

УДК 235.33; 539.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ МОДУЛЯЦИИ СВЕТОВОГО ПОТОКА В МЕТОДЕ λ-МОДУЛЯЦИИ

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

Развит метод экспериментального определения глубины модуляции длины волны излучения при снятии спектров в методе модуляции длины волны. Экспериментально определена глубина модуляции и ее зависимость от длины волны в видимой области спектра для модуляционной оптической установки. Метод может быть распространен на модуляционные установки других типов.

Одним из наиболее перспективных методов определения электронных характеристик и особенностей электронной структуры материалов является оптический метод [1]. Оптические спектры позволяют находить характеристики электронов проводимости и параметры электрон-фононного взаимодействия в полупроводниках, металлах и проводящих соединениях. Модуляционные оптические методы [2] дают возможность изучать тонкую структуру спектров. Наибольшее развитие эти методы получили при исследовании полупроводников. Успехи таких исследований связаны с тем, что оптические спектры полупроводников характеризуются узкими и отчетливыми полосами поглощения. Исследование оптических свойств металлов и соединений с металлическим характером проводимости представляет собой значительно более трудную задачу по причине того, что оптические спектры металлов имеют значительно менее отчетливую структуру и характеризуются широкими полосами поглощения. Однако в последнее время интерес к таким исследованиям значительно вырос в связи с тем, что именно такие исследования могут выявить особенности электронных характеристик новых перспективных соединений, таких как высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП), манганиты, бориды и др., в которых природа наблюдаемых аномалий свойств остается не до конца выясненной.

При использовании модуляционных методик в эксперименте определяются спектры производной исследуемой величины (обычно коэффициентов отражения R или пропускания T). При этом важной характеристикой является величина изменения модулирующего параметра, так называемая глубина модуляции. Именно эта величина определяет тот факт, что измеряемый спектр (модуляционный спектр) является спектром производной измеряемой величины. Измеряемый сигнал прямо зависит от глубины модуляции. Знание значений глубины модуляции необходимо для оптимизации оптических модуляционных установок. При слишком малой глубине модуляции мал измеряемый сигнал, и значит мала чувствительность установки. При слишком большой глубине модуляции могут быть утеряны данные о тонкой структуре спектров.

В настоящей работе развит экспериментальный метод определения глубины модуляции на установке, описанной в работах [3 – 5]. При исследовании оптических свойств проводящих материалов на указанной установке возможна модуляция как внутреннего параметра образца (например, его температуры), так и внешнего параметра (длины волны λ или частоты ω падающего на образец излучения). Ниже будет описан метод определения глубины модуляции длины волны $\delta\lambda$ и приведены соответствующие оптические и электронная схемы. Развита идеология может быть применена (с небольшим изменением схемы) и при измерении глубины модуляции температуры.

Модуляционный оптический спектр, получаемый с помощью модуляции длины волны светового потока (т.н. λ -модуляция), представляет собой частотную зависимость (или зависимость от λ) производной логарифма оптической характеристики (коэффициента пропускания или отражения) по параметру модуляции λ [2]. Наибольший интерес представляют собой модуляционные спектры отражения, поскольку они могут измеряться на массивных непрозрачных образцах. Однако при настройке установки более удобно работать со спектрами пропускания светофильтров с известными параметрами. В этом случае модуляционный спектр пропускания определяется выражением:

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

где $T(\lambda)$ – коэффициент пропускания светофильтра, $\delta\lambda$ – глубина модуляции длины волны излучения, $\delta T(\lambda)$ – величина изменения коэффициента пропускания фильтра при изменении длины волны излучения на $\delta\lambda$ (величина δT зависит от λ).

