

УДК 539.393

Автоматизированная модуляционная установка для получения оптических спектров

А. И. Головашкин, Г. И. Кузнецов, А. Л. Шелехов

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Описана автоматизированная установка для получения оптических модуляционных спектров металлов и соединений. Установка позволяет получать, помимо спектров коэффициента отражения, спектры при модуляции длины волны падающего излучения и термомодуляционные оптические спектры. Спектральный интервал, задаваемый используемыми монохроматором и приемниками, составляет 0,5–6 эВ. Приводятся оптическая и электронная блок-схемы установки. Даны примеры полученных модуляционных спектров.

Оптическая спектроскопия — чрезвычайно важный метод фундаментальных и прикладных исследований. Этот метод широко применяется при изучении свойств металлов и, в частности, сверхпроводников. Однако сложность электронных спектров металлических соединений, наличие широких линий поглощения в их спектрах приводят к тому, что часто недостаточно просто измерений спектров отражения или поглощения. Для выделения тонких деталей спектров металлов и их соединений необходимо применение модуляционной оптической спектроскопии, т. е. получение спектров производных оптических характеристик по внутреннему или внешнему параметру образца.

При создании комбинированной модуляционной оптической установки ставилась долгосрочная задача — разработать и собрать установку для получения модуляционных спектров высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). Это объяснялось сложностью электронных структур ВТСП и особенно их оптических спектров. Они значительно сложнее структуры и спектров металлов и простых интерметаллических соединений типа $A15$, карбидов и т. д. Поэтому для расшифровки спектров ВТСП необходимо привлекать именно модуляционные оптические методы, позволяющие получать производные коэффициента отражения R по температуре T , длине волны λ и другие. Расшифровка оптических спектров ВТСП позволит пролить свет на

электронную структуру этих соединений. Последняя, по-видимому, является ключевым элементом, определяющим аномально высокие критические температуры этих сверхпроводников и другие их аномальные свойства. К сожалению, несмотря на 12 лет интенсивных исследований, механизм высокотемпературной сверхпроводимости, а также природа аномальных свойств остаются неясными и электронная структура ВТСП не до конца расшифрованной.

Ниже описывается автоматизированная модуляционная оптическая установка для получения спектров металлов и металлических соединений. Используемые в данном варианте установки — монохроматор МДР-3 и фотоприемники — позволяют получать спектры в интервале энергий 0,5–6 эВ (или в области длин волн излучения 0,2–2,6 мкм). Установка позволяет получать как спектры с модуляцией длины волны излучения λ , так и термомодуляционные спектры при модуляции температуры образца. Установка основана и является развитием сконструированных ранее термомодуляционной оптической установки [1] и установки с модуляцией длины волны падающего на образец излучения [2]. Описываемая комбинированная установка обладает преимуществами обеих методик — термомодуляции и модуляции длины волны излучения. В настоящей установке, помимо некоторых изменений оптической схемы, конструктивных изменений механики, модернизирована также электронная часть. Указанные изменения были сделаны не только для улучшения параметров установки, но и, в частности, для реализации возможности получения модуляционных спектров различных ВТСП. На установке были проведены пробные измерения модуляционных спектров карбида NbC [3], спектров с модуляцией длины волны излучения (λ — модуляционные спектры или спектры МДВ) Au, Nb и Nb₃Sn. Термомодуляционная методика и детали соответствующей части установки подробно описаны в работе [1]. Поэтому в статье более подробно рассматриваем описание методики и схем λ -модуляционной части установки.

Спектры коэффициента отражения и производной коэффициента отражения по длине волны

Как известно, спектр коэффициента отражения определяется формулой

$$R(\lambda) = \frac{J(\lambda)}{J_0(\lambda)}, \quad (1)$$

где $J(\lambda)$ — интенсивность отраженного от образца излучения; $J_0(\lambda)$ — интенсивность излучения, падающего на образец. Спектр логарифмической производной коэффициента отражения по длине волны λ определяется выражением

$$\beta(\lambda) = \frac{1}{R(\lambda)} \frac{dR(\lambda)}{d\lambda}. \quad (2)$$

Преобразовывая и дифференцируя (1), найдем

$$J(\lambda) = J_0(\lambda) R(\lambda), \quad (3)$$

$$dJ(\lambda) = R(\lambda) dJ_0(\lambda) + J_0(\lambda) dR(\lambda). \quad (4)$$

Разделив (4) на $J(\lambda)$ и учитывая (3), получим

$$\frac{dJ(\lambda)}{J(\lambda)} = \frac{dJ_0(\lambda)}{J_0(\lambda)} + \frac{dR(\lambda)}{R(\lambda)}. \quad (5)$$

В эксперименте могут быть измерены малые конечные приращения ΔJ_0 и ΔJ , вызванные известным малым приращением $\Delta\lambda$. Поэтому вместо (2) используется приближение:

$$\beta(\lambda) \cong \frac{1}{R(\lambda)} \frac{\Delta R(\lambda)}{\Delta\lambda} \cong \frac{1}{\Delta\lambda} \left(\frac{\Delta J(\lambda)}{J(\lambda)} - \frac{\Delta J_0(\lambda)}{J_0(\lambda)} \right). \quad (6)$$

Таким образом, для получения спектров $R(\lambda)$ и $\beta(\lambda)$ необходимо экспериментально измерить величины $J_0(\lambda)$, $\Delta J_0(\lambda)$, $J(\lambda)$, $\Delta J(\lambda)$, $\Delta\lambda$. Из (6) вытекает основной принцип построения и работы измерительной установки: отдельно измеряются величины $J_0(\lambda)$, ΔJ_0 и $J(\lambda)$, $\Delta J(\lambda)$ при соблюдении условий: $\Delta\lambda$ — известна; при измерениях в обоих случаях оптические пути, зеркала и преобразователи одинаковы. Таким образом, реализуется метод модуляции длины волны излучения.

