

07;12

## Автоматизированная установка для регистрации спектров фотоотражения с использованием двойного монохроматора

© Л.П. Авакянц, П.Ю. Боков, А.В. Червяков

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119992 Москва, Россия  
e-mail: avakants@genphys.phys.msu.ru

(Поступило в Редакцию 3 декабря 2004 г.)

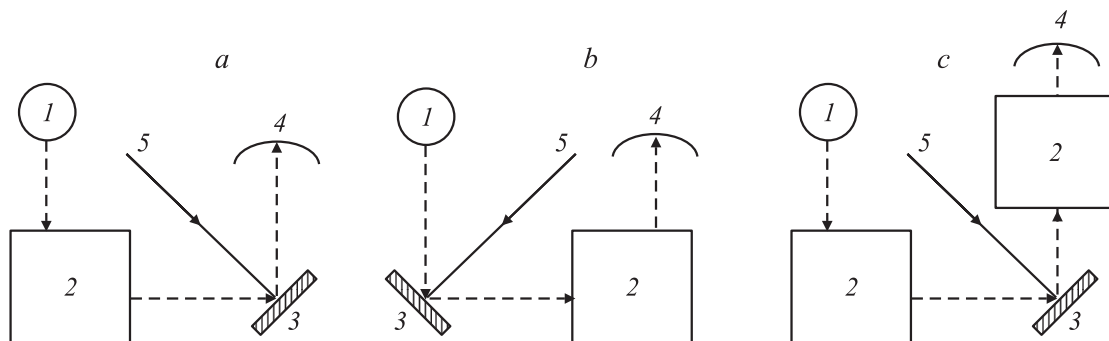
Разработана и создана экспериментальная установка для исследования полупроводниковых структур методом спектроскопии фотоотражения. Предложенная оптическая схема на базе двойного монохроматора позволяет уменьшить неконтролируемый разогрев образца и связанный с фотогенерацией носителей изгиб зон, что дает возможность проводить регистрацию спектров фотоотражения с минимальным воздействием модулирующего и зондирующего излучений на образец. Преимущества экспериментальной установки позволили получить при комнатной температуре спектры фотоотражения в сверхрешетках на основе GaAs/GaAsP и определить энергии межзонных переходов и скачок потенциала в зоне проводимости указанных сверхрешеток.

Методы модуляционной спектроскопии широко используются для исследования таких полупроводниковых структур, как квантовые ямы и сверхрешетки. Наибольшее распространение получили методы фото- и электроотражения [1], основанные на регистрации изменения коэффициента отражения  $R$  исследуемого образца под воздействием электрического поля. В случае фотоотражения (ФО) модуляция  $R$  осуществляется изменением электрического поля в области пространственного заряда при генерации электронно-дырочных пар модулирующим лазерным излучением. Несмотря на то что относительные изменения коэффициента отражения, обусловленные действием модулирующего излучения, малы ( $\Delta R/R \sim 10^{-5}$ ), они могут быть зарегистрированы с помощью техники синхронного детектирования. Преимуществами метода ФО являются бесконтактность и высокая пространственная локальность.

При регистрации спектров ФО возможно два положения монохроматора: до исследуемого объекта (рис. 1, *a*) [2] и после него (рис. 1, *b*) [3]. В первом случае (рис. 1, *a*) излучение спектральной лампы  $I$  (зондирующее излучение — штриховая линия на рисунке) проходит через монохроматор 2, падает на исследуемый

образец и, отразившись от него, попадает на фотоприемник 4 [2]. В ту же область образца направляется модулирующее излучение 5. В такой конфигурации наряду с полезным сигналом ФО на фотоприемник попадает свет, обусловленный рассеянием модулирующего излучения на неоднородностях поверхности образца. В условиях синхронного приема это выводит измерительный канал за пределы динамического диапазона измерений.

