

Структура гетерограниц и фотолюминесцентные свойства GaAs/AlAs-сверхрешеток, выращенных на (311)A- и (311)B-ориентированных поверхностях: сравнительный анализ

© Г.А. Любас[¶], Н.Н. Леденцов*, Д. Литвинов[†], Б.Р. Семягин, И.П. Сошников*, В.М. Устинов*, В.В. Болотов, D. Gerthsen[†]

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

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

[†] University of Karlsruhe, D-76128 Karlsruhe, Germany

(Получена 10 декабря 2001 г. Принята к печати 18 декабря 2001 г.)

Фотолюминесцентные свойства GaAs/AlAs-сверхрешеток второго типа, выращенных на поверхности (311), определяются ее поляриностью. Ранее электронно-микроскопические исследования показали наличие в образцах, выращенных на поверхности (311)A, гофрировки (*corrugation*) обоих GaAs/AlAs- и AlAs/GaAs-интерфейсов с высотой 1 нм и периодом 3.2 нм. В настоящей работе в электронно-микроскопических картинах и их фурье-изображениях сверхрешетки, выращенной на поверхности (311)B, латеральная периодичность в 3.2 нм также выявляется, однако выражена она слабо, что связано с нечетким гофрированием и наличием длинноволнового (> 10 нм) беспорядка. Спектры фотолюминесценции сверхрешетки GaAs/AlAs на поверхности (311)A сильно поляризованы относительно направления гофрирования интерфейса в отличие от сверхрешетки (311)B, где гофрировка выражена слабо. Нами обнаружено, что гигантское замешивание Г- и X-минимумов зоны проводимости имеет место только для сверхрешеток с сильно гофрированными интерфейсами и позволяет получить ярко-красную люминесценцию вблизи 650 нм вплоть до комнатной температуры. Обнаруженные отличия для сверхрешеток, выращенных на поверхностях (311)A и (311)B, подтверждают, что именно гофрирование интерфейса, а не кристаллографическая ориентация играет определяющую роль в оптических свойствах сверхрешеток (311).

В последние годы большой интерес уделяется исследованию эффекта периодического фасетирования поверхности (311)A GaAs, который был открыт в 1991 году [1]. При типичных для молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) условиях поверхность (311)A GaAs реконструируется в периодический массив микрофасеток (микроканалов), направленных вдоль кристаллографического направления [233] с периодом 32 Å вдоль направления [011̄] [1]. Высота микроканалов составляет 10.2 Å [1]. При гетероэпитаксиальном росте на такой фасетированной поверхности чередующихся слоев GaAs и AlAs получают сверхрешетки (СР) с периодически модулированными по толщине слоями. Такие сверхрешетки принято называть латеральными сверхрешетками (ЛСР), а модуляцию толщины слоев — гофрировкой („corrugation“) слоев, или гетерограниц. ЛСР 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. Недавно в таких структурах было обнаружено явление поляризационной анизотропии фотолюминесценции (ФЛ) [2–4] и установлено, что при разной толщине GaAs-слоев наблюдается разная природа поляризационной анизотропии [3,4]. Для толщины более ≈ 35 Å природа поляризации объяс-

няется в основном ориентационной анизотропией поверхности (311), в то время как при толщине менее ≈ 35 Å — преимущественно гофрировкой гетерограниц [3,4]. Обнаруженная поляризационная анизотропия ФЛ хорошо согласуется с данными высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии (ВПЭМ) [5], которые показали наличие в образцах, выращенных на поверхности (311)A, гофрирования обоих GaAs/AlAs- и AlAs/GaAs-интерфейсов с латеральным периодом в 3.2 нм и высотой гофрирования 1 нм. Настоящая работа посвящена сравнительному исследованию ФЛ и структуры сверхрешеток GaAs/AlAs, выращенных на (311)A- и (311)B-ориентированных поверхностях.

Исследуемые СР GaAs/AlAs были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs с ориентацией (311)A, (311)B и (100). Направления A и B определялись по анизотропии химического травления. Период в исследуемых СР равнялся 4 нм, а средняя толщина GaAs и AlAs слоев 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/см²). 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

