

РЕЗОНАНСНОЕ ПРОНИКНОВЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ МОД В УЛЬТРАТОНКИХ СВЕРХРЕШЕТКАХ (GaAs)_n(Al_{0,5}Ga_{0,5}As)_n

Ю.А.Пусен

Институт физики полупроводников СО РАН
630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 30 ноября 1993 г.

Взаимодействие оптических колебательных мод, локализованных в слоях сверхрешеток (GaAs)_n(Al_{0,5}Ga_{0,5}As)_n исследовалось с помощью инфракрасной (ИК) фурье-спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС). Впервые было обнаружено резонансное проникновение в барьер поперечных оптических квантованных колебательных мод.

Из-за большой разности между массами катионов оптические частоты в GaAs и AlAs расположены в различных частотных диапазонах. Вследствие этого оптические колебания в сверхрешетках GaAs/AlAs оказываются локализованными в соответствующих слоях; при этом слои AlAs играют роль барьеров для колебаний GaAs и, наоборот, слои GaAs ограничивают колебания AlAs.

Колебательные спектры твердых растворов Al_xGa_{1-x}As характеризуются двухмодовым поведением [1]: одна мода с частотами, близкими к частотам AlAs, называется AlAs-подобной модой (AlAs-like), другая - GaAs-подобная мода (GaAs-like) - расположена вблизи оптических частот GaAs. В результате, дисперсионные кривые оптических колебаний в соседних слоях сверхрешеток GaAs/Al_xGa_{1-x}As могут перекрываться. Как следствие этого, колебательные моды, локализованные в слоях GaAs и Al_xGa_{1-x}As, частоты которых совпадают, становятся *делокализованными*. Очевидно, что такие "проникающие" оптические моды не могут взаимодействовать со светом из-за большой величины их эффективного волнового числа и поэтому не могут быть обнаружены в оптических спектрах (ИК или КРС).

Для исследования различного поведения оптических колебательных мод в сверхрешетках GaAs/Al_xGa_{1-x}As мы использовали ИК фурье-спектроскопию. В этом случае, из-за небольшой дисперсии поперечных оптических (ТО) фононов, активных в ИК спектрах, по сравнению с дисперсией продольных оптических (ЛО) фононов, активных в КРС, резонансные условия между квантованными модами в различных слоях могут быть достигнуты проще.

Для исследования эффекта резонансного проникновения оптических колебательных мод мы измеряли спектры отражения сверхрешеток (GaAs)_n(Al_{0,5}Ga_{0,5}As)_n, где *n* - число монослоев в слоях сверхрешетки, в частотном диапазоне ТО фононов GaAs при комнатной температуре, при которой резонансные условия между модами, локализованными в различных слоях, могут быть легче удовлетворены.

Спектры отражения записывались с помощью фурье-спектрометра "Bomen DA8" со спектральным разрешением 1см⁻¹. Для точного определения частот квантованных мод анализировались спектры первой производной отражения по методике, опубликованной в [2]. При этом величины частот оптических

квантованных мод определялись подгонкой рассчитанных спектров производной отражения к экспериментальным. Теоретические спектры отражения вычислялись согласно методике, представленной в [3].

В данной работе исследовались сверхрешетки $(\text{GaAs})_n(\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As})_n$ с ультратонкими слоями, выращенные с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии на (100) подложках из GaAs. В целях получения хорошо разделенных энергетически квантованных мод в одном слое мы использовали сверхрешетки с $n = 4$ и $n = 6$. Общая толщина исследованных сверхрешеток составила 8960 \AA (400 повторений) и 6720 \AA (200 повторений) соответственно для образцов с $n = 4$ и $n = 6$, что позволяло наблюдать значительное отражение, обусловленное оптическими колебательными модами, локализованными в слоях.

