

**СВЕРТКА ВЕТВЕЙ АКУСТИЧЕСКИХ ФОНОНОВ В
СВЕРХРЕШЕТКАХ GaAs/InAs**

А.П.Шебанин, В.А.Гайслер, Т.В.Курочкина,
Н.Т.Мошегов, С.И.Стенин, А.И.Торопов

Исследование комбинационного рассеяния света в сверхрешетках GaAs/InAs с большим отношением толщин слоев GaAs и InAs впервые позволило пронаблюдать свертку ветвей акустических фононов в значительной части акустического диапазона. Экспериментально определена дисперсионная зависимость для акустических фононов в GaAs.

Наличие дополнительной периодичности в полупроводниковых сверхрешетках (СР) сильно видоизменяет фоновый спектр кристалла¹. В частности, в низкочастотной области спектра происходит свертка ветвей акустических фононов (СВАФ) в пределах мини-зоны Бриллюэна, что проявляется в спектрах комбинационного рассеяния света (КРС) в виде набора дублетных пиков. Интенсивность этих пиков в соответствии с¹ задается выражением:

$$I_{m\pm} = A m^{-2} \sin^2(m\pi d_1/d)[1 + n(\omega_{m\pm})]\omega_{m\pm}, \quad (1)$$

где m – номер дублета, ω – его частота, индексы (+) и (-) при номере m относятся к высокочастотным и низкочастотным пикам дублета, d – период сверхрешетки, d_1 , d_2 – толщины соседствующих слоев, $d_1 + d_2 = d$, $n(\omega_m)$ – распределение Бозе–Эйнштейна, A – коэффициент пропорциональности. Из соотношения (1) можно определить затухание интенсивности СВАФ дублетов при увеличении m . В предшествующих работах экспериментально исследовались полупроводниковые СР с $d_1 \approx d_2$, в этом случае, в соответствии с (1), затухание велико: интенсивность второго дублета (как и всех четных) равна нулю, интенсивность третьего дублета за счет фактора m^{-2} почти на порядок меньше интенсивности первого дублета и так далее. В данной работе впервые рассмотрен предельный случай СР, когда отношение толщин слоев (d_1 и d_2) велико. В таких СР при $kT > \hbar\omega$ и не очень больших m выражение (1) преобразуется к следующему виду:

$$I_{m\pm} = A \pi^2 d_1^2 d^{-2} k T \hbar^{-1}, \quad (2)$$

то есть интенсивность не зависит от номера m ; это позволяет наблюдать процесс СВАФ в значительно более широком диапазоне, что и реализовано экспериментально в данной работе.

Были исследованы СР (GaAs) _{k} (InAs) _{l} , выращенные методом молекулярной эпитаксии на установках, разработанных в ИФП СОАН, k и l – число мономолекулярных слоев, $l=2$ для всех образцов, $k=6, 10, 19, 22$, соответственно, для образцов *A*, *B*, *C*, *D*. Рост каждого слоя контролировался методом дифракции быстрых электронов и заканчивался в момент достижения максимума интенсивности зеркального рефлекса дифракции, что соответствовало максимальному заполнению верхнего монослоя². Исследование КРС проводилось на спектрометре У-1000 при возбуждении светом аргонового лазера с длиной волны $\lambda_l = 514,5$ нм, при $T = 295$ К в вакуумной камере в брюстеровской геометрии квазиобратного рассеяния.

На рис. 1 представлены спектры КРС четырех образцов. Штриховой линией обозначены широкие особенности, возникающие за счет разупорядочения кристаллической структуры (*DATA*, *DALA*)¹⁾¹. На фоне этих особенностей отчетливо проявляются СВАФ дублеты, число которых возрастает с ростом d_1 ($a_2 = \text{const}$), в спектре образца *D* ($d_1/d_2 = 11$) наблюдается 7 СВАФ дублетов. Теоретические значения интенсивности дублетов и их час-

¹⁾ *DATA*, *DALA* – аббревиатура: disorder – activated LA-, TA-phonons.

