

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОПЕРЕЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ФОНОНОВ GaAs В ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As СО СПАРЕННЫМИ КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

*А.Г.Милехин, Ю.А.Пусеп, В.В.Преображенский, Б.Р.Семягин,  
Д.И.Лубышев*

*Институт физики полупроводников Сибирского отделения РАН  
630090 Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 9 марта 1994 г.

Экспериментально исследован эффект локализации поперечных оптических фононов в слоях GaAs, разделенных ультра-тонкими барьерами Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As. Показано, что слой AlAs толщиной в 1 монослой является барьером для фононов GaAs, а слой Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As с  $x \leq 0,5$  является проникающим.

Прогресс в полупроводниковой технологии позволил создать периодические структуры с толщинами слоев, сравнимыми с межатомными расстояниями, что дает возможность изучать квантоворазмерные эффекты. При описании колебательного спектра периодических структур GaAs/AlAs с ультратонкими слоями необходимо учитывать эффект локализации оптических фононов. Поскольку дисперсии оптических фононов GaAs и AlAs не перекрываются, то фононы каждого из материалов, составляющих периодическую структуру, оказываются локализованными в соответствующих слоях.

Основные результаты по исследованию локализации оптических фононов были получены методом комбинационного рассеяния света (КРС) [1]. Правила отбора в комбинационном рассеянии для сверхрешеток GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As, выращенных в направлении (100) позволяют наблюдать лишь продольные оптические (LO) колебания. Недавно [2] было показано, что ИК спектроскопия позволяет исследовать эффект локализации как продольных, так и поперечных оптических (TO) фононов. При этом правила отбора для ИК спектроскопии позволяют наблюдать лишь нечетные колебательные моды с волновым числом

$$q_m = \frac{m\pi}{(n + \delta)a}, \quad (1)$$

где  $m$  – номер локализованной моды,  $n$  – число монослоев соответствующего слоя,  $a$  – толщина монослоя. Параметр  $\delta$  характеризует глубину проникновения локализованной моды в соседние слои. Как показано в [3], в сверхрешетках (СР) GaAs/AlAs для локализованных LO мод  $\delta = 1$ . Экспериментально было получено, что в СР GaAs/As<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As при толщине барьера меньше, чем 20 Å, для  $x = 0,4$  и 11 Å для  $x = 1$ , LO фононы GaAs оказываются делокализованными [4,5].

В настоящей работе мы сообщаем об исследовании эффекта локализации поперечных оптических фононов GaAs в периодических структурах GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As со спаренными квантовыми ямами.

Нами было проведено исследование ИК спектров отражения структур со спаренными квантовыми ямами (GaAs)<sub>n</sub>/(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As)<sub>t</sub>/(GaAs)<sub>n</sub>/(AlAs)<sub>m</sub>, где  $m = 10$ ,  $n = 3$ ,  $t = 1$  – числа монослоев в соответствующем слое,  $x = 1; 0,5; 0,3$  –

доля Al в твердом растворе  $Al_xGa_{1-x}As$  (образцы №2, №3, №4, соответственно). Число повторений периода этих структур равно 40. Для определения длины локализации квантованных ТО мод ИК спектры структур со спаренными ямами сравнивались со спектрами сверхрешеток  $(GaAs)_k/(AlAs)_m$ , где  $k = 3; 7$  (образцы №1 и №5, соответственно) и  $m = 10$ . В случае проникающего барьера длины локализации квантованных ТО мод GaAs сверхрешеток  $(GaAs)_7/(AlAs)_{10}$  и структур со спаренными квантовыми ямами должны совпадать.

