

Светодиоды на основе асимметричной двойной гетероструктуры InAs/InAsSb/InAsSbP для детектирования CO₂ ($\lambda = 4.3$ мкм) и CO ($\lambda = 4.7$ мкм)

© В.В. Романов, И.А. Белых, Э.В. Иванов, П.А. Алексеев, Н.Д. Ильинская, Ю.П. Яковлев

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

E-mail: romanovvv@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 18 декабря 2018 г.

В окончательной редакции 24 декабря 2018 г.

Принята к публикации 26 декабря 2018 г.

Методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений выращены асимметричные двойные гетероструктуры InAs/InAsSb/InAsSbP. На основе гетероструктур были созданы светодиоды двух типов (А и В) с длиной волны в максимуме спектра излучения 4.1 и 4.7 мкм соответственно. Исследованы их вольт-амперные и электролюминесцентные характеристики при комнатной температуре. Мощность излучения для светодиодов А и В в квазинепрерывном режиме (частота — 512 Гц) при токе 250 мА составляла 24 и 15 мкВт соответственно. В импульсном режиме (частота — 512 Гц, длительность — 1 мкс) мощность излучения для светодиодов А и В при токе 2.1 А достигала 158 и 76 мкВт соответственно. Разработанные светодиоды могут быть использованы как высокоэффективные источники излучения в оптических абсорбционных сенсорах, предназначенных для регистрации углекислого и угарного газов в атмосфере.

DOI: 10.21883/FTP.2019.06.47738.9051

1. Введение

Спектральный диапазон 4–5 мкм содержит фундаментальные полосы поглощения таких газов, как углекислый CO₂ (4.3 мкм) и угарный CO (4.7 мкм), представляющих опасность для здоровья и жизни человека [1]. В связи с этим возникает необходимость разработки эффективных и недорогих приборов для детектирования и определения концентрации указанных газов с помощью оптического абсорбционного метода [2,3]. На роль источников излучения в таких приборах наиболее подходят светодиоды на основе системы твердых растворов In–As–Sb–P [4].

Ранее светоизлучающие гетероструктуры для спектрального диапазона 4–5 мкм были созданы методами жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) и газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ). При выращивании методом ЖФЭ высокоэффективных структур, излучающих в указанном диапазоне длин волн, для снятия упругих напряжений, возникающих в связи с несоответствием постоянных решеток подложки InAs и активной области InAsSb, между ними целесообразно формировать кристаллически более совершенные градиентные слои твердых растворов. В результате методом ЖФЭ были созданы светодиоды как на основе варизонных структур, так и гетероструктур различных конструкций [5–10]. Использование технологии МОГФЭ позволяет выращивать светоизлучающие гетероструктуры с высоким содержанием сурьмы в активной области InAsSb без создания градиентных слоев [11–13]. Так, в работе [11] сообщается о разработке светодиодов на основе двойной симметричной гетероструктуры

InAs/InAsSb/InAs с максимумом излучения на длине волны 4.1 мкм при комнатной температуре. Максимальная оптическая мощность таких светодиодов в квазинепрерывном режиме (частота — 0.5 кГц) при токе 200 мА составила 30 мкВт.

Другим преимуществом технологии МОГФЭ является возможность выращивания твердых растворов InAsSbP, изопериодных к InAs во всем диапазоне составов [14]. Это позволяет сформировать гетероструктуры с высокими потенциальными барьерами и тем самым существенно повысить эффективность локализации носителей заряда [12]. Светодиоды с максимумом излучения на длине волны 4.7 мкм ($T = 300$ К) на основе симметричной двойной гетероструктуры InAsSbP/InAsSb/InAsSbP с содержанием фосфора 50% были исследованы в работе [13]. В квазинепрерывном режиме на частоте 0.5 кГц мощность излучения указанных светодиодов не превышала 1.2 мкВт при токе 200 мА. Низкие значения оптической мощности, полученные в данной работе, могут быть связаны с наличием большого количества гетерограниц между слоями, недостаточно хорошо согласованными по параметрам решетки.

Представляется, что применение асимметричных гетероструктур на основе InAs позволит существенно упростить процесс выращивания по сравнению со случаем симметричных структур InAs(SbP)/InAsSb, а также уменьшить количество гетерограниц и соответствующих структурных неоднородностей. В свою очередь это может повысить выходную мощность светодиодов, излучающих в рассматриваемом диапазоне длин волн.

Данная работа посвящена разработке и исследованию светодиодов, на основе асимметричных двойных гетеро-

структур, выращенных методом МОГФЭ, излучающих в спектральном диапазоне 4–5 мкм. Подробно описана технология выращивания данных структур, представлены результаты исследования вольт-амперных и электролюминесцентных характеристик светоизлучающих диодов, созданных на основе полученных гетероструктур. Продемонстрирована возможность использования разработанных светодиодов для детектирования диоксида углерода в атмосфере.