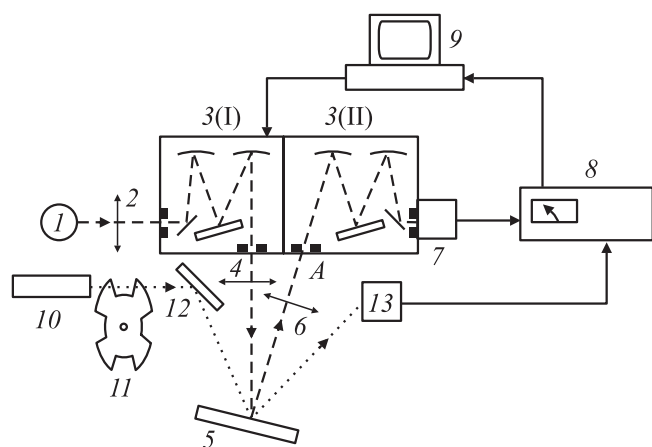
Во втором случае (рис. 1, *b*) [3] весь спектр излучения спектральной лампы  $I$  и модулирующее излучение 5 падают на образец, отражаются от него и поступают на входную щель монохроматора 2. Через монохроматор 2 проходит только зондирующее излучение (штриховая линия на рисунке) и поступает на фотоприемник 4. В этом случае монохроматор отсекает свет, вызванный рассеянием модулирующего излучения на неоднородностях поверхности исследуемой структуры. Однако образец подвергается постоянной засветке всем спектром излучения мощной спектральной лампы, что приводит не только к его локальному разогреву, но и фотовозбуждению носителей и, как следствие, неконтролируемому изгибу зон.



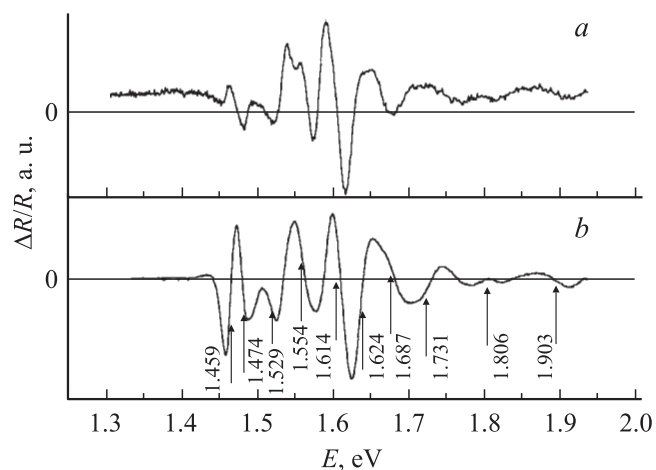
**Рис. 1.** Схемы регистрации спектров ФО с одним (*a, b*) и двумя (*c*) монохроматорами. 1 — спектральная лампа, 2 — монохроматор, 3 — образец, 4 — фотоприемник, 5 — модулирующее излучение.

Для устранения недостатков описанных выше схем мы разработали установку для регистрации спектров ФО на базе двойного монохроматора (рис. 1, *c*). В этом случае свет спектральной лампы *1* проходит через первый монохроматор *2* и попадает на образец *3*. В ту же точку на образец *3* направлено модулирующее излучение. Отраженный от образца свет проходит через второй монохроматор *2* и поступает на фотоприемник *4*. В такой схеме отсутствует разогрев образца, а рассеянное модулирующее излучение подавляется вторым монохроматором *2*. На рис. 2 показана блок-схема экспериментальной установки для регистрации спектров ФО с двойным монохроматором МДР-6 с фокусным расстоянием 30 см и апертурой 1:6. Вместо средней щели во втором плече монохроматора была вмонтирована дополнительная входная щель *A*.

Излучение спектральной лампы *1* (мощностью 30 W) фокусировалось оптической системой *2* на входную щель первого монохроматора *3*(I), проходило через него и оптической системой *4* направлялось на образец *5*. В ту же точку образца падало излучение He-Ne лазера *10*, которое модулировалось механическим прерывателем *11*. Частота модуляции могла изменяться в пределах 50–1500 Hz. Отраженное от образца *5* зондирующее излучение (на рис. 2 штриховая линия) направлялось объективом *6* на входную щель *A* второго монохроматора *3*(II) и с его выхода поступало на малошумящий фотоусилитель *7*. В качестве датчика фотоусилителя применялся кремниевый фотодиод типа ФДК-263, включенный по схеме с нулевым смещением. Амплитудно-частотная характеристика усилителя была оптимизирована для работы в полосе



**Рис. 2.** Блок-схема экспериментальной установки для регистрации спектров ФО. *1* — спектральная лампа, *2* — объектив, *3* — двойной монохроматор МДР-6, *4* — объектив, *5* — образец, *6* — объектив, *7* — фотоприемник с малошумящим усилителем, *8* — селективный нановольтметр Unipan-232B, *9* — компьютер с микропроцессорным модулем сопряжения, *10* — He-Ne лазер, *11* — прерыватель, *12* — поворотное зеркало, *13* — фотоприемник опорного сигнала.



**Рис. 3.** Спектры ФО сверхрешетки GaAs/GaAsP, зарегистрированные с использованием одного монохроматора (*a*) и в схеме с использованием двойного монохроматора (*b*). Стрелками указаны энергии межзонных переходов в сверхрешетке, определенные путем подгонки спектров ФО суммой выражений Аспнеса (1).

