

Спектры излучения диодов $p\text{-AlGaAs}/\text{GaAsP}/n\text{-AlGaAs}$ при одноосном сжатии

Е. В. Богданов^{1,a}, Н. Б. Брандт^{1,a}, Н. Я. Минина^{1,b}, С. С. Широков², А. Э. Юнович²

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,
¹кафедра физики низких температур и сверхпроводимости; ²кафедра физики полупроводников.
 Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

E-mail: ^abev@mig.phys.msu.ru, ^bmin@mig.phys.msu.ru

Статья поступила 12.03.2010, подписана в печать 06.04.2010

Представлены новые экспериментальные данные о влиянии одноосного сжатия до 4 кбар вдоль кристаллографических направлений $[110]$ и $[1\bar{1}0]$ на спектры электролюминесценции и вольт-амперные характеристики диодов на основе гетероструктур $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}/p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($y = 0.84$), разработанных для инжекционных лазеров. С ростом давления спектры демонстрируют сдвиг в коротковолновую область, достигающий 25 мэВ при 3 кбар, а также рост интенсивности в 2–3 раза. Проведены численные расчеты зонной структуры исследованных гетероструктур при сжатии вдоль оси $[110]$, которые указывают на возрастание эффективной ширины запрещенной зоны в квантовой яме $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$ с барическим коэффициентом порядка 8.5 мэВ/кбар и уменьшение высоты барьеров на границах квантовой ямы. Расчеты предсказывают возможность пересечения зон (crossover) легких и тяжелых дырок при давлениях выше 4.5–5 кбар. Возрастание эффективной ширины запрещенной зоны полностью описывает экспериментальные данные о сдвиге спектров электролюминесценции, а смешивание состояний легких и тяжелых дырок при приближении к точке пересечения зон является вероятной причиной роста интенсивности излучения при одноосном сжатии.

Ключевые слова: электролюминесценция, одноосная деформация, лазерный диод, гетероструктуры, квантовые ямы.

УДК: 538.958. PACS: 62.50.-p, 73.40.Kp, 78.60.Fi, 78.67.De.

Введение

Для целого ряда научных и технических приложений требуются источники излучения с переменной длиной волны. Так, например, в спектроскопии часто необходимо подбирать излучение, соответствующее энергиям переходов определенных атомов или молекул. Аналогичная необходимость перестройки длины волны возбуждающего излучения часто встречается в физике полупроводников при исследовании, например, фотопроводимости, глубоких центров или экситонов. В связи с этим замена обычно применяемого в таких случаях набора диодов одним регулируемым источником излучения представляется весьма актуальной проблемой. Подход к ее решению может быть различным, в частности, ширина запрещенной зоны, определяющая длину волны излучения, заметно меняется с температурой. Другим из таких подходов может быть изменение зонной структуры излучающего твердотельного элемента с помощью давления.

В течение последних десятилетий гидростатические давления и одноосное сжатие использовались в качестве сильного внешнего воздействия на зонную структуру и энергетический спектр носителей заряда в твердых телах, приводящего к их количественной и качественной перестройке. В частности, наблюдался целый ряд электронных топологических переходов в системе BiSb [1] и переходов металл–диэлектрик [2]. В последнее время успешно продемонстрирована возможность изменять длину волны излучения лазерных диодов с помощью всестороннего сжатия в камерах гидростатического давления [3, 4], в основе которой

также лежит изменение с давлением зонной структуры и уровней размерного квантования. Однако применение методики гидростатического сжатия для перестройки длины волны излучения диодов связано с определенными неудобствами, так как получение гидростатического давления предполагает использование сложной аппаратуры, особенно в случае, когда излучение должно выводиться из камеры с жидкой средой под давлением P до 20 кбар. Кроме того, передающие давление среды, обычно используемые в камерах высокого давления (такие, как пентан, керосин и их смеси с маслом), обладают низкой теплопроводностью, что может приводить к перегреву диодов при высоких рабочих токах. С другой стороны, надежный тепловой контакт диода с держателем, обеспечивающим теплоотвод из камеры, приводит под давлением к появлению на диоде неконтролируемых анизотропных деформаций из-за разницы в коэффициентах сжимаемости материалов диода и держателя [5].