Спектр оптических мод исследованных сверхрешеток в области колебаний GaAs приведен на рис.1. Значения частот GaAs и $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$ вблизи Γ -точки зоны Бриллюэна были взяты из [1]; дисперсии TO и LO фононов GaAs и AlAs были взяты соответственно из [2] и [4]. Дисперсионные зависимости GaAs-like колебаний в $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$ были получены путем переноса дисперсий оптических колебаний GaAs на величины, соответствующие центрально-симметричным оптическим фононам в $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$ [1]. Для определения величин эффективных волновых чисел квантованных мод (q_m) мы использовали соотношение [5]

$$q_m = 2\pi m / (n + 1) a_{01,2},$$

где m – номер квантованной моды, $a_{01,2}$ – постоянные решетки для GaAs и $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$ соответственно.

Как следует из рис.1, в сверхрешетках с $n = 4$ все восемь оптических квантованных мод (четыре LO и четыре TO) оказываются хорошо энергетически разделены и должны наблюдаться в спектрах (ИК или КРС), в то время как в случае с $n = 6$ все моды локализованы, за исключением двух: TO_3 мода в слое GaAs перекрывается с TO_1 GaAs-like модой в слое $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$ (показано штриховой линией на рис.1), формируя одну "проникающую" моду. Таким образом, эти две квантованные моды не могут быть обнаружены в экспериментальных спектрах.

Для подтверждения локализованного характера LO колебаний, которого следует ожидать, следуя рис.1, было измерено КРС LO фононами GaAs. Спектры КРС, обусловленные рассеянием всех LO мод, локализованных в слоях GaAs, изображены на рис.2. КРС в области оптических колебаний $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$ не наблюдалось вследствие слабой интенсивности.

Спектры производной отражения двух образцов с $n = 4$ и $n = 6$, записанные в области TO колебаний GaAs, представлены на рис.3. Две спектральные линии наблюдались в образце с $n = 4$: интенсивный дублет вблизи 265 см^{-1} , обусловленный TO_1 GaAs-like модой и TO_1 GaAs модой, локализованными соответственно в слоях $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$ и GaAs. TO колебания подложки также дают свой вклад на частоте 267 см^{-1} , однако интенсивность отражения от подложки была сравнительно мала из-за большой толщины сверхрешетки. Вторая линия, наблюдаемая вблизи 255 см^{-1} , обусловлена TO_3 GaAs-like квантованной модой (локализованной в слоях $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$) и, возможно, TO_3 GaAs модой (локализованной в слоях GaAs). Интенсивность этой линии не была достаточна для уверенного определения частот TO_3 GaAs и GaAs-like колебательных мод.

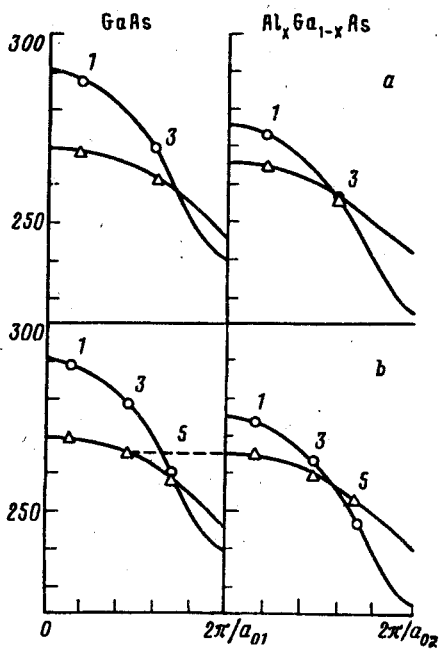


Рис.1

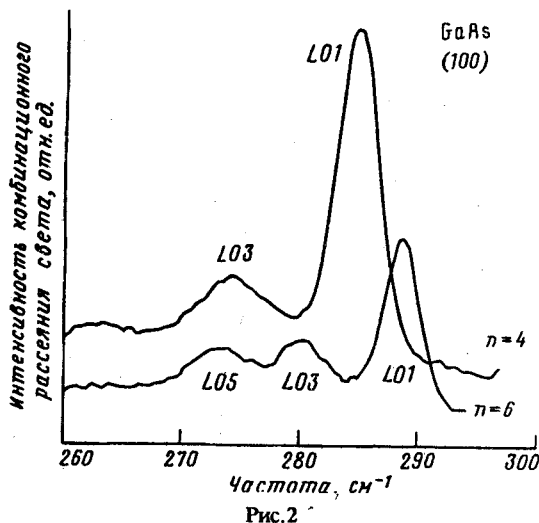


Рис.2

Рис.1. Спектр активных в ИК оптических колебательных мод сверхрешеток $(\text{GaAs})_n(\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As})_n$ с $n = 4$ (а) и $n = 6$ (б). Кружки соответствуют LO модам, а треугольники – TO модам

