

Аннигиляция центров безызлучательной рекомбинации в структурах GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами в результате воздействия плазмы

© К.С. Журавлев, В.А. Колосанов, М. Холланд*, И.И. Мараховка

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

*Университет Глазго,

Глазго G12 8QQ, Великобритания

(Получена 24 октября 1996 г. Принята к печати 25 февраля 1997 г.)

Исследовано влияние низкоэнергетичной плазмы (CF_4 , Ar, Kr) на фотолюминесценцию структур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами. Установлено, что обработка в плазме приводит к гашению фотолюминесценции квантовых ям, расположенных в приповерхностной области структуры, и глубина этой области увеличивается с увеличением времени экспозиции в плазме. За пределами этой области после обработки структур в плазме интенсивность фотолюминесценции квантовых ям возрастает. Мы связываем изменения интенсивности фотолюминесценции с влиянием индуцированных плазмой неравновесных точечных дефектов, аномально быстро диффундирующих в глубь структуры.

Обработка в низкоэнергетичной плазме широко используется при изготовлении низкоразмерных структур и полупроводниковых приборов на основе соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$. В процессе обработки ионы плазмы бомбардируют поверхность структур и модифицируют электронные и оптические свойства приповерхностной области структур [1–4]. В работах [5,6] было установлено, что при плазменной обработке происходит деградация фотолюминесценции в приповерхностной области слоев n -GaAs и структур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами. В данной работе исследовано влияние плазмы на фотолюминесцентные свойства структур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами и показано, что после экспозиции в плазме наблюдается не только гашение фотолюминесценции квантовых ям, но и резкое возгорание фотолюминесценции квантовых ям, расположенных на расстоянии в несколько десятков нанометров от поверхности.

Структуры с квантовыми ямами были выращены на подложках полуизолирующего GaAs ориентации (100) методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Они состояли из буферного слоя GaAs толщиной 1.0 мкм, слоя $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ толщиной 0.5 мкм и набора квантовых ям различной ширины, расположенных в пределах 200 нм от поверхности структуры. Структуры были закрыты слоем GaAs толщиной 10 нм. В структуре В357 было 6 квантовых ям шириной 2.2, 2.8, 3.4, 4.2, 5.6 и 8.5 нм, разделенных барьерами ($\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$) шириной 24 нм; внутри слоя $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 0.5 мкм для предотвращения диффузии примесей и точечных дефектов в структуру из подложки [7] была выращена короткопериодная сверхрешетка AlAs/GaAs. Структура Е138 содержала 5 квантовых ям шириной 2.5, 3.1, 3.8, 5.2 и 8.5 нм с барьерами ($\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$) шириной 22 нм; в этой структуре короткопериодная сверхрешетка в слое $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ не выращивалась. Обработка структур производилась в плазме CF_4 , которая обычно используется для селективного удаления пленок SiO_2 и Si_3N_4 при изготовлении полупроводниковых приборов, а также в плазме Ar или Kr. Плот-

ность мощности плазмы равнялась 0.5 Вт/см^2 , потенциал самосмещения — 400 В и давление — 0.07 Тор. Для того чтобы избежать нагрева структур при длительной экспозиции их в плазме разряд через каждые 120 с гасился и образцы охлаждались. Фотолюминесценция (ФЛ) возбуждалась излучением He–Ne-лазера с плотностью мощности 20 Вт/см^2 . Спектры ФЛ анализировались монохроматором СДЛ-1 и регистрировались охлаждаемым фотоумножителем типа ФЭУ-83, работающим в режиме

