

Двухцветная люминесценция в одиночной гетероструктуре II типа InAsSbP/InAs

© М.М. Григорьев*, П.А. Алексеев*+, Э.В. Иванов*, К.Д. Моисеев*†

* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

† Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, 197376 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 19 апреля 2012 г. Принята к печати 25 апреля 2012 г.)

Впервые методом градиентной сканирующей кельвин-зонд микроскопии были исследованы p - n -гетеропереходы на основе узкозонных соединений в системе твердых растворов In-As-Sb-P. На примере одиночной гетероструктуры II типа p -InAsSbP/ n -InAs было продемонстрировано перераспределение потока инжектируемых носителей в образце вдоль направления внешнего электрического поля. При приложении к гетероструктуре прямого смещения наблюдалась двухполосная люминесценция — интерфейсная на гетерогранице p -InAsSbP/ p -InAs и объемная в арсениде индия. При этом было показано, что не прямые (интерфейсные) переходы демонстрировали большую эффективность излучательной рекомбинации, чем прямые межзонные. Наблюдение многополосных спектров электролюминесценции открывает путь к созданию многоцветных светодиодов для среднего инфракрасного диапазона 3–5 мкм на основе одной гетероструктуры.

1. Введение

Интерес к гетероструктурам на основе узкозонных соединений $A^{III}B^V$ для создания оптоэлектронных приборов, работающих в среднем инфракрасном спектральном диапазоне 3–5 мкм, стимулируется широким применением как одиночных светодиодов, так и светоизлучающих линеек для таких важных применений, как дистанционный анализ газообразного загрязнения атмосферы, контроль в промышленности, переработке углеродных энергоносителей и др. [1,2]. Поскольку для решения большинства прикладных задач оптоэлектроники важно, чтобы светодиодные структуры работали при температурах вблизи комнатной и выше, следует учитывать процессы, характерные для узкозонных соединений, которые могут ослаблять эффективность излучения. Одним из таких процессов является утечка носителей из активной области p - n -перехода вследствие недостаточной высоты потенциальных барьеров на гетерогранице и большой скорости безызлучательной рекомбинации. Оже в гетероструктурах на основе соединений арсенида индия [3]. Известно, что в гетеропереходах II типа могут быть существенно подавлены процессы рекомбинации Оже за счет не прямых туннельных излучательных переходов на гетерогранице, величина энергии которых значительно меньше ширины запрещенной зоны каждого из материалов, образующих гетеропереход [4]. Более того, гетерограница II типа позволяет создавать достаточно высокие потенциальные барьеры одновременно для дырок и электронов [5].

В предыдущей работе была продемонстрирована интерфейсная люминесценция при комнатной температуре на одиночной гетерогранице II типа InAs/InAsSbP, образованной соединениями с дырочным типом проводимости [6]. Было установлено, что интенсивность излучательных переходов на интерфейсе в ступенчатом

гетеропереходе II типа p -InAs/ p -InAsSbP соизмерима с интенсивностью объемных рекомбинационных переходов в объеме арсенида индия, легированного акцепторной примесью. Однако интерфейсная люминесценция наблюдалась при приложении смещения, противоположного смещению, при котором возникала люминесценция из объема. Кроме того, изотипная дырочная гетероструктура демонстрировала низкое абсолютное значение интенсивности выходящего излучения вследствие низкого уровня инжекции электронов по сравнению со структурами с электронно-дырочным типом инжекции. В данной работе будет проведено сравнительное исследование обоих типов люминесценции на примере гетероструктуры с двумя типами носителей заряда при одинаковом внешнем смещении и при одном и том же уровне тока накачки и будет показано, что эффективность интерфейсных излучательных переходов может значительно превышать эффективность объемной излучательной рекомбинации.

