

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

95-211

P14-95-211

С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин, Н.Н.Скынтее

ИССЛЕДОВАНИЯ ВТСП-ПЛЕНОК  
В ОБЛАСТИ ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ  
НА ПУЧКЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Направлено в журнал «Сверхпроводимость:  
физика, химия, техника»

1995

В инфракрасной спектроскопии (ИК) среднего и дальнего диапазона были достигнуты большие успехи с использованием фурье-интерферометров с источником излучения типа "черное тело" (ЧТ) с температурой  $T \cong 1500K$ , для которых мощность излучения в полосу  $\Delta\lambda/\lambda \cong 0.1$  составляет  $P \cong 10^{-8}$  Вт. Дальнейшее повышение эффективности спектроскопических исследований связано с разработкой высокоинтенсивных источников излучения в области  $\lambda \geq 100$  мкм.

С развитием ускорительной техники такими источниками могут быть электронные циклические ускорители, источники синхротронного излучения (СИ) и источники с переменной магнитной структурой (лазеры на свободных электронах — ЛСЭ) [1]. Особенностью источника СИ для ИК-спектроскопии в длинноволновом диапазоне по сравнению с источником типа ЧТ является то, что спектральная плотность излучения  $P_\lambda$  спадает как  $\lambda^{-1}$ , тогда как для ЧТ:  $P_\lambda \sim \lambda^{-3}$  [2]. Измерения мощности СИ в длинноволновой области на источнике *NSLS* [1] в Брукхейвене показали, что в спектральном диапазоне  $\lambda \geq 100$  мкм отношение мощности СИ к мощности излучения ЧТ  $P_{СИ}/P_{ЧТ} \cong 10$  [1]. Особенностью использования специализированных накопителей является то, что основная мощность лежит в диапазоне мягкого рентгена, а на ИК-диапазон приходится лишь малая ее часть. Спектр СИ характеризуется параметром  $\lambda_c = 4.2R\gamma^{-3}$ , где  $R$  - радиус электронного кольца,  $\gamma$  - релятивистский фактор электронов. Для накопителя *NSLS*  $R = 2.2$  м,  $\lambda_c = 59 \text{ \AA}$  [1]. Для оценок мощности излучения в дальнем ИК-диапазоне используется асимптотическая формула ( $\lambda \gg \lambda_c$ ) [1]:

$$N_\lambda \left[ \frac{\text{фотон}}{\text{с} \times \text{мрад}} \right] = 5.25 \times 10^{16} \times I_e [\text{A}] \times E [\text{ГэВ}] \times \left( \frac{\lambda_c}{\lambda} \right)^{1/3} \times \frac{\Delta\lambda}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $I_e$  - ток электронного кольца в А,  $E$  - энергия электронов в ГэВ. Пути повышения мощности ИК СИ связаны с двумя факторами: 1 - увеличение апертуры ( $E_{x,y}$ ) оптического канала в горизонтальном направлении, 2 - увеличение накопленного тока в кольце. В настоящее время максимальные значения этих параметров достигнуты на установке *NSLS* [1]:

$$E_x = 90 \text{ мрад}, \quad E_y = 90 \text{ мрад}, \quad I_e = 750 \text{ мА}.$$

С точки зрения оптимального, источником с большой импульсной яркостью ИК СИ является накопитель с максимальным значением тока.

Подставляя в формулу (1):  $I_e = \frac{N_e \times e \times c}{2\pi R}$  и  $\lambda_c \cong \frac{R}{\gamma^3}$ , получаем

$$N_\lambda \sim \frac{N_e}{R^{2/3}} \quad (2)$$

Из формулы (2) видно, что наиболее эффективным излучателем для ИК-диапазона будет электронное кольцо с минимальным радиусом  $R$  и максимальным числом электронов. Как было показано в работе [2], для генерации СИ в субмиллиметровом диапазоне наиболее адекватен импульсный накопитель электронов (ИНЭ). Рабочие параметры электронного кольца импульсного накопителя следующие [5]:

$$R = 3 \div 4 \text{ см}, E = 20 \div 25 \text{ МэВ}, N_e = 5 \times 10^{12}, I_e = 1200 \div 1300 \text{ А}.$$

Для этих параметров накопителя выигрыш в мощности излучения в длинноволновом ИК-диапазоне определяется, по сравнению с другими источниками, соотношением токов электронов и составляет  $\cong 2000$ .

Для увеличения акцептанса оптического канала был разработан многозеркальный тракт со сферическими зеркалами. Проведенные эксперименты показали, что на длину  $L = 200$  см он передает около 5% всей мощности СИ. Стендовые исследования для длины транспортировки  $L = 200$  см дают значение горизонтального акцептанса на уровне  $\theta \cong 1000$  мрад. Причем, как показали измерения, в такой оптической системе вертикальный акцептанс  $\theta_z = 120$  мрад.

