

УДК 535.33; 539.2

## ПОЛУЧЕНИЕ МОДУЛЯЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ $MgB_2$ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА $\lambda$ -МОДУЛЯЦИИ

А. М. Герасимов, А. И. Головашкин, О. М. Иваненко, А. П. Коротков

*Описана настройка и отладка модуляционной оптической автоматизированной установки с помощью измерений обычных и модуляционных спектров светофильтра и золотого зеркала, а также результаты предварительного исследования модуляционных спектров высокотемпературного сверхпроводника  $MgB_2$ . В спектре  $MgB_2$  обнаружена полоса поглощения с локальной особенностью при  $\hbar\omega = 1.81$  эВ.*

Оптические свойства соединений являются весьма существенным источником информации об их электронной структуре. Оптические спектры позволяют находить характеристики электронов проводимости и параметры электрон-фононного взаимодействия в полупроводниках, металлах и проводящих соединениях. При этом при изучении соединений с металлическим характером проводимости возникают значительно большие трудности по сравнению с полупроводниками, оптические спектры которых характеризуются узкими и отчетливыми полосами поглощения. Оптические спектры металлов имеют значительно менее отчетливую структуру и характеризуются широкими полосами поглощения. Возможность изучать тонкую структуру оптических спектров дают модуляционные оптические методы [1]. При использовании модуляционных методик на эксперименте определяются спектры производной исследуемой величины (обычно коэффициента отражения  $R$ ), на которых все особенности спектра проступают более отчетливо. Модуляционный оптический спектр, получаемый с помощью модуляции длины волны светового потока (т.н.  $\lambda$ -модуляция), представляет собой частотную зависимость (или зависимость от длины волны света  $\lambda$ ) производной логарифма оптической характеристики (коэффициента пропускания или отражения) по параметру

модуляции  $\lambda$ . Наибольший интерес представляют собой модуляционные спектры отражения, поскольку они могут измеряться на массивных непрозрачных образцах. В этом случае модуляционный спектр отражения определяется выражением:

$$\beta(\lambda) = \frac{d \ln R(\lambda)}{d\lambda} = \frac{1}{R(\lambda)} \frac{dR(\lambda)}{d\lambda} \approx \frac{1}{R(\lambda)} \frac{\delta R(\lambda)}{\delta \lambda}, \quad (1)$$

где  $R(\lambda)$  – коэффициент отражения образца,  $\delta \lambda$  – глубина модуляции длины волны излучения,  $\delta R(\lambda)$  – величина изменения коэффициента отражения образца при изменении длины волны излучения на  $\delta \lambda$  (величина  $\delta R$  зависит от  $\lambda$ ).

Измерения модуляционных спектров методом  $\lambda$ -модуляции проводились на модернизированном варианте автоматизированной оптической модуляционной установки, созданной в лаборатории сверхпроводимости ФИАН. Первоначальный вариант установки подробно описан в работах [2, 3]. Модернизированный вариант установки, а также методика экспериментального определения глубины модуляции  $\delta \lambda$  описаны в [4].

В настоящей работе описана, во-первых, настройка, отладка установки с помощью измерений обычных и модуляционных спектров светофильтра IF-650 (спектры пропускания) и золотого зеркала (спектры отражения) и, во-вторых, результаты предварительного исследования модуляционных спектров высокотемпературного сверхпроводника  $MgB_2$ .

Результаты измерений спектров светофильтра показали полное соответствие модуляционного оптического спектра пропускания (спектра производной  $dT/d\lambda$ , где  $T(\lambda)$  – коэффициент пропускания) обычному спектру пропускания, что подтвердило правильность настройки, как оптической, так и электронной схемы установки.

Используемое нами золотое зеркало представляет собой непрозрачную пленку золота, нанесенную в вакууме на полированную стеклянную подложку. Спектр отражения золотого зеркала, а также его модуляционный спектр отражения приведены на рис. 1 а, б. Величина глубины модуляции  $\delta \lambda$  в исследованной области составляла около 2 Å. Измерения спектров выполнены в интервале длин волн 4178 – 7199 Å. В качестве приемника излучения использовались ФЭУ-62 и ФЭУ-39. На рисунке для обычного спектра приведены также значения коэффициента отражения золота для разных длин волн из [5]. Наблюдается хорошее согласие наших результатов с известными по литературе данными. Видно также соответствие измеренных спектров отражения  $R(\lambda)$  и производной  $dR/d\lambda$ .

