

Люминесценция приповерхностного гетероперехода GaAs/AlAs в гетероструктурах на основе AlAs

© В.Е. Никифоров², Д.С. Абрамкин^{1,2}, Т.С. Шамирзаев^{1,2,3,¶}

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова
Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия

³ Уральский федеральный университет,
620002 Екатеринбург, Россия

E-mail: tim@isp.nsc.ru

(Получена 27 апреля 2017 г. Принята к печати 12 мая 2017 г.)

Высокая реакционная способность алюминия приводит к тому, что поверхность гетероструктур на основе AlAs необходимо защищать от окисления слоем GaAs. В результате в приповерхностной области таких гетероструктур всегда есть гетеропереход GaAs/AlAs. В работе показано, что при нерезонансном оптическом возбуждении структур с этим гетеропереходом связана полоса фотолюминесценции, интенсивность которой определяется толщиной и типом легирования защитного слоя GaAs.

DOI: 10.21883/FTP.2017.11.45112.26

1. Введение

Широкозонный полупроводник AlAs активно используется при создании оптоэлектронных гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) и квантовыми точками (КТ) для фундаментальных исследований и практического применения [1]. Из-за высокой реакционной способности алюминия, который сильно взаимодействует с содержащимся в атмосфере кислородом, гетероструктуры на основе AlAs защищают тонким слоем GaAs. Поэтому в приповерхностной области гетероструктур на основе AlAs всегда есть гетеропереход GaAs/AlAs. При нерезонансном возбуждении таких гетероструктур излучением с энергией фотонов, превышающей ширину запрещенной зоны AlAs, с этим гетеропереходом может быть связана полоса фотолюминесценции (ФЛ), перекрывающаяся с ФЛ от квантовых ям и точек.

В данной работе мы показываем, что в гетероструктурах InAs/AlAs с квантовыми точками появляется дополнительная полоса ФЛ, связанная с приповерхностным гетеропереходом GaAs/AlAs, а ее интенсивность, определяется толщиной и типом легирования защитного слоя GaAs.

2. Детали эксперимента

В работе изучались гетероструктуры InAs/AlAs с квантовыми точками, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на полуизолирующих подложках GaAs с ориентацией (001). Структуры содержали один слой КТ между слоями AlAs. Технология выращивания гетероструктур подробно описана в работе [2]. Для защиты верхнего слоя AlAs от окисления выращивался покровный слой GaAs. Были выращены нелегированные гетероструктуры с толщиной покровного слоя 5 и

20 нм. Дополнительно выращивались гетероструктуры с покровным слоем толщиной 20 нм, легированным донорной (кремний) или акцепторной (бериллий) примесью до уровня $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Последовательность слоев в легированных и нелегированных гетероструктурах с толщиной покровного слоя 20 нм приведена на рис. 1.

Спектры люминесценции измерялись на установке, построенной на основе спектрографа Acton Advanced SP2500A, оснащенного охлаждаемой жидким азотом ПЗС-камерой Spec-10 System. Стационарная фотолюминесценция возбуждалась полупроводниковым GaN-лазером (энергия фотона $h\nu = 3.06 \text{ эВ}$). Плотность мощности возбуждения составляла 25 Вт/см^2 . Измерения проводились при температуре жидкого азота. Время-разрешенная ФЛ возбуждалась N₂-лазером ($h\nu = 3.68 \text{ эВ}$) с частотой следования импульсов 1 кГц,

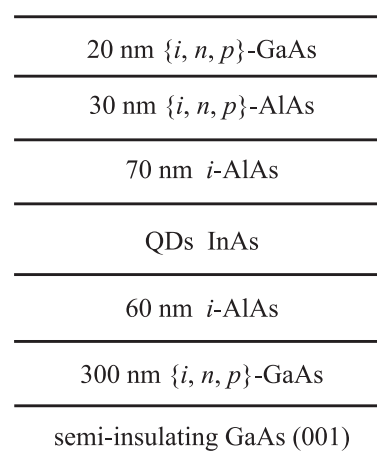


Рис. 1. Последовательность слоев в легированных и нелегированных гетероструктурах InAs/AlAs с толщиной покровного слоя 20 нм.

длительностью импульса 7 нс и плотностью энергии в импульсе 1.75 мкДж/см^2 , что соответствует плотности мощности в импульсе 250 Вт/см^2 и средней плотности мощности 1.75 мВт/см^2 . Время-разрешенная ФЛ измерялась фотоэлектронным умножителем ФЭУ-79 в режиме время-коррелированного счета фотонов.

