Письма в ЖЭТФ, том 95, вып. 2, с. 76 – 79 © 2012 г. 25 января

Свертка ветвей акустических фононов в направлении, перпендикулярном нанофасеткам, в сверхрешетках GaAs/AlAs (311)A

В. А. Володин[1]*, А. С. Кожухов, А. В. Латышев, Д. В. Щеглов*

Институт физики полупроводников СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 16 ноября 2011 г.

После переработки 8 декабря 2011 г.

Сверхрешетки GaAs/AlAs, выращенные на нанофасетированной поверхности (311)A, исследованы с применением методов атомно-силовой микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света. При обратном рассеянии света в направлении, перпендикулярном нанофасеткам, обнаружены пики, соответствующие свернутым акустическим фононам. Период, оцененный из положения пиков, составил 1.6 нм, что соответствует половине расстояния между нанофасетками.

Создание гетероструктур с контролируемым периодом (сверхрешеток) и исследование их свойств являются актуальной задачей физики твердого тела. Гетероэпитаксиальный рост на высокоиндексных нанофасетированных поверхностях GaAs и AlAs может применяться для получения нанометровых объектов воспроизводимых формы и размеров в планарном направлении. Эффект фасетирования поверхности (311)A GaAs (возникновение на ней периодического массива нанофасеток вдоль направления $(\bar{2}33)$ с периодом 3.2 нм в направлении $(01\bar{1})$) был обнаружен в работе [1] и подтвержден многими авторами [2–4]. Высота нанофасеток по различным данным составляет либо 1.02 нм (6 монослоев в направлении (311)) [1–3], либо 0.34 нм (2 монослоя) [4].

Свойства фононов в сверхрешетках, выращенных на поверхности (311)A исследовались в работах [5–11]. Однако основное внимание уделялось исследованию влияния нанофасетирования на дисперсию оптических фононов, а акустические фононы в подобных структурах исследованы мало. Известно, что в периодических структурах вследствие изменения границ зоны Бриллюэна по квазиимпульсу возникает эффект “свертки” (*folding*) ветвей акустических фононов с возникновением дублетов в спектрах комбинационного рассеяния света [12, 13]. Возникновение периодической структуры вследствие нанофасетирования при гетероэпитаксиальном росте должно приводить к свертке ветвей акустических фононов в направлении, перпендикулярном нанофасеткам. Однако этот вопрос до настоящего времени не исследован экспериментально.

Периодические гетероструктуры (сверхрешетки, *superlattices*) GaAs/AlAs были выращены с применением метода молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs с ориентациями (311)A и (100) в одном процессе – “side by side”. Эффективная, т.е. средняя, без учета периодического изменения толщины (корругации), толщина слоев AlAs составляла 1.36 нм (8 монослоев в направлении [311]). Эффективная толщина слоев GaAs составляла 1.02 нм (6 монослоев). Сверхрешетка содержала 150 периодов. Рост осуществлялся при температуре подложки 550 °C в условиях структурной перестройки типа (8×1) для поверхностей как GaAs, так и AlAs. Последнее контролировалось с использованием метода дифракции быстрых электронов. Известно, что в данных условиях поверхности GaAs и AlAs распадаются на массив нанофасеток с периодом 3.2 нм [1]. Сверхрешетки были покрыты защитным слоем GaAs с толщиной 5 нм. Дисперсия фононов исследовалась с применением спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) в геометрии обратного рассеяния. Все спектры регистрировались при комнатной температуре при возбуждении линией аргонового лазера 514.5 нм. Использовалось оборудование Научно-образовательного комплекса “Наносистемы и современные материалы” НГУ: спектрометр T64000 производства Horiba Jobin Yvon с приставкой для микроскопических исследований КРС на базе микроскопа Olympus. Пространственное разрешение определялось размерами лазерного пучка в фокусе и равнялось 1 мкм. Мощность излучения, доходящего до образца, составляла около 2 мВт. Излучение не вызывало заметного нагрева образцов.

