

05; 06; 07

© 1991

КОНТРОЛЬ ПЕРИОДА И РЕЗКОСТИ ГЕТЕРОГРАНИЦ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВЕРХРЕШЕТОК МЕТОДОМ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

В.А. Г а й с л е р, Д.А. Т э н н э,
Н.Т. М о ш е г о в, А.И. Т о р о п о в,
А.П. Ш е б а н и н, Н.В. Н о м е р о ц к и й

В работе рассматриваются возможности использования метода комбинационного рассеяния света (КРС) для определения периода полупроводниковых сверхрешеток (СР), флуктуаций периода по площади структуры и оценки резкости гетерограниц.

Метод контроля периода СР основан на использовании данных КРС о частотах дублетов свернутых акустических фононов (СВАФ) [1], которые определяются точками пересечения вертикальных линий, задающих волновой вектор фонона q в процессе КРС, с ветвями дисперсионной зависимости акустических фононов в СР (рис. 1, а). Для значений волновых векторов, не слишком близких к центру или границе мини-зоны Бриллюэна (что выполняется в случае обратного рассеяния, когда $q \cong 4\pi n/\lambda$; здесь λ — длина волны падающего света, n — показатель преломления), дисперсия свернутых акустических фононов в модели упругого континуума описывается формулой (1, 2):

$$\omega(q) = \left(\frac{2\pi m}{d} \pm q \right) V_{CP}, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (1)$$

где

$$V_{CP} = \left[\frac{1}{d} \left(\frac{d_1}{V_1} + \frac{d_2}{V_2} \right) \right]^{-1} = \langle V^{-1} \rangle^{-1}. \quad (2)$$

Здесь V_1, V_2 — скорости звука в материалах 1 и 2, d_1, d_2 — толщины их слоев, $d = d_1 + d_2$, q — волновой вектор, ω — частота фонона в СР.

Хорошее соответствие экспериментальных значений частот СВАФ — дублетов с теоретическими [3, 4], а также значительное смещение частот при малом изменении периода СР (рис. 1, а) позволяют использовать данные КРС для контроля периода выраженных СР.

Нами были исследованы образцы СР $(GaAs)_m(AZAs)_n$, в которых m при росте задавалось равным 11 монослоям, n — 3,5 монослоям для образцов А и В соответственно, а также образ-

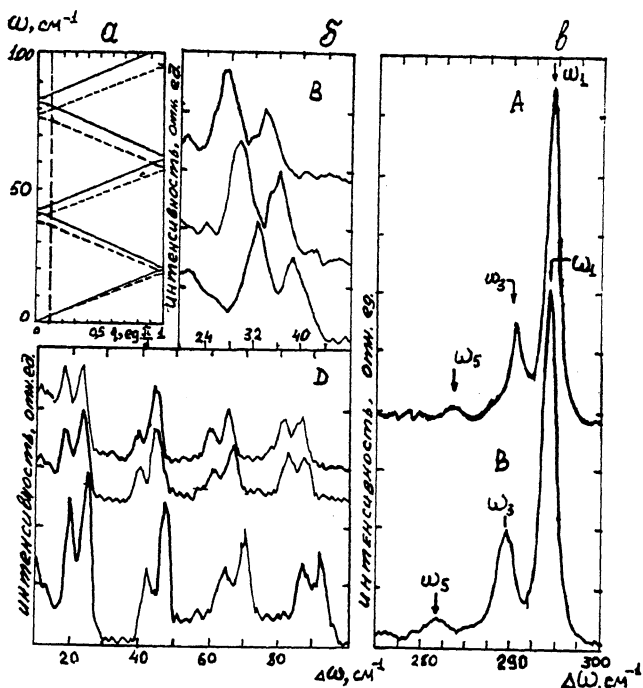


Рис. 1. а - дисперсионные зависимости для свернутых акустических фононов в сверхрешетках $(GaAs)_{11}(AlAs)_3$ (сплошная линия) и $(GaAs)_{12}(AlAs)_3$ (пунктирная линия); б - спектры комбинационного рассеяния света образцов В и Д в области акустических фононов; в - спектры комбинационного рассеяния света образцов А и В в высокочастотной области фононного спектра.

цы CP $(GaAs)_k(InAs)_2$, $k = 19, 22$ монослоев для образцов С, Д. Все образцы были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установках, разработанных в ИФП СО АН, на подложках $GaAs$ с ориентацией (100). Толщины слоев контролировались в процессе роста путем регистрации осцилляций интенсивности зеркального рефлекса при дифракции быстрых электронов на отражение. Спектры КРС записывались на спектрометре $U-1000$ при возбуждении светом аргонового лазера с длиной волны 514,5 нм при температуре 295 К в вакуумной камере в брестеровской геометрии квазиобратного рассеяния. На рис. 1, б приведены спектры КРС образцов В и Д в акустической области. Аналогичные данные получены и для образцов А и С.

