

07;09;10;12

## Методы инфракрасной синхротронной ускорительной диагностики

© А.А. Мальцев, М.А. Мальцев

Объединенный институт ядерных исследований,  
141980 Дубна, Московская область, Россия

(Поступило в Редакцию 4 октября 1995 г.)

Представлены методы измерения токовых, геометрических и оценки энергетических параметров кольцевого сгустка релятивистских низкоэнергетичных электронов, основанные на использовании эффекта синхротронного излучения в его оптической, преимущественно инфракрасной, части спектрального распределения, а также на использовании быстродействующих инфракрасных детекторов, обеспечивающих регистрацию излучения в спектральном диапазоне  $\Delta\lambda \simeq 0.3\text{--}45$  мкм. Дано описание ряда информационно-измерительных систем, разработанных и созданных в Объединенном институте ядерных исследований для реализации методов инфракрасной синхротронной ускорительной диагностики. В системах используются специально разработанные элементы инфракрасной оптики. Регистрация излучения ведется охлаждаемыми и работающими при комнатной температуре инфракрасными фотоприемниками из Si, Pb, Se, InSb, GeAu, LiNbO<sub>3</sub>. Приведены примеры реализации методов в ускорительных экспериментах.

### Введение

В течение длительного периода времени одним из приоритетных направлений развития Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) было создание коллективного ускорителя тяжелых ионов электронными кольцами. Создание коллективного ускорителя в значительной степени зависело от возможности формирования высокоплотных электронных кольцевых сгустков. В связи с этим возникла необходимость в разработке различных методов диагностики кольца низкоэнергетичных релятивистских электронов в процессе его формирования и сжатия в камере компрессора — кольцевом электронном ускорителе, в котором заряженные частицы движутся в магнитном поле по спиралеобразной сжимающейся орбите в медианной плоскости компрессора. Наиболее эффективным из предложенных к рассмотрению методов наблюдения кольцевого сгустка без его разрушения оказался метод, основанный на использовании собственного синхротронного излучения электронов. В представленной работе дан обзор методов синхротронной диагностики ускоряемых пучков и исследования быстропротекающих при ускорении процессов и приведены результаты их применения. Особенностью методов, отличающих их от уже широко использованных для этой цели, является то, что они основаны на регистрации синхротронного излучения в широком, в основном инфракрасном диапазоне длин волн оптического спектра ( $\Delta\lambda \sim 0.3\text{--}45$  мкм). Методы отработывались и проверялись в экспериментах на ряде кольцевых электронных ускорителей [1–3]. Для реализации методов разработаны и созданы интегральные [4,5] и координатные [6,7] детектирующие информационно-измерительные системы, обладающие высокой точностью, чувствительностью, надежностью и стабильностью параметров во времени, что позволило использовать их в ускорительной практике ОИЯИ в качестве базовых устройств диагностики.

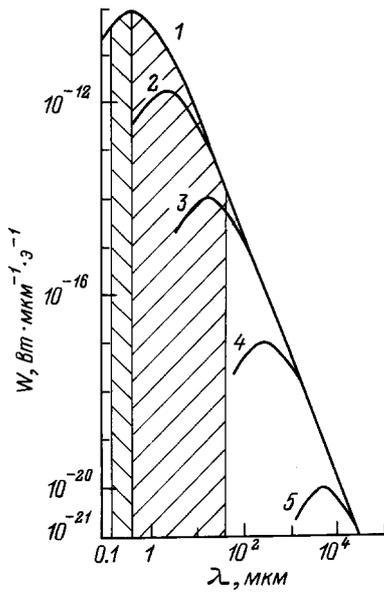
Необходимо отметить, что область применения результатов работы значительно шире. Благодаря своим возможностям и качествам большинство описанных в работе методов и информационно-измерительных систем могут быть использованы в том же или с небольшими изменениями виде и на других кольцевых электронных [8] и протонных [9] ускорителях и накопителях.

### Цели и задачи

В современном ускорительном эксперименте его качество непосредственно зависит от точного и строгого выполнения требований, предъявляемых к ускоряемому пучку. Проблема контроля и управления пучком в процессе ускорения (накопления) является весьма актуальной в настоящее время для всех ускорителей и накопителей, а для вновь создаваемых — особенно. Она требует разработки различных методов диагностики, в том числе развития уже имеющихся, а также создания информационно-измерительных детектирующих систем для их реализации на практике.

Эффект синхротронного излучения хорошо изучен и давно используется для различных научных и прикладных целей [10,11], в том числе и для диагностики пучков заряженных частиц. Излучение является носителем объективной информации о параметрах пучков без какого-либо влияния на процесс ускорения (неразрушающая диагностика).

