

12,13,03,10,11

## Анизотропия фонон-плазмонных мод в сверхрешетках GaAs/AlAs (311)

© В.А. Володин

Институт физики полупроводников СО РАН,  
Новосибирск, Россия  
Новосибирский государственный университет,  
Новосибирск, Россия  
E-mail: volodin@isp.nsc.ru

(Поступила в Редакцию 24 мая 2010 г.)

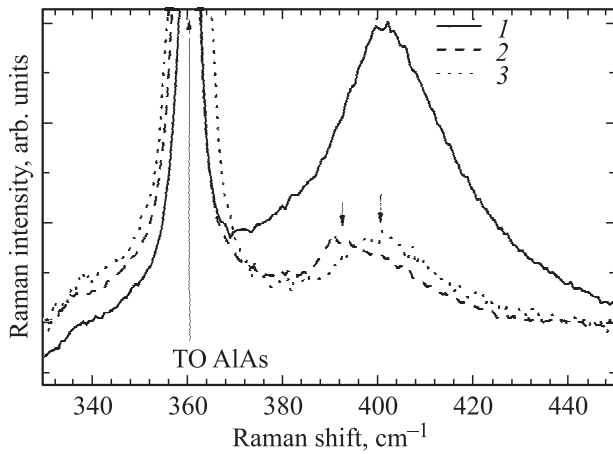
Легированные сверхрешетки (СР) GaAs/AlAs, выращенные на поверхностях (311)A и (311)B, были исследованы с применением методики спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС). При обратном рассеянии с „торца“ СР (с применением микроприставки для исследования КРС) удалось обнаружить фононные и фонон-плазмонные моды с различными направлениями волновых векторов в плоскости СР (т.е. распространяющиеся в различных латеральных направлениях). Впервые экспериментально обнаружена латеральная анизотропия смешанных фонон-плазмонных мод, обусловленная структурной анизотропией в СР, выращенной на фасетированной поверхности (311)A.

Известно, что в полярных полупроводниках продольные фононы создают макроскопическое электрическое поле, поэтому фононы в них взаимодействуют с коллективными колебаниями свободных носителей заряда (плазмонами) с образованием новых квазичастиц — фонон-плазмонных мод [1]. Теоретически предсказаны эффекты фонон-плазмонного взаимодействия в сверхрешетках (СР) и в двумерных системах [2–4], часть этих эффектов обнаружена экспериментально [5,6], однако для систем с более сложной структурой и соответственно с более сложным фононным спектром эта задача остается актуальной.

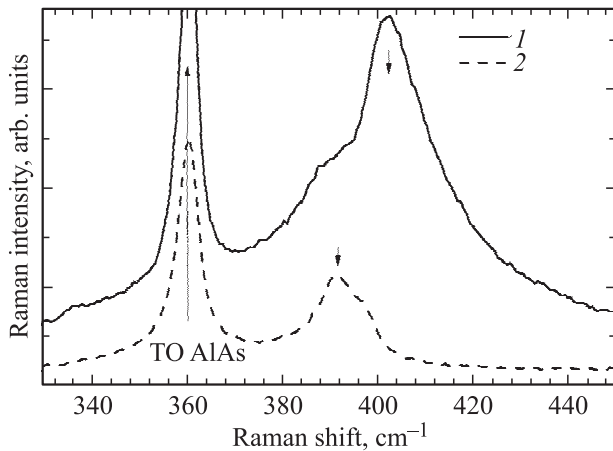
Как показали расчеты [4], в случае анизотропии эффективной массы носителей заряда должно быть различие в частотах фонон-плазмонных мод, распространяющихся вдоль направлений „тяжелой“ либо „легкой“ масс. Для того чтобы разница в частотах стала экспериментально наблюдаема (т.е. составляла хотя бы несколько обратных сантиметров), волновое число мод должно быть порядка миллиона обратных сантиметров. Эффект анизотропии фонон-плазмонных мод для легированных GaAs/AlAs СР, выращенных на поверхности (001), был экспериментально обнаружен ранее [6] из анализа спектров комбинационного рассеяния света (КРС) при обратном рассеянии. Использовались различные геометрии рассеяния: первая — когда волновые векторы падающего и рассеянного света нормальны к плоскости СР; вторая — когда волновые векторы падающего и рассеянного света лежат в плоскости СР. Задачей настоящей работы было получить эффект латеральной анизотропии фонон-плазмонных мод для легированных GaAs/AlAs СР, если они обладают структурной анизотропией в латеральном направлении. Такие объекты называют латеральными сверхрешетками (ЛСР) либо СР, содержащими периодический массив квантовых проволок.