Измерения модуляционных спектров методом λ -модуляции проводились на модернизированном варианте автоматизированной оптической модуляционной установки, созданной в лаборатории сверхпроводимости ФИАН. Первоначальный вариант установки

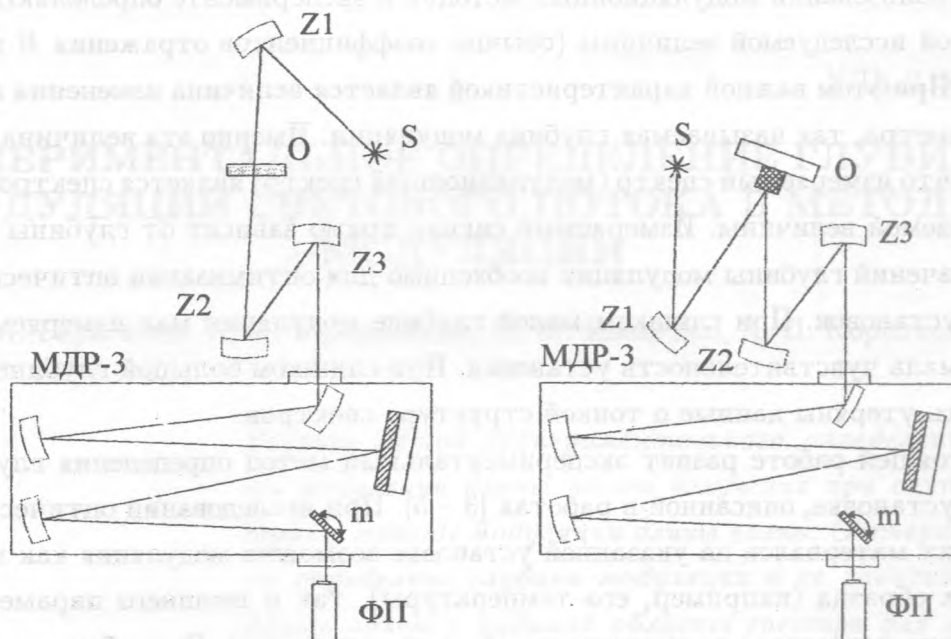


Рис. 1. Оптико-механическая схема установки (измерение спектров пропускания). S – осветитель; Z_1, Z_2, Z_3 – система фокусирующих зеркал; O – образец, закрепленный на подвижной столике; МДР-3 – монохроматор; ФП – фотоприемник; m – модуляционное зеркало.

Рис. 2. Оптико-механическая схема установки (измерение спектров отражения). Обозначение элементов установки соответствует рис. 1.

подробно описан в [3, 4]. Оптическая схема модифицированной установки приведена на рис. 1 и 2. Рис. 1 соответствует измерению спектра пропускания, рис. 2 – спектра отражения. При измерении спектра пропускания свет от источника S , пройдя через систему зеркал Z_1, Z_2, Z_3 и образец O , попадает на входную щель монохроматора (в данном варианте установки используется монохроматор МДР-3). При измерении спектра отражения свет отражается от образца. Угол отражения при этом близок к нормальному. Измерение сигнала в отсутствие образца и его сравнение с измерениями в присутствии образца позволяет определить абсолютное значение коэффициентов пропускания или отражения. Электронная схема измерения потока на выходе монохроматора приведена на рис. 3. Сигнал после модулятора и фотоприемника (ФЭУ) раздваивается и через резонансный усилитель и фазовый детектор поступает на плату ЦАП-АЦП, сопряженную с персональным компьютером класса Pentium III.