2. Методика создания и исследования гетероструктур

Гетероструктуры InAs/InAsSb/InAsSbP были выращены методом МОГФЭ. Осаждение проводилось в горизонтальном реакторе с резистивным типом нагрева при атмосферном давлении. В качестве подложки использовался нелегированный InAs (100) ($n = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$). Перед процессом эпитаксии подложка отжигалась в реакторе в атмосфере арсина (AsH_3) при температуре 610°C в течение 30 мин. Затем температура понижалась до 510°C и производилось осаждение активного слоя InAsSb и верхнего барьерного слоя $\text{InAs}_{1-y-x}\text{Sb}_y\text{P}_x$. Источниками компонент выращиваемых твердых растворов являлись металлоорганические соединения (триметилиндий — TMIIn и триметилстибин — TMSb), а также гидридные газы (арсин — AsH_3 и фосфин — PH_3). В качестве источника легирующей акцепторной примеси применялся диэтилцинк (DeZn).

Были созданы два типа гетероструктур InAs/InAsSb/InAsSbP (А и В), которые отличались друг от друга как толщиной эпитаксиальных слоев, так и содержанием сурьмы в тройном твердом растворе. Содержание TMSb в газовой фазе при осаждении тройного твердого раствора для структур А и В составило 0.45 и 0.58 соответственно. Состав газовой фазы при наращивании эпитаксиального слоя InAsSbP был одинаковым для обеих структур.

В результате гетероструктура А состояла из активного слоя InAsSb толщиной 1.5 мкм с содержанием сурьмы в твердой фазе $x = 0.08$ и барьерного слоя InAsSbP толщиной 1.7 мкм с содержанием сурьмы и фосфора в твердой фазе 0.26 и 0.42 соответственно. Гетероструктура В содержала активный слой InAsSb толщиной 3 мкм с содержанием сурьмы в твердой фазе $x = 0.125$ и барьерный слой InAsSbP толщиной 1.2 мкм с таким же содержанием сурьмы и фосфора, как и в структуре А.

Легирование верхних эпитаксиальных слоев проводилось в одинаковых технологических условиях. Напуск DeZn в реактор производился за 20 мин до завершения эпитаксиального роста.

Для определения положения p – n -перехода исследовался скол структуры методами сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) [15]. Исследования осуществлялись на сканирующем зондовом микро-

пе Ntegra AURA (NT-MDT) в условиях форвакуума ($p = 10^{-5}$ бар) при комнатной температуре. Методом градиентной кельвин-зонд микроскопии производились измерения топографии поверхности поперечного скола образца, а также распределения поверхностного потенциала. Для приложения внешнего смещения к исследуемой структуре были созданы два электрических контакта: первый — на подложке InAs, второй — на барьерном слое InAsSbP.

Светодиодные чипы размером 400×400 мкм были сформированы методом фотолитографии и химического травления. Верхний контакт был создан со стороны эпитаксиальных слоев в виде кольца шириной 30 мкм с внутренним диаметром 200 мкм. При этом суммарная толщина верхнего контакта составляла 2.5 мкм. Со стороны подложки напылялся сплошной контакт толщиной 0.6 мкм. Чипы монтировались на стандартные корпуса ТО–18.

Исследования вольт-амперных и электролюминесцентных характеристик светодиодных гетероструктур проводились при комнатной температуре.

Спектры электролюминесценции (ЭЛ) регистрировались с помощью автоматизированной установки на основе монохроматора MS-3504i с дифракционной решеткой 200 штрих/мм и фотовольтаического приемника InSb, охлаждаемого жидким азотом.

Для минимизации искажений спектров ЭЛ, возникающих вследствие поглощения излучения молекулами углекислого газа, присутствующего в воздухе, использовался метод продувки оптического тракта измерительной установки потоком газообразного азота.

Электролюминесценция возбуждалась прямоугольными импульсами тока с коэффициентом заполнения от 50% (квазинепрерывный режим) до 0.03% и с частотой повторения от 0.5 до 16 кГц. Амплитуда импульсов варьировалась в диапазоне 25–2100 мА в зависимости от выбранного режима питания. При этом отрицательный потенциал был приложен к подложке n -InAs, а положительный — к верхнему слою InAsSbP. Исследования вольт-амперных характеристик проводились в квазинепрерывном режиме с частотой 512 Гц.

