

05; 10; 12
© 1992 г.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО КОЛЬЦА ДЛЯ ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

С. И. Тютюнников, В. Н. Шалыпин, В. С. Швецов, А. С. Щеулин

Приводятся экспериментальные результаты по измерению мощности синхротронного излучения электронного кольца с параметрами: число электронов $(3-5) \cdot 10^{12}$, радиус кольца 3—5 см, энергия электронов 10—20 МэВ, длительность импульса 10 мс. Измерения проведены в диапазоне длин волн инфракрасного излучения (ИК) 2—400 мкм. Используются разработанные многозеркальные оптические каналы для фокусировки и вывода излучения. Экспериментальные и расчетные значения плотности мощности излучения на длине волны 300 мкм совпадают и составляют $6 \cdot 10^{-4}$ Вт/мкм, что на несколько порядков превышает мощность известных источников. Показана возможность создания ИК спектрометра с уникальными параметрами для исследований в области физики твердого тела.

Введение

Метод инфракрасной спектроскопии является одним из основных при исследовании в физике твердого тела. Для средневолнового диапазона ИК излучения $\lambda \leq 20$ мкм достаточно эффективны дифракционные спектрометры с источником излучения абсолютно черного тела, выполненного из карбида кремния. В области длин волн $\lambda \geq 100$ мкм спектральная плотность этих источников очень мала — на уровне 10^{-8} — 10^{-9} Вт, поэтому для увеличения светосилы используются спектральные приборы с фурье-преобразованием (фурье-спектрометры). В таких спектрометрах, однако, из-за слабой мощности источника излучения эффективно можно проводить измерения спектров поглощения только слабопоглощающих веществ. Поэтому увеличение мощности источника излучения в дальнем ИК диапазоне приведет к увеличению эффективности прибора.

Помимо использования мощного источника ИК излучения для измерения оптических характеристик сильно поглощающих материалов открывается другая область его использования, а именно для возбуждения колебаний кристаллической решетки, для исследования механизмов примесной фотопроводимости и т. д.

В работе [1] впервые было предложено использовать для спектроскопии твердых тел синхротронное излучение электронного кольца коллективного ускорителя тяжелых ионов (КУТИ). Особенностью данной установки для использования синхротронного излучения являются два факта.

1. Генерируемый спектральный диапазон ИК излучения может изменяться, поскольку меняется радиус электронного кольца. Возможный диапазон изменения длины волны $\lambda_c = 4.2R/\gamma^3$ (γ — релятивистский фактор электронов) определяется предельным радиусом R , при котором еще можно вывести излучение от кольца. Для нашего случая $3 \leq R \leq 8$ см, что для длин волн λ_c дает диапазон перестройки $2 < \lambda_c \leq 30$ мкм. При этом практически отсутствует, что очень важно, излучение с длинами волн $\lambda \leq \lambda_c$.

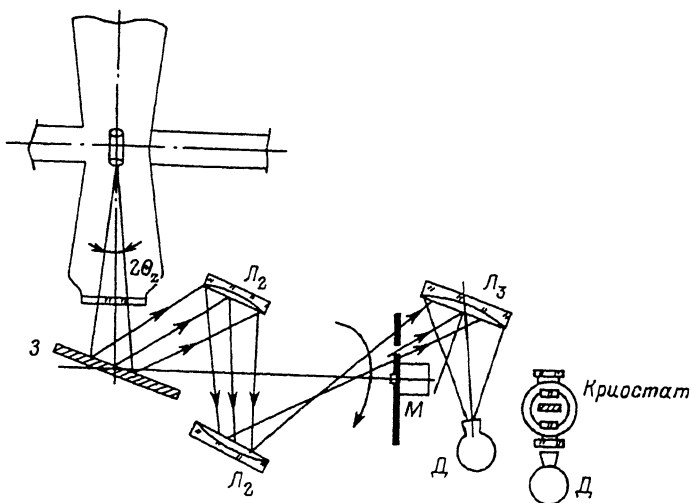


Рис. 1. Схема оптического канала из внешних зеркал.

$Л_1 - Л_3$ — сферические зеркала, 3 — плоское зеркало, Д — детектор ИК диапазона, М — модулятор.