В основном для диагностики используется видимая часть спектра синхротронного излучения [10,12]. Инфракрасной области, судя по количеству работ [13], до сих пор не уделяется того внимания, которого она, безусловно, заслуживает. В какой-то мере это можно объяснить трудностями с оптическими и регистрирующими системами, предназначенными для работы в нужной части инфракрасного спектра. Тем не менее инфракрасная область синхротронного излучения предста-



**Рис. 1.** Рассчитанные спектры синхротронного излучения в компрессоре для различных радиусов сжатия кольцевого сгустка. Заштрихованы видимая и инфракрасная области, где ведется регистрация;  $R$ , см: 1 — 4, 2 — 6, 3 — 10, 4 — 20, 5 — 40;  $\gamma$ : 1 — 50, 2 — 33, 3 — 20, 4 — 10, 5 — 5.

влияет несомненный интерес для разработчика методов и систем диагностики, так как позволяет существенно расширить возможности использования синхротронного излучения в научных и прикладных целях. Например, только благодаря использованию синхротронного инфракрасного излучения возможна неразрушающая диагностика пучков низкоэнергетичных релятивистских электронов в компрессоре электронных колец ОИЯИ. При существующих энергиях и радиусах орбит электронов в компрессоре спектр их синхротронного излучения в основном расположен в инфракрасной области с длиной волны  $\lambda \lesssim 1$  мкм (рис. 1).

Цель данной работы кроме описания методов, основанных на использовании синхротронного излучения как носителя объективной информации о параметрах пучков в ускорителе, состоит в том, чтобы привлечь внимание к широкому кругу проблем, которые могли бы решаться с помощью этих методов синхротронной, преимущественно инфракрасной диагностики. Используется диапазон длин волн, включающий в себя видимую (от  $\lambda \sim 0.3$  мкм) и инфракрасную (до  $\lambda \sim 45$  мкм) области оптического спектра длин волн, что существенно превосходит спектральную область, используемую для этой цели в настоящее время ( $\Delta\lambda \approx 0.3-1.1$  мкм).

Такой широкий спектральный диапазон выбран не случайно. Это — область спектральной чувствительности многих, достаточно доступных и простых в эксплуатации инфракрасных детекторов, быстродействием и чувствительностью способных удовлетворить требования ускорительного эксперимента.

Методы и системы диагностики по синхротронному излучению были основаны на результатах спектральных расчетов (рис. 1) и на новейших достижениях инфракрасной техники (оптических материалов и детекторов излучения). Это позволило реализовать поставленные ускорительным экспериментом задачи обеспечения измерений и контроля мгновенных (в пределах 1 мкс) значений следующих основных параметров и характеристик пучка: числа частиц (тока) пучка, геометрических параметров (размеров) пучка и его положения в пространстве ускорителя, распределения частиц в пространстве и времени, энергии частиц и др.

### Методы синхротронной инфракрасной диагностики

Для ускорительного эксперимента, проводимого на компрессоре электронных колец, наибольший интерес представляет уверенное диагностирование кольцевого сгустка на заключительном этапе его формирования и сжатия, когда равновесный (средний) радиус кольца  $R \approx 4$  см, а энергия электронов  $E \approx 20$  МэВ. В процессе сжатия кольца, как это видно на рис. 1, максимум спектрального распределения синхротронного излучения перемещается из радиочастотного диапазона в ближнюю инфракрасную область, и на заключительном этапе сжатия  $\lambda_m \approx 1.1$  мкм.

1) Измерение числа электронов. Методика измерения числа электронов (тока) в пучке по интенсивности их синхротронного излучения основана на прямой зависимости абсолютной величины интенсивности синхротронного излучения от числа частиц в ускоряемом пучке  $N_e$

$$N_e = \frac{W}{w}, \tag{1}$$

где  $W$  — полная мощность синхротронного излучения,  $w = 4.6 \cdot 10^{-16} \gamma^4 / R^2$  — мощность излучения одного электрона в Вт ( $\gamma = E/E_0$  — релятивистский фактор,  $E_0 = 0.511$  МэВ — энергия покоя электрона); на использовании длинноволновой, в основном инфракрасной части спектрального распределения интенсивности синхротронного излучения в широком интервале длин волн  $\Delta\lambda/\lambda > 1$ ; на сравнении интегральных измерений интенсивности синхротронного излучения, зарегистрированной на разных (но не менее двух) участках спектрального распределения, в области длин волн  $\lambda < \lambda_c/2$ , где  $\lambda_c = 4\pi \cdot R/3\gamma^3$  — критическая длина волны, и  $\lambda > \lambda_c$ , где интенсивность синхротронного излучения практически не зависит от энергии частиц, как это можно видеть из выражения [14]

$$w \approx 9 \cdot 10^{-10} R^{-2/3} \lambda^{-7/3}, \tag{2}$$

на сравнении интегральных потоков синхротронного излучения и излучения теплового источника, например вольфрамовой лампы накаливания, с учетом подобия их

спектральных распределений интенсивности и соответствия друг другу максимумов этих распределений.

