

УДК 621.315.592.3

ФОТОСТИМУЛИРОВАННЫЙ ОТЖИГ ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННЫХ СТРУКТУР GaAs/AlGaAs

Н. Н. Лойко, В. М. Коннов, Т. В. Ларикова

Исследованы квантово-размерные структуры GaAs/Al_{0,23}Ga_{0,77}As, имплантированные ионами ¹⁷⁴Yb до расчетных концентраций 10¹⁵ – 10¹⁷ см⁻³ и прошедшие фотостимулированный отжиг. Отжиг проводился ступенчато в интервале температур 350 – 725°С с длительностью каждой ступени 5 минут. По данным фотолюминесценции оценена степень восстановления квантово-размерных структур после имплантации и отжига.

Об ионной имплантации квантово-размерных структур GaAs/AlGaAs уже сообщалось [1]. Данная работа является продолжением исследований ионно-имплантированных структур пониженной размерности.

При проведении имплантации одновременно с введением примеси создается большое количество радиационных дефектов (более 100 дефектов на один имплантированный атом). Поэтому после имплантации проводят отжиг, цель которого – уменьшить концентрацию дефектов и активировать оптически или электрически имплантированную примесь.

Ранее для объемных кристаллов III-V нами был опробован и хорошо себя зарекомендовал фотостимулированный отжиг (ФСО) [2, 3, 4]. ФСО можно рассматривать как один из вариантов скоростного термического отжига. Суть метода заключается в совместном световом и тепловом воздействии на образец в атмосфере водорода ($p \sim 1$ атм). Роль водорода в пассивации и уменьшении числа оборванных связей хорошо известна. В процессе отработки технологического режима были подобраны интенсивность, спектральный состав падающего на образец света, температура и длительность отжига. Несмотря на то, что механизм ФСО неясен, использование этой

методики позволяет не только проводить отжиг без защитного покрытия, но и получить более интенсивную редкоземельную фотолюминесценцию (ФЛ) по сравнению с термическим отжигом под защитным покрытием.

В статье [1] описаны как структура $GaAs/Al_{0,23}Ga_{0,77}As$, которая была использована в качестве модельного объекта в данной работе, так и процедура имплантации ионов Yb . Как показал анализ профилей распределения Yb по глубине в объемных кристаллах A_3B_5 , полученных методом вторичной ионной масс-спектропии до и после ФСО, этот ион при использованных условиях имплантации практически не диффундирует вглубь образца [5]. В исследуемых структурах Yb находился в основном в первом барьере. Имплантации подвергалась половина каждого образца (A – неимплантированная, B – имплантированная часть). После имплантации образцы проходили ступенчатый изохронный ФСО длительностью 5 минут в интервале температур $350 - 700^\circ C$ с шагом $20 - 50^\circ C$. Контроль за ходом ФСО осуществлялся по измерениям ФЛ [1]. Спектры ФЛ регистрировались непосредственно после имплантации и после каждого отжига для обеих частей образца. Степень восстановления структур после ФСО оценивалась по положению экситонных пиков в спектрах ФЛ, их интенсивности и по полуширине пиков на полувысоте δ_i .

Сразу после имплантации Yb с расчетной концентрацией порядка 10^{15} см^{-3} интенсивность излучения экситонных пиков уменьшилась по сравнению с исходной в первой яме приблизительно на порядок, во второй – в 2 – 3 раза, в третьей же практически не изменилась. ФСО образца при $350^\circ C$ привел к полному отжигу дефектов в первой и второй квантовых ямах и практически не повлиял на спектры ФЛ части A этого образца.