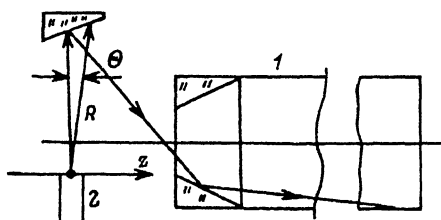


Рис. 2. Схема оптического канала из внутренних зеркал.

1 — оптический канал, 2 — источник излучения.

2. Поток СИ линейно зависит от числа электронов в кольце N_e . В электронном кольце КУТИ $N_e \approx 3-5 \cdot 10^{12}$, что существенно превосходит все имеющиеся установки в этом спектральном диапазоне.

Для использования синхротронного излучения одной из главных задач является формирование пучка синхротронного излучения заданных размеров с фокусировкой как можно большего светового потока, выходящего из окна ускорительной камеры. Для вывода СИ были разработаны конструкции оптических каналов двух типов (рис. 1, 2).

Радиусы кривизны системы зеркал были рассчитаны по результатам работы [2], в которой впервые был предложен алгоритм расчета фокусировки СИ. Были проведены стендовые измерения этой системы фокусировки с помощью лазерного источника на длине волны $\lambda = 0.63$ мкм. Проверялись зависимости эффективности преобразований излучения от радиального и аксиального положения излучателя, что эквивалентно положению электронного кольца относительно системы зеркал. Допустимое радиальное положение источника составляет ± 1 мм.

У сигн, мВ	Геометрия оптической системы	Режим сжатия	Примечания
$U_0 = 100$	Точечный детектор, I положение	I режим, $R_k = 8$ см, $\gamma = 22$	$\bar{\lambda}_{\text{изм}} = 7$ мкм
$U_1 = 8 \cdot 10^3$	Оптическая система из трех зеркал, II положение		
$U_0 = 600$	Точечный детектор, I положение	$R_k = 4$ см, $\gamma = 44$	$\bar{\lambda}_{\text{изм}} = 2.5$ мкм
$U_1 = 2 \cdot 10^4$	II положение		
$U_2 = 3 \cdot 10^4$	III положение		

Экспериментальная часть

На рис. 1 показаны схемы расположения камеры ускорителя и оптических каналов для транспортировки синхротронного излучения. Юстировка канала из трех зеркал производилась по положению источника излучения, который мог перемещаться с $R_k = 3$ до 8 см в камере ускорителя.

Для вывода СИ в разных условиях эксперимента использовались окна из соответствующих материалов: 1) ближний ИК диапазон — кварц $\lambda < 10$ мкм, 2) средний ИК диапазон — КРС-5, $\lambda \leq 40$ мкм, 3) дальний ИК диапазон — полиэтилен, $\lambda \geq 200$ мкм.

Синхротронное излучение электронного кольца после оптического тракта попадало на приемник, в качестве которого использовались на ближний ИК диапазон фотосопротивление Ge : Au; на дальний ИК диапазон детектор из InSb при $T \approx 4$ К.

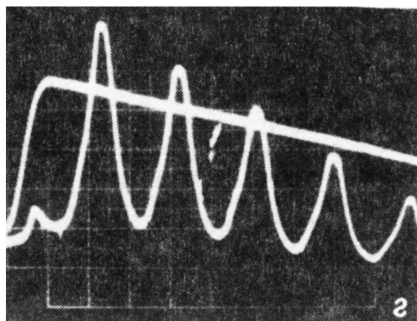
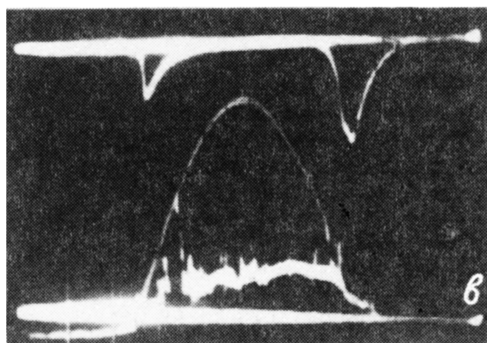
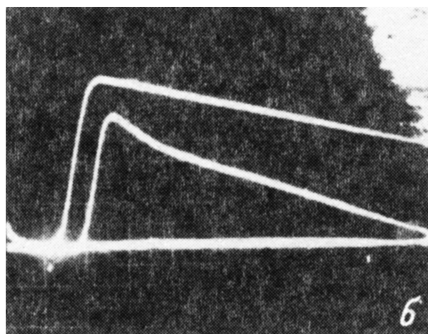
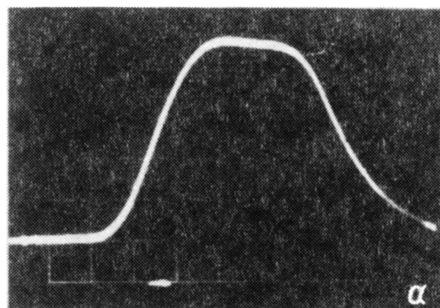


