

УДК 537.222.22

РАЗМЕРНОЕ КВАНТОВАНИЕ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ GaAs/Al_xGa_{1-x}As ПО ДАННЫМ СПЕКТРОСКОПИИ ФОТООТРАЖЕНИЯ

Л.П. Авакянц, П.Ю. Боков, И.П. Казаков^{*)}, А.В. Червяков

(кафедра общей физики)

E-mail: avakants@genphys.phys.msu.su

Методом спектроскопии фотоотражения (ФО) исследованы эпитаксиальные гетероструктуры GaAs/Al_xGa_{1-x}As с шириной квантовой ямы 10, 20 и 30 нм. При комнатной температуре в спектрах ФО наряду с линиями в области фундаментальных переходов GaAs (1.42 эВ) и Al_xGa_{1-x}As (1.74 эВ) наблюдаются спектральные особенности, связанные с размерным квантованием в яме и расщеплением валентной зоны на подзоны тяжелых и легких дырок. Экспериментально полученные значения энергий уровней хорошо совпадают с теоретически рассчитанными в рамках модели огибающей волновой функции.

Введение

Методы модуляционной спектроскопии широко используются для исследования полупроводниковых структур и поверхности полупроводников [1–3]. Наибольшее распространение получили методы фото- и электроотражения, основанные на регистрации изменения коэффициента отражения R исследуемого образца под воздействием электрического поля. В случае фотоотражения модуляция R осуществляется изменением электрического поля в полупроводнике при генерации электронно-дырочных пар лазерным излучением. Преимуществами этого неразрушающего метода являются бесконтактность и высокая пространственная локальность. В данной работе этот метод используется для изучения эффектов размерного квантования в эпитаксиальных гетероструктурах GaAs/Al_xGa_{1-x}As с различной шириной квантовой ямы (КЯ).

Образцы

Исследуемые образцы были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке «ЦНА-25» в Центре молекулярно-лучевой эпитаксии Физического института им. П.Н. Лебедева РАН. Образцы выращивались на подложках GaAs с ориентацией (001), на которые последовательно наносились полуизолирующие слои: буферный слой GaAs (толщина 320 нм), барьер Al_xGa_{1-x}As (толщина 20 нм), КЯ GaAs (толщина 10, 20 и 30 нм для образцов № 1, 2 и 3 соответственно), барьер Al_xGa_{1-x}As (толщина 30 нм), защитный слой GaAs (толщина 5 нм). Относительная концентрация алюминия в тройном соединении лежала в пределах $x = 20\text{--}0.24$.

Методика эксперимента

Регистрация спектров ФО проводилась на кафедре общей физики физического факультета МГУ

им. М.В. Ломоносова на установке, схема которой приведена на рис. 1. Свет от спектральной лампы 1 мощностью 30 Вт отражался от образца 2 и, пройдя через монохроматор 3 (МДР-6), попадал на фотоприемник 4 (фотодиод ФД-7К), сигнал с которого поступал на синхронный детектор 9 (Unipan В-232). На образец также направлялось излучение He-Ne лазера 5, которое модулировалось механическим прерывателем 6. Часть лазерного излучения от светоделительной пластины 7 поступала на фотоприемник 8 и исполь-

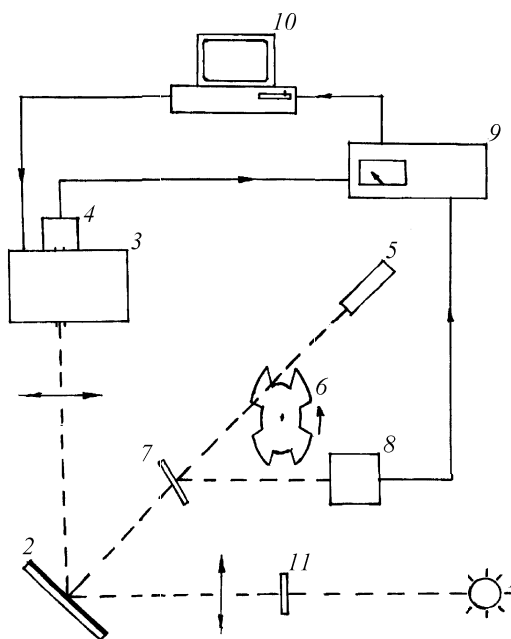


Рис. 1. Схема установки для регистрации спектров ФО: 1 — спектральная лампа, 2 — исследуемый образец, 3 — монохроматор МДР-6, 4 — фотодиод ФД-7К с фотоусилителем, 5 — He-Ne лазер (632.8 нм, 1 мВт), 6 — прерыватель, 7 — светоделительная пластинка, 8 — фотоприемник канала синхронизации, 9 — фазочувствительный нановольтметр Unipan В-232, 10 — блок управления с компьютером, 11 — нейтральный фильтр

^{*)} Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН.

