

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОНИКНОВЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ, ЛОКАЛИЗОВАННЫХ В СЛОЯХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР GaAs/AlAs В БАРЬЕР ПО СПЕКТРАМ ОТРАЖЕНИЯ

Ю.А.Пусен, А.Г.Милехин, Н.Т.Мошегов, В.В.Тихомиров,
А.И.Торопов

*Институт физики полупроводников СО АН СССР
630090, Новосибирск*

Поступила в редакцию 28 мая 1991 г.

По спектрам отражения исследованы оптические колебательные моды, локализованные в слоях GaAs периодических структур $(\text{GaAs})_n(\text{AlAs})_m$. Представлены спектры, свидетельствующие о частичном проникновении фононов GaAs в соседние слои AlAs. В рамках модели линейной цепочки определена глубина проникновения.

Изучение энергетического спектра фононов, локализованных в тонких слоях, позволяет получить информацию о дисперсии колебательного спектра исследуемых кристаллов. Из-за разности частот оптических фононов GaAs и AlAs оптические колебания в периодических структурах $(\text{GaAs})_n(\text{AlAs})_m$ (здесь n , m - число монослоев GaAs и AlAs соответственно) локализируются в обоих слоях. При этом слои AlAs играют роль барьера для фононов GaAs и наоборот. В ¹ нами были обнаружены особенности спектров отражения, обусловленные прямым взаимодействием света с колебательными модами, локализованными в слоях сверхрешеток $(\text{GaAs})_n(\text{AlAs})_m$. В этом случае, в отличие от комбинационного рассеяния света, взаимодействие света с фононами является процессом первого порядка, что существенно упрощает интерпретацию экспериментальных результатов.

Одной из проблем описания колебательных свойств периодических структур является влияние границ раздела между слоями. В случае фононных мод, локализованных в слоях, эта проблема заключается в определении глубины проникновения данной моды в соседний слой. Как было установлено в ряде теоретических работ (см. например ^{2,3}) для периодических структур $(\text{GaAs})_n(\text{AlAs})_m$ глубина проникновения составляет величину порядка расстояния между атомными плоскостями. Проникновение локализованных колебаний в соседние слои наблюдалось при исследовании комбинационного рассеяния света в сверхрешетках с ультратонкими толщинами слоев - от 1 до 6 монослоев ⁴.

В настоящей работе представлены спектры отражения оптических колебательных мод, локализованных в слоях GaAs периодических структур $(\text{GaAs})_n(\text{AlAs})_m$, свидетельствующие о частичном проникновении этих мод в соседние слои AlAs.

Исследовались периодические структуры $(\text{GaAs})_n(\text{AlAs})_m$ выращенные методом МЛЭ на подложках GaAs, ориентированных в направлении [001], с числом повторений 50. Спектры отражения записывались в области поперечных оптических колебаний GaAs при температуре жидкого гелия с помощью фурье-спектрометра "Bruker IFS-113V"; в качестве фотоприемника использовался охлаждаемый гелием германиевый болометр. Отражение измерялось под углом близким к нормальному. Как было показано в ¹ частотам локализованных TO -фононов соответствуют минимумы производной

отражения $dR/d\nu$, амплитуды которых монотонно уменьшаются с ростом порядка моды. Это уменьшение амплитуд обусловлено уменьшением некомпенсированной части дипольного момента. Вследствие проникновения локализованных фононов в барьер появляется добавка, увеличивающая дипольный момент локализованной моды; очевидно, дипольный момент старших мод должен при этом измениться сильнее. В исследованных нами структурах был обнаружен рост амплитуд минимумов $dR/d\nu$, соответствующих TO -колебательным модам, локализованным в слоях GaAs, обусловленный изменением их дипольного момента в результате проникновения в барьер.