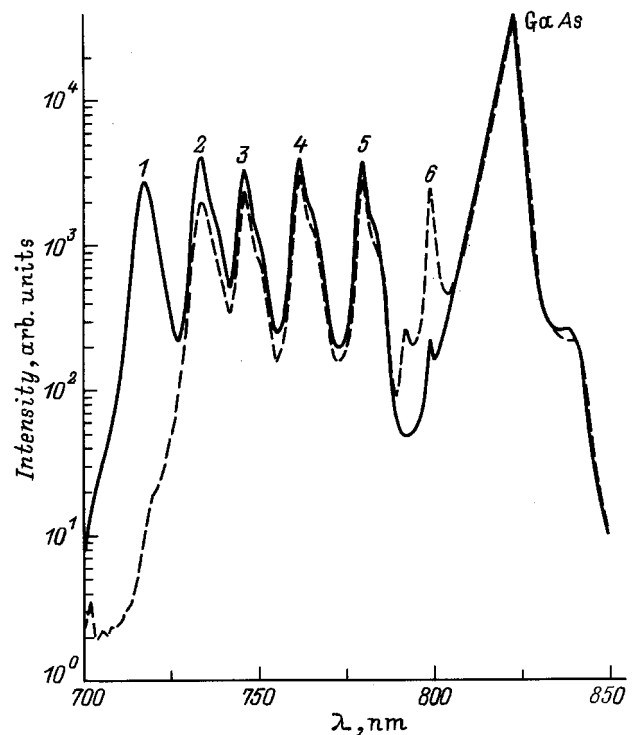


Рис. 1. Спектры ФЛ структуры В357 до (сплошная линия) и после (штриховая) обработки структуры в плазме CF_4 в течение 60 с. $T = 77 \text{ К}$. 1–6 — соответствуют квантовым ямам шириной 2.2, 2.8, 3.4, 4.2, 5.6, 8.5 нм.

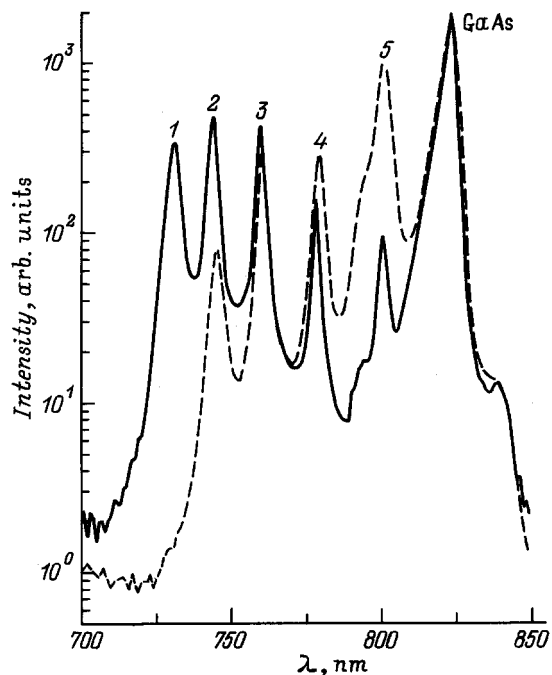


Рис. 2. Спектры ФЛ структуры E138 до (сплошная линия) и после (штриховая) обработки структуры в плазме CF_4 в течение 60 с. $T = 77$ К. 1–5 соответствуют квантовым ямам шириной 2.5, 3.1, 3.8, 5.2, 8.5 нм.

счета фотонов. Образцы при проведении измерений помещались в оптический дьюар с жидким азотом.

На рис. 1 приведены спектры ФЛ структуры V357 до и после экспозиции в плазме. Пик фотолюминесценции с максимумом 1.507 эВ связан с переходом зона-зона в слое GaAs, остальные 6 пиков соответствуют переходам между первым электронным уровнем и первым уровнем тяжелых дырок ($1ehh$) в квантовых ямах. В исходной структуре интенсивность ФЛ квантовых ям шириной 2.2, 2.8, 3.4, 4.2 и 5.6 нм была высокой и примерно одинаковой, что свидетельствует о малой скорости безызлучательной рекомбинации в этих квантовых ямах. Самая удаленная от поверхности структуры квантовая яма 8.5 нм имела существенно меньшую интенсивность ФЛ. После экспозиции структуры в плазме CF_4 в течение 60 с фотолюминесценция ближайшей к поверхности квантовой ямы исчезла полностью, фотолюминесценция квантовых ям 3.4, 4.2, и 5.6 нм не изменилась, а интенсивность ФЛ квантовой ямы 8.5 нм возросла более чем в 10 раз до уровня ФЛ остальных квантовых ям. В специально выращенной без короткопериодной сверхрешетки AlAs/GaAs структуре E138 интенсивность ФЛ квантовых ям была низкой. После экспозиции в плазме CF_4 интенсивность ФЛ всех квантовых ям, расположенных далее 80 нм от поверхности структуры, как видно из рис. 2, возросла, но в различной степени и до различного уровня. Аналогичные изменения происходили в спектрах ФЛ и после обработки структур в плазме аргона или криптона.