[1] e-mail: volodin@isp.nsc.ru

На рис. 1 показаны спектры КРС от сверхрешеток в случае, когда векторы падающего и рассеянного фо-

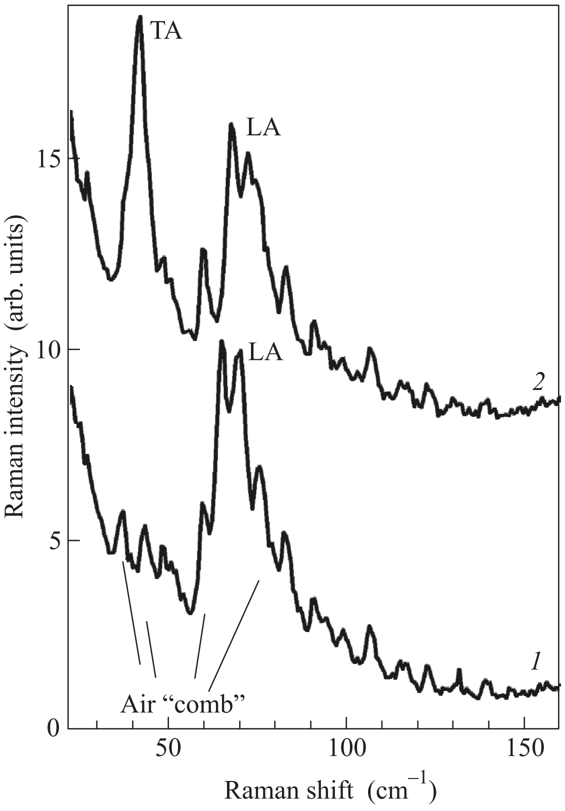

Рис. 1. Спектры КРС сверхрешеток GaAs/AlAs в акустической области (волновой вектор света направлен по нормали к поверхности): *1* – образец выращен на поверхности (100); *2* – образец (311)A

тонов перпендикулярны плоскости образцов. Спектры были зарегистрированы в различных геометриях. Во всех спектрах присутствуют пики, обусловленные рассеянием на вращательных и колебательных модах молекул азота и кислорода в воздухе. От данных пиков невозможно избавиться, даже поместив образец в вакуум. Дело в том, что рассеянный от образца свет, прежде чем попасть на входную щель монохроматора, фокусируется на узкую щель конфокального микроскопа и в этой точке также происходит КРС на молекулах азота и кислорода. Линией *1* показан спектр, зарегистрированный от образца (100) в геометрии $Z'(VV)-Z'$, линией *2* – спектр, зарегистрированный от образца (311)A в геометрии $Z(XX)-Z$. 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 Z' и V параллельны кристаллографическим направлениям [100] и [011] соответственно. Оси X, Y и Z параллельны кристаллографическим направлениям [01 – 1], [–233] и [311] соответственно. В спектрах образцов (100) и (311)A присутствуют пики в акустической области, которые можно отнести к свернутым акустическим фононам. Для образца (311)A, помимо продольной (LA) моды, разрешенной является также поперечная (TA) мода. Из-за шумового фона, а также вследствие малого расщепления не удалось разрешить дублет, который обычно соответствует свернутым акустическим модам [13]. Из простых соображений, изложенных в монографии [12] и ссылках в ней, можно получить зависимость частот наблюдаемых в КРС свернутых мод от скорости звука, периода сверхрешетки, импульса, передаваемого кристаллу фотоном, и номера дублета:

$$\omega_{\pm}(N,q) = \frac{2\pi}{d} v_s N \pm v_s q. \qquad (1)$$

Здесь период сверхрешетки равен 2.38 нм, а удвоенное волновое число фотона (при рассеянии назад) с учетом эффективного показателя преломления гетероструктуры GaAs/AlAs равно 10^6 см$^{-1}$.

Если учесть, что мы наблюдаем первый дублет, то скорость продольного звука для направления (100) составляет $5 \cdot 10^5$ см/с. Это неплохо совпадает с эффективной скоростью звука в сверхрешетке с данными структурными параметрами, которую можно вычислить по формуле

$$v_s = \frac{v_1 v_2}{\alpha v_1 + (1-\alpha) v_2}, \quad \alpha = \frac{d_2}{d_2 + d_1}, \qquad (2)$$

где d_1 и d_2 – толщины первого и второго слоев, а v_1 и v_2 – скорости звука в первой и второй средах.

Так как LA-пик в образце (311)A располагается при несколько большей частоте, можно сделать вывод о том, что скорость продольного звука в направлении [311] несколько выше, чем в направлении [100]. Вычисленная по формуле (1) из положения пика TA скорость поперечного звука в направлении [311] составляет $3.1 \cdot 10^5$ см/с, что также неплохо совпадает с эффективной скоростью звука в сверхрешетке.