В настоящей работе представлены новые экспериментальные данные об изменении длины волны и интенсивности электролюминесценции (ЭЛ) диодов на основе гетероструктур $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}/p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ под действием одноосного сжатия до $P = 4$ кбар при температуре жидкого азота. Методика одноосного сжатия, созданная и описанная ранее [6], позволяет осуществлять свободный вывод излучения от образца для его спектрального анализа. Она разработана в комбинации с оптическим криостатом простой конструкции, который можно изготовить в лабораторной мастерской.

1. Экспериментальная установка и образцы

Криостат для исследования спектров ЭЛ при азотной температуре приведен на рис. 1, а. Он состоит из пенопластового стакана 1 с окном 2, изготовленном из тонкостенной стальной трубки, которая закрыта с обеих сторон полиэтиленовой пленкой толщиной 20 мкм. Жидкий азот 3 поступает из транспортного дьюара на дно пенопластового сосуда по виниловой трубке 4 и в случае переполнения выливается через трубку 5. Заполнение криостата жидким азотом контролировалось по показаниям дифференциальной термодпары (А-В). Криостат плотно соединяется с верхней частью описанного ранее [6] растягивающего устройства 6. Основная часть деформирующего устройства (рис. 1, б) состоит из упругого кольца 2* и образца (диода) 1*, жестко закрепленного в кольце с помощью низкотемпературной эпоксидной смолы. Кольцо из сплава 40ХНЮ крепится в растягивающем устройстве с помощью держателей 3* и трансформирует растягивающее усилие F , приложенное вдоль направления x , в сжимающее образец усилие вдоль направления y . Располагается кольцо с образцом в криостате (рис. 1, а) напротив окна 2 в положении 7 между внешней неподвижной стальной трубкой 8 и внутренней подвижной трубкой 9, обеспечивающей передачу растягивающего усилия от калиброванной пружины 10. Величина одноосного сжатия образца калибруется для заданной геометрии кольца в зависимости от силы F по дифракции рентгеновских лучей [6].

Регистрация спектров ЭЛ производилась с помощью автоматизированной установки на базе связанного с персональным компьютером монохроматора МДР-12,

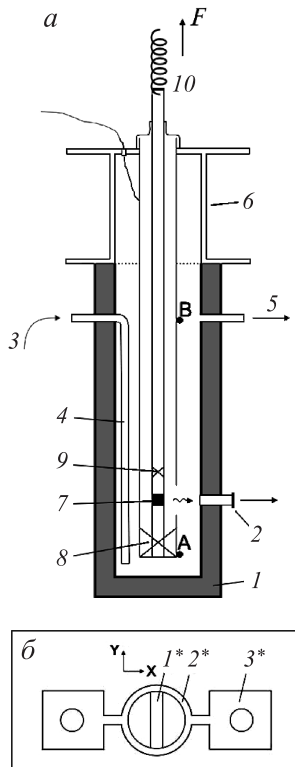


Рис. 1. Схема оптического криостата (а) и рабочего элемента растягивающего устройства (б). См. текст

который обеспечивает точность измерений с дисперсией 2.4 нм/мм. При ширине входной щели не более 30 мкм это позволяет достичь спектрального разрешения установки до 0.1 нм, что соответствует точности определения энергии квантов 0.3–0.4 мэВ при измерениях в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Измерения возможно проводить с постоянным шагом по длинам волн $\Delta L = 0.1-1$ нм, имея до 170–1700 точек на спектральном интервале с усреднением по 1–25 измерениям в каждой точке. Цифровые приборы, включенные в измерительный комплекс для усиления и измерения сигналов, позволяют увеличить динамический диапазон установки до пяти порядков. Шумы и наводки ограничивают динамический диапазон для единичного спектра (но не системы спектров) на уровне сигнала $10^{-2}-10^{-3}$ от интенсивности в максимуме. Спектры ЭЛ исследовались при токе I через диод в интервале 0.1–30 мА.