Для двух исследованных структур на рис. 3 показана интенсивность ФЛ квантовых ям после экспозиции в плазме (I), нормированная на интенсивность ФЛ квантовых ям в исходном образце (I_0), в зависимости от расстояния от поверхности структуры до соответствующей квантовой ямы (d). Нормированная интенсивность ФЛ отражает изменение концентрации центров безызлучательной рекомбинации (ЦБР) в квантовых ямах. В качестве репера при сравнении спектров использовалась ФЛ слоя GaAs, расположенного достаточно далеко от поверхности структуры и не повреждавшегося при плазменной обработке. Из рисунка видно, что нормированная интенсивность ФЛ наиболее сильно возросла в квантовых ямах, расположенных на больших расстояниях от поверхности структуры, что свидетельствует о более существенном уменьшении концентрации ЦБР в этих квантовых ямах.

Фотолюминесценция структур изменялась при увеличении времени экспозиции в плазме. На рис. 4 показаны спектры ФЛ, а на рис. 5 приведена нормированная интенсивность ФЛ квантовых ям структуры E138 после различного времени экспозиции в плазме CF_4 . Из этих рисунков видно, что при увеличении времени экспозиции расширилась область структуры, в которой интенсивность ФЛ упала, а за пределами этой области интенсивность ФЛ незначительно увеличилась.

Полученные данные показывают, что после экспозиции в плазме в структурах формируются два слоя, различающиеся по люминесцентным свойствам. В первом

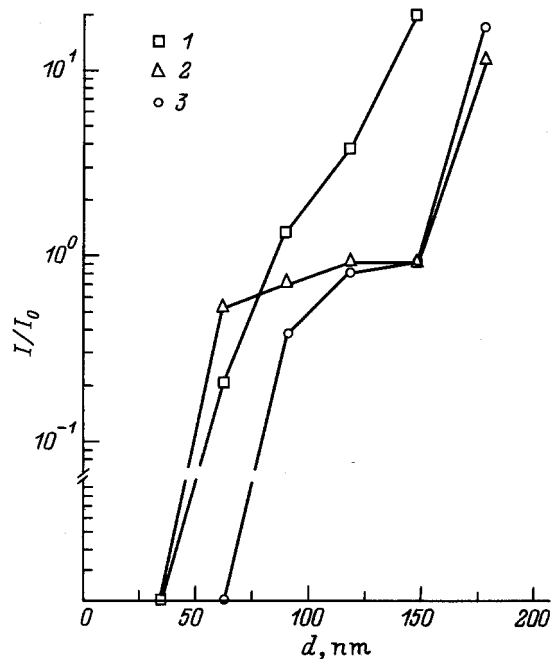


Рис. 3. Нормированная интенсивность ФЛ (I/I_0) структур V357 и E138 после их экспозиции в плазме в течение 60 с в зависимости от расстояния от поверхности структур до квантовых ям (d). 1 — E138, экспозиция в Ar; 2 — V357, экспозиция в Ar; 3 — V357, экспозиция в CF_4 .