Травление поверхностного слоя гетероструктур проводилось в растворе $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ с соотношением концентраций 3 : 2 : 50 [3].

Расчет зонных диаграмм гетероструктур проводился с использованием программного пакета Nextnano⁺⁺, основные приближения, использованные при расчетах диаграмм, приведены в работе [2].

3. Результаты эксперимента

Спектры ФЛ нелегированных гетероструктур InAs/AlAs с различной толщиной покровного слоя показаны на рис. 2. В спектрах присутствуют две полосы ФЛ: высокоэнергетическая, обозначенная на рисунке как QD, обусловленная рекомбинацией носителей заряда в квантовых точках InAs [2], и низкоэнергетическая, обозначенная на рисунке как S. Отношение интенсивностей этих полос изменяется при изменении толщины покровного слоя GaAs. В гетероструктуре с толщиной покровного слоя 20 нм интенсивность низкоэнергетической полосы S в 1.5 раза больше интенсивности высокоэнергетической полосы QD. При уменьшении толщины покровного слоя до 5 нм интенсивность полосы QD воз-

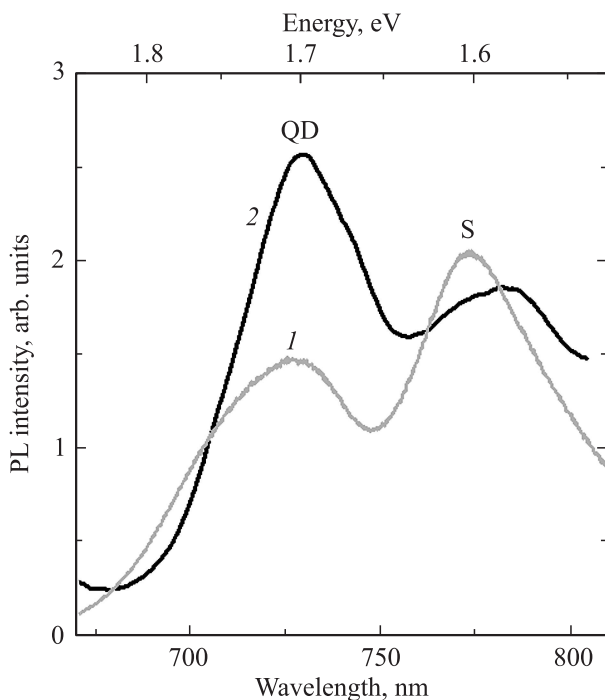


Рис. 2. Спектры низкотемпературной (77 K) фотолюминесценции (PL) нелегированных гетероструктур InAs/AlAs с толщиной покровного слоя GaAs 20 (1) и 5 нм (2).

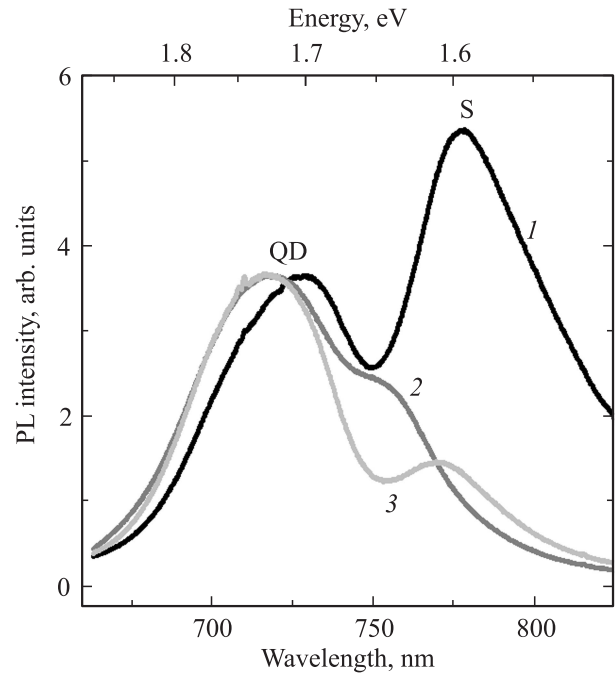


Рис. 3. Спектры низкотемпературной (77 K) фотолюминесценции (PL) гетероструктур InAs/AlAs с толщиной покровного слоя GaAs 20 нм: нелегированного (1), легированных донорами (2) и акцепторами (3).