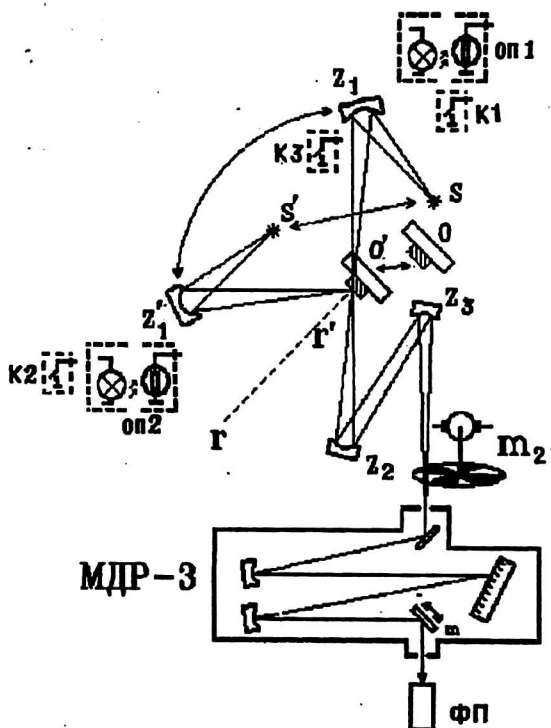
Оптико-механическая система

Оптико-механическая система (ОМС) (рис. 1) включает в себя осветитель S ; систему зеркал Z_1, Z_2, Z_3 ; поворотный рельс (не показан на рисунке); образец O , закрепленный на подвижном столике (не показан на рисунке); монохроматор МДР-3; сменные фотоприемники ФП.

Рис. 1. Оптико-механическая система установки:

S — осветитель; Z_1-Z_3 — система фокусирующих зеркал; O — образец, закрепленный на подвижном столике; МДР-3 — монохроматор; ФП — фотоприемник; пункт $r-r'$ — ось вращения поворотного рельса (не показан на рисунке), перпендикулярная к плоскости рисунка; ОП1, ОП2 — оптоэлектронные пары; К1, К2 — концевые выключатели; К3 — герконовое реле; m — модулирующее зеркало; m_2 — прерыватель потока излучения

Показано два положения осветителя (S, S'), первого зеркала (Z_1, Z_1') и образца (O, O'), соответствующие прямому прохождению пучка света и отражению его от исследуемого образца



Пунктир $r-r'$ обозначает ось вращения поворотного рельса, перпендикулярную плоскости рисунка. Зеркало Z_1 , осветитель и столик с образцом закреплены на поворотном рельсе ОМС, который имеет два рабочих положения, воспроизводимых с высокой точностью. В положении 1 свет от осветителя падает последовательно на зеркало Z_1 , зеркало Z_2 , зеркало Z_3 и далее на входную

щель монохроматора, что позволяет измерить $\Delta J_0(\lambda)$, $J_0(\lambda)$. Размеры зеркал подобраны так, чтобы полностью использовать апертуру монохроматора.

При повороте рельса изменяется положение подвижного столика, осветителя S , зеркала Z_1 , образца O , которые занимают новые положения S' , Z_1' и O' , соответственно. ОМС юстируется так, чтобы ось вращения поворотного рельса совпадала с рабочей поверхностью образца. Для точной фиксации столика при положении 2 рельса используется специальный упор, а перемещение столика осуществляется за счет натянутой пружины. В положении 2 свет от осветителя падает на зеркало Z_1 (положение Z_1'), образец (положение O'), зеркало Z_2 , зеркало Z_3 и далее фокусируется на входной щели монохроматора, что позволяет измерить $J(\lambda)$ и $\Delta J(\lambda)$. Угол падения света на образец в реальной установке близок к прямому.

Особое значение имеет точность воспроизведения положения 1 рельса и положения 2. Применяется двухскоростной режим вращения: быстрое перемещение на основном участке пути и медленная доводка при точной установке в положение 1 или 2. В качестве датчика положения рельса используются оптоэлектронные пары ОП1 и ОП2 для положения 1 или 2, соответственно. Концевые выключатели К1 и К2 служат для ограничения движения рельса при ошибке в позиционировании и продвижении рельса за 1-е или 2-е положение. Герконовое реле К3 (магнит прикреплен к поворотному рельсу, геркон — к плоскости металлического стола — основания) позволяет отличать 1-е положение рельса от 2-го.

Оптические пути в 1-м и 2-м положениях одинаковы. Различие заключается в отражении излучения от поверхности образца в положении 2. Таким образом, для измерения падающего и отраженного излучения используются одни и те же оптические элементы и одна измерительная система, что позволяет проводить измерение абсолютных значений коэффициента отражения и его производной с большой точностью.