2. Структуры для исследований и методики экспериментов

Для проведения исследований одиночные гетероструктуры InAsSbP/InAs были получены методом жидкофазной эпитаксии путем наращивания слоев твердого раствора p -InAs_{0.66}Sb_{0.11}P_{0.23}, легированного акцепторной примесью цинка до концентрации дырок $p \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$, на подложках n^0 -InAs(100), преднамеренно не легированных, с концентрацией электронов $n = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Легирование твердого раствора p -InAsSbP осуществлялось непосредственно из раствора-расплава в процессе эпитаксиального наращивания. Эпитаксиальные слои четверного твердого раствора были псевдоморфны по параметру решетки с бинарной подложкой InAs.

Для изучения электрических и люминесцентных характеристик выращенных образцов были изготовлены

† E-mail: mkd@iropt2.ioffe.rssi.ru

мезадиодные структуры с помощью стандартного метода фотолитографического совмещения и применением травления в водном растворе. Диаметр мезы составлял 500 мкм, размер точечного контакта 50 мкм. Исследуемые мезадиоды были смонтированы на держателях ТО-18. Возбуждение электролюминесценции (ЭЛ) осуществлялось прямоугольными импульсами тока с коэффициентом заполнения 50% и частотой повторения 610 Гц. Спектры ЭЛ регистрировались с помощью автоматизированной установки на основе монохроматора МДР-2 с дифракционной решеткой 150 штр/мм. В качестве детектора инфракрасного излучения использовался фотодиод на основе InSb, охлаждаемый до температуры жидкого азота. Электрический сигнал преобразовывался по схеме синхронного детектирования с помощью селективного усилителя SR-510.

Для изучения распределения электрического потенциала внутри полученной эпитаксиальной структуры в качестве объекта исследования была выбрана поверхность скола одиночной гетероструктуры $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAs}$, выполненного в направлении, перпендикулярном эпитаксиальному росту. При этом на поверхности слоя $p\text{-InAsSbP}$ был создан точечный омический контакт, а со стороны подложки выполнен сплошной омический контакт. При приложении к гетероструктуре внешнего смещения методом сканирующей кельвин-зонд микроскопии (СКЗМ) были получены профили падения напряжения вдоль направления эпитаксиального роста. Метод СКЗМ позволяет регистрировать распределение контактной разности потенциалов (КРП) между проводящим зондом и поверхностью исследуемого объекта с пространственным разрешением вплоть до 10 нм. Регистрируемое распределение поверхностного потенциала отображает поведение работы выхода с поверхности исследуемого образца. Следует учитывать, что вследствие закрепления уровня Ферми на поверхности распределение поверхностного потенциала отличается от распределения работ выхода в объеме материалов, составляющих гетероструктуру. Однако данный метод позволяет успешно выявлять $p\text{-}n$ -переходы и гетеропереходы, созданные в гетероструктуре [7,8]. При приложении внешнего электрического смещения к структуре основная часть напряжения падает в области пространственного заряда (ОПЗ) $p\text{-}n$ -перехода или гетероперехода. Поэтому, предполагая, что при приложении внешнего смещения на поверхности не происходит изменения закрепления уровня Ферми, распределение КРП смещенной структуры однозначно иллюстрирует положение $p\text{-}n$ -перехода.

В данной работе исследования проводились методом градиентной сканирующей кельвин-зонд микроскопии (ГСКЗМ) [9], обладающим лучшим пространственным разрешением по сравнению со стандартным методом СКЗМ. Улучшенное пространственное разрешение связано с тем, что в данном методе детектируется производная (градиент) силы взаимодействия между проводящим зондом и поверхностью. Этот факт позволяет регистрировать взаимодействие только между кончиком

зонда и поверхностью образца, в отличие от всего зонда и поверхности, как в обычном методе СКЗМ. Метод ГСКЗМ был реализован на сканирующем зондовом микроскопе Ntegra AURA производства компании НТ-МДТ (г. Зеленоград, Россия) с помощью специального программного алгоритма [10]. Использовались кремниевые зонды с проводящим покрытием DCP-11 (НТ-МДТ). Радиус закругления зондов составлял $R = 70$ нм. Исследования проводились при комнатной температуре в условиях среднего вакуума ($P = 10^{-2}$ мбар). Следует отметить, что данная методика для изучения узкозонных материалов в системе твердых растворов In-As-Sb-P и их гетеропереходов была применена впервые.