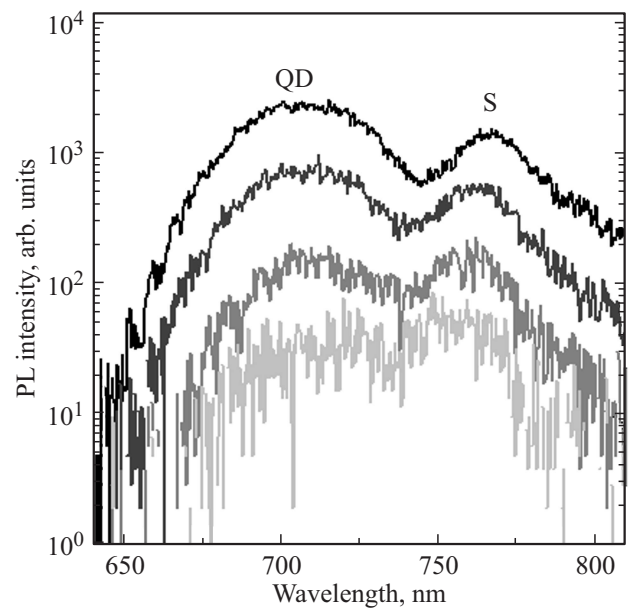


Рис. 4. Время-разрешенные спектры низкотемпературной (77 K) фотолюминесценции (PL) нелегированной гетероструктуры InAs/AlAs с толщиной покровного слоя GaAs 20 нм, измеренные через (сверху вниз) 0,2, 0,4, 0,8 и 1,6 мкс после импульса возбуждения.

растает, а относительная интенсивность полосы S уменьшается до значения 0.7 от интенсивности полосы QD.

Спектры ФЛ гетероструктур InAs/AlAs с толщиной покровного слоя 20 нм, легированного донорами и ак-

цепторами, приведены на рис. 3. Видно, что легирование покровного слоя как донорами, так и акцепторами не приводит к изменению интенсивности полосы QD, однако интенсивность полосы S при легировании уменьшается примерно на порядок величины.

Время-разрешенные спектры ФЛ нелегированной гетероструктуры InAs/AlAs с толщиной покровного слоя 20 нм приведены на рис. 4. Анализ спектров показывает, что затухание ФЛ обеих полос после возбуждающего импульса неэкспоненциально, причем полоса S затухает медленнее (ее интенсивность уменьшается в 30 раз за 1.4 мкс), чем полоса QD (уменьшение интенсивности в 70 раз за 1.4 мкс).

4. Обсуждение результатов

Уменьшение относительной интенсивности полосы S при уменьшении толщины покровного слоя GaAs позволяет высказать предположение о том, что эта полоса связана с рекомбинацией носителей заряда на гетеропереходе GaAs/AlAs в приповерхностной области гетероструктуры. При уменьшении толщины приповерхностного слоя GaAs, который обладает большим коэффициентом поглощения лазерного излучения, происходит пространственное перераспределение фотовозбужденных носителей заряда. Их концентрация уменьшается в приповерхностном слое GaAs, при этом увеличивается доля носителей заряда, рожденных поглощенными в AlAs фотонами и продифундировавших в область

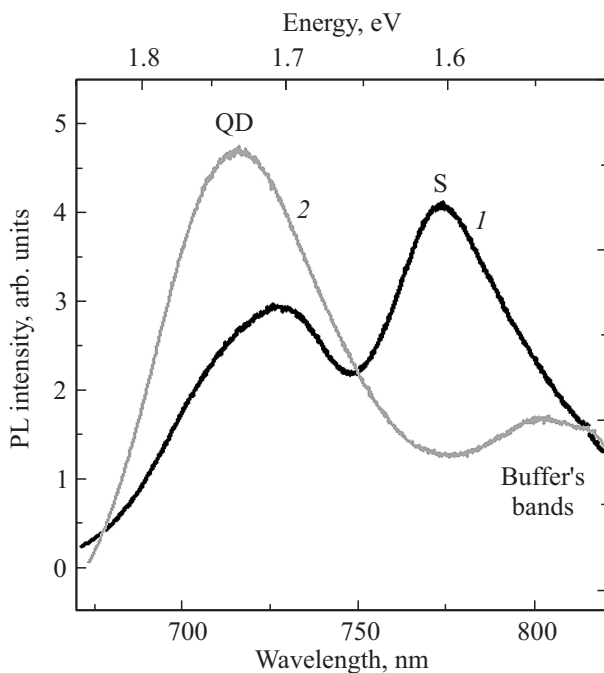


Рис. 5. Спектры низкотемпературной (77 К) фотолюминесценции (PL) гетероструктуры InAs/AlAs с толщиной покровного слоя GaAs 20 нм до (1) и после (2) удаления поверхностного слоя GaAs (травления гетероструктуры на глубину 30 нм).

