

ЛОКАЛИЗОВАННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ МОДЫ В СВЕРХРЕШЕТКАХ GaSb/AlSb

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

*Институт физики полупроводников СО РАН
630090 Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 8 апреля 1996 г.

После переработки 26 июля 1996 г.

Детально исследован колебательный спектр тонкопериодных сверхрешеток GaSb/AlSb в диапазоне частот оптических фононов GaSb. Впервые экспериментально обнаружен эффект локализации поперечных оптических фононов GaSb в сверхрешетках GaSb/AlSb. Измерены дисперсии TO и LO фононов в GaSb.

PACS: 07.57.-c

Инфракрасная (ИК) спектроскопия является традиционным инструментом исследования колебательных свойств полупроводников. Недавно было показано, что ИК спектроскопия может быть успешно применена и для изучения полупроводниковых сверхрешеток [1–3]. Анализ особенностей в спектрах отражения, измеренных в дальней ИК области спектра, позволил детально исследовать колебательный спектр сверхрешеток (СР) GaAs/AlGaAs с ультратонкими слоями [4–7]. Были изучены эффект локализации оптических фононов в СР GaAs/AlGaAs, анизотропия и ангармонизм оптических колебательных мод.

Сверхрешетки GaSb/AlSb, которые характеризуются значительным рассогласованием (0.65%) параметров решеток GaSb и AlSb и классифицируются как сверхрешетки с напряженными слоями, привлекают пристальное внимание в связи с их возможным приборным применением, например в качестве лазерных диодов [8] и инжекционных лазеров [9]. Вместе с тем, колебательный спектр СР GaSb/AlSb остается малоизученным. В настоящее время опубликовано лишь несколько работ по изучению колебательного спектра сверхрешеток GaSb/AlSb методом комбинационного рассеяния света (КРС) [10–12].

Как и в случае сверхрешеток GaAs/AlAs, массы катионов в слоях СР GaSb/AlSb значительно различаются. Вследствие этого оптические колебания кристаллической решетки оказываются локализованными в соответствующих слоях. В силу ограничений по правилам отбора, в сверхрешетках GaSb/AlSb, ориентированных в направлении (100), КРС позволяет наблюдать лишь продольные оптические колебания.

Правила отбора для ИК спектроскопии разрешают наблюдение в ИК спектрах как продольных оптических (LO), так и поперечных оптических (TO) фононов GaSb и AlSb. В то же время, авторам известен лишь единственный результат по наблюдению оптических фононов GaSb и AlSb в спектрах ИК отражения длиннопериодных сверхрешеток GaSb/AlSb [13]. При этом о наблюдении эффекта локализации оптических фононов в слоях сверхрешеток не сообщалось.

В данной работе мы представляем результаты исследования эффекта локализации оптических фононов GaSb в тонкопериодных сверхрешетках

GaSb/AlSb, где следует ожидать влияния эффектов квантования на спектр оптических фононов.

Изучались ИК спектры отражения CP (GaSb)_n/(AlSb)_n, где $n = 2; 4; 7; 10; 15$ – число монослоев в соответствующем слое CP. Число повторений периода CP составляло для разных образцов от 50 до 200. Образцы были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке "Катунь" на подложках GaAs, ориентированных в направлении (100) при температуре $T = 470^\circ\text{C}$. Буферный слой GaAs толщиной 1 мкм, выращенный на подложке, был покрыт слоем AlSb толщиной 0.3 мкм. Для ИК экспериментов использовались как не легированные, так и легированные кремнием ($N_{\text{Si}} = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) буферные слои GaAs. Слои AlSb выращивались для уменьшения плотности дислокаций вследствие несоответствия кристаллических решеток подложки, слоев сверхрешетки GaSb и AlSb. Толщины слоев GaSb и AlSb контролировались методом регистрации осцилляций интенсивности зеркального рефлекса картины дифракции быстрых электронов на отражение.

Для регистрации ИК спектров отражения от CP использовался ИК фурье-спектрометр Bruker IFS-113V. ИК спектры были записаны в области частот собственных колебаний кристаллических решеток GaSb и AlSb ($200 - 400$) см^{-1} при температуре $T = 80 \text{ K}$. Разрешение составляло 1 см^{-1} по всему спектральному диапазону, число сканов – 2000. Анализировались ИК спектры, записанные в условиях нормального падения света на образец ($\Theta = 10^\circ$), и p -поляризованные спектры, измеренные при наклонном падении света ($\Theta = 70^\circ$). В ИК спектрах нормального падения возможно наблюдение поперечных колебательных мод, в то время как в спектрах p -поляризации вследствие эффекта Беремана [14] оказываются активны как TO, так и LO колебания.

