

Излучательные свойства гетероструктур с двухслойной квантовой ямой (GaAsSb–InGaAs)/GaAs

© Б.Н. Звонков, С.М. Некоркин, О.В. Вихрова, Н.В. Дикарева[†]

Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 10 января 2013 г. Принята к печати 21 января 2013 г.)

Исследованы особенности излучательных характеристик GaAs-гетероструктур с двухслойной квантовой ямой (GaAs_{1-x}Sb_x–In_yGa_{1-y}As), выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии. С учетом анализа литературных данных для процесса выращивания методом МОС-гидридной эпитаксии экспериментально были определены температурный диапазон (560–580°C), соотношение потоков источников элементов V и III групп ($\lesssim 1$) и порядок выращивания слоев для создания активной области лазерной гетероструктуры GaAs/InGaP, представляющей собой двухслойную квантовую яму GaAs_{0.75}Sb_{0.25}–In_{0.2}Ga_{0.8}As. Для этой структуры наблюдалось электролюминесцентное излучение на длине волны 1075 нм, связанное с непрямыми переходами между валентной зоной слоя GaAs_{0.75}Sb_{0.25} и зоной проводимости слоя In_{0.2}Ga_{0.8}As. Увеличение тока непрерывной накачки приводило к падению интенсивности данного излучения и возникновению устойчивой генерации лазерного излучения на прямых в координатном пространстве переходах на длине волны 1022 нм при плотности порогового тока 1.4 кА/см² при комнатной температуре.

1. Введение

На сегодняшний день сохраняется устойчивая потребность в создании лазерных диодов на основе GaAs с генерацией излучения вблизи длины волны 1.3 мкм (высокоскоростного канала волоконно-оптической связи). Одним из направлений деятельности является формирование лазерных структур с активной областью, содержащей квантовую яму GaAs_{1-x}Sb_x/GaAs с $x = 0.35$. К сожалению, существуют трудности получения структур с таким содержанием сурьмы, поскольку, как предсказано в [1], существует зона несмешиваемости для твердого раствора GaAs_{1-x}Sb_x с молярной долей сурьмы x примерно от 0.25 до 0.7. В итоге это может приводить к неомогенности материала квантовой ямы из-за спинодального распада твердого раствора в области составов, обеспечивающих излучательную рекомбинацию вблизи 1.3 мкм.

В связи со сказанным более перспективным может оказаться другое направление в создании лазерных диодов с длиной волны излучения 1.3 мкм на основе GaAs-гетероструктур, связанное с исследованием возможности получения двухслойных квантовых ям (GaAs_{1-x}Sb_x–In_yGa_{1-y}As)/GaAs [2,3]. При определенных толщинах соответствующих напряженных слоев и содержании сурьмы и индия соответственно $x \leq 0.3$, $y \leq 0.45$ в них можно достичь высокой интенсивности фотолюминесцентного излучения на непрямых переходах между зоной проводимости слоя In_yGa_{1-y}As и валентной зоной слоя GaAs_{1-x}Sb_x [2]. Кроме того, излучательные характеристики значительным образом зависят от совершенства гетерограницы слоев GaAs_{1-x}Sb_x/In_yGa_{1-y}As и порядка их выращивания. Поэтому научная деятельность в данном случае связана с

исследованиями по оптимизации технологических условий получения подобных двухслойных квантовых ям. В первую очередь это касается методов молекулярно-лучевой и МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений), являющихся основными методами выращивания таких наногетероструктур.

В работе [4] представлены результаты исследований гетероструктур с двухслойной квантовой ямой (GaAs_{0.7}Sb_{0.3}–In_{0.3}Ga_{0.7}As)/GaAs, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) при температурах 450–500°C. Показано, что понижение температуры роста слоев с целью подавления процесса сегрегации сурьмы до 450°C приводило к уменьшению энергии непрямого перехода, но снижало интенсивность фотолюминесцентного излучения квантовой ямы из-за увеличения плотности дефектов. Напротив, увеличение температуры выращивания до 500°C способствовало росту интенсивности излучения, увеличению энергии непрямого перехода и появлению дополнительного пика в коротковолновой области, который связывали с неоднородным распределением сурьмы в квантовой яме. С учетом полученных данных авторами [4] впервые методом МЛЭ была выращена лазерная гетероструктура (GaAs_{1-x}Sb_x–In_yGa_{1-y}As)/GaAs/AlGaAs и получена генерация излучения в диапазоне длин волн 1.1–1.2 мкм в импульсном режиме тока накачки при комнатной температуре.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния технологических параметров получения GaAs-гетероструктур с двухслойной квантовой ямой (GaAs_{1-x}Sb_x–In_yGa_{1-y}As) методом МОС-гидридной эпитаксии на их излучательные характеристики. Основная цель исследований — определение оптимальных условий получения активной области лазерной структуры.