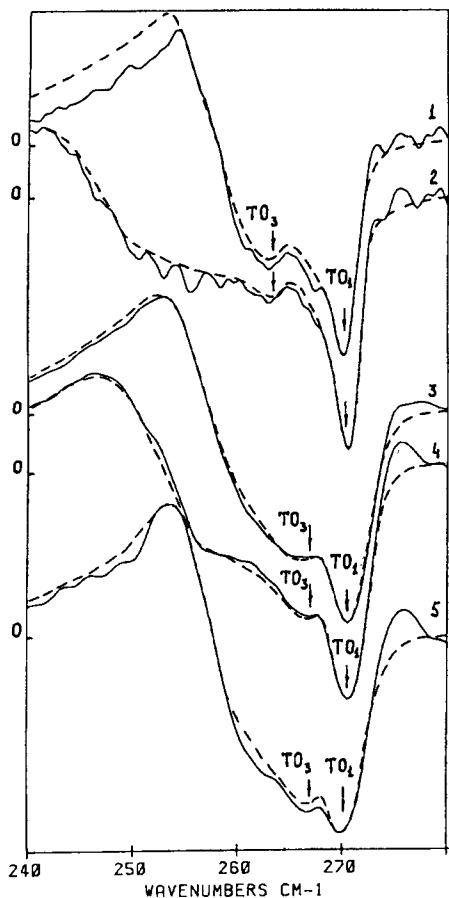
Образцы были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке "Катунь-С" на легированных Si подложках GaAs АГНК-4с ( $n_{Si} = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ), ориентированных в направлении (100). Использование легированных подложек позволило исключить интерференцию в подложке. Толщины слоев СР контролировались методом регистрации осцилляций интенсивности зеркального рефлекса картины дифракции быстрых электронов на отражение.

ИК спектры отражения были записаны на ИК-фурье спектрометре "Bruker" IFS-113V в условиях нормального падения света на образец при температуре 77К. Разрешение составляло  $1 \text{ см}^{-1}$  по всему спектральному диапазону. Для определения частот наблюдаемых колебательных мод с высокой точностью анализировались спектры производной отражения  $dR/d\omega$ .

На рисунке представлены производные экспериментальных ИК спектров отражения исследуемых структур в области частоты ТО фонона GaAs. Особенности в спектрах производной, обозначенные стрелками, соответствуют  $TO_1$  и  $TO_3$  модам, локализованным в слоях GaAs. Плечо, наблюдаемое в спектрах на частотах ниже  $260 \text{ см}^{-1}$ , соответствует низкочастотной плазмон-фононной моде в подложке, положение которой зависит от уровня легирования. Как видно из рисунка (кривые 1 и 2), частоты локализованных ТО мод структур  $(GaAs)_3/(AlAs)_{10}$  и  $(GaAs)_3/(AlAs)_1/(GaAs)_3/(AlAs)_{10}$  совпадают, что свидетельствует о локализации ТО фононов GaAs в слоях GaAs толщиной 3 монослоя. Таким образом, слой AlAs толщиной в 1 монослой является барьером для проникновения ТО колебаний кристаллической решетки GaAs в соседние квантовые ямы.

В случае, если спаренные квантовые ямы разделены слоем твердого раствора  $Al_xGa_{1-x}As$  толщиной в 1 монослой и с  $x \leq 0,5$ , то в спектрах производной отражения СР  $(GaAs)_3/(Al_xGa_{1-x}As)_1/(GaAs)_3/(AlAs)_{10}$  наблюдается высокочастотный сдвиг линии  $TO_3$  моды GaAs (кривая 3 соответствует  $x = 0,5$ , а кривая 4 -  $x = 0,3$ ). Такой сдвиг может быть объяснен увеличением длины локализации соответствующих колебательных мод, когда барьер  $Al_xGa_{1-x}As$  является проникающим для локализованных ТО мод. При этом ТО фононы GaAs оказываются локализованными на суммарной толщине слоя, состоящем из двух квантовых ям, разделенных ультратонким барьером  $Al_xGa_{1-x}As$ . Изменения частоты  $TO_1$  практически не наблюдается вследствие слабой дисперсии ТО фононов GaAs при малых значениях волновых чисел.

Подтверждением проникновения ТО локализованных мод через монослойный барьер твердого раствора является точное совпадение частот локализованных  $TO_i$  мод GaAs периодических структур  $(GaAs)_3/(Al_xGa_{1-x}As)_1/(GaAs)_3/(AlAs)_{10}$  с  $x = 0,3; 0,5$  с частотами  $TO_i$  мод, локализованных в сверхрешетке  $(GaAs)_7/(AlAs)_{10}$  (кривая 5 на рисунке) в слое GaAs толщиной 7 монослоев.