Метод заключается в том, что синхротронное излучение на выходе его из вакуумной камеры ускорителя регистрируется двумя или более детекторами с соблюдением одного или всех из следующих условий: 1) излучение регистрируется только в медианной плоскости пучка (кольцевого сгустка), где угол расходимости синхротронного излучения относительно плоскости орбиты вращения электронов  $\theta = 0$ , двумя или более интегральными детекторами; 2) однокоординатный детектор охватывает большую часть угла  $\theta \simeq 1/\gamma$ , в котором распространяется поток синхротронного излучения, а чувствительные элементы детектора регистрируют интенсивность излучения либо в одном спектральном диапазоне, либо на разных участках спектрального распределения; 3) большая часть потока синхротронного излучения в телесном угле  $\Omega \sim 1/\gamma$  попадает на входной зрачок оптического канала детектирующей информационно-измерительной системы; 4) детекторы синхротронного излучения прокалиброваны на тепловом эталонном источнике, характер спектрального распределения интенсивности излучения которого соответствует спектру исследуемого синхротронного излучения, а сама интенсивность известна.

2) Геометрические параметры кольцевого сгустка. Неподвижный наблюдатель может видеть только часть кольцевого сгустка по касательной, проходящей через центр малого поперечного сечения кольца. Поскольку видимую часть кольцевого сгустка можно считать и рассматривать как набор осцилляторов с тремя степенями свободы: продольной (синхротронной) и двумя поперечными (бетатронными) — радиальной и осевой, то система измерения геометрических параметров сгустка должна обеспечивать измерение поперечных размеров кольца и его радиуса, а также возможность наблюдения динамики этих величин.

Метод измерения геометрических параметров кольцевого электронного сгустка и его положения в пространстве ускорителя, а также исследования динамики сгустка в процессе его формирования, сжатия и ускорения (накопления) основан на использовании инфракрасных оптических и детектирующих средств вывода синхротронного излучения из вакуумной камеры ускорителя, его транспортировки и регистрации.

Метод заключается в том, что изображение поперечного сечения кольцевого сгустка, попавшего в поле зрения длиннофокусного оптического канала — двухметрового инфракрасного телескопа [15], фокусируется на чувствительной поверхности координатного детектора.

3) Измерение угловой расходимости синхротронного излучения. Важным параметром для диагностики кольцевого сгустка в компрессоре является угловая расходимость синхротронного излучения в направлении, перпендикулярном медианной плоскости кольца. Измерение угловой расходимости синхротронного излучения позволяет не только

более точно оценить интенсивность синхротронного излучения, но и дает информацию об энергии электронов и их угловом распределении (аксиальные бетатронные колебания).

Отмечено, что в сильноочных, загруженных ионами электронных кольцах угловое распределение синхротронного излучения относительно орбитальной плоскости определяется в основном аксиальными бетатронными колебаниями электронов [2]. Частота последних  $\nu_z$  зависит от положительного заряда ионов, накопленного в кольце [16], и удовлетворяет условию

$$\nu_z = \left[ \frac{2R^2(f - 1/\gamma^2)}{\sigma_b(\sigma_a + \sigma_b)} - (1 - f) \frac{P}{2} \right] \mu, \quad (3)$$

где  $f = Z \cdot N_i / N_e$ ,

$$P = 2 \ln [16R/\sqrt{2} \cdot (\sigma_a + \sigma_b)],$$

$$\mu = N_e \cdot r_e / 2\pi\gamma R,$$

$\sigma_a$  и  $\sigma_b$  — радиальный и азимутальный среднеквадратичные радиусы малого сечения кольца,  $Z$  и  $N_i$  — заряд и число ионов в кольце,  $N_e$  — число электронов,  $r_e$  — классический радиус электрона.

Для незагруженного ионами электронного кольца угловая расходимость синхротронного излучения  $\theta$  и энергия электронов  $\gamma$  связаны выражением

$$\theta \simeq 1/\gamma. \quad (4)$$

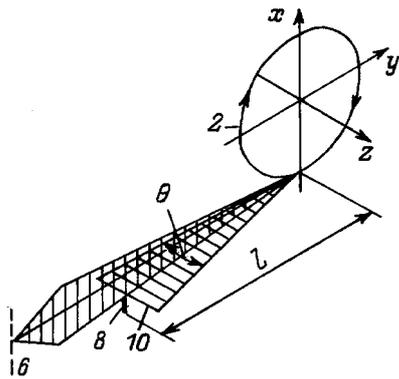
Поэтому измерение углового распределения синхротронного излучения позволяет получать информацию об ионной компоненте и энергии электронов в кольце, тогда как интеграл от этого распределения прямо связан с числом электронов.

Таким образом, метод измерения энергии электронов, а также числа электронов и ионов в электронно-ионном кольцевом сгустке основан на зависимости угловой расходимости потока синхротронного излучения от величины энергии электронов, их числа и ионной компоненты.

Метод заключается в измерении профиля функции распределения потока синхротронного излучения относительно медианной плоскости кольцевого сгустка в процессе его сжатия и ускорения (накопления) координатным детектором с линейным расположением чувствительных элементов. Детектор ориентирован перпендикулярно медианной плоскости кольца и перекрывает основную часть потока излучения.