[¶] E-mail: lubas@isp.nsc.ru

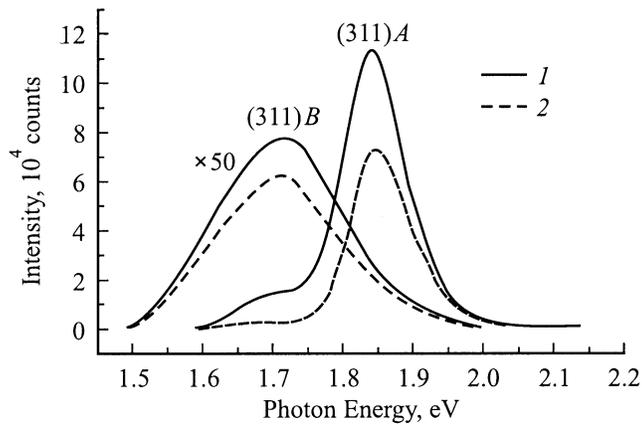


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции сверхрешеток GaAs/AlAs, выращенных на поверхностях (311)А и (311)В в одном ростовом цикле. Спектры сверхрешетки (311)В увеличены в 50 раз. $T = 300$ К. Поляризация света, излученного образцами, анализировалась в плоскости слоев сверхрешеток для случаев: вдоль (1 — S-компонента) и поперек (2 — P-компонента) канавок гофрировки.

образцов света применялась бипризма Глана. На входе монохроматора стоял деполаризующий 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.

На рис. 1 показаны спектры ФЛ сверхрешеток GaAs/AlAs, выращенных на поверхностях (311)А и (311)В в одном росте и, следовательно, при одинаковых условиях. Измерения проходили при комнатной температуре. У СР GaAs/AlAs, выращенной на фасетированной поверхности (311)А, 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 СР на поверхности (311)В (спектры последней на рис. 1 приводятся увеличенными в 50 раз). Отличие объясняется формированием в СР (311)А хорошо структурированных гофрированных слоев арсенида галлия, наличие которых в данном образце было подтверждено прямыми электронно-микроскопическими исследованиями. Латеральная локализация электронов в ЛСР (преимущественно движение электронов в ЛСР возможно только вдоль канавок гофрирования) уменьшает безызлучательную поверхностную рекомбинацию, следствием чего и является высокая интенсивность ФЛ при комнатных температурах. Возбуждающий ФЛ свет падал под углом к плоскости слоев СР. Направление вектора электрического поля E (поляризация возбуждающего излучения) в плоскости слоев СР составляло угол 45 градусов с направлением канавок гофрировки (направлением $[2\bar{3}3]$). ФЛ регистрировалась по нормали к плоскости слоев. Поляризация света, излученного

образцами, анализировалась в плоскости слоев СР для случаев: вдоль (линия — S-компонента) и поперек (пунктир — P-компонента) канавок. Как и предполагалось, в спектрах ФЛ ЛСР (311)А наблюдается сильная поляризационная анизотропия. Степень поляризации $(S-P)/(S+P)$ для пика с энергией 1.69 эВ составила

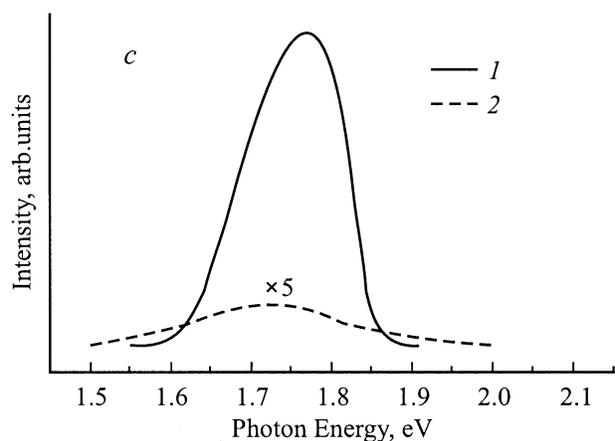
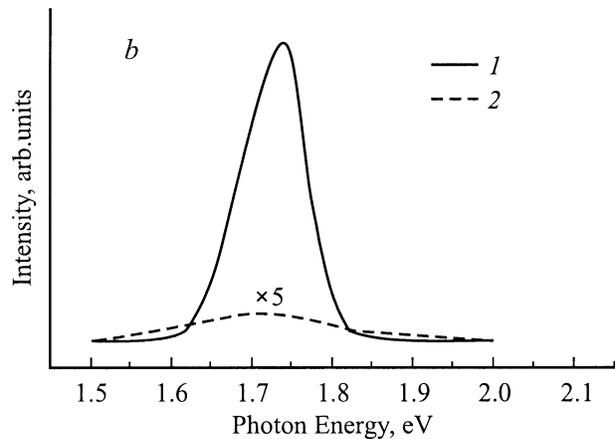
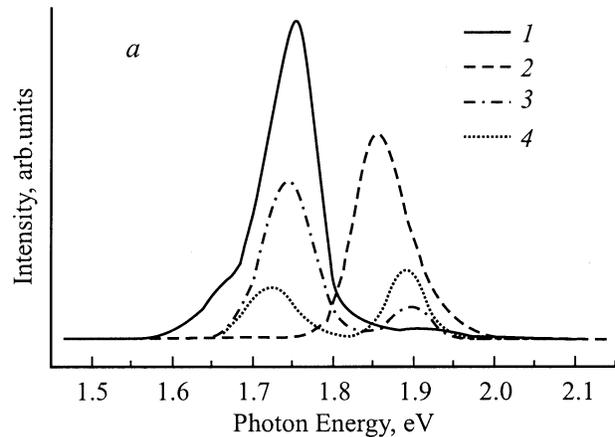