Расчетное значение импульсной мощности СИ для многозеркального оптического канала длиной  $L = 30$  см для длины волны  $\lambda = 300$  мкм составляет  $P_\lambda = 6 \times 10^{-4}$  Вт/мкм для  $N_e = 5 \times 10^{12}$ ; экспериментально полученное значение  $P_\lambda = (5 \pm 2) \times 10^{-4}$  Вт/мкм. Временная длительность излучения определяется режимом формирования электронного кольца и составляет  $\tau = (10^{-7} \div 10^{-1})$  с, частота повторений импульсов СИ:  $\nu \cong 1$  Гц.

Из приведенных выше результатов следует, что импульсный накопитель электронов с параметрами  $N_e = 5 \times 10^{12}$ ,  $R = 3$  см,  $E = 20 \cong 25$  МэВ обеспечивает возможность формирования пучка субмиллиметрового излучения в диапазоне  $\lambda > 100$  мкм с рекордной импульсной мощностью  $P = (5 \div 6) \times 10^{-3}$  Вт в полосу  $\Delta\lambda/\lambda = 0.1$ .

Одной из важных задач, стоящих на пути спектроскопических исследований на таком импульсном пучке СИ, является создание импульсного спектрометра. В настоящее время под эту установку ведется модернизация ИК-монохро-

матора на дифракционной решетке (эшелетте) с целью расширения спектрального диапазона до 700 мкм. В качестве детектора используется оптико-акустический приемник (ОАП) с лавсановым окном, а также приемник ( $Ge : Ga$ ), основанный на примесной проводимости при гелиевой температуре. При работе с дифракционным монохроматором время набора спектра пропускания в интервале  $\lambda = 50 \div 300$  мкм и  $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-2}$  составит  $t = 3$  часа, при  $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-1}$  —  $t \cong 20$  мин.

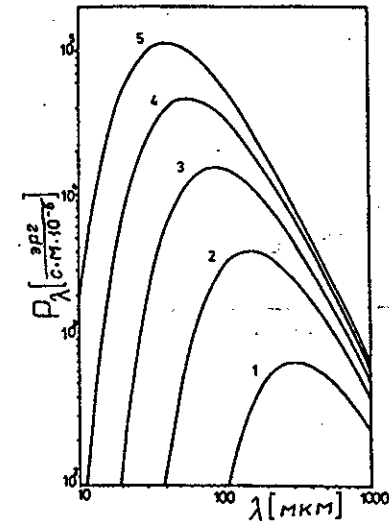


Рисунок 1. Мгновенные спектры мощности СИ в разные моменты времени:  $t = 1.7$  мс - 1;  $t = 1.9$  мс - 2;  $t = 2.1$  мс - 3;  $t = 2.3$  мс - 4;  $t = 2.5$  мс - 5

Для проведения исследований в ВТСП-материалах эффектов, проявляющихся в плавной зависимости пропускания или отражения от длины волны, можно использовать то обстоятельство, что в импульсном накопителе происходит в течение временного цикла формирования электронного кольца последовательное смещение коротковолновой границы спектра СИ в сторону коротких длин волн, т.е. происходит временная эволюция спектра синхротронного излучения  $P(\lambda, \lambda_c(t))$ , рис.1. Характерный масштаб временной эволюции определяется изменением параметров кольца  $R(t)$ ,  $E_c(t)$  и соответственно  $\lambda_c(t)$ . Если изме-

рение потока СИ производится с помощью детектора с постоянной времени  $T_d$ , много меньшей выбранного интервала и спектральной чувствительностью  $D_0(\lambda)$ , то зависимость тока с детектора от времени может быть представлена в следующем виде :

$$J_0(t) = \int_{\lambda_1}^{\alpha\lambda_c(t)} P(\lambda_c(t), \lambda) \times D_0(\lambda) d\lambda; \quad (3)$$

$\lambda_1$  - нижний предел, определяется чувствительностью детектора (для детектора (Ge:Ga) он составляет 100 мкм). Верхний предел  $\alpha\lambda_c(t)$  является функцией времени сжатия кольца.