Исследуемые структуры $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}/p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ были выращены на подложках из легированного кремнием (001) GaAs методом металлоорганической парофазной эпитаксии. Квантовая яма (КЯ) шириной 14 нм из $\text{GaAs}_{0.84}\text{P}_{0.16}$ заключена с обеих сторон между образующими волновод барьерными слоями $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ толщиной 1 мкм и различным уровнем легирования p - и n -типа, которое, начиная с $1 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$ вблизи КЯ, достигает $2 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$ в периферических областях структуры. Существенно, что из-за несоответствия постоянных кристаллических решеток квантовая яма растянута биаксиально на 0.558% уже в процессе эпитаксиального роста. Вследствие такого сильного встроенного растяжения материала КЯ основное состояние легких дырок (ЛН1) оказывается в валентной зоне наивысшим состоянием вместо основного состояния тяжелых дырок (НН1), характерного для структур из материалов $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ с малым несоответствием кристаллических решеток.

Размеры образцов, помещаемых в деформирующее кольцо (рис. 1, б), составляют $3 \times 0.55 \times 0.45$ мм. Токи через диод были нормальны к плоскости структуры, а излучение выводилось в направлении, перпендикулярном сжатию.

2. Результаты и их обсуждение

При температуре $T = 77$ К исследованы спектры ЭЛ шести диодов на основе p - n -переходов в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с встроенной квантовой ямой $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$. Измерения проводились при одноосном сжатии до 4 кбар вдоль кристаллографических направлений $[110]$ и $[1\bar{1}0]$, в диапазоне рабочих токов от 0.1 до 30 мА. Эксперименты при температуре жидкого азота ($T = 77$ К) позволяют получать спектры электролюминесценции, в которых ширина спектральных линий в 3–4 раза меньше, чем в спектрах при комнатной температуре, а резкие максимумы интенсивности гарантируют точность определения длин волн в максимумах не хуже ± 1 нм (рис. 2, а).

2.1. Изменение длины волны излучения

Максимум спектра излучения при нулевом давлении $P = 0$ и температуре 77 К наблюдался на краю красного

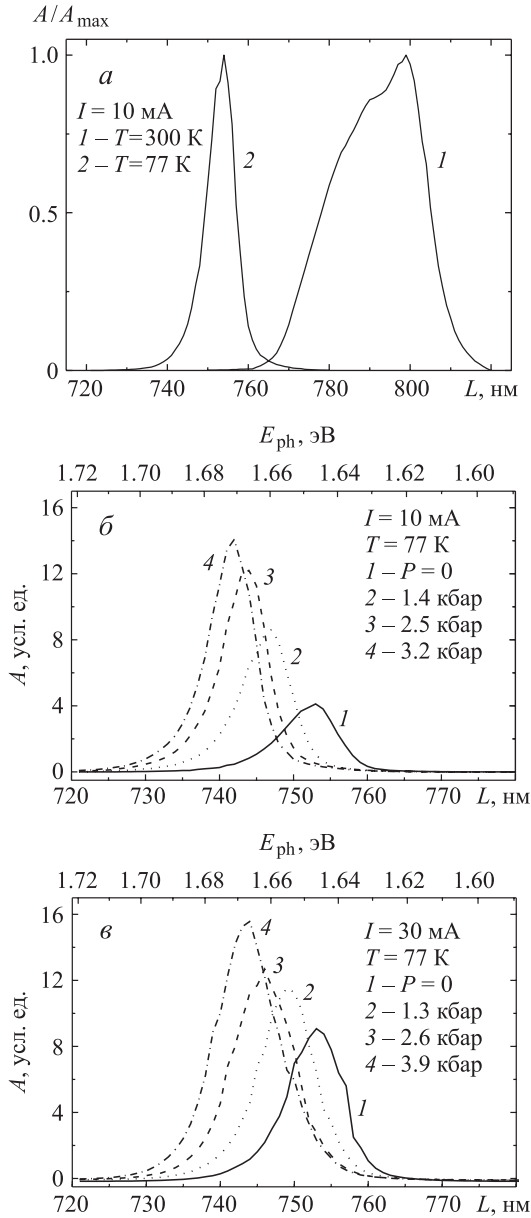


Рис. 2. Спектры электролюминесценции диода на основе гетероструктуры $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}/p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в недеформированном состоянии (а) и при одноосном сжатии вдоль направлений $[1\bar{1}0]$ (б) и $[110]$ (в)