В установке используется четырехскоростной монохроматор МДР-3 с линейной по λ скоростью развертки, осуществляющий сканирование принимаемого излучения как при прямом, так и при обратном ходе развертки. Для модуляции по длине волны монохроматор модернизирован. Модулирующее зеркало m , направляющее поток излучения после дифракционной решетки и сферического зеркала на выходную щель монохроматора, установлено на оси шагового двигателя, ротор которого совершает поворот попеременно то влево, то вправо в пределах одного шага. Необходимо отметить, что положение ротора при каждом шаге жестко задано конструкцией двигателя и воспроизводится с высокой точностью. Поэтому стабильность во времени параметров λ -модуляции совпадает (в первом приближении) со стабильностью задающего генератора. Величина $\Delta\lambda$ определяется дисперсионной кривой монохроматора. Глубина модуляции $\Delta\lambda$ в видимой области спектра измерялась также экспериментально по лазерной линии, значение совпало с расчетным.

Нами использовались и другие методики модуляции λ , например колеблющаяся пропускающая пластинка (LiF). В этом случае глубина модуляции $\Delta\lambda$ была значительно ниже и составляла в средней части спектрального интервала 5 \AA . Однако конструктивно наиболее простым и надежным оказалось колеблющееся зеркало.

В качестве фотоприемников (ФП) используются фотоумножители (ФЭУ) и фоторезисторы. При использовании ФЭУ можно пренебречь паразитным сигналом, связанным с темновым током. Поэтому для измерения $J_0(\lambda)$ и $J(\lambda)$

используется схема с усилителем постоянного тока. Особенностью фоторезисторов в качестве преобразователей потока излучения в электрический сигнал является значительная постоянная составляющая, соответствующая темновому режиму. Поэтому для измерения с помощью фоторезисторов величин $J_0(\lambda)$ и $J(\lambda)$ используется дополнительная модуляция потока излучения с частотой около 1300 Гц вращающимся диском с прорезями (m_2), который устанавливается перед входной щелью монохроматора.

Для повышения точности предусмотрено измерение шумовых характеристик всей измерительной системы в целом (хотя наибольший вклад вносят ФЭУ и фоторезисторы). Для этого поток излучения перекрывается шторкой, управляемой электромагнитом. Шторка установлена перед входной щелью монохроматора (на рис. 1 не показана).

Нами разработана также система для охлаждения образца и проведения оптических измерений при низких температурах, включая гелиевые. Установка также легко позволяет получать спектры при температурах, несколько превышающих комнатные. Нагрев образца осуществляется либо током, текущим через образец, либо специальным нагревателем. Таким же способом осуществляется модуляция температуры образца при измерении термомодуляционных спектров.

Принцип построения электронной системы измерения (ЭСИ)

Работу установки в целом можно условно разделить на несколько одновременно выполняемых операций:

- собственно измерение потока излучения на выходе монохроматора;
- управление оптико-механической системой;
- синхронизация работы узлов электронной системы измерения и ОМС;
- накопление и хранение в удобной форме результатов измерения.

Последние три задачи управления удобно решать с помощью персональной ЭВМ. Величина потока излучения на выходе монохроматора из-за наличия модуляции зависит от времени. Зеркало-модулятор m колеблется с частотой $f_m \cong 500$ Гц с малой амплитудой, что приводит к малым колебаниям длины волны выходного излучения и его интенсивности. Кроме того, при работе системы развертки по длине волны средняя величина выходного потока также меняется со временем. Максимальная скорость развертки используемого монохроматора МДР-3 равна 1,6 нм/мин, поэтому изменение выходного потока монохроматора, вызванное работой его развертки, является медленным по сравнению с процессом модуляции и скоростью преобразования входного сигнала в цифровой код ЭСИ.

Отдельно отметим, что при работе системы развертки по длине волны может меняться не только средняя величина выходного потока монохроматора, но и фаза (относительно опорного сигнала, управляющего шаговым двигателем привода зеркала-модулятора) модуляционных колебаний выходного потока. Фаза будет меняться на 180° при длине волны выходного потока, соответствующей каждому локальному максимуму или минимуму спектра излучения, падающего на входную щель монохроматора. Это изменение фазы отражает изменение знака производной интенсивности входного потока по длине волны.

Учитывая вышесказанное, для описания величины потока излучения на выходе монохроматора можно использовать с достаточно хорошим приближением следующее выражение:

$$J'(\lambda, t) = J'(\lambda) + J'_m(\lambda) \sin(2\pi f_m t + \psi(\lambda)). \quad (7)$$

Здесь $J'(\lambda, t)$ — измеряемый на выходе монохроматора поток излучения, соответствующий 2-му положению поворотного рельса (когда измеряется поток излучения, отраженный от образца; можно для краткости ввести термин “отраженный пучок”); $J'(\lambda)$ — величина потока излучения на выходе монохроматора без модуляции (при измерении отраженного пучка); $J'_m(\lambda)$ — амплитуда модуляционной составляющей; f_m — частота модуляции; t — время; $\psi(\lambda)$ — фаза модуляционной составляющей, принимающая значение 0 или 180° .

Аналогичное выражение можно написать для измеряемого на выходе монохроматора потока излучения, соответствующего 1-му положению поворотного рельса (когда измеряется падающий на образец поток; назовем его “прямой пучок”) $J'_0(\lambda, t)$:

$$J'_0(\lambda, t) = J'_0(\lambda) + J'_{m0}(\lambda) \sin(2\pi f_m t + \psi_0(\lambda)). \quad (7a)$$

Здесь $J'_0(\lambda)$ — величина потока излучения на выходе монохроматора без модуляции (при измерении прямого пучка); $J'_{m0}(\lambda)$ — амплитуда модуляционной составляющей; $\psi_0(\lambda)$ — фаза модуляционной составляющей в этом случае.