Рис. 3. Оциллограммы сигналов с детекторов.

a — схема рис. 2, детектор Ge: Au, развертка 0.2 мс/дел.; *б, з* — схема рис.1, детектор Ge: Au, развертка 2 мс/дел, нижний луч; *в* — схема рис. 1, детектор InSb, развертка 0.5 мс/дел., нижний луч.

Измерение мощности СИ проводилось в двух режимах сжатия электронного кольца (рис. 1). I режим: конечный радиус $R_k = 3$ см, время сжатия 4—5 мс; II режим: $R_k = 8$ см, время нахождения на этом радиусе десятки микросекунд. Измерения проводились в трех положениях детектора.

I положение, когда детектор стоял вблизи окна вывода излучения, при этом падающий поток определяется апертурой окна детектора, амплитуда сигнала U_0 . II положение, когда детектор установлен после зеркального тракта из трех зеркал, амплитуда сигнала U_1 . В III положении детектор установлен после системы внутренних зеркал, выводящих излучение в аксиальном направлении, амплитуда сигнала U_2 .

В таблице приведены значения амплитуд сигналов с детектора в разной геометрии и разных режимах сжатия.

Вывод излучения СИ с оптической системой в аксиальном направлении осуществлялся при движении кольца в направлении системы зеркал, которые были установлены на $z = 4$ см. Изменением параметров магнитной системы при медленном выводе кольца изменялись радиус подхода электронного кольца к зеркалам и соответственно условия транспортировки СИ. Были выбраны оптимальные параметры магнитной системы, при которых получено максимальное значение сигнала с детектора излучения.

На рис. 3, а, б показаны осциллограммы сигналов с детектора ИК излучения в оптимальном режиме фокусировки СИ излучения в двух схемах оптических каналов. Визуально поток излучения СИ в аксиальном тракте заполняет равномерно все сечение канала.

Из результатов таблицы видно, что фокусирующие свойства двух оптических каналов приводят к увеличению светового потока примерно в 100 раз.

В оптической системе аксиального типа длина пути транспортировки составляет 2 м; если она будет уменьшена в три раза, то поток СИ может быть существенно увеличен (как показывают расчеты, примерно на порядок). Оценки геометрической эффективности вывода G СИ двух оптических систем по результатам таблицы дают значение $G \approx 10^{-2}$, т. е. удается собрать несколько процентов общей мощности СИ от всего электронного кольца в диапазоне длин волн $\lambda \leq 7$ мкм. Геометрическая эффективность для длин волн $\lambda > 7$ мкм будет определяться соотношением углового распределения СИ Θ_z и угловым размером окна для вывода СИ $\Theta_0 \sim R_0/L$, где R_0 — радиус окна, L — расстояние от сечения электронного кольца до окна. Для $\Theta_z \leq R_0/L$ геометрическая эффективность оптического канала будет близка к значению, полученному в эксперименте для $\lambda \leq 7$ мкм. Полуширина углового распределения СИ в среднем и дальнем ИК диапазонах для длин волн $\lambda \geq \lambda_c$ дается формулой $\Theta_z = 1/\gamma(\lambda/\lambda_c)^{1/3}$. Из факта зависимости полуширины углового распределения СИ от длины волны следует, что эффективность вывода излучения наружными зеркалами будет определяться апертурой выводного окна. Для вывода излучения с длиной волны $\lambda = 100$ мкм потребуется окно с $R_0 = 6$ см, что весьма проблематично. В этом случае эффективно работает оптический канал с внутренними зеркалами. Стендовые измерения показали, что в аксиальном направлении вплоть до угла $\Theta = 200$ мрад эффективность транспортировки излучения не зависит от угла падения на зеркала.

