

УДК 621.315.592.3

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ СТРУКТУР ZnSe/CdZnSe, ВКЛЮЧАЯ СТРУКТУРЫ С ПОНИЖЕННОЙ РАЗМЕРНОСТЬЮ, ВЫРАЩЕННЫЕ И ЛЕГИРОВАННЫЕ Yb В ПРОЦЕССЕ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ

В. М. Коннов, Н. Н. Лойко, Ю. Г. Садофьев, А. С. Трушин

Проведены исследования фотолюминесценции структур на основе соединений ZnSe/CdZnSe, выращенных и легированных иттербием в одном процессе молекулярно-лучевой эпитаксии. Специфическая люминесценция, связанная с ионами Yb^{3+} , наблюдалась только после дополнительной имплантации ионов кислорода и проведения термоотжига. Для структур ZnSe/CdZnSe с квантовыми ямами (КЯ) определены оптимальные условия для наблюдения люминесценции, обусловленной экситонами, локализованными в КЯ, и сложными центрами на основе иона Yb^{3+} .

Проблема легирования полупроводников редкоземельными (РЗ) элементами достаточно сложна. Известно, что введение РЗ элемента в полупроводниковую матрицу не всегда приводит к возникновению излучения фотолюминесценции. Основные аспекты этой проблемы изложены в работах [1, 2]. Внимание, проявляемое к изучению условий, необходимых для появления устойчивого и воспроизводимого излучения РЗ ионов, помещенных в различные полупроводниковые матрицы, обусловлено большими потенциальными возможностями применения таких материалов в оптоэлектронике, в частности, для создания узкополосных источников света.

Изучение спектров возбуждения фотолюминесценции ионов Er^{3+} в кристаллах кремния и $GaAs$ показали, что существенную роль в механизме возбуждения РЗ ионов играют экситоны [1 – 3]. Методы зонной инженерии позволяют резко повысить концентрацию экситонов в отдельных пространственных областях структуры с пониженной

размерностью. В таких системах эффективность возбуждения РЗ иона будет определяться параметрами квантово-размерной структуры и атомно-электронной структурой самого РЗ-центра, если, конечно, введение атомов РЗ элемента катастрофически не ухудшит качество самих материалов барьера и ямы, например, из-за достаточно больших размеров РЗ атомов.

Цель данной работы – исследование процессов формирования f -люминесцентных центров и их оптических характеристик с учетом особенностей, обусловленных пониженной размерностью матрицы, на примере легированных РЗЭ структур на основе соединений II–VI с квантовыми ямами. Отметим, что влияние РЗ примеси на излучательные свойства квантово-размерных структур на основе соединений II–VI до сих пор не исследовалось.

Экспериментальная часть. На начальном этапе работы был проведен цикл ростовых процессов на установке молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) типа "Катунь", в результате которых была отработана технология выращивания монокристаллических пленок $ZnSe$ на подложках $GaAs$, обладающих достаточно высоким кристаллическим совершенством. На втором этапе были определены оптимальные режимы для легирования слоев $ZnSe$ и $CdZnSe$ иттербием непосредственно в процессе роста этих слоев по технологии МЛЭ. В ходе этих экспериментов были получены структуры $ZnSe:Yb/GaAs$ и $Cd_xZn_{1-x}Se:Yb/ZnSe/GaAs$ с концентрацией атомов Yb от 10^{17} см^{-3} до 10^{19} см^{-3} .

Исследования полученных образцов методом вторичной ионной массспектрометрии (ВИМС) подтвердили наличие Yb в выращенных слоях $ZnSe$ в значительных концентрациях, и показали, что распределение иттербия по толщине выращенных слоев однородно во всем диапазоне используемых уровней легирования. Несмотря на это, в спектрах фотолюминесценции образцов характеристического излучения ионов Yb^{3+} не наблюдалось.

С подобной ситуацией мы уже сталкивались при исследованиях слоев $ZnTe$ и $GaAs$, выращенных и легированных Yb в процессе МЛЭ. Оказалось, что для получения устойчивого и воспроизводимого излучения РЗ центров на основе иона Yb^{3+} в слоях полупроводников необходимо присутствие кислорода, и слои должны быть высокого кристаллического качества [4 – 6]. В данной работе кислород вводился методом ионной имплантации, а затем проводился термоотжиг образцов. Ниже приводятся результаты фотолюминесцентных исследований полупроводниковых структур трёх типов, выращенных по следующей схеме. У всех трех структур толщина буферного слоя нелегированного $ZnSe$ составляла примерно 700 нм. Затем в структурах I типа осаждался

слой $ZnSe$ толщиной 40 нм, легированный Yb до концентрации $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$. У структур II и III типа на буферный слой последовательно наращивались две квантовые ямы $Cd_{0.2}Zn_{0.8}Se$ шириной 5 и 10 нм соответственно, разделенные 40 нм $ZnSe$ барьером. Структуры покрывались слоем $ZnSe$ толщиной 40 нм. У структуры II типа этот верхний слой был легирован Yb до концентрации $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$. У структуры III типа Yb вводился в процессе роста 10 нм – $Cd_{0.2}Zn_{0.8}Se$ квантовой ямы. Далее методом ионной имплантации в структуры вводили кислород. При этом облучению кислородом подвергалась половина каждого образца. Эту часть образца мы назовём рабочей. Вторая половина образца – контрольная – служила для выявления влияния условий проведения термоотжига на фотолюминесцентные свойства структур.