3. Результаты и обсуждение

Исследование поперечного скола гетероструктуры А методами СЗМ позволило определить топографию и распределение поверхностного потенциала как в случае заземленной структуры, так и при подаче прямого и обратного смещения (рис. 1). На изображении топографии поверхности (рис. 1, а) хорошо различима граница между подложкой InAs и слоем $\text{InAsSb}_{0.08}$ (вертикальная штриховая линия в окрестности координаты 3.4 мкм). Данный факт является следствием релаксации упругих напряжений при скальвании напряженной структуры. Так как на рис. 1 свободная поверхность барьерного слоя InAsSbP находится на расстоянии 0.2 мкм от нуля,

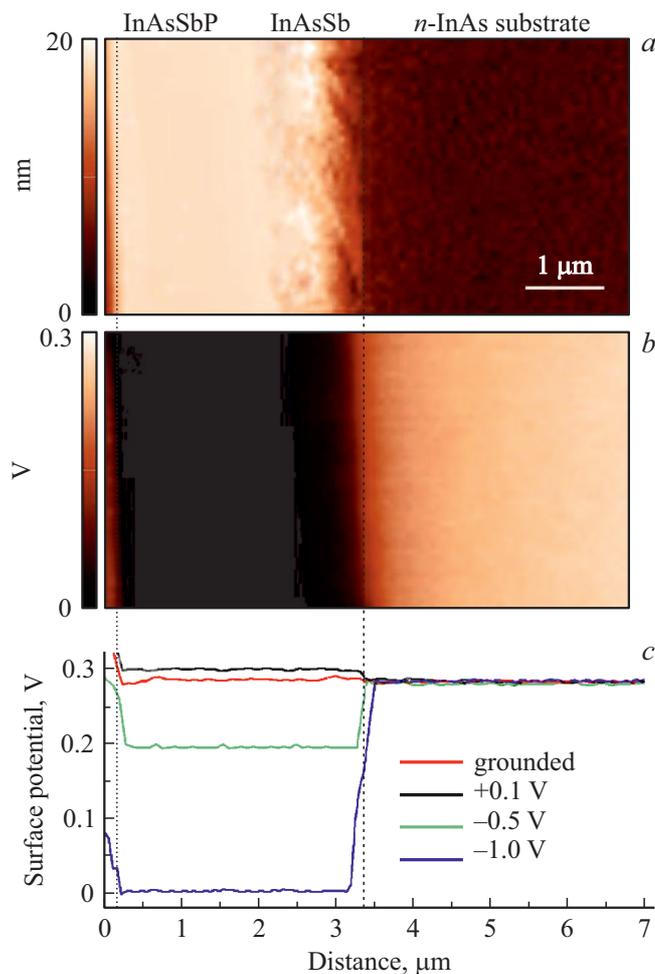


Рис. 1. Результаты исследований поперечного скола гетероструктуры А с помощью сканирующей зондовой микроскопии: *a* — топография заземленной структуры; *b* — распределение поверхностного потенциала в структуре при смещении -1 В; *c* — профили распределений поверхностного потенциала для заземленной структуры, а также при подаче смещения 0.1 , -0.5 и -1 В. Вертикальная штриховая линия обозначает гетерограницу между активным слоем InAsSb и подложкой InAs.

суммарная толщина эпитаксиальных слоев InAsSb_{0.08} и InAsSb_{0.26}P_{0.42} составляет 3.2 мкм, что согласуется с исходными данными для изучаемой структуры. Граница между слоями InAsSb_{0.08} и InAsSb_{0.26}P_{0.42} на изображении топографии поверхности не была обнаружена, что свидетельствует о хорошей согласованности постоянных кристаллической решетки тройного и четверного твердого растворов.

Распределение поверхностного потенциала (рис. 1, *b*) и соответствующие профили при различных внешних смещениях (рис. 1, *c*) позволили выявлять области пространственного заряда в гетероструктуре. Из рис. 1, *c* следует, что внешнее электрическое напряжение падает в области границы подложки InAs и активного слоя InAsSb. Кроме того, на профиле распределения потенциала, который был зарегистрирован при смещении -1 В,

наблюдается характерный излом в окрестности 3.3 мкм, что указывает на наличие p - n -перехода в данной области гетероструктуры.

Результаты, полученные методами СЗМ, были использованы при построении зонных диаграмм исследуемых гетероструктур. При этом расчет значений ширины запрещенной зоны, разрывов зоны проводимости и валентной зоны гетеропереходов для многокомпонентных твердых растворов основывался на методах и данных, изложенных в работах [16,17].