тот отмечены на рис. 1 треугольниками. В низкочастотной области спектров теоретические значения интенсивностей хорошо соответствуют экспериментальным данным, по мере приближения к частотному интервалу, где расположена особенность DALA, проявляется заметное расхождение. Значения частот СВАФ пиков рассчитывались в соответствии с выражением, полученным нами специально для СР, в которых d_2 равен двум мономолекулярным слоям InAs, что рассматривается в виде линейной цепочки атомов; слой d_1 , значительно большей толщины, рассматривается в континуальном приближении. Выражение, задающее дисперсию имеет вид:

$$\cos(qd) = \cos(kd_1) \left[\frac{\psi - \alpha^2 + \psi^2}{\alpha} \right] + \sin(kd_1) \left[\frac{(1 + \psi)^2 - \alpha^2 + \alpha^2 \delta^2 - \psi^2 \delta^2}{2\alpha\delta} \right], \quad (3)$$

где q — волновой вектор фонона в СР, $K = \omega/v_1$, ω — частота фонона в СР, v_1 — скорость LA-фонона в GaAs, $\alpha = (2 - M_{As}\omega^2\beta^{-1})^{-1}$; M_{As} — масса атома As, $\beta = 2C'_{11}a_0$ — константа жесткости связи атомов In—As, C'_{11} — постоянная упругости, a_0 — постоянная решетки InAs, $\psi = (M_{In}\omega^2\beta^{-1} - 2 + \alpha)$, M_{In} — масса атома In, $\delta = (KC_{11}a^2\beta^{-1})/2$, C_{11} — постоянная упругости, a — постоянная решетки GaAs.

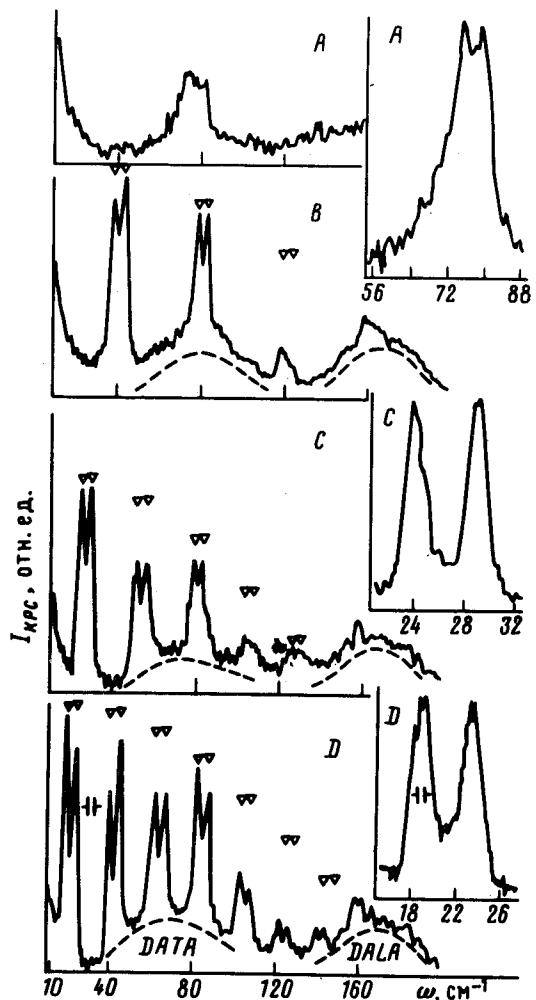


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния света сверхрешеток GaAs/InAs с периодом: $d = 23,0 \text{ \AA}$ (образец A), $d = 34,3 \text{ \AA}$ (образец B), $d = 59,7 \text{ \AA}$ (образец C), $d = 68,2 \text{ \AA}$ (образец D)

