

УДК 621.315.592.3

## ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР GaAs/AlGaAs

О. М. Бородина<sup>1</sup>, В. А. Дравин, И. П. Казаков, В. М. Коннов, Т. В. Ларикова,  
Н. Н. Лойко, В. И. Цехош, С. Г. Черноок

*Квантово-размерная структура GaAs/Al<sub>0,23</sub>Ga<sub>0,77</sub>As, состоящая из трех изолированных ям, была имплантирована ионами <sup>174</sup>Yb с энергией 120 кэВ до расчетных концентраций 10<sup>15</sup> – 10<sup>19</sup> см<sup>-3</sup>. По данным фотолюминесценции оценено пространственное распределение радиационных дефектов по глубине структуры.*

В данной работе рассматривается возможность использования ионной имплантации для легирования квантово-размерных структур.

Известно, что при имплантации объемных полупроводников расчетные профили распределения вводимой примеси по глубине образца хорошо согласуются с данными, полученными методом вторичной ионной масс-спектропии (ВИМС). В то же время при имплантации в полупроводники III-V профиль распределения дефектов по глубине образца простирается значительно глубже, чем профиль вводимой примеси [1]. Профили распределения дефектов по глубине образца практически не поддаются расчету, так как они зависят от целого ряда трудно контролируемых параметров, связанных как с условиями проведения имплантации, так и со свойствами конкретного образца. В данной работе была предпринята попытка проследить влияние границ раздела на кинетику накопления радиационных дефектов, установить характер их распределения по глубине структуры.

Для проведения имплантации была выбрана структура, состоящая из трех изолированных квантовых ям из GaAs различной ширины, разделенных барьерами

<sup>1</sup>ГИРЕДМЕТ.

из  $Al_xGa_{1-x}As$ . Структура была выращена методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Рост структуры проводился на подложке  $GaAs$  с ориентацией (001) при температуре  $\simeq 600^\circ C$ . Выращенная структура исследовалась методом ВИМС. По измерениям профилей распределения  $Al$  по глубине структуры уточнялась ширина барьеров и концентрация алюминия  $x$ ; она равна 0,23.

В качестве основной контролирующей методики использовалась фотолюминесценция (ФЛ). Спектры ФЛ квантово-размерной структуры измерялись следующим образом. Возбуждающее ФЛ модулированное излучение мощностью  $\sim 1 Вт$  было сфокусировано на образце в пятно диаметром около 3 мм. Спектральная область возбуждающего ФЛ света лежит в диапазоне от 4000 до 6000  $\text{Å}$ . Излучение от образца собиралось на входной щели спектрометра ДФС-12 (линейная дисперсия во втором порядке составляет 10  $\text{Å}/мм$ ). На выходе спектрометра в качестве фотоприемника использовался охлаждаемый ФЭУ-81. Регистрация ФЛ велась методом синхронного детектирования. Температура образца во время измерений ФЛ составляла 77 К.

Типичный спектр ФЛ исследуемой структуры приведен на рис. 1.1. Для определения ширины каждой из трех квантовых ям  $L_i$  по положению экситонных пиков в спектре ФЛ были использованы нормировочные кривые из статьи [2]. Для исследованных структур получены следующие значения:  $L_1 \sim 98 \text{ Å}$ ,  $L_2 \sim 153 \text{ Å}$  и  $L_3 > 250 \text{ Å}$ . Качество структуры оценивалось по полуширине экситонного пика на полувысоте  $\delta_i$ . Эти полуширины имели следующие средние значения:  $\delta_1 \sim 3,0 мэВ$ ;  $\delta_2 \sim 2,0 мэВ$ ;  $\delta_3 \sim 2,8 мэВ$ . Геометрия структуры показана на рис. 2а.

В качестве имплантируемой примеси мы выбрали ион  $Yb$ , основываясь на определенном опыте работы по имплантации  $Yb$  в объемные кристаллы  $GaAs$ ,  $GaP$  и  $InP$ . Это сравнительно тяжелый ион с большим ионным радиусом, сильно взаимодействующий с рядом фоновых примесей. Профили распределения имплантированного  $Yb$  по глубине объемных образцов, полученные методом математического моделирования, хорошо согласуются с данными ВИМС.