3. Особенности распределения поверхностного потенциала в одиночной гетероструктуре II типа $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAs}$

На рис. 1, *a* приведено изображение топографии поверхности поперечного скола исследуемой гетероструктуры $p\text{-InAs}_{0.66}\text{Sb}_{0.11}\text{P}_{0.23}/n\text{-InAs}$, полученное с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ). Вдоль направления эпитаксиального роста (горизонтальная ось) достаточно

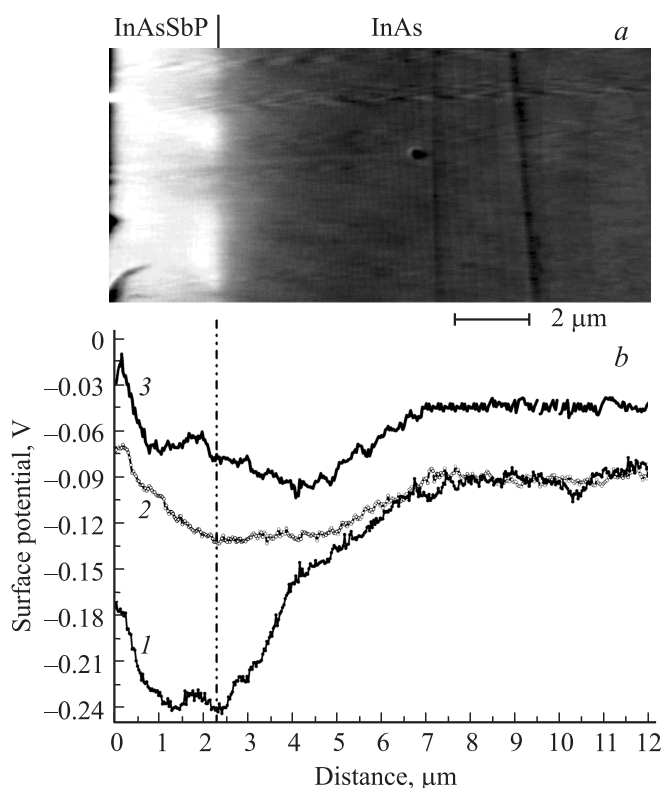


Рис. 1. *a* — АСМ изображение топографии поверхности скола гетероструктуры II типа $p\text{-InAs}_{0.66}\text{Sb}_{0.11}\text{P}_{0.23}/n\text{-InAs}$. *b* — распределение поверхностного потенциала на сколе гетероструктуры II типа $p\text{-InAs}_{0.66}\text{Sb}_{0.11}\text{P}_{0.23}/n\text{-InAs}$ в условиях приложения обратного (1), нулевого (2) и прямого (3) внешнего смещения.

отчетливо видна ступенька в контрасте вблизи отметки 2.3 мкм, что соответствует металлургической границе раздела подложка–слой. Таким образом, толщина слоя p -InAsSbP составила 2.3 мкм.

При нулевом внешнем смещении (заземленная структура) распределение потенциала на поверхности скола в направлении, перпендикулярном плоскости гетероперехода, указывало на существование в подложке нелегированного арсенида индия области с p -типом проводимости вблизи гетерограницы (см. зависимость 2 на рис. 1, *b*). Характерное для p - n -гомоперехода поведение кривой, описывающей распределение поверхностного потенциала между p и n областями, наблюдается для расстояний в диапазоне 2.3–12 мкм от поверхности образца [11]. Появление данной области вызвано диффузией атомов цинка из эпитаксиального слоя в подложку при проведении процесса эпитаксиального наращивания [12]. Тогда наклонный участок (шириной порядка 2.5 мкм) между двумя областями с постоянным значением потенциала можно приписать положению области пространственного заряда. Однако если принять во внимание изгиб энергетических зон арсенида индия вблизи гетерограницы InAsSbP/InAs (см. схематическую зонную диаграмму на рис. 2), то в области расстояний 2.3–4 мкм не должно наблюдаться плато в распределении поверхностного потенциала, но оно наблюдается в эксперименте. Получается, что суммарный вклад от изгиба зон вблизи гетероперехода и концентрационного профиля диффундированной акцепторной примеси будет отображаться в поверхностном потенциале как плато (данные зависимости компенсируют поведение друг друга). Тогда реальная ОПЗ p - n -перехода начинается практически от гетерограницы и p -область в InAs не превышает 0.7 мкм.