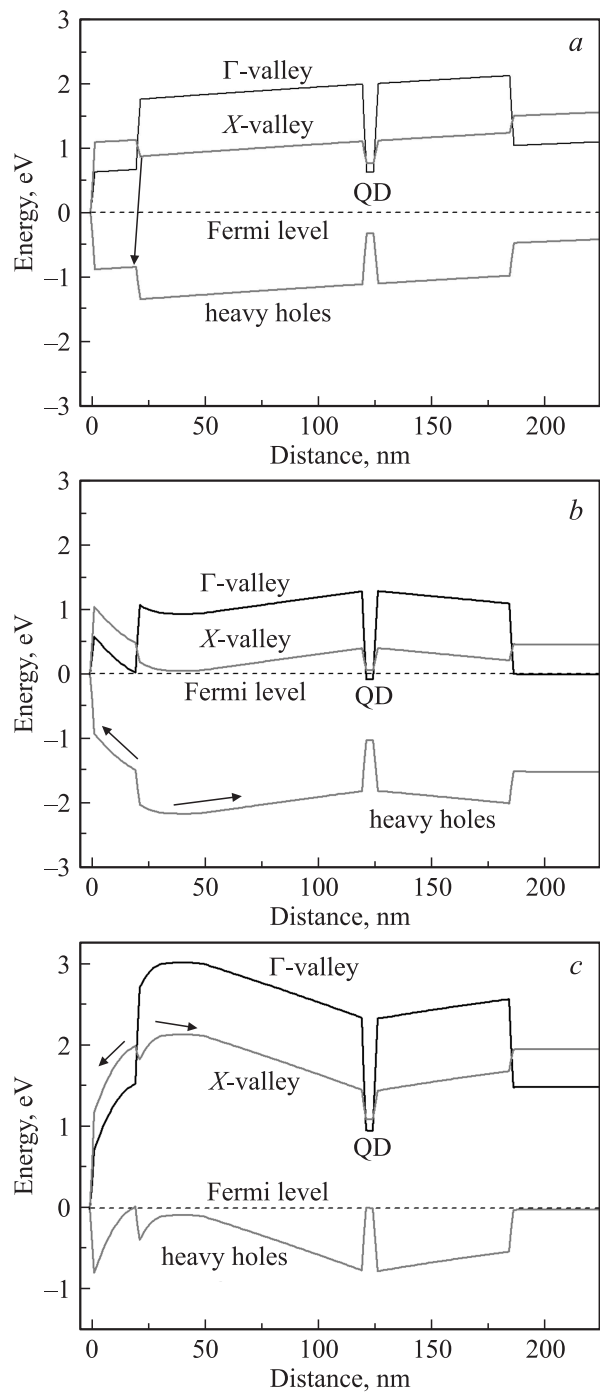


Рис. 6. Зонные диаграммы, рассчитанные для гетероструктур InAs/AlAs с толщиной покровного слоя GaAs 20 нм: *a* — нелегированная, стрелкой показан оптический переход; *b* — легированная донорами, *c* — легированная акцепторами. *b, c*: стрелками показаны пути делокализации носителей заряда.

локализации КТ. Большая длительность затухания нестационарной ФЛ в полосе S по сравнению с затуханием ФЛ в полосе QD подтверждает эту интерпретацию. Действительно, ожидаемая вероятность оптического перехода для разделенных как в реальном пространстве,

так и в пространстве квазиимпульсов носителей заряда на гетеропереходе GaAs/AlAs с непрямозонным энергетическим спектром второго рода меньше, чем вероятность оптического перехода в непрямозонных КТ InAs/AlAs первого рода, в которых и электрон, и дырка разделены в пространстве квазиимпульсов, но находятся в одной и той же области реального пространства [3,4]. Неэкспоненциальность затухания ФЛ полос QD, S связана с тем, что мы наблюдаем сумму большого количества моноэкспоненциальных кинетик от экситонов, излучающих на одной длине волны, но локализованных в КТ InAs/AlAs различных размера и состава (локализованных на шероховатостях гетероинтерфейса GaAs/AlAs), с разными временами излучательной рекомбинации [5,6].