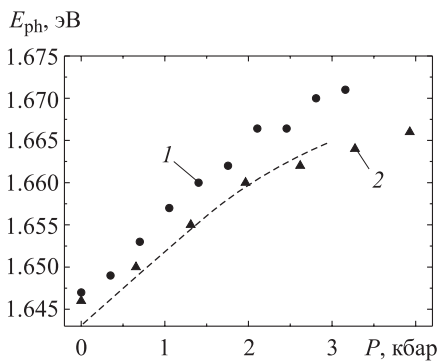


Рис. 3. Барические зависимости положения максимума излучения при сжатии вдоль направлений $[1\bar{1}0]$ (1) и $[110]$ (2). Штриховая линия — результаты расчета

диапазона вблизи 753 нм. Для всех исследованных образцов $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}/p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($y = 0.84$) максимум смещается в область более коротких длин волн при сжатии как в направлении $[1\bar{1}0]$, так и в направлении $[110]$ (рис. 2, б, в). Сдвиг положения максимума спектра с деформацией обратим и полностью повторяется в различных циклах нагружения образца. Зависимость сдвига от давления соответствует возрастанию энергии фотонов E_{ph} в начальной области давлений с барическими коэффициентами $dE_{ph}/dP = 9.2$ и 7.2 мэВ/кбар для направлений сжатия вдоль $[1\bar{1}0]$ и $[110]$ соответственно (рис. 3). При давлениях выше 2 кбар наблюдается небольшая сублинейность. Максимальное смещение спектра, полученное для исследованной серии образцов, составляет 25 мэВ при давлении $P = 3$ кбар в направлении $[1\bar{1}0]$ и 20 мэВ при $P = 4$ кбар в направлении $[110]$.

Смещение спектров ЭЛ лазерных диодов на основе $\text{InGaP}/\text{AlGaInP}$ в коротковолновую область под действием всестороннего сжатия наблюдалось ранее в работе [4] и связывалось с увеличением величины запрещенной зоны E_g под давлением. Нами были проведены численные расчеты энергетических зон и уровней размерного квантования в квантовой яме исследованной структуры $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}/p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ при одноосном сжатии вдоль направления $[110]$. Было установлено, что сдвиг спектра ЭЛ определяется увеличением под давлением эффективной ширины запрещенной зоны, т.е. оптической энергетической щели, определяемой разницей энергий основных состояний электронов и легких дырок в КЯ. При этом рассчитанный барический коэффициент в начальной области давлений составляет $dE_{ph}/dP = 8.5$ мэВ/кбар. В основе программы расчета, разработанной ранее [7], лежит конечно-разностный метод, позволяющий само согласованно решать уравнение Пуассона и уравнение Шрёдингера. Гамильтониан в уравнении Шрёдингера в представлении Латинжера–Кона учитывал члены, описывающие деформацию. Результаты расчетов, выполненные с использованием литературных данных [8] о структуре, механических свойствах и параметрах энергетического спектра, приведены на рис. 3. Видно, что они хорошо описывают экспериментальные данные.

2.2. Вольт-амперные характеристики

Влияние давления на вольт-амперные характеристики (ВАХ) исследованных диодов показано на рис. 4. В отличие от спектров электролюминесценции изменения ВАХ с нагрузкой в области прямых смещений качественно отличаются для различных направлений сжатия: при сжатии вдоль $[110]$ пороговое напряжение уменьшается, а при сжатии вдоль $[1\bar{1}0]$ — возрастает. Наблюдаемый эффект качественно можно объяснить возникающим при одноосном сжатии пьезоэлектрическим полем. Это поле, как хорошо известно [9], возникает в материалах $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ в направлении $[001]$ при сжатии $P \parallel \langle 110 \rangle$; в отсутствие компенсирующего заряда оно достигает в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} \sim 10$ кВ/см при давлении $P = 1$ кбар. Это пьезоэлектрическое поле направлено от поверхности к подложке (т.е. в направлении прямого смещения) при сжатии вдоль $[110]$. Оно