На рис. 2 приведена схематическая зонная диаграмма одиночной гетероструктуры II типа p -InAs_{0.66}Sb_{0.11}P_{0.23}/ n -InAs в условиях термодинамического равновесия с учетом степени легирования соединений, образующих данный гетеропереход. Как видно из рисунка, за счет изгибов зон на гетерогранице II типа происходит формирование потенциальных ям для электронов и дырок по разные стороны границы раздела. Относительно наклонного участка слева от гетероперехода InAsSbP/InAs (диапазон расстояний 0–2.3 мкм, рис. 1, *b*), то данный эффект может быть обусловлен как вкладом от изгиба энергетических зон вблизи гетерограницы InAsSbP/InAs, поскольку потенциальная яма на стороне эпитаксиального слоя заполнена дырками, так и изгибом энергетических зон вблизи гетероперехода поверхность/ p -InAsSbP из-за наличия поверхностных состояний твердого раствора. Однако изучение влияния поверхности выходит за рамки данной статьи и является предметом для последующих исследований.

При приложении внешнего смещения к структуре таким образом, что потенциал, приложенный к эпитаксиальному слою p -InAsSbP, оказывается отрицательным относительно потенциала, приложенного к подложке

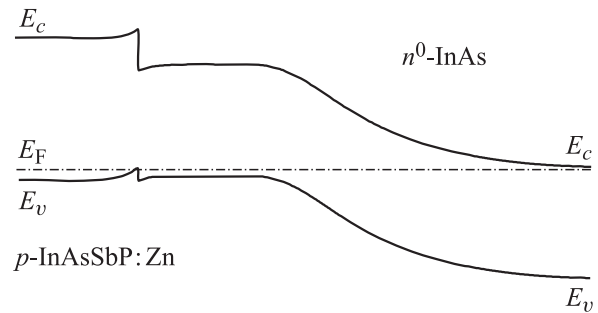


Рис. 2. Схематическая зонная энергетическая диаграмма одиночной гетероструктуры II типа p -InAs_{0.66}Sb_{0.11}P_{0.23}/ n -InAs в термодинамическом равновесии.

n -InAs (так называемое „обратное“ смещение), наблюдается увеличение области ОПЗ (см. зависимость 1 на рис. 1, *b*). При этом основная часть приложенного внешнего напряжения падает в области расстояний 2.3–4 мкм, именно в области перекомпенсированного арсенида индия. Увеличение ОПЗ происходит за счет экстракции носителей заряда из области p - n -перехода, когда под действием внешнего электрического поля электроны устремляются в сторону подложки n -InAs, а дырки — в p -InAsSbP („плато“ p -области сдвигается в эпитаксиальный слой). Излом в распределении КРП вблизи значения 4 мкм можно объяснить влиянием гетерограницы. При увеличении обратного смещения экстрагированные из p - n -перехода дырки локализуются на стороне твердого раствора p -InAsSbP, и суммарная ОПЗ расширяется до 5 мкм за счет разрушения p -области в арсениде индия. Тогда следует ожидать негативной люминесценции, обусловленной экстракцией носителей из области p - n -перехода, с энергиями фотона, близкими к ширине запрещенной зоны арсенида индия.

При прямом смещении, поданном на образец, проявляется более сложная картина в распределении поверхностного потенциала (см. зависимость 3 на рис. 1, *b*). Заметим, что при прямом смещении поверхностный потенциал подложки не совпадает с потенциалом подложки в случае нулевого смещения. Этот эффект можно объяснить наличием существенных поверхностных токов утечки, которые при температурах вблизи комнатной могут быть существенными для соединений A^{III}B^V с узкой шириной запрещенной зоны [13]. Также это объясняет несоответствие величин приложенного внешнего смещения и наблюдаемого в КРП. Величина прямого смещения составляла 0.8 В, а обратного — 0.6 В.