Модуляция длины волны излучения осуществляется при помощи колеблющегося зер-

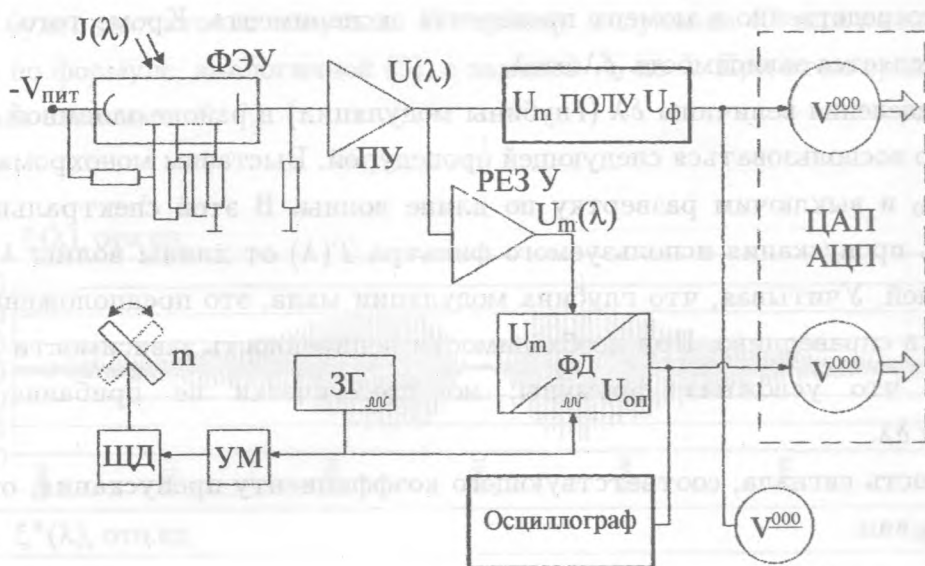


Рис. 3. Блок-схема электронной системы измерения с ФЭУ. $J(\lambda)$ – падающее на ФЭУ излучение; ПУ – предварительный усилитель; ПОЛУ У – полосовой усилитель; ЦАП-АЦП – плата цифроаналогового и аналогового цифрового преобразования (установлена в компьютере); РЕЗ У – резонансный усилитель; ФД – фазовый детектор; ЗГ – задающий генератор; УМ – усилитель мощности; ШД – шаговый двигатель; m – зеркало-модулятор; $V_{пит}$ – напряжение питания ФЭУ.

кала m , находящегося внутри монохроматора непосредственно перед выходной щелью (рис. 1). Данное зеркало установлено на оси шагового двигателя, ротор которого совершает поворот попеременно то влево, то вправо в пределах одного шага. Положение ротора при каждом шаге жестко задано конструкцией двигателя и воспроизводится с высокой точностью, поэтому временная стабильность параметра модуляции (глубины модуляции) $\delta\lambda$ совпадает со стабильностью задающего генератора. Зеркало-модулятор колеблется с частотой $f_m = 513$ Гц и малой амплитудой. Глубина модуляции $\delta\lambda$ обычно рассчитывается по углу поворота колеблющегося зеркала. Учитывая важное значение этой величины для определения абсолютной величины производных $dR/d\lambda$ и $dT/d\lambda$, ее необходимо определять на эксперименте. Современная электронная техника позволяет это сделать.

В настоящей работе величина $\delta\lambda$ и ее зависимость от длины волны λ определялись на основе записи невыпрямленного сигнала, соответствующего спектру пропускания свето-

фильтра. Этот метод позволяет определять глубину модуляции $\delta\lambda$ в соответствующей области непосредственно в момент проведения эксперимента. Кроме того, на эксперименте определяется зависимость $\delta\lambda$ от λ .

Для определения величины $\delta\lambda$ (глубины модуляции) в районе заданной длины волны λ_0 можно воспользоваться следующей процедурой. Выставим монохроматор на длину волны λ_0 и выключим развертку по длине волны. В этой спектральной области зависимость пропускания используемого фильтра $T(\lambda)$ от длины волны λ будем считать линейной. Учитывая, что глубина модуляции мала, это предположение в первом приближении справедливо. При необходимости нелинейность зависимости $T(\lambda)$ можно учитывать, что усложнит формулы, но практически не прибавит точности определения $\delta\lambda$.

Зависимость сигнала, соответствующего коэффициенту пропускания, от времени t будет иметь вид:

$$T(t) = T(\lambda_0) + \frac{\delta T}{2} \sin(\omega t). \quad (2)$$

Здесь $T(\lambda_0)$ – сигнал, соответствующий пропусканию фильтра на длине волны λ_0 (эта длина волны выбрана нами за нуль отсчета), ω – частота модуляции (период колебаний зеркала $\tau = 2\pi/\omega$), δT – полная величина изменения $T(t)$ (т.е. удвоенная амплитуда переменной части сигнала). Определяя на эксперименте величину δT и наклон (тангенс угла наклона) зависимости $T(\lambda)$ в районе $\lambda \approx \lambda_0$ (т.е. величину $dT(\lambda_0)/d\lambda$), найдем:

$$\delta\lambda = \frac{1}{dT(\lambda_0)/d\lambda} \delta T. \quad (3)$$

Это значение глубины модуляции в точке $\lambda = \lambda_0$. Определяя значение $\delta\lambda$ в разных участках спектра, получим экспериментальную зависимость $\delta\lambda$ от λ .

