

УДК 621.315.592.3

## ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ЦЕНТРОВ, СВЯЗАННЫХ С ИОНАМИ $Yb^{3+}$ , В КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ GaAs/GaAlAs

В. М. Коннов, И. П. Казаков, Н. Н. Лойко, В. А. Дравин, О. М. Бородина<sup>1</sup>,  
М. Ю. Часовских, А. А. Гиппиус

*Проведены исследования фотолюминесценции квантово-размерных структур на основе GaAs/GaAlAs, легированных Yb либо в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии, либо методом ионной имплантации. Специфическая люминесценция, связанная с ионами  $Yb^{3+}$ , наблюдалась только после дополнительной имплантации кислорода. Проведено сопоставление интенсивности редкоземельной люминесценции в квантово-размерных структурах и объемном материале.*

Внимание, проявляемое к исследованиям оптических свойств квантово-размерных структур, в значительной мере обусловлено перспективами создания на их основе новых оптоэлектронных приборов.

Исследования спектров возбуждения фотолюминесценции (ФЛ) редкоземельных (РЗ) ионов  $Er^{3+}$ , помещенных в кристаллы кремния и арсенида галлия показали, что в механизме возбуждения этих ионов существенную роль играют экситоны [1]. Методы зонной инженерии позволяют резко повысить концентрацию экситонов в отдельных пространственных областях структуры с пониженной размерностью, прежде всего, в квантовых ямах. При этом предполагается, что в такой системе эффективность возбуждения РЗ иона будет определяться параметрами квантово-размерной структуры и

<sup>1</sup>Государственный научный центр РФ институт ГИРЕДМЕТ.

атомно-электронной структурой самого РЗ центра, если, конечно, введение РЗ элемента катастрофически не ухудшит качества самих материалов барьера и ямы, например, из-за больших геометрических размеров РЗ атомов.

В данной работе исследовалась фотолюминесценция квантово-размерной структуры на основе  $GaAs/GaAlAs$ , легированной  $Yb$  либо в процессе роста этой структуры по технологии молекулярно-лучевой эпитаксии (МВЕ), либо методом ионной имплантации. Выбор  $Yb$  в качестве РЗ примеси определялся накопленным опытом работы с объемными кристаллами  $GaAs$ ,  $AlGaAs$ ,  $GaP$  и  $InP$ , легированными  $Yb$  в процессе ионной имплантации или при выращивании эпитаксиальных слоев [2 – 7].

Рост квантово-размерных структур проводился на установке МВЕ "Цна-25", имплантация – на ускорителе тяжелых ионов "High Voltage Engineering Europe".

Имплантация ионов, вносящая значительные радиационные повреждения, и отжиг с целью их устранения, в общем, приводят к ухудшению качества квантово-размерных структур. Это проявляется как в уменьшении интенсивности линий экситонной люминесценции, так и в их уширении, обусловленном изменением геометрии квантово-размерных структур (диффузия алюминия из барьерного слоя  $AlGaAs$  в область  $GaAs$ ) при высокотемпературном отжиге. В ходе предшествующих исследований были определены режимы имплантации и отжига, обеспечивающие приемлемое качество структур [8].

*Одноямная, МВЕ-легированная структура.* Вначале рассмотрим результаты, полученные на предельно простой структуре, состоящей из 100-Å ямы  $GaAs$ , легированной  $Yb$  во время роста по технологии МВЕ, заключенной между двумя барьерами из  $Al_xGa_{1-x}As$  толщиной  $\sim 40$  нм.

Измерения, проведенные методом масс-спектропии вторичных ионов (SIMS), подтвердили наличие ямы шириной  $\sim 10$  нм и показали, что концентрация алюминия в материале барьера  $x \sim 0.3$ , а толщина барьеров близка к рассчитанной из условий роста структуры. К сожалению, чувствительности метода SIMS не хватило, чтобы определить наличие  $Yb$  в тонком слое  $GaAs$  и, тем более, оценить его концентрацию. Для оценки величины концентрации  $Yb$  в материале квантовой ямы были воспроизведены режимы роста и легирования  $Yb$  контрольных пленок  $GaAs$ , но уже на более толстых ( $\sim 100$  нм) слоях. Измерения SIMS показали, что при использованных технологических режимах в этих контрольных слоях концентрация  $Yb$  была постоянной по глубине и составляла  $\sim 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Существенно, что в спектре такой структуры присутствовало мощное излучение экситонов, локализованных в квантовой яме. Таким образом, струк-

тура достаточно безболезненно перенесла введение  $Yb$  в объем квантовой ямы. В то же время излучение ионов  $Yb^{3+}$  отсутствовало.