частот 50–1500 Hz. Сигнал с усилителя поступал на синхронный детектор *8* селективного нановольтметра Unipan-232B. В качестве опорного напряжения синхронного детектора использовался сигнал с фотодиода *13*, на который поступало отраженное от образца *5* модулирующее излучение от лазера *10* (пунктир на рис. 2). Таким образом, величина напряжения на выходе синхронного детектора *8* была пропорциональна изменению коэффициента отражения *R* образца *5* на частоте модуляции. Апертуры оптических систем *2*, *4* и *6* согласованы с апертурой монохроматора *3*. Управление положением решеток монохроматора *3* и измерение и регистрация сигнала ФО производились с помощью разработанного нами [4] модуля сопряжения на базе микроконтроллера 89c51 фирмы Atmel с персонального компьютера *9* по последовательному интерфейсу RS-232. Спектральная ширина аппаратной функции монохроматора составляла 1 meV. Запись спектров ФО осуществлялась при комнатной температуре.

На рис. 3 приведены спектры ФО сверхрешетки на основе гетеропары GaAs/GaAsP, полученные нами в экспериментах с использованием одинарного монохроматора по схеме рис. 1, *b* (спектр *a*) и двойного монохроматора по схеме рис. 2 (спектр *b*). В спектрах линии с энергией 1.459 и 1.903 eV соответствуют фундаментальным переходам в напряженных слоях GaAs и GaAs<sub>0.6</sub>P<sub>0.4</sub> соответственно. Линии в диапазоне 1.459–1.903 eV связаны с межзонными переходами в сверхрешетке. Из рисунка видно, что спектры ФО различаются не только существенным увеличением соотношения „сигнал/шум“, но и формой, что связано с уменьшением воздействия на образец зондирующего излучения.

Для определения энергий межзонных переходов мы провели подгонку экспериментальных спектров в рамках низкополевой модели Аспнеса [5].

$$\frac{\Delta R}{R}(E) = \operatorname{Re} [A \cdot e^{i\varphi} (E - E_i + \Gamma)^{-m}], \quad (1)$$

где  $A$ ,  $\varphi$  — амплитудный и фазовый параметры;  $E$  — энергия зондирующего излучения;  $E_i$  — положение  $i$ -ой спектральной особенности;  $\Gamma$  — феноменологический параметр уширения;  $m$  — параметр, определяемый видом критической точки и порядком производной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon(E)$  по энергии.

В рассматриваемом случае  $m = 2$  [5]. На рис. 3, *b* рядом со стрелками даны значения энергий межзонных переходов сверхрешетки, рассчитанные из экспериментального спектра. На основании моделирования зонной структуры сверхрешетки GaAs/GaAsP и полученных из спектров ФО экспериментальных данных нами была проведена оценка разрыва зон на гетерогранице, которая составила для рассматриваемого образца  $\Delta E_c / \Delta E_g = 0.15$  [6], где  $\Delta E_g$  — разница ширин запрещенных зон барьера и ямы,  $\Delta E_c$  — разрыв зоны проводимости на гетерогранице.

Таким образом, разработана и создана автоматизированная экспериментальная установка для изучения энергетического спектра полупроводниковых соединений методом спектроскопии фотоотражения. Предложенная схема уменьшает возмущающее воздействие зондирующего излучения на объекты исследования, что дает возможность избежать неконтролируемого разогрева образца и связанного с фотогенерацией носителей изгиба зон. Проведенные на данной установке исследования напряженной сверхрешетки GaAs/GaAsP при комнатной температуре позволили определить энергии межзонных переходов и оценить величину скачка потенциала на гетерогранице.

## Список литературы

- [1] Pollak F.H. // Proc. SPIE. 2000. Vol. 3944. P. 408–422.
- [2] Hughes P.J., Weiss B.L., Hosea T.J.S. // J. Appl. Phys. 1995. Vol. 77. N 12. P. 6472–6480.
- [3] Авакянц Л.П., Боков П.Ю., Казаков И.П. и др. // Вестн. Московского ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2002. Т. 32. № 4. С. 48–50.
- [4] Боков П.Ю., Иванцов А.А., Митин И.В. и др. // Тез. докл. конф. „Современный физический практикум“. СПб., 2002. С. 34.
- [5] Aspnes D.E. // Surf. Sci. 1973. Vol. 37. P. 418–441.
- [6] Авакянц Л.П., Боков П.Ю., Колмакова Т.П. и др. // ФТП. 2004. Т. 38. № 12. С. 1439–1434.