

# Оценка пространственной неоднородности гетерограниц в квантовых ямах GaAs/AlGaAs методом спектроскопии фотоотражения

© Л.П. Авакянц<sup>+</sup>, П.Ю. Боков<sup>+</sup>, Г.Б. Галиев<sup>\*†</sup>, И.П. Казаков<sup>•</sup>, А.В. Червяков<sup>+</sup>

<sup>+</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (физический факультет), 119992 Москва, Россия

<sup>\*</sup> Институт СВЧ полупроводниковой электроники Российской академии наук, 113105 Москва, Россия

<sup>•</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 119991 Москва, Россия

(Получена 17 февраля 2015 г. Принята к печати 25 февраля 2015 г.)

Методом спектроскопии фотоотражения исследованы гетероструктуры на основе GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами шириной от 20 до 35 нм. Установлено, что параметр уширения спектральных линий, связанных с межзонными переходами, увеличивается с ростом энергии межзонного перехода и уменьшается с увеличением ширины квантовой ямы. Наблюдаемое уменьшение ширины спектральных линий с ростом ширины квантовой ямы связывается с пространственной неоднородностью гетерограниц, которая для исследованных структур составила 0.34–0.39 нм (1.3–1.4 монослоя).

## 1. Введение

Полупроводниковые структуры с квантовыми ямами на основе GaAs/AlGaAs широко применяются для создания светодиодов, лазеров, сверхбыстрых транзисторов и других приборов опто- и микроэлектроники [1]. Одним из важных факторов, определяющих физические свойства такого рода структур, является качество гетерограниц, которое определяет такие параметры, как ширина линий излучения, связанных с межзонными и межподзонными переходами, интенсивность электрон-фононного взаимодействия [2], подвижность носителей [3], долговечность изготавливаемых полупроводниковых приборов.

В настоящей работе для оценки качества гетерограниц используется метод спектроскопии фотоотражения. Из спектров фотоотражения гетероструктур с квантовыми ямами на основе GaAs/AlGaAs определены параметры уширения линий, связанных с межзонными переходами. Рассмотрены основные механизмы, оказывающие влияние на уширение спектральных линий.

## 2. Исследуемые образцы

Исследуемые образцы были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Образцы с квантовыми ямами шириной 20 и 30 нм выращивались на подложках GaAs с ориентацией (001), на которые последовательно наносились полуизолирующие слои: буферный слой GaAs (толщина 320 нм), барьер  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (толщина 20 нм), квантовая яма GaAs, барьер  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (толщина 30 нм), защитный слой GaAs (толщина 5 нм). Относительная концентрация алюминия в тройных соединениях была в пределах  $x = 0.20\text{--}0.24$ .

Образцы с квантовыми ямами шириной 26 и 35 нм выращивались на подложках GaAs с ориентацией (001), на которые последовательно наносились полуизолирующие слои: буферный слой GaAs (толщина 500 нм), барьер  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (толщина 30 нм), квантовая яма GaAs, барьер  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (толщина 30 нм), защитный слой GaAs (толщина 8 нм).