Имплантация проводилась ионами  $^{174}Yb$  с энергией 120 кэВ при комнатной температуре. Облучению ионами подвергалась одна половина каждого образца. Расчетные концентрации вводимой примеси составляли  $10^{15}$ ,  $10^{16}$ ,  $10^{17}$ ,  $10^{18}$ ,  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Профиль распределения  $Yb$  по глубине образца, полученный методом математического моделирования, показан на рис. 2б. Расчетный максимум концентрации введенного  $Yb$  лежит на глубине  $\sim 300 \text{ Å}$ , то есть можно считать, что имплантирован в основном первый барьер.

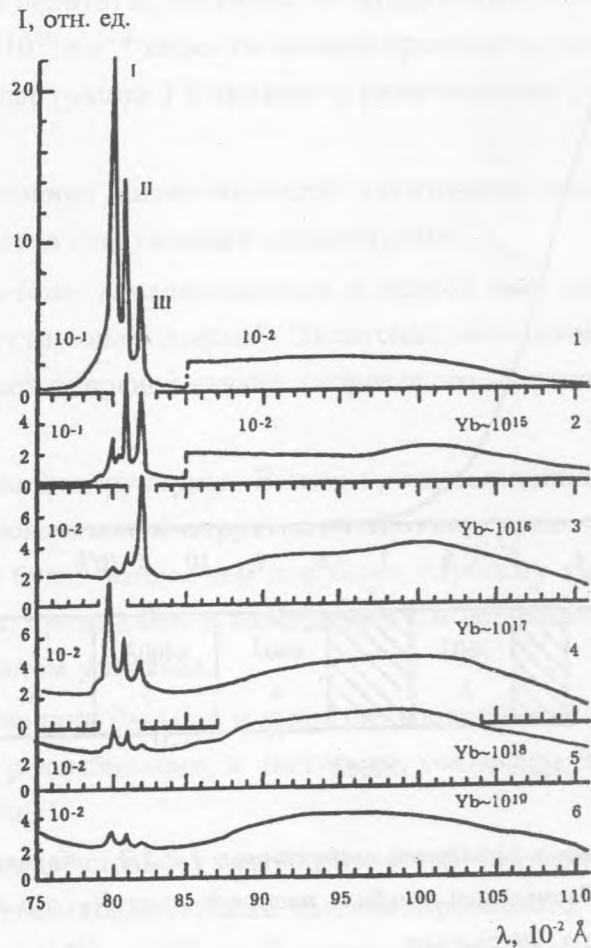


Рис. 1. Спектры ФЛ образцов квантово-размерной структуры  $GaAs/Al_{0,23}Ga_{0,77}As$ : 1 – исходный образец; 2 – 6 – образцы, имплантированные  $Yb$  до указанных расчетных концентраций  $Yb, cm^{-3}$  (по порядку величины).

На рис. 1 изображены спектры ФЛ образцов до и после имплантации  $Yb$ . При расчетной концентрации  $Yb$  порядка  $10^{15} cm^{-3}$  (рис. 1. 2) интенсивность излучения экситонных пиков уменьшилась по сравнению с исходной (рис. 1.1): в первой яме – приблизительно на порядок, во второй яме – в 2-3 раза, в третьей яме – незначительно.

Увеличение концентрации  $Yb$  до  $\sim 10^{16} cm^{-3}$  привело к уменьшению интенсивности ФЛ первой и второй квантовых ям приблизительно на два порядка и приблизительно на порядок – третьей ямы (рис. 1.3).

При переходе к концентрации  $Yb \sim 10^{17} cm^{-3}$  интенсивность излучения всех трех