[†] E-mail: dikareva@nifti.unn.ru

2. Методика эксперимента

Гетероструктуры с двухслойной квантовой ямой ($\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x-\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$)/GaAs были получены на подложках GaAs (001) методом МОС-гидридной эпитаксии в горизонтальном кварцевом реакторе при атмосферном давлении и содержали буферный слой GaAs толщиной ~ 0.2 мкм, квантовую яму $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x-\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ и покровный слой GaAs толщиной 30–50 нм. В качестве источника Sb использовалось соединение триметилсурьма. С учетом анализа представленных в литературе данных по получению напряженных слоев $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ и двухслойных квантовых ям ($\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x-\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$)/GaAs методом МОС-гидридной эпитаксии [5–7,2] было исследовано влияние температуры выращивания ($520-580^\circ\text{C}$), отношения потоков металлоорганических соединений элементов V/III групп и порядка выращивания слоев на фотолюминесцентные свойства структур. Результаты исследований учитывались при создании лазерной гетероструктуры с двухслойной квантовой ямой в GaAs-волноводе. На подложке *n*-GaAs последовательно были выращены следующие эпитаксиальные слои: *n*-InGaP (480 нм), *n*-GaAs (260 нм), *i*-GaAs (60 нм), $\text{GaAs}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}$ (10 нм), $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ (5 нм), *i*-GaAs (30 нм), *p*-GaAs (260 нм), *p*-InGaP (480 нм), p^+ -GaAs (230 нм). Слои *n*-типа проводимости (InGaP и GaAs) легировались в процессе роста примесью кремния, слои *p*-InGaP и p^+ -GaAs формировались в результате легирования цинком и углеродом соответственно. Контактный слой p^+ -GaAs, ограничивающие InGaP и волноводные слои GaAs выращивались при температуре 620°C . Активная область, представляющая собой двухслойную квантовую яму $\text{GaAs}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}-\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, формировалась при оптимальной температуре 560°C . При выращивании слоя $\text{GaAs}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}$ отношение потоков элементов V/III групп составляло ~ 1 .

Спектры фотолюминесценции выращенных гетероструктур исследовались при 77 К и комнатной температуре. Для возбуждения излучения использовался He–Ne-лазер с длиной волны 632.5 нм, мощностью 30 мВт.

На основе лазерной гетероструктуры были изготовлены лазерные диоды с шириной активной области 100 мкм путем химического травления контактного слоя вне активной полоски с последующей протонной имплантацией вскрытой поверхности слоя *p*-InGaP. Зеркалами служили сколотые грани структуры. Длина резонатора составляла 1 мм.

3. Обсуждение результатов

Температура выращивания двухслойной квантовой ямы методом МОС-гидридной эпитаксии определяется в основном оптимальной температурой получения слоя $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$. Как и в случае МЛЭ, понижение

температуры роста до 475°C частично подавляет сегрегацию сурьмы, но значительным образом ухудшает кристаллические и излучательные характеристики гетероструктур [7]. Увеличение температуры формирования слоя $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ до 600°C препятствует встраиванию атомов Sb главным образом благодаря температурной зависимости процесса разложения арсина. Вследствие этого номинальное соотношение компонент элементов V и III групп и отношение As и Sb в газовой фазе будет увеличиваться с возрастанием температуры, и в результате содержание сурьмы в растущем слое будет уменьшаться. Для выращивания твердого раствора $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ методом МОС-гидридной эпитаксии необходимо поддерживать низкое отношение элементов V/III групп и низкое значение парциального давления As [8]. Поэтому с учетом анализа литературных данных [5–8] экспериментально были определены температурный диапазон ($560-580^\circ\text{C}$) и отношение потоков атомов V и III групп ($\lesssim 1$) для процесса выращивания методом МОС-гидридной эпитаксии слоя $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0.1 \leq x \leq 0.25$) хорошего качества для создания двухслойной квантовой ямы.

