

## Дихроизм пропускания света массивом квантовых проволок GaAs, самоформирующихся на нанofасетированной поверхности (311)A

© 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\*\*\*

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,  
630090 Новосибирск, Россия

\* Новосибирский государственный университет,  
630090 Новосибирск, Россия

\*\* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

\*\*\* Laboratory of Electron Microscopy, University of Karlsruhe,  
76128 Karlsruhe, Germany

E-mail: volodin@isp.nsc.ru

(Поступила в Редакцию 9 июня 2004 г.)

Дихроизм пропускания света (зависимость пропускания от направления поляризации) был обнаружен в гофрированных сверхрешетках GaAs/AlAs, выращенных на нанofасетированной поверхности (311)A. Наблюдаемый эффект связывается со структурной анизотропией — формированием массива квантовых проволок GaAs, что было подтверждено данными высокоразрешающей электронной микроскопии. В сверхрешетках GaAs/AlAs, содержащих квантовые проволоки, была обнаружена также поляризационная анизотропия фотолуминесценции, наблюдаемой в желто-красном диапазоне длин волн.

Исследования сверхрешеток (СР) GaAs/AlAs, выращенных на периодически нанofасетированных поверхностях интересны для создания латеральных сверхрешеток, содержащих массивы квантовых проволок (КП) с уникальными оптическими и транспортными свойствами [1–3]. Подобные структуры являются перспективными для создания лазеров (в том числе каскадных) с вертикальным резонатором и фотоприемников инфракрасного диапазона на межподзонном поглощении для регистрации света, падающего под углами, близкими к нормали [1,3–5]. Возможность формирования массива КП в СР GaAs/AlAs, выращиваемых на нанofасетированной поверхности (311)A, впервые была продемонстрирована в [6]. Было показано, что при гетероэпитаксии GaAs/AlAs в условиях нанofасетирования поверхности (311)A происходит формирование вертикально-коррелированного массива КП, расстояние между которыми совпадает с периодом фасеток — 3.2 nm вдоль направления (011). КП вытянуты вдоль направления (233), модуляция их толщины определяется высотой фасеток, равной 1 nm.

Экспериментальные образцы были изготовлены с применением метода молекулярно-лучевой эпитаксии. Температура роста составляла 550°C, более подробно условия роста описаны в работе [7]. На подложке (311)A (разориентация подложки от направления (311) была менее 15') с буфером GaAs в 0.1 μm и AlAs в 0.2 μm были выращены СР GaAs/AlAs. Наличие нанofасетирования поверхности (возникновение структурной реконструкции поверхности (8 × 1)) подтверждалось получаемыми *in-situ* данными по дифракции быстрых электронов. Эффективная толщина слоев AlAs составляла 1.7 nm (десять монослоев в направлении (311)), а

слоев GaAs — 1 nm (образец 1) и 1.7 nm (образец 2). Количество периодов в образцах 1 и 2 составляло 150 и 100 соответственно. Для исследования спектров пропускания методом селективного травления были изготовлены мембраны с помощью удаления подложки до прозрачного AlAs-буфера. В качестве селективного травителя использовался раствор аммиака и перекиси водорода в соотношении 1:10. Спектры пропускания в поляризованном свете регистрировали, используя спектрометр СФ-30 в двухлучевой схеме с поляризаторами в канале с образцом и в канале сравнения. Для возбуждения фотолуминесценции (ФЛ) применялся Ar<sup>+</sup>-лазер (λ = 448 nm), а спектры ФЛ (с разрешением по поляризации с использованием в качестве поляризатора призмы Глана) регистрировались с применением спектрометра СДЛ-1 с фотоумножителем ФЭУ-79 в качестве приемника. Исследования методом высокоразрешающей электронной микроскопии (ВРЭМ) были проведены с использованием прибора Philips CM200 FEG/ST. Методика ВРЭМ исследований подробно изложена в работе [8].

