

одной из задач настоящей работы. Сравнение полученных в настоящей работе значений упругих констант на частотах МБР ($\approx 10^{10}$ Hz) с ультразвуковыми данными ^[6,7] (частоты обычно составляют $10^5 - 10^7$ Hz) в пределах погрешностей не позволяет сделать однозначный вывод о наличии дисперсии скоростей звука в данном соединении, по крайней мере для комнатной температуры (см. таблицу).

В заключение авторы выражают благодарность В.В. Еременко за интерес к работе и полезное обсуждение результатов.

Список литературы

- [1] Ray S., Zalkin A., Templeton D.H. Acta Cryst. **B29**, 2741 (1973).
- [2] Фабелинский И.Л. Молекулярное рассеяние света. М. (1965). 512 с.
- [3] Федоров Ф.И. Теория упругих волн в кристаллах. М. (1965). 386 с.
- [4] Vacher R., Boyer L. Phys. Rev. **B6**, 2, 639 (1972).
- [5] Parker P.M., Mayer W.G. Acta Cryst. **15**, 4, 334 (1962).
- [6] Галкин А.А., Кожухарь А.Ю., Цинцадзе Г.А. ЖЭТФ **70**, 1, 248 (1976).
- [7] Васюков В.Н., Лукин С.Н., Цинцадзе Г.А. ЖЭТФ **77**, 4(10), 1544 (1979).

Физика твердого тела, том 38, № 5, 1996
Solid State Physics, vol. 38, N 5, 1996

ИК ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР GaAs/AlAs С ДВОЙНЫМИ КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

© А.Г.Милехин, Ю.А.Пусеп, Ю.А.Яновский, И.И.Марахова

Институт физики и полупроводников Сибирского отделения
Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия
(Поступило в Редакцию 3 ноября 1995 г.)

Показано, что ИК Фурье-спектроскопия может быть успешно применена для изучения упорядочения атомов на гетерограницах полупроводниковых сверхрешеток. Исследованы ИК-спектры отражения периодических гетероструктур GaAs/AlAs с двойными квантовыми ямами. Анализ частот локализованных оптических колебательных мод позволил установить различие прямой и обратной гетерограниц. В рамках модели двухатомной линейной цепочки был рассчитан реальный профиль гетероструктур.

Экспериментально и теоретически колебательный спектр сверхрешеток (СР) GaAs/AlAs изучен достаточно подробно ^[1-5]. Известно, что продольные (LO) и поперечные (TO) оптические фононы GaAs и AlAs в СР GaAs/AlAs локализованы в соответствующих слоях, поскольку объемные дисперсии оптических фононов этих двух материалов не пересекаются во всем частотном интервале. Как следствие колебательный спектр СР представляет собой набор локализованных колебательных мод, число которых зависит от числа полудлин волн фонона, приходящихся на расстояние, равное толщине слоя. Было найдено хорошее согласие значений частот, полученных экспериментально и рассчитанных в рамках различных моделей ^[6-8].

Вместе с тем недавно ^[9,10] было обнаружено различие между экспериментальными и рассчитанными частотами локализованных мод в

ультратонких СРС толщиной слоев 1–4 монослоя, что было объяснено увеличением толщины слоя вследствие размытости гетерограниц. Более того, как было показано в [11], частоты продольных оптических колебательных мод оказываются чувствительными к устройству прямой (AlAs на GaAs) и обратной (GaAs на AlAs) гетерограниц.

В настоящей работе представлено исследование ИК-спектров отражения периодических структур GaAs/AlAs со спаренными квантовыми ямами, разделенными ультратонким барьером, в области частот оптических фононов GaAs.

Исследуемыми образцами были периодические структуры с периодами $(\text{GaAs})_2(\text{AlAs})_1(\text{GaAs})_4(\text{AlAs})_4$ и $(\text{GaAs})_4(\text{AlAs})_1(\text{GaAs})_2(\text{AlAs})_4$ с числом повторений 50. Такой выбор периода структуры позволяет наблюдать разницу между прямой и обратной границами роста СР. Действительно, в случае одинаково устроенных гетерограниц колебательные спектры структур будут идентичны. Если же эти границы разные, то ИК-спектры таких СР будут отличаться.