Порядок выращивания слоев двухслойной квантовой ямы $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x-\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ значительным образом влияет на их излучательные характеристики [3,4]. Для гетероструктур с такими квантовыми ямами, выращенных методом МЛЭ, было обнаружено, что выращивание вначале слоя твердого раствора $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, а затем слоя $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ приводило к значительному возрастанию интенсивности и увеличению длины волны фотолюминесцентного излучения [3,4], обусловленного рекомбинацией электронов зоны проводимости квантовой ямы $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ с дырками валентной зоны квантовой ямы $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$.

Нами были проведены подобные исследования для гетероструктур с двухслойной квантовой ямой, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии. На рис. 1 представлены спектры фотолюминесценции гетероструктур с двухслойными квантовыми ямами $[\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}(7\text{ нм})-\text{GaAs}_{0.80}\text{Sb}_{0.20}(6\text{ нм})]/\text{GaAs}$ (спектр 1) и $[\text{GaAs}_{0.80}\text{Sb}_{0.20}(6\text{ нм})-\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}(7\text{ нм})]/\text{GaAs}$ (спектр 2) при 77 К. В спектрах обеих структур присутствует пик, обусловленный непрямыми излучательными переходами между зоной проводимости слоя $\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}$ и валентной зоной слоя $\text{GaAs}_{0.80}\text{Sb}_{0.20}$. Необходимо отметить, что характер перехода исследовался в подобных структурах ранее посредством измерения кинетики фотолюминесценции и наблюдалась обычная для не прямых переходов медленная (до 10 нс) релаксация сигнала фотолюминесценции [9].

Видно, что выращивание вначале слоя $\text{GaAs}_{0.80}\text{Sb}_{0.20}$ так же, как и в случае использования для роста структур метода МЛЭ, приводит к значительному возрастанию интенсивности излучения квантовой ямы и увеличению его длины волны. Вероятно, в данном случае напряжения в двухслойной квантовой яме распределены таким образом, что формируется более качественная граница

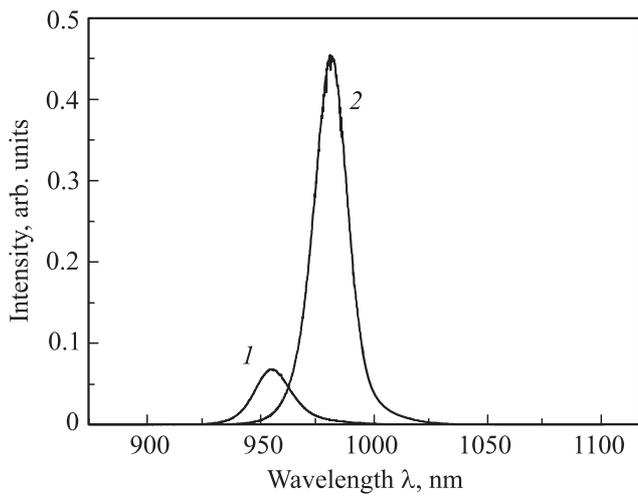


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции при 77 К гетероструктур с двухслойными квантовыми ямами $[\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}(7\text{ нм})-\text{GaAs}_{0.80}\text{Sb}_{0.20}(6\text{ нм})]/\text{GaAs}$ (1) и $[\text{GaAs}_{0.80}\text{Sb}_{0.20}(6\text{ нм})-\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}(7\text{ нм})]/\text{GaAs}$ (2).

раздела слоев $\text{GaAs}_{0.80}\text{Sb}_{0.20}$ и $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, образуется меньшее количество дислокаций и на формирование слоя $\text{GaAs}_{0.80}\text{Sb}_{0.20}$ не оказывает влияния процесс сегрегации индия.

Представленные выше данные по технологическим особенностям формирования двухслойных квантовых ям $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x-\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ методом МОС-гидридной эпитаксии учитывались при создании лазерной гетероструктуры.