Проведенные расчеты показали, что зонные диаграммы гетероструктур А и В качественно не различаются и содержат по два гетероперехода второго типа (рис. 2). Повышение содержания сурьмы в слое InAsSb от 0.08 до 0.125 приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны тройного твердого раствора в диапазоне 0.298 – 0.264 эВ при $T = 300$ К. В то же время на гетеропереходе InAs/InAsSb возрастают разрывы потолка валентной зоны $\Delta E_v^{(1)}$ (от 84 до 128 мэВ) и дна зоны проводимости $\Delta E_c^{(1)}$ (в интервале 24 – 39 мэВ). На гетеропереходе InAsSb/InAsSbP, напротив, уменьшаются разрывы потолка валентной зоны $\Delta E_v^{(2)}$ (от 115 до 78 мэВ) и дна зоны проводимости $\Delta E_c^{(2)}$ (в диапазоне 275 – 254 мэВ). В результате в обеих гетероструктурах формируются потенциальные барьеры, достаточные для ограничения дырок в валентной зоне и электронов в зоне проводимости активного слоя. Данное ограничение увеличивает вероятность протекания процессов излучательной межзонной рекомбинации.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) светодиодов, изготовленных на основе гетероструктур А и В, представлены на рис. 3. Для обеих гетероструктур ВАХ де-

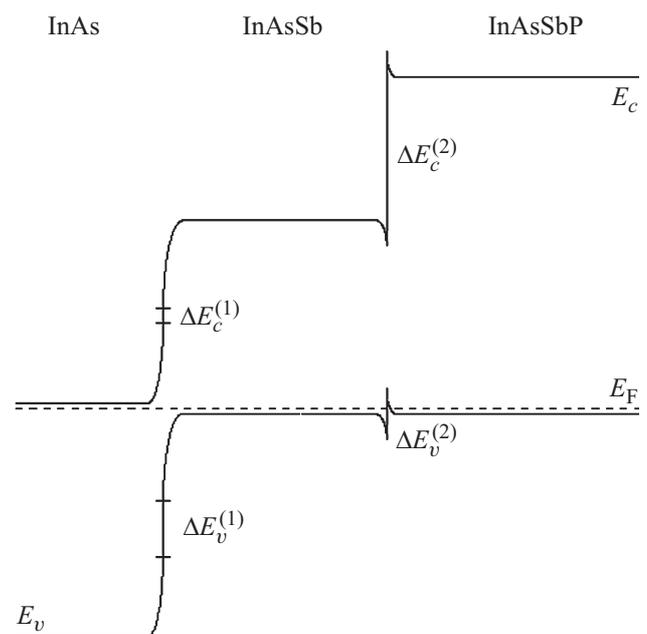


Рис. 2. Зонная энергетическая диаграмма гетероструктур А и В в состоянии термодинамического равновесия при $T = 300$ К.

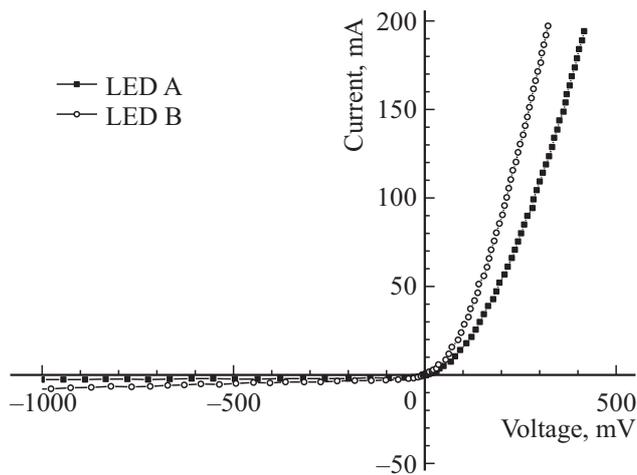


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики исследуемых светодиодных структур А и В, измеренные при температуре 300 К.

монстрировали диодную зависимость тока от приложенного смещения. Напряжение отсечки, которое характеризует величину потенциального барьера для носителей заряда, составляет 170 и 110 мВ для гетероструктуры А и В соответственно. Данные величины значительно меньше соответствующих значений ширины запрещенной зоны узкозонного слоя InAsSb, расположенного в активной области исследуемых гетероструктур. Низкое значение напряжений отсечки, по-видимому, объясняется наличием токов утечки через интерфейс InAs/InAsSb, которые вносят существенный вклад в механизм токопротекания. Значения последовательного сопротивления для светодиодов на основе гетероструктур А и В были равны 1.3 и 1.1 Ом соответственно.

Результаты исследований электролюминесцентных характеристик гетероструктур А и В в квазинепрерывном режиме при токах накачки от 25 до 250 мА представлены на рис. 4 и 5. Длительность импульсов тока была равна ~ 1 мс, частота повторения — 512 Гц.