приповерхностном слое ФЛ квантовых ям гасится, а во втором (более глубоком слое) интенсивность ФЛ квантовых ям (слабо люминесцирующих в исходных структурах) возрастает. Увеличение времени экспозиции в плазме незначительно влияет на люминесцентные свойства второго слоя. Изменения интенсивности ФЛ после экспозиции структур в плазме практически не зависят от природы плазмообразующего газа (CF_4 , Ar, Kr) и, следовательно, они не связаны с внедрением элементов плазмы в структуру. Мы полагаем, что изменения интенсивности ФЛ обусловлены неравновесными точечными дефектами, которые образуются в приповерхностной области структур при плазменной обработке и аномально быстро диффундируют в возбужденном кристалле [8], при этом коэффициент диффузии одного типа дефектов по крайней мере на порядок больше коэффициента диффузии другого. Наши данные показывают, что глубина первого поврежденного слоя (l) пропорциональна корню квадратному от времени экспозиции, согласно уравнению $l = (Dt_e)^{1/2}$, где D — коэффициент диффузии неравновесных дефектов ($D \approx 10^{-12} \text{ см}^2/\text{с}$) и t_e — время экспозиции. Вероятно, что гасят ФЛ в приповерхностной области структур неравновесные вакансии, которые являются ЦБР, а возрастает интенсивность ФЛ в результате аннигиляции вакансий, введенных при росте, с неравновесными межузельными атомами. В случае справедливости этого предположения

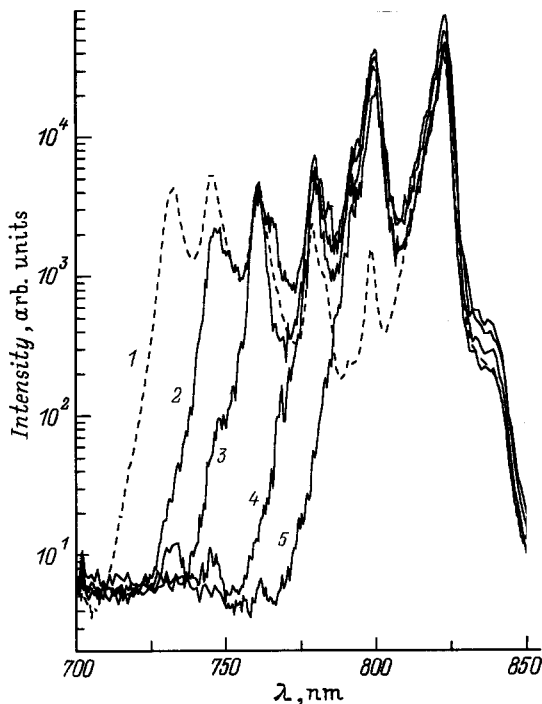


Рис. 4. Спектры ФЛ структуры E138 после различного времени экспозиции в плазме CF_4 t_e , с: 1 — 0, 2 — 60, 3 — 120, 4 — 240, 5 — 360. $T = 77 \text{ К}$.

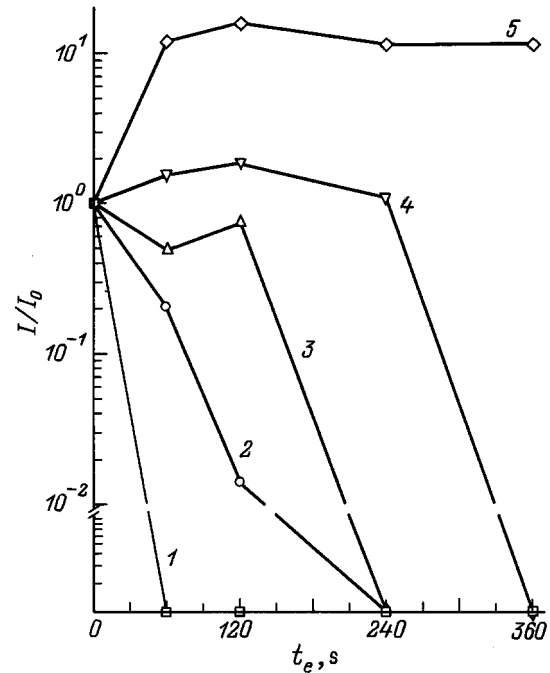


Рис. 5. Нормированная интенсивность ФЛ (I/I_0) квантовых ям структуры E138 в зависимости от времени экспозиции в плазме CF_4 t_e . 1–5 соответствуют квантовым ямам шириной 2.5, 3.1, 3.8, 5.2, 8.5 нм.

