,8—8,6 мкм предназначен детектор, состоящий из охлаждаемого до температуры жидкого азота фотоспротивления из германия, легированного золотом, и усилителя. Детектор (рис.2) устанавливается в фокальной плоскости телескопической системы и регистрирует излучение от источника независимо от его место-

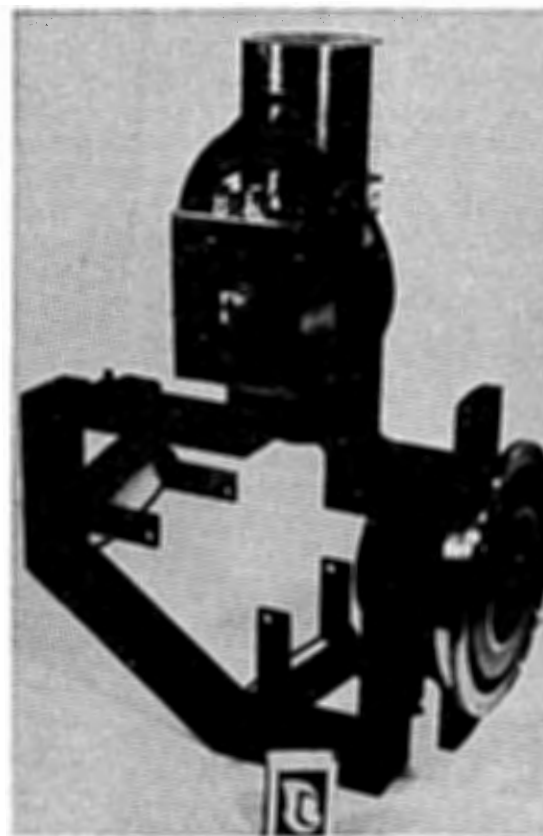


Рис. 2. Детектирующий блок охлаждаемого детектора из GeAu и предусилителя с фокусирующей инфракрасной зеркально-линзовой оптической системой и прогреваемым окном из оптической керамики КО-1

положения в пространстве объекта. Поле зрения оптической системы в пространстве объекта излучения составляет ~Ø 34 мм.

Все три измерительные системы прошли длительную апробацию в ускорительной практике в качестве базовых устройств диагностики электронных сгустков. Они позволяют обеспечить измерение интенсивности синхротронного излучения с относительной точностью лучше чем 0,2% и способны зарегистрировать число

частиц в диапазоне  $10^7$ — $10^{13}$ . Системы обладают высокой надежностью и стабильностью параметров, просты в эксплуатации.

Для реализации второго варианта метода измерения числа частиц по их синхротронному излучению разработана и создана измерительная система с многоэлементным инфракрасным детектором модульной конструкции. Исходя из требований ускорительного эксперимента специально разработана конструкция многоэлементного координатно-чувствительного фотоприемника с линейным расположением чувствительных элементов (размер одного элемента 0,4×0,2 мм). Детектор набран из 6 модулей, в каждом из которых по 24 чувствительных элемента. Такая модульная конструкция позволяет, в случае необходимости, производить оперативную замену неисправного модуля с неработающим элементом без замены всего детектора, повышая, таким образом, надежность работы системы и снижая эксплуатационные расходы. Детектор располагается в непосредственной

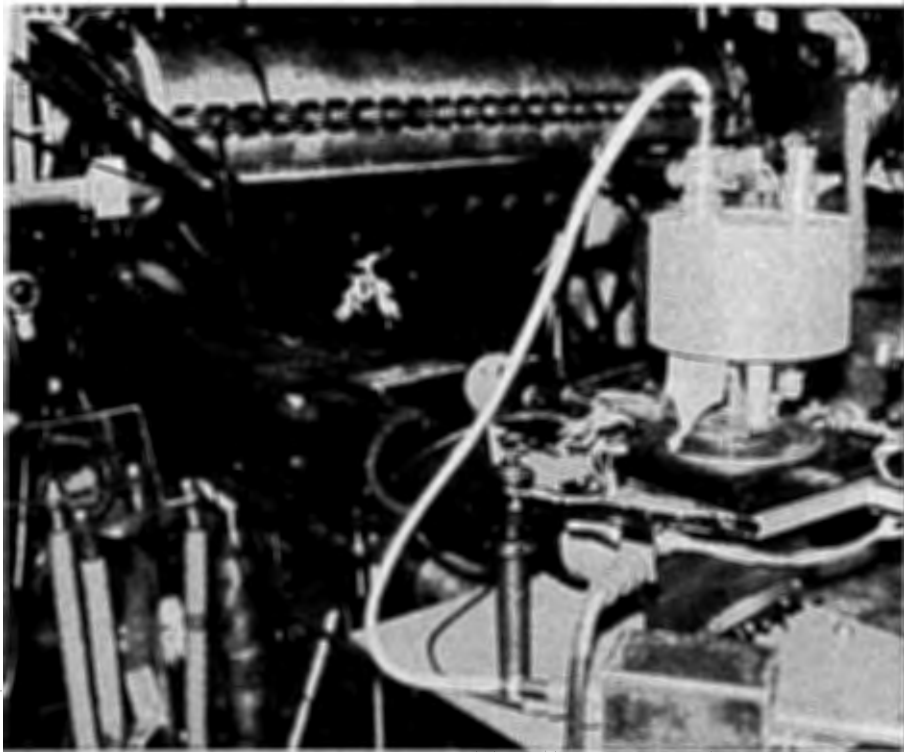


Рис. 3. Общий вид измерительного канала системы диагностики параметров пучка с помощью синхротронного излучения

