

ЛОКАЛИЗОВАННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ФОНОНЫ В СЛОЯХ AlAs СВЕРХРЕШЕТОК GaAs/AlAs

В.А.Гайслер, Д.А.Тэнне¹⁾, Н.Т.Мошегов, А.И.Торопов, И.И.Мараховка,
А.П.Шебанин

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

Поступила в редакцию 5 января 1995 г.

Методом комбинационного рассеяния света исследован фоновый спектр совершенных сверхрешеток GaAs/AlAs в области частот AlAs . В спектрах разрешены пики, соответствующие локализованным в слоях AlAs продольным оптическим фононам с порядком квантования 1–5. Полученные экспериментальные данные подтверждают результаты микроскопического расчета дисперсии LO -фононов объемного AlAs .

Локализованные оптические фононы в полупроводниковых сверхрешетках проявляются в спектрах комбинационного рассеяния света (КРС) в виде ряда пиков, частоты которых соответствуют частотам оптических фононов объемного материала при значениях волнового вектора

$$q = \frac{m\pi}{(n + \delta)a_0}, \quad m = 1, 2, 3... \quad (1)$$

где a_0 – толщина монослоя, n – число монослоев соответствующего материала, δ – параметр, описывающий проникновение фонона в соседние слои другого материала [1,2]. Таким образом, данные КРС о частотах локализованных оптических фононов позволяют определять дисперсию оптических фононов объемных материалов, образующих сверхрешетки. Эта возможность представляется весьма значимой для AlAs , поскольку из-за нестабильности этого материала затруднено его исследование методом рассеяния холодных нейтронов.

К настоящему времени опубликовано много работ, в которых исследованы оптические фононы, локализованные в слоях GaAs [1,2]. Экспериментальные значения их частот хорошо соответствуют имеющимся теоретическим дисперсионным зависимостям объемного GaAs [3]. В работе [4] сообщается о наблюдении методом ИК спектроскопии в сверхрешетках GaAs/AlAs локализованных TO -фононов AlAs , частоты которых также хорошо соответствуют теоретической дисперсии объемного AlAs [3]. Однако экспериментальные данные о LO -фононах, локализованных в слоях AlAs [5-7], очень немногочисленны и противоречивы. Целью данной работы является детальное исследование эффектов локализации LO -фононов в слоях AlAs методом КРС и анализ дисперсии LO -фононов в AlAs .

Характерный спектр КРС сверхрешеток GaAs/AlAs в области частот AlAs представлен на рис.1а. Он содержит пики LO - и TO -фононов, а также широкую спектральную особенность, обусловленную интерфейсными фононами. В спектрах КРС идеальной сверхрешетки, выращенной в направлении (001), должны присутствовать только пики LO -фононов. В реальных сверхрешетках

¹⁾ e-mail: tenne@ispht.nsk.su

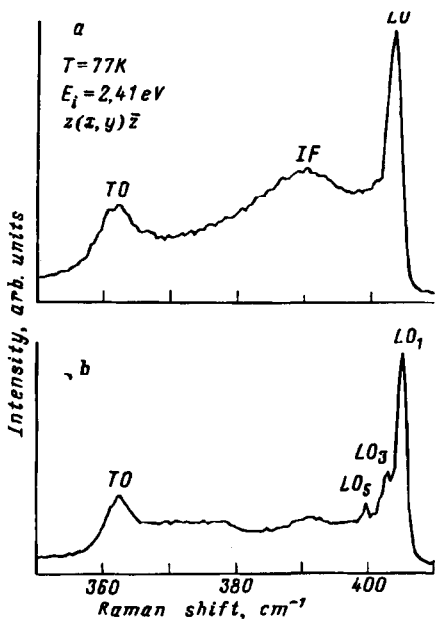


Рис.1

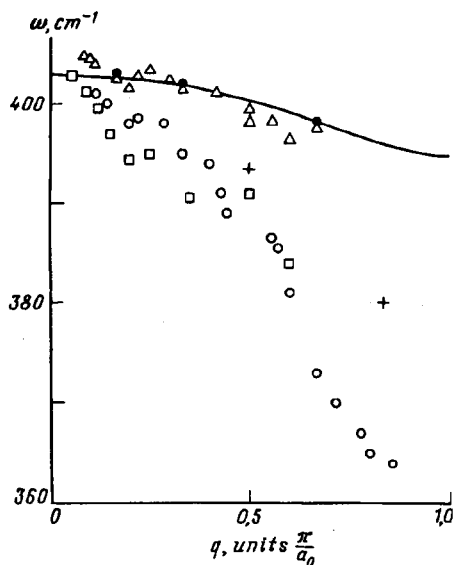


Рис.2

Рис.1. Спектры КРС в области частот AlAs: *a* – сверхрешетки $(\text{GaAs})_7(\text{AlAs})_7$ с шероховатыми гетерограницами, *b* – сверхрешетки $(\text{GaAs})_9(\text{AlAs})_9$ с более резкими гетерограницами

