

## Фотолюминесценция и структура гетерограниц (311)А- и (311)В-ориентированных сверхрешеток GaAs/AlAs

Г. А. Любас<sup>1)</sup>, Н. Н. Леденцов<sup>+</sup>, Д. Литвинов\*, Д. Гертцен<sup>2)</sup>\*, И. П. Сошников<sup>+</sup>, В. М. Устинов<sup>+</sup>

*Институт физики полупроводников Сибирского отд. РАН, 630090 Новосибирск, Россия*

<sup>+</sup> *Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия*

*\* University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany*

Поступила в редакцию 11 декабря 2001 г.

После переработки 3 января 2002 г.

Методами фотолюминесценции и высокоразрешающей электронной микроскопии на просвет с применением фурье-обработки изображений исследованы сверхрешетки GaAs/AlAs, выращенные одновременно на подложках GaAs с ориентацией (311)А и (311)В. Для (311)В сверхрешеток была обнаружена периодическая корругированность (гофрировка) гетерограниц. Сравнение структуры (311)А и (311)В сверхрешеток показало, что корругированность имеет место в обоих случаях, а ее период вдоль направления [001] равен 3.2 нм. Причем в (311)В сверхрешетках корругированность выражена слабее и дополнительно присутствует модуляция (длинноволновый беспорядок) с характерным латеральным размером, превышающим 10 нм. Наличие длинноволнового беспорядка в (311)В сверхрешетках делает слабой вертикальную корреляцию областей, богатых GaAs и AlAs, которая хорошо наблюдается в (311)А. Оптические свойства (311)В сверхрешеток похожи на (100) и коренным образом отличаются от (311)А. В отличие от (311)В, для (311)А сверхрешеток наблюдается сильная поляризационная анизотропия фотолюминесценции. Показано, что в (311)А корругированных сверхрешетках с тонкими слоями GaAs и AlAs именно корругированность гетерограниц, а не кристаллографическая ориентация поверхности (311), играет определяющую роль в их оптических свойствах.

PACS: 75.55.Cr

В последние годы большое внимание уделяется исследованию эффекта корругации поверхности арсенида галлия при гетероэпитаксии на (311)А-ориентированных подложках, который был открыт в 1991 г. [1]. В основе данного эффекта лежит явление самоорганизации, когда фасетированная поверхность (311)А GaAs при некоторых условиях реконструируется в периодический массив микрофасеток (микроразрывов), направленных вдоль кристаллографического направления  $[2\bar{3}3]$  с периодом 3.2 нм вдоль направления  $[01\bar{1}]$  [1, 2]. Высота микрофасеток в одной из моделей составляет 1.02 нм [1], в другой – 0.34 нм [2] и является определяющим параметром для возможности получения корругированных сверхрешеток (КСР), которые представляют собой квазиодномерные системы с сильным эффектом размерного квантования носителей заряда. Последнее важно при исследовании квантовых явлений при комнатной температуре и создании приборов, работающих на межподзонных переходах при высоких температурах. Оптические свойства (311)А GaAs/AlAs КСР

подробно исследовались в работах [1, 3]. Однако исследования были ограничены сравнением (311)А- и (100)-ориентированных сверхрешеток (СР) [1, 3]. Недавно в таких структурах было обнаружено явление поляризационной анизотропии фотолюминесценции (ФЛ) [3, 4] и установлено, что при разной толщине слоев GaAs наблюдается разная природа поляризационной анизотропии [4]. При толщине более  $\sim 3.5$  нм природа поляризации объясняется в основном ориентационной анизотропией поверхности (311), в то время как при толщине менее  $\sim 3.5$  нм – преимущественно корругированностью (гофрировкой) гетерограниц [4]. Обнаруженная поляризационная анизотропия ФЛ хорошо согласуется с данными высокоразрешающей электронной микроскопии на просвет (ВПЭМ) [1, 3, 5], где показано наличие в образцах, выращенных на поверхности (311)А, корругированности обоих GaAs/AlAs и AlAs/GaAs интерфейсов с латеральным периодом в 3.2 нм и высотой 1 нм. Оптические свойства GaAs/AlAs СР второго типа, выращенные на поверхности (311), определяются ее поляризованностью. Структура границ раздела и фотолюминесцентные свойства СР, выращенных на (311)В поверхности

<sup>1)</sup> e-mail: lubas@isp.nsc.ru

<sup>2)</sup> D.Gerthsen.