Образцы I типа $ZnSe:Yb/ZnSe/GaAs$ были ионно-легированы кислородом методом распределенных доз. В этом случае энергии и дозы имплантации подбирались таким образом, чтобы обеспечить равномерное распределение кислорода в слое $ZnSe$ толщиной ~ 40 нм. Концентрация кислорода при этом составляла: $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, 10^{17} см^{-3} , $3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, 10^{18} см^{-3} , $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, 10^{19} см^{-3} , $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, 10^{20} см^{-3} .

При имплантации в квантово-размерные структуры II и III типов энергия ионов кислорода была выбрана так, чтобы максимум распределения этих ионов совпадал с центром широкой ямы ($E = 25 \text{ кэВ}$). Доза облучения подбиралась так, чтобы концентрация примеси кислорода в максимуме распределения лежала в диапазоне от $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ до $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

После имплантации кислорода образцы $ZnSe:(Yb + O)/GaAs$ отжигались в атмосфере водорода при давлении $\sim 1 \text{ атм}$. Длительность каждого этапа отжига составляла ~ 5 минут. Отжиг проводился в интервале температур $100 - 650^\circ \text{C}$ с шагом по температуре $30 - 50^\circ \text{C}$. После каждого этапа отжига регистрировались спектры фотолюминесценции образца при температуре 77 K на установке, созданной на основе спектрометра ДФС-12.

Отметим, что излучение ионов Yb^{3+} было зарегистрировано на контрольных (не имплантированных кислородом) частях некоторых исследуемых образцов I типа после отжига при температуре $\sim 100^\circ \text{C}$. Возникновение этого слабого и неустойчивого излучения, по-видимому, обусловлено наличием в образцах примеси фонового кислорода. На рабочих частях тех же самых образцов, содержащих атомы кислорода в концентрациях $(5 \cdot 10^{16} - 6 \cdot 10^{17}) \text{ см}^{-3}$, РЗ излучение появилось после отжига при температуре $220 - 260^\circ \text{C}$. Для образцов I типа с концентрацией кислорода выше 10^{18} см^{-3} – после

отжига при температуре $\sim 300^\circ\text{C}$. Для образцов с концентрацией Yb более 10^{20} см^{-3} , РЗ излучение не наблюдалось во всем диапазоне температур проведения отжига. Исследования влияния концентрации кислорода на эффективность излучения структур позволило определить оптимальные значения концентрации кислорода и температуры отжига. Было установлено, что в слоях $\text{ZnSe}:(\text{Yb} + \text{O})$, оптимальная концентрация кислорода составляет примерно $(3 - 6) \cdot 10^{18}\text{ см}^{-3}$ (при концентрации $\text{Yb} \sim 10^{18}\text{ см}^{-3}$), а оптимальная температура отжига лежит в диапазоне $400 - 600^\circ\text{C}$.

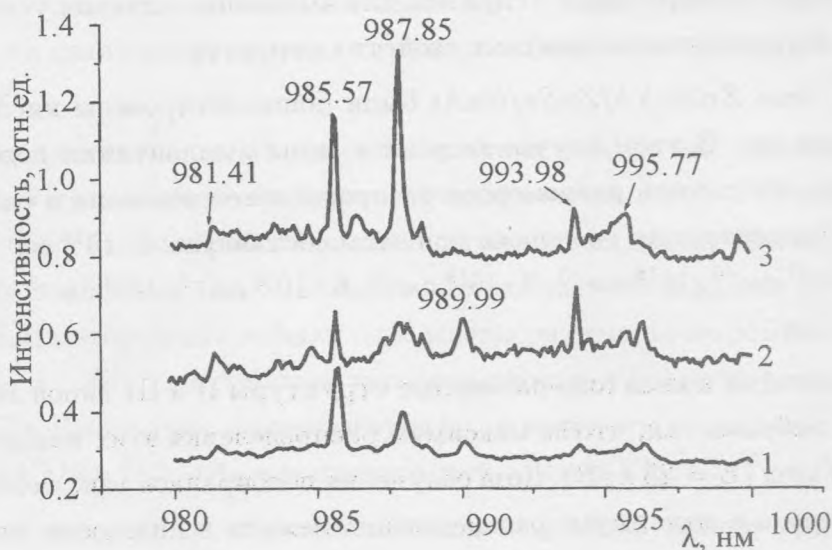


Рис. 1. Спектры РЗ излучений одного и того же образца структуры первого типа после отжигов при температурах 350°C (1), 450°C (2) и 600°C (3). Концентрация Yb в слое ZnSe составляла $\sim 10^{18}\text{ см}^{-3}$, концентрация атомов кислорода $\sim 3 \cdot 10^{18}\text{ см}^{-3}$. Относительные единицы измерения интенсивности на всех последующих рисунках одинаковы.