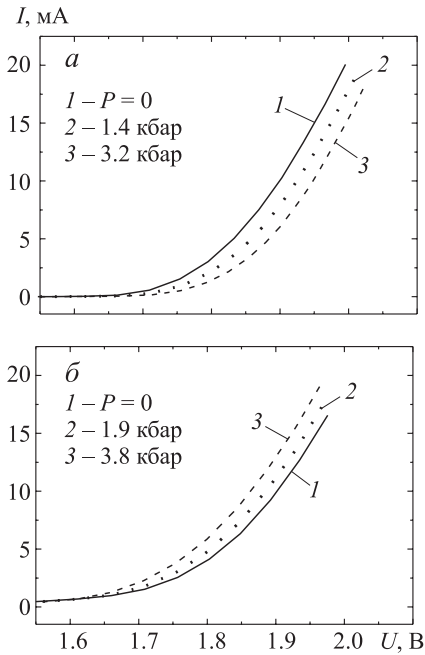


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики диодов, измеренные при сжатии вдоль направлений $[1\bar{1}0]$ (а) и $[110]$ (б), $T = 77$ К

имеет обратное направление при сжатии по оси $[1\bar{1}0]$. При наличии тока через диод пьезоэлектрическое поле должно компенсироваться пространственным зарядом. Но, как показывает смещение ВАХ под давлением, полной компенсации не происходит, хотя оцениваемое по сдвигу ВАХ значение напряженности поля ~ 1 кВ/см при $P = 1$ кбар на порядок меньше рассчитываемого не скомпенсированного поля. Предполагается, что наличие пьезоэлектрического поля в образцах может быть причиной несколько различного сдвига спектров ЭЛ при сжатии вдоль направлений $[110]$ и $[1\bar{1}0]$ (рис. 4). В то же время сам сдвиг в область больших энергий фотонов связан, как показывают расчеты, в основном, с увеличением под давлением величины запрещенной зоны $\text{GaAs}_{0.84}\text{P}_{0.16}$.

2.3. Возрастание интенсивности излучения

В процессе исследования спектров ЭЛ обнаружено интересное явление — возрастание спектральной интенсивности излучения A с ростом одноосного сжатия диода, которая увеличивается (в спектральном максимуме) в 2–3 раза при давлениях до 3–4 кбар независимо от направления сжатия (рис. 2, б, в). Эффект наблюдался на всех шести исследованных диодах и носил воспроизводимый и обратимый по давлению характер. Спектры снимались при четко фиксированном токе через диод во всем интервале давлений и в ходе одного эксперимента без изменения геометрии опыта, параметров измерительной установки и температуры (жидкий азот), так что факт обнаруженного явления не вызывает сомнений.

Рассмотрим возможные причины роста интенсивности ЭЛ при одноосном сжатии. Был проведен анализ спектральных зависимостей электролюминесценции, полученных при различных значениях токов через диоды в интервале 0.1–30 мА и давлений в интерва-

ле 0–4 кбар. Относительное изменение коэффициента полезного действия (КПД) светодиодов определялось как изменение отношения площади под кривой спектральной интенсивности электролюминесценции к подводимой к диоду электрической мощности. КПД существенно возрастал с нагрузкой в соответствии с ростом максимума спектральной интенсивности. Величина КПД диодов в зависимости от подводимой мощности носила суперлинейный характер и не имела тенденции к насыщению. Это указывает на отсутствие в используемом диапазоне токов заметного вклада в рекомбинацию безызлучательных Оже-процессов, подавление которых по мере роста величины запрещенной зоны под давлением могло бы объяснить рост интенсивности электролюминесценции.

Исследуемые структуры на основе материалов $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ являются пьезоэлектриками, и пьезоэлектрическое поле может влиять на форму КЯ и перекрытие волновых функций электронов и дырок. Однако эффект возрастания интенсивности ЭЛ одинаково наблюдается для обоих направлений сжатия $[110]$ и $[1\bar{1}0]$, а пьезоэлектрическое поле, возникающее под нагрузкой, направлено по-разному [9], поэтому оно не может быть причиной роста интенсивности излучения при сжатии.