## Экспериментальная техника и ее возможности

1) Схемы измерений. Реализацию методов синхротронной инфракрасной диагностики на ускорителе иллюстрирует рис. 2, на котором показана геометрия испускания синхротронного излучения и



**Рис. 2.** Схема, поясняющая геометрию испускания синхротронного излучения и его регистрации. Цифровые обозначения соответствуют рис. 3.

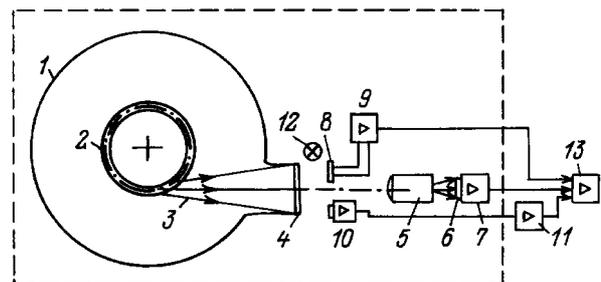
его регистрации различными детектирующими блоками. Блок-схема экспериментальной техники, образующей единый комплекс систем синхротронной инфракрасной диагностики, приведена на рис. 3. Рис. 2 и 3 имеют общие цифровые обозначения.

Процесс диагностики кольцевого ступка включает в себя следующие операции. Из вакуумной камеры компрессора 1 генерируемый кольцом заряженных частиц 2 поток синхротронного излучения 3, расходящийся под углом  $\theta$  к медианной плоскости кольца, выводится через специальное высоковакуумное окно 4, пропускающее синхротронное излучение в рабочем диапазоне длин волн. На выходе из компрессора синхротронное излучение регистрируется блоком интегральных детекторов 8, установленных в непосредственной близости от окна, на расстоянии  $l$  от поперечного сечения кольца. На этом же расстоянии установлен многоэлементный однокоординатный детектор 10. Интегральные детекторы блока 8 измеряют интенсивность синхротронного излучения на различных участках характеристики его спектрального распределения, регистрируя излучение в медианной плоскости кольца, где угол  $\theta = 0$ . Детектирующий блок 10 измеряет интенсивность и угловую расходимость потока излучения, перекрывая большую его часть относительно медианной плоскости кольца. Часть потока излучения попадает на входной зрачок длиннофокусного оптического канала 5 (инфракрасный телескоп). Оптический канал 5 обеспечивает транспортировку излучения с минимальными потерями на заданное расстояние и передачу его на детектор. Излучение фокусируется либо в виде изображения [15] поперечного сечения исследуемого пучка заряженных частиц на чувствительной поверхности однокоординатного детектора 6, с помощью которого измеряются геометрические параметры кольца и распределяются частицы по сечению, либо в виде изображения входного зрачка оптического канала [17] на чувствительной поверхности одноэлементного интегрального детектора — измерителя числа электронов (одного из ряда детекторов, образующих блок 8).

Излучение регистрируется детектирующими блоками — измерительными преобразователями интенсивности синхротронного излучения в электрический сигнал, который выделяется на фоне импульсных электромагнитных помех ускорителя и усиливается в блоках 7, 9 и 11. Предварительно усиленный аналоговый сигнал по кабельной магистрали подается на пульт управления на электронные блоки регистрации, обработки и накопления информации 13. Электронные блоки 13 выполнены в стандарте КАМАК и работают на линии с ЭВМ. Обработанные результаты измерений выдаются в требуемом виде и накапливаются в памяти ЭВМ (12 — контрольный источник — инфракрасный светодиод АЛ1 1078).

2) Измерители числа электронов. Метод измерения числа электронов по интенсивности синхротронного излучения реализован на практике на компрессоре электронных колец ОИЯИ [3] и сильноточном синхротроне Ленинградского института ядерной физики (г. Гатчина) [1]. Для реализации метода разработаны и созданы ряд информационно-измерительных систем [4,5,7,18] с детекторами различной спектральной чувствительности, что позволяет обеспечить регистрацию синхротронного излучения в диапазоне длин волн от 0.3 до 45 мкм. В качестве детекторов использованы кремниевый фотодиод ( $\Delta\lambda = 0.3-1.1$  мкм); фотоспротивление из селенида свинца ( $\Delta\lambda = 0.7-4.5$  мкм), работающее при комнатной температуре; фотоспротивление, охлаждаемые до температуры жидкого азота, из антимонида индия ( $\Delta\lambda = 0.7-6$  мкм) и германия, легированного золотом ( $\Delta\lambda = 1.8-8.6$  мкм); пироэлектрик на основе ниобата лития с окном из KRS-5, прозрачность которого ( $\Delta\lambda = 1.5-45$  мкм) определяет диапазон спектральной чувствительности детектора, а также длинноволновую границу применения методов синхротронной инфракрасной диагностики. Положительной особенностью перечисленных детекторов (за исключением работающих при температуре 77 К), выгодно отличающей их от традиционно используемых для синхротронной диагностики в видимом диапазоне (ФЭУ, диссектор и т.д.), является то, что они могут работать в непосредственной близости от электронного кольца, в условиях высокого уровня электромагнитных и радиационных помех.