На основании опыта предыдущей работы с объемными кристаллами  $GaAs$ , легированными  $Yb$ , данная структура была имплантирована ионами кислорода таким образом, чтобы глубина залегания максимума распределения кислорода пришлась на середину ямы, а концентрация кислорода в максимуме соответствовала  $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$  [2]. Режимы отжига были выбраны такими, чтобы минимизировать возможные проявления деградации этой структуры [8, 9]. На начальных стадиях отжига пики экситонного излучения в спектрах ФЛ квантовой структуры становились несимметричными и уширенными. При повышении температуры отжига помимо несимметричного уширения полосы экситонного излучения наблюдался и ее коротковолновый сдвиг, связанный с уменьшением ширины квантовой ямы из-за проникновения алюминия из барьера в материал ямы. После однократного фотостимулированного отжига (ФСО) при температуре  $\sim 700^\circ C$  длительностью 5 мин уширение и сдвиг экситонной полосы оказались в пределах разброса значений этих параметров по площади структуры. Это означает, что деградационные явления если и имели место, то их влияние не оказывало определяющего воздействия на квантовые свойства структуры.

Имплантация кислорода и пятиминутный отжиг при  $700^\circ C$  привели к уменьшению интенсивности экситонной люминесценции на полтора – два порядка и появлению люминесценции, связанной с f-f переходами на ионах  $Yb^{3+}$  (рис. 1). Видно, что РЗ излучение представлено двумя линиями, локализованными на  $\sim 991 \text{ нм}$  (Y-центры) и  $1006 \text{ нм}$  (X-центры). Ранее нами на основании накопленного статистического материала по спектрам РЗ излучения разнообразных по своему примесному составу кристаллов  $GaAs$ , имплантированных совместно иттербием и кислородом, было показано, что в кристаллах  $GaAs:(Yb + O)$  линия излучения  $1006 \text{ нм}$  связана с ассоциацией иона  $Yb^{3+}$  с примесью  $Se$ , а линия  $990.8 - 991 \text{ нм}$  – с комплексом  $Yb^{3+} + Si$  [3].

Таким образом, структура центров РЗ люминесценции и условия их формирования в квантово-размерных структурах в целом близки к таковым в объемном материале, а специфичность спектров различных редкоземельных люминесцентных комплексов позволяет использовать их для определения фоновых примесей (в данном случае  $Se$  и  $Si$ ) в квантово-размерных структурах.

*Трехъямная, ионно-имплантированная структура.* Структура, состоящая из последовательности квантовых ям из  $GaAs$  различной толщины, была использована ранее при исследовании влияния дефектов, возникающих при ионной имплантации, на свой-

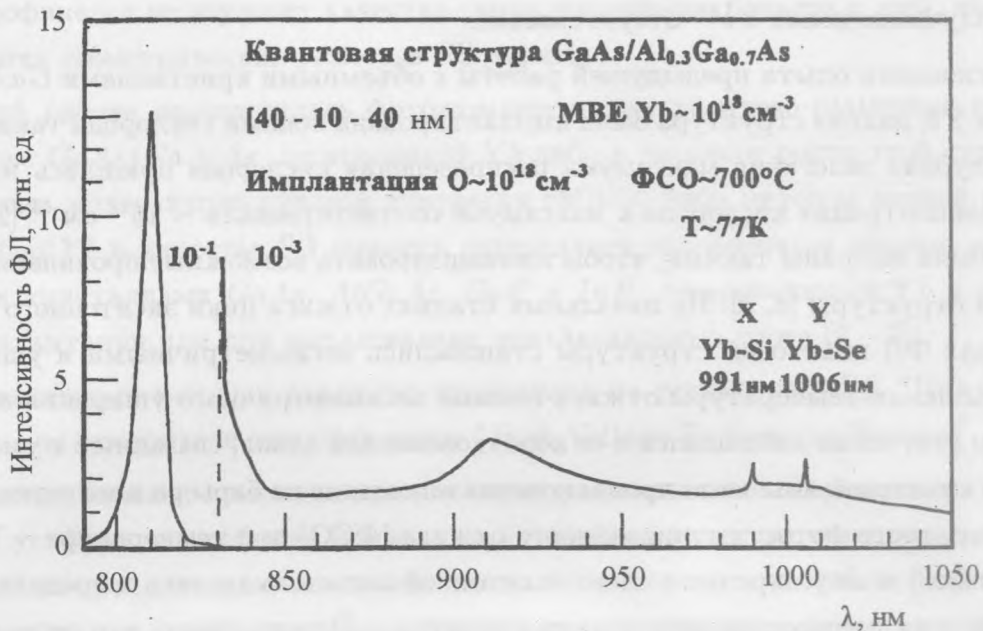


Рис. 1. Спектр ФЛ квантовой структуры, выращенной и легированной Yb методом МВЕ. Измерения проведены после имплантации структуры ионами кислорода и ФСО при температуре  $700^\circ\text{C}$  длительностью 5 минут. Спектр ФЛ регистрировался при температуре образца  $77\text{ K}$ .