Еще одной возможной причиной роста интенсивности ЭЛ под давлением может быть увеличение инжекции носителей в КЯ вследствие изменения структуры потенциальных барьеров. Как показывают расчеты зонной структуры, изменение ширины запрещенной зоны $\Delta E_g = E_g(P) - E_g(0)$ при сжатии в подложке из GaAs и барьерных слоях $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ происходит в 3–4 раза медленнее, чем в КЯ $\text{GaAs}_{0.84}\text{P}_{0.16}$ (рис. 5). Это ведет к понижению барьеров и росту инжекционного тока. Однако абсолютное снижение высоты барьеров на 3–4% вряд ли может полностью объяснить рост интенсивности ЭЛ в 2–3 раза.

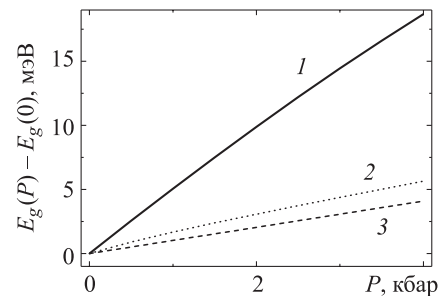


Рис. 5. Рассчитанные изменения величины запрещенной зоны в квантовой яме $\text{GaAs}_{0.84}\text{P}_{0.16}$ (1), слоях $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ (2) и подложке из GaAs (3) при сжатии вдоль $[110]$, $T = 77$ К

Как упоминалось выше, в напряженной КЯ исследованных структур уровень размерного квантования ЛН1 является основным состоянием вместо характерного для ненапряженных структур $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ уровня НН1. Согласно предварительным расчетам, зоны легких и тяжелых дырок движутся навстречу друг другу при одноосном сжатии. Таким образом, при достаточно высоких давлениях, оцениваемых в настоящее время как $P \geq 5$ кбар, уровни ЛН1 и НН1 проходят точку пересечения, и НН1 вновь становится основным состо-

янием дырок в КЯ. Как показано в ряде работ [10], вблизи точки пересечения (вырождения) происходит смешивание состояний легких и тяжелых дырок; это сильно влияет на оптические свойства. Аналогичное пересечение ЛН1 и НН1 состояний было зарегистрировано в похожих GaAs_{1-y}P_y/AlGaAs лазерных диодах в зависимости от состава твердого раствора [10]. Оно сопровождалось двукратным увеличением коэффициента поглощения, которое было объяснено возрастанием комбинированной плотности состояний в точке пересечения уровней. На основании проведенного анализа и численных расчетов приближение к точке слияния ЛН1 и НН1 уровней размерного квантования представляется основной причиной роста интенсивности ЭЛ при сжатии.

Заключение

Простой оптический криостат, описанный в работе, позволяет исследовать электро- и фотолюминесценцию образцов в условиях одноосного сжатия при температуре 77 К. Спектры ЭЛ диодов на основе гетероструктур *n*-Al_xGa_{1-x}As/GaAs_yP_{1-y}/*p*-Al_xGa_{1-x}As сдвигаются в коротковолновую область при одноосном сжатии вдоль кристаллографических направлений [110] и [110]. Сдвиг достигает 25 мэВ при давлении 3 кбар, при этом интенсивность излучения возрастает более чем в 2 раза. Численные расчеты зонной структуры исследованных диодов указывают на рост эффективной ширины запрещенной зоны в квантовой яме при сжатии, уменьшение барьеров на границах КЯ и на пересечение зон легких и тяжелых дырок при давлении 4.5–5 кбар. Экспериментально наблюдаемые в начальной области давлений коэффициенты сдвига

энергии фотонов $dE_{ph}/dP = 9.2$ и 7.2 мэВ/кбар для направлений сжатия вдоль [110] и [110] соответственно хорошо согласуются с рассчитанным значением $dE_{ph}/dP = 8.5$ мэВ/кбар. Одноосное сжатие может быть использовано для подстройки длины волны излучения диодов в небольшом интервале (около 10 нм). Наиболее вероятной причиной роста интенсивности ЭЛ при сжатии является сближение состояний легких и тяжелых дырок и их смешивание, приводящее к росту комбинированной плотности состояний.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 07-02-00866).