Результаты фотолюминесцентных исследований лазерной гетероструктуры с двухслойной квантовой ямой $\text{GaAs}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}-\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ в GaAs-волноводе показаны на рис. 2. Спектральные зависимости содержат пики, отвечающие люминесценции от контактного слоя p^+ -GaAs в области длины волны $\lambda = 854\text{ нм}$ при 77 К, а также вблизи $\lambda = 875$ и 908 нм при комнатной температуре. Фотолюминесцентное излучение напряженной квантовой ямы $\text{GaAs}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}-\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, расположенной в активной области структуры, проявляется в длинноволновой области спектра. В спектре квантовой ямы при 77 К содержатся два пика, которые могут быть обусловлены прямыми переходами (А, электрон и дырка в слое $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$) и непрямыми переходами (В, электрон в зоне проводимости слоя $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, а дырка в валентной зоне слоя $\text{GaAs}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}$) (рис. 3). Прямым переходам соответствует фотолюминесцентное излучение с длиной волны $\lambda \approx 970\text{ нм}$, непрямым переходам — излучение с длиной волны $\lambda \approx 1000\text{ нм}$. При комнатной температуре, по-видимому, преобладает излучательная рекомбинация носителей в слое $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, так как в спектре фотолюминесценции наблюдается пик (при 1000 нм), связанный с прямыми переходами, и плечо в длинноволновой области спектра (около 1042 нм), которое можно связать с непрямыми переходами.

Появление в спектре фотолюминесценции двухслойной квантовой ямы пика, отвечающего прямым переходам в слое $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, может быть связано с заполнением глубоких дырочных уровней валентной зоны слоя $\text{GaAs}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}$ благодаря тому факту, что основная часть возбуждающего излучения поглощается слоями p -типа, контактным слоем p^+ -GaAs в частности. Вследствие этого в излучательной рекомбинации начинают участвовать дырки с общих со слоем $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ уровней. При этом вероятность излучательной рекомбинации на прямых переходах значительно больше вероятности непрямых переходов. В частности, в работе [10] были проанализированы электронно-дырочные

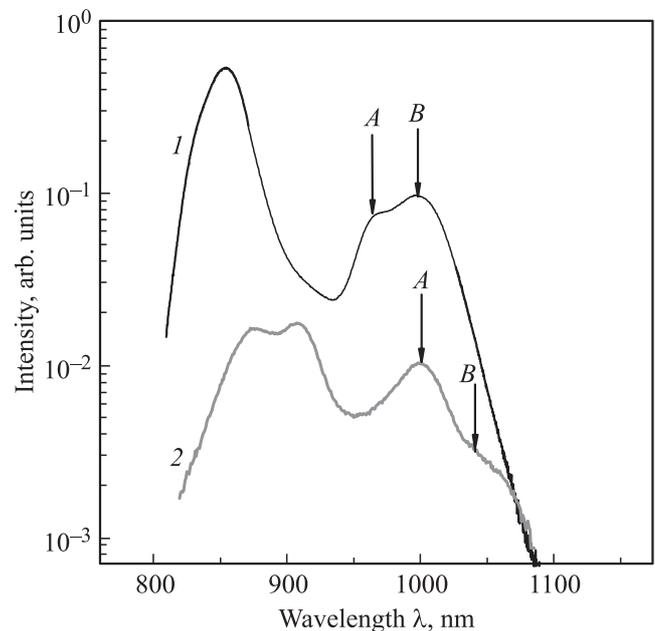


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции лазерной гетероструктуры $(\text{GaAs}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}-\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As})/\text{GaAs}/\text{InGaP}$ при 77 К (1) и при комнатной температуре (2). Указаны положения пиков от непрямых (А) и прямых (В) оптических переходов в двухслойной квантовой яме.

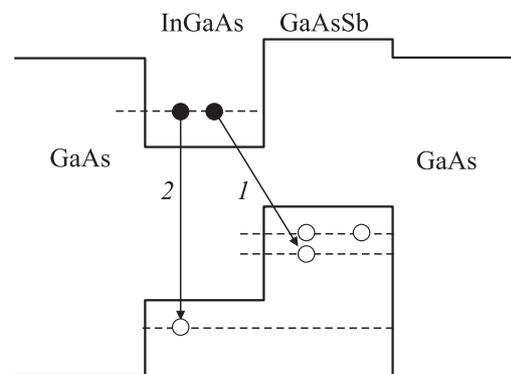


Рис. 3. Зонная диаграмма двухслойной квантовой ямы $\text{GaAs}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}-\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ в отсутствие электрического поля: 1 — непрямые, 2 — прямые оптические переходы.