Легированные GaAs/AlAs СР были изготовлены с применением метода молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs с ориентациями (311)A и (311)B. Ориентация поверхностей различалась по анизотропии химического травления. Толщина слоев AlAs составляла 13.6 Å (8 монослоев), эффективная толщина слоев GaAs составляла 3.4 Å (2 монослоя). СР содержали 300 периодов и для чистоты эксперимента были выращены в одном процессе — „side by side“. Рост осуществлялся при температуре подложки 550°C в условиях структурной перестройки типа (8 × 1) для поверхностей как GaAs, так и AlAs, что контролировалось с использованием метода дифракции быстрых электронов. Известно, что в данных условиях поверхности GaAs и AlAs распадаются на массив наноканавок с периодом 32 Å [7], и в процессе гетероэпитаксии формируются ЛСР. В процессе роста образцы были однородно легированы кремнием, концентрация кремния составляла  $2.5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , что по оценкам при комнатной температуре должно давать объемную концентрацию электронов порядка  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Для того чтобы изолироваться от подложки, СР были выращены на буферном слое AlAs толщиной в 0.3 μm. Все СР были покрыты защитным слоем GaAs толщиной 50 Å.

Дисперсия фононов и смешанных фонон-плазмонных мод исследовалась с применением спектроскопии КРС. Все спектры КРС регистрировались при комнатной температуре при возбуждении линией аргонового лазера 514.5 nm. Использовалось оборудование научно-образовательного комплекса „Наносистемы и современные материалы“ НГУ — спектрометр T64000 производства Horiba Jobin Yvon с тройным монохроматором. В качестве детектора использовалась кремниевая матрица фотоприемников, охлаждаемая жидким азотом. Применялась приставка для микроскопических исследований КРС на базе микроскопа Olympus. Латеральное разрешение определялось размерами лазерного пучка в



**Рис. 1.** Спектры КРС легированных CP GaAs/AlAs, выращенных на поверхности (311)A, полученные в различных геометриях рассеяния: 1 —  $\mathbf{q}$  перпендикулярен плоскости CP, 2 —  $\mathbf{q}$  параллелен плоскости CP и направлению квантовой проволоки, 3 —  $\mathbf{q}$  параллелен плоскости CP и перпендикулярен направлению квантовой проволоки.



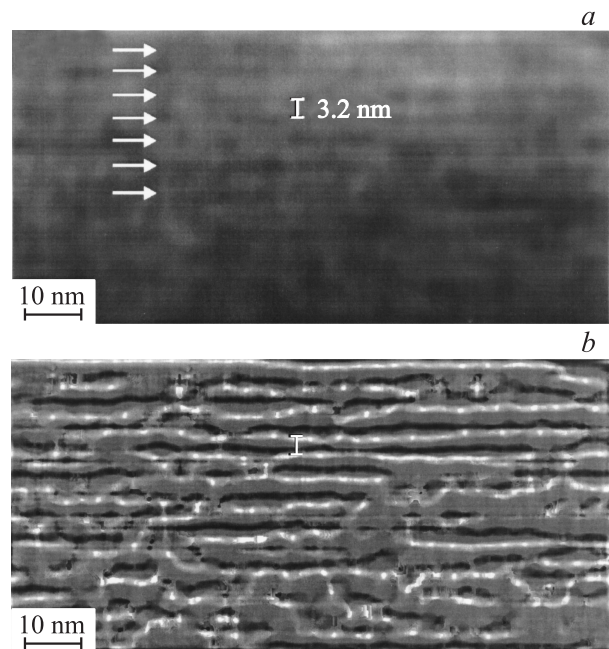
**Рис. 2.** Спектры КРС легированных CP GaAs/AlAs, выращенных на поверхности (311)B, полученные в различных геометриях рассеяния: 1 —  $\mathbf{q}$  перпендикулярен плоскости CP, 2 —  $\mathbf{q}$  параллелен плоскости CP.

фокусе и равнялось  $1 \mu\text{m}$ . Мощность излучения, достигающего до образца, составляла около  $2 \text{ mW}$ ; излучение не вызывало заметного нагрева образцов.

На рис. 1 показаны спектры КРС от ЛСР, выращенной на поверхности (311)A. Спектры были зарегистрированные в различных геометриях. Сплошной линией показан спектр, зарегистрированный в геометрии  $Z(XX)\bar{Z}$ . Здесь и далее оси в скобках соответствуют направлению поляризации вектора напряженности электрического поля падающей и рассеянной электромагнитных волн, а оси вне скобок показывают направление волнового вектора падающей и рассеянной электромагнитных волн. Оси  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  параллельны кристаллографическим направлениям  $[11\bar{1}]$ ,  $[\bar{2}33]$  и  $[311]$  соответственно. По данным работы [7], нанofасетки и соответственно квантовые проволо-

ки вытянуты вдоль направления  $Y$ . Штриховой линией на рис. 1 показан спектр КРС, зарегистрированный в геометрии  $Y(XX)\bar{Y}$ . Пунктирной линией показан спектр КРС, зарегистрированный в геометрии  $X(ZZ)\bar{X}$ . В двух последних случаях фотон рассеивается на фоновых и фонов-плазменных модах, волновой вектор которых лежит в плоскости слоев ЛСР. Все три геометрии разрешены для КРС на смешанных фонов-плазменных модах. Из сравнительного анализа спектров, приведенных на рис. 1, видно, что частоты данных мод, распространяющихся вдоль либо поперек нанofасеток, различаются, а частоты мод, распространяющихся поперек нанofасеток, близки независимо от геометрии рассеяния  $Z(XX)\bar{Z}$  или  $X(ZZ)\bar{X}$ . Сигнал в первом случае больше лишь потому, что во втором случае не весь лазерный пучок удастся сфокусировать на „торце“ CP толщиной примерно в  $0.5 \mu\text{m}$ . Следует отметить, что положение пика от смешанных фонов-плазменных мод в спектрах КРС зависело только от направления их распространения и не зависело от поляризации света. Применялась также поляризационная геометрия  $X(Y\bar{Y})\bar{X}$ .

