

06;07

Высокоэффективные светодиоды на 3.4–4.4 μm на основе $p\text{-AlGaAsSb}/n\text{-InGaAsSb}/n\text{-AlGaAsSb}$, работающие при комнатной температуре

© Б. Журтанов, Э.В. Иванов, А.Н. Именков,
Н.М. Колчанова, А.Е. Розов, Н. Стоянов, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 19 сентября 2000 г.

Созданы и исследованы излучающие структуры на основе $p\text{-AlGaAsSb}/n\text{-InGaAsSb}/n\text{-AlGaAsSb}$ на $p\text{-GaSb}$ (100) подложке с высоким содержанием Al в ограничительных слоях, работающие при комнатной температуре. Данная структура обеспечила превышение оптической мощности излучения и внешнего квантового выхода ($\sim 1\%$) в 3 раза по сравнению с известной гетероструктурой $\text{InAsSb}/\text{InAsSbP}$, выращенной на подложке InAs. Значительное увеличение импульсной мощности излучения обусловлено более эффективным удержанием неравновесных носителей заряда в активной области и уменьшением безызлучательной рекомбинации за счет создания изопериодной структуры.

Полупроводниковые источники излучения в настоящее время используются в прикладной спектроскопии для определения присутствия ряда газов, отравляющих атмосферу. В средней инфракрасной области 3.0–5 μm лежат сильные фундаментальные полосы поглощения газов, представляющих практический интерес, например метан (CH_4), углекислый газ (CO_2), окись углерода (CO) и другие. Значительный успех в регистрации этих газов был сделан благодаря разработкам светодиодов на основе многокомпонентных структур $\text{InAsSbP}/\text{InAsSb}/\text{InAsSbP}$,

работающих при комнатной температуре, выполненным в Физико-техническом институте для спектрального диапазона $3\text{--}5\ \mu\text{m}$ [1–4]. Следующим шагом по пути увеличения эффективности светоизлучающих структур такого типа является совместная работа сотрудников ФТИ и сотрудников Ланкастерского университета [5]. Авторы этой работы добились увеличения эффективности светодиодов за счет улучшения чистоты материала активной области путем введения в нее атомов редкоземельных элементов. Это позволило создать светодиоды, в которых оптическая мощность в импульсе превышала $1\ \text{mW}$ при комнатной температуре. Общим недостатком излучающих структур $\text{InAsSbP}/\text{InAsSb}$ является неизопериодность полупроводниковых слоев структуры и InAs , недостаточная высота барьера для эффективного удержания неравновесных носителей заряда в активной области, большое поглощение и заметная ударная рекомбинация из-за влияния спин-орбитально отщепленной зоны. Применение известных светодиодных структур сдерживается недостаточно высокой мощностью излучения ($\sim 1\ \text{mW}$ в импульсном режиме и порядка $80\ \mu\text{W}$ в непрерывном режиме). Поэтому авторы сконцентрировали свое внимание на поиск альтернативных подходов к созданию высокоэффективных светодиодов на основе новых полупроводниковых материалов.

В данной работе впервые предлагается принципиально новый подход к получению высокоэффективных источников излучения на диапазон $3.0\text{--}5.0\ \mu\text{m}$, использующий двойную гетероструктуру $\text{AlGaAsSb}/\text{InGaAsSb}/\text{AlGaAsSb}$, выращенную на GaSb подложке. Главной целью данного направления исследований авторы считают необходимость увеличения квантовой эффективности и мощности излучения на порядок по сравнению с известными излучателями на основе твердых растворов InAs в указанном спектральном диапазоне. Данная работа является первой работой в этом направлении и продолжает наши предыдущие работы по созданию и исследованию светодиодов в ИК области.

2. Предложенная структура создавалась методом жидкофазной эпитаксии на $p\text{-GaSb}$ (100) подложке и содержала четыре эпитаксиальных слоя: $p\text{-AlGaAsSb}/n\text{-InGaAsSb}/n\text{-AlGaAsSb}/n\text{-GaSb}$. Состав узкозонного слоя соответствовал середине указанного спектрального диапазона. Подложка $p\text{-GaSb}$ специально не легировалась и имела концентрацию равновесных дырок $(1\text{--}2) \cdot 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$. Широкозонные слои n и p типа выращивались с большим содержанием Al , чем Ga ; p -слой специально

не легировался. Электронная проводимость в *p*-слое достигалась легированием Те. Широкозонные слои имели толщину 1.5 мкм. Узкозонный слой активной области $\text{In}_{0.934}\text{Ga}_{0.066}\text{As}_{0.83}\text{Sb}_{0.17}$ толщиной (1.5–2) мкм специально не легировался и имел концентрацию свободных электронов около 10^{18} cm^{-3} . Контактный слой *n*-GaSb был сильно легирован Те. Отличительная особенность предлагаемой структуры состоит в том, что она является принципиально изопериодной с подложкой GaSb. Измеренная величина относительного рассогласования постоянной решеток $\Delta a/a$ находится в пределах точности измерения $2 \cdot 10^{-4}$. Увеличение концентрации Al приводит к росту энергетического разрыва зон и создает лучшие условия для удержания неравновесных носителей заряда в активной области.

Образец помещался в светодиодный корпус с параболическим рефлектором. Светодиод имел форму параллелепипеда. Площадь *p*–*n* перехода была квадратной $0.5 \times 0.5 \text{ mm}$. Высота параллелепипеда составляла 0.1 mm. Излучение выходило в сторону рефлектора в основном через боковые грани параллелепипеда. Для измерения спектров излучения на структуру подавался импульсный ток длительностью 20 мкс, скважностью 49. В качестве диспергирующего прибора использовался монохроматор, у выходной щели которого был размещен фотоприемник из InSb, охлаждаемый жидким азотом. Мощность излучения измерялась стандартным прибором Nova с термопарной головкой 2A-SH.