СР были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на легированных подложках GaAs, ориентированных в направлении (100), с концентрацией примеси $(\text{Si}) 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Легирование использовалось для того, чтобы исключить интерференцию на всей толщине образца и вклад подложки в ИК-спектры. Образцы были продублированы для проверки воспроизводимости результатов.

Спектры отражения записывались при температуре $T = 79 \text{ K}$ на ИК Фурье-спектрометре BRUKER IFS-113v в дальней ИК-области спектра ($700\text{--}100 \text{ cm}^{-1}$) с разрешением 0.5 cm^{-1} по всему спектральному диапазону. Угол падения излучения на образец составлял 70° . Измерения были выполнены в *p*-поляризованном свете. Согласно правилам отбора, ИК-излучение может взаимодействовать лишь с нечетными локализованными модами, дипольный момент которых отличен от нуля. Поэтому в ИК-спектрах отражения ожидалось проявление лишь нечетных локализованных колебательных мод.

Экспериментальные спектры отражения, измеренные в области частот LO-фононов GaAs, представлены на рис. 1. Особенности в спектрах, указанные стрелками, соответствуют старшим локализованным модам продольных оптических (LO) колебаний GaAs. Из рис. 1 видно, что частоты колебательных мод для двух типов СР отличаются, что свидетельствует о различии прямой и обратной гетерограниц. Структуры, выращенные для проверки полученных данных, показывают хорошую воспроизводимость результатов.

Для анализа полученных спектров гетероструктур использовалась модель двухатомной линейной цепочки в приближении «дефекта масс», описывающая оптические колебания в СР [10]. Каждый атом в этой цепочке представляет собой целый монослой атомов, которые колеблются как единое целое. В случае перемешивания атомов на границе раздела в СР масса атомов в плоскости может быть представлена следующим образом: $m = Ax + B(1 - x)$, где A и B — массы атомов, а x — содержание материала A в одном монослое СР. С помощью этой модели можно рассчитать частоты локализованных мод в структуре с любым профилем состава.

В случае резких гетерограниц, когда нет перемешивания атомов на гетерограницах, были рассчитаны частоты для исследуемых СР (I на рис. 1). Эти частоты одинаковы для двух типов структур, поскольку

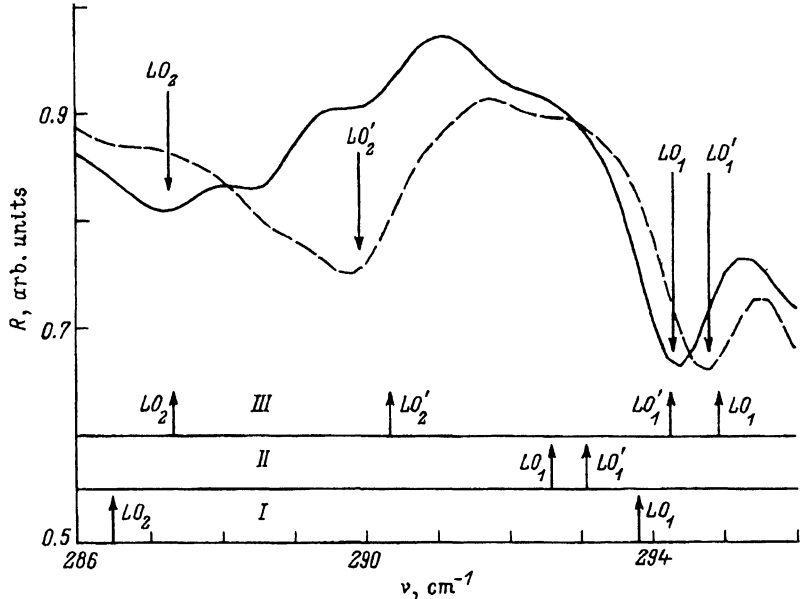


Рис. 1. Экспериментальные спектры ИК-отражения структур, записанные в р-поляризованном свете.

Сплошная линия — $(\text{GaAs})_2/(\text{AlAs})_1/(\text{GaAs})_4/(\text{AlAs})_4$, штриховая — $(\text{GaAs})_4/(\text{AlAs})_1/(\text{GaAs})_2/(\text{AlAs})_4$. Особенности, отмеченные стрелками, соответствуют рассчитанным частотам колебательных мод: I — для случая идеальной гетерограницы, II — согласно сегрегационной модели, III — полученные из наилучшей подгонки экспериментальных и рассчитанных частот колебательных мод.