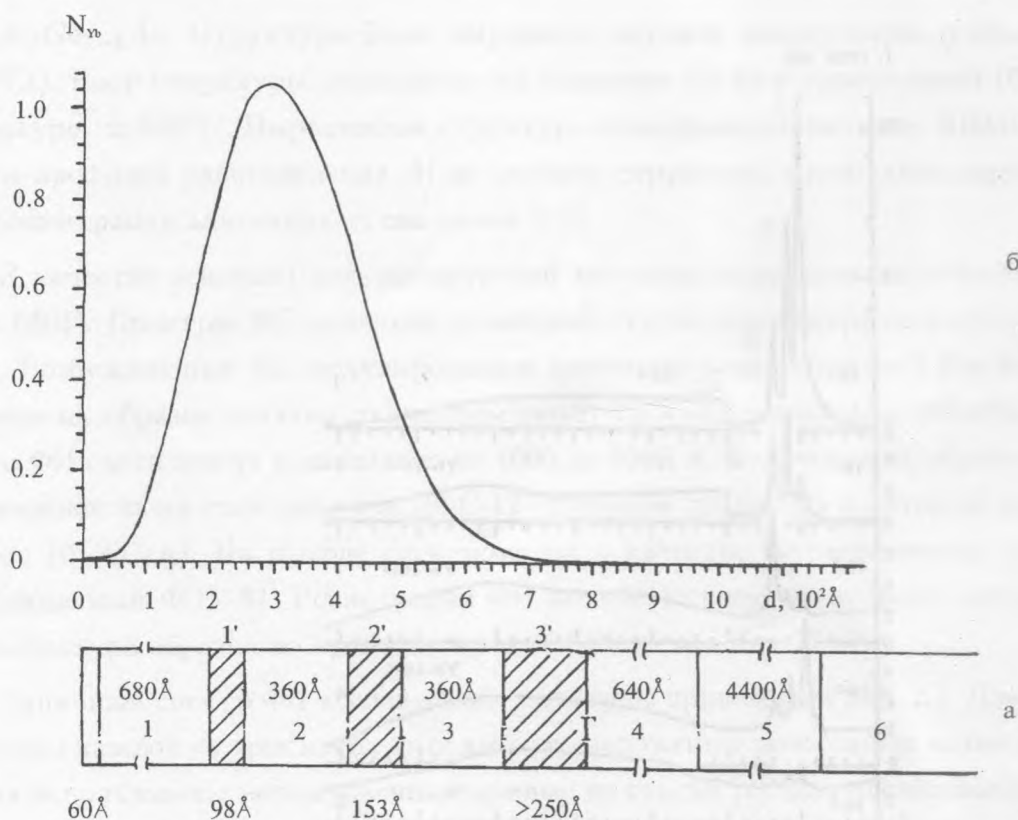


Рис. 2. а) Геометрия квантово-размерной структуры: 1,2,3,4, – барьеры, 5 – буфер, 6 – подложка, 1', 2', 3' – ямы. б) Расчетный профиль распределения  $N_{yb}$  по глубине  $d$  структуры, нормированный на значение в максимуме.

экситонных пиков снизилась приблизительно на два порядка, и при этом изменился характер распределения интенсивностей между квантовыми ямами (рис. 1.4). Он стал подобен распределению интенсивностей по квантовым ямам до имплантации.

Аналогичное распределение интенсивностей по квантовым ямам при общем понижении интенсивности экситонных пиков наблюдалось на образцах с концентрациями  $Yb \sim 10^{18}$  и  $10^{19} \text{ см}^{-3}$  (рис. 1.5 и 1.6). При этом наряду с гашением ФЛ в экситонной части спектра наблюдается относительный рост интенсивности излучения в примесно-дефектной области (более 8400 Å).

Ранее уже отмечалось, что имплантационные дефекты проникают в кристалл значительно глубже, чем вводимая примесь. Поэтому изменения интенсивности экситонных пиков мы связываем с распространением радиационных дефектов по глубине структуры. Анализируя спектры ФЛ, можно сказать, что при концентрации  $Yb \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$

дефекты проникли в первую и, частично, во вторую ямы, но не затронули третью. При концентрации  $Yb \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$  дефекты начали проникать уже в третью яму, и дальнейшее увеличение концентрации  $Yb$  привело к равномерному распределению дефектов по всей структуре.

Исходное соотношение интенсивностей экситонных пиков в квантово-размерной структуре определяется следующими параметрами.

а) Свойства экситона, локализованного в данной яме, прежде всего, энергия связи электрона с соответствующей дыркой. Экситоны, локализованные в более узких ямах (обладающие большей энергией связи), скорее всего, должны давать большую интенсивность.