Учитывая характер изменения фазы вместо (7) и (7a) удобно использовать выражения

$$J'(\lambda, t) = J'(\lambda) + J'_m(\lambda) \cos \psi(\lambda) \sin 2\pi f_m t. \quad (8)$$

$$J'_0(\lambda, t) = J'_0(\lambda) + J'_{m0}(\lambda) \cos \psi_0(\lambda) \sin 2\pi f_m t. \quad (8a)$$

При сделанных допущениях величины $J'_m(\lambda) \cos \psi(\lambda)$ и $J'_{m0}(\lambda) \cos \psi_0(\lambda)$ являются хорошими приближениями искомым приращений $\Delta J_0(\lambda)$ и $\Delta J(\lambda)$, необходимых для вычисления спектра $\beta(\lambda)$ (6) [о влиянии потерь см. ниже].

ЭСИ позволяет измерять пары величин $J'_0(\lambda)$, $J'_{m0}(\lambda) \cos \psi_0(\lambda)$ и $J'(\lambda)$, $J'_m(\lambda) \cos \psi(\lambda)$ дискретно через интервалы времени, задаваемые программно.

Как уже отмечалось, время измерения одной пары величин — $J'_0(\lambda)$ и $J'_{m0}(\lambda) \cos \psi_0(\lambda)$ или $J'(\lambda)$ и $J'_m(\lambda) \cos \psi(\lambda)$ — настолько мало, что позволяет считать измеряемые величины и среднюю длину волны λ постоянными за время измерения. Эти соображения учтены в (7) и (7a), где опущена зависимость длины волны λ от времени t . Таким образом, (7)—(7a) используются для описания величин потока излучения на выходе монохроматора лишь для коротких интервалов времени, определяемых временем измерения параметров одной экспериментальной точки, что и необходимо для получения конечного результата.

Параметры модуляции колеблющимся зеркалом, используемые в установке: $\Delta \lambda = 17 \text{ \AA}$ (в средней части спектрального интервала); $f_m \approx 500 \text{ Гц}$. Следует отметить, что точное значение $f_m = 500 \text{ Гц}$ (или любая другая частота модуляции, кратная 50 Гц) приводит к повышению влияния промышленных помех и не используется.

Измеряемые величины $J'_0(\lambda, t)$, $J'(\lambda, t)$ отличаются от истинных величин $J_0(\lambda, t)$ и $J(\lambda, t)$ на величину потерь в оптическом тракте. Эти потери учитываются частотнозависимыми коэффициентами $K_0(\lambda)$ и $K(\lambda)$:

$$J'_0(\lambda, t) = K_0(\lambda)J_0(\lambda, t), \quad (9)$$

$$J(\lambda, t) = K(\lambda)J(\lambda, t). \quad (10)$$

Поскольку оптический тракт (кроме образца) одинаков при обоих измерениях, можно считать, что

$$K_0(\lambda) = K(\lambda). \quad (11)$$

Таким образом, как следует из формул (1), (6) и (9)–(11), влияние оптического тракта не сказывается на результирующих значениях $R(\lambda)$ и $\beta(\lambda)$. Отметим, что эксперимент подтверждает справедливость сделанных предположений и приближения (7) и (7a).

С помощью фотоприемника поток излучения из выходной щели монохроматора преобразуется в электрический сигнал. На основе линейности используемых фотоприемников можно написать:

$$U_0(\lambda, t) = \alpha(\lambda)J_0(\lambda, t) + U_{\text{const}}, \quad (12)$$

$$U(\lambda, t) = \alpha(\lambda)J(\lambda, t) + U_{\text{const}}. \quad (12a)$$

Здесь $U_0(\lambda, t)$ и $U(\lambda, t)$ — величины электрического сигнала на выходе ФП для 1-го и 2-го положений поворотного рельса ОМС (т. е. сигнал без образца и с образцом); $\alpha(\lambda)$ — частотнозависимый коэффициент преобразования фотоприемником излучения в электрический сигнал; U_{const} — постоянная составляющая, вызванная темновым током. При использовании ФЭУ постоянная составляющая отсутствует.

Используя (8) и (8a), получим (для случая ФЭУ):

$$U_0(\lambda, t) = U_0(\lambda) + U_{m0}(\lambda)\cos\psi_0(\lambda)\sin 2\pi f_m t, \quad (13)$$

$$U(\lambda, t) = U(\lambda) + U_m(\lambda)\cos\psi(\lambda)\sin 2\pi f_m t, \quad (13a)$$

$$U_0(\lambda) = \alpha(\lambda)J'_0(\lambda), \quad (14)$$

$$U(\lambda) = \alpha(\lambda)J'(\lambda), \quad (14a)$$

$$U_{m0}(\lambda) = \alpha(\lambda)J'_{m0}(\lambda), \quad (15)$$

$$U_m(\lambda) = \alpha(\lambda)J'_m(\lambda). \quad (15a)$$

Здесь $U_0(\lambda)$ и $U(\lambda)$ — величины электрического сигнала на выходе ФЭУ, соответствующие потокам излучения на ФЭУ с длиной волны λ без модуляции зеркалом m в 1-м или во 2-м положении ОМС; $U_{m0}(\lambda)$ и $U_m(\lambda)$ — амплитуды модуляционных составляющих сигнала на выходе ФЭУ в этих двух случаях.