профили этих структур зеркально-симметричны. Экспериментальные же спектры отличаются друг от друга, что исключает подобную симметрию. В качестве модели, описывающей устройство гетерограницы, была выбрана модель, учитывающая сегрегацию атомов на гетерограницах [12]. В рамках этой модели был построен профиль концентрации Ga и рассчитаны частоты локализованных мод двух типов CP (II на рис. 1). Как видно из этого рисунка, рассчитанные частоты существенно отличаются от экспериментальных данных. Таким образом, применение только модели сегрегации для описания ИК-спектров CP не дает удовлетворительных результатов. Возможной причиной такого рассогласования может служить взаимодиффузия атомов на гетерограницах, величина которой зависит от условий роста (скорости и температуры роста, времени выглаживания выращенного слоя и т.д.). Хорошее согласие экспериментальных и рассчитанных частот локализованных мод было получено при варьировании профиля концентрации Ga. Профили концентрации Ga, наилучшим образом описывающие экспериментальные частоты локализованных мод для двух структур, представлены на рис. 2, а и 3, а. Из этих рисунков видно, что для обоих образцов прямая гетерограница более резкая, чем обратная.

Следует отметить, что наилучшее согласие экспериментальных и рассчитанных частот достигается при рассмотрении в расчетах первой и второй локализованных мод (III на рис. 1), в то время как правила отбора для ИК-спектров CP с резкими гетерограницами разрешают наблюдение только нечетных мод. Для выяснения этого факта были

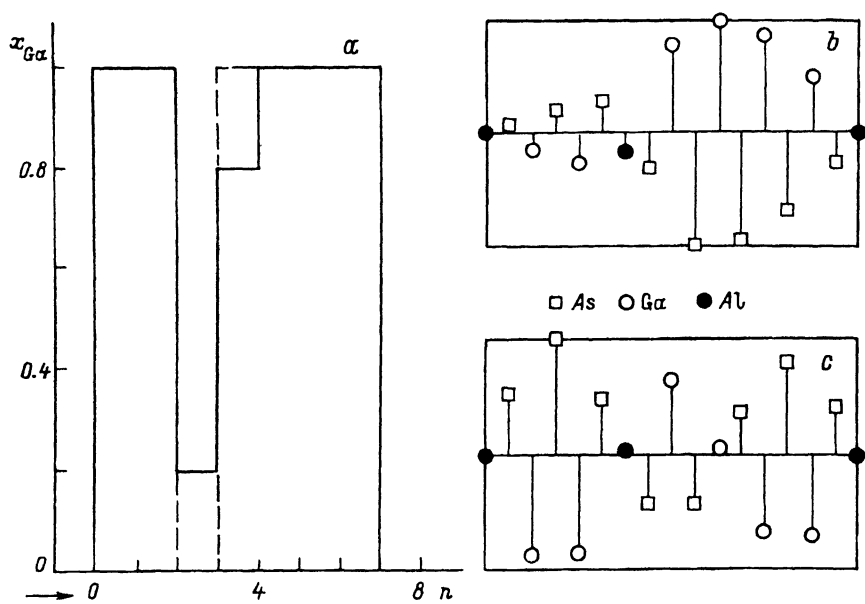


Рис. 2. Профиль концентрации Ga для структуры $(GaAs)_2/(AlAs)_1/(GaAs)_4/(AlAs)_4$ (a) и собственные смещения атомов для первой (b) и второй (c) колебательных мод.

n — число монослоев.