Рис.2. Дисперсия LO-фононов объемного AlAs: Δ – данные настоящей работы, \bullet – данные работы [5], \circ , \square – данные работ [6] и [7] соответственно, $+$ – расчетные значения частот локализованных AlAs LO-фононов в сверхрешетке $(\text{GaAs})_5(\text{AlAs})_5$. Сплошная линия – результат микроскопического расчета [3]

с шероховатыми гетерограницами за счет нарушения закона сохранения волнового вектора в спектре проявляются интерфейсные фононы, что существенно затрудняет наблюдение или осложняет правильную интерпретацию пиков локализованных оптических фононов. Кроме того, разупорядоченность гетерограниц приводит к заметному изменению частот локализованных LO-фононов [8], и, очевидно, в этом случае экспериментальные значения частот локализованных оптических фононов нельзя использовать для построения дисперсии объемного материала.

Для проведения экспериментов нами были отобраны наиболее совершенные образцы сверхрешеток GaAs/AlAs. Критерием выбора являлось отсутствие интерфейсной особенности в спектрах КРС (как в GaAs, так и в AlAs области), что позволило спектрально разрешить пики локализованных LO-фононов AlAs (рис.1б).

Нами исследованы следующие образцы, отвечающие сформулированному критерию совершенства гетерограниц: $(\text{GaAs})_{12}(\text{AlAs})_{12}$, $(\text{GaAs})_{10}(\text{AlAs})_{10}$, $(\text{GaAs})_9(\text{AlAs})_9$, $(\text{GaAs})_{12}(\text{AlAs})_6$, $(\text{GaAs})_9(\text{AlAs})_5$. Все образцы были выращены в ИФП СО РАН методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs с ориентацией (001). Толщина каждого слоя контролировалась в процессе роста путем регистрации осцилляций интенсивности зеркального рефлекса при дифракции быстрых электронов на отражение. Спектры КРС записывались на

спектрометре Jobin Yvon U1000 при возбуждении светом аргонового лазера с длиной волны 514,5 нм при температуре 77 К в геометриях $z(x, y)\bar{z}$ и $z(x, x)\bar{z}$ (ось z параллельна направлению роста сверхрешетки (001), оси x и y – направлениям (100) и (010), соответственно). Во всех перечисленных образцах в геометрии $z(x, y)\bar{z}$ спектрально разрешались локализованные в слоях AlAs фононы LO_1 , LO_3 , LO_5 (спектр всех сверхрешеток подобен изображенному на рис.1б). Кроме того, в параллельной геометрии $z(x, x)\bar{z}$ наблюдались пики четных локализованных фононов LO_2 , а для образца $(\text{GaAs})_{12}(\text{AlAs})_6$ – и LO_4 .

Полученные данные позволяют построить дисперсию LO -фононов объемного AlAs. Для этого экспериментальному значению частоты локализованного фонона LO_m сопоставляется значение волнового вектора, определяемое соотношением (1). Из анализа комплексной дисперсионной зависимости GaAs [9] следует, что на частотах AlAs LO -фононов ($\sim 400 \text{ см}^{-1}$) $(\text{Im}(k))^{-1} < 1 \text{ \AA}$ ($\text{Im}(k)$ – мнимая часть волнового вектора, описывающая затухание AlAs фононов в слоях GaAs). В связи с этим мы полагаем в соотношении (1) $\delta = 0$. (При рассмотрении проникновения GaAs LO -фонона в слой AlAs $(\text{Im}(k))^{-1} \approx 3 \text{ \AA}$, соответственно параметр δ обычно принимается равным одному монослою).

Построенная на основании полученных нами данных дисперсия LO -фононов объемного AlAs представлена на рис.2 (треугольники). На этом же рисунке представлены экспериментальные данные работы [5] и работ [6,7]. Сплошной линией показан результат микроскопического расчета дисперсии LO -фононов AlAs, проведенного из первых принципов [3]. Наши данные, существенно отличаясь от данных работ [6,7], хорошо согласуются как с данными [5], так и с теоретической дисперсионной зависимостью. Небольшое отклонение экспериментальных точек от теоретической дисперсии может быть обусловлено неидеальностью сверхрешеток, что, как уже отмечалось [8], приводит к уменьшению частоты локализованных LO -фононов в AlAs. Для иллюстрации этого факта на рис.2 крестами отмечены расчетные значения частот локализованных AlAs LO -фононов в сверхрешетке $(\text{GaAs})_5(\text{AlAs})_5$, в которой по 2 монослоя на каждой гетерогранице представляют собой твердый раствор $\text{Ga}_{0,5}\text{Al}_{0,5}\text{As}$ [8]. Как видно из рис.2, эти значения приближаются к данным работ [6,7].