интегралы перекрытия и характер оптических переходов в структурах с двухслойными квантовыми ямами $(\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x-\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As})/\text{GaAs}$ ($x = 0.18, 0.29, 0.32$). Отмечается, что подобные структуры являются ярким примером случая, когда смешиваются электронные системы I и II типов и когда правила отбора для оптических переходов изменяются по сравнению с таковыми в обычных квантовых ямах с прямоугольным профилем. Показано, что в данном случае основной переход имеет место между уровнем тяжелых дырок в слое $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ и уровнем электронов в слое $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$. Данный переход является непрямым в реальном пространстве, и его вероятность составляет $\sim 20\%$. Вероятность увеличивается до 90%, если электрон и дырка локализованы в одном и том же слое.

Спектральные зависимости излучения лазерных диодов, изготовленных на основе гетероструктуры $(\text{GaAs}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}-\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As})/\text{GaAs}/\text{InGaP}$, для различных значений тока постоянной накачки при комнатной температуре приведены на рис. 4. Как видно из представленных данных, при токе $I = 50$ мА (кривая 1) наблюдается люминесценция с максимумом на длине волны $\lambda = 1075$ нм. При увеличении тока до $I = 100$ мА (кривая 2) с коротковолновой стороны в спектре присутствует слабовыраженный пик с максимумом на длине волны $\lambda = 1040$ нм. При токе накачки $I = 300$ мА (кривая 3) интенсивность этого коротковолнового пика растет, а длинноволнового падает. Спектральные максимумы при этом сдвигаются в область коротких волн.

Сопоставление полученных данных с поведением спектров фотолюминесценции лазерной структуры позволяет заключить, что электролюминесценция на длине волны $\lambda = 1075$ нм связана с непрямыми переходами между валентной зоной квантовой ямы $\text{GaAs}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}$ и зоной проводимости квантовой ямы $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, а на длине волны $\lambda = 1040$ нм — с прямыми оптическими переходами, отвечающими квантовой яме $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ (рис. 2). Электрическая накачка в данном случае позволяет реализовать случай, когда в спектре люминесценции виден вклад только от не прямых переходов (минимальное значение тока $I = 50$ мА).

При токе $I = 1.2$ А (кривая 4) спектр сужается с максимумом на длине волны $\lambda = 1022$ нм. Дальнейшее увеличение тока до $I = 1.4$ А (кривая 5) приводит к возникновению генерации на длине волны $\lambda = 1022$ нм. Спектральная ширина при этом токе составляет 2 нм.

Общий сценарий развития спектральной зависимости излучения от тока накачки при температуре жидкого азота такой же, как и при комнатной температуре. На рис. 4, *b* кривые 1–4 соответствуют спектральным характеристикам допорогового режима излучения. В данном случае для величины постоянного тока $I = 150$ мА (кривая 3) видны два хорошо разрешимых спектральных максимума электролюминесценции. Стимулированное излучение наблюдается при токе $I = 700$ мА (кривая 4) на длине волны $\lambda = 975$ нм.