В качестве первого объекта экспериментального исследования был выбран высокотемпературный сверхпроводник  $MgB_2$ . Обнаруженный около трех лет назад, этот

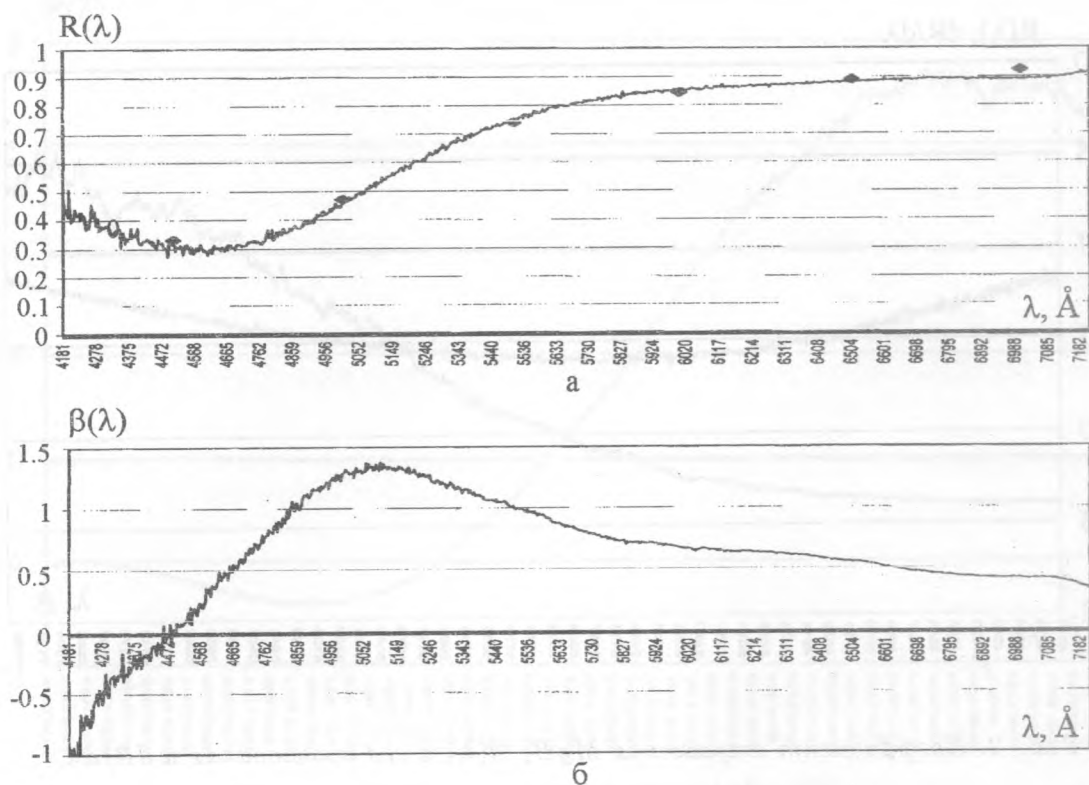


Рис. 1. а) Коэффициент отражения золота  $R(\lambda)$ ;  $\diamond$  – табличные значения. б) Модуляционный спектр золота  $\beta(\lambda)$ .

сверхпроводник является уникальным соединением. В нем, помимо перехода в сверхпроводящее состояние при температуре  $T_C = 39\text{ K}$ , найден второй фазовый переход в области температур  $10 - 12\text{ K}$ . Обнаружено, что в  $MgB_2$  проявляются две сверхпроводящие щели, соответствующие двум вышеуказанным температурам фазовых переходов. Теория связывает наличие двух сверхпроводящих щелей с двумя группами носителей заряда, имеющих в соединении  $MgB_2$ . Такая необычная электронная структура привлекает к этому соединению повышенное внимание [6]. Кроме того,  $MgB_2$  считается одним из очень перспективных соединений для приложений в сверхпроводниковой электронике. Это связано с весьма высокой  $T_C$ , отсутствием в этом соединении “вредных” элементов и значительной по сравнению с другими высокотемпературными сверхпроводниками длиной когерентности.

