

## ФОТООТРАЖЕНИЕ ОТ КВАНТОВОЙ ЯМЫ GaAs/GaAlAs ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

В.Л.Берковиц, А.О.Гусев, И.В.Кочнев,  
Б.С.Явич

В последнее время для исследования энергетического спектра полупроводниковых квантоворазмерных структур наряду с традиционными оптическими методами (люминесценция, поглощение) широкое применение находят методы модуляционной спектроскопии отражения, главным образом так называемое фотоотражение [1,2]. В основе метода фотоотражения лежит эффект изменения оптических параметров полупроводника электрическим полем (эффект Франца-Келдыша). В отличие от обычного электроотражения в фотоотражении модуляция электрического поля в кристалле осуществляется бесконтактным способом: поле периодически меняется за счет экранирования встроенного барьера носителями, которые создаются сильно поглощаемым лазерным излучением. Фотоотражение дает информацию об энергетическом положении критических точек  $k$ -пространства, а также о величине электрического поля и изгибе зон у поверхности полупроводника и на гетеропереходе [2]. С помощью этого метода можно диагностировать сверхрешетки при комнатной температуре [3], однако до сих пор не сообщалось о получении спектров фотоотражения от структур с одиночной квантовой ямой при комнатных условиях. Это, по-видимому, связано с малой величиной измеряемого сигнала фотоотражения. В данной работе сообщается о реализации именно такого эксперимента.

Исследуемый образец был получен методом МОС-гидридной эпитаксии и представлял собой двойную GaAs/AlGaAs гетероструктуру со ступенчатым изменением состава AlGaAs в барьерных слоях и GaAs активной областью толщиной 100 Å, выращенную на подложке  $i$ -GaAs (100). На рисунке, а приведена энергетическая схема исследуемого образца и показаны толщины и составы слоев, составляющих структуру.

Применялась обычная для фотоотражения экспериментальная схема, описанная в [4]. Мы регистрировали спектры оптического отражения при нормальном падении. В качестве источника излучения использовался монохроматор МДР-23. Модуляция поля осуществлялась с помощью He-Ne лазера (длина волны  $L = 6328$  Å, мощность 3 мВт), излучение которого во избежание прямой засветки ФЭУ было направлено под углом 45° к поверхности структуры. Частота модуляции 600 Гц. Измеряемой величиной являлось отношение  $\delta R/R$ , где  $\delta R$  — изменение в коэффициенте отражения, связанное с модуляцией лазерным излучением;  $R$  — коэффициент отражения.

Спектр фотоотражения вышеописанной структуры приведен на рисунке, б. Из-за малой величины измеряемого сигнала  $\delta R/R$  этот спектр представляет собой усреднение по десяти измерениям. Из спектра вычтен постоянный паразитный сигнал люминесценции, характерной для такой лазерной структуры.

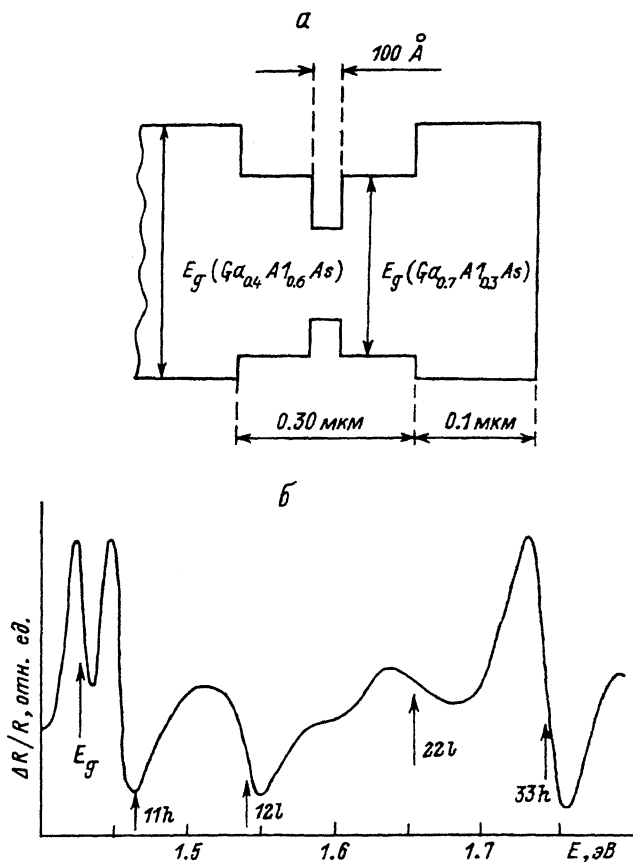


Рис. 1. Энергетическая схема исследуемого образца (а) и спектр фотоотражения от квантовой ямы при комнатной температуре (б).