Рис.2. Интенсивность комбинационного рассеяния света (I_{KPC}) в диапазоне LO колебаний GaAs сверхрешеток $(\text{GaAs})_n(\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As})_n$

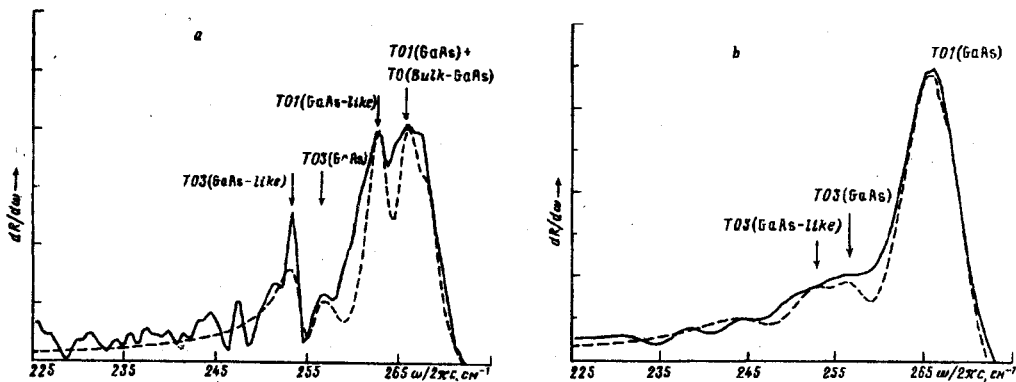


Рис.3. Спектр производной отражения в диапазоне TO колебаний GaAs сверхрешеток $(\text{GaAs})_n(\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As})_n$: а) $n = 4$, б) $n = 6$

В спектре производной отражения образца с $n = 6$ была обнаружена только одна интенсивная линия на частоте 266 см^{-1} , обусловленная фундаментальной GaAs модой TO_1 . В согласии с рис.1 в этом случае квантованные моды TO_1 GaAs-like и TO_3 GaAs перекрываются, формируя единственную "проникающую" моду, которая неактивна в ИК спектрах. Небольшое "плечо", наблюда-

емое с низкочастотной стороны TO_1 линии (рис.3) указывает на возможный вклад TO_3 GaAs и TO_1 GaAs-like мод, которые частично перекрываются и поэтому их "локализованная часть" может взаимодействовать со светом.

Таким образом, исследование оптических колебательных мод в сверхрешетках $(GaAs)_n(Al_{0,5}Ga_{0,5}As)_n$ показало, что перекрытие дисперсий поперечных оптических фононов в GaAs и $Al_{0,5}Ga_{0,5}As$ приводит к появлению новых "проникающих" мод, которые не взаимодействуют со светом вследствие их большого эффективного волнового числа. Этот эффект является причиной исчезновения из оптических спектров квантованных мод с одинаковыми частотами, локализованными в соседних слоях.

Эта работа была выполнена в Сеульском Национальном Университете с образцами, выращенными в лаборатории профессора Дж.Ву. Автор признателен финансовой поддержке KSSSTCC, MOST Кореи, благодарит профессора Дж.Ву за гостеприимство и профессора Т.Но за содействие при записи спектров отражения.

-
1. S.Baroni, S. de Gironcoli, and P.Giannozzi, Phys. Rev. Lett. 65, 84 (1990).
 2. Ю.А.Пусеп, А.Г.Милехин, М.П.Синюков и др., Письма в ЖЭТФ 52, 1068 (1990).
 3. Yu.Pusep, A.Milekhin, and A.Toropov, Superlattices and Microstructures 13, 115 (1993).
 4. G.Fasol, M.Tanaka, H.Sakaki, and Y.Horikoshi, Phys. Rev. B 38, 6056 (1988).
 5. B.Jusserand and D.Paquet, Phys. Rev. Lett. 56, 1752 (1986).