Результаты. РЗ спектры одного и того же образца структуры I типа, отожженного при трех температурах приведены на рис. 1. После отжига при температуре $\sim 300^\circ\text{C}$ первой появилась полоса при $980 - 982\text{ нм}$. При температурах отжига $350 - 450^\circ\text{C}$ были зарегистрированы две группы линии при 985 нм и 995 нм . Дальнейшее повышение температуры отжига до 650°C приводило к гашению РЗ излучения. Следует отметить, что после отжига при температурах $300 - 400^\circ\text{C}$ в спектрах фотолюминесценции этой серии образцов, зарегистрированных как на рабочих, так и контрольных частях, появились как линии связанных экситонов, так и следы краёвых полос (458.5 нм и 461.0

нм), характерных для объемных кристаллов $ZnSe$. Эти краевые полосы связывают с центрами Li_{Zn} и Na_{Zn} [7]. Это свидетельствует о значительном улучшении качества исходных образцов после проведения отжига и, в частности, о том, что большая часть радиационных дефектов в системе $ZnSe:(Yb + O)$ отжигается при температурах 350 – 400°С.

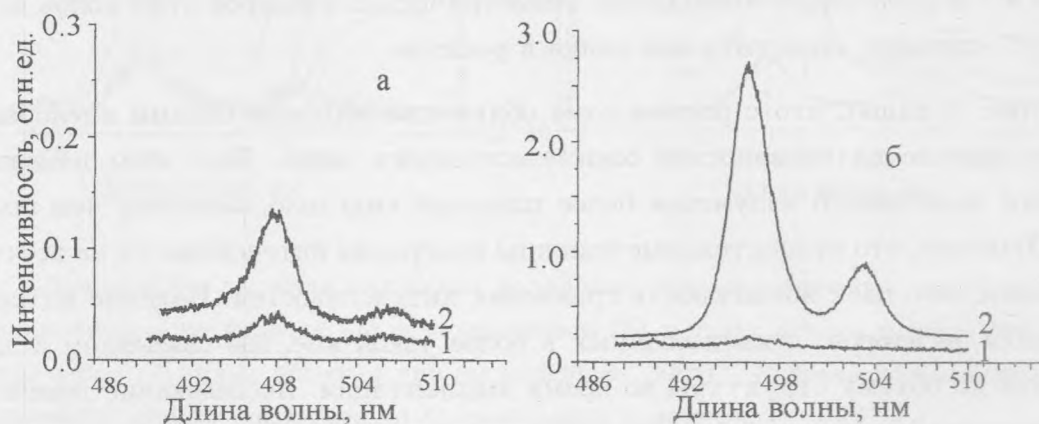


Рис. 2. Спектры ФЛ в области излучения экситонов, локализованных в квантовых ямах, зарегистрированных как на рабочих (1), так и на контрольных (2) частях одних и тех же образцов структуры второго типа после проведения имплантации ионов кислорода до двух значений максимума распределения его концентрации по глубине; а – $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, б – 10^{18} см^{-3} .

На рис. 2 приведены спектры фотолюминесценции, зарегистрированные как на контрольных, так и на рабочих частях одних и тех образцов структуры II типа после проведения имплантации ионов кислорода двумя различными дозами. Укажем, что для контрольных частей этих образцов ширина обоих пиков экситонов, локализованных в квантовых ямах, на полувысоте равна примерно 3 нм. Разброс в положении максимумов экситонов, локализованных как в широкой, так и в узкой ямах, для образцов этой серии не превышал 6.0 нм. Спектральные положения полос экситонов, локализованных в квантовых ямах, соответствуют тем, что указаны в работе [8].

По аналогии с результатами, полученными в работе [8], мы ожидали гораздо большей интенсивности экситонной линии, связанной с более широкой ямой, по сравнению с интенсивностью излучения экситонов, локализованных в более узкой яме. Это, по видимому, связано с легированием материала верхнего барьера, что привело к большей

концентрации ростовых дефектов, как в самом слое $ZnSe$, так и, вероятно, в прилегающем к нему слое материала широкой ямы. Другой причиной, которая могла бы вызвать падение интенсивности экситонной полосы широкой ямы, могут быть напряжения, обусловленные легированием барьера РЗ элементом. Дело в том, что размеры ионов Yb^0 и Yb^{1+} составляют по оценкам [9] соответственно 0.18 и 0.14 нм. В ходе проведения отжига, в результате взаимодействия с некоторыми фоновыми примесями, образуются ионы Yb^{3+} и происходит уменьшение геометрических размеров этих ионов до 0.08 нм. Ион Yb^{3+} способен заместить ион цинка в решетке.