Рис.1. Электронно-микроскопическое изображение структуры гетерограниц (311)В СР. Направление [311] ориентировано вверх, направление  $[01\bar{1}]$  – вправо. Темные слои – слои GaAs, светлые – AlAs. Видна нечеткая корругированность с латеральным периодом в 3.2 нм и длинноволновый беспорядок с характерным латеральным размером более 10 нм

GaAs, до настоящего времени изучены не были. В данной работе исследуется структура гетерограниц (311)В СР и проводится ее сравнение со структурой (311)А образцов. Анализируются различия в свойствах ФЛ СР, выращенных на (311)А- и (311)В-ориентированных поверхностях.

Исследуемые GaAs/AlAs СР были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs ориентации (311)А, (311)В и (100). Направления А и В определялись по анизотропии химического травления. Период в исследуемых СР равнялся 4 нм, а средняя толщина слоев GaAs и AlAs была одинаковой и составляла величину 2 нм. Образцы были исследованы методом ФЛ спектроскопии в диапазоне температур от 77 до 300 К. Источником возбуждения ФЛ служил Ar-лазер (488 нм) с типичной мощностью накачки 10–20 мВт (плотность мощности составляла 5–10 Вт/см<sup>2</sup>). Спектры ФЛ регистрировались с применением двойного монохроматора СДЛ-1 с разрешением 0.4 нм и фотоумножителя с катодом S-20. В качестве анализатора поляризации излученного от образцов света применялась бипризма Глана. На входе монохроматора стоял деполяризующий клин. Структура сверхрешеток исследовалась методом высокоразрешающей электронной микроскопии на просвет с обработкой изображений для выделения контраста, связанного с различным коэффициентом экстинкции электронов для AlAs и GaAs. Использовался микроскоп фирмы Philips CM200 FEG/ST.

На рис.1 приведено ВПЭМ изображение структуры гетерограниц (311)В сверхрешетки. Направление [311] ориентировано вверх, направление  $[01\bar{1}]$  – вправо. Темные слои – слои GaAs, светлые – AlAs. На изображении видна нечеткая корругированность с латеральным периодом величиной 3.2 нм. Латеральный период в 3.2 нм сильно замазывается длинноволновым (с характерным латеральным размером более 10 нм) беспорядком. Присутствие длинноволнового беспорядка приводит к слабой вертикальной корреляции областей, богатых GaAs и AlAs. В отличие от (311)А СР, где в вертикальном направлении возвышенные участки располагаются над возвышенными, а углубления над углублениями, в (311)В СР подобного рода корреляция практически отсутствует. С целью более глубокого анализа различий в устройстве гетерограниц (311)А и (311)В СР нами были получены фурье-образы процессированных изображений ВПЭМ. На рис.2а и б они соответственно приведены для (311)А и (311)В СР. Для более четкого выделения латеральной периодичности в изображениях на рис.2а и б было применено вычитание длинноволновой компоненты. Фурье-образы изображений для тех же (311)А и (311)В СР, но без вычитания приводятся на рис.2с и д. Как можно видеть, и в (311)А и в (311)В есть латеральный период величиной 3.2 нм. При этом в (311)В он проявляется намного слабее, и длинноволновая компонента его сильно замазывает, но максимум интенсивности все же есть. Наличие такого латерального периода для (311)В СР коррели-

Рис.2. Фурье-образы изображений ВПЭМ, полученные для (311)А (а) и (311)В (b) СР с вычитанием длинноволновой компоненты. На (с) и (d) соответственно показаны фурье-образы тех же самых сверхрешеток, но без вычитания. Как можно видеть, всюду есть латеральный период величиной 3.2 нм. При этом в (311)В он проявляется намного слабее и длинноволновая компонента его сильно замазывает, но максимум интенсивности все же есть

рует с недавними исследованиями методом сканирующей туннельной микроскопии [6], где наблюдалось периодическое фасетирование (расщепление) поверхности (311)В GaAs с аналогичным периодом. Подчеркнем, что в работе [6] обнаружено периодическое фасетирование поверхности (311)В GaAs, а нами обнаружена периодическая гофрировка границ раздела между слоями GaAs и AlAs. Обнаружение периодического расщепления поверхности еще не означает, что чередующиеся слои GaAs и AlAs, выращенные на ней, получатся также модулированными по высоте. Заметим, что обнаруженная латеральная периодичность в 3.2 нм для (311)В СР не такая четкая, как в (311)А, и ее достаточно хорошо можно увидеть лишь после удаления длинноволновой компоненты. В (311)А СР обнаружена очень четкая корругированность с высотой 1 нм и периодом в 3.2 нм, полностью соответствующая модели [1].