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции сверхрешеток GaAs/AlAs, выращенных на поверхностях (311)А (рис. 2, а), (311)В (рис. 2, б) и (100) (рис. 2, с) в одном ростовом цикле. Температура, К: 1 — 77, 2 — 295, 3 — 117, 4 — 150. Спектры записаны без анализатора. Для сверхрешеток (311)В и (100) спектры при комнатной температуре увеличены в 5 раз.

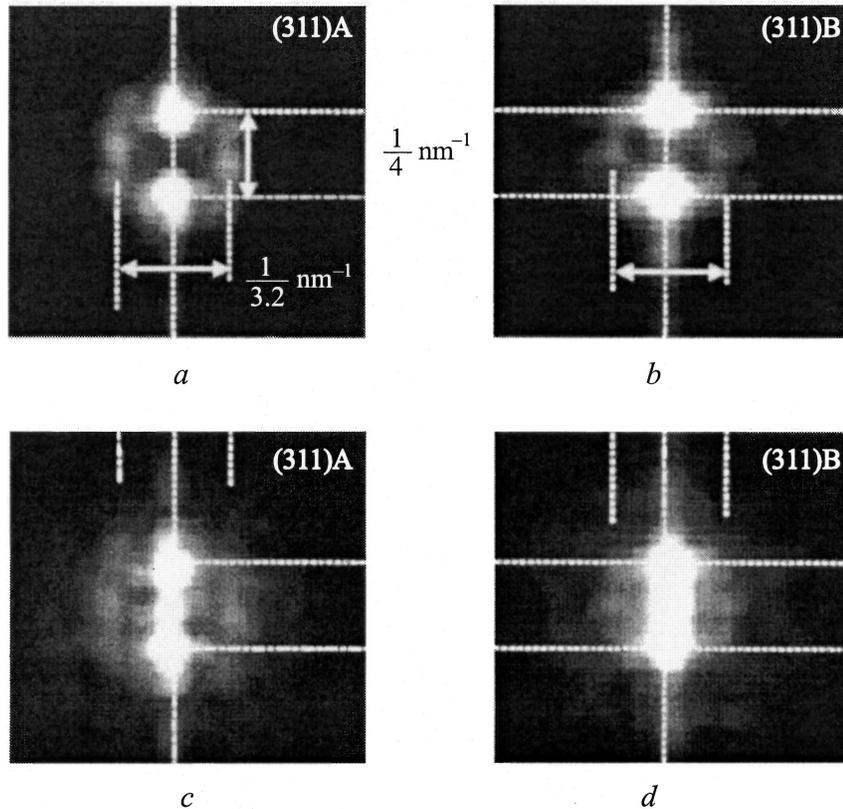


Рис. 3. Фурье-образцы изображений ВПЭМ, полученные для сверхрешеток (311)А (рис. 3, *a*) и (311)В (рис. 3, *b*) с вычитанием длинноволновой компоненты. На рис. *c* и *d* соответственно показаны фурье-образы тех же самых сверхрешеток, но без вычитания. Для обеих сверхрешеток наблюдается латеральный период величиной 3.2 нм. При этом в (311)В его видно намного хуже, чем в (311)А, и длинноволновая компонента его сильно замазывает.

величину более 60% и для пика с энергией 1.84 эВ — примерно 22% (рис. 1). Как можно видеть из того же рисунка, анизотропия ФЛ была существенно меньше в случае СР (311)В (максимум 1.71 эВ), а ее степень составила величину около 10%. Уменьшение поляризационной анизотропии для СР (311)В вполне объяснимо и связано с тем, что гофрировка в ней не такая четкая, как в (311)А. Таким образом, в случае СР (311)В влияние гофрировки гетерограниц мало, а природа поляризации объясняется в основном анизотропией валентной зоны. Отметим, что при изменении температуры существенно изменения величины поляризационной анизотропии не наблюдается.