ства квантово-размерных структур [8]. При этом специфические линии собственной люминесценции разных ям были использованы для контроля пространственного распределения радиационных дефектов и определения оптимальных условий имплантации и отжига. В частности, было установлено, что в случае иттербия таковыми являются: концентрация Yb в максимуме распределения –  $10^{17}\text{ см}^{-3}$ , температура отжига –  $700^\circ\text{C}$ , длительность – 5 мин.

Имплантация Yb и отжиг при указанных условиях не привели к возникновению в данной структуре специфических линий люминесценции иона  $\text{Yb}^{3+}$ . Ранее нами было показано, что эффективные центры люминесценции на основе иона  $\text{Yb}^{3+}$  в объемных ионно-легированных кристаллах GaAs реализуются в виде трехкомпонентных комплексов, включающих ионы  $\text{Yb}^{3+}$ , кислорода и соактиваторов – элементов IV (кремний, углерод) и VI (сера, селен) групп Периодической системы [10, 11]. Кислород, не влияя на энергетический спектр таких центров, играет определяющую роль в процессе передачи энергии возбуждения электронно-дырочных пар решетки центрам люминесценции.

На основании этих данных была проведена дополнительная имплантация кислорода и селена; выбор последнего обусловлен как тем, что люминесцентные комплексы с его участием дают достаточно эффективную люминесценцию, так и тем, что, по не очень понятным причинам, его присутствие несколько ослабляет эффекты радиационного повреждения [3]. Имплантация образцов квантовой структуры примесями селена и кислорода проводилась при таких энергиях, чтобы глубины залегания максимумов распределения этих примесей были по возможности близки к глубине залегания  $Yb$ , а значения в максимуме также соответствовали  $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

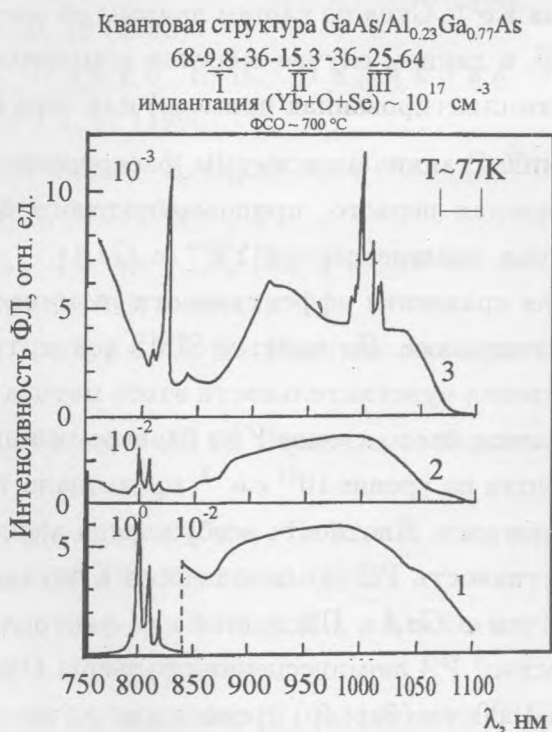


Рис. 2. Спектры ФЛ образцов полупроводниковой структуры GaAs/AlGaAs, содержащей три изолированных квантовых ямы различной ширины. 2.1 – спектр ФЛ образца исходной структуры. 2.2 – спектр ФЛ образца квантово-размерной структуры после имплантации первого барьера ионами  $Yb$ ,  $Se$  и  $O$  до расчетных значений концентраций  $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$  в максимуме распределения примесей. 2.3 – спектр ФЛ образца после имплантаций ( $Yb+Se+O$ ) и после проведения ФСО при  $700^\circ\text{C}$  длительностью 5 минут. Температура образцов при записи спектров ФЛ составляла  $77 \text{ K}$ .