кривые на рис. 3 показывают распределение по толщине структур вакансий, введенных при плазменной обработке ($d < 80 \text{ нм}$) и в процессе роста ($d \geq 80 \text{ нм}$). Малые изменения интенсивности ФЛ некоторых квантовых ям (слабо люминесцирующих в исходных структурах) после экспозиции структур в плазме могут быть объяснены тем, что низкую интенсивность ФЛ этих квантовых ям определяют не точечные дефекты решетки, а ЦБР, связанные с химическими примесями, с которыми неравновесные межузельные атомы взаимодействуют слабо.

Таким образом, в работе изучено влияние обработки в плазме на фотолюминесцентные свойства структур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами. Показано, что обработка в плазме приводит к гашению фотолюминесценции квантовых ям, расположенных в приповерхностной области структуры, и глубина этой области увеличивается с увеличением времени экспозиции в плазме. За пределами этой области после обработки структур в плазме фотолюминесценция квантовых ям возрастает. Мы полагаем, что изменения интенсивности фотолюминесценции обусловлены неравновесными точечными дефектами, возникающими в структуре при обработке в плазме.

Авторы выражают благодарность М.Р. Бакланову и Л.А. Ненашевой за проведение обработки структур в плазме и С.И. Чикичеву за плодотворные обсуждения результатов работы.

Список литературы

- [1] А.В. Мурель, А.П. Касагкин, В.М. Коган. Изв. РАН. Сер. физ., **56**, 161 (1992).
- [2] W. Beinstingl, R. Christanell, J. Smoliner, C. Wirner, E. Gornik, G. Weimann, W. Schlapp. Appl. Phys. Lett., **57**, 177 (1990).
- [3] G. Juang, J.K. Hsu, I.S. Yen, H.S. Shiau. J. Appl. Phys., **72**, 684 (1992).
- [4] O.J. Glembocki, B.E. Taylor, E.A. Dobisz. J. Vac. Sci. Technol. B, **9**, 3546 (1991).
- [5] H.W. Wong, D.L. Green, T.Y. Liu, D.G. Lishan, M. Bellis, E.L. Hu, P.M. Petroff, P.O. Holtz, J.L. Mertz. J. Vac. Sci. Technol. B, **6**, 1906 (1988).
- [6] К.С. Журавлев, В.А. Колосанов, В.Г. Плюхин, Т.С. Шамиряев. ЖТФ, **64**, 185 (1994).
- [7] P.M. Petroff, R.C. Miller, A.C. Gossard, W. Wiegmann. Appl. Phys. Lett., **44**, 217 (1984).
- [8] М. Ланно, Ж. Бургуэн. *Точечные дефекты в полупроводниках. Теория* (М., Мир, 1984) с. 236.

Редактор Л.В. Шаронова

Annihilation of nonradiative recombination centers in GaAs/AlGaAs multiquantum well structures after plasma exposure

K.S. Zhuravlev, V.A. Kolosanov, M. Holland*,
I.I. Marahovka

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

*Department of Electronics and Electrical Engineering,
University of Glasgow,
Glasgow G12 8QQ, United Kingdom

Abstract An effect of plasma exposure on the photoluminescence properties of the GaAs/AlGaAs multiquantum well structures have been examined. It was shown that the photoluminescence of the quantum wells in the near-surface region is quenched after plasma exposure and the depth of this region expanded with increasing of exposure time. The photoluminescence intensity from the quantum wells located beyond this region rose. We believe that the photoluminescence recovery occurs due to annihilation of nonradiative recombination centers in the quantum wells with plasma induced highly mobile point defects.

E-mail: Zhur@ispht.nsk.su
Fax: 007-(3832)351771