Обнаруженные существенные различия в устройстве гетерограниц (311)А- и (311)В-ориентированных СР приводят к сильному отличию их фотолюминесцентных свойств. На рис.3 рассмотрим спектры ФЛ от GaAs(2 нм)/AlAs(2 нм) СР, выращенных на

(311)А, (311)В и (100) поверхностях в одном росте и, следовательно, при одинаковых условиях. Спектры приведены для разных значений температуры. Если сравнить спектры от (311)В и (100) СР, то можно заметить, что они очень похожи между собой и коренным образом отличаются от спектров (311)А СР. В отличие от последней спектры (311)В и (100) СР содержат по одному максимуму, интенсивность которого растет с понижением температуры. Похожесть фотолюминесценции (311)В и (100) СР означает, что у (311)В СР не происходит заметной модификации электронно-оптических свойств вследствие корругации, как это происходит у (311)А. Более слабая корругированность и присутствие беспорядка в (311)В не позволяют сделать этого. В то время как дополнительное размерное квантование носителей заряда, возникающее из-за четкой корругированности в (311)А КСР, приводит к существенной модификации ее электронно-оптических и квантовых свойств. Происходит замешивание<sup>3)</sup> Г- и Х-минимумов зоны проводимости, в результате чего в спектре ФЛ от

<sup>3)</sup> Суть явления замешивания была описана в работе [3].

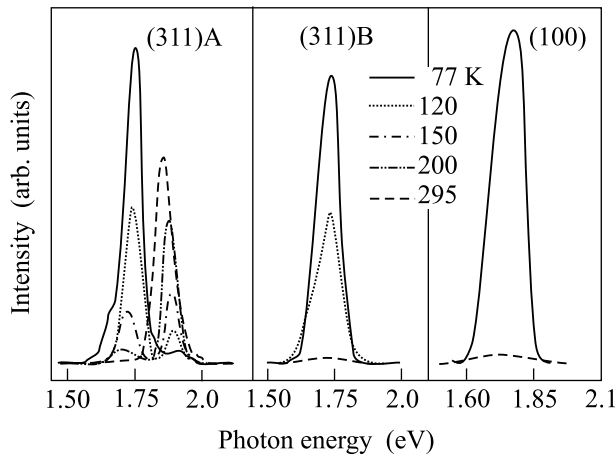


Рис.3. Спектры фотолюминесценции, записанные при различной температуре, от GaAs(2 нм)/AlAs(2 нм) СП, выращенных на поверхностях (311)А, (311)В и (100) одновременно в одном ростовом цикле. Поляризация света не анализировалась. Как можно видеть, спектры от (311)В и (100) сверхрешеток содержат по одному максимуму и очень похожи между собой, в то время как в спектрах от (311)А сверхрешетки наблюдается два максимума, что коренным образом отличает данные спектры от спектров (311)В и (100) сверхрешеток

(311)А КСР видно два максимума, как от переходов с участием  $X$ -минимума зоны проводимости, так и из замещенных  $\Gamma$ - и  $X$ -состояний. Отметим, что такое гигантское замешивание вызвано четкой корругированностью гетероинтерфейсов с периодом 3.2 нм и высотой 1 нм в исследуемой (311)А КСР. Таким образом, прослеживается очень четкая связь между характером корругированности и оптическими свойствами КСР.

На рис.4 показаны спектры ФЛ от (311)А- и (311)В-ориентированных СП при комнатной температуре и разной поляризационной геометрии. Поляризация света, возбуждающего ФЛ, была под углом  $45^\circ$  к направлению канавок корrugации, а поляризация света, излученного от образца, анализировалась в двух геометриях: вдоль (линия,  $S$ -компонента) и поперек (пунктир,  $P$ -компонента) канавок. (311)А и (311)В СП были выращены одновременно в одном ростовом цикле. Как можно видеть, у GaAs/AlAs СП, выращенной на (311)А поверхности, была обнаружена эффективная ФЛ при комнатной температуре. Свечение красного цвета от нее было видно глазом, и интенсивность была более чем в 50 раз выше, чем в случае (311)В СП (спектры последней на рис.4 приводятся увеличенными в 50 раз). Отличие объясняется формированием в (311)А СП хорошо структу-