Иногда удобнее измерять $\delta\lambda$ прямо в процессе эксперимента, когда записывается, например, зависимость пропускания от длины волны λ . В этом случае зависимость невыпрямленного модуляционного сигнала от λ будет выражаться формулой:

$$T(t) = T(\lambda_0 + at) + \frac{\delta T}{2} \sin(\omega t). \quad (4)$$

Здесь $\lambda = at$ – зависимость длины волны, пропускаемой монохроматором, от времени ($a = d\lambda/dt$ – скорость развертки длины волны), λ_0 – начальная точка записи, $\delta T = (\delta T_1 + \delta T_2)/2$ – средняя величина изменения $T(t)$ за один период. В этом случае величина δT будет меняться со временем (т.е. с длиной волны). Если частота модуляции

ω достаточно высока по сравнению со скоростью развертки длины волны, то изменение δT с λ будет достаточно плавным. И глубину модуляции $\delta\lambda$ для каждой λ можно определять по формуле, аналогичной (3), с заменой λ_0 на λ . При этом сразу получится спектральная зависимость $\delta\lambda$.

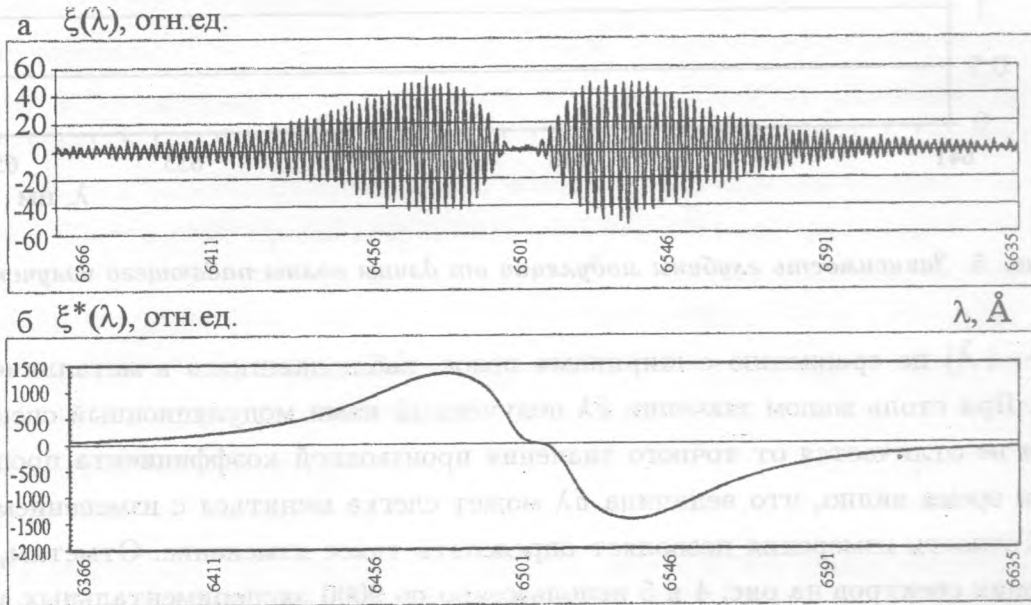


Рис. 4. Сигнал со светофильтра IF-650: а) невыпрямленный $\xi(\lambda)$, б) выпрямленный $\xi^*(\lambda)$.