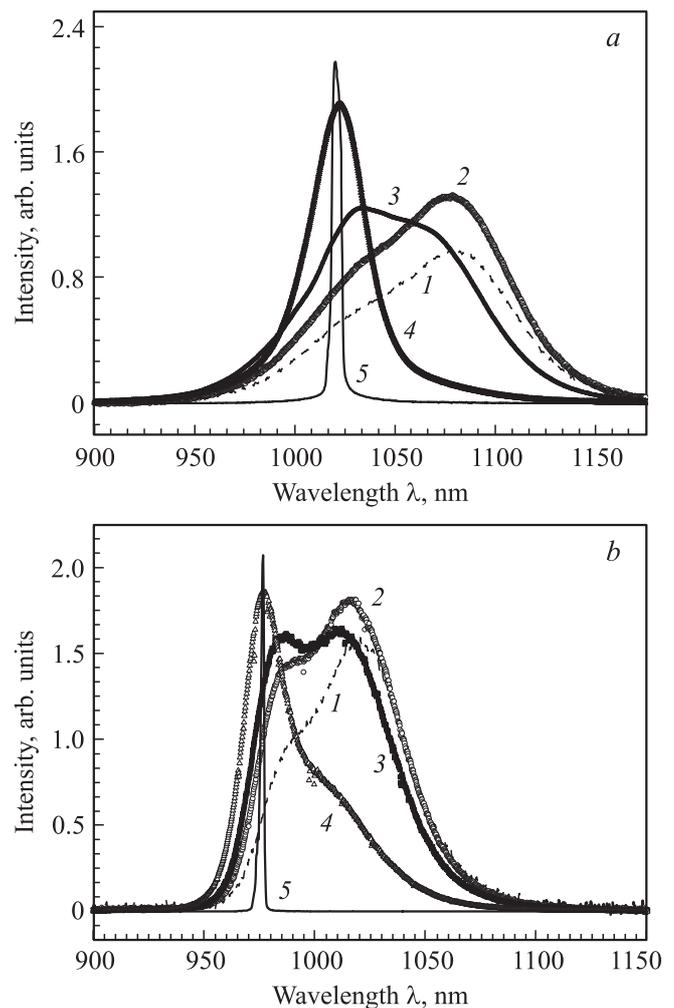


Рис. 4. Спектры электролюминесценции лазерной гетероструктуры $(\text{GaAs}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}-\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As})/\text{GaAs}/\text{InGaP}$ при разных токах постоянной накачки. *a* — температура измерений 297 К, ток накачки $I = 50$ (1), 100 (2), 300 мА (3), 1.2 (4), 1.4 А (5); *b* — температура измерений 77 К, ток накачки $I = 50$ (1), 100 (2), 150 (3), 300 (4), 700 мА (5).

Предполагается, что отсутствие длинноволновой генерации может быть обусловлено тем, что наряду с заполнением глубоких дырочных уровней происходит значительное изменение зонной структуры квантовой ямы в присутствии электрического поля на металлургической границе гетероперехода $\text{GaAs}_{0.75}\text{Sb}_{0.25}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$. Так, в работе [4] для лазерной структуры с двухслойной квантовой ямой, выращенной методом МЛЭ, также наблюдали значительное смещение пиков электролюминесценции и генерации (до 1.17 мкм по отношению к пику фотолюминесценции на длине волны 1.3 мкм) в коротковолновую область. Авторы связывают этот факт с необходимостью использовать большие токи накачки (в импульсном режиме токовой накачки плотность порогового тока составляет 2.1 кА/см²) для получения излучения, в результате чего в генерации участвуют носители, находящиеся на более высоких уровнях возбуж-

денных состояний. Основной путь преодоления этого недостатка — дальнейшая оптимизация получения лазерных структур с активной областью, представляющей собой двухслойную квантовую яму, с целью повышения оптического качества структур и снижения порогового тока.

4. Заключение

Таким образом, в процессе выполнения данной работы с учетом анализа литературных данных экспериментально были определены температурный диапазон (560–580°C) и отношение потоков элементов V и III групп ($\lesssim 1$) для процесса выращивания методом МОС-гидридной эпитаксии слоя GaAs_{1-x}Sb_x (0.1 ≤ x ≤ 0.25) хорошего качества с целью создания двухслойной квантовой ямы. Экспериментально подтверждено, что, как и в случае МЛЭ, первоначальное выращивание слоя твердого раствора GaAs_{1-x}Sb_x способствует значительному возрастанию интенсивности и увеличению длины волны фотолуминесцентного излучения наногетероструктур с двухслойной квантовой ямой GaAs_{1-x}Sb_x–In_yGa_{1-y}As.