Используя эти формулы, легко получить выражения для $J_0(\lambda)$, $\Delta J_0(\lambda)$, $J(\lambda)$, $\Delta J(\lambda)$ через $U_0(\lambda)$, $U_{m0}(\lambda)$, $U(\lambda)$, $U_m(\lambda)$, соответственно. Подставляя их в (1) и (6), получим:

$$R(\lambda) = \frac{U(\lambda)}{U_0(\lambda)}, \quad (16)$$

$$\beta(\lambda) \equiv \frac{1}{\Delta\lambda} \left(\frac{U_m(\lambda)\cos\psi(\lambda)}{U(\lambda)} - \frac{U_{m0}(\lambda)\cos\psi_0(\lambda)}{U_0(\lambda)} \right), \quad (17)$$

где в правой части стоят лишь величины электрических сигналов и $\Delta\lambda$.

Введем обозначения:

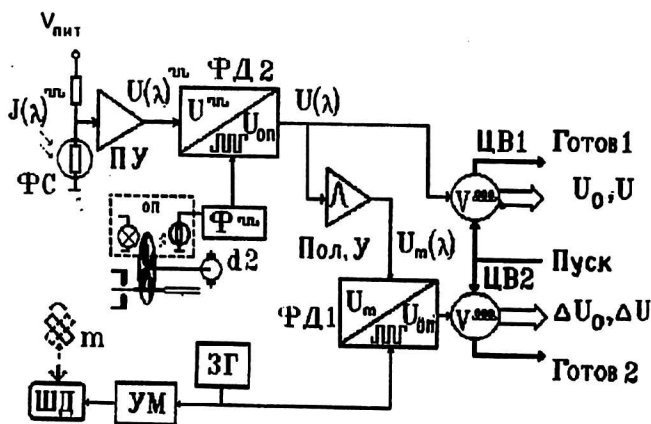
$$\Delta U(\lambda) = U_m(\lambda)\cos\psi(\lambda), \quad (18)$$

Сигнал с ФЭУ, пропорциональный потоку излучения на выходе монохроматора, усиливается предварительным усилителем (ПУ) и подается на вход цифрового вольтметра ЦВ1 (типа Ш-300) и вход полосового усилителя (Пол. У). В качестве последнего используется полосовой усилитель селективного вольтметра UNIPAN-237. Переменное напряжение, пропорциональное модуляционной составляющей потока излучения на выходе монохроматора, с выхода полосового усилителя подается на фазовый детектор (ФД1) – нановольтметр UNIPAN-232. Напряжение на выходе последнего измеряется вторым цифровым вольтметром ЦВ2 (типа Ш-300).

Блок-схема ЭСИ с использованием фотосопротивления приведена на рис. 3. Ее отличает от предыдущей схемы фазовый детектор ФД2, включенный после ПУ. Опорный сигнал с частотой перекрытия потока излучения механическим модулятором поступает на ФД2 с оптоэлектронной пары модулятора, располагаемого перед входной щелью МДР-3. Для уменьшения искажений, вносимых операцией модуляция-демодуляция, частота прерывания потока излучения должна быть в несколько раз выше частоты спектральной модуляции.

Рис. 3. Блок-схема электронной системы измерения с фотосопротивлением ФС:

ФД2 — фазовый детектор; ОП — оптоэлектронная пара; Ф — формирователь опорного напряжения для ФД; $d2$ — двигатель прерывателя света (остальные обозначения см. рис. 2)



Запуск ЦВ1 и ЦВ2 осуществляется по команде с управляющей персональной ЭВМ. Вырабатываемый цифровой код — основа для вычисления $R(\lambda)$ и $\beta(\lambda)$ — является результатом работы ЭСИ и считывается управляющей ЭВМ.

В установке используются следующие приемники оптического излучения: ФЭУ-39 А ($\lambda = 0,2-0,4$ мкм), ФЭУ-38 А ($\lambda = 0,4-0,7$ мкм), ФСВ-19 А ($\lambda = 0,7-2,6$ мкм).

Таким образом, ЭСИ позволяет измерять величины $J_0(\lambda)$, $\Delta J_0(\lambda)$, $J(\lambda)$, $\Delta J(\lambda)$ в диапазоне $0,2-2,6$ мкм.

Блок-схема и функционирование установки

На рис. 4 обозначены следующие основные элементы установки: ЭСИ (для наглядности выделены фотоприемник с блоком питания); $d1$ — двигатель привода поворотного рельса; монохроматор МДР-3; подвижный экран ПЭ; пять датчиков положения поворотного рельса; задающий генератор; усилитель мощности; шаговый двигатель привода модулирующего зеркала m в монохроматоре. Назначение последних трех модулей ясно из предыдущего изложения.

Функционально установка организована с помощью средств системы КАМАК. В кейте (см. рис. 4) установлено два модуля ввода параллельного

цифрового кода ($u1, u2$) для связи с ЭСИ (для управления и ввод кода с цифровых вольтметров типа Ш-300); крейт-контроллер обмена с РС ($u4$); многофункциональный модуль $u3$.