На рис.1 представлены ИК спектры отражения сверхрешеток (GaSb)_n/(AlSb)_n, выращенных с легированным буферным слоем GaAs, записанные в области частот собственных колебаний кристаллической решетки GaSb, в условиях наклонного падения, в p -поляризованном свете. В ИК спектрах наблюдаются особенности, соответствующие первым локализованным LO₁ и TO₁ модам слоя GaSb. Положение стрелок соответствует значениям частот оптических колебательных мод, которые определялись из подгонки рассчитанных спектров отражения к экспериментальным. Как видно из рисунка, с уменьшением толщины слоев GaSb наблюдается сдвиг частот колебательных мод в низкочастотную область, что свидетельствует о сильной локализации продольных и поперечных оптических фононов в слоях сверхрешеток GaSb/AlSb.

Спектры отражения, рассчитанные для этих сверхрешеток по методике, представленной в [15], показаны на рисунке пунктирными линиями. Предполагалось, что каждый слой сверхрешетки является изотропным и может быть описан диэлектрической функцией

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

где $\epsilon_{001(2)}$ – высокочастотная диэлектрическая функция, $\omega_{i1(2)}$, $\Omega_{pi1(2)}$, $\gamma_{i1(2)}$ – частоты i -той локализованной TO моды, плазменная частота i -той моды и коэффициент затухания i -той моды, соответственно. Индекс 1 соответствует слою GaSb, 2 – слою AlSd. Суммирование производится по всем нечетным локализованным модам. Наилучшее соответствие между экспериментальными и рассчитанными спектрами было получено для следующих параметров:

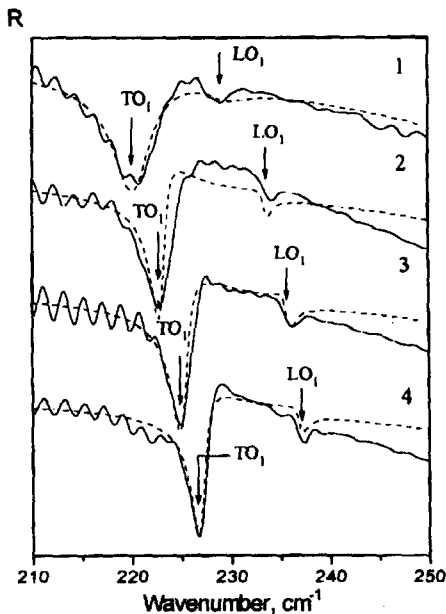


Рис.1. ИК спектры отражения сверхрешеток $(\text{GaSb})_n/(\text{AlSb})_n$, записанные в области наклонного падения в p -поляризованном свете ($\Theta \sim 70^\circ$), где $n = 2$ – кривые 1, $n = 4$ – кривые 2, $n = 7$ – кривые 3, $n = 10$ – кривые 4

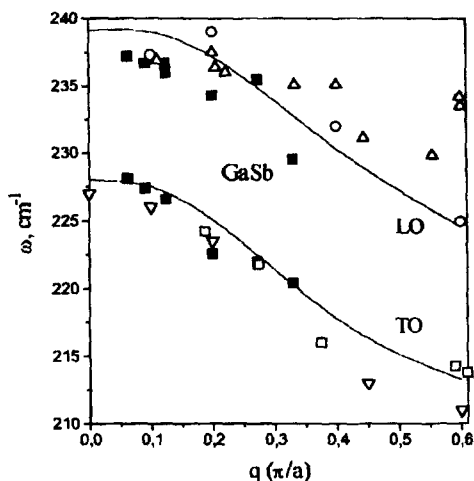


Рис.2. Дисперсия TO и LO фононов GaSb. Сплошными линиями показаны дисперсионные кривые, рассчитанные в [17]; ■, □ – данные, полученные из анализа ИК спектров; ○, ▽ – результаты экспериментов по нейтронному рассеянию [17]; Δ – данные по комбинационному рассеянию света [11]

$\epsilon_{001} = 14.44$, $\epsilon_{002} = 10.24$ – высокочастотные диэлектрические проницаемости GaSb и AlSb, взятые из [15], $\gamma_s = 2$, $\gamma_{11} = 1.5$ – параметры затухания оптических колебаний подложки GaAs и первой локализованной оптической колебательной моды, локализованной в слое GaSb, соответственно.

В ИК спектрах отражения, записанных при нормальном падении, кроме TO_1 мод, наблюдаются слабые линии, соответствующие старшим локализованным TO_3 колебательным модам.