На рис. 2 видно, что с ростом дозы облучения образцов ионами кислорода происходило падение интенсивностей обеих экситонных полос. При этом падение интенсивности экситонного излучения более широкой ямы шло заметнее, чем более узкой ямы. Отметим, что относительные единицы измерения интенсивности на всех рисунках одинаковы, что дает возможность сравнения интенсивностей. Падение интенсивности излучения экситонов, локализованных в более узкой яме, мы связываем с диффузией дефектов по объему структуры во время имплантации. Исследование поведения экситонных линий в зависимости от условий отжига проводилось в несколько этапов. В ходе проведения изохронного отжига в интервале температур $250 - 460^\circ C$ было установлено, что большая часть радиационных дефектов для образцов этой структуры отжигается при температуре $\sim 300^\circ C$. Также укажем, что для образцов этой серии также, как и в случае структуры I типа, после отжига при температуре $350 - 450^\circ C$ в спектрах фотолюминесценции были зарегистрированы линии связанных экситонов, характерных для объемных слоев $ZnSe$.

Спектры фотолюминесценции, зарегистрированные в области излучения экситонов, локализованных в квантовых ямах, на контрольных и рабочих частях для одного и того же образца, облученного до концентрации кислорода в максимуме его распределения $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$, приведены на рис. 3. Этот образец прошел 5 этапов изохронного отжига. Точно такой же результат был получен после однократного отжига при температуре $300^\circ C$ и длительностью в 5 минут, т.е. основным параметром в ходе проведения отжига оказывается температура. Сравнение спектров фотолюминесценции на рис. 2 показало, что проведение отжига приводит к частичному восстановлению излучения экситонов, локализованных в квантовых ямах, и спектральное положение экситонных полос для контрольной и рабочей частей образца практически совпадают. Аналогичные спектры были получены для другого образца этой структуры, имплантированного кислородом до концентрации $\sim 6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в максимуме его распределения и одно-

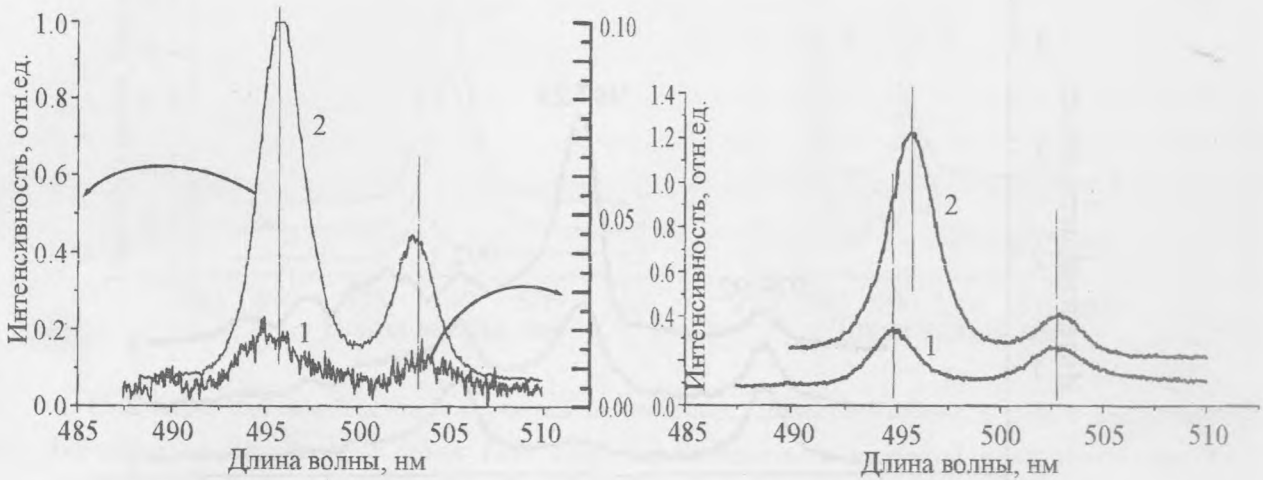


Рис. 3. Спектры ФЛ в области излучения экситонов, локализованных в квантовых ямах, зарегистрированные на рабочей (1) и контрольной (2) частях одного и того же образца структуры типа II, после отжига при температуре 300°C . Рабочая часть образца была имплантирована ионами кислорода до концентрации в максимуме $\sim 10^{18}\text{ см}^{-3}$.

Рис. 4. Спектры ФЛ в области излучения экситонов, локализованных в квантовых ямах, зарегистрированные на рабочей (1) и контрольной (2) частях одного и того же образца структуры типа II после однократного отжига при 400°C длительностью 5 мин.