близости от окна, в прямом пучке синхротронного излучения, перпендикулярно медианной плоскости пучка. Регистрация синхротронного излучения (измерение его угловой расходимости) производится одновременно всеми элементами в течение 30 нс с интервалом между измерениями 60—100 мкс. Кроме измерения интенсивности синхротронного излучения с учетом его угловой расходимости, а значит, более точного определения числа частиц в динамике их накопления, измерительная система позволяет оценить энергию частиц и частоту их аксиальных бетатронных колебаний.

Метод измерения геометрических параметров пучка и его положения в пространстве ускорителя, а также исследования динамики развития пучка в процессе накопления основан на использовании инфракрасных средств вывода синхротронного излучения из камеры ускорителя, его транспортировки и регистрации. Метод заключается в том, что изображение



Рис. 4. Многоэлементные инфракрасные детекторы: слева — 50-элементная линейка из InSb с криогенным устройством и блоком предусилителей, справа — 14-элементная линейка из PbSe с микрохолодильником и блоком предусилителей

пучка, попавшего в поле зрения оптического канала, фокусируется на детектирующий блок с линейным расположением чувствительных элементов и регистрируется им (см. рис.3). Метод реализован в виде трех информационно-измерительных систем, основное отличие которых — спектральная чувствительность их детекторов. Каждый детектирующий блок содержит линейку из чувствительных элементов, криогенную систему (в случае охлаждаемого

приемника) и электронный блок усилителей. Длина одного элемента (или размер шага линейки) выбиралась исходя из размеров конкретного исследуемого пучка. При диаметре пучка  $\sim 2$  мм шаг линейки выбран  $\sim 0,2$ — $0,4$  мм при всей длине линейки  $\sim 10$ — $20$  мм. Для спектральной области  $0,4$ — $1,1$  мкм использован детектор с чувствительными элементами из кремния, число элементов — 32 и 48, длина одного элемента —  $0,2$  мм. Для спектральной области  $0,8$ — $4,6$  мкм по своим характеристикам (чувствительность, быстродействие, надежность и простота в эксплуатации) лучше всего подходит детектирующая линейка с чувствительными элементами из PbSe (рис.4), с длиной одного элемента  $0,2+0,7$  мм. Благодаря встроенному в корпус детектора термоэлектрическому микрохолодильнику рабочая температура чувствительных элементов снижена более чем на  $20$  °C относительно температуры окружающей среды. Детектирующая система с фотоприемником из InSb (рис.4), охлаждаемым до температуры жидкого

азота, позволяет регистрировать инфракрасное синхротронное излучение с длиной волны до 5,3 мкм. Приемник представляет собой двухрядную линейку, состоящую из 50 чувствительных элементов, шаг линейки — 0,2 мм. Специальная криогенная система обеспечивает непрерывную работу детектора в течение более 4 часов.

Координатно-чувствительный детектор устанавливается на выходе оптического канала, в его фокусе. Предусмотрена возможность перемещения детектора в фокальной плоскости канала с точностью 10 мкм. Управление перемещением осуществляется дистанционно, с помощью электро-механического привода. Длительность одного измерения (по всем чувствительным элементам) регулируется в широких пределах от 10 нс до нескольких микросекунд. Интервал между измерениями — 60+100 мкс. Точность измерения геометрических параметров пучка зависит от дифракции и аберраций оптической системы, а также пространственного разрешения детектирующего блока. Для регистрации излучения в инфракрасной области спектра можно подобрать детектор с шагом приблизительно 30+50 мкм, размер чувствительного элемента кремниевого мозаичного детектора может составлять несколько микрометров (например, ПЗС-линейки и матрицы).

В заключение следует отметить, что все перечисленные в работе методы неразрушающей инфракрасной синхротронной диагностики пучков заряженных частиц и реализующие эти методы информационно-измерительные системы прошли проверку в ускорительном эксперименте в качестве базовых или основных. С помощью этих методов и систем получены важные физические результаты [2], что позволяет утверждать и надеяться на возможность их успешного использования в том же или с небольшими изменениями виде на других ускорителях, генерирующих синхротронное или краевое (на краях магнитов) излучение, и не только на электронных ускорителях, но и на протонных, с энергиями частиц около 100 ГэВ и выше.

Использование современной инфракрасной техники позволяет наблюдать и регистрировать параметры пучков при таких радиусах орбит и энергиях частиц, при которых диагностика с применением обычных детекторов излучения видимого диапазона была бы невозможной.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Волков Ю.М., Мальцев А.А., Свиридов В.А. и др. — ПТЭ, 1982, 5, с.40.
2. Мальцев А.А. — Сообщение ОИЯИ 9-86-289, Дубна, 1986.

Рукопись поступила в издательский отдел  
28 декабря 1992 года.