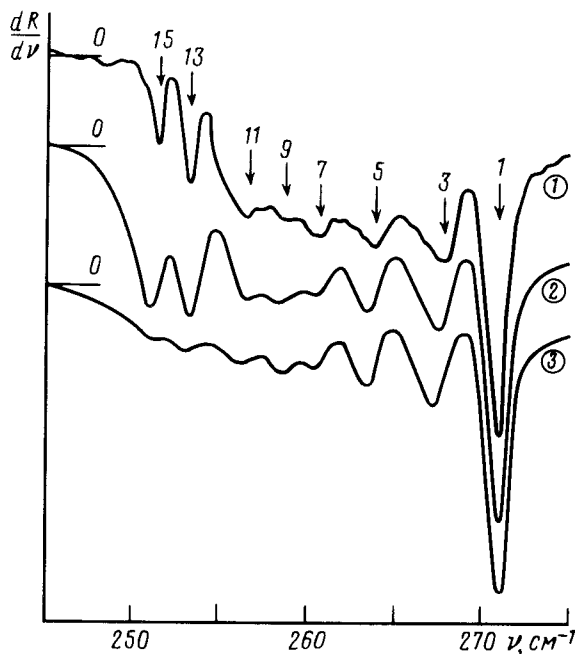


Рис. 1. Спектры производной $dR/d\nu$ периодической структуры $(GaAs)_{17}(AlAs)_{17}$: 1 - эксперимент, $T = 4,2$ К; 2 - расчет согласно формулы (2) с параметрами локализованных мод, приведенными в таблице; 3 - расчет с коэффициентами A_j , определенными в отсутствие проникновения ($\delta = 0$); все остальные параметры идентичны использованным при расчете спектра 2

Спектр производной отражения периодической структуры $(GaAs)_{17}(AlAs)_{17}$ приведен на рис.1. Амплитуды первых пяти локализованных TO -мод монотонно уменьшаются с ростом порядка моды, в то время как интенсивность последних мод - возрастает. Спектр отражения периодической структуры в области фононных возбуждений можно вычислить с помощью диэлектрической функции:

$$\epsilon_{s1}(\omega) = (\epsilon_1 d_1 - \epsilon_2 d_2) / (d_1 - d_2), \quad (1)$$

где d_1 , d_2 - толщины слоев, а ϵ_1 , ϵ_2 - диэлектрические функции соответствующих слоев. Эффекты локализации фононов, распространяющихся в направлении, перпендикулярном слоям, приводят к образованию стоячих волн, период которых определяется толщиной слоя, а частота - дисперсией фононов в объемном кристалле. Диэлектрическая функция слоя с учетом локализации фононов в нем определяется суммой вкладов от каждой локализованной моды согласно соотношению:

$$\epsilon_{1,2}(\omega) = \epsilon_{\infty 1,2} \left[1 + \sum_j A_j (\omega_{Lj}^2 - \omega_{Tj}^2) / (\omega_{Tj}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_j) \right], \quad (2)$$

где $\epsilon_{\infty 1,2}$ - высокочастотные диэлектрические проницаемости соответствующих слоев; ω_{Lj} , ω_{Tj} - частоты продольных и поперечных оптических колебаний, характеризующие j -ую локализованную моду, а γ_j - ее затухание; A_j - силы осцилляторов, характеризующие взаимодействие моды со светом, которые определяются ее дипольным моментом.