В соответствии с (3) для всех исследуемых структур построены дисперсионные зависимости $\omega(q)$, которые с высокой точностью позволяют описать экспериментальные

данные по значениям частот $\omega_{m\pm}^2$ ²⁾. В первом секторе рис. 2 приведены дисперсионная зависимость и экспериментальные значения частот первых двух дублетов образца D . Осуществляя процедуру обратную свертке, и руководствуясь экспериментальными значениями $\omega_{m\pm}$ (стрелки на рис. 2, сектор 2), можно построить дисперсионную зависимость для LA -фононов объемного материала (рис. 2, сектор 3). Сплошная линия на рис. 2 сектор 3 – теоретическая дисперсионная зависимость для LA -фононов GaAs⁴.

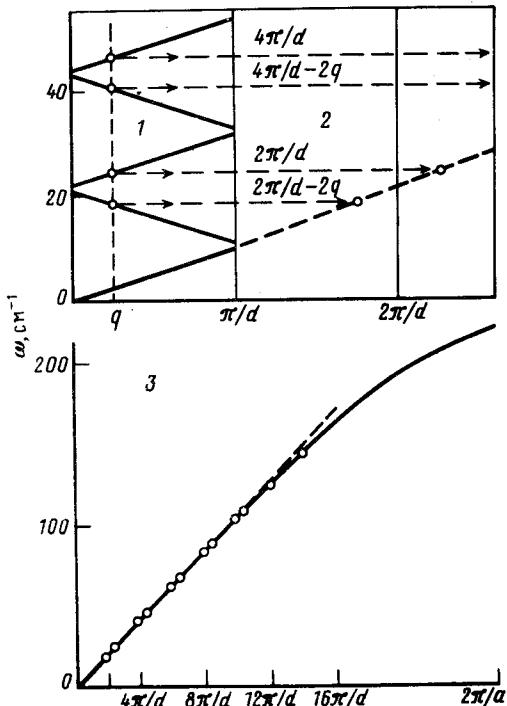


Рис. 2. Дисперсионные зависимости фононов в сверхрешетках GaAs/InAs и LA -фононов в GaAs

Как показал анализ экспериментальных результатов, незначительное изменение периода СР приводит к заметному сдвигу частот СВАФ дублетов (рис. 1 – С, Д). Это позволяет использовать данные КРС для определения параметра d исследуемых СР с точностью $\sim 0,5 \text{ \AA}$. Флуктуации периода СР Δd приводят к неоднородному уширению СВАФ пиков, тем самым, значения полуширин пиков могут быть использованы для оценки параметра Δd . На вставках рис. 1 приведены первые СВАФ дублеты, записанные с лучшим разрешением. Величина Δd , определяемая по полуширине СВАФ пиков, не превышает 1 монолоя.

Таким образом, исследование КРС в СР GaAs/InAs с $d_1 \gg d_2$ позволило пронаблюдать процесс СВАФ в значительной части акустического диапазона и построить дисперсионную зависимость фононов LA в GaAs. Данные КРС могут быть использованы для определения параметров d и Δd с высокой точностью.

Литература

1. Colvard C., Gant T.A., Klein M.V. et al. Phys. Rev. B, 1985, 31, 2080.
2. Sakamoto T., Funabashi H., Ohta K. et al. Jap. J. Appl. Phys., 1984, 23, L657.
3. Albuquerque E.L., Fulco P., Tilley D.R. Phys. Stat. Sol. B, 1988, 146, 449.
4. Sung-kit Yip, Yia-Chung Chang. Phys. Rev. B, 1984, 30, 7037.

Чиститут физики полупроводников
Сибирское отделение Академии наук СССР

Поступила в редакцию

8 февраля 1989 г.

²⁾ Дисперсионные зависимости, получаемые в соответствии с ^{1,3} незначительно отличаются от полученных нами; отличия для первых дублетов не превышает $0,3 \text{ cm}^{-1}$.