кратно отожженного при температуре 400°C . На рис. 4 можно наблюдать дальнейший рост интенсивности полос экситонов, локализованных в обеих квантовых ямах по сравнению с рис. 3 (относительные единицы измерения интенсивности на всех рисунках одинаковы). Однако если спектральные положения экситонных полос для контрольной и рабочей частей для случая широкой ямы практически совпадают, то для полос экситонов, локализованных в более узкой яме, был замечен сдвиг в коротковолновую сторону для рабочей части образца по сравнению с контрольной. Мы полагаем, что этот сдвиг обусловлен диффузией части атомов кадмия из материала ямы и соответственно уменьшением эффективной толщины слоя материала узкой ямы. Укажем, что с повышением температуры отжига до 450°C величина этого сдвига уже явно превышала 6 нм . При этом полоса излучения экситонов, локализованных в более узкой яме, имела уже явно несимметричную форму – она была затянута в сторону более коротких длин волн.

Как уже указывалось выше, для слоев $\text{ZnSe}:(\text{Yb}+\text{O})$ в диапазоне температур отжига $380 - 450^\circ\text{C}$ в РЗ спектрах доминировала полоса при 995 нм . Для РЗ спектров образцов

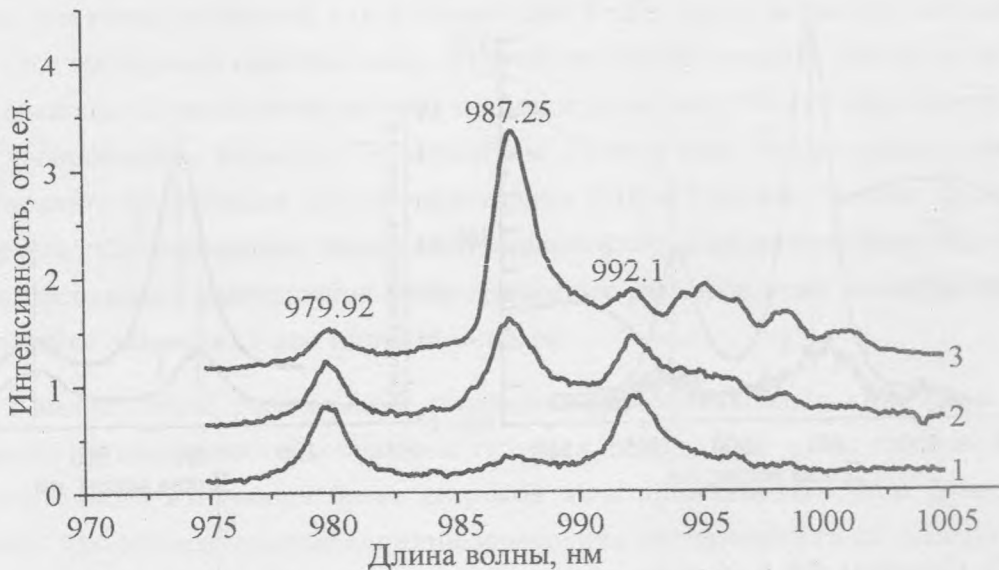


Рис. 5. РЗ спектры для трех образцов структуры типа II, имплантированных ионами кислорода до концентраций в максимуме его распределения 10^{18} см^{-3} (1), $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (2) и $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (3), а затем прошедших термоотжиг при температуре 400°C .

структуры II типа помимо этой полосы наиболее заметны были полосы, расположенные на 980, 987 и 992 нм. В ходе проведения отжига первой появлялась полоса 980 и 987 нм, затем 995 и 992 нм. Скорее всего, полосу 980 нм можно связать с ассоциациями иона Yb^{3+} с примесями щелочных металлов (Na , Li), а полосу 992 нм с комплексами иона Yb^{3+} с примесями углерода и кремния. РЗ спектры для двух образцов структуры II типа, имплантированных кислородом до концентраций $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и 10^{19} см^{-3} , а затем прошедших однократный отжиг при температуре 400°C , приведены на рис.5. С ростом дозы облучения образцов кислородом до определенного предела росла интенсивность излучения ионов Yb^{3+} . Однако уровень восстановления интенсивностей излучения экситонов, локализованных в квантовых ямах, в случае меньших доз был существенно выше, чем в случае больших доз. Для восстановления интенсивности излучения экситонов структуры II типа и для достижения эффективного РЗ излучения необходимо введение атомов кислорода до концентраций в максимуме его распределения по толщине структуры на уровне $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3} - 6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ с последующим однократным отжигом при температуре $\sim 400^\circ \text{C}$ и длительностью ~ 5 минут.