На рис. 4 показаны спектры ЭЛ, зарегистрированные в лабораторной атмосфере (штриховая линия) и атмосфере азота (сплошная линия). Характерный провал, наблюдающийся на спектрах ЭЛ в окрестности длины волны 4.26 мкм, обусловлен присутствием интенсивной полосы поглощения. Наличие данной полосы связано с колебательно-вращательными переходами в молекулах CO_2 , содержащегося в лабораторной атмосфере [1]. Газообразный азот не имеет полос поглощения в изучаемом спектральном диапазоне, поэтому продувка оптического тракта экспериментальной установки потоком азота позволяла вытеснить углекислый газ и тем самым существенно ослабить искажения спектров ЭЛ, возникающие благодаря поглощению излучения молекулами CO_2 . К сожалению, данная методика не могла полностью устранить абсорбционные искажения спектров вследствие технических особенностей экспериментальной установки.

Для гетероструктуры А (см. рис. 4, а) спектр ЭЛ имел асимметричную форму с резким коротковолновым и более пологим длинноволновым краем. При этом длина волны в максимуме была равна 4.1 мкм, а ширина спектра на полувысоте составляла 695 нм (т.е. $\Delta h\nu_A \approx 50$ мэВ, что соответствует величине $2kT$ при комнатной температуре). Спектр ЭЛ гетероструктуры В (рис. 4, б) представлял собой симметричную полосу с максимумом на длине волны 4.7 мкм и полушириной 1230 нм ($\Delta h\nu_B \approx 75$ мэВ $\approx 3kT$ при $T = 300$ К). Для гетероструктур А и В форма спектров, длина волны в максимуме, а также значение ширины на полувысоте практически не изменялись при увеличении тока накачки от 25 до 250 мА.

Положения максимумов в спектрах ЭЛ для обеих гетероструктур соответствуют значению ширины запрещенной зоны тройного активного слоя InAsSb. По-видимому, резкий коротковолновый край спектра ЭЛ гетероструктуры А, а также меньшее значение его полуширины, выраженное в энергетических единицах, объяс-

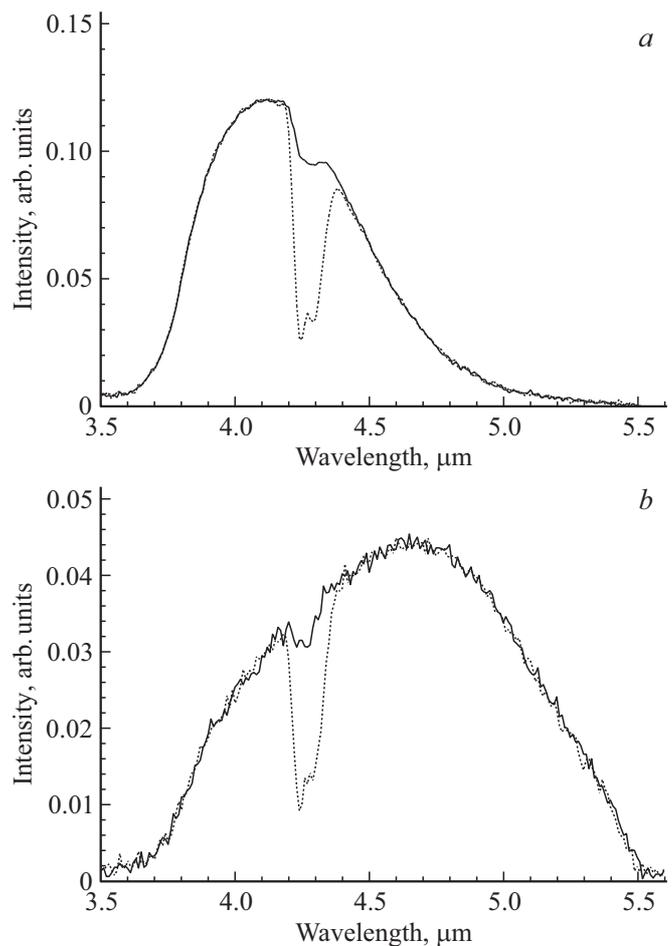


Рис. 4. Спектры электролюминесценции исследуемых светодиодных структур А (а) и В (б) при $T = 300$ К (квазинепрерывный режим, частота — 512 Гц, ток накачки — 150 мА). Сплошной линией показаны спектры, зарегистрированные в атмосфере азота, штриховой линией — спектры в лабораторной атмосфере.

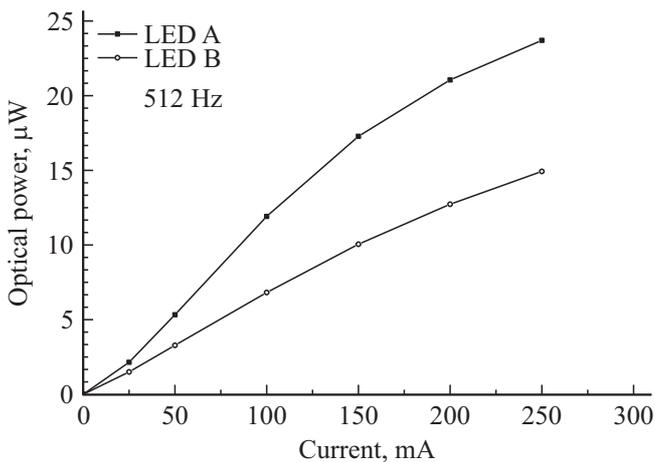


Рис. 5. Зависимости оптической мощности от тока для гетероструктур А и В при температуре 300 К, зарегистрированные в атмосфере азота (квазинепрерывный режим, частота — 512 Гц).