Для исследования процессов, приводящих к возникновению сверхпроводимости в пленках оксидных из $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ и других, большой интерес имеет диапазон длин волн $\lambda \geq 100$ мкм, где можно ожидать проявления эффектов спаривания электронов. Поэтому один из экспериментов был направлен на измерение мощности СИ в длинноволновом диапазоне. Детектором излучения служил кристалл InSb при гелиевой температуре $T = 4.5$ К. Для вывода излучения использовалась лавсановая пленка толщиной 100 мкм, шириной $2z = 40$ мм, которая обеспечивала перепад давления от $5 \cdot 10^{-8}$ Тор в камере до атмосферного. Использовался оптический тракт из внешних зеркал. На рис. 3, в показана осциллограмма сигнала с детектора InSb . Зависимость амплитуды сигнала от

числа электронов в кольце линейная. Для последующей проверки устанавливались перед детектором различные фильтры: пороговый фильтр из керамики с пропусканием излучения при $\lambda \geq 250$ мкм, дифференциальный фильтр из металлических сеток с пропусканием в диапазоне $300 \leq \lambda \leq 600$ мкм.

Амплитуда сигнала с детектора связана с падающей мощностью излучения $P(\lambda)$

$$U_c = k \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) \alpha(\lambda) G(\lambda) d\lambda,$$

где $\alpha(\lambda)$ — спектральная чувствительность детектора, k — коэффициент усиления предусилителя, G — геометрический фактор излучения, $G = \Theta_0 / \Theta_{\text{сш}} = S_{\text{окна}} / 4\pi L^2 \Theta_z$, $U_c \approx 150$ мВ — значение сигнала при максимальном числе электронов в данном сеансе $N_e \approx 2-3 \cdot 10^{12}$, $G \approx 10^{-3}$, $K = 10^2$.

Отсюда получаем $P(\bar{\lambda}) = 0.3$ Вт ($\bar{\lambda} = 300$ мкм). Средняя спектральная плотность $\Phi_0(\bar{\lambda}) = \frac{P(\bar{\lambda})}{\Delta\lambda} \approx 5 \cdot 10^{-4}$ Вт·мкм $^{-1}$.

Расчетное значение при $N_e = 2 \cdot 10^{12}$ $\Phi_0(\bar{\lambda}) = 6 \cdot 10^{-4}$ Вт/мкм при $\lambda = 300$ мкм.

Видно, что экспериментальные значения близки к расчетным по мощности излучения.

В спектроскопии твердых тел в области дальнего ИК диапазона $\lambda \geq 100$ мкм используются из-за большой светосилы в основном фурье-спектрометры с ртутной лампой сверхвысокого давления в качестве источника излучения. Типичные значения мощности излучения $\Phi 10^{-9}$ Вт в полосу $\Delta\lambda/\lambda \approx 10^{-1}$. Источник СИ — экспериментальное значение в телесный угол оптического тракта $\Phi(\bar{\lambda}) = \Phi_0(\bar{\lambda}) G \cdot \Delta\lambda \approx 5 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-3} \cdot 30 = 1.5 \cdot 10^{-5}$ Вт. Из экспериментальных результатов следует, что источник синхротронного излучения мощнее на четыре порядка известных источников.

Далее вопрос стоит о выборе спектрального прибора для работы с пучком СИ из-за его импульсного характера. Спектрометры дифракционные и решеточные при использовании за каждый импульс СИ будут давать одну точку по длинам волн. Для набора спектра требуется набор статистики. Так, для набора спектра с шагом $\Delta\lambda/\lambda \approx 10^{-2}$ и длиной 100 мкм необходимо 10^4 точек, что при частоте $f = 1$ Гц составит время работы примерно 3 ч. При исследовании проявления энергетической щели требуется шаг по длинам волн не лучше $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-1}$, при этом время набора существенно сокращается до 0.5 ч.