Спектры фотолюминесценции образцов в области излучения экситонов, локализованных в квантовой яме, для образца структуры III типа приведены на рис. 6. Спектр

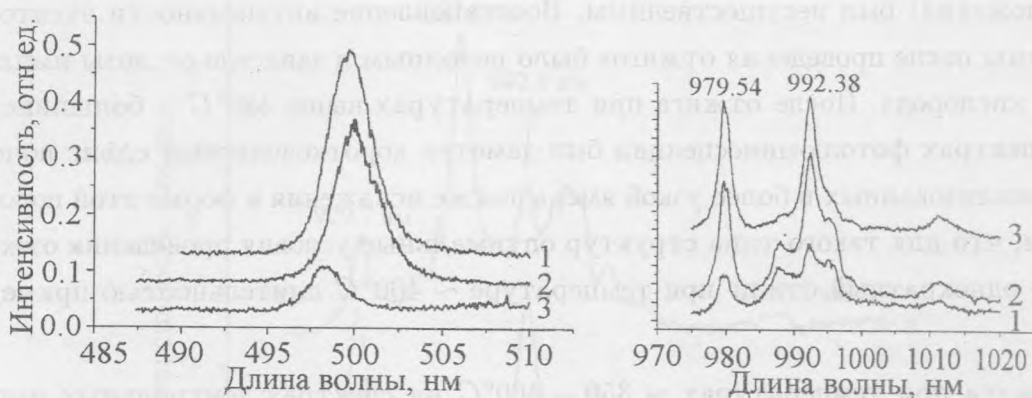


Рис. 6. Спектры ФЛ в области излучения экситонов, локализованных в узкой квантовой яме, для образца структуры типа III. Образец содержал в широкой квантовой яме Yb с концентрацией 10^{19} см^{-3} . Укажем, что эта экситонная полоса на рабочей части была погашена имплантацией. 1 – спектр, зарегистрированный на контрольной части после отжига при 400°C . 2 – спектр, зарегистрированный на контрольной части образца сразу после проведения имплантации. 3 – спектр рабочей части после отжига при 400°C .

Рис. 7. РЗ спектры трех образцов структуры типа III. Образцы содержали в материале широкой квантовой ямы атомы Yb с концентрацией $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Концентрация имплантированных атомов кислорода составляла $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (1), $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (2) и 10^{19} см^{-3} (3). После имплантации кислорода образцы прошли однократный отжиг при температуре 400°C длительностью 5 минут.

1 этого рисунка был зарегистрирован на контрольной части одного из образцов. Легирование материала широкой ямы Yb до концентрации порядка 10^{19} см^{-3} привело к полному исчезновению полосы экситонов, локализованных в этой яме $\lambda \approx 503 \text{ нм}$. С ростом дозы имплантированного кислорода происходило гашение интенсивности полосы излучения экситонов, локализованных и в узкой яме $\lambda \approx 500 \text{ нм}$. Для примера укажем, что при концентрации кислорода в максимуме его распределения порядка 10^{17} см^{-3} интенсивность полосы излучения узкой ямы на контрольной части образца примерно на порядок превосходила интенсивность той же самой полосы на рабочей части. При концентрации кислорода $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ полоса экситонов, локализованных в узкой яме, была полностью погашена. В ходе проведения цикла изохронных отжигов было установлено, что заметное восстановление интенсивности полосы экситонов, локализованных в узкой яме, происходит при температурах $\sim 350 - 400^\circ\text{C}$. Так же как и в предыдущих случаях,

форма этой полосы была близка к симметричной, и спектральный сдвиг (от первоначального положения) был несущественным. Восстановление интенсивности экситонов более узкой ямы после проведения отжига было неполным и зависело от дозы имплантированного кислорода. После отжига при температурах выше 420°C у большинства образцов в спектрах фотолюминесценции был заметен коротковолновый сдвиг полосы экситонов, локализованных в более узкой яме, а также искажения в форме этой полосы. Мы полагаем, что для такого типа структур оптимальные условия проведения отжига следующие – однократный отжиг при температуре $\sim 400^{\circ}\text{C}$ длительностью примерно 5 минут.

После отжига при температурах $\sim 350 - 400^{\circ}\text{C}$ на спектрах контрольных частей некоторых образцов (на 5 из 20 образцов) можно было усмотреть следы полосы экситонов, локализованных в широкой яме. Если концентрация Yb в широкой яме составляла $\sim 10^{19}\text{ см}^{-3}$, то интенсивность экситонного излучения этой ямы резко уменьшалась, и восстановление этого излучения в процессе отжига замедлялось по сравнению, например, с интенсивностью более широкой ямы структуры II типа.

Спектры фотолюминесценции в области излучения РЗ центров для трёх образцов структуры III типа, содержащих кислород в различных концентрациях, и прошедших однократный термоотжиг при температуре 400°C , приведены на рис. 7. С ростом дозы имплантированного кислорода линейно росла и интенсивность РЗ излучения для диапазона концентраций кислорода от $3 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$ до 10^{19} см^{-3} . Дальнейшее увеличение концентрации кислорода практически не приводило к увеличению роста интенсивности излучения РЗ центров.