На рис. 2 приведены спектры КРС в случае, когда волновые векторы падающего и рассеянного света лежат в плоскости сверхрешеток. Геометрия рассеяния была такой же, как и в работах [14, 15]. Применяя микроскопическую приставку КРС, удалось сфокусировать свет на боковой поверхности (“торце”) сверхрешеток. Как и ожидалось, в спектре образца (100) не обнаружено никаких особенностей в акустической области. На рис. 2 приведен только спектр, зарегистрированный в геометрии $V(Z'Z')-V$. Однако

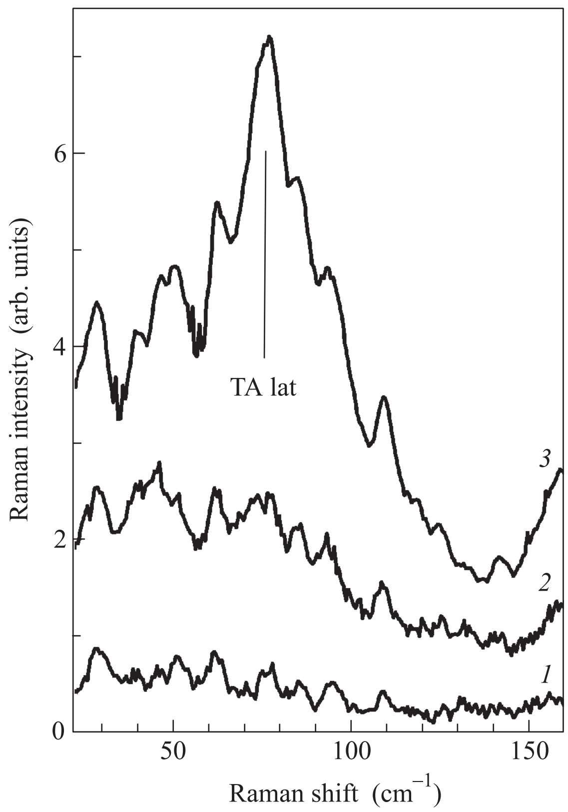

Рис. 2. Спектры КРС сверхрешеток GaAs/AlAs (волновые векторы падающего и рассеянного света лежат в плоскости сверхрешеток): *1* – образец выращен на поверхности (100); *2* – образец (311)A, волновой вектор направлен вдоль нанофасеток; *3* – образец (311)A, волновой вектор направлен перпендикулярно нанофасеткам

пиков не было обнаружено во всех возможных геометриях (соответствующие спектры на рисунке не показаны). Для образца (311)A пики, соответствующие свернутым акустическим фононам, обнаружены только в случае, когда фотон рассеивался в направлении, перпендикулярном направлению нанофасеток (геометрия $X(ZZ)-X$). По данным работ [1–11, 16, 17] нанофасетки вытянуты вдоль направления Y. Однако если оценить период латеральной свертки при скорости поперечного звука $3.65 \cdot 10^5$ см/с (эффективная скорость звука для одной из поперечных веток в направлении [01 − 1]), то период окажется равным не 3.2, а 1.6 нм. Как показано в работе [15], существование такого периода (половина от расстояния между фасетками) возможно при частичном заполнении наноканавок GaAs на поверхности AlAs при гетероэпитаксиальном росте.

Для подтверждения структурной анизотропии поверхность образца (311)A была изучена в топографической и фазовой модах с применением атомно-силового микроскопа (АСМ "Solver P47h", НТМДТ, Москва). Использовалось оборудование Центра коллективного пользования "Наноструктуры" СО РАН. Сканирование производилось в полуконтактном режиме посредством стандартных зондов ($v = (150-250)$ кГц) с характерным радиусом кривизны иглы ~ 10 нм. На рис. 3а демонстрируется