зовалась для формирования опорного напряжения. Таким образом измерялось изменение коэффициента отражения R на частоте модуляции. Спектральная ширина щелей монохроматора составляла 1.0 мэВ. Управление монохроматором и регистрация спектра ФО осуществлялись с помощью микропроцессорного модуля сопряжения, подключенного к персональному компьютеру 10. Измерения проводились при комнатной температуре.

Результаты эксперимента

Полученные спектры фотоотражения образцов №1-3 приведены на рис. 2. В спектрах доминируют линии в областях 1.42 и 1.74 эВ, обусловленные фундаментальными переходами E_{01} GaAs и E_{02} $Al_x Ga_{1-x} As$ соответственно. С использованием полученного значения E_{02} для $Al_x Ga_{1-x} As$ и учетом того, что в тройном соединении E_{02} зависит от концентрации x [4]:

$$E_{02}(300\text{ K}, x) = (1.425 + 1.444x) \text{ эВ},$$

была вычислена мольная доля алюминия. Для образцов №1-2 эта величина составила 0.216 ± 0.004 , для образца №3 — 0.231 ± 0.005 .

dR/R , отн. ед.

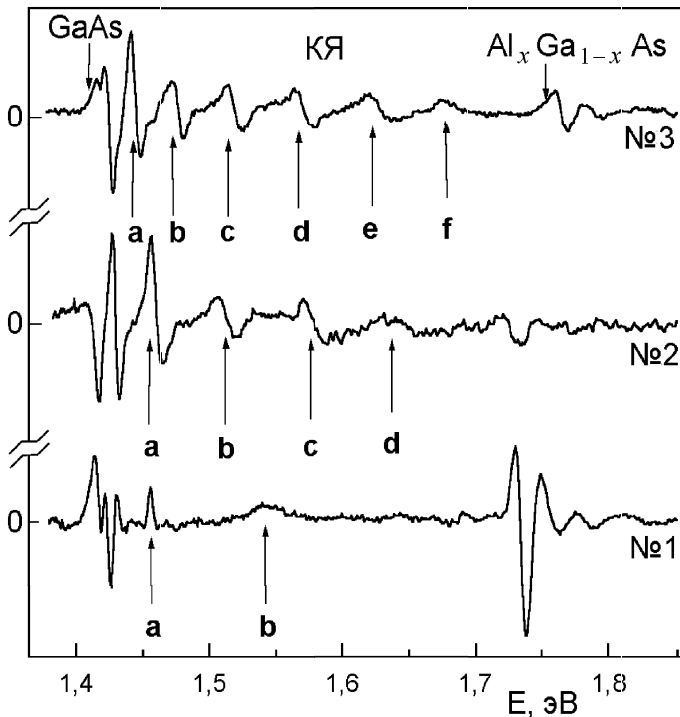


Рис. 2. Спектры фотоотражения образцов №1-3. Буквами a-f обозначены особенности, связанные с эффектами размерного квантования в яме

Из спектров ФО (рис. 2) видно, что по мере увеличения ширины квантовой ямы наблюдается увеличение числа спектральных особенностей в области энергий между 1.42 и 1.74 эВ (обозначены буквами a-f на рис. 2). Это свидетельствует о том, что данные линии возникают вследствие переходов между уровнями валентной зоны E_v и зоны прово-

димости E_c квантовой ямы с учетом расщепления на подзоны тяжелых (hh) и легких (lh) дырок (рис. 3).

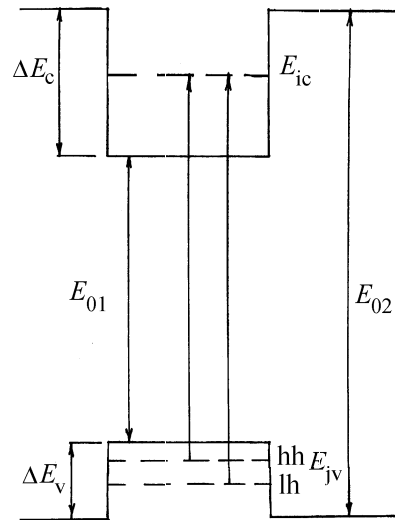


Рис. 3. Схема уровней энергии в квантовой яме: hh — подзона тяжелых дырок; lh — подзона легких дырок; E_{ic} , E_{iv} — уровни размерного квантования в зоне проводимости и в валентной зоне; E_{01} , E_{02} — энергии фундаментальных переходов в яме и барьере; ΔE_c , ΔE_v — разрыв зон в гетеропереходе

Для расчета энергий уровней E_i в КЯ использовался метод огибающей волновой функции [5, 6]. E_i вычислялось из трансцендентного уравнения

$$\sin \left(L_w \sqrt{\frac{m_1^* E_i}{2\hbar^2}} \right) - K \cos \left(L_w \sqrt{\frac{m_1^* E_i}{2\hbar^2}} \right) = 0,$$

где

$$K = \frac{1}{2} \left[\sqrt{\frac{m_1^*(V - E_i)E_i}{m_2^*}} - \sqrt{\frac{m_2^* E_i}{m_1^*(V - E_i)}} \right],$$

здесь m_1^* — эффективная масса в яме GaAs, m_2^* — эффективная масса в барьере $Al_x Ga_{1-x} As$ (значения эффективных масс взяты из [4]), V — глубина КЯ, L_w — ширина КЯ. Значение V в зоне проводимости считалось равным 65% от разницы энергий фундаментальных переходов $E_{02} - E_{01}$ ямы и барьера [6] (см. ΔE_c на рис. 3).