Рассмотрим спектры ФЛ СР с ориентацией (311)А, (311)В и (100), которые приведены на рис. 2 для разных значений температуры. СР выращены в одном ростовом цикле. Если сравнить спектры СР (311)В и (100) (рис. 2, *b* и *c* соответственно), то можно заметить, что они очень похожи между собой и коренным образом отличаются от спектров СР (311)А (рис. 2, *a*). В отличие от последней спектры СР (311)В и (100) содержат по одному максимуму, интенсивность которого растет с уменьшением температуры. Похожесть фотолюминесценции СР (311)В и (100) означает, что у сверхре-

шетки (311)В не происходит заметной модификации электронно-оптических свойств вследствие гофрировки гетерограниц, как это происходит у СР (311)А. Более слабое гофрирование и присутствие длинноволнового беспорядка в (311)В не позволяют сделать этого. В то время как дополнительное размерное квантование носителей заряда, возникающее из-за модуляции толщины слоев в ЛСР (311)А, приводит к существенной модификации ее электронно-оптических и квантовых свойств. Происходит замешивание¹ Г и X-минимумов зоны проводимости. В результате чего в спектре ФЛ ЛСР (311)А видно два максимума, как от переходов с участием X-минимума зоны проводимости, так и из замешенных Г–X-состояний. Отметим, что такое гигантское замешивание наблюдается впервые и связано с четкой гофрировкой гетерограниц с периодом 3.2 нм и высотой 1 нм в исследуемой ЛСР (311)А.

Обнаруженное существенное отличие спектров ФЛ между СР (311)А и (311)В согласуется с прямыми исследованиями методом высокоразрешающей электронной микроскопии. На рис. 3 приводятся Фурье-образы изображений ВПЭМ, полученные для СР (311)А

¹ Явление замешивания впервые наблюдалось в работе [2].

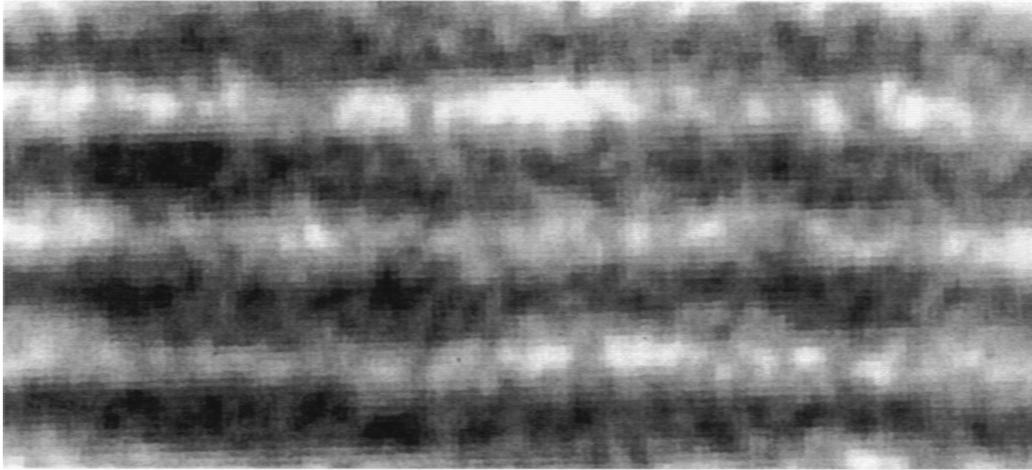


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры гетерограниц сверхрешетки (311)В. Вертикально — направление [311], горизонтально — направление [011]. Светлые слои — слои AlAs. Высота изображения 16 нм. Видны: слабая гофрировка с латеральным периодом в 3.2 нм и длинноволновый беспорядок с характерным латеральным размером более 10 нм.

(рис. 3, *a*) и (311)В (рис. 3, *b*) с вычитанием длинноволновой компоненты, которое применялось с целью выделения латеральной периодичности. На рис. 3, *c* и *d* приводятся фурье-образы изображений для тех же СР (311)А и (311)В, но только без вычитания. 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 СР (311)В согласуется в недавними исследованиями сканирующей туннельной микроскопии [6]. Заметим, что обнаруженная латеральная периодичность в 3.2 нм для СР (311)В не такая четкая, как в (311)А, и ее достаточно хорошо можно увидеть лишь после удаления длинноволновой компоненты. Кроме того, как следует из приведенного ВПЭМ изображения на рис. 4, в СР на поверхности (311)В практически отсутствует вертикальная корреляция областей, богатых GaAs и AlAs.