На образце с концентрацией Yb порядка 10^{16} см^{-3} сразу после имплантации наблюдался только один экситонный пик, связанный с третьей квантовой ямой, интенсивность которого уменьшилась, по сравнению с частью A , более чем на порядок (рис. 1.1, 1.3). Излучение экситонов, локализованных во второй квантовой яме ($\sim 8095 \text{ \AA}$), было зарегистрировано после ФСО при $350^\circ C$, увеличение температуры отжига до $400^\circ C$ привело к появлению экситонного пика, связанного с первой квантовой ямой ($\lambda = 8005 - 8010 \text{ \AA}$) (рис. 1.4). Интенсивности экситонного излучения второй и третьей квантовых ям по порядку величины достигли значений, которые они имели до имплантации, после ФСО при $700^\circ C$ (рис. 1.5). Таким образом, радиационные дефекты, введенные во время имплантации, удалось отжечь в первой яме частично, а во второй и третьей яме – практически полностью.

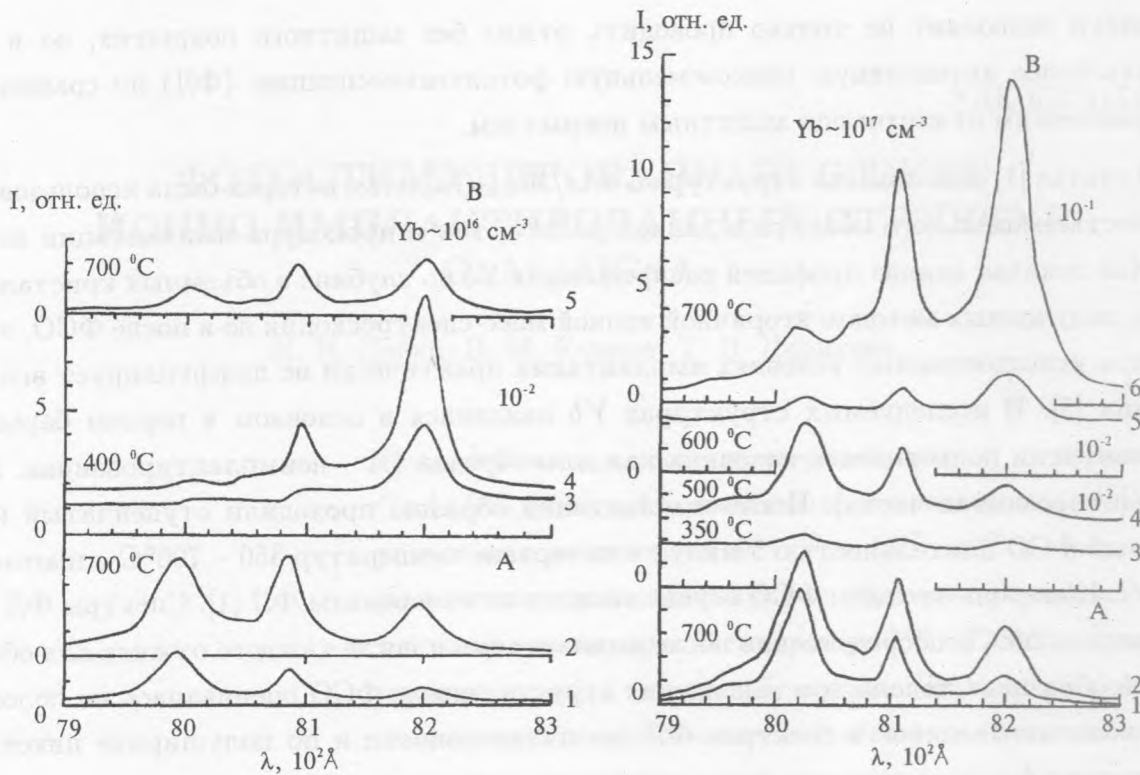


Рис. 1. Спектры ФЛ двух частей образца: А – неимплантированная часть, В – часть, имплантированная Yb до расчетной концентрации порядка 10^{16} см^{-3} . 1 – исходный образец, 2 – после ФСО при 700°C , 3 – сразу после имплантации, 4, 5 – после ФСО при 400°C и 700°C .

Рис. 2. Спектры ФЛ двух частей образца: А – неимплантированная часть, В – часть, имплантированная Yb до расчетной концентрации порядка 10^{17} см^{-3} . 1 – исходный образец, 2 – после ФСО при 700°C , 3, 4, 5, 6 – после ФСО соответственно при 350°C , 500°C , 600°C и 700°C .