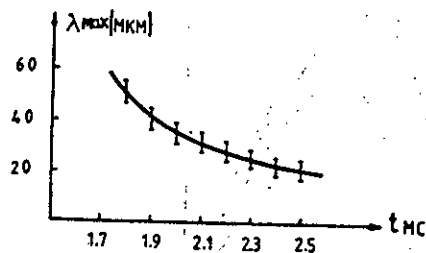


Рисунок 2. Зависимость длины волны максимума мощности СИ от времени сжатия

Если перед детектором находится исследуемый объект, то коэффициент пропускания объекта  $T(\lambda)$  связан с временной зависимостью сигнала датчика  $I_s(t)$  посредством интегрального уравнения :

$$J_s(t) = \int_{\lambda_1}^{\alpha\lambda_c(t)} P(t, \lambda_c(t), \lambda) \times D_s(\lambda) \times T(\lambda) d\lambda. \quad (4)$$

Задача практической реализации данного метода восстановления функции пропускания объекта требует знания с хорошей точностью зависимости  $\lambda_c(t)$ , которая определяет временную эволюцию спектра СИ. На рис.2 показана измеренная зависимость  $\lambda_{max} = f(t) = 0.42 \times \lambda_c$  для выбранного режима сжатия электронного кольца по методике, описанной в работе [3].

Функция пропускания объекта  $T(\lambda)$  находится, как показали численные расчеты, в процессе эволюции спектра СИ с точностью до нескольких процентов,

из измерения отношения производных по времени сигналов детектора, при наличии перед детектором ВТСП-пленки и без нее [4].

Спектральное разрешение этого метода определяется скоростью изменения  $\lambda_c$  во времени :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{d\lambda_c}{dt} \times \frac{T_d}{\lambda_{max}}, \quad \text{где } T_d \text{ — временное разрешение детектора.}$$

В типичном режиме сжатия на участке резкого изменения  $\lambda_c(t)$  получаем  $\Delta\lambda/\lambda \cong 10^{-2}$  ( $T_d = 10^{-5}$  с). Для измерения спектров пропускания в длинноволновом диапазоне используются детекторы :

- 1 (Ge : Ga)  $20 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 100 \text{ мкм}$ ,  $T_p = 4.5K$ ,
- 2 (In Sb)  $\lambda > 100 \text{ мкм}$ ,  $T_p = 4.5K$ .

Спектральная чувствительность детектора (Ge : Ga) измерялась на фурье-спектрометре с точностью меньше одного процента.

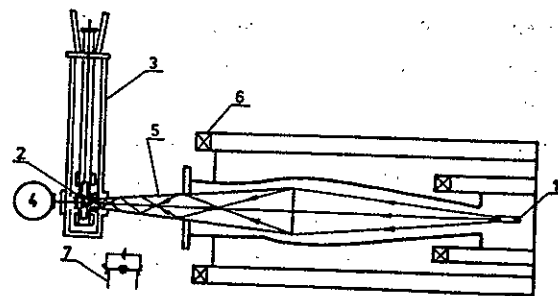


Рисунок 3. Блок-схема оптического канала на импульсном накопителе: 1 - электронное кольцо; 2 - образец в криостате; 3 - криостат; 4 - детектор, регистрирующий прошедшее излучение; 5 - конический световод; 6 - катушки магнитного поля

На рис.3 показана блок-схема оптического канала формирования пучка СИ на импульсном накопителе электронов. Для фокусировки СИ исполь-

зуются конический световод из латуни, который обеспечивает аксептанс на уровне  $Q_2 \cong 130$  мрад. Конический световод фокусирует излучение на ВТСП-пленку, находящуюся в прокачанном криостате. Температура пленки может изменяться от  $4.5K$  до  $300K$ . Проходящее сквозь пленку излучение попадает на ИК-детекторы ((*Ge : Ga*), или (*In Sb*)), которые находятся в заливных криостатах.

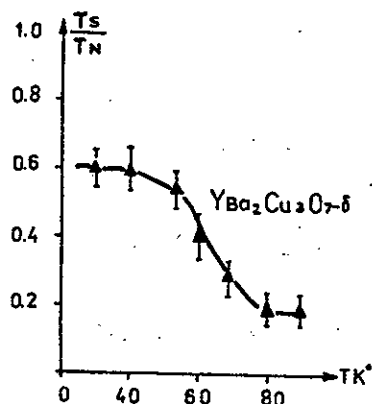


Рисунок 4. Зависимость пропускания излучения с  $\lambda = 315$  мкм,  $\Delta\lambda/\lambda = 0.15$  сверхпроводящей пленкой *YBCO* от температуры

Перед детектором *In Sb* был установлен решеточный узкополосный фильтр с  $\nu = 32$  см<sup>-1</sup>,  $\lambda = 315$  мкм и  $\Delta\nu/\nu \cong 1/15$  для измерения коэффициента пропускания ВТСП-пленки. Для измерений использовалась поликристаллическая пленка *YBCO* на подложке из *MgO*, температура перехода  $T_c = 80K$  с  $\Delta T \cong 3K$ . Сопротивление пленки в процессе эксперимента с СИ контролировалась по измерению резистивного отклика с контактов, находящихся на пленке. Температура контролировалась термопарой, помещенной на пленку. При исследовании на пучке СИ во всей области спектра при температуре  $T < 80K$  не было обнаружено резистивного отклика ВТСП-пленки, который был бы связан с болометрическим либо с другим эффектом [5].