Мы не наблюдали особенностей, связанных с оптическими колебательными модами, локализованными в слоях AlSb, вследствие большой величины параметра затухания этих мод и сильного отражения от буферного слоя AlSb.

Волновое число локализованной оптической колебательной моды может быть определено как

$$q_m = m\pi/L_c a, \quad (2)$$

причем $L_c = n + \delta$, где m – квантовый номер локализованной моды, n – число монослоев соответствующего слоя, a – толщина одного монослоя этого слоя, $\delta = 1$ – параметр, характеризующий проникновение локализованной моды в соседний слой [12].

По известным значениям частот локализованных мод и их волновых чисел были построены дисперсионные зависимости TO и LO фононов в GaSb. На рис.2 представлены дисперсионные зависимости, полученные из ИК данных (квадраты), в сравнении с данными нейтронного рассеяния и комбинацион-

ного рассеяния света [11,17,18]. Частоты темных квадратов соответствуют частотам TO_1 и TO_3 мод, соответственно. До сих пор единственным инструментом, позволяющим определить дисперсию TO фононов в GaSb являлся метод нейтронного рассеяния [17]. Точность определения частот оптических фононов этим методом $\pm 2\%$, что оказывается неудовлетворительным при изучении колебательного спектра сверхрешеток. Изучение ИК спектров отражения тонкопериодных сверхрешеток GaSb/AlSb позволило дополнить и уточнить дисперсию TO и LO фононов в GaSb. Качественно согласие дисперсионных зависимостей, полученных из анализа ИК спектров, наблюдается с результатами расчетов, проведенных в рамках "оболочечной" модели [17], которая учитывает взаимодействие между соседними за ближайшими атомами. Рассчитанные дисперсии оптических фононов в GaSb показаны на рис.2 сплошными линиями.

Следует отметить, что напряжение в слоях сверхрешеток может приводить к незначительному высокочастотному сдвигу частот всех локализованных мод [12], что составляет для LO и TO фононов $\sim 2\text{см}^{-1}$.

Таким образом, в работе изучен колебательный спектр короткопериодных сверхрешеток GaSb/AlSb. Обнаружен эффект локализации оптических фононов в слоях GaSb. Получены дисперсии TO и LO фононов GaSb.

-
1. B.Lou, R.Sudharsanan, and S.Perkowitz, *Phys. Rev.* **B38**, 2212 (1988).
 2. Ю.А.Пусеп, А.Г.Милехин, М.П.Синюков и др., *Письма в ЖЭТФ* **52**, 1068 (1990).
 3. B.Samson, T.Dumelow, A.A.Hamilton et al., *Phys. Rev.* **B46**, 2375 (1992).
 4. G.Scamacio, L.Tapfer, W.Konig et al., *Phys. Rev.* **B43**, 14754 (1991).
 5. А.Г.Милехин, Ю.А.Пусеп, В.В.Преображенский и др., *Письма в ЖЭТФ* **59**, 471 (1994).
 6. Yu.Pusep, A.Milekhin, and A.Toropov, *Solid State Electronics* **37**, 613 (1994).
 7. Yu.A.Pusep, S.W.da Silva, J.C.Galzerani et al., *Phys. Rev.* **B52**, 2610 (1995).
 8. Y.Ohmori, Y.Suzuki, and H.Okamoto, *Jpn. J. Appl. Phys.* **64**, 6733 (1988).
 9. T.Sakamoto, H.Funabashi, K.Ohta et al., *Superlattices and Microstructures* **1**, 347 (1985).
 10. B.Jusserand, P.Voisin, M.Voos et al., *Appl. Phys. Lett.* **46**, 678 (1985).
 11. G.P.Schwarz, G.J.Gualtieri, W.A.Sunder, and L.A.Farrow, *Phys. Rev.* **B36**, 4868 (1987).
 12. P.V.Santos, A.K.Sood, M.Cardona et al., *Phys. Rev.* **B37**, 6381 (1988).
 13. G.Scamacio, C.Gadaleta, A.Tagliente et al., *Solid State Electronics* **37**, 625 (1994).
 14. D.W.Berreman, *Phys. Rev.* **130**, 2193 (1963).
 15. Yu.Pusep, A.Milekhin, and A.Toropov, *Superlattices and Microstructures* **13**, 115 (1993).
 16. *Londolt-Bornstein Tables, New Series* **22**, Eds. O.Madelung and H.Schulz, Berlin: Springer, 1987.
 17. M.K.Farr, J.G.Traylor, and S.K.Sinha, *Phys. Rev.* **B11**, 1587 (1975).
 18. H.Bilz and W.Kress, *Phonon Dispersion Relation in Insulators*, Springer, Heidelberg, 1979.