В настоящей работе исследовался также спектр AlAs фононов в ряде сверхрешеток $(\text{GaAs})_s(\text{AlAs})_n$, где $n = 3, 2, 1, 0,5$ монослоя, и твердого раствора $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$, $x \sim 0,01$. Эти спектры позволяют проследить эволюцию локализованного в слое AlAs LO -фонона в локальный фонон атома Al в GaAs. Спектры КРС этих образцов приведены на рис.3. Как видно из рисунка, в сверхрешетках, где толщина слоев AlAs составляет 3 и 2 монослоя, частота LO -фонона находится в пределах частотного диапазона LO -фононов AlAs, то есть в этих сверхрешетках фонон еще может рассматриваться как локализованный фонон в слое AlAs. (Однако данные о его частоте в этих сверхрешетках не могут быть использованы для построения дисперсии объемного AlAs, так как роль разупорядоченности гетерограниц в сверхрешетках со сверхтонкими слоями очень значительна). По мере уменьшения толщины слоев AlAs частота LO -фонона уменьшается и приближается к частоте локального фонона атома Al в GaAs, наблюдавшегося нами в спектре твердого раствора с малой концентрацией Al (около 1%).

Таким образом, в данной работе представлены экспериментальные результаты исследования методом КРС спектра локализованных LO -фононов в слоях AlAs сверхрешеток GaAs/AlAs, подтверждающие микроскопический расчет

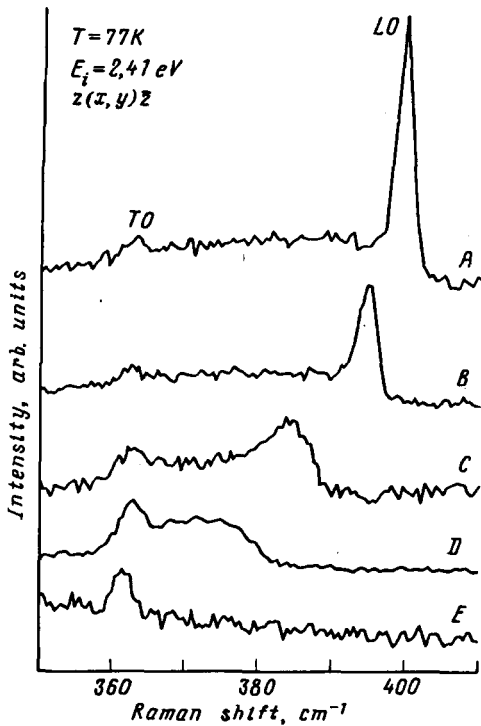


Рис.3. Спектры КРС образцов сверхрешетки $(\text{GaAs})_s(\text{AlAs})_n$, $n = 3, 2, 1, 0,5$ монослоя (A, B, C, D, соответственно); спектр твердого раствора $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$, $x \approx 0,01$ (E)

дисперсии AlAs LO-фононов, проведенный из первых принципов. Также проведено исследование спектра AlAs фононов в сверхрешетках со сверхтонкими слоями AlAs, что позволило пронаблюдать эволюцию локализованного фонона в слоях AlAs в локальное колебание атома Al в GaAs.

Работа выполнена при поддержке Международного научного фонда (грант NQR000).

1. B.Jusserand and M.Cardona, In: *Light Scattering in Solids V*, Ed. by M.Cardona and G.Guntherodt (Springer, Heidelberg, 1989), p.49.
2. M.Cardona, *Superlatt. and Microstr.* **5**, 27 (1989).
3. S.Baroni, P.Giannozzi, and E.Molinari, *Phys. Rev.* **B41**, 3870 (1990).
4. Ю.А.Пусеп, А.Г.Милехин, М.П.Синюков и др., *Письма в ЖЭТФ* **52**, 1068 (1990).
5. D.J.Mowbray, M.Cardona, and K.Ploog, *Phys. Rev.* **B43**, 1598 (1991).
6. Z.P.Wang, D.S.Jiang, and K.Ploog, *Solid State Commun.* **65**, 661 (1988).
7. Yu.A.Pusep, A.G.Milekhin, N.T.Moshegov et al, *J.Phys.Condens. Matter* **6**, 93 (1994).
8. E.Molinari, S.Baroni, P.Giannozzi, and S.de Gironcoli, *Phys. Rev.* **B41**, 3870 (1990).
9. C.Colvard, T.A.Gant, M.V.Klein et al, *Phys. Rev.* **B31**, 2080 (1985).