б) Геометрия самой структуры. В нашем случае наиболее узкая яма расположена ближе всего к поверхности структуры, поэтому уровень накачки ее электронно-дырочными парами будет выше, чем для более глубоких ям. Уровень накачки в этом случае определяется, прежде всего, коэффициентом поглощения падающего света материалом барьера, а затем уже ямы.

в) Качество материала барьера и ямы, т.е. соотношение излучательных и безызлучательных каналов рекомбинации, в частности, концентрация точечных дефектов, как в барьере, так и в яме.

На рис. 3 показаны зависимости интенсивностей ФЛ первой, второй и третьей квантовых ям от расчетной концентрации имплантированного  $Yb$ . Видно, что в области малых концентраций ( $10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) скорости введения дефектов в первой и второй ямах близки друг к другу, а в третьей – несколько меньше. Для расчетных концентраций  $Yb$  более  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  изменилась не только скорость введения дефектов, но и характер накопления дефектов для двух ближайших к поверхности структуры ям.

Имплантация проводилась таким образом, что набор необходимой дозы обеспечивался ростом плотности ионного тока. Поэтому можно предположить, что увеличение плотности ионного тока при переходе к концентрациям большим, чем  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , привело к дополнительному энерговыделению при имплантации, а следовательно, либо к частичному отжигу накопленных дефектов, либо к повышению скорости их миграции внутри структуры. Поскольку максимальные изменения произошли в кинетике накопления дефектов для первых двух ям, а для третьей характер накопления дефектов изменился слабо, то не исключено, что наличие градиента дополнительного энерговыделения ускорило исчезновение градиента концентраций дефектов по толщине структуры. Однако из-за сложности объекта исследования нельзя исключить возможность участия в кине-

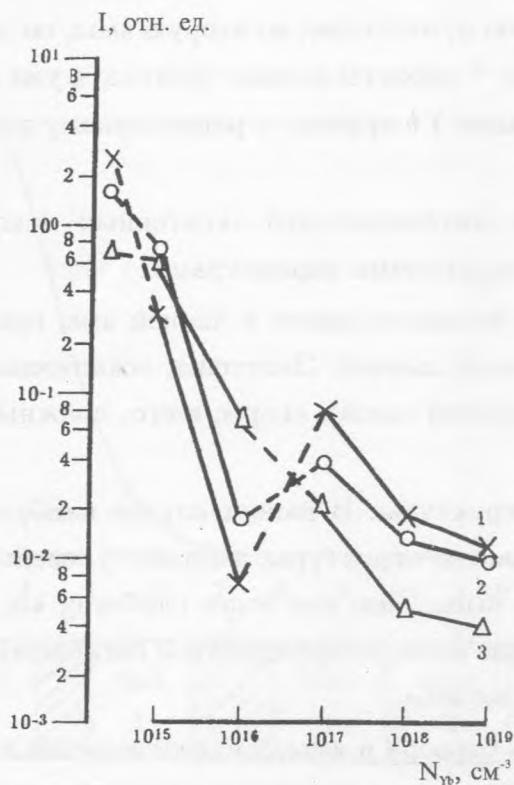


Рис. 3. Зависимость интенсивности ФЛ  $I$  от расчетной концентрации  $N$  имплантированного  $Yb$  для квантовых ям: 1 - первой; 2 - второй; 3 - третьей.

тике накопления дефектов и других факторов.

Отметим, что после имплантации во всем диапазоне концентраций, вплоть до  $10^{19} см^{-3}$ , не происходит ни уширения экситонных пиков, ни их сдвига в коротковолновую область, а значит, не происходит "размывания" границ раздела, т.е. структура достаточно устойчива к подобной имплантации.

Таким образом, используя в качестве пространственных зондов излучение экситонов, локализованных в квантовых ямах, можно проследить профиль пространственного распределения дефектов и кинетику их накопления внутри структуры с ростом дозы имплантации.

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

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gippius A. A., Ushakov V. V., Yakimkin V. N., and Vavilov V. S. 6th International conference on ion beam modification of materials, Tokyo, Japan, June 12-17, 1988, p. EP-47.
- [2] Oelgart G. et al. Phys. Rev., **B49**, 10456 (1994).

Поступила в редакцию 8 июля 1996 г.