## 3. Методика эксперимента

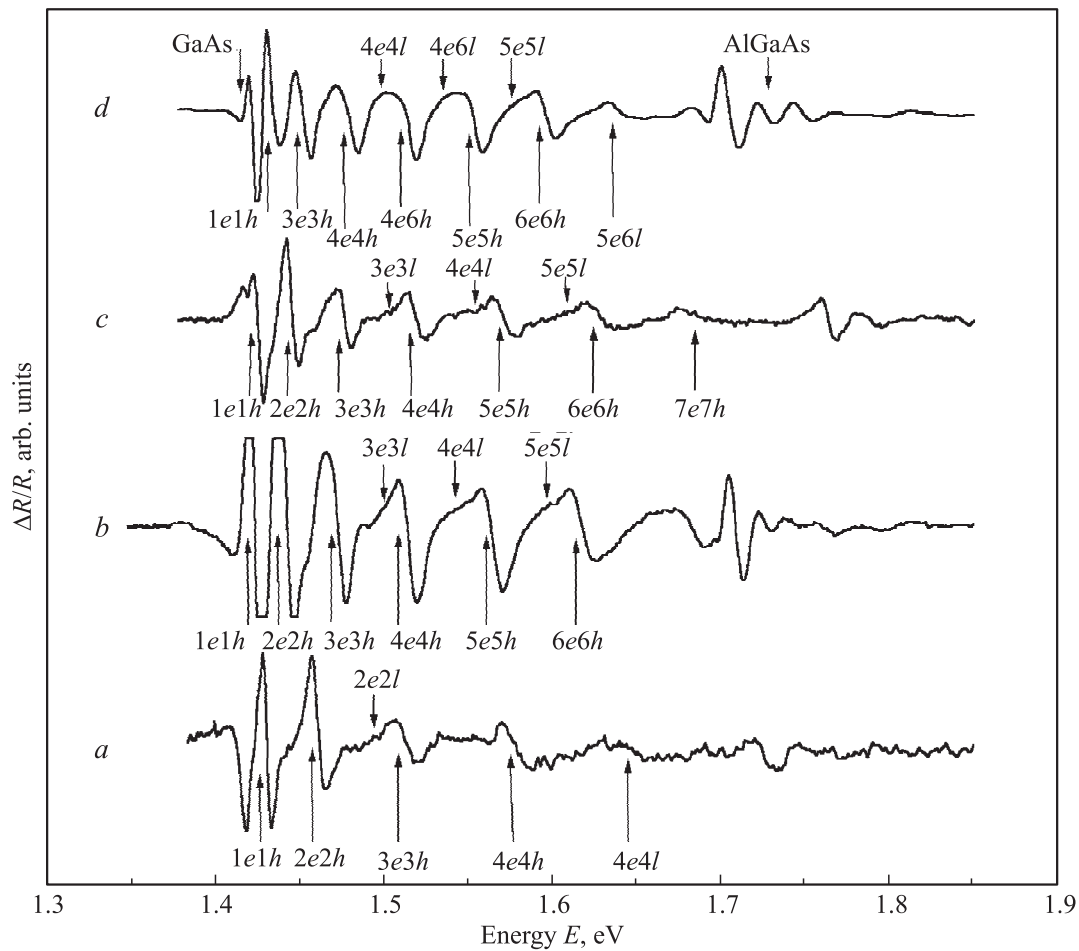
Спектры фотоотражения регистрировались на автоматизированной установке с использованием двойного монохроматора [4,5]. В качестве модулирующего излучения использовалась линия 632.8 нм He–Ne-лазера (мощность 1 мВт). Частота модуляции составляла 340 Гц. Ширина аппаратной функции спектрометра не превышала 1 мэВ. Регистрация спектров фотоотражения осуществлялась при комнатной температуре.

## 4. Результаты и обсуждение

Спектры фотоотражения гетероструктур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами приведены на рис. 1. Во всех спектрах присутствуют линии в области 1.41 и 1.70–1.77 эВ, связанные с фундаментальными переходами  $E_{01}$  GaAs и  $E_{02}$   $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  соответственно. Линии, связанные с барьерами  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , представляют собой осцилляции Франца–Келдыша.

Линии в области энергий 1.41–1.70 эВ связаны с переходами между уровнями размерного квантования электронов зоны проводимости и дырок валентной зоны. Идентификация наблюдаемых в спектрах фотоотражения межзонных переходов была нами осуществлена ранее в работах [6,7]. Использовалась модель огибающей волновой функции для прямоугольного потенциала с учетом различия эффективных масс носителей в яме и

<sup>†</sup> E-mail: galiev\_galib@mail.ru



**Рис. 1.** Спектры фотоотражения гетероструктур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами шириной 20 (a), 26 (b), 30 (c) и 35 нм (d). Символами  $penh$  ( $penl$ ) обозначены переходы между  $n$ -уровнем зоны проводимости и  $m$ -уровнем подзон тяжелых ( $h$ ) и легких ( $l$ ) дырок валентной зоны.

барьере и непараболичности закона дисперсии в зоне проводимости. Глубина квантовой ямы в зоне проводимости принималась равной 0.65 от разницы энергий межзонных переходов  $E_{02} - E_{01}$  слоев AlGaAs и GaAs соответственно.