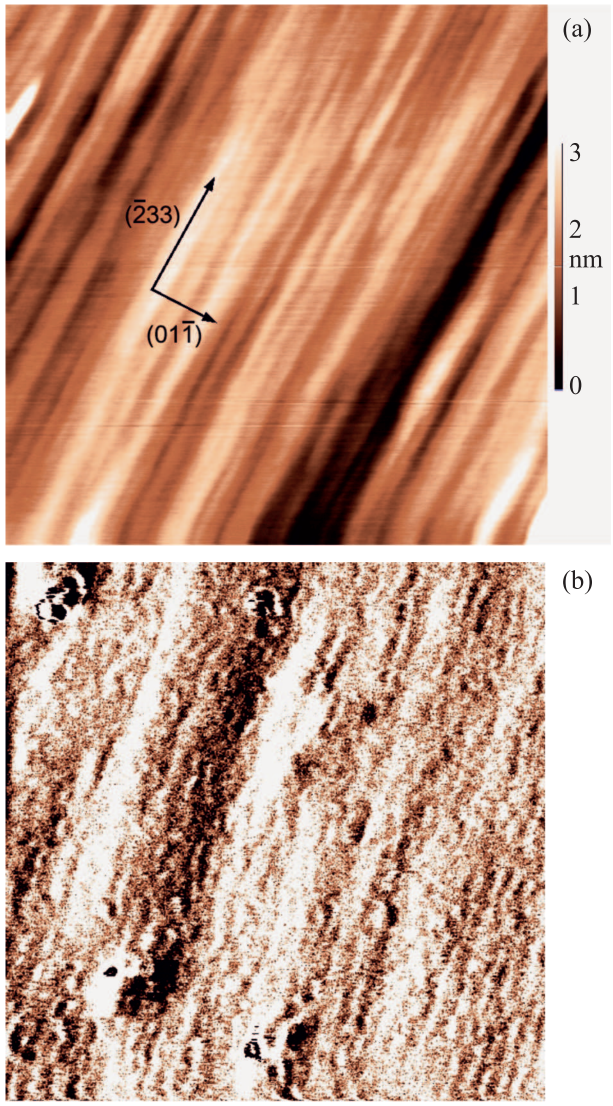

Рис. 3. Пример структурной анизотропии поверхности (311)A. (a) – 1×1 мкм^2, АСМ-изображение рельефа поверхности образца (311)A; (b) – 400×400 нм^2, АСМ-изображение фазового контраста этой же поверхности; вдоль макрорельефных областей наблюдаются более мелкие "тяжи", вытянутые в направлении, совпадающем с общим направлением нанофасетирования

характерная картина рельефа поверхности пленки в масштабе 1×1 мкм^2. На поверхности наблюдались вытянутые в направлении ($\bar{2}$33) особенности рельефа шириной 30–50 нм ("макротяжи"). Более детальное рассмотрение посредством фазового контраста АСМ

[18] (рис. 3b) позволило выявить дополнительную более тонкую структуру "макротяжей" – характерные периодические особенности с периодом в направлении $(01\bar{1})$ в несколько нанометров. Известно, что на фоне нанофасетирования с периодом 3.2 нм на поверхности (311)A развиваются фасетки с периодом 10–20 нм [19], которые мы и наблюдаем на рис. 3.

Итак, в настоящей работе для сверхрешетки GaAs/AlAs (311)A впервые была обнаружена свертка акустических фононов в направлении, перпендикулярном нанофасеткам.

Авторы благодарны В.В. Преображенскому и Б.Р. Семягину за приготовление экспериментальных образцов.

---

1. R. Nötzel, N.N. Ledentsov, L. Dawerits et al., Phys. Rev. Lett. **67**, 3812 (1991).
2. P.V. Santos, A. Cantarero, M. Cardona et al., Phys. Rev. B **52**, 1970 (1995).
3. M. Wassermeier, J. Sudijono, M.D. Johnson et al., Phys. Rev. B **51**, 14721 (1995).
4. D. Lüerβen, A. Dinger, H. Kalt et al., Phys. Rev. B **57**, 1631 (1998).
5. И.В. Белоусов, В.Ю. Давыдов, И.Э. Козин и др., Письма в ЖЭТФ **57**, 112 (1993).
6. Z.V. Popovic, E. Richter, J. Spitzer et al., Phys. Rev. B **49**, 7577 (1994).
7. A.J. Shields, Z.V. Popovic, M. Cardona et al., Phys. Rev. B **49**, 7584 (1994).
8. Z.V. Popovic, M.B. Vukmirovic, Y.S. Raptis et al., Phys. Rev. B **52**, 5789 (1995).
9. G. Armelles, P. Castrillo, P.D. Wang et al., Solid State Communications **94**, 613 (1995).
10. В.А. Володин, М.Д. Ефремов, В.Я. Принц и др., Письма в ЖЭТФ **66**, 45 (1997).
11. В.А. Володин, М.Д. Ефремов, В.В. Преображенский и др., ФТП **34**, 62 (2000).
12. *Light scattering in Solids V. Superlattices and other microstructures* (ed. by M. Cardona and G. Guntherodt), Springer Verlag, Berlin, 1989.
13. А.П. Шебанин, В.А. Гайслер, Т.В. Курочкина и др., Письма в ЖЭТФ **49**, 349 (1989).
14. В.А. Володин, Письма в ЖЭТФ **89**, 483 (2009).
15. В.А. Володин, ФТТ **53**, 377 (2011).
16. N.N. Ledentsov, D. Litvinov, A. Rosenauer et al., Journal of Electronic Materials **30**, 463 (2001).
17. D. Litvinov, A. Rosenauer, D. Gerthsen et al., Appl. Phys. Lett. **81**, 1080 (2002).
18. Д.В. Щеглов, А.В. Латышев, ЖЭТФ **133**, 271 (2008).
19. A.B. Vorob'ev, A.K. Gutakovsky, V.Ya. Prinz et al., Appl. Phys. Lett. **77**, 2976 (2000).