В настоящей работе мы выполнили предварительные исследования спектра отражения  $MgB_2$  и его модуляционного спектра отражения в области длин волн  $4178 -$

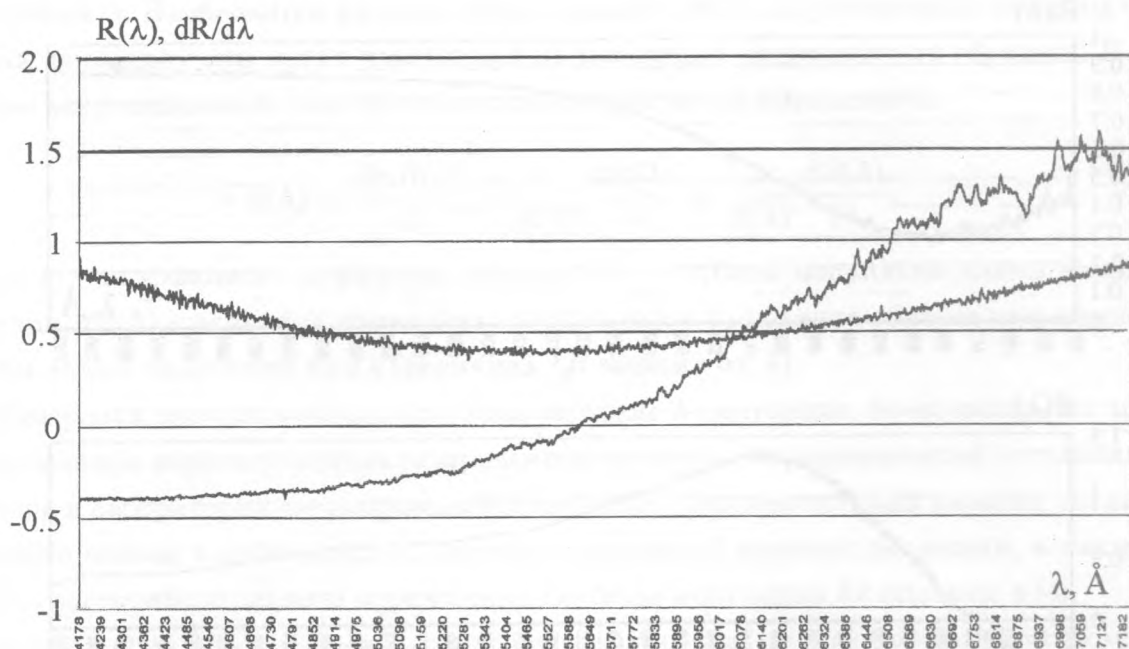
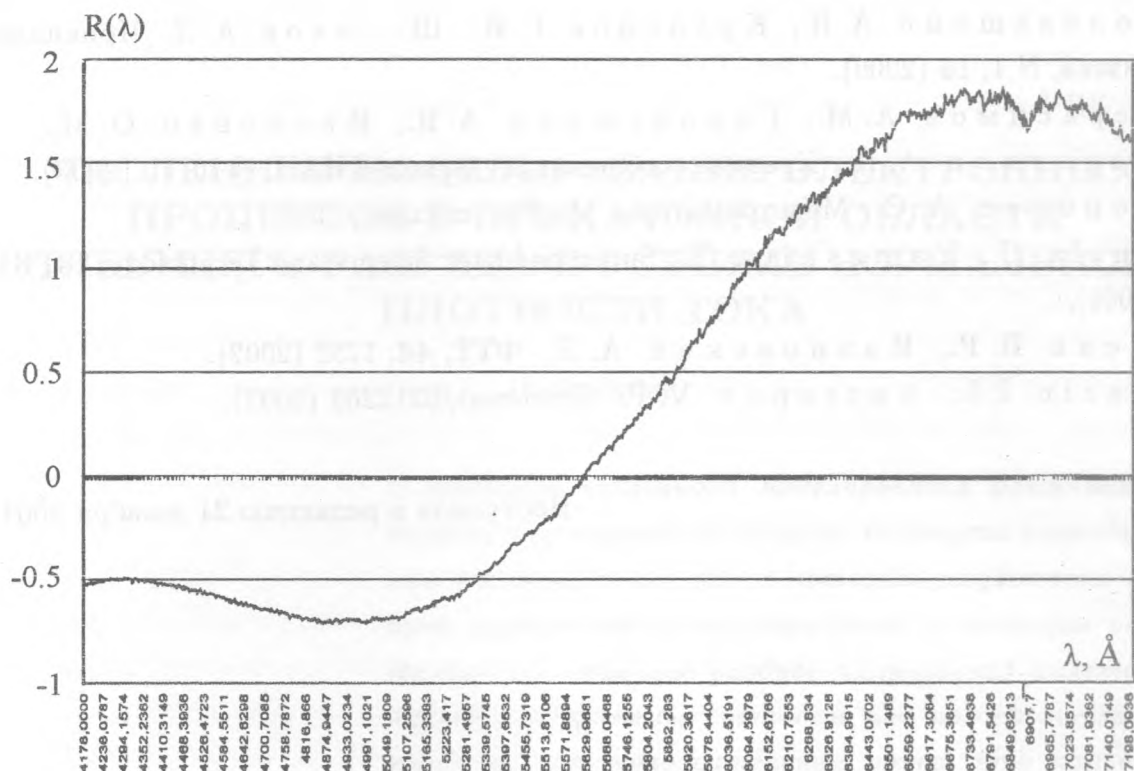