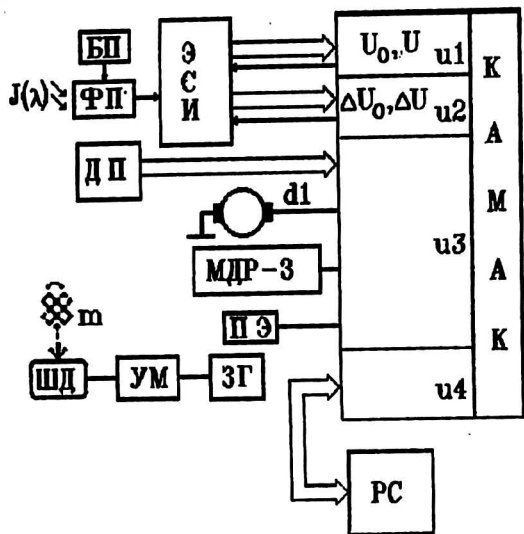


Рис. 4. Электронная блок-схема установки:

ФП — фотоприемник; БП — блок питания фотоприемника; ЭСИ — электронная система измерения (см. рис. 2 и 3); ДП — датчики положения поворотного рельса; $d1$ — двигатель привода поворотного рельса; МДР-3 — монохроматор; ПЭ — подвижный экран; ШД — шаговый двигатель; m — модулирующее зеркало; УМ — усилитель мощности; ЗГ — задающий генератор; РС — персональная ЭВМ; $u1, u2$ — модули КАМАК для связи с ЭСИ; $u3$ — многофункциональный модуль; $u4$ — крейт-контроллер обмена с РС

С помощью $u3$ осуществляются:

считывание состояний датчиков положения рельса — ОП1, ОП2 и К3 (см. рис. 1);

управление двигателем $d1$ и его отключение при срабатывании концевых выключателей $k1$ и $k2$ (см. рис. 1);

считывание состояния концевых выключателей начала и конца рабочего диапазона развертки монохроматора;

выдача напряжения на электромагниты, управляющие подвижным экраном.

Модули $u1, u2$ и $u4$ — стандартные, а $u3$ изготовлен специально.

Цикл автоматической работы установки делится на четыре этапа:

поворотный рельс находится в положении 1, монохроматор сканирует в прямом направлении (рост λ), измеряются $J_0(\lambda)$ и $\Delta J_0(\lambda)$;

поворотный рельс поворачивается в положение 2. Монохроматор ускоренно возвращается в исходное положение (обратный ход развертки). Подвижный экран перекрывает излучение. Измеряются фоновые сигналы $U_{ш0}$ и $\Delta U_{ш0}$;

поворотный рельс находится в положении 2. Монохроматор сканирует в прямом направлении. Измеряются $J(\lambda)$ и $\Delta J(\lambda)$;

поворотный рельс поворачивается в положение 2. Монохроматор ускоренно возвращается в исходное положение (обратный ход развертки). Подвижный экран перекрывает излучение. Измеряются фоновые сигналы $U_{ш}$ и $\Delta U_{ш}$;

поворотный рельс находится в положении 2. Монохроматор сканирует в прямом направлении. Измеряются $J(\lambda)$ и $\Delta J(\lambda)$;

поворотный рельс поворачивается в положение 2. Монохроматор ускоренно возвращается в исходное положение (обратный ход развертки). Подвижный экран перекрывает излучение. Измеряются фоновые сигналы $U_{ш}$ и $\Delta U_{ш}$.

Перед началом измерения управляющая ЭВМ (РС) находится в ждущем режиме. Оператором включается прямой ход развертки. Развертка начинается до рабочего диапазона монохроматора (при выбранной дифракционной решетке). В начале рабочего диапазона срабатывает концевой выключатель, и запускающий сигнал поступает в РС через КАМАК. В моменты времени ($t = n \cdot \Delta t$; $n = 0 - N-1$) от поступления запускающего сигнала РС генерирует команды запуска ЦВ1 и ЦВ2. После преобразования по сигналу "Готов ЦВ1"

и "Готов ЦВ2" коды, соответствующие $U_0(\lambda)$ и $\Delta U_0(\lambda)$, считываются в регистры модулей $u1$ и $u2$ КАМАК, а из них — в РС. Очевидно, что минимальное разрешение по длине волны λ (шаг $\Delta\lambda$) определяется быстродействием цифровых вольтметров Ц-300. Величины N и Δt задаются программно. Если условия эксперимента требуют использования всего рабочего хода развертки, то $T_p = N \Delta t$ (T_p — время прямого рабочего хода монохроматора). По окончании 1-го этапа (рабочего хода) в памяти РС формируются две последовательности из N чисел каждая: $U_0(n)$ и $\Delta U_0(n)$.

После окончания счета подается напряжение на $d1$ и электромагнит ПЭ. Рельс начинает движение в положение 2; подвижной экран перекрывает излучение на входе монохроматора. Монохроматор, дойдя до конца прямого хода, автоматически переключается на ускоренный обратный ход. Установка рельса в положение 2 осуществляется с помощью оптопары ОП-2. Первое перекрытие потока в ОП-2 запускает процедуру точного позиционирования: на $d1$ подаются редкие короткие импульсы, заставляющие рельс двигаться мелкими шагами. Рельс останавливается после появления сигнала в ОП-2.

Во время перехода в положение 2 осуществляется измерение уровня шумов измерительного тракта. M раз подается команда на запуск ЦВ1 и ЦВ2. Усредненный результат M измерений $U_{ш0}$, $\Delta U_{ш0}$ принимается за уровень шума измерительного тракта на 1-м этапе. Разности $U_0(n) - U_{ш0}$ и $\Delta U_0(n) - \Delta U_{ш0}$ используются при вычислении спектров. Этап 2 заканчивается автоматическим переключением монохроматора в режим прямого хода и переводом ПЭ в положение, открывающее входную щель монохроматора. Величина M задается программно ($M \leq 400$).

Этап 3 функционально аналогичен этапу 1. Позиционирование поворотного рельса осуществляется с помощью оптопары ОП-1. Результатом этапа 3 являются две последовательности в памяти РС из N чисел каждая: $U(n)$, $\Delta U(n)$.