Согласно нашим предположениям, приведенным выше, основное падение напряжения будет приходиться на самую высокоомную область исследуемой гетероструктуры в диапазоне расстояний 2.3–4 мкм. На фоне направления основного гетероперехода p -InAsSbP/ n -InAs в распределении КРП наблюдается ступенька между двумя плато с разных сторон гетерограницы и „V“-образное поведение зависимости потенциала с локальным минимумом в окрестности 4 мкм. Такая форма зависимости

может быть представлена как суперпозиция вкладов от двух областей, включенных навстречу друг другу, что похоже на $p-n$ -переход со встроенным аккумуляционным слоем дырок ($p-p^+-n$), т.е. потенциальная яма для дырок вблизи гетерограницы II типа InAsSbP/InAs на стороне твердого раствора полностью заполнена (рис. 2). С другой стороны гетерограницы самосоглавованная квантовая яма в зоне проводимости арсенида индия остается незаполненной и может принимать электроны, инжектируемые из объема n -InAs. Таким образом, в одиночной гетероструктуре появляются две области для реализации возможных рекомбинационных излучательных переходов. Одна область более обширная, порядка 2 мкм (область перехода p -InAs/ n -InAs), а вторая квантово-размерная и локализована вблизи гетерограницы p -InAsSbP/ p -InAs. Следовательно, в спектрах электролюминесценции при прямом смещении следует ожидать, как минимум, две полосы излучения, при этом с различной природой происхождения.

4. Двухцветная электролюминесценция в одиночной гетероструктуре n -InAs/ p -InAs_{0.66}Sb_{0.11}P_{0.23} при комнатной температуре

Полученные мезодиодные структуры демонстрировали выпрямляющие вольт-амперные характеристики (ВАХ) при комнатной температуре в отличие от ВАХ для изотипной гетероструктуры p -InAsSbP/ p -InAs, которые были близки к омическим (рис. 3). Следует принять во внимание, что узкозонные соединения с дырочным типом проводимости, образующие гетеропереходы II типа, обладают малым сопротивлением, поскольку в них основная область пространственного заряда располагается в материале с меньшей шириной запрещенной зоны [14]. Кроме того, специфика гетероперехода II типа p -InAsSbP/ p -InAs выражается в низкой величине потенциального барьера на гетерогранице, что может приводить к достаточно сильному току дырок по валентной зоне при температурах вблизи комнатной. Таким образом, нелинейность в ВАХ для изотипной гетероструктуры p -InAsSbP/ p -InAs определяется только величиной разрыва в зоне проводимости на гетерогранице [6]. Появление дополнительного к $p-p$ -гетеропереходу последовательного сопротивления в виде объема нелегированной подложки n -InAs приводит к перераспределению падения напряжения внутри самой гетероструктуры p -InAsSbP/ n -InAs. Очевидно, что основное падение приложенного внешнего смещения определяется $p-n$ -переходом в объеме арсенида индия, образующимся за счет диффузии акцепторной примеси из легированного твердого раствора p -InAsSbP в глубь нелегированной подложки.

При приложении обратного смещения к гетероструктуре p -InAs_{0.66}Sb_{0.11}P_{0.23}/ n -InAs действительно на-