Как уже было сказано ранее, число электронов в кольце  $N_e$  может быть вычислено, если известна мощность синхротронного излучения одного электрона  $w$  и из-



**Рис. 3.** Блок-схема компрессора и систем диагностики.

мерена полная мощность синхротронного излучения  $W$  согласно выражению (1). Полная мощность синхротронного излучения может быть определена, если известны коэффициент использования потока синхротронного излучения от кольцевого сгустка  $G$  — геометрический фактор, определяемый телесным углом приемника синхротронного излучения; коэффициент спектрального пропускания  $n(\lambda)$  промежуточной среды (окно, фильтры, оптика) и ее поляризационные свойства; относительная спектральная характеристика чувствительности фотодетектора  $\varepsilon(\lambda)$ .

В общем случае сигнал на приемнике излучения  $U$  может быть записан как

$$U = N_e S G \int_0^{\infty} w(\lambda) \varepsilon(\lambda) n(\lambda) d\lambda, \quad (5)$$

где  $S$  — калибровочная постоянная приемника в В/Вт, измеренная по методике, изложенной в работе [19], на вольфрамовом эталонном источнике.

Разработаны два варианта [3] для абсолютных измерений интенсивности синхротронного излучения: приближенный, когда излучение регистрируется и измеряется только в медианной плоскости кольцевого сгустка ( $\theta = 0$ ) интегральным детектирующим блоком  $8$  (рис. 2 и 3), и более точный, когда система фотоприемников, составляющих однокоординатный детектирующий блок  $10$ , охватывает телесный угол, где сосредоточена большая часть потока синхротронного излучения. Достоинство первого способа в простоте аппаратуры (может быть использован один интегральный одноэлементный фотоприемник). Недостаток — отсутствие оперативной, для каждого импульса ускорения, информации об угловом распределении синхротронного излучения ( $G$  — геометрический фактор).

Одноэлементный интегральный измеритель используется в комплексе систем синхротронной инфракрасной диагностики в качестве монитора абсолютного числа электронов в кольце. Он является базовым устройством диагностики при настройке рабочего режима ускорителя.

Мониторирование проводится на заключительном, наиболее ответственном этапе сжатия кольцевого сгустка в компрессоре, когда максимум спектрального распределения синхротронного излучения попадает в ближнюю инфракрасную область, где  $\lambda_m \simeq 1.1$  мкм. Для этой области в качестве прецизионных интегральных измерителей интенсивности синхротронного излучения использованы детекторы из кремния и селенида свинца, существенно отличающиеся своими спектральными характеристиками и регистрирующие излучение на разных относительно  $\lambda_m$  участках его спектрального распределения.

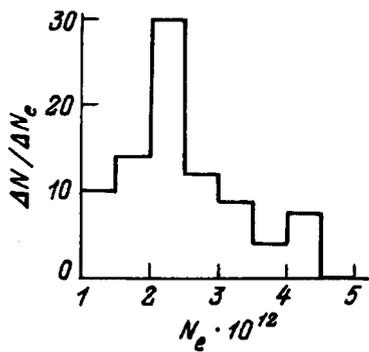
Для измерения излучения в области длин волн  $\lambda < 1/2\lambda_c$  в спектральном диапазоне  $\Delta\lambda \simeq 0.3-1.1$  мкм использовалась измерительная система [20] со светочувствительным фотоприемным устройством (ФПУ), состоящим из кремниевого фотодиода и усилителя, выполненных в одном корпусе по интегральной техно-

логии. Фотоприемник способен работать в непосредственной близости от окна вывода синхротронного излучения в условиях импульсных электромагнитных и радиационных помех высокого уровня. Такой детектор обладает рядом преимуществ по сравнению с широко используемыми для этой цели в данной спектральной области фотоумножителями (ФЭУ). Уступая ФЭУ в чувствительности, кремниевый фотоприемник имеет более широкий динамический диапазон и более равномерную характеристику спектральной чувствительности. Небольшие габариты фотоприемника ( $\sim 1$  см<sup>3</sup>), нечувствительность к внешним магнитным и радиационным полям, 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  $\lambda > \lambda_c$  в диапазоне  $\Delta\lambda \simeq 0.7-4.5$  мкм предназначена помехозащищенная измерительная система [4] с детектором из соленида свинца, работающим при комнатной температуре. Измерительная система разрабатывалась с учетом возможности ее использования в условиях максимального уровня импульсных электромагнитных помех ускорителя и может регистрировать излучение в непосредственной близости от окна синхротронного излучения и при минимальном количестве промежуточных оптических элементов между излучателем и приемником. Промежуточные элементы на пути потока синхротронного излучения вносят погрешности (порой трудно учитываемые) в определение абсолютного числа частиц, поэтому желательно, чтобы их число было минимально необходимым.

Метод определения числа электронов в ускоряемых пучках по измеренной интенсивности синхротронного излучения реализован в практике ускорительного эксперимента в виде ряда законченных информационно-измерительных систем [3-5,7]. Метод прошел проверку на разных ускорителях [1-3], отработывался и развивался более десяти лет. Для компрессора электронных колец этот метод явился базовым при проведении прецизионных абсолютных измерений числа электронов в кольцевых сгустках при исследовании различных режимов работы ускорителя.