Методом МОС-гидридной эпитаксии была изготовлена лазерная гетероструктура GaAs/InGaP с активной областью, представляющей собой двухслойную квантовую яму GaAs_{0.75}Sb_{0.25}–In_{0.2}Ga_{0.8}As. На изготовленных лазерных диодах при комнатной температуре удалось наблюдать электролюминесцентное излучение на длине волны 1075 нм, связанное с непрямыми переходами между валентной зоной слоя GaAs_{0.75}Sb_{0.25} и зоной проводимости слоя In_{0.2}Ga_{0.8}As. Увеличение тока непрерывной накачки приводило к падению интенсивности данного излучения, и в итоге была обнаружена устойчивая генерация лазера с квантовой ямой GaAs_{0.75}Sb_{0.25}–In_{0.2}Ga_{0.8}As на прямых в координатном пространстве переходах на длине волны 1022 нм при плотности порогового тока 1.4 кА/см² при комнатной температуре. Поэтому необходимо проведение дальнейших исследований, связанное с оптимизацией состава и толщин слоев квантовой ямы в условиях их выращивания методом МОС-гидридной эпитаксии для достижения возможности осуществления лазерной генерации на не прямых переходах между валентной зоной квантовой ямы GaAs_{1-x}Sb_x и зоной проводимости квантовой ямы In_yGa_{1-y}As.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 11-02-00645а, 11-02-97049-р_поволжье_а, 10-02-00371-а).

Список литературы

- [1] J.R. Pesetto, G.B. Stringfellow. *J. Cryst. Growth*, **62**, 1 (1983).
- [2] M. Peter, K. Winkler, M. Maier, N. Herres, J. Wagner, D. Fekete, K.H. Bachem, D. Richards. *Appl. Phys. Lett.*, **67** (18), 2639 (1995).
- [3] Z.C. Niu, X.H. Xu, H.Q. Ni, Y.Q. Xu, Z.H. He, Q. Han, R.H. Wu. *J. Cryst. Growth*, **278**, 558 (2005).
- [4] J.F. Klem, O. Blum, S.R. Kurtz, I.J. Fritz, K.D. Choquette. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **18** (3), 1605 (2000).
- [5] M. Pristovsek, M. Zorn, U. Zeimer, M. Weyers. *J. Cryst. Growth*, **276**, 347 (2005).
- [6] C.T. Wan, Y.K. Su, R.W. Chuang, C.Y. Huang, Y.S. Wang, W.C. Chen, H.C. Yu. *J. Cryst. Growth*, **310**, 4854 (2008).
- [7] Y.K. Su, C.T. Wan, R.W. Chuang, C.Y. Huang, W.C. Chen, Y.S. Wang, H.C. Yu. *J. Cryst. Growth*, **310**, 4850 (2008).
- [8] M.J. Cherng, G.B. Stringfellow, R.M. Cohen. *Appl. Phys. Lett.*, **44**, 677 (1984).
- [9] С.В. Морозов, Д.И. Крыжков, В.Я. Алешкин, В.И. Гавриленко, Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова, Ю.Г. Садофьев. *Тр. XVI Междунар. симп. «Нанозифика и нанозлектроника»* (2012) т. 1, с. 316.
- [10] R. Kudrawiec, G. Sek, K. Ryczko, J. Misiewicz, J.C. Harmand. *Appl. Phys. Lett.*, **84** (18), 3453 (2004).

Редактор Л.В. Шаронова

The emission properties of (GaAs_{1-x}Sb_x–In_yGa_{1-y}As)/GaAs bilayer quantum well heterostructures

B.N. Zvonkov, S.M. Nekorkin, O.V. Vikhrova, N.V. Dikareva

Physicotechnical Research Institute,
Nizhny Novgorod State University,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The emission characteristics of MOCVD grown heterostructures with bilayer quantum well were (GaAs_{1-x}Sb_x–In_yGa_{1-y}As)/GaAs studied. Taking into account published data, the experimental definition of the temperature range (560–580°C), the V/III flux ratio ($\lesssim 1$) and the sequence of layer growth for GaAs_{0.75}Sb_{0.25}–In_{0.2}Ga_{0.8}As bilayer quantum well active region of the GaAs/InGaP laser heterostructure were established. Electroluminescence at wavelength of 1075 nm for this structure was observed. The emission was associated with indirect transitions between GaAs_{0.75}Sb_{0.25} layer valence band and In_{0.2}Ga_{0.8}As layer conduction band. Increase in the continuous pumping current led to intensity decreasing of radiation on this wavelength and formation of the stable laser generation on the direct in the coordinate space transitions at wavelength of 1022 nm with a threshold current density of 1.4 kA/cm² at room temperature.