няются частичной непрозрачностью подложки InAs в области длин волн 3.5–3.9 мкм.

На рис. 5 показаны зависимости оптической мощности от тока накачки для изучаемых гетероструктур, зарегистрированные в атмосфере азота при квазинепрерывном режиме питания (частота — 512 Гц). Измерения проводились по методике, описанной в работе [18]. В диапазоне токов накачки от нуля до 150 мА указанные зависимости были линейными. При более высоких значениях тока темп прироста мощности начинал снижаться. Переход от линейного участка ватт-амперных характеристик к сублинейному связан с джоулевым разогревом исследуемых структур, который проявляется при значительных токах накачки. Так как из двух гетероструктур большей последовательным сопротивлением характеризовалась структура А, влияние токового разогрева для нее также было наиболее существенным. При этом во всем исследованном диапазоне токов накачки соответствующие значения оптической мощности для гетероструктуры В были приблизительно в 1.6 раза ниже, чем для структуры А. В частности, при токе 250 мА оптическая мощность для гетероструктур А и В составила 24 и 15 мВт соответственно. Этот факт обусловлен влиянием безызлучательной оже-рекомбинации, роль которой возрастает по мере уменьшения ширины запрещенной зоны активной области исследуемых структур [19].

В заключение следует обратить внимание на присутствие характерных точек перегиба на обеих ватт-амперных зависимостях при токе 25 мА (см. рис. 5). Данная особенность подтверждает наше предположение о существовании заметных токов утечки через интерфейс InAs/InAsSb, что сказывается прежде всего на параметрах ВАХ гетероструктур А и В. Другая возможная причина существования указанных точек перегиба связа-

на с наличием структурных дефектов, которые являются ловушками для неравновесных носителей заряда.

Зависимости оптической мощности от тока для светодиодов на основе гетероструктур А и В, измеренные в атмосфере азота при импульсных режимах питания, представлены на рис. 6. Частота повторения импульсов тока составляла 512 Гц (рис. 6, а) и 2047 Гц (рис. 6, б). Длительность импульсов варьировалась в интервале от 1 до 20 мкс.

Для обеих гетероструктур зависимости оптической мощности (P) от тока накачки (I) аппроксимировались степенными функциями $P = \alpha \cdot I^\beta$, где α и β — параметры, зависящие от характеристик гетероструктуры и режима питания, причем $\beta < 1$. По мере уменьшения длительности импульсов тока показатель степени β монотонно увеличивался. Например, на частоте 2047 Гц данный параметр для гетероструктуры А возрастал от значения 0.54 до 0.64 при изменении длительности импульса от 4 до 1 мкс. Для гетероструктуры В соответствующие значения показателя β находились в диапазоне 0.45–0.54. На частоте 512 Гц прирост параметра β за счет уменьшения длительности импульсов тока был