На полученных структурах исследовались спектральные и ватт-амперные характеристики при различных токах при комнатной температуре.

3. Спектры излучения обычно содержали одну полосу (рис. 1). Длина волны в максимуме интенсивности составляла 3.7–3.8 мкм. На длинноволновом склоне полосы заметна линия поглощения газа CO_2 ($\lambda = 4.27 \text{ мкм}$), находящегося в воздухе. Ширина полосы излучения на половине высоты составляет 30–35 meV, что в 1.5–2 раза меньше, чем обычно в светодиодах при комнатной температуре. Следует отметить более высокую крутизну коротковолнового склона полосы, чем длинноволнового. Форма полосы практически не зависит от тока.

Интегральная импульсная мощность излучения P определяется основной полосой и растет с увеличением тока I сверхлинейно (рис. 2). Если зависимость P от I выразить формулой $P \sim I^n$, то показатель степени n уменьшается с током от значения 3 при токе 150 mA до значения 1.2 при токе 2500 mA. Импульсная мощность (измеренная

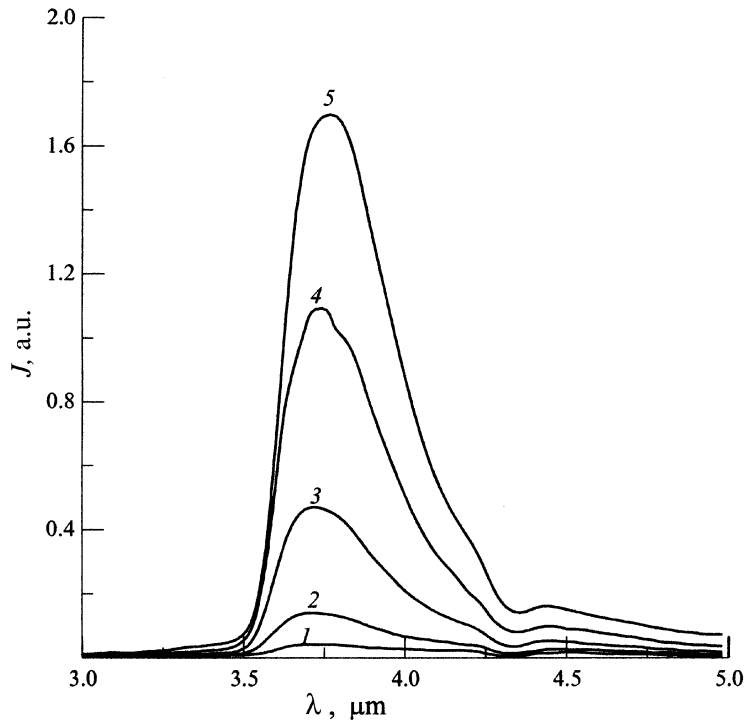


Рис. 1. Спектры излучения светодиода 9602 при комнатной температуре при различных токах I , mA: 1 — 200, 2 — 300, 3 — 500, 4 — 700, 5 — 1000.

средняя мощность прибором Nova и умноженная на скважность) при импульсном токе 1 А длительностью $20 \mu\text{s}$ и скважностью 49 составляет 3.2 mW. Это соответствует величине внешнего квантового выхода излучения 1%.

4. Обсудим экспериментальные результаты.

Как следует из п. 3, энергия максимума спектра излучения всех светодиодов оказывается больше ширины запрещенной зоны узкозонного материала при комнатной температуре на 20–30 meV. Поэтому можно говорить о преобладании в исследованных структурах межзонной рекомбинации неравновесных носителей заряда над примесной и интерфейс-

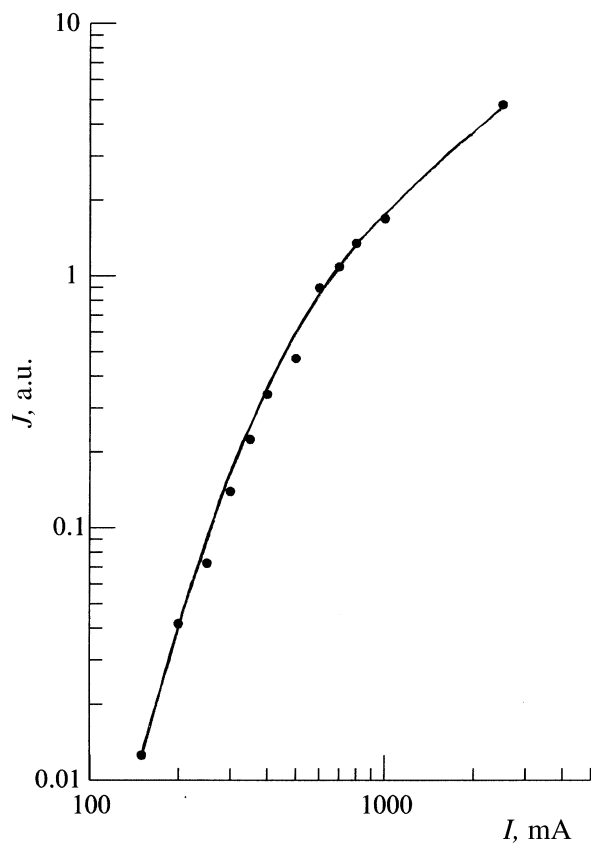


Рис. 2. Зависимость интенсивности излучения светодиода 9