На рис. 2 показаны спектры образца с расчетной концентрацией имплантированного Yb порядка 10^{17} см^{-3} . Непосредственно после имплантации интенсивность экситонных пиков уменьшилась приблизительно на три порядка. Соотношение интенсивностей пиков различных ям подобно наблюдаемому на части А. После ФСО при температуре $550 - 600^\circ\text{C}$ распределение интенсивностей меняется – доминирующую роль начинает играть излучение третьей, самой удаленной от поверхности ямы.

Эволюция интенсивностей экситонных пиков с ростом температуры изохронного отжига для обеих частей образцов с расчетными концентрациями $Yb \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и 10^{17} см^{-3} приведена на рис. 3. Видно, что с ростом дозы облучения и после ФСО при

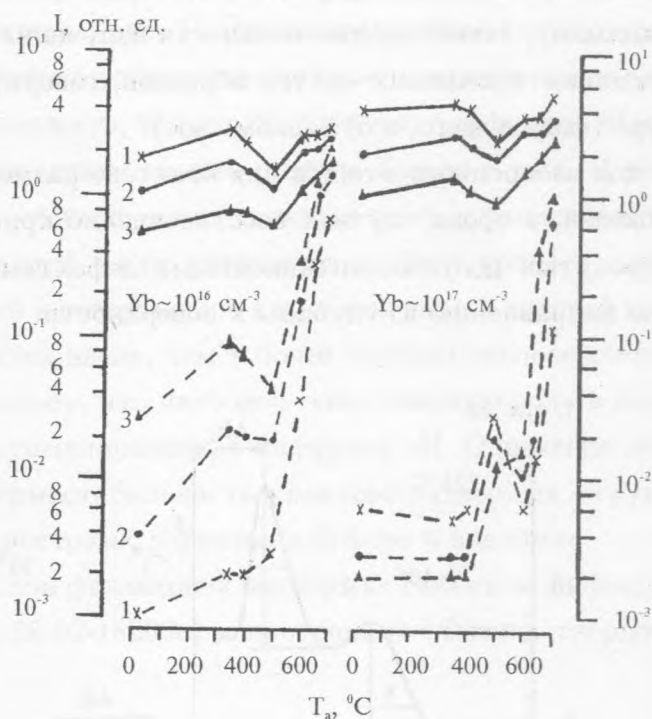


Рис. 3. Зависимость интенсивностей ФЛ экситонных пиков от температуры T_a изохронного ФСО для образцов, имплантированных Yb до расчетных концентраций порядка 10^{16} и 10^{17} см^{-3} . 1, 2, 3 – соответственно для первой, второй и третьей квантовых ям; сплошные кривые – неимплантированная часть образца, пунктирные кривые – имплантированная часть образца.

700°C интенсивность излучения экситонов, локализованных в ямах, все больше отличается от первоначальных (доимплантационных) значений. При этом, чем ближе яма расположена к поверхности, тем заметнее это отличие. Появление и устойчивый характер этой тенденции говорит о накоплении имплантационных дефектов и о генерации термодфектов в приповерхностных областях квантово-размерной структуры. Такие же явления наблюдаются при отжиге объемных ионно-имплантированных кристаллов GaAs в интервале температур $550 - 700^\circ\text{C}$.

Спад интенсивности экситонной ФЛ для неимплантированных частей образцов в диапазоне температур $450 - 550^\circ\text{C}$ аналогичен спаду интенсивности краевой люминесценции для неимплантированных кристаллов GaAs. Считается, что при этих температурах в объем полупроводника попадает большое количество точечных дефектов,

обусловленное распадом протяженных дефектов, что приводит к гашению краевой люминесценции. По-видимому, такой ход интенсивности излучения экситонных пиков, наблюдаемый для неимплантированных частей образцов, говорит о наличии ростовых дефектов в структуре (скорее всего, в буферном слое).