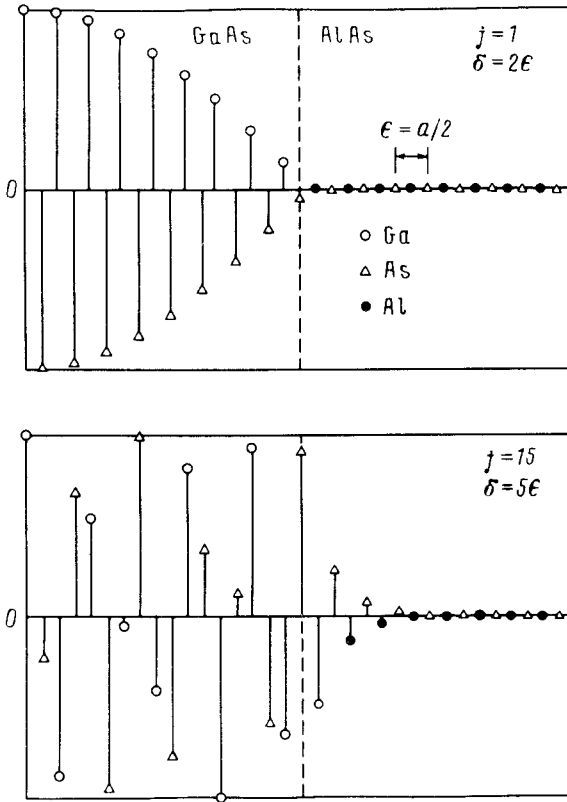


Рис. 2. Собственные смещения атомов в слоях GaAs и AlAs периодической структуры $(\text{GaAs})_{17}(\text{AlAs})_{17}$; начало координат выбрано в середине слоя GaAs, штриховая линия соответствует границе между слоями, $a = 5,6 \text{ \AA}$

Силы осцилляторов локализованных TO -мод были рассчитаны нами в приближении модели линейной цепочки⁵. На рис.2 показаны собственные смещения атомов в слоях структуры $(\text{GaAs})_{17}(\text{AlAs})_{17}$ для первой и пятнадцатой мод. Спектр производной отражения, рассчитанный с учетом вычисленных сил осцилляторов локализованных мод, приведен на рис.1 (кривая 2). Параметры локализованных мод, обеспечивающие наилучшее согласие теории с экспериментом представлены в таблице. Как видно из таблицы наблюдается рост глубины проникновения $\delta = 2\pi/\text{Im}q$ (где $\text{Im}q$ - мнимая часть волнового числа, характеризующая затухание моды в барьере) для последних локализованных мод. Этот факт обусловлен близостью частот акустических колебаний AlAs к частотам оптических колебаний GaAs в области волновых чисел вблизи края зоны Бриллюэна. Величины глубин проникновения, приведенные в таблице хорошо соответствуют рассчитанным в² значениям $\text{Im}q$

для фононов GaAs в слоях AlAs сверхрешеток $(\text{GaAs})_n(\text{AlAs})_m$. В таблице приведены также силы осцилляторов локализованных мод, рассчитанные в отсутствие проникновения ($\delta = 0$). Спектр производной отражения для этого случая характеризуется монотонным убыванием амплитуд минимумов локализованных мод (кривая 3 на рис.1).

Параметры локализованных оптических колебаний периодической структуры
 $(\text{GaAs})_{17}(\text{AlAs})_{17}$

j	1	3	5	7	9	11	13	15
ω_{Lj}	294	292	287	282	277	272	262	262
ω_{Tj}	271	268	264	261	259	256,6	253,8	251,5
γ_j	1,7	3	3	3	3	3	2,5	2,5
A_j	0,449	0,153	0,090	0,063	0,045	0,036	0,089	0,073
δ_j	2	2	2	2	2	3	5	6
$A_j(\delta = 0)$	0,49	0,16	0,097	0,068	0,052	0,041	0,033	0,027

Частоты ω и параметры затухания γ приведены в см^{-1} , δ - в единицах монослоев ϵ

На основании результатов, приведенных в работе можно сделать вывод, что оптические колебания, локализованные в слоях GaAs периодических структур $(\text{GaAs})_n(\text{AlAs})_m$ частично проникают в соседние слои AlAs; причем глубина проникновения растет для мод с волновыми числами, близкими к краю Бриллюэна.

Благодарим Батыева Э.Г. и Миронова Ф.С. за полезные обсуждения.

Литература

1. Пусеп Ю.А., Милехин А.Г., Синюков М.П., Торопов А.И., Плуг К. Письма в ЖЭТФ, 1985, 31, 2080.
2. Colvard G., Gant T.A., Klein M.V. et al. Phys. Rev. B, 1985, 31, 2080.
3. Cardona M. Light Scattering in Solids V, by M.Cardona, G.Güntherodt, Springer-Verlag, Heidelberg, 1989.
4. Ishibashi A., Itabashi M., Mori Y. et al. Phys. Rev. B, 33, 2887.
5. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников, М.: Наука, 1978, с.615.