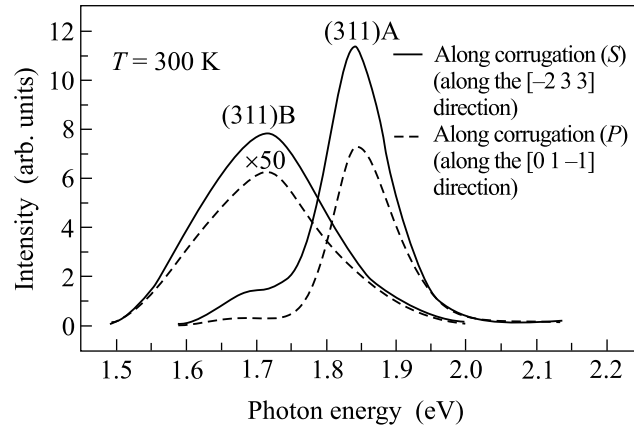


Рис.4. Спектры фотолюминесценции, записанные при комнатной температуре от GaAs(2 нм)/AlAs(2 нм) СП, выращенных на (311)А- и (311)В-ориентированных поверхностях в одном ростовом цикле. Поляризация света, возбуждающего фотолюминесценцию, была под углом  $45^\circ$  к направлению канавок корrugации, а поляризация света, излученного образцами, анализировалась вдоль (линия,  $S$ -компонента) и поперек (пунктир,  $P$ -компонента) канавок. Интенсивность спектров от (311)В сверхрешетки увеличена в 50 раз

рированных корrugированных слоев арсенида галлия, наличие которых в данном образце было подтверждено прямыми электронно-микроскопическими исследованиями. Латеральная локализация электронов в КСР (преимущественно движение электронов в КСР возможно только вдоль канавок корrugации) уменьшает безызлучательную поверхностную рекомбинацию, следствием чего и является высокая интенсивность ФЛ при комнатных температурах. Как и предполагалось, в спектрах ФЛ от (311)А КСР наблюдается сильная поляризационная анизотропия. Степень поляризации  $(S - P)/(S + P)$  для пика с энергией 1.69 эВ составила величину более 60% и для пика с энергией 1.84 эВ – более 22% (см. рис.4). Как можно видеть из того же рисунка, анизотропия ФЛ была существенно меньше в случае (311)В СП (максимум 1.71 эВ), а ее степень составила величину около 10%. Уменьшение поляризационной анизотропии для (311)В СП вполне объяснимо и связано с тем, что корrugация в ней (см. рис.1) не такая четкая, как в (311)А. При изменении температуры существенного изменения величины поляризационной анизотропии обнаружено не было. Таким образом, влияние корrugации в случае (311)В СП мало, а природа поляризации объясняется в основном анизотропией валентной зоны.

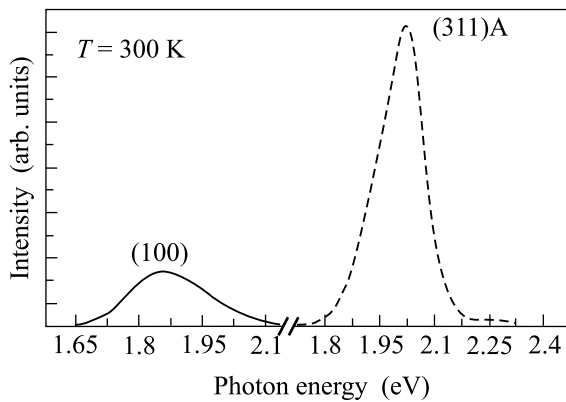


Рис.5. Спектры фотолюминесценции, записанные при комнатной температуре от GaAs/AlAs СР, выращенных в одном росте на подложках GaAs с ориентациями (311)А (максимум 2.02 эВ) и (100) (1.87 эВ). Количество осаждаемого GaAs соответствовало слою толщиной в 1 нм для поверхности (100). При этих условиях на (100) образуются плоские слои, а на (311)А – массив квантовых проволок. Максимум фотолюминесценции от сверхрешетки, содержащей квантовые проволоки, расположен при существенно больших значениях энергии. Увеличение энергии объясняется возникновением дополнительного размерного квантования носителей заряда в квантовых проволоках