Таким образом, ход изохронного отжига для квантово-размерной структуры и для кристаллов *GaAs* сходен, в обоих случаях восстановление кристаллической решетки начинается с незатронутых постимплантационными дефектами областей, и процесс распространяется по направлению из глубины к поверхности.

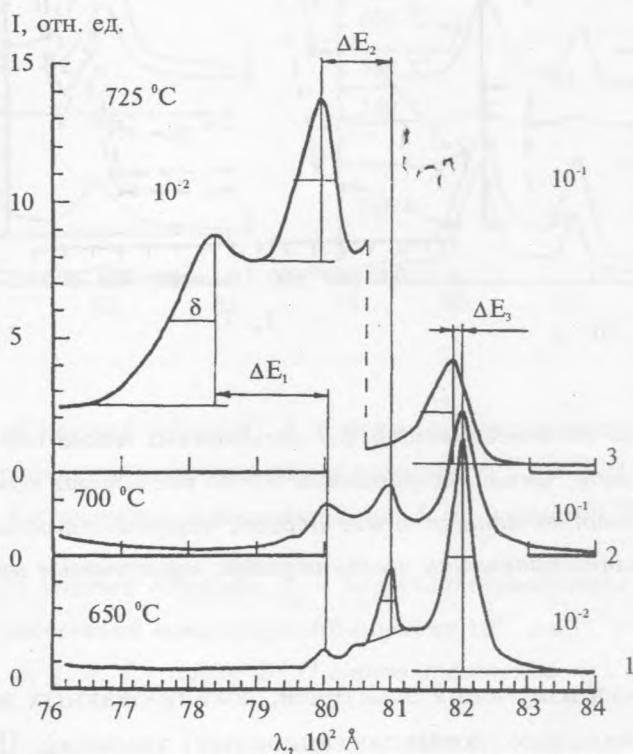


Рис. 4. Спектры ФЛ образца, имплантированного *Yb* до расчетной концентрации порядка 10^{16} см^{-3} и прошедшего изохронный ФСО при температурах 650°C (1), 700°C (2) и 725°C (3). δ – полуширина экситонного пика на полувысоте, ΔE_i – смещение положения экситонного пика.

Отметим также, что отжиг структур в диапазоне $350 - 700^\circ\text{C}$ независимо от концентрации *Yb* (от 10^{15} до 10^{17} см^{-3}) не приводил к деградации структур, т.е. не менялось ни спектральное положение экситонных пиков, ни полуширина каждого из экситонных

пиков. Однако дальнейшее повышение температуры отжига до 725°C радикально изменило спектр ФЛ. структуры (рис. 4). Экситонные линии сдвинулись в коротковолновую область. Пики существенно уширились, причем уширение носило несимметричный характер. Можно предположить, что это обусловлено диффузией Al из материала барьера в материал ямы и размытием границ раздела барьер – яма. В результате квантовые ямы становятся не прямоугольными, а скорее всего, трапециевидными. При этом эффективная ширина каждой из ям уменьшается. Этот процесс наиболее ярко выражен для первой, ближайшей к поверхности, квантовой ямы, в которой концентрация постимплантационных дефектов выше, чем в более глубоко расположенных квантовых ямах. По-видимому, это означает, что наиболее существенную роль в деградации структуры играет радиационно-стимулированная диффузия Al . Однако не менее важным фактором, влияющим на термостабильность квантово-размерных структур, является и исходная концентрация ростовых дефектов в буфере и подложке.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 96-02-18206а) и программы "Физика твердотельных наноструктур" (проект 1-008).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бородина О. М., Дравин В. А., Казаков И. П. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 9-10, (1996).
- [2] Гукасян А. М., Коннов В. М., Лойко Н. Н. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 3-4, 44 (1992).
- [3] Гукасян А. М., Коннов В. М., Лойко Н. Н. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 3-4, 47 (1992).
- [4] Гукасян А. М., Коннов В. М., Лойко Н. Н. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 5-6, 63 (1992).
- [5] Бородина О. М., Коннов В. М., Лойко Н. Н. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 9-10, 11 (1993).

Поступила в редакцию 8 июля 1996 г.