Рис. 2. Коэффициент отражения  $MgB_2$   $R(\lambda)$  и его производная  $dR/d\lambda$ .

7199 Å. Интерес к оптическим свойствам  $MgB_2$  в видимой области спектра (энергия  $\hbar\omega \sim 1-2$  эВ) связан с тем, что в этом соединении может существовать диэлектрическая щель  $E_g \sim 1-3$  эВ [7, 8]. Ее характерное значение важно для понимания природы уникального электронного строения  $MgB_2$ . Отметим, что близкие по значению величины диэлектрических энергетических щелей  $E_g \sim 2$  эВ (пайерлсовская щель) наблюдаются в других высокотемпературных сверхпроводниках.

Образец представлял собой пленку  $MgB_2$ , нанесенную на подложку  $MgO$  (001) методом лазерного осаждения. Размер образца составлял  $6 \times 10$  мм<sup>2</sup>. Глубина модуляции при измерении модуляционного спектра  $\delta\lambda$  была около 2 Å. Измерения выполнены при комнатной температуре.

Результаты измерений спектра отражения  $R(\lambda)$  и его производной  $dR/d\lambda$  приведены на рис. 2, модуляционный спектр  $\beta(\lambda)$  – на рис. 3. Из рисунков видно, что в области  $\hbar\omega \sim 2$  эВ в  $MgB_2$  имеется полоса поглощения. Полоса имеет сложную структуру, в частности, локальный минимум при  $\hbar\omega = 1.81$  эВ ( $\lambda \approx 6900$  Å). Однако на наш взгляд, эта полоса выглядит недостаточно резкой, чтобы претендовать на роль представителя пайерлсовской щели. Возможно, что вблизи исследованного нами интервала  $\lambda$

Рис. 3. Модуляционный спектр  $MgB_2$   $\beta(\lambda)$ .

существует другая, более сильная полоса поглощения, соответствующая пайерлсовской щели. Возможно также, что причиной отсутствия ожидаемой полосы в спектре является недостаточно высокое качество исследуемого образца. Поэтому полученные данные надо считать предварительными, требующими дальнейших исследований в более широкой области спектра и на более совершенных образцах.

Авторы выражают благодарность Л. Л. Чайкову за ценные замечания.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект N 03-02-16930).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кардона М. Модуляционная спектроскопия. М., Мир, 1972.
- [2] Головашкин А. И., Кузнецов Г. И., Шелехов А. Л. Препринт ФИАН N 69, М., 1999.



- [3] Головашкин А. И., Кузнецов Г. И., Шелехов А. Л. Прикладная физика, N 1, 16 (2000).
- [4] Герасимов А. М., Головашкин А. И., Иваненко О. М., Коротков А. П. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 10, 10 (2003).
- [5] Топорец А. С. Монохроматоры. М., Гостехиздат, 1955.
- [6] Vuzla S., Yamashita T. Superconductor Science and Technology, 14, R115 (2001).
- [7] Шейн И. Р., Ивановский А. Л. ФТТ, 44, 1752 (2002).
- [8] Mazin I. I., Antropov V. P. Cond-mat/0212263 (2002).

Поступила в редакцию 24 декабря 2004 г.