Обсуждение результатов. Проведенные эксперименты показали, что для активации РЗ излучения в слоях ZnSe и CdZnSe , выращенных и легированных Yb в процессе МЛЭ, так же, как и для слоёв GaAs:Yb и ZnTe:Yb , необходимо присутствие примесей-соактиваторов РЗ излучения [4 – 6]. Одной из таких примесей является кислород. Увеличение количества атомов кислорода (до определенного предела) приводило к росту интенсивности линий и полос РЗ излучения. Таким образом, можно утверждать, что атом или ионы кислорода входят в состав сложных РЗ центров на основе иона Yb^{3+} . Наблюдаемые в ходе проведения изохронного отжига изменения тонкой структуры РЗ излучения, при которых один набор спектральных линий сменяется другим, свидетельствует, что тонкую структуру РЗ излучения определяют уже другие примеси. РЗ комплексы образуются в ходе проведения отжига, когда возможна диффузия фоновых примесей.

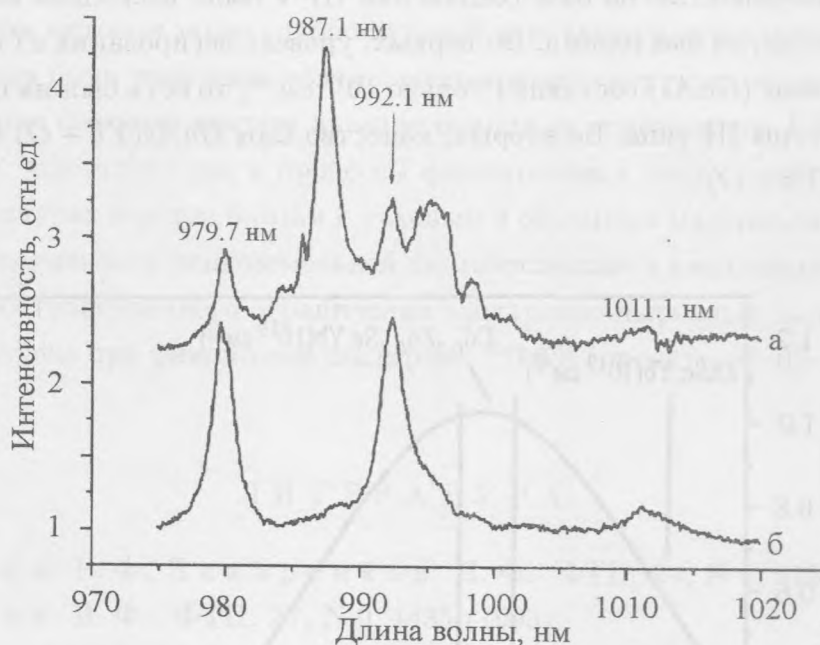


Рис. 8. РЗ спектры образцов структуры II типа (а) и структуры III типа (б). Образец (а) содержал в барьере $ZnSe$ атомы Yb с концентрацией 10^{19} см^{-3} . Образец (б) содержал Yb с концентрацией $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ в материале ямы. Образцы были имплантированы ионами кислорода до концентрации в максимуме распределения $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$, а затем прошли однократный отжиг при температуре 400°C .

Следует признать, что качество полупроводниковых слоев квантово-размерных структур было недостаточно высоким. Относительно низкое качество материала ямы было обусловлено различием кристаллических решеток $ZnSe$ (цинковая обманка) и $CdSe$ (вюрцит). Кристаллическая структура твердых растворов $Cd_xZn_{1-x}Se$ зависит от состава, от условий проведения роста и от последующих (за ростом) технологических операций. Понятно, что слои квантовых ям должны были содержать большое количество ростовых дефектов.

Выше было показано, что введение атомов Yb в слои квантовой ямы способно существенно понизить интенсивность экситонов, локализованных в этой яме, а также понизить уровень её восстановления в ходе проведения отжига после имплантации ионов кислорода. Укажем, что аналогичная ситуация складывалась и для квантово-размерных структур $GaAs/AlGaAs$, выращенных и легированных Yb по МЛЭ [10]. Хотя надо признать, что степень восстановления интенсивностей экситонных полос в структурах с

пониженной размерностью на базе соединений III–V была несколько выше. Возможно, это обусловлено двумя факторами. Во-первых, уровень легирования иттербием материала квантовой ямы ($GaAs$) составлял только 10^{18} см^{-3} , то есть был на порядок меньше, чем для структуры III типа. Во-вторых, качество слоя $GaAs(Yb + O)$ было выше, чем слоя $CdZnSe:(Yb + O)$.