Этап 4 аналогичен этапу 2. Результатом является оценка уровня шумов измерительного тракта на этапе 3: $U_{ш}$, $\Delta U_{ш}$.

Для улучшения отношения сигнал/шум установки в целом производится многократное (K раз) повторение рабочего цикла с последующим усреднением по ансамблю реализаций. При этом отношение сигнал/шум улучшается в \sqrt{K} раз. Величина K задается программно.

Как уже отмечалось, в результате измерений получают последовательности значений сигналов (в виде цифровых кодов в памяти РС), связанные с номером запускающей импульса, генерируемого РС. Для перехода от последовательностей $U_0(n)$, $\Delta U_0(n)$, $U(n)$, $\Delta U(n)$ к $U_0(\lambda_n)$, $\Delta U_0(\lambda_n)$, $U(\lambda_n)$, $\Delta U(\lambda_n)$ (где λ_n меняется дискретно, начиная от λ_n — начала рабочего хода развертки монохроматора, с некоторым постоянным шагом $\delta\lambda$) необходимо установить соотношение между двумя номерами n_1 и n_2 и соответствующими им длинами волн λ_1 и λ_2 . Разность $n_1 - n_2$ желательно максимально увеличить. С этой целью используются узкополосные интерференционные фильтры, устанавливаемые перед входной щелью монохроматора. Специальная программа реализует 1-й этап дважды: для фильтра с длиной волны максимума пропускания $\lambda_{\phi 1}$ и фильтра с длиной волны максимума пропускания $\lambda_{\phi 2}$. В результате в памяти РС появляются две последовательности $U_{\phi 1}(n)$ и $U_{\phi 2}(n)$ с максимальными значениями $U_{\phi 1}(n_1)$ и $U_{\phi 2}(n_2)$. Отсюда, учитывая, что скорость развертки по λ монохроматора линейна по времени, определяется величина $\delta\lambda$

$$\delta\lambda = \frac{\lambda_{\phi 2} - \lambda_{\phi 1}}{n_2 - n_1} \quad (21)$$

и длина волны излучения λ_n , соответствующая каждому номеру n ,

$$\lambda_n = \lambda_n + \delta\lambda n. \quad (22)$$

После вычитания уровня шумов и усреднения по реализациям, используя формулы (16) и (20) с учетом (21) и (22), получаем искомые зависимости $R(\lambda)$ и $\beta(\lambda)$ в виде последовательности из N точек $R(\lambda_n)$ и $\beta(\lambda_n)$.

В принципе, нами использовались и другие реперные точки для длин волн λ_1 и λ_2 , например линия He-Ne-лазера. Определение длин волн, соответствующих реперным точкам, производилось по шкале монохроматора с точностью до 1 \AA .

Результаты, спектры $R(\lambda)$ и $\beta(\lambda)$, могут выдаваться либо в виде непрерывных кривых (ЭВМ линейно аппроксимирует промежуточные значения), либо в виде кривых с экспериментальными точками $R(\lambda_n)$ и $\beta(\lambda_n)$ для сравнения с расчетными спектрами.

Примеры модуляционных спектров

В качестве примеров ниже приведены модуляционные спектры пропускания дидимового стекла (эталонный спектр), отражения золота, ниобия. Спектры МДВ этих объектов получены при комнатной температуре.

На рис. 5 приведен спектр пропускания $T(\lambda)$ дидимового стекла в области $5300-10600 \text{ \AA}$, а на рис. 6 — его модуляционный спектр