Производная экспериментальных (сплошная линия) и теоретических (пунктирная линия) ИК спектров отражения сверхрешеток. Кривая 1 соответствует спектру СР  $(\text{GaAs})_3/(\text{AlAs})_{10}$ , 2 -  $(\text{GaAs})_3/(\text{AlAs})_1/(\text{GaAs})_3/(\text{AlAs})_{10}$ , 3 -  $(\text{GaAs})_3/(\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As})_1/(\text{GaAs})_3/(\text{AlAs})_{10}$ , 4 -  $(\text{GaAs})_3/(\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As})_1/(\text{GaAs})_3/(\text{AlAs})_{10}$ , 5 -  $(\text{GaAs})_7/(\text{AlAs})_{10}$

Точные значения частот локализованных мод получены из подгонки теоретического спектра к экспериментальному. Теоретические спектральные зависимости были рассчитаны с помощью метода  $E - H$ -матриц для слоистых структур [6]. Предполагалось, что каждый слой является изотропным и может быть описан диэлектрической функцией вида

$$\epsilon_{1(2)} = \epsilon_{001(2)} + \sum_i \frac{\Omega_{pi1(2)}^2}{\omega_{ti1(2)}^2 - \omega^2 + i\omega\gamma_{i1(2)}} \quad (2)$$

где  $\epsilon_{001(2)}$  - высокочастотная диэлектрическая функция,  $\omega_{ti1(2)}$ ,  $\Omega_{pi1(2)}$ ,  $\gamma_{i1(2)}$  - частота  $i$ -ой локализованной ТО моды, плазменная частота и коэффициент затухания  $i$ -ой моды. Индекс 1 соответствует слою GaAs, 2-AlAs. Суммирование выполняется по всем нечетным модам, так как четные моды не обладают дипольным моментом и не вносят вклад в диэлектрическую функцию.

Теоретические спектральные зависимости, при которых наблюдается наилучшее согласие теории и эксперимента, представлены на рисунке пунктирной линией. Параметры, полученные при подгонке, приведены в таблице.

Образец	Подложка		Параметры слоев GaAs					
	$\Omega_p$	$\gamma_p$	$\omega_{t1}$	$\Omega_{p1}$	$\gamma_1$	$\omega_{t3}$	$\Omega_{p3}$	$\gamma_3$
N <sup>o</sup> 1	1380	55	270,5	370	2,5	264,2	260	5,1
N <sup>o</sup> 2	1160	50	270,5	370	2,3	264,5	267	5,6
N <sup>o</sup> 3	1400	55	270,5	373	2,8	267,1	269	5,6
N <sup>o</sup> 4	1290	60	270,5	370	2,8	267,1	269	5,2
N <sup>o</sup> 5	1400	49	270,3	373	2,8	267,1	350	4,2

Примечание. Все величины даны в  $\text{см}^{-1}$ .

Таким образом, в данной работе исследован колебательный спектр структур  $(\text{GaAs})_3/(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As})_1/(\text{GaAs})_3/(\text{AlAs})_{10}$  со спаренными квантовыми ямами в области частот ТО фонона GaAs. Показано, что барьер толщиной в 1 монослой при  $x = 1$  приводит к локализации ТО фононов GaAs в спаренных квантовых ямах GaAs, а барьер с содержанием Al  $x \leq 0,5$  является проникающим.

1. M.Cardona, Light Scattering in Solids V, Heidelberg: Springer-Verlag, 1989.
2. Yu.Pusep, A.Milekhin, A.Toropov, Superlattices and Microstructures **13**, 115 (1993).
3. B.Jusserand, D.Paquet, Phys. Rev. Lett. **56**, 1752 (1986).
4. D.-S.Kim, A.Bouchalkha, J.M.Jacob et al., Phys. Rev. Lett. **68**, 1002 (1992).
5. A.Ishibashi, M.Itabashi, Y.Mori et al., Phys. Rev. **B33**, 2887 (1986).
6. B.Heinz, Optische Konstanten von Halbleiter- Mehrschicht-systemen, Doctor Dissertation, R.-W.T.H., Aachen, 1991.