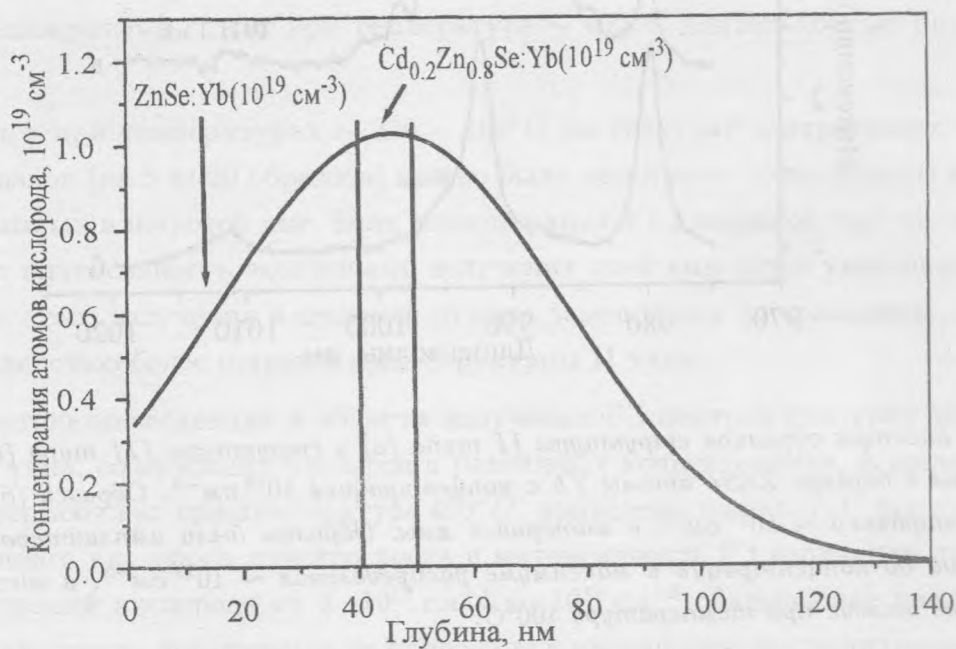


Рис. 9. Распределение по глубине атомов кислорода, имплантированных в структуры II и III типа с энергией 25 кэВ. По оси абсцисс показаны границы слоев первого барьера и квантовой ямы.

Для того, чтобы выяснить, где лучше размещать РЗ ионы – в барьере или квантовой яме – обратимся к рис. 8 и 9. На этом рисунке показано распределение имплантированного кислорода по глубине структуры. Там же указаны границы первого барьера и широкой ямы. Из рисунка ясно, что большая часть атомов кислорода расположена в материале барьера. Более высокие кристаллические качества материала барьера должны были бы увеличить преимущества размещения атомов иттербия в слое $ZnSe$, однако интенсивность РЗ излучения в структуре III типа при прочих равных условиях, как показано на рис. 8, даже несколько превосходила интенсивность РЗ излучения в структурах II типа. Это означает, что эффективность люминесценции центров на основе ионов Yb^{3+} , находящихся в квантовой яме, превосходит таковую в барьере благодаря

эффектам пространственного ограничения электронно-дырочных пар.

Таким образом методом молекулярно-лучевой эпитаксии в сочетании с технологией ионного внедрения были получены полупроводниковые структуры пониженной размерности, содержащие сложные 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 объемных материалах. Обнаружено увеличение эффективности редкоземельной люминесценции в квантовых ямах благодаря эффектам пространственного ограничения электронно-дырочных пар.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 01-02-17732 и 03-02-16976).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мастеров В. Ф., Захаренков Л. Ф. ФТП, **24**, N 4, 610 (1990).
- [2] Мастеров В. Ф. ФТП, **27**, N 9, 1435 (1993).
- [3] Taguchi A., Takohai K., and Nakata G. Materials Research Society Symposium. Proceeding. Volume 301. Rare Earth Doped Semiconductors. Editors: G. Pomrenke, P. Klein, D. Langer. Pittsburg, 1993.
- [4] Коннов В. М., Лойко Н. Н., Садофьев Ю. Г., и др. ФТП, **36**, вып. 11, 1297 (2002).
- [5] Sadofyev Yu. G., Konnov V. M., Loiko N. N., and Girpius A. A. J. Vac. Sci. Technol., B **19**(4), 1492 (2001).
- [6] Коннов В. М., Лойко Н. Н., Гиппиус А. А. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 9 – 10, 18 (1995).
- [7] Гавриленко В. И., Грехов А. М., Корбутяк Д. В., Литовченко В. Г. Оптические свойства полупроводников. Справочник, Киев, Наукова думка, 1987.
- [8] Pellegrini V., Atanasov R., Treducucci A., and Beltram F. Phys. Rev., B **51**(8), 5171 (1995).
- [9] Woun R. Phys. Stat. Sol., **148**(b), 11 (1988).
- [10] Коннов В. М., Лойко Н. Н., Гиллинский А. М., и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 8, 17 (1999).

Поступила в редакцию 18 июля 2003 г.