На рис.4 представлен результат измерения пропускания сверхпроводящей пленки *YBCO* в зависимости от температуры (длина волны  $\lambda = 315$  мкм). Измерения зависимости пропускания от температуры проведены в режиме освещения ВТСП-пленки "белым светом". Узкополосный фильтр, выделявший заданную длину волны, устанавливался перед детектором.

Поскольку ускоритель работает с частотой  $f = 1$  Гц, то измерения проводились с мониторингом числа электронов от импульса к импульсу, которое определяло абсолютную мощность излучения. В процессе измерения было обнаружено, что при некоторой пороговой мощности при  $T \geq 60K$  обнаруживается уменьшение пропускания сверхпроводящей пленки в зависимости от падающего излучения. Значение пороговой мощности составляет  $\cong 10$  Вт, при длительности излучения  $\tau = 15$  мс. Измерение пропускания сверхпроводящей пленкой *YBCO* в режиме регистрации временного отклика с детектора (*Ge : Ga*) и последующая обработка как  $J_s(t)$ , производной по времени по формуле (5), так и методом численного решения интегрального уравнения (4) с известным законом  $\lambda_c = f(t)$  и  $P_c = f(\lambda_c)$  дает по классической теории БКШ [6] значение  $2\Delta = 20$  мэВ при  $T = 20K$  [7].

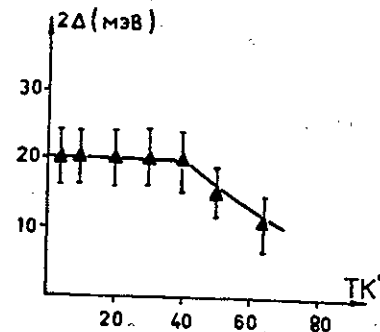


Рисунок 5. Зависимость энергетической щели  $2\Delta$  от температуры, измеренная в режиме эволюции спектра СИ

Были проведены также измерения зависимости от температуры значения  $2\Delta$ , которое представлено на рис.5. В пределах ошибки все точки температурной кривой ложатся на зависимость, даваемую теорией БКШ.

$$2\Delta = 3.2 \times k \times T_c \times (1 - T/T_c)^{1/2}$$

Уменьшение пропускания  $T_s/T_N$  (рис.6), измеренное на длине волны  $\lambda = 315$  мкм при мощности излучения  $P > 10$  Вт, может свидетельствовать о разрушении куперовских пар падающим излучением.

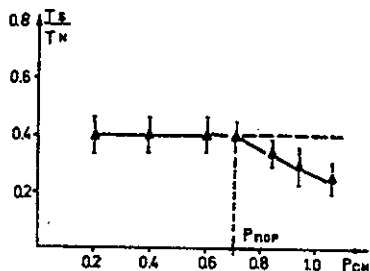


Рисунок 6. Зависимость пропускания излучения на  $\lambda = 315$  мкм при  $T = 60K$  от полной мощности СИ

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Измерено значение энергетической щели  $2\Delta$  ВТСП пленки  $YBCO$  ( $T_c = 80K$ ) при температуре  $T = 20K$ , величина которой составляет  $2\Delta = 20 \pm 6$  мэВ;
2. Измеренная температурная зависимость  $2\Delta = f(T)$  близка к зависимости, даваемой теорией БКШ.

## Список литературы

- [1] G.P. Williams et al.,— Rev. Sci. Instrum. 60(7)/1989, pp2176-2178
- [2] С.И.Тютюнников и др. — ЖТФ/1992, т62, вып3, с146-151
- [3] Г.В. Долбилов и др. — ЖТФ/1985, т55, вып7, сс1311-1316
- [4] Е.С. Кузьмин и др. — Сообщение ОИЯИ Дубна/1991, Е14-91-542
- [5] С.И. Тютюнников, В.Н. Шаляпин, В.П. Саранцев — Сообщение ОИЯИ, Дубна/1992 P14-92-576
- [6] Mattis D., Bardin J. — Phys. Rev. 11,16/1958 p412.
- [7] Н.Р. Скintей и др. — Сообщение ОИЯИ Дубна/1993, P14-93-411

Рукопись поступила в издательский отдел  
12 мая 1995 года.