Рассматриваемые линии имеют вид, характерный для низкополювого случая, и могут быть описаны формулой Аспнеса [8]

$$\frac{\Delta R}{R}(E) = \text{Re} \left[ A e^{i\varphi} (\hbar\omega - E_i + i\Gamma)^{-m} \right], \quad (1)$$

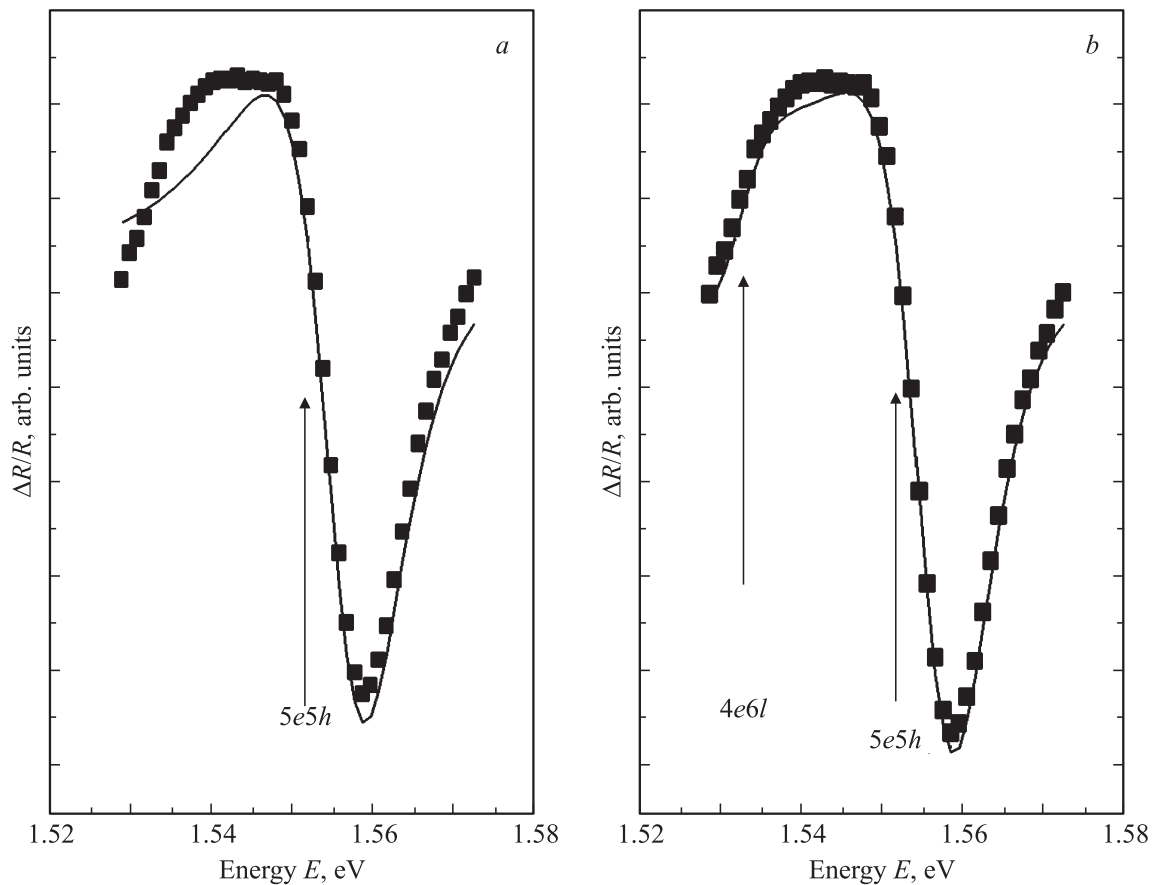
где  $A$ ,  $\varphi$  — амплитудный и фазовый параметры,  $\hbar\omega$  — энергия фотонов зондирующего излучения,  $E_i$  — положение спектральной особенности,  $\Gamma$  — феноменологический параметр уширения,  $m$  — параметр, определяемый видом критической точки (в нашем случае  $m = 3$  [8]). Перечисленные выше параметры спектральных линий определялись в результате аппроксимации экспериментальных данных суммой выражений Аспнеса (1).

Пример аппроксимации участка спектра фотоотражения образца с квантовой ямой шириной 35 нм приведен на рис. 2. Видно, что асимметрия контура является след-

ствием наложения линий, обусловленных переходами с участием подзон тяжелых и легких дырок.