На рис. 2 приведены спектры КРС от ЛСР, выращенной на поверхности (311)B. Известно, что CP, выращенные на данной поверхности, не обладают ярко выраженной структурной анизотропией [8]. Как и для ЛСР (311)A, сплошной линией в данном случае показан спектр, зарегистрированный в геометрии  $Z(XX)\bar{Z}$ . Штриховой линией на рис. 2 показан спектр КРС, зарегистрированный в геометрии  $X(ZZ)\bar{X}$ . В этом случае волновой вектор лежит в плоскости CP. Если волновой вектор



**Рис. 3.** Пример структурной анизотропии GaAs/AlAs (311)A ЛСР. Снимок получен с помощью электронной микроскопии высокого разрешения, plane view изображение. *a* — необработанное изображение, *b* — изображение после Фурье-обработки.

оставался в плоскости СР, то при любых ее поворотах спектр КРС практически не изменялся. Таким образом для СР с ориентацией (311)В не было обнаружено латеральной анизотропией фонон-плазмонных мод.

Качественно наблюдаемый эффект анизотропии дисперсии смешанных фонон-плазмонных мод для GaAs/AlAs (311)А ЛСР можно объяснить их структурной анизотропией. В данном случае происходит формирование массива объектов типа квантовых проволок. Эти данные подтверждаются данными электронной микроскопии высокого разрешения [9,10]. Пример электронного изображения GaAs/AlAs (311)А ЛСР приведен на рис. 3. Структурная анизотропия ведет также к анизотропии эффективной массы. Это является причиной анизотропии дисперсии фонон-плазмонных мод [4,6]. Структурная анизотропия ведет также к анизотропному рассеянию, что также может вносить вклад в наблюдаемый эффект.

В заключение можно отметить, что для GaAs/AlAs (311)А ЛСР впервые была обнаружена зависимость частот смешанных фонон-плазмонных мод в зависимости от латерального направления их волнового вектора. Предполагается, что латеральная анизотропия дисперсии данных мод обусловлена структурной анизотропией данных ЛСР.

Автор признателен В.В. Преображенскому и Б.Р. Семягину за приготовление экспериментальных образцов, Д. Литвинову и Н.Н. Леденцову за предоставленный снимок ВРЭМ-изображения.

## Список литературы

- [1] Рассеяние света в твердых телах. В. IV. Электронное рассеяние, спиновые эффекты, морфические эффекты / Под ред. М. Кардоны, Г. Гюнтеродта. Мир, М. (1986). С. 408.
- [2] Л.А. Фальковский, Е.Ж. Мищенко. Письма в ЖЭТФ **82**, 103 (2005).
- [3] В.Е. Бисти, В.Е. Кирпичев, Л.В. Кулик, И.В. Кукушкин. Письма в ЖЭТФ **83**, 300 (2006).
- [4] V.A. Volodin, M.D. Efremov, V.A. Sachkov, N.N. Ledentsov. Phys. Low-Dim. Struct. **5/6**, 109 (2003).
- [5] D. Olego, A. Pinczuk, A.C. Gossard, W. Wiegmann. Phys. Rev. B **26**, 7867 (1982).
- [6] В.А. Володин. Письма в ЖЭТФ **89**, 483 (2009).
- [7] R. Nötzel, N.N. Ledentsov, L.A. Däweritz, M. Hohenstein, K. Ploog. Phys. Rev. Lett. **67**, 3812 (1991).
- [8] N.N. Ledentsov, D. Litvinov, A. Rosenauer, D. Gerthsen, I.P. Soshnikov, V.A. Shchukin, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.E. Zukov, V.A. Volodin, M.D. Efremov, V.V. Preobrazhenskii, B.P. Semyagin, D. Bimberg, Zh.I. Alferov. J. Electron. Mater. **30**, 463 (2001).
- [9] D. Litvinov, A. Rosenauer, D. Gerthsen, N.N. Ledentsov, B.P. Bimberg, G.A. Ljubas, V.V. Bolotov, V.A. Volodin, M.D. Efremov, V.V. Preobrazhenskii, B.R. Semyagin, I.P. Soshnikov. Appl. Phys. Lett. **81**, 1080 (2002).
- [10] В.А. Володин, М.Д. Ефремов, Р.С. Матвиенко, В.В. Преображенский, Б.Р. Семягин, Н.Н. Леденцов, И.Р. Сошников, Д. Литвинов, А. Розенауэр, Д. Герцен. ФТТ **47**, 354 (2005).