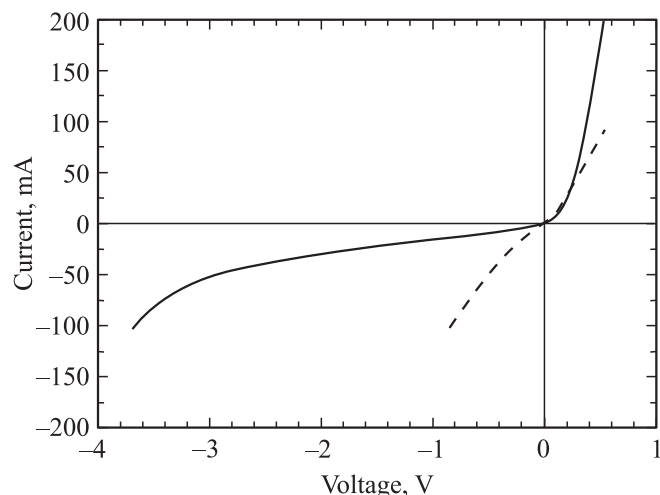


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики для гетероструктур p -InAs_{0.66}Sb_{0.11}P_{0.23}/ p -InAs (пунктирная линия) и p -InAs_{0.66}Sb_{0.11}P_{0.23}/ n -InAs (сплошная линия) при температуре 300 К.

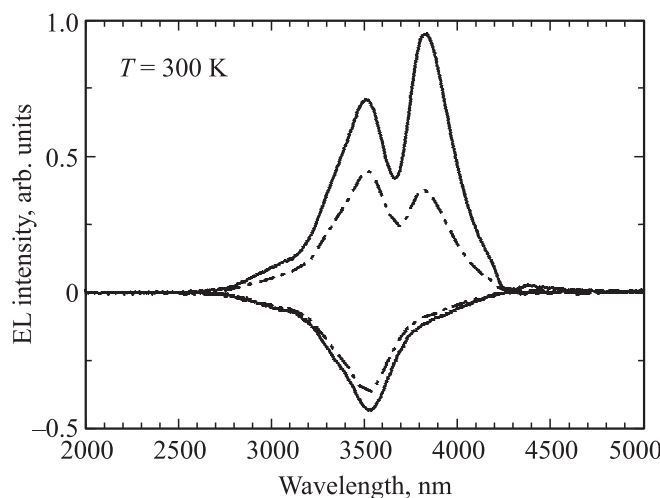


Рис. 4. Спектры электролюминесценции гетероструктуры p -InAs_{0.66}Sb_{0.11}P_{0.23}/ n -InAs, полученные при разных токах накачки, для случая прямого и обратного смещения при температуре 300 К (пунктирная линия — 25 мА, сплошная линия — 50 мА).

блюдалась негативная люминесценция при комнатной температуре (рис. 4). Спектры излучения содержали единственную полосу с минимумом интенсивности при длине волны $\lambda_1 = 3.5$ мкм, что соответствовало переходам в объеме арсенида индия. Негативная люминесценция демонстрировала слабую интенсивность в диапазоне токов до 200 мА, которая выходила на насыщение уже при малых уровнях токов накачки, начиная с 50 мА. В отличие от изотипной гетероструктуры p -InAsSbP/ p -InAs, никакой другой люминесценции не наблюдалось.

При прямом смещении для гетероструктуры p -InAs_{0.66}Sb_{0.11}P_{0.23}/ n -InAs была получена только поло-

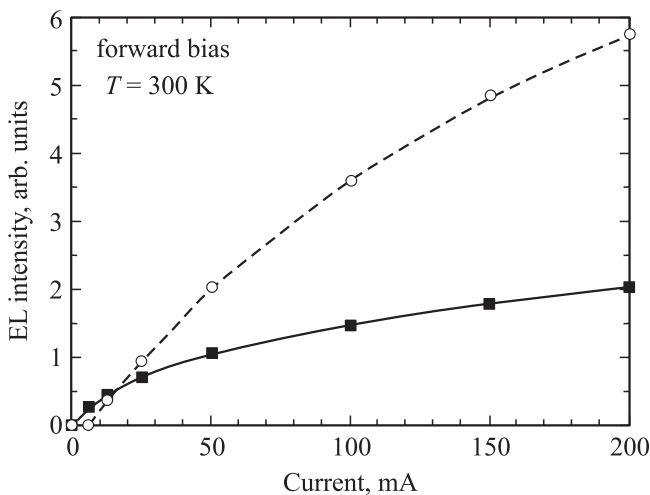


Рис. 5. Зависимости интенсивности электролюминесценции от тока накачки при прямом смещении для полосы $\lambda_2 = 3.5$ мкм (сплошная линия) и полосы излучения $\lambda_2 = 3.85$ мкм (пунктирная линия) при комнатной температуре.