На рис. 4а для примера приведена запись невыпрямленного модуляционного сигнала $\xi(\lambda)$, полученного при измерении коэффициента пропускания фильтра IF-650 в области $\lambda \approx 6400 - 6600 \text{ \AA}$. Этот сигнал получен вырезанием из экспериментального промодулированного сигнала пропускания медленно меняющейся функции $T(\lambda)$ при помощи полосового усилителя Unipan 232. Экспериментальный сигнал записывался платой ЦАП-АЦП с частотой считывания около 50 Гц. Таким образом, именно данная плата выполняла функцию стробоскопического прерывателя. Т.к. время преобразования аналогового входа платы равно 70 мкс, изменение сигнала за время преобразования пренебрежимо мало. На рис. 4б показан выпрямленный сигнал $\xi^*(\lambda)$, пропорциональный спектральной зависимости производной $dT(\lambda)/d\lambda$. Эти данные позволяют определить экспериментальный спектр глубины модуляции $\delta\lambda$.

На рис. 5 показана спектральная зависимость $\delta\lambda$ во всем доступном с этим фильтром интервале спектра (6400 – 6600 Å). Видно, что величина $\delta\lambda$ действительно достаточно

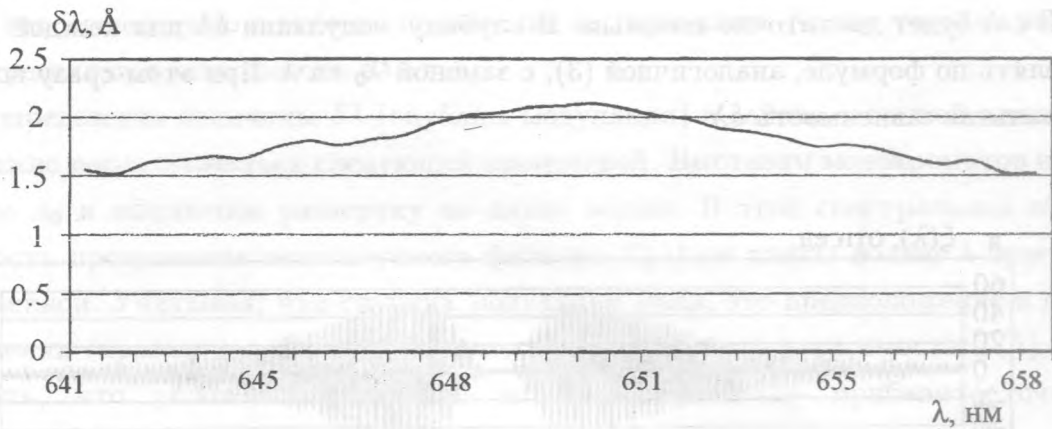


Рис. 5. Зависимость глубины модуляции от длины волны падающего излучения.

мала ($\sim 1 \text{ \AA}$) по сравнению с ширинами полос, наблюдавшихся в металлических системах. При столь малом значении $\delta\lambda$ полученный нами модуляционный спектр практически не отличается от точного значения производной коэффициента пропускания. В то же время видно, что величина $\delta\lambda$ может слегка меняться с изменением величины λ . Точность измерения позволяет определять такое изменение. Отметим, что при построении спектров на рис. 4 и 5 использовано по 9000 экспериментальных точек.

Аналогичным образом возможно определение глубины модуляции температуры при получении модуляционных спектров методом термомодуляции.

Таким образом, в настоящей работе развит метод экспериментального определения глубины модуляции $\delta\lambda$ при получении модуляционных спектров.

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

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

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Соколов А. В. Оптические свойства металлов. М., Физматгиз, 1961.
- [2] Кардона М. Модуляционная спектроскопия. М., Мир, 1972.
- [3] Головашкин А. И., Кузнецов Г. И., Шелехов А. Л. Препринт ФИАН N 69, М., 1999.
- [4] Головашкин А. И., Кузнецов Г. И., Шелехов А. Л. Прикладная физика, N 1, 16 (2000).

[5] Герасимов А. М., Головашкин А. И., Коротков А. П., Шелехов А. Л. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 8, 36 (1999).

Поступила в редакцию 10 октября 2003 г.