На рис. 1 приведены спектры пропускания СР GaAs<sub>6</sub>/AlAs<sub>10</sub> (311)A (образец 1) для света, поляризованного вдоль и поперек направления КП. Спектры измерялись при комнатной температуре. Видно сильное различие в пропускании (а следовательно, и в поглощении) света с различной поляризацией — дихроизм. Различие наиболее существенно в диапазоне фундаментального поглощения света в сверхрешетке. Данные по зависимости поглощения от поляризации света коррелируют с данными по поляризационной анизотропии фотолуминесценции (рис. 2). Минимум в пропускании света, поляризованного вдоль направления роста КП (233), совпадает с максимумом в сигнале ФЛ (рис. 1 и 2).

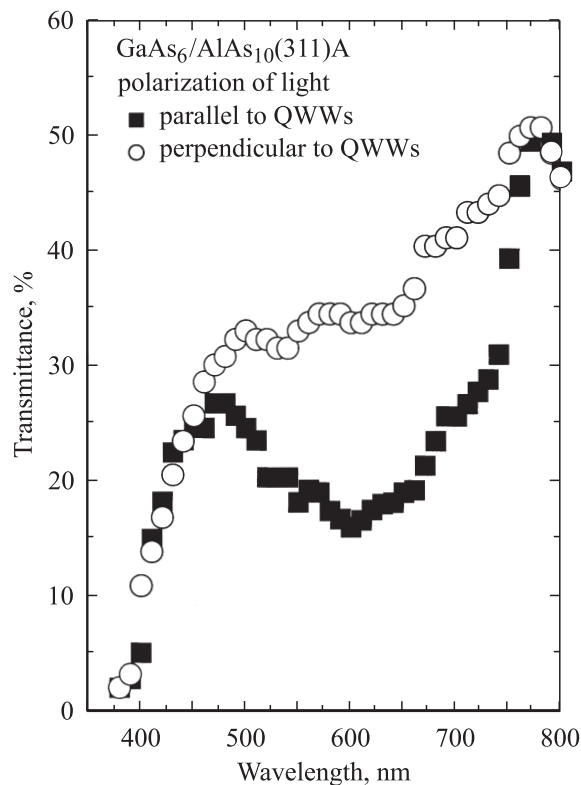


Рис. 1. Спектры пропускания сверхрешетки GaAs<sub>6</sub>/AlAs<sub>10</sub>(311)A, содержащей КП.

Сигнал ФЛ в данной поляризации примерно в 2.5 раза превышает сигнал ФЛ, поляризованный вдоль направления (01 $\bar{1}$ ), т.е. поперек КП. Дихроизм пропускания и выделенная поляризация сигнала ФЛ, по-видимому, связаны с зависимостью вероятности фундаментальных оптических переходов от поляризации электромагнитной волны. Необходимо отметить, что спектры ФЛ регистрировались при комнатной температуре, возбуждающий свет от аргонового лазера был поляризован вдоль направления ( $\bar{2}33$ ), плотность накачки составляла приблизительно 100 W/cm<sup>2</sup>. При этом наблюдался довольно интенсивный сигнал ФЛ (видимый глазом) в желто-красном спектральном диапазоне. Максимум ФЛ соответствовал оранжевому излучению.

В каждом росте помимо СР с ориентацией (311)A выращивались „side-by-side“ (т.е. в абсолютно тех же условиях) образцы-спутники с ориентацией (100) и (311)B. В полярных полупроводниках направления (311)A и (311)B не эквивалентны, а ориентация подложки (сторона А или В) определялась по анизотропии химического травления. Для образцов-спутников никакого сигнала ФЛ при комнатной температуре не наблюдалось, либо он был на два порядка меньше по интенсивности, а его максимум был сдвинут в длинноволновую область спектра [9].

Известно, что СР GaAs/AlAs с примерно равными толщинами слоев GaAs и AlAs при толщинах слоев