жительная люминесценция. Спектры ЭЛ содержали уже две ярко выраженные интенсивные полосы излучения с максимумами при длинах волн $\lambda_1 = 3.5$ мкм и $\lambda_2 = 3.85$ мкм. Коротковолновая полоса λ_1 соответствовала межзонным излучательным переходам в объеме арсенида индия и наблюдалась как зеркальное отражение полосы негативной люминесценции, полученной при обратном смещении. Она также быстро выходила на насыщение (рис. 5). Длинноволновая полоса λ_2 наблюдалась только при приложении прямого смещения и может быть приписана интерфейсным переходам на гетерогранице II типа $p\text{-InAs}_{0.66}\text{Sb}_{0.11}\text{P}_{0.23}/p\text{-InAs}$ [6]. Возникла она пороговым образом, начиная с 8 мА, и при увеличении тока накачки (более 25 мА) становилась доминирующей в спектре электролюминесценции (рис. 4). Насыщение интерфейсной полосы излучения наступало при больших значениях тока (более 150 мА), чем для объемной полосы (рис. 5).

В результате реализуется уникальная ситуация, когда в едином спектре ЭЛ можно одновременно наблюдать полосы излучения, обусловленные различными по природе происхождения рекомбинационными излучательными переходами. При приложении прямого смещения к гетероструктуре $p\text{-InAsSbP}/p\text{-InAs}$ закономерно происходит объемная излучательная рекомбинация в области пространственного заряда в арсениде индия. Под действием внешнего электрического поля потоки электронов и дырок устремляются навстречу друг другу за счет выпрямления перехода $p\text{-InAs}/n\text{-InAs}$. Дырки поступают в область прямосмещенного перехода $p\text{-InAs}/n\text{-InAs}$ из слоя твердого раствора, проходя над барьером, образованным разрывом в валентной зоне на гетерогранице $p\text{-InAsSbP}/p\text{-InAs}$. Однако не все электроны,двигающиеся из объема $n\text{-InAs}$, рекомбинируют в области $p\text{-}n$ -перехода, оставшаяся часть встречает пре-

граду своему дальнейшему движению в виде потенциального барьера в зоне проводимости на гетерогранице $p\text{-InAsSbP}/p\text{-InAs}$, где и локализуются в потенциальной яме на стороне арсенида индия. Как уже было отмечено выше, при прямом смещении потенциальная яма для дырок на гетерогранице $p\text{-InAs}_{0.66}\text{Sb}_{0.11}\text{P}_{0.23}/p\text{-InAs}$ на стороне твердого раствора $p\text{-InAsSbP}$ сохраняется и заполнена носителями заряда. Таким образом, на гетерогранице II типа электроны и дырки пространственно разделены и энергия излучательного интерфейсного перехода ограничена по нижнему пределу эффективной шириной перекрытия зон на гетерогранице E_s [6]. Поскольку при таком внешнем смещении происходит заполнение самосогласованных потенциальных ям на гетерогранице $p\text{-InAsSbP}/p\text{-InAs}$ за счет инжекции носителей заряда из p - и n -областей навстречу друг другу, эффективность перекрытия волновых функций пространственно разделенных электронов и дырок вблизи гетерограницы II типа существенно повышается за счет поджимания носителей заряда внешним электрическим полем и дальнейшей их аккумуляции на интерфейсе. Это в свою очередь ведет к повышению вероятности излучательных рекомбинационных процессов, обусловленных туннелированием носителей заряда под потенциальными барьерами на гетерогранице навстречу друг другу.