На рис. 2 приведены спектры ФЛ исходной квантовой структуры (2.1), то же после

имплантаций ( $Yb + O + Se$ ), (2.2) и, наконец, после проведения ФСО при температуре  $700^\circ C$  длительностью 5 мин (2.3). На спектре 2.3, помимо излучения экситонов, локализованных в квантовых ямах, четко видно характеристическое излучение ионов  $Yb^{3+}$ .

Как показало исследование спектров ФЛ объемных пленок  $GaAlAs$ , либо легированных  $Yb$  по технологии МВЕ, либо имплантированных  $Yb$ , излучение центров люминесценции на основе ионов  $Yb^{3+}$  в этом материале сосредоточено в интервале от 980 до 1002 нм [5]. Отсюда следует, что излучение в выделенной на рис. 2.3 спектральной области (т.е. с длиной волны более 1002 нм) связано с находящимися в  $GaAs$  люминесцентными комплексами на основе иона  $Yb^{3+}$ . Судя по нашим данным об энергетической структуре комплексов такого типа [3], в данном случае в состав комплексов, помимо иттербия и кислорода, входит селен (имплантированная примесь) или сера (фоновая примесь).

Исходя из условий имплантации (максимумы распределения имплантированных примесей находятся в пределах первого, приповерхностного барьера) можно утверждать, что в данном случае люминесценция  $Yb^{3+}$  в  $GaAs$  – это РЗ люминесценция первой квантовой ямы. Для сравнения эффективности люминесценции в яме и барьере следует иметь в виду следующее. По данным SIMS концентрация  $Yb$  в первой яме не превышала  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  (предел чувствительности этого метода по  $Yb$ ), а, скорее всего, составляла  $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Полное число атомов  $Yb$  в барьере толщиной  $\sim 70 \text{ нм}$ , где находится максимум концентрации на уровне  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ , превышало таковое в яме толщиной  $\sim 10 \text{ нм}$  примерно на два порядка. Плотность возбуждения в области ямы меньше, чем в области барьера. Эффективность РЗ люминесценции в случае объемного материала в целом выше в  $AlGaAs$ , чем в  $GaAs$ . Последние два фактора должны были бы еще более усилить "преимущество" РЗ люминесценции барьера. Однако интенсивность РЗ излучения в области 980 – 1000 нм (барьер) превосходит интенсивность в области 1000 – 1010 нм (яма) не более чем в 3 – 4 раза. Это означает, что интенсивность люминесценции (в расчете на единицу концентрации) центров на основе  $Yb^{3+}$ , находящихся в квантовой яме, более чем на порядок превышает таковую в барьере благодаря эффектам пространственного ограничения электронно-дырочных пар.

В данной работе показано, что методы молекулярно-лучевой эпитаксии в сочетании с ионной имплантацией позволяют реализовать полупроводниковые структуры пониженной размерности, содержащие центры люминесценции на основе ионов  $Yb^{3+}$ . Установлено, что структура и процессы формирования таких центров в квантово-размерных структурах в целом близки к таковым в объемном материале. Обнаружено увеличение

эффективности редкоземельной люминесценции в квантовых ямах благодаря эффектам пространственного ограничения электронно-дырочных пар.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (96-02-18206), программы "Физика твердотельных наноструктур" (97-1046), ИНТАС – РФФИ (95-0531) и CRDF (NRE1-235).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мастеров В. Ф. ФТП, **27**, вып. 9, 1435 (1993).
- [2] Коннов В. М., Лойко Н. Н., Гиппиус А. А. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 9-10, 18 (1995).
- [3] Коннов В. М., Лойко Н. Н., Ларикова Т. В. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 3-4, 67 (1996).
- [4] Коннов В. М., Лойко Н. Н., Черноок С. Г. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 3, 3 (1999).
- [5] Коннов В. М., Лойко Н. Н., Гилинский А. М. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, в печати.
- [6] Коннов В. М., Лойко Н. Н. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 9-10, 41 (1997).
- [7] Коннов В. М., Лойко Н. Н. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 9-10, 52 (1997).
- [8] Бородина О. М., Дравин В. А., Казаков И. П. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 9-10, 41 (1996).
- [9] Лойко Н. Н., Коннов В. М., Ларикова Т. В. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 9-10, 48 (1996).
- [10] Коннов В. М., Ларикова Т. В., Лойко Н. Н., Ушаков В. В. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 5-6, 50 (1995).
- [11] Дравин В. А., Коннов В. М., Ларикова Т. В., Лойко Н. Н. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 5-6, 18 (1995).

Поступила в редакцию 12 мая 1999 г.