При требуемой ускорительным экспериментом точности измерения числа электронов в кольцевом сгустке на заключительном этапе его формирования и сжатия, составляющей  $\simeq 20\%$ , метод позволил проводить количественные измерения с погрешностью  $\simeq 10\%$ . Относительная погрешность измерения интенсивности излучения составляет  $0.2\%$ . В физических экспериментах по исследованию величины тока электронных кольцевых сгустков, соответствующей различным режимам работы ускорителя, метод обеспечил измерение числа частиц в диапазоне  $\sim 10^7-10^{13}$  эл. На рис. 4 показаны результаты измерения числа электронов в электронных кольцах в момент их сжатия до конечного радиуса  $\sim 4$  см при энергии электронов  $\sim 20$  МэВ. Измерения проводились при одном режиме работы ускорителя в течение



**Рис. 4.** Результаты измерения числа электронов в кольцевых сгустках, полученные за восьмичасовой сеанс работы ускорителя.

8-часового сеанса. По вертикальной оси отложено число зарегистрированных импульсов синхротронного излучения, по горизонтальной — число электронов в кольцевом сгустке.

3) Измерение размеров кольцевого сгустка. Метод измерения геометрических параметров кольцевого сгустка и исследования динамики его сжатия реализован в виде трех информационно-измерительных систем, основное отличие которых — спектральная чувствительность их координатных детекторов. Каждый детектирующий блок содержит линейку из чувствительных элементов, криогенную систему (в случае охлаждаемого фотоприемника) и электронику усилителей. Длина одного чувствительного элемента (или размер шага линейки) выбиралась исходя из размеров конкретного пучка заряженных частиц, исследования которого необходимо было проводить. При расчетном диаметре малого поперечного сечения кольцевого сгустка ~ 2 мм шаг линейки выбран ~ 0.2–0.4 мм при всей длине однокоординатного детектора ~ 10–20 мм.

Для получения изображения (однокоординатного) поперечного сечения кольца в видимом и ближнем инфракрасном свете использован детектор с чувствительными элементами из кремния. Число элементов 32, разрешающая способность детектора 0.2 мм.

Для спектральной области 0.7–4.6 мкм оптимальными по своим характеристикам (чувствительность, быстродействие, надежность и простота в эксплуатации) оказались фотоприемные устройства из селенида свинца. Число элементов 10–14, шаг линейки 0.4–0.7 мм. В одном корпусе (цилиндр диаметром ~ 20 мм и длиной ~ 40 мм) размещены однокоординатный детектор, блок усилителей и микрохолодильник. Благодаря встроенному в корпус детектора термоэлектрическому микрохолодильнику рабочая температура чувствительных элементов снижена более чем на 20°С относительно температуры окружающей среды.

Детектирующая система с однокоординатным инфракрасным детектором из сурьмянистого индия, охлаждаемым до температуры жидкого азота, позволяет реги-

стрировать инфракрасное синхротронное излучение с длиной волны до 6 мкм. Приемник представляет собой двухрядную линейку, состоящую из 50 элементов. Разрешающая способность 0.2 мм. Специальная криогенная система обеспечивает непрерывную работу детектора в течение > 4 ч.

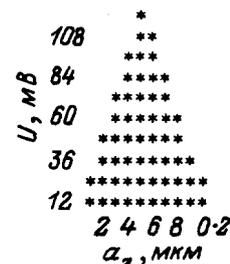
Координатно-чувствительный детектирующий блок многоканальной информационно-измерительной системы диагностики электронного (электронно-ионного) кольца устанавливается на выходе зеркального длиннофокусного ( $f = 1850$  мм) инфракрасного телескопа [15], оптического тракта длиной ~ 2 м. Это позволяет координатно-чувствительному детектору работать вне зоны высокого уровня импульсных электромагнитных помех ускорителя.

Детектор может перемещаться в плоскости изображения объекта исследования с точностью 0.1 мм. Перемещение осуществляется с помощью дистанционно-управляемого электромеханического привода.

Длительность одного измерения (одновременного по всем чувствительным элементам детектора) регулировалась в широких пределах от 10 нс до нескольких мкс. Интервал между измерениями 40–100 мкс. За один цикл ускорения длительностью ~ 1 мс измерительная система позволяет получить 10–12 однокоординатных изображений малого поперечного сечения кольцевого сгустка.

Точность измерения геометрических параметров кольца зависит от aberrаций сферических зеркал инфракрасного телескопа и пространственного разрешения детектирующего блока. Для компрессора электронных колец требуемая точность пространственного разрешения составляла ~ 0.4 мм. Однокоординатные инфракрасные детекторы обеспечивают пространственную точность 0.2–0.4 мм и позволяют измерять равновесный радиус кольцевого сгустка и  $R(t)$ -траекторию с погрешностью ~ 1.5%.