Стрелками указаны рассчитанные энергии переходов между квантованными уровнями ямы.

Одиночный максимум с энергией 1.42 эВ, очевидно, связан со слабодегированной подложкой. Действительно, область с содержанием Al – 60% прозрачна для лазерного излучения, в области же с содержанием Al – 30% поглощение слабо (для GaAs глубина проникновения света с  $L = 6328 \text{ \AA}$  составляет 0.3 мкм). Этот пик возникает благодаря модуляции энергетического барьера на границе перехода подложка  $\text{Ga}_{0.4}\text{Al}_{0.6}$  (эффект Франца-Келдыша для объемного материала). Появление других особенностей связано с переходами между уровнями в квантовой яме.

Было проведено сравнение энергетического положения этих особенностей с решением уравнения Шредингера для конечной потенциальной ямы. Ширина ямы, эффективные массы носителей считались заданными ( $m_e = 0.067$ ,  $m_h = 0.45$ ,  $m_l = 0.087$ ). Ширина запрещенной зоны  $E_g(\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}) = 1.856 \text{ эВ}$  [5]. Подгоночным параметром являлась величина  $Q_c = \delta E_c / \delta E_g$ , где  $\delta E_c$  – разрыв зон проводимости,  $\delta E_g$  – разность запрещенных зон барьера и ямы. Результаты лучшей подгонки (при  $Q_c = 0.67 \pm 0.03$ ) приведены стрелками на рисунке, б с общепринятыми обозначениями переходов (первая цифра указывает на номер электронного

уровня, вторая — номер дырочного уровня, буква  $l(h)$  — уровень легкой (тяжелой) дырки). Значение параметра  $Q_c$  соответствует литературным данным [6].

Расчетная энергия самого низкоэнергетического перехода  $11h$ , наименее зависящего от параметра  $Q_c$ , оказалась равной 1.464 эВ, что на 8 мэВ больше экспериментального значения; энергия связи экситона в квантовой яме с рассматриваемыми параметрами как раз равна 8 мэВ [7], что говорит о экситонном характере перехода. Об экситонном характере переходов в квантоворазмерных структурах ранее сообщалось в [8]. Энергетическое положение максимума фотолюминесценции от данной структуры [9] совпадает с рассчитанной энергией перехода  $11h$ . При сравнении полученного спектра со спектром поглощения сверхрешетки, составленной из подобных квантовых ям (50 периодов GaAs(100 Å)/Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As(100 Å)) [7], оказалось, что положение особенностей в спектре фотоотражения, за исключением перехода  $33h$ , точно совпадает с максимумами поглощения. Отсутствие пика  $33h$  в спектре поглощения, по-видимому, связано с ограничением области измерения большим коэффициентом поглощения.

### Список литературы

- [1] Glembocki O.J., Shanabrook B.V., Bottka N., Beard W.T. Comas J. // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 46. N 10. P. 970-972.
- [2] Yin X., Pollak F.H. Pawlowicz L., O'Neill N., Hafizi M. // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 56. N 13. P. 1278-1280.
- [3] Shen H., Parayanthal P., Pollak F.H. Smirl A.L., Shulman J.N., D'Haenens I. // Solid State Commun. 1986. V. 59. P. 557-559.
- [4] Bhattacharya R.N. Shen H., Parayanthal P., Pollak F.H., Coutts T., Aharoni H. // Phys. Rev. B. 1988. V. 37. N 8. P. 4044-4050.
- [5] Huang D., Ji G., Reddy U.K., Morcoc H. // J. Appl. Phys. 1988. V. 63. N 11. P. 5447-5453.
- [6] Kroemer H., Wu-Yi Chien, Harris J.S., Edvwall D.D. // Appl. Phys. Lett. 1980. V. 36. N 4. P. 295-297.
- [7] Schmitt-Rink S., Chemla D.S. Miller D.A.B. // Advances in Physics. 1989. V. 38. P. 89-188.
- [8] Theis W.M., Sanders G.D., Leak C.E., Bajaj K.K., Morcoc H. // Phys. Rev. B. 1988. V. 37. N 6. P. 3042-3051.
- [9] Коваленков О.В., Машевский А.Г., Сеницын М.А., Федорова О.М., Явич Б.С., // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. N 3. С. 222-226.

Физико-технический институт  
им.А.Ф.Иоффе РАН  
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию  
10 декабря 1992 г.