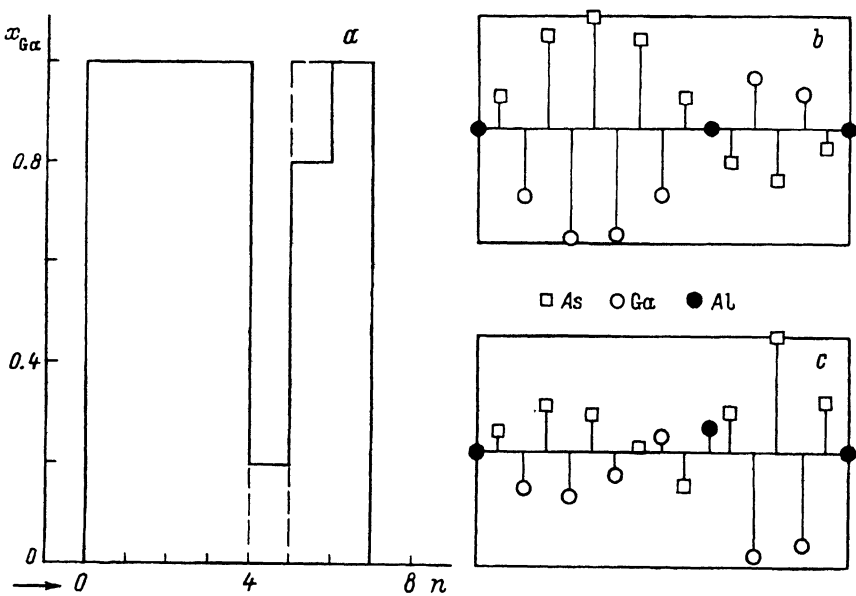


Рис. 3. Профиль концентрации Ga для структуры $(GaAs)_4/(AlAs)_1/(GaAs)_2/(AlAs)_4$ (a) и собственные смещения атомов для первой (b) и второй (c) колебательных мод.

n — число монослоев.

рассчитаны смещения атомов в исследуемых структурах для первой и второй локализованных мод (рис. 2, *b*, *c* и 3, *b*, *c*). На рисунках амплитуды условно показаны отрезками выше оси. Из рисунка видно, что суммарный дипольный момент для второй моды не равен нулю: следовательно, вторая мода может быть активна в ИК-спектрах.

Таким образом, в работе исследовались ИК-спектры зеркально-симметричных периодических структур GaAs/AlAs. Показано, что прямая и обратная гетерограницы отличаются; причем прямая гетерограница является более резкой, чем обратная. Установлено, что модель сегрегации не полностью описывает упорядочение атомов на гетерограницах GaAs/AlAs. В рамках модели двухатомной линейной цепочки в приближении «дефекта масс» был рассчитан реальный профиль гетероструктур с асимметричными квантовыми ямами. Рассчитаны смещения атомов в гетероструктурах и показано, что для случая структур со спаренными квантовыми ямами, разделенными ультратонким барьером, возможно наблюдение в ИК-спектрах отражения как четных, так и запрещенных в ИК-спектрах нечетных локализованных колебательных мод вследствие ненулевого дипольного момента этих мод.

Список литературы

- [1] Jusserand B., Cardona M. *Light Scattering in Solids* / Ed. M. Cardona, G. Guntherodt. Springer-Verlag (1989).
- [2] Klein M.V. *IEEE J. Quant. Electron.* QE-22, 9, 1760 (1986).
- [3] Пусеп Ю.А., Милехин А.Г., Синюков М.П., Плуг К., Торопов А.И. *Письма в ЖЭТФ* **52**, 9, 1068 (1990).
- [4] Pusep Yu.A., Milekhin A.G., Toropov A.I. *Superlatt. Microstruc.* **13**, 115 (1993).
- [5] Милехин А.Г., Пусеп Ю.А., Преображенский В.В., Семягин Б.Р., Лубышев Д.И. *Письма в ЖЭТФ* **59**, 7, 471 (1994).
- [6] Baroni S., Giannozzi P., Molinari E. *Phys. Rev.* **B41**, 3870 (1990).
- [7] Spitzer J., Gregora I., Ruf T., Cardona M., Ploog K. *Solid State Commun.* **84**, 275 (1992).
- [8] Ishibashi A., Itabashi M., Mori Y., Kaneko K., Kawaso S., Watanabe N. *Phys. Rev.* **B33**, 2887 (1986).
- [9] Wang Z.P., Han H.X., Li G.H., Jiang D.S., Ploog K. *Phys. Rev.* **B43**, 12650 (1991).
- [10] Samson B., Dumelow T., Hamilton A.A., Parker T.J., Smith S.R., Tilley D.R., Foxon C.T., Hilton D., Moore K.J. *Phys. Rev.* **B46**, 2375 (1992).
- [11] Jusserand B., Mollot F., Moison J.M., Roux G.L. *Appl. Phys. Lett.* **57**, 56 (1990).
- [12] Moison J.M., Guille C., Houzay F., Barthe F., Van Rompay M. *Phys. Rev.* **B40**, 6149 (1989).