На рис. 3 приведена зависимость параметра уширения спектральных линий для переходов типа  $penh$  (т.е. с участием подзоны тяжелых дырок, здесь  $n$  — номер энергетического уровня) от энергий межзонных переходов в исследуемых квантовых ямах. Видно, что параметр уширения спектральных линий увеличивается с ростом энергии межзонного перехода.

Согласно [9], ширина низкополювых линий фотоотражения, связанных с переходами из зоны проводимости в подзону тяжелых дырок в области квантовой ямы, при комнатной температуре составляет 2–3 мэВ, в объемном полупроводнике 15–20 мэВ. Большим энергиям межзонных переходов соответствуют переходы между мелкими уровнями в квантовых ямах электронов зоны проводимости и дырок валентной зоны. Поэтому наблюдаемое монотонное увеличение ширины спектральных линий можно связать с переходом от двумерных (глубокие уровни в ямах) к трехмерным (мелкие уровни в ямах) свойствам локализованных в квантовой яме электронов и дырок.



**Рис. 2.** Пример аппроксимации участка экспериментального спектра образца с квантовой ямой шириной 35 нм одним (а) и двумя (б) выражениями Аспнеса (1). Точки — экспериментальные данные, линия — результат аппроксимации. Символами  $pe5h$  ( $pe6l$ ) обозначены переходы между  $n$ -уровнем зоны проводимости и  $m$ -уровнем подзон тяжелых ( $h$ ) и легких ( $l$ ) дырок валентной зоны.

Среди рассматриваемых спектров фотоотражения гетероструктур самыми широкими оказались спектральные линии образца с шириной квантовой ямы 20 нм, самыми узкими — спектральные линии образцов с шириной квантовых ям 30 и 35 нм.

Из возможных механизмов уширения спектральных линий следует выделить электрон-фононное взаимодействие, нарушение правил отбора по четности для межзонных переходов, а также неоднородность ширины квантовой ямы (неидеальность гетерограниц).

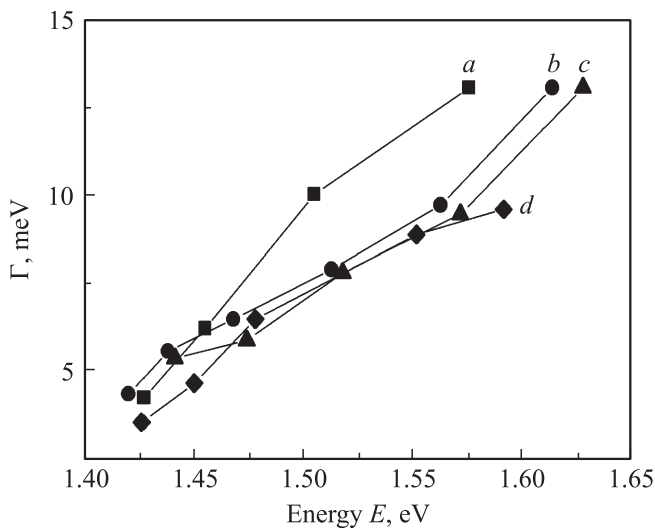
Электрон-фононное взаимодействие в квантовых ямах возможно лишь в том случае [9], когда разность энергий электронных, электронно-дырочных или дырочных уровней  $\Delta E$  кратна энергии продольного оптического фонона  $\hbar\Omega_{LO}$ :

$$\Delta E = n\hbar\Omega_{LO}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (2)$$

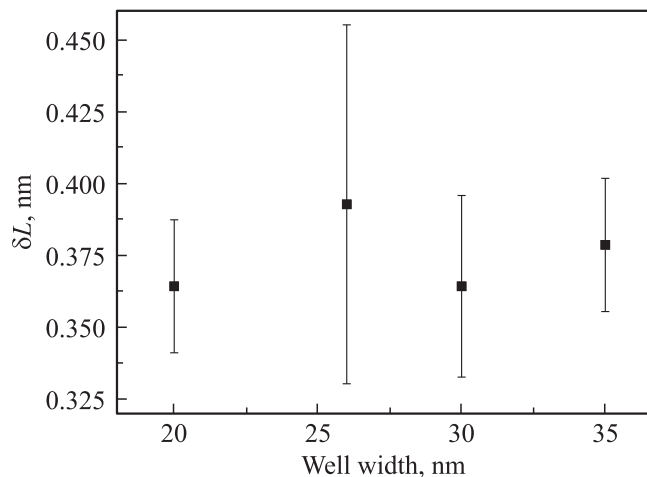
в этом случае электрон или дырка могут передать свою энергию колебаниям кристаллической решетки. В GaAs энергия продольного оптического фонона  $\hbar\Omega_{LO} = 36$  мэВ [10]. Среди рассчитанных нами в рамках модели огибающей волновой функции для прямоуголь-