Получаемые из эксперимента данные о частотах свернутых LA фононов (поперечные фононы не активны в КРС в геометрии обрат-

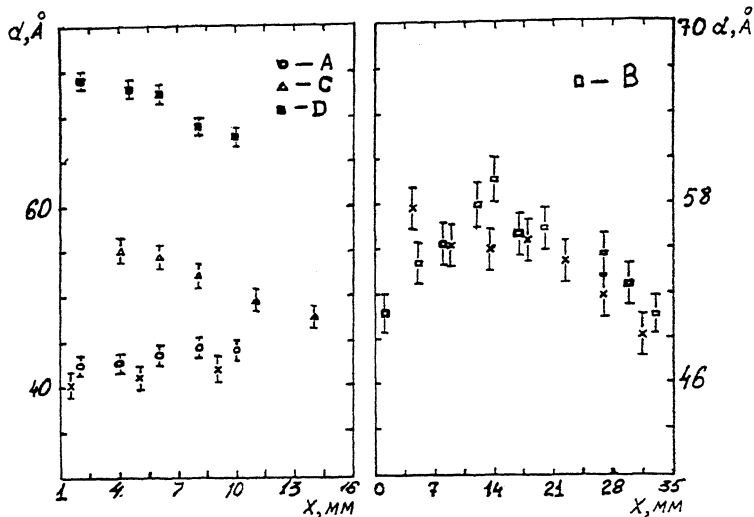


Рис. 2. Изменение периода по площади образцов А, С, Д (слева) и В (справа). х – значения периода для образцов А и В, полученные из данных дифракции рентгеновских лучей.

ного рассеяния для структур с ориентацией (100) [1]) использовались для определения периода CP с помощью соотношения (1). Точность определения периода зависит в основном от двух факторов. Первый – точность определения экспериментальных значений частот СВАФ-дублетов. В данной работе положение дублетов определялось с точностью 0.3 см^{-1} и ошибка при определении d за счет этого фактора составляла $\sim 0.5 \text{ \AA}$ (образцы А и В). Сдвиг частоты при изменении периода растет пропорционально порядковому номеру дублета, поэтому точность определения периода повышается при использовании данных о частотах СВАФ-дублетов более высокого порядка (образцы С и Д).

Вторым фактором является то, что, используя данные о частотах СВАФ-дублетов, мы можем судить о полном периоде $d = d_1 + d_2$, не зная точно величин d_1 и d_2 . Поскольку V_{CP} в формуле (4) зависит от d_1 и d_2 , то неопределенность в этих величинах вносит вклад в ошибку при определении периода. Обычно мы знаем значения d_1 и d_2 , задаваемые в процессе роста, с точностью ± 1 монослой. В этом случае вклад в ошибку при определении полного периода составляет $\sim 0.5 \text{ \AA}$, и даже при неопределенности величин d_1 и $d_2 \pm 2$ монослоя этот вклад составит $\sim 1 \text{ \AA}$. С учетом всех факторов ошибка при определении периода составляет не более 1.5 \AA (0.5 монослой).

Спектры КРС для образцов А–Д были записаны в нескольких точках по поверхности структуры. На рис. 1, б видно смещение частот СВАФ-дублетов, что свидетельствует о том, что период CP

не является постоянным по всей площади структуры, а изменяется в пределах 1-3 монослоев. Это изменение, а также точность определения периода для каждого образца приведены на рис. 2. Заметное смещение частот СВАФ-дублетов происходит при изменении вредного периода CP на 0.3 \AA , т.е. метод КРС позволяет регистрировать даже такие незначительные флуктуации периода (0.1 монослоя). Для образцов А и В приведены также данные дифракции рентгеновских лучей, которые хорошо согласуются со значениями, полученными из данных КРС.

В высокочастотной области фонованого спектра CP проявляются эффекты локализации оптических фононов (ЛОФ) в слое одного материала [1, 3]. Если гетерограница является резкой, то частота m -го локализованного фонона равна частоте объемного оптического фонона этого материала с волновым вектором [1, 4]:

$$\varphi = \frac{m\pi}{(n+1)a}, \quad m = 1, 2, 3, \dots, \quad (3)$$

где a — толщина монослоя данного материала, n — число монослоев. Поскольку дисперсия оптических фононов вблизи центра зоны Бриллюэна является квадратичной: $\omega = \omega_0 - \delta q^2$ [1], то частоты ЛОФ в случае резких гетерограниц образуют квадратичную последовательность. В этом случае для частот нечетных локализованных $L0$ фононов, которые наблюдаются в спектрах КРС в нерезонансных условиях [1], очевидно, выполняется соотношение

$$\beta = \frac{(\omega_5 - \omega_3)}{(\omega_3 - \omega_1)} = 2. \quad (4)$$

Если же гетерограницы не являются резкими, и условие строгой локализации фонона в пределах одного слоя нарушается, то β будет меньше 2. В соответствии с данными работы [4] параметр β в CP с сильно размытыми гетерограницами может приближаться к 1. Это проиллюстрировано на примере образцов А и В, спектры КРС которых в оптической области приведены на рис. 1, в. Для образца А $\beta = 2$ с хорошей точностью (5%), что говорит о резкости гетерограниц. В образце В $\beta \cong 1.6$, т.е. качество гетерограниц здесь хуже.

Таким образом, в данной работе предложен локальный неразрушающий метод контроля периода выращенных сверхрешеток, основанный на использовании данных КРС о частотах СВАФ-пииков, позволяющий определить этот параметр с точностью 1-1.5 \AA . Метод КРС является очень чувствительным к изменению периода и позволяет регистрировать флуктуации периода величиной до 0.3 \AA по площади структуры. Также проиллюстрирована возможность использования данных КРС о частотах локализованных оптических фононов для качественной оценки резкости гетерограниц.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] C a r d o n a M. // Superlattices and microstructures. 1989. V. 5. N 1. P. 27-42.
- [2] C o l v a r d C. et al. // Phys. Rev. B. 1985. V. 31. N 4. P. 2080-2091.
- [3] Г а й с л е р В.А. и др. // ЖЭТФ. 1990. Т. 98. В. 3(9). С. 1081-1092.
- [4] J u s s e r a n d B. et al. // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 47. N 3. P. 301-303.

П о с т у п и л о в Р е д а к ц и ю
30 мая 1991 г.