Список литературы

1. Брандт Н.Б., Егоров В.С., Лавренюк М.Ю. и др. // ЖЭТФ. 1985. **22**, № 6. С. 1303.
2. Брандт Н.Б., Скипетров Е.П. // Физика низких температур. 1996. **22**, № 8. С. 870.
3. Dybala F., Adamiec P., Bercha A. et al. // Proc. SPIE. 2003. **4989**. P. 181.
4. Trzeciakowski W., Bercha A., Dybala F. et al. // Phys. Stat. Sol. (b). 2007. **244**, N 1. P. 179.
5. Piechal B., Tomm J.W., Bercha A. et al. // Apple. Phys. A. 2009. **97**, N 1. P. 179.
6. Minina N.Ya., Brandt N.B., Savin A.M., Bogdanov E.V. // J. Phys. Conference Series. 2008. **121**. P. 032002.
7. Kolokolov K.I., Savin A.M., Beneslavski S.D. et al. // Phys. Rev. B. 1999. **59**. P. 7537.
8. Vurgaftman I., Meyer J.R., Ram-Mohan L.R. // J. Appl. Phys. 2001. **89**, N 11. P. 5815.
9. Кравченко В.Н., Минина Н.Я., Савин А.М. // ЖЭТФ. 2000. **118**, № 6. С. 1443.
10. Hong S.-C., Kothiyal G.P., Debbar N. et al. // Phys. Rev. B. 1988. **37**, N 2. P. 878.

Emission spectra of *p*-AlGaAs/GaAsP/*n*-AlGaAs diodes under uniaxial compression

E. V. Bogdanov^{1,a}, N. B. Brandt^{1,a}, N. Ya. Minina^{1,b}, S. S. Shirokov², A. E. Yunovich²

¹Department of Low Temperature and Superconductivity Physics; ²Department of Semiconductor Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^a bev@mig.phys.msu.ru, ^b min@mig.phys.msu.ru.

New experimental results on the influence of the uniaxial stress up to 4 kbar along [110] and [110] crystallography directions on the electroluminescence spectra and current-voltage characteristics of diodes based on heterostructures *n*-Al_xGa_{1-x}As/GaAs_yP_{1-y}/*p*-Al_xGa_{1-x}As (*y* = 0.84) are presented. With increasing stress, the emission spectra demonstrate a blue shift of up to 25 meV at a pressure 3 kbar, while the electroluminescence intensity shows 2–3 times increase. Band structure calculations in *n*-Al_xGa_{1-x}As/GaAs_yP_{1-y}/*p*-Al_xGa_{1-x}As heterostructure under uniaxial compression in [110] direction indicate an increase of the effective energy gap with the baric coefficient about 8.5 meV/kbar, a decrease in the quantum well barriers and probability of light hole-heavy hole crossover at uniaxial stress over 4.5–5 kbar. The calculated increase of the effective energy gap is in a good agreement with the experimental shift of electroluminescence spectra under compression. Mixing of light-hole and heavy-hole states near a predicted crossover point may be the reason for electroluminescence intensity increase.

Keywords: electroluminescence; uniaxial stress; laser diodes, heterostructures, quantum wells.

PACS: 62.50.-p, 73.40.Kp, 78.60.Fi, 78.67.De.

Received 12 March 2010.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 5(2010).

Сведения об авторах

1. Богданов Евгений Владимирович — докт. физ.-мат. наук, доцент, доцент; тел.: (495) 939-39-41, e-mail: bev@mig.phys.msu.ru.
2. Брандт Николай Борисович — докт. физ.-мат. наук, профессор, профессор; тел.: (495) 939-05-78, e-mail: bev@mig.phys.msu.ru.
3. Минина Наталья Яковлевна — докт. физ.-мат. наук, профессор, вед. науч. сотр.; тел.: (495) 939-13-60, e-mail: min@mig.phys.msu.ru.
4. Широков Станислав Сергеевич — аспирант; тел.: (495) 939-29-94, e-mail: stas.shirokov@gmail.com.
5. Юнович Александр Эммануилович — докт. физ.-мат. наук, профессор, профессор; тел.: (495) 939-29-94, e-mail: yunovich@phys.msu.ru.