Существует еще один эффективный метод сканирования излучения, описанный в работе [3], в котором дисперсионным элементом является вращающийся диск, по его образующей установлены диэлектрические узкополосные фильтры, отличающиеся друг от друга на $\Delta\lambda$. Полученное разрешение $\Delta\lambda/\lambda \leq 10^{-2}$ в области 100–500 мкм.

Для проверки работоспособности этой методики диск с диэлектрическими фильтрами был заменен диском с разрезом шириной 2 мм, который был укреплен на электродвигателе. При сжатии кольца в режиме длительного удержания синхротронное излучение фокусируется на вращающийся диск с щелью (рис. 1), после щели установлено сферическое зеркало, собирающее излучение на при-

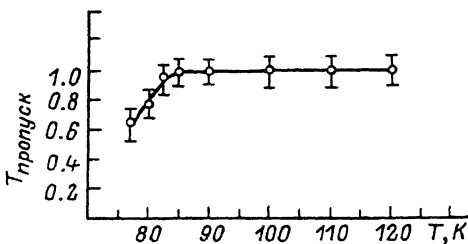


Рис. 4. Зависимость пропускания ИК излучения пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7 - \delta$ от температуры.

емное окно детектора. На осциллограмме представлен сигнал с детектора с вращающимся диском (рис. 3, з). Как видно, полное время оборота составляет примерно 4 мс. Временная структура сигнала представляет собой профиль сечения электронного кольца, просканированный механической щелью.

Таким образом, видно, что в этом режиме сжатия можно реализовать сканирующий спектрометр с временем сканирования 4 мс. Надо при этом иметь детектор с временным разрешением $\Delta t = \tau_0 \Delta \lambda / \lambda \approx 4 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-2} \text{с} = 40 \text{ мкс}$, что несложно выполнить с набором имеющихся детекторов.

Был поставлен пробный эксперимент по измерению коэффициента прохождения ИК излучения сквозь пленку состава $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ по подложке из кремния. На рис. 1 показана блок-схема эксперимента. СИ излучение фокусировалось оптическим каналом на входное окно оптического криостата прокачного типа с возможностью работать при температуре от 5 до 300 К. В криостате установлена пленка. Излучение из криостата попадает на детектор ИК излучения Ge:Аu. Поскольку криостат был предназначен для длиноволновой области спектра, 4 окна были выполнены из полиэтилена (100 мкм), то на длинах волн максимальной чувствительности детектора $\lambda \approx 7 \text{ мкм}$ коэффициент пропускания суммарного криостата составлял $\approx 1/100$ от начального потока. Тем не менее сигнал с детектора был значителен. С охлаждением до азотной температуры величина пропускания уменьшилась в 1.5 раза. На рис. 4 показана зависимость коэффициента пропускания от температуры.

Сформулируем основные выводы, полученные в результате экспериментов.

1. Измеренные значения мощности ИК излучения в ближнем и дальнем ИК диапазоне совпадают с расчетными.

2. Разработаны конструкции и опробованы на ускорителе два типа оптических трактов для сбора СИ. Максимально достигнутый коэффициент сбора мощности излучения $\approx 2 \cdot 10^{-2}$.

3. Экспериментально показана возможность сканирования спектра с помощью вращающегося диска с узкополосными фильтрами на ускорителе электронных колец.

4. Проведены первые эксперименты, которые показали изменение коэффициента пропускания пленочных материалов из $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ при охлаждении до азотной температуры.

5. Эксперимент и расчет подтверждают возможность создания на ускорителе электронных колец спектрометра ИК излучения с уникальными параметрами для исследований в области физики твердого тела.

Выражаем благодарность В. Л. Аксенову, Б. В. Васильеву за большую поддержку, В. Б. Анзину, В. Г. Шабратову, Ю. П. Филиппову за помощь в эксперименте.

Список литературы

- [1] Долбилов Г. В., Мальцев А. П., Саранцев В. П. и др. // Тр. X Совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. Д-9-87-105. С. 390—393.
- [2] Квочка В. И., Панасюк В. С., Романовский В. Ф. и др. // ЖТФ. 1974. Т. 44. Вып. 6. С. 1210—1217.
- [3] Telfair J., Gilly F. // J. Am. Lab. 1976. Vol. 8. P. 91—94.

Институт ядерных исследований
Москва

Поступило в редакцию
31 августа 1990 г.