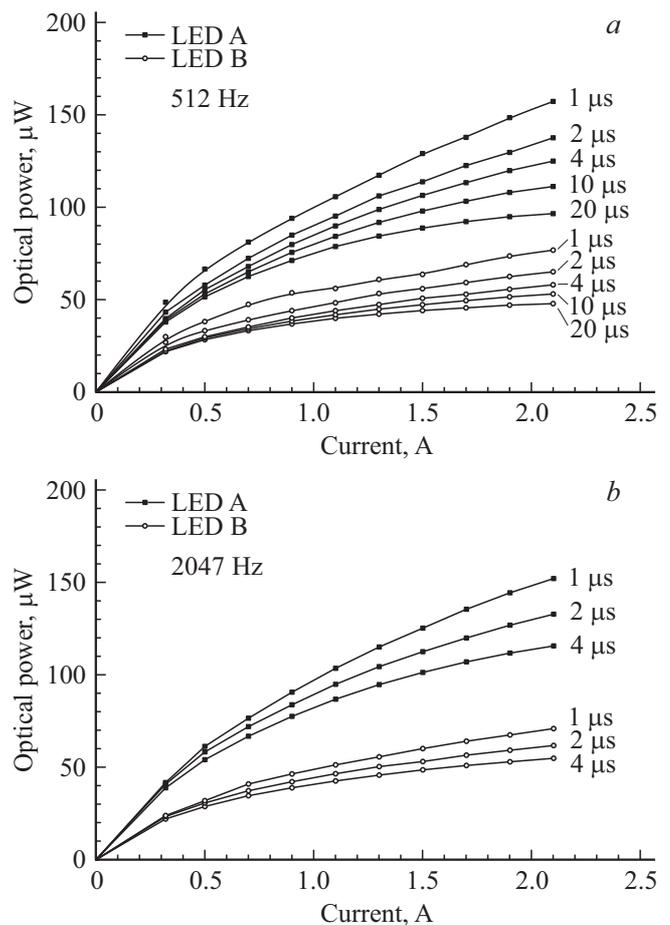


Рис. 6. Зависимости оптической мощности от тока для гетероструктур А и В при $T = 300$ К, зарегистрированные в атмосфере азота (импульсный режим, частота — 512 Гц (а) и 2047 Гц (б)).

менее заметен. В этом режиме изменение длительности импульса от 4 до 1 мкс для гетероструктуры А сопровождалось увеличением параметра β в интервале 0.58–0.61, а для гетероструктуры В данный показатель изменялся от 0.468 до 0.473. Похожая динамика была характерна и для параметра α : его величина монотонно возрастала по мере уменьшения длительности импульсов тока.

В результате на частотах 512 и 2047 Гц наблюдался рост оптической мощности при уменьшении длительности импульсов тока накачки для обеих исследованных структур. Данный эффект, очевидно, связан с ослаблением джоулевого разогрева гетероструктур за счет использования более коротких импульсов питания. При этом на частоте 512 Гц были получены несколько большие значения оптической мощности (на 2–8%), нежели на частоте 2047 Гц для соответствующих длительностей импульсов. Это явление также может быть объяснено уменьшением разогрева исследуемых гетероструктур при увеличении скважности импульсов тока.

Следует подчеркнуть, что гетероструктура А демонстрировала более высокие значения параметров β и α по сравнению со структурой В. Вследствие этого значения импульсной оптической мощности для светодиодов на основе гетероструктуры А были в ~ 1.6 – 2.0 раза выше, чем для светодиодов на основе гетероструктуры В при одинаковых значениях питающего тока в диапазоне 0.3–2.1 А. Например, на частоте 512 Гц при длительности импульсов 1 мкс для максимальных значений тока накачки 2.1 А импульсная оптическая мощность составляла 158 и 76 мкВт для гетероструктуры А и В соответственно. Как уже говорилось выше, данное различие обусловлено процессами оже-рекомбинации, скорость которой увеличивается при уменьшении ширины запрещенной зоны активного слоя InAsSb в составе гетероструктур А и В [19].

Таким образом, как и в случае квазинепрерывного режима питания, ватт-амперные характеристики в импульсном режиме при больших токах накачки имеют сублинейный участок, наличие которого связано с разогревом гетероструктуры, а также с возрастающим влиянием безызлучательной оже-рекомбинации.

4. Заключение

Методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений были выращены асимметричные двойные гетероструктуры InAs/InAsSb/InAsSbP двух типов, отличающиеся друг от друга толщиной эпитаксиальных слоев и содержанием сурьмы в тройном твердом растворе InAsSb. На основе данных гетероструктур были созданы светодиоды с длиной волны в максимуме спектра ЭЛ 4.1 мкм (А) и 4.7 мкм (В). В квазинепрерывном режиме (частота — 512 Гц) при токе 250 мА выходная оптическая мощность светодиодов А и В составляла 24

и 15 мкВт соответственно. В импульсном режиме (частота — 512 Гц, длительность импульса — 1 мкс) при токе 2.1 А были достигнуты значения оптической мощности 158 и 76 мкВт для светодиодов А и В соответственно.

Использование асимметричных гетероструктур InAs/InAsSb/InAsSbP позволило существенно упростить процесс выращивания по сравнению с симметричными структурами InAsSb/InAsSbP, которые были получены ранее методом МОГФЭ [13]. При этом удалось также обеспечить эффективную локализацию неравновесных носителей заряда в активной области. В результате оптическая мощность светодиодов В с максимумом спектра ЭЛ на длине волны 4.7 мкм, созданных на основе таких структур, была увеличена на порядок. В то же время значения оптической мощности для светодиодов А, излучающих в районе 4.1 мкм, мало отличались от тех величин, которые были характерны для светодиодов на основе симметричных структур InAs/InAsSb, выращенных методом МОГФЭ [11]. Это позволяет утверждать, что прирост оптической мощности для длинноволновых светодиодов В был достигнут за счет уменьшения количества гетерограниц и связанных с ними структурных неоднородностей. При этом по-прежнему существует перспектива повышения оптической мощности светодиодов с максимумом на длине волны 4.1 мкм за счет использования гетероструктур с высокими потенциальными барьерами.