$$\beta(\lambda) = \frac{1}{T(\lambda)} \frac{dT(\lambda)}{d\lambda}$$

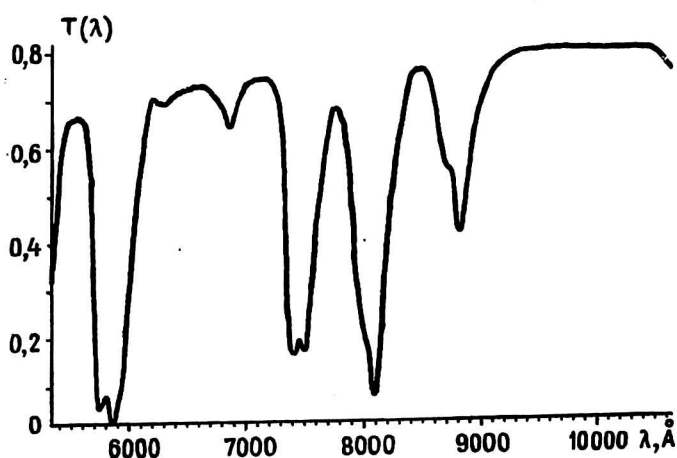


Рис. 5. Спектр пропускания дидимового стекла $T(\lambda)$

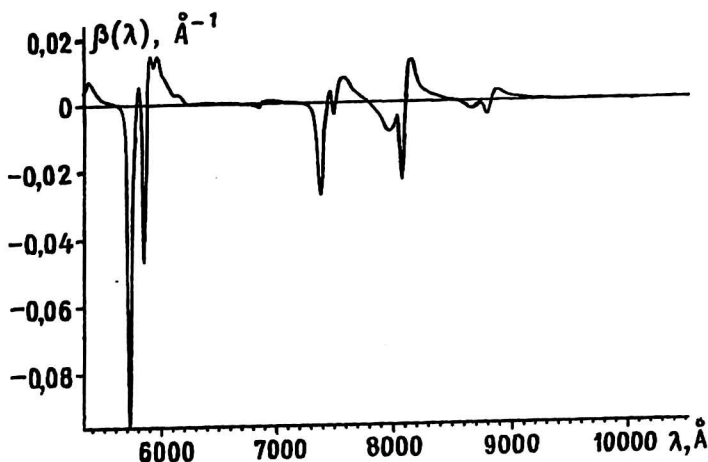
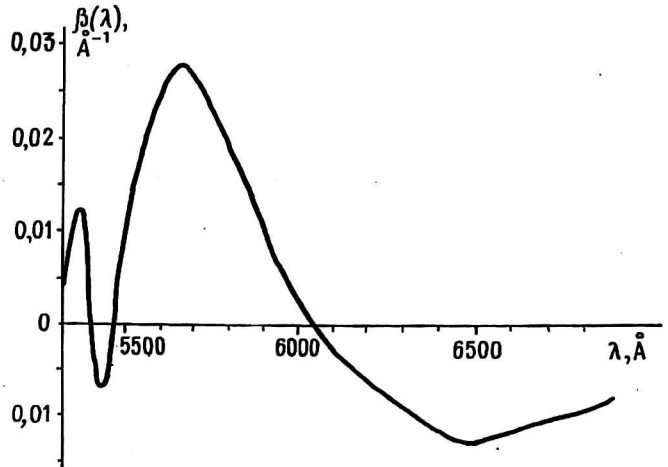


Рис. 6. Модуляционный спектр пропускания $\beta(\lambda) = (1/T)(dT/d\lambda)$ дидимового стекла (T — пропускание)

Эти спектры измерены нами в целях проверки правильности работы установки. Результаты находятся в полном соответствии с известным спектром этого стекла и друг с другом.

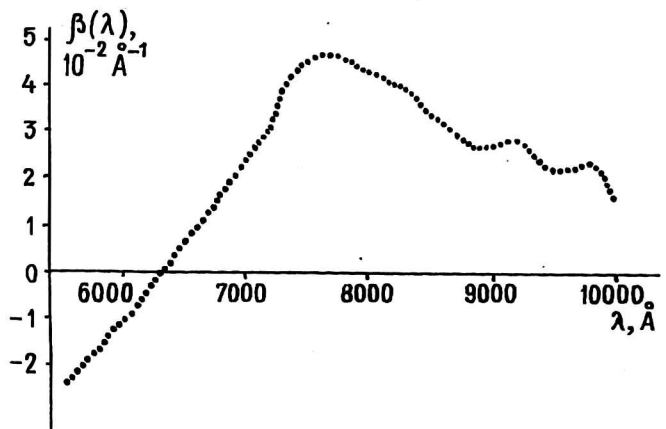
На рис. 7 представлен модуляционный спектр $\beta(\lambda)$ пленки золота толщиной 0,4 мкм, осажденной в вакууме 10^{-6} торр на рубиновую полированную подложку. Результаты хорошо согласуются с литературными данными в этой области спектра.

Рис. 7. Модуляционный спектр отражения $\beta(\lambda) = (1/R) \cdot (dR/d\lambda)$ пленки золота (R — коэффициент отражения)



На рис. 8 приведен спектр $\beta(\lambda)$ ниобия в области 5500—10000 Å. Видна сложная структура спектра, имеющего в этой области несколько полос межзонального поглощения. Образец ниобия представлял собой пленку толщиной 0,4 мкм, осажденную в вакууме 10^{-6} торр на рубиновую подложку. Температура перехода в сверхпроводящее состояние этой пленки составляла $T_c = 9,2$ К. На рис. 8 приведены экспериментальные точки, чтобы показать разрешение. Положения главных особенностей модуляционного спектра $\beta(\omega)$ для ниобия, полученные в настоящей работе, хорошо совпадают с литературными данными, в том числе полученными ранее термомодуляционным методом [4].

Рис. 8. Модуляционный спектр отражения $\beta(\lambda) = (1/R) \cdot (dR/d\lambda)$ пленки ниобия



Заключение

В статье описана автоматизированная комбинированная оптическая установка для получения модуляционных спектров металлов и их соединений. Используемые в данном варианте установки, монохроматор и приемники позволяют получать спектры в области 0,5—6 эВ (0,2—2,6 мкм). Диапазон может быть расширен при замене монохроматора и приемников. Полученные пробные модуляционные спектры Au и Nb согласуются с известными спектрами их коэффициентов отражения.

Литература

1. Головашкин А. И., Шелехов А. Л.: Тр. ФИАН, 1984. С. 151, 137.
2. Головашкин А. И., Шелехов А. Л.// ФТТ. 1982. № 24. С. 3339.
3. Головашкин А. И., Крайская К. В., Шелехов А. Л.//Там же. 1990, № 32. С. 175.
4. Герасимов А. М., Головашкин А. И., Коротков А. П., Шелехов А. Л. КСФ, 1999 (в печати).

Работа поддерживается Научным советом направления "Сверхпроводимость" в рамках РНТП "Актуальные проблемы физики конденсированных сред".

Automatic modulating installation for obtaining of optical spectra

A. I. Golovashkin, G. I. Kuznetsov, A. L. Shelekhov
P. N. Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia

Automatic modulating installation for obtaining of optical spectra of metals and compounds is described. The installation enables to obtain, besides the reflectivity coefficient spectra, the optical thermo-modulation spectra and wave-length modulation ones. Spectral interval, which depends on the used monochromator and detectors, is 0,5–6 eV. The optical and electronic schemes of the installation are given. Some samples of modulation spectra are presented.