GaAs менее 3.5 nm являются сверхрешетками второго типа [10]. Но в нашем случае период сверхрешетки и толщины слоев оказываются ультрамалыми; следовательно, барьеры как для электронов, так и для дырок являются туннельно-тонкими и они не строго локализованы в слоях либо GaAs, либо AlAs. Таким образом, квантовые проволоки предположительно не являются изолированными, а представляют собой туннельно-связанный массив. При этом дополнительная латеральная симметрия, приводящая к свертке зоны Бриллюэна, возникает не только вдоль направления роста (311), но и вдоль направления, перпендикулярного нанопроводкам (01 $\bar{1}$ ). Латеральный период (период фасеток) вдоль этого направления составляет 3.2 nm. Высокая периодичность фасеток с периодом 3.2 nm неоднократно подтверждалась различными методиками, например по данным сканирующей электронной микроскопии [11]. По-видимому, свертка зоны Бриллюэна в двух направлениях обуславливает перемешивание электронных состояний из Г-, X- и L-долин, что приводит к более эффективной излучательной рекомбинации в данной структуре по сравнению со сверхрешетками, выращенными вдоль высокосимметричного направления (100). Можно также предположить, что менее интенсивная ФЛ (или вообще отсутствие сигнала) от СР GaAs/AlAs, выращенных на поверхности (311)B, связана с менее яр-

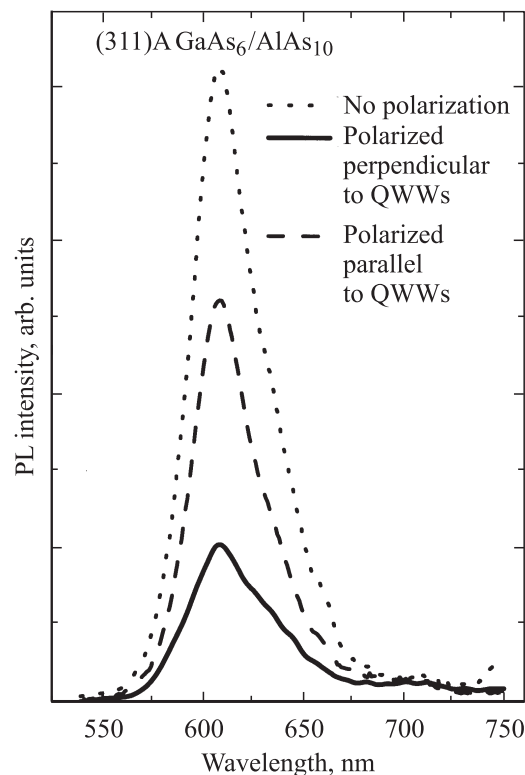
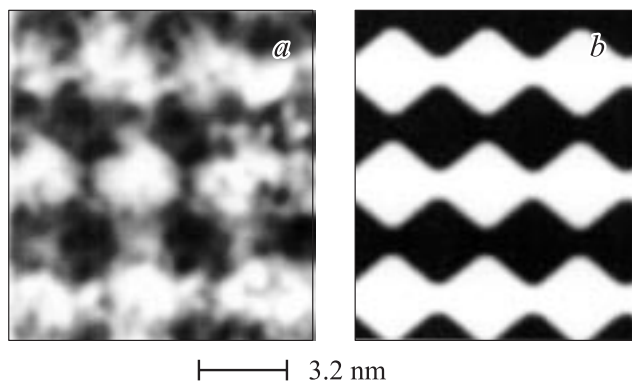


Рис. 2. Спектры фотолуминесценции сверхрешетки GaAs<sub>6</sub>/AlAs<sub>10</sub>(311)A, содержащей КП. Пунктирная линия — сигнал ФЛ без анализа поляризации, сплошная — излучение поляризовано вдоль направления (01 $\bar{1}$ ), штриховая — излучение поляризовано вдоль направления ( $\bar{2}33$ ).



**Рис. 3.** *a* — ВРЭМ-изображение (*cross section* на просвет вдоль направления  $(\bar{2}33)$ ) сверхрешетки GaAs<sub>10</sub>/AlAs<sub>10</sub> (311)A, выращенной в условиях нанофасетирования поверхности, *b* — модель ВРЭМ-изображения в случае формирования идеально периодического массива КП. Темные участки — участки, обогащенные галлием.

ко выраженным гофрированием (нанофасетированием) этой поверхности по сравнению с поверхностью (311)A. С другой стороны, фоновые примеси, внедряющиеся в слои из остаточной атмосферы ростовой камеры, могут по-разному реагировать с различными поверхностями. Вместе с тем, однако, сверхрешетки с более толстыми слоями ( $\sim 10$  nm) AlAs и GaAs, выращенные на (311)A-, (311)B- и (100)-ориентациях, показали сопоставимую интенсивность ФЛ.