ного потенциала энергий уровней электронов и дырок для всех образцов нет значений, удовлетворяющих соотношению (2). Следовательно, в исследуемых образцах рассеяние электронов, локализованных в области квантовой ямы, на продольных оптических фононах не должно давать существенного вклада в уширение спектральных линий фотоотражения.

Приведенные в работах [6,7] результаты расчетов показали, что в квантовой яме шириной 20 нм общее количество межзонных переходов составляет несколько десятков. Как показано в [11], легирование барьеров AlGaAs и, как следствие, изменение профиля квантовой ямы GaAs приводят к нарушению правил отбора по четности для межзонных переходов и видимому уширению спектральных линий фотоотражения, обусловленному частичным перекрытием отдельных линий. В то же время в спектрах (рис. 1) наблюдается небольшое количество резких линий, ширина которых уменьшается с увеличением ширины квантовых ям, т. е. с увеличением общего количества межзонных переходов (см. рис. 3, зависимости для переходов с участием подзоны тяжелых дырок). Следовательно, нарушение правил отбора по



**Рис. 3.** Зависимость параметра уширения линий в спектрах фотоотражения от энергий межзонных переходов с участием подзоны тяжелых дырок для образцов с квантовыми ямами шириной 20 (a), 26 (b), 30 (c), 35 нм (d).



**Рис. 4.** Пространственная неоднородность гетерограниц  $\delta L$  серии рассматриваемых образцов.

четности для межзонных переходов в квантовых ямах рассматриваемой серии образцов несущественно, и можно сделать вывод о том, что основной механизм уширения спектральных линий связан с пространственной неоднородностью гетерограниц.

Оценим влияние неоднородности ширины квантовой ямы на изменение энергии уровней. Как известно, для частицы массой  $m^*$  в квантовой яме шириной  $L$  разрешенные значения энергий  $E_n$  имеют дискретный характер:

$$E_n = \frac{\hbar^2}{2m^*} \left( \frac{n\pi}{L} \right)^2, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

Тогда относительному изменению ширины квантовой ямы  $\delta L/L$  будет соответствовать относительное измене-

ние энергии

$$\frac{\delta E}{E} \propto \frac{2\delta L}{L}. \quad (4)$$

Чаще всего неоднородность границ обнаруживается в виде небольших островков или впадин на гетероинтерфейсе [12]. Так как спектр фотоотражения снимается с области площадью несколько квадратных миллиметров, то сигнал представляет собой суперпозицию спектров от квантовых ям, ширина которых лежит в диапазоне  $L \pm \delta L$ . Следовательно, в узких квантовых ямах пространственная неоднородность гетерограниц приводит к большим флуктуациям уровней энергии, чем в широких квантовых ямах.

Нами проведен расчет абсолютной флуктуации  $\delta L$  (4), (3) по параметру уширения линий в спектрах фотоотражения. Результаты расчета приведены на рис. 4. Наблюдаемым значениям параметра уширения  $\Gamma$  соответствует неоднородность каждой гетерограницы  $\sim (0.36-0.39)$  нм, что соответствует значениям 1.3–1.4 монослоя GaAs нм [10]. При этом существенного различия в значениях  $\delta L$  для образцов с разной шириной квантовой ямы не наблюдается, что подтверждает сделанное предположение о преимущественном влиянии пространственной неоднородности гетерограниц на уширение линий в спектрах фотоотражения.

Таким образом, экспериментальные данные об энергиях межзонных переходов и о параметре уширения спектральных линий могут быть использованы не только для оценки ширины  $L$  квантовой ямы, но и для оценки пространственной неоднородности  $\delta L$  ее гетерограниц, в том числе в системах диагностики *in situ*.