Следующие данные также хорошо согласуются с моделью корругированности, предложенной в работах [1, 5]. На рис.5 приведены спектры ФЛ при комнатной температуре от GaAs/AlAs СР, выращенных одновременно на подложках GaAs с ориентациями (311)А и (100), при этом в одном росте осаждалось количество GaAs, соответствующее слою толщиной в 1 нм для поверхности (100). При этих условиях на поверхности (100) образуются плоские слои, а на (311)А – квантовые проволоки (КП), точнее, проволокоподобные кластеры [7]. Средняя толщина слоев AlAs была больше высоты корругированности (1 нм в модели [5]), то есть достаточной для того, чтобы были сформированы новые фасетки AlAs. Максимум ФЛ от СР, содержащей плоские слои GaAs, находится на 1.87 эВ. Максимум СР, содержащей КП, расположен в районе 2.02 эВ. Как можно видеть, максимум ФЛ СР, содержащей КП, смещен на 150 мэВ в сторону больших значений энергии по сравнению с СР, содержащей плоские слои. Такое значительное увеличение энергии объясняется изменением размерности системы при переходе от двумерных плоских слоев к одномерным КП. Полуширина линии в спектре ФЛ от (311)А СР уже, чем в (100). Понижение размерности уменьшает ширину подзон, а это приводит к более узким оптическим спектрам. При этом линия в слу-

чае (311)А СР может дополнительно уширяться из-за различной длины, которую могут иметь проволокоподобные кластеры (из-за ограничения движения носителей в направлении, параллельном КП). Отметим, что интенсивность ФЛ (311)А СР примерно в 5 раз выше, чем у (100) СР. В одномерных системах рассеяние на оптических фононах сильно подавлено. Это приводит к уменьшению безызлучательной и, как следствие, к увеличению излучательной рекомбинации и является причиной наблюдаемого увеличения интенсивности в КП в нашем случае. Некоторое дополнительное увеличение интенсивности может также происходить вследствие увеличения плотности состояний в случае (311)-ориентированных систем.

Таким образом, прямые электронно-микроскопические исследования высокого разрешения (311)А и (311)В СР показали наличие в обоих случаях корругированности с латеральным периодом величиной 3.2 нм. В случае (311)В СР корругированность гетерограниц наблюдается впервые. Причем, в (311)А СР наблюдается очень ясная корругированность с высотой 1 нм, полностью соответствующая модели [1], в то время как в (311)В СР, выращенных одновременно с (311)А СР, корругированность проявляется существенно слабее и наблюдается большое количество длинноволнового беспорядка. Наличие длинноволнового беспорядка в (311)В СР делает слабой вертикальную корреляцию областей, богатых GaAs и AlAs, которая хорошо наблюдается в случае (311)А СР. Характер корругированности гетерограниц, выявленный в (311)В СР, не позволяет сделать их оптические свойства похожими на (311)А, где корругированность полностью удовлетворяет модели [1]. В отличие от (311)В, для (311)А СР наблюдается сильная поляризационная анизотропия фотолюминесценции, когда интенсивность света, поляризованного в направлении вдоль канавок корругации гетероинтерфейса, существенно выше, чем поперек. В спектрах ФЛ от (311)В СР поляризационная анизотропия существенно меньше. Таким образом, подтверждается вывод, сделанный в работе [4], что природа поляризации для (311)А КСР с тонкими слоями GaAs и AlAs определяется, в основном, корругированностью гетерограниц. Обнаружено, что оптические свойства (311)В СР похожи на обычные (100) СР и коренным образом отличаются от (311)А. Установлено, что в отличие от (311)А, у (311)В СР не происходит заметной модификации электронно-оптических свойств вследствие корругации. Показано, что в (311)А КСР с тонкими слоями GaAs и AlAs именно корругированность гетерограниц, а не отличие кристаллографической ориентации поверхности (311) от поверхности

(100), играет определяющую роль в их оптических свойствах.

Один из авторов (Г. А. Любас) выражает благодарность Международному благотворительному научному фонду им. К. И. Замараева.

1. R. Nötzel, N. N. Ledentsov, L. A. Däweritz et al., Phys. Rev. Lett. **67**, 3812 (1991).
2. M. Wassermeier, J. Sudijono, M. D. Johnson et al., Phys. Rev. **B51**, 14721 (1995).
3. R. Nötzel, N. N. Ledentsov, L. A. Däweritz et al., Phys. Rev. **B45**, 3507 (1992).
4. Г. А. Любас, В. В. Болотов, Письма в ЖЭТФ **72**, 294 (2000) [JETP Lett. **72**, 205 (2000)].
5. N. N. Ledentsov, D. Litvinov, A. Rosenauer et al., J. Electronic Materials **30**, 463 (2001).
6. Z. M. Wang, L. Däweritz, and K. H. Ploog, Appl. Phys. Lett. **78**, 712 (2001).
7. Ж. И. Алферов, А. Ю. Егоров, А. Е. Жуков и др., ФТП **26**, 1715 (1992).