В СР GaAs/AlAs (311)A с относительно большим периодом (6.5 nm и больше) ранее наблюдалась зависимость коэффициента отражения от поляризации света [12]. Наличие ярко выраженной структурной анизотропии в короткопериодных СР GaAs/AlAs (311)A было подтверждено ранее по данным комбинационного рассеяния света в этих структурах [13,14]. Прямые ВРЭМ-данные также подтверждают наличие КП в сверхрешетках, выращенных в условиях нанофасетирования поверхности (311)A (рис. 3). Данные получены для образца 2, выращенного в тех же условиях, что и образец 1. В этой сверхрешетке, содержащей КП, также наблюдалась поляризационная анизотропия сигнала ФЛ [9]. По ВРЭМ-данным, полученным способом *plan-view* на многослойных структурах, КП GaAs-AlAs были вытянуты вдоль направления фасеток  $(\bar{2}33)$  [8], а хорошая латеральная периодичность в 3.2 nm свидетельствовала о строгой вертикальной корреляции КП AlAs и GaAs.

Таким образом, можно предположить, что анизотропия оптических свойств (дихроизм пропускания света и поляризованный сигнал ФЛ) короткопериодных СР GaAs/AlAs, выращенных на нанофасетированной поверхности (311)A, определяется их структурной анизотропией — наличием массива КП.

Авторы признательны Р.А. Соотс за помощь в химических обработках при приготовлении мембран.

## Список литературы

- [1] 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**, 464 (2001).
- [2] M. Henini, P.A. Crump, P.J. Rodgers. *J. Cryst. Growth* **150**, 446 (1995).
- [3] P.O. Vaccaro, M.Hirai, K. Fujita, T. Watanabe. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **29**, 2221 (1996).
- [4] R. Nötzel, N.N. Ledentsov, L.A. Däweritz, K. Ploog. *U.S. Patent* 5, 714, 765 (Issued 3.02.1998, priority 29.01.1991).
- [5] N.N. Ledentsov, D. Litvinov, D. Gerthsen, G.A. Ljubas, V.V. Bolotov, B.R. Semyagin, V.A. Shchukin, I.P. Soshnikov, V.M. Ustinov, D. Bimberg. *Proc. of SPIE* **4656**, 33 (2002).
- [6] R. Nötzel, N.N. Ledentsov, L.A. Däweritz, H. Hohenstein, K. Ploog. *Phys. Rev. Lett.* **67**, 3812 (1991).
- [7] M.D. Efremov, V.A. Volodin, V.V. Preobrazhenskii, B.R. Semyagin, D.V. Marin, R.S. Matvienko, N.N. Ledentsov, I.P. Soshnikov, D. Litvinov, A. Rosenauer, D. Gerthsen. *Physica E* **23**, 3–4, 461 (2004).
- [8] D. Litvinov, A. Rosenauer, D. Gerthsen, N.N. Ledentsov, D. 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).
- [9] M.D. Efremov, V.A. Volodin, V.V. Bolotov, V.A. Sachkov, G.A. Lubas, V.V. Preobrazhenskii, B.R. Semyagin. *Solid State Phenom.* **60–70**, 507 (1999).
- [10] M. Nakayama, I. Tanaka, I. Kimura. *Japan. J. Appl. Phys.* **29**, 41 (1990).
- [11] L. Geelhaar, J. Marquez, K. Jacobi. *Phys. Rev. B* **60**, 15 890 (1999).
- [12] М.В. Белоусов, В.Л. Беркович, А.О. Гусев, Е.Л. Ивченко, П.С. Копьев, Н.Н. Леденцов, А.И. Несвижский. *ФТТ* **36**, 1098 (1994).
- [13] В.А. Володин, М.Д. Ефремов, В.Я. Принц, В.В. Преображенский, Б.Р. Семягин, А.О. Говоров. *Письма в ЖЭТФ* **66**, 45 (1997).
- [14] В.А. Володин, М.Д. Ефремов, В.В. Преображенский, Б.Р. Семягин, В.В. Болотов, В.А. Сачков. *ФТП* **34**, 62 (2000).