Для проверки предположения о связи полосы S с рекомбинацией электронов и дырок на гетерогранице GaAs/AlAs нелегированный поверхностный слой (толщиной ~ 30 нм) стравливался. Спектры ФЛ гетероструктур до и после стравливания поверхностного слоя приведены на рис. 5. Видно, что полоса S после травления, как ожидалось, исчезает, а вследствие пространственного перераспределения фотовозбужденных носителей заряда интенсивность полосы QD возрастает и появляется ФЛ от буферного слоя GaAs, лежащего под нижним слоем AlAs.

Рассмотрим теперь зонные диаграммы изучаемых гетероструктур. Диаграммы, рассчитанные для гетероструктур InAs/AlAs с толщиной покрывного слоя 20 нм и различным типом легирования, приведены на рис. 6. Как видно из зонной диаграммы, показанной на рис. 6, а, в нелегированной гетероструктуре электроны могут локализоваться в X-долине слоя AlAs на гетерогранице, а дырки в приповерхностном слое GaAs. Переход, приводящий к появлению полосы S в нелегированной гетероструктуре, показан на рис. 6, а стрелкой. Легирование приповерхностной области гетероструктуры приводит к модификации ее энергетического спектра. Как это видно из рис. 6, б и с, легирование донорной (акцепторной) примесью приводит к образованию в приповерхностной области гетероструктуры делокализуемого потенциала для дырок (электронов). Отталкивание фотовозбужденных носителей заряда одного знака от гетерограницы GaAs/AlAs и является причиной резкого уменьшения интенсивности полосы S в гетероструктурах с легированным защитным слоем GaAs.

5. Заключение

В работе изучена фотолюминесценция гетероструктур с КТ InAs/AlAs. При нерезонансном оптическом возбуждении в спектрах низкотемпературной фотолюминесценции гетероструктур появляется дополнительная полоса, обусловленная рекомбинацией носителей заряда на приповерхностном гетеропереходе (защитный слой GaAs)/AlAs. Показано, что интенсивность этой полосы уменьшается с уменьшением толщины слоя GaAs из-за уменьшения в нем концентрации фотовозбужденных

носителей заряда и при легировании слоя GaAs из-за модификации энергетического спектра гетероперехода GaAs/AlAs, препятствующей локализации фотовозбужденных дырок при легировании приповерхностной области донорами и локализации фотовозбужденных электронов при легировании приповерхностной области акцепторами.

Работа выполнена при финансовой поддержке правительства Российской Федерации, постановление № 211, контракт № 02.A03.21.0006 и РФФИ (проект № 16-02-00242).

Список литературы

- [1] Ж.И. Алфёров. УФН, **172**, 1068 (2002).
- [2] T.S. Shamirzaev, A.V. Nenashev, A.K. Gutakovskii, A.K. Kalagin, K.S. Zhuravlev, M. Larsson, P.O. Holtz. Phys. Rev. B, **78**, 085323 (2008).
- [3] Y. Mori, N. Watanabe. J. Electrochem. Soc., **125**, 1510 (1978).
- [4] T.S. Shamirzaev, J. Debus, D.R. Yakovlev, M.M. Glazov, E.L. Ivchenko, M. Bayer. Phys. Rev. B, **94**, 045411 (2016).
- [5] T.S. Shamirzaev, J. Debus, D.S. Abramkin, D. Dunker, D.R. Yakovlev, D.V. Dmitriev, A.K. Gutakovskii, L.S. Braginsky, K.S. Zhuravlev, M. Bayer. Phys. Rev. B, **84**, 155318 (2011).
- [6] I.N. Krivorotov, T. Chang, G.D. Gilliland, L.P. Fu, K.K. Bajaj, D.J. Wolford. Phys. Rev. B, **58**, 10687 (1998).

Редактор Л.В. Шаронова

Luminescence of near-surface GaAs/AlAs heterojunction in AlAs-based heterostructures

V.E. Nikiforov², D.S. Abramkin^{1,2}, T.S. Shamirzaev^{1,2,3}

¹ A.V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Science, 630090 Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State University, 630090 Novosibirsk, Russia

³ Ural Federal University, 620002 Yekaterinburg, Russia

Abstract A surface of AlAs-based heterostructures must be protected by GaAs cap layer because of high reactivity of aluminum. Thus, the near-surface region of such heterostructures always contains a heterojunction GaAs/AlAs. The photoluminescence band can be associated with the heterojunction at a non-resonant optical excitation. It has been demonstrated that intensity of the photoluminescence band is determined by the doping type and thickness of the GaAs cap layer.