В ускорительных экспериментах, проводимых на компрессоре электронных колец, использован однокоординатный вариант измерителей геометрических параметров кольцевого сгустка. Однокоординатный детектор позволяет измерять размер малого поперечного сечения кольца и распределение электронов по сечению либо параллельно медианной плоскости сгустка ( $\bar{a}_R$ ), либо перпендикулярно ( $\bar{a}_Z$ ). Такой однокоординатный детектор



**Рис. 5.** Размер малого поперечного сечения кольцевого сгустка и распределение электронов по сечению.

был выбран исходя из симметричности сечения кольца относительно его медианной плоскости с целью повышения надежности работы измерительной системы (а также уменьшения ее стоимости и эксплуатационных расходов) за счет использования минимально необходимого числа регистрирующих каналов. Работу однокоординатного детектирующего блока иллюстрирует рис. 5, на котором представлены мгновенный (время измерения < 0.1 мкс) размер поперечного сечения кольцевого сгустка и характер распределения электронов по сечению, т. е. однокоординатный детектор дает всю необходимую и достаточно полную информацию о геометрических параметрах кольцевого сгустка. На рис. 6 показана  $R(t)$ -траектория кольцевого сгустка электронов. Она характеризует динамику сжатия кольца до его конечного равновесного радиуса, соответствующего определенному (задаваемому оператором) режиму работы ускорителя. По вертикальной оси отложено значение равновесного радиуса сжимаемого кольцевого сгустка релятивистских низкоэнергетичных электронов, по горизонтальной — время относительно момента начала ускорения. Координатно-чувствительный детектор ориентирован параллельно медианной плоскости кольца.

4) У г л о в а я р а с х о д и м о с т ь с и н х р о т р о н н о г о и з л у ч е н и я. Для измерения угловой расходимости синхротронного излучения в инфракрасной области спектра разработана и создана информационно-измерительная система с выносным многоэлементным инфракрасным детектором модульной конструкции. Конструкция детектора разработана исходя из условий и требований ускорительного эксперимента и представляет собой модульный координатно-чувствительный фотоприемник с линейным расположением светочувствительных элементов, размер которых составляет  $0.2 \times 0.4$  мм. Детектирующий блок набран из шести модулей, в каждом из которых по 24 чувствительных элемента. Каждый элемент может вести регистрацию излучения как автономный измерительный канал, но при необходимости в один измерительный канал может быть объединено несколько светочувстви-

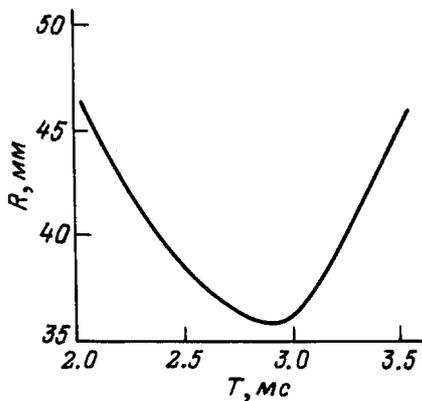


Рис. 6.  $R(t)$ -траектория электронного сгустка на заключительном этапе его формирования и сжатия.

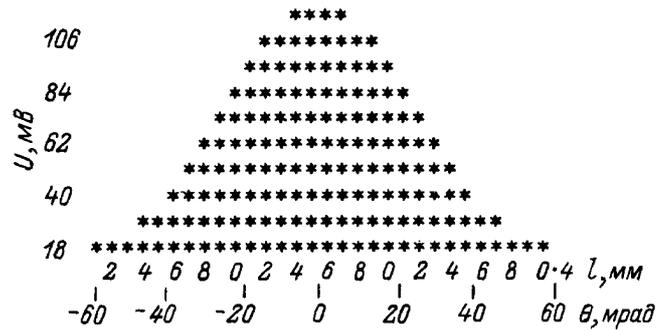


Рис. 7. Угловая расходимость синхротронного излучения на заключительном этапе сжатия кольца.

тельных элементов, и, таким образом, разрешающая способность координатного детектора может меняться от 0.4 до нескольких миллиметров.

Модульная конструкция позволяет в случае необходимости производить оперативную замену неисправного модуля с неработающим элементом без замены всего детектирующего блока, тем самым повышается надежность работы информационно-измерительной системы и снижаются эксплуатационные расходы.

Работу многоканальной системы измерения угловой расходимости синхротронного излучения иллюстрирует рис. 7. На рисунке показано мгновенное значение углового распределения потока излучения относительно медианной плоскости кольцевого сгустка, измеренное в один из 10 моментов сжатия кольца, зарегистрированных измерительной системой в одном цикле ускорения. По вертикальной оси отложены амплитуды сигналов в мВ с каждого элемента однокоординатного детектора, по горизонтальной — длина детектора в мм и угол относительно медианной плоскости кольца в мрад. Полуширина распределения определяется энергией электронов в кольце и частотой их бетатронных колебаний, зависящей в свою очередь от наличия и величины ионной компоненты в кольце. Интеграл от этого распределения дает величину интенсивности синхротронного излучения и прямо связан с числом электронов в кольцевом сгустке. Система позволяет наблюдать за динамикой сжатия в каждом цикле ускорения.