В данном эксперименте было показано, что непрямые (интерфейсные) переходы демонстрировали большую эффективность рекомбинации, чем прямые межзонные, именно в силу своей квантовой особенности. Более того, вероятность непрямых (интерфейсных) излучательных рекомбинационных переходов на гетерогранице II типа $p\text{-InAsSbP}/p\text{-InAs}$ была существенно больше даже при сохранении прямых межзонных переходов (объемных) в арсениде индия, что весьма актуально для светоизлучающих приборов на основе узкозонных соединений арсенида индия, работающих при комнатной температуре. Наблюдение многополосных спектров электролюминесценции предлагает рассмотрение модели создания многоцветных светодиодов для среднего ИК диапазона 3–5 мкм на основе реализации нескольких каналов излучательной рекомбинации, происходящих одновременно в одной эпитаксиальной гетероструктуре. Для некоторых приложений оптоэлектроники применяется разностный метод регистрации сигнала, при котором учитывается разность между ответами системы от основного и базового сигналов светодиода. Использование особенностей интерфейсной люминесценции на гетеропереходах II типа вместе с каскадированием эпитаксиальной гетероструктуры позволит минимизировать размеры светодиода и повысить эффективность потребления электроэнергии.

Работа частично поддержана в рамках проектов РФФИ (11-02-00234а и 10-02-93110-НЦНИЛ_а), программы президиума РАН № 27 „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“ и программы Отделения физических наук РАН, грантом президента для научных школ (НШ-3008.2012.2).

Список литературы

- [1] A. Joullie, P. Christol, A.N. Baranov, A. Vicet. *Topics Appl. Phys.*, **89**, 1 (2003).
- [2] P.T. Moseley, B.C. Tofield. *Solid State Gas Sensors* (Bristol, Hilger, 1987).
- [3] A. Sugimura. *J. Appl. Phys.*, **51**, 4405 (1980).
- [4] G.G. Zegrya, A.D. Andreev. *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 2681 (1995).
- [5] М.Р. Михайлова, К.Д. Моисеев, Ю.П. Яковлев. *Semicond. Sci. Technol.*, **19**, R109 (2004).
- [6] М.М. Григорьев, Э.В. Иванов, К.Д. Моисеев. *ФТП*, **45**, 1386 (2011).
- [7] А.В. Анкудинов, А.Н. Титков, R. Laiho, В.А. Козлов. *ФТП*, **36**, 1138 (2002).
- [8] A. Doukkali, S. Ledain, C. Guasch, J. Bonnet. *Appl. Surf. Sci.*, **235**, 507 (2004).
- [9] P. Girad, M. Ramonda, D. Saluel. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **20**, 1348 (2002).
- [10] К.С. Ладутенко, А.В. Анкудинов, В.П. Евтихийев. *Письма ЖТФ*, **36**, 71 (2010).
- [11] A. Ikukawa, S. Hosaka, R. Imura. *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 3510 (1995).
- [12] H. Khalid, H. Mani, A. Joullie. *J. Appl. Phys.*, **88**, 4768 (1988).
- [13] R. Shikler, Y. Rosenwaks. *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 836 (2000).
- [14] М.П. Михайлова, И.А. Андреев, К.Д. Моисеев, Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **29**, 678 (1995).

Редактор Т.А. Полянская

Two-colour luminescence in a single type II InAsSbP/InAs heterostructure

*M.M. Grigoryev**, *P.A. Alekseev***, *E.V. Ivanov**,
*K.D. Moiseev**

* Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences
194021 St. Petersburg, Russia

+ St. Petersburg Electrotechnical University „LETI“,
197376 St. Petersburg, Russia

Abstract Gradient scanning Kelvin probe microscopy was for the first time employed to study $p-n$ heterojunctions based on narrow-gap compounds in the In-As-Sb-P solid solution system. The single type II p -InAsSbP/ n -InAs heterostructure was used to demonstrate redistribution of the flow of injected carriers in the sample along a direction of external electric field. Two-band luminescence — interfacial at the p -InAsSbP/ p -InAs heterointerface and bulk-like in InAs — was observed under forward bias applied to the heterostructure. It was shown that indirect (interfacial) transitions exhibited more efficient radiative recombination than direct interband ones. Observation of multi-band electroluminescent spectra opens the way to creation of multi-colour light-emitting diodes made on single-crystal heterostructure for mid-infrared ($3-5\mu\text{m}$) operation.