## 5. Заключение

Исследована зависимость параметра уширения линий в спектрах фотоотражения гетероструктур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами от ширины квантовой ямы и энергии межзонных переходов.

Установлено, что увеличение параметра уширения от 4 до 12 мэВ с ростом энергии межзонного перехода связано с переходом от двумерных (глубокие уровни в ямах) к трехмерным (мелкие уровни в ямах) свойствам локализованных в квантовой яме электронов и дырок.

Показано, что основным механизмом уширения линий в спектрах фотоотражения исследуемых образцов является пространственная неоднородность гетерограниц. Проведенные оценки показывают, что неоднородность каждой гетерограницы составляет  $\sim (0.36-0.39)$  нм (1.3–1.4 монослоя), что свидетельствует о высоком качестве исследуемых структур.

Данные, полученные в настоящей работе методом спектроскопии фотоотражения, могут использоваться как для оценивания ширины квантовой ямы, так и для оценивания пространственной неоднородности ее гетерограниц.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, гранты № 13-02-01394 и 14-02-31510.

## Список литературы

- [1] Ж.И. Алфёров. ФТП, **32** (1), 3 (1998).
- [2] Г.Б. Галиев, С.С. Пушкарев, И.С. Васильевский, Е.А. Климов, А.Н. Клочков, П.П. Мальцев. ФТП, **48** (1), 67 (2014).
- [3] В.Г. Мокеров, Г.Б. Галиев, Ю. Пожела, К. Пожела, В. Юцене. ФТП, **36** (6), 713 (2002).
- [4] Л.П. Авакянц, П.Ю. Боков, А.В. Червяков. ЖТФ, **75** (10), 66 (2005).
- [5] A. Badakhshan, M. Sydor, K. Alavi, N. Teraguchi, H. Morkoc. SPIE Proc., **1678**, 159 (1992).
- [6] Л.П. Авакянц, П.Ю. Боков, И.П. Казаков, А.В. Червяков. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3, Физика. астрономия, **32** (4), 48 (2002).
- [7] Л.П. Авакянц, П.Ю. Боков, Г.Б. Галиев, В.Э. Каминский, В.А. Кульбачинский, В.Г. Мокеров, А.В. Червяков. Опт. и спектр., **93** (6), 857 (2002).
- [8] D.E. Aspnes. Surf. Sci., **37**, 418 (1973).
- [9] H. Qiang, F.H. Pollak, C.M. Sotomayor Tores, W. Leitich, A.H. Kean, M.A. Storscio, J. Iafrate. Appl. Phys. Lett., **61** (12), 1411 (1992).
- [10] L. Pavesi, M. Guzzi. J. Appl. Phys., **75** (10), 4779 (1994).
- [11] L.P. Avakyants, P.Yu. Bokov, A.V. Chervyakov, G.B. Galiev, E.A. Klimov, I.S. Vasil'evskii, V.A. Kulbachinskii. Semicond. Sci. Technol., **21**, 462 (2006).
- [12] M. Herman, D. Bimberg, J. Christen. J. Appl. Phys., **70** (2), R1 (1991).

Редактор Л.В. Шаронова

## Photoreflexion estimation of spatial inhomogeneity of heterointerfaces in the quantum wells GaAs/AlGaAs

L.P. Avakyants<sup>+</sup>, P.Yu. Bokov<sup>+</sup>, G.B. Galiev\*, I.P. Kazakov<sup>•</sup>, A.V. Chervyakov<sup>+</sup>

<sup>+</sup> Lomonosov Moscow State University  
(Physics Department),  
119992 Moscow, Russia

\* Institute of Ultrahigh Frequency  
Semiconducting Electronics,  
Russian Academy of Sciences,  
113105 Moscow, Russia

• Lebedev Physical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
119991 Moscow, Russia

**Abstract** GaAs/AlGaAs heterostructures with quantum wells width from 20 to 35 nm have been investigated by means of photoreflexance spectroscopy. The broadening parameter of spectral lines connected with the interband transitions grows with the increase of the transition energy and reduces with the increasing of the well width. The decrease of the broadening parameter with the increasing of the well width is connected with the spatial inhomogeneity of heterointerfaces. The spatial inhomogeneity of heterointerfaces have been estimated as 0.34–0.39 nm (1.3–1.4 monolayers).