### Заключение

Методы и аппаратура инфракрасной синхротронной диагностики прошли длительную отработку и тщательную проверку в физических экспериментах и исследованиях пучков низкоэнергетичных релятивистских электронов на электронных кольцевых ускорителях — компрессорах электронных колец ОИЯИ и сильноточном синхротроне Ленинградского института ядерной физики (г. Гатчина). Разработанные методы и созданные для их реализации информационно-измерительные системы оказались единственной возможностью получить ценную

научную информацию о способности и возможности кольцевых электронных сгустков захватывать, удерживать и ускорять тяжелые ионы. К сожалению, в нынешних условиях коллективный метод ускорения тяжелых ионов электронными кольцами оказался нереализуем по причине невозможности формирования высокоплотных электронных кольцевых сгустков.

Полученные результаты показали высокую эффективность и надежность как методов диагностики, так и аппаратуры. Технические характеристики информационно-измерительных систем, использующих синхротронное излучение преимущественно инфракрасного диапазона в качестве носителя информации о параметрах пучка в процессе его ускорения, полностью соответствуют условиям и требованиям ускорительного эксперимента. Они обеспечивают измерение и контроль мгновенных (в пределах 1 мкс) значений основных параметров и характеристик пучка, имея возможность регистрировать излучение в спектральном диапазоне 0.3–45 мкм, который существенно превышает спектральную область, используемую в основном для этой цели в современной ускорительной практике (0.3–1.1 мкм). Детектирующие системы обладают высокой чувствительностью и хорошей устойчивостью к воздействию импульсных электромагнитных и радиационных полей ускорителя, что позволяет устанавливать детектирующие блоки в непосредственной близости от магнитных узлов и систем ускорителя, не искажая при этом конфигурацию магнитных полей.

Измерительные системы просты в эксплуатации и обслуживании. Они обладают высокой надежностью, сохраняя неизменными свои параметры и характеристики в течение длительного периода времени, несмотря на достаточно жесткие условия эксплуатации. Синхротронная инфракрасная диагностика может быть использована на существующих и проектируемых электрон-позитронных коллайдерах [8] и на протонных кольцевых ускорителях [9]. Детектирующая аппаратура по заложенным в нее основным параметрам и характеристикам может быть использована для различных научных и прикладных целей.

## Список литературы

- [1] Волков Ю.М., Мальцев А.А., Свиридов В.В. и др. // ПТЭ. 1982. № 5. С. 40–43.
- [2] Голутвин И.А., Мальцев А.А., Саранцев В.П., Свиридов В.А. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 3. С. 469–471.
- [3] Мальцев А.А. Сообщение СИАИ. № 9-86-289. Дубна, 1986. 11 с.
- [4] Лачинов В.М., Мальцев А.А., Филин В.П. // ПТЭ. 1982. № 5. С. 43–47.
- [5] Malzew A., Tragner P. // Tagungsband 92 der KDT Suhl zur Tagung "Temperatur '89". Suhl. Т. 2. S. 311–320.
- [6] Голутвин И.А., Карпов Б.С., Кирилов С.С. и др. Сообщение СИАИ. № 9-83-696. Дубна, 1983. 5 с.
- [7] Кондрашов В.Д., Мальцев А.А., Смолин Д.А. и др. Сообщение СИАИ. № 9-85-278. Дубна, 1985. 4 с.
- [8] Proc. of the Workshop on JINR  $c$ -tau Factory. N El. 5.13-92-98. Dubna, 1992. 382 p.
- [9] Джелепов В.П. // Тр. X Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. Дубна. Д9-87-105. Т. 1. С. 23.
- [10] Синхротронное излучение. Свойства и применение / Под ред. К. Кунца. М.: Мир, 1981.
- [11] Proc. of the 8<sup>th</sup> USSR National Conf. on Synhrotron Radiation Utilization (SR' 88). Novosibirsk (USSR), 1988.
- [12] Bossart R., Bosser J., Burnod et al. // Nucl. Instr. and Meth. 1979. Vol. 164. P. 375–380.
- [13] Тернов И.М., Михайлин В.В. Синхротронное излучение. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- [14] Годвин Р. // УФН. Т. 101. № 3. С. 493.
- [15] Белинская Г.И., Голутвин И.А., Дубовик А.С. и др. // ПТЭ. 1977. № 4. С. 27–29.
- [16] Laslett L. // LBL Report ERAN-1984. Berkley, 1972.
- [17] Мальцев А.А. Сообщение СИАИ. № 13-9663. Дубна, 1976. 8 с.
- [18] Мальцев А.А. Препринт ОИЯИ. № P9-92-562. Дубна, 1992. 10 с.
- [19] Мальцев А.А. Сообщение ОИЯИ. № 9-86-12. Дубна, 1986. 7 с.
- [20] Мальцев А.А., Мальцев М.А. // Атомная энергия. 1995. Т. 79. № 2. С. 118.