Для определения положения линий в спектре каждая из них аппроксимировалась формулой, соответствующей низкополевой модели Аспнеса [7]:

$$\frac{dR}{R}(E) = \text{Re} [A e^{i\varphi} (E - E_i + \Gamma)^{-m}],$$

где A , φ — амплитудный и фазовый параметры, E — энергия зондирующего излучения, E_i — положение спектральной особенности, Γ — параметр уширения, m — величина, определяемая видом критической точки. Мы использовали значение $m = 2$ [7].

Расчет показывает, что число возможных переходов для ям шириной 10, 20 и 30 нм составляет 12, 33 и 102 соответственно. На спектрах ФО (рис. 2) видно меньшее число линий. По-видимому, это связано не с перекрытием линий вследствие теплового

**Экспериментальные и теоретические значения энергий переходов в области КЯ, эВ.
Погрешность определения экспериментальных значений составляет 5 мэВ**

Спектральные особенности	Образец №1		Образец №2		Образец №3	
	Эксперимент	Теория	Эксперимент	Теория	Эксперимент	Теория
E_{01}	1.410		1.414		1.416	
a	1.452	1.452 (1h1e)	1.454	1.433 (1h1e)	1.440	1.444 (2h2e)
b	1.537	1.529 (2l2e)	1.505	1.486 (4h2e)	1.473	1.472 (3h3e)
c			1.575	1.590 (3h3e)	1.517	1.512 (4h4e)
d			1.649	1.641 (3l3e)	1.570	1.562 (5h5e)
e					1.627	1.622 (6h6e)
f					1.678	1.688 (10h6e)
E_{02}	1.731		1.728		1.760	

уширения и флуктуацией ширины ямы, что делало бы невозможным наблюдение резких спектральных особенностей, а с существованием правил отбора. В работе [8] делается предположение, что наибольшей интенсивностью обладают линии с $\Delta n = 0, 2$ (n — номер уровня в валентной зоне и зоне проводимости). Поэтому из большого количества комбинаций уровней для образцов №2–3 мы выбирали те, для которых $\Delta n = 0, 2$. Кроме того, учитывалось [9], что вероятность переходов из подзоны легких дырок в 2–3 раза меньше вероятности переходов из подзоны тяжелых дырок. Рассчитанные таким образом значения энергий переходов находятся в хорошем согласии с результатами эксперимента (см. таблицу).

Выводы

Особенности в спектрах ФО эпитаксиальных гетероструктур GaAs/Al_xGa_{1-x}As с шириной квантовой ямы 10, 20 и 30 нм связаны с размерным квантованием в яме и расщеплением валентной зоны на подзоны тяжелых и легких дырок. Экспериментально полученные значения энергий уровней могут быть описаны в рамках модели огибающей волновой функции с учетом правил отбора $\Delta n = 0, 2$.

Следует отметить, что метод спектроскопии ФО позволяет наблюдать эффекты размерного кванто-

вания в полупроводниковых гетероструктурах при комнатной температуре.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 01-02-17732).

Литература

1. Pollak F.H. // SPIE Proc. 2000. **3944**. P. 408.
2. Qiang H., Pollak F.H., Huang Y.-S. et al. // SPIE Proc. 1994. **2139**. P. 11.
3. Hughes P. J., Weiss B.L., Hosea T.J.S. // J. Appl. Phys. 1995. **77**, No. 12. P. 6472.
4. Pavesi L., Guzzi M. // J. Appl. Phys. 1994. **75**, No. 10. P. 4779.
5. Варданян Б.Р., Чукичев М.В., Юнович А.Э. и др. // ФТП. 1994. **28**, № 2. С. 259.
6. Oelgart G., Orschel B., Andreani L.C. et al. // Phys. Rev. 1994. **B 49**, No. 15. P. 10456.
7. Aspnes D.E. // Surf. Sci. 1973. **37**. P. 418.
8. Jan G.-J., Hsu K.-T., Tseng P.-K. et al. // SPIE Proc. 1990. **1286**. P. 200.
9. Кузьменко Р., Ганжа А., Домашевская Э.П. и др. // ФТП. 2000. **34**, № 9. С. 1086.

Поступила в редакцию
16.01.02