Разработанные светодиоды могут применяться в качестве высокоэффективных источников излучения в оптических абсорбционных сенсорах, предназначенных для детектирования и измерения концентрации углекислого и угарного газов.

Полученные результаты показывают перспективность использования асимметричных двойных гетероструктур InAs/InAsSb по сравнению с симметричными структурами для создания светоизлучающих диодов, работающих в спектральном диапазоне 4–5 мкм при комнатной температуре.

Список литературы

- [1] R.H. Pierson, A.N. Fletcher, E.St.C. Gantz. *Analyt. Chem.*, **28** (8), 1218 (1956).
- [2] S. McCabe, B.D. MacCraith. *Electron. Lett.*, **29** (19), 1719 (1993).
- [3] J.G. Growder, S.D. Smith, A. Vass, J. Keddie. In: *Mid-infrared Semiconductor Optoelectronics*, ed. by A. Krier (London, Springer, 2006) p. 595.
- [4] M. Mikhailova, N. Stoyanov, I. Andreev, B. Zhurtanov, S. Kizhaev, E. Kunitsyna, Kh. Salikhov, Yu. Yakovlev. *Proc. SPIE*, **6585**, 658526 (2007).
- [5] А.А. Попов, М.В. Степанов, В.В. Шерстнёв, Ю.П. Яковлев. *Письма ЖТФ*, **24** (15), 34 (1998).
- [6] H.H. Gao, A. Krier, V. Sherstnev, Y. Yakovlev. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **32** (15), 1768 (1999).
- [7] A. Krier, H.H. Gao, V.V. Sherstnev, Y. Yakovlev. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **32** (24), 3117 (1999).

- [8] М. Айдаралиев, Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. ФТП, **34** (1), 102 (2000).
- [9] М. Айдаралиев, Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. ФТП, **35** (5), 619 (2001).
- [10] Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь. ФТП, **40** (6), 717 (2006).
- [11] А.С. Головин, А.П. Астахова, С.С. Кижасев, Н.Д. Ильинская, О.Ю. Серебренникова, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **36** (1), 105 (2010).
- [12] Н.В. Зотова, С.С. Кижасев, С.С. Молчанов, Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, Б.В. Пушный, Ю.П. Яковлев. ФТП, **37** (8), 980 (2003).
- [13] А.С. Головин, А.А. Петухов, С.С. Кижасев, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **37** (11), 15 (2011).
- [14] В.В. Романов, М.В. Байдакова, К.Д. Моисеев. ФТП, **48** (6), 753 (2014).
- [15] М.М. Григорьев, П.А. Алексеев, Э.В. Иванов, К.Д. Моисеев. ФТП, **47** (1), 30 (2013).
- [16] А. Милнс, Д. Фойхт. *Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник* (М., Мир, 1975) с. 432.
- [17] I. Vurgaftman, J.R. Meyer, L.R. Ram-Mohan. J. Appl. Phys., **89** (11), 5815 (2001).
- [18] Н.Д. Стоянов, Б.Е. Журтанов, А.П. Астахова, А.Н. Именков, Ю.П. Яковлев. ФТП, **37** (8), 996 (2003).
- [19] V.N. Abakumov, V.I. Perel', I.N. Yassievich. In: *Modern Problems in Condensed Matter Sciences*, ed. by V.M. Arganovich, A.A. Maradudin (Amsterdam, North Holland, 1991) v. 33, p. 320.

Редактор А.Н. Смирнов

Light-emitting diodes based on asymmetrical double InAs/InAsSb/InAsSbP heterostructure for CO₂ ($\lambda = 4.3 \mu\text{m}$) and CO ($\lambda = 4.7 \mu\text{m}$) detection

V.V. Romanov, I.A. Belykh, E.V. Ivanov, P.A. Alekseev, N.D. Il'inskaya, Yu.P. Yakovlev

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Asymmetrical double InAs/InAsSb/InAsSbP heterostructures are grown by metalorganic vapor-phase epitaxy. Two types of light-emitting diodes (A and B) were created on basis of grown heterostructures with emission peak at 4.1 and 4.7 μm , respectively. The current-voltage and electroluminescent characteristics of light-emitting diodes are investigated at room temperature. When operating at 50% duty cycle mode (frequency — 512 Hz) with a current of 250 mA, light-emitting diodes A and B produced the optical power of 24 and 15 μW , respectively. Under the pulse operation (frequency — 512 Hz, duration — 1 μs) with a current of 2.1 A, the optical power of light-emitting diodes A and B reached the values of 158 and 76 μW , respectively. The developed light-emitting diodes can be used as high-effective radiation sources in optical absorption sensors for detection of carbon dioxide and carbon monoxide in the atmosphere.