Таким образом, фурье-анализ ВПЭМ изображений, полученных от сверхрешеток (311)А и (311)В, показал наличие в обоих случаях латерального периода величиной 3.2 нм. При этом в СР (311)В латеральный период не так заметен, как в (311)А. Причиной этому является более слабая гофрировка и присутствие большого количества длинноволнового беспорядка. В СР (311)А обнаружена очень ясная гофрировка с высотой 1 нм и четкой периодичностью в 3.2 нм. Установлено, что гигантское замешивание Г- и Х-минимумов зоны проводимости имеет место только для сверхрешеток с сильно гофрированными интерфейсами и позволяет получить ярко-красную люминесценцию вблизи 650 нм вплоть до комнатной температуры. В спектрах ФЛ СР (311)А наблюдается сильная поляризационная анизотропия (интенсивность света, поляризованного в направлении вдоль канавок

гофрирования интерфейса, существенно выше, чем поперек). В спектрах СР (311)В анизотропия существенно меньше. Таким образом, подтверждается вывод, сделанный в работе [3], что природа поляризации для ЛСР (311)А не объясняется только одной ориентационной анизотропией поверхности (311), а определяется в основном гофрированием гетерограниц. В отличие от (311)А у сверхрешетки (311)В не происходит заметной модификации электронно-оптических свойств вследствие гофрировки. По своим электронным свойствам она больше похожа на обычную СР (100). Вышеизложенные исследования являются важными как с научной точки зрения, так и в плане приборных перспектив и могут быть применены, например, для разработки планарных приемников ИК излучения на межподзонных переходах с поляризационно-чувствительным детектированием и нормальным падением света, ИК иллучателей, планарных Esaki-Tsu сверхрешеток для СВЧ применений (в том числе трехтерминальных, с затвором, например усилителей СВЧ) и т.д.

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

Список литературы

- [1] R. Nötzel, N.N. Ledentsov, L.A. Däweritz, M. Hohenstein, K. Ploog. *Phys. Rev. Lett.*, **67**, 3812 (1991).
- [2] R. Nötzel, N.N. Ledentsov, L.A. Däweritz, K. Ploog, M. Hohenstein. *Phys. Rev. B*, **45**, 3507 (1992).
- [3] Г.А. Любас, В.В. Болотов. *Письма ЖЭТФ*, **72**, 294 (2000). [*JETP Lett.*, **72**, 205 (2000)].
- [4] G.A. Lyubas, V.V. Bolotov. *Abstracts 9th Int. Conf. on Defects: Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors* (Rimini, Italy, Sept. 24–28, 2001) p. 214.

- [5] 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, V.E. Efremov, V.V. Preobrazhenskii, B.P. Semyagin, D. Bimberg, Zh.I. Alferov. *J. Electron. Mater.*, **30**, 463 (2001).
- [6] Z.M. Wang, L. Däweritz, K.H. Ploog. *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 712 (2001).

Редактор Л.В. Беляков

Interface structure and photoluminescence properties of GaAs/AlAs superlattices grown on (311)A- and (311)B-oriented surfaces: comparative study

*G.A. Lyubas, N.N. Ledentsov**, *D. Litvinov†*,
*B.R. Semyagin, I.P. Soshnikov**, *V.M. Ustinov**,
V.V. Bolotov, D. Gerthsen†

Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

* Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

† University of Karlsruhe,
D-76128 Karlsruhe, Germany

Abstract Photoluminescence properties of type II GaAs/AsAs superlattices grown on (311) surface has been determined by its polarity. Earlier, using a high-resolution transmission electron microscopy (HRTEM) it was found that both GaAs/AlAs and AlAs/GaAs interfaces in superlattices grown on (311)A surface are corrugated with a height of 1 nm and a lateral periodicity of 3.2 nm. In the present work in HRTEM and Fourier transform images of superlattice grown on (311)B surface the 3.2 nm lateral periodicity is also revealed, however, it is rather illegible because of not clear corrugating and due to the presence of long-wavelength (> 10 nm) disorder. Photoluminescence spectra of GaAs/AlAs superlattice grown on (311)A surface are strongly polarized in relation to the direction of interface corrugation unlike the superlattice grown on (311)B surface, where corrugation was weak. We found that strong mixing between Γ and X states in the conduction band took place only in the case of superlattices with strongly corrugated interfaces and allowed realization of bright-red photoluminescence at room temperature at 650 nm. Observed differences between superlattices grown on (311)A and (311)B surfaces confirm that it is the interface corrugation (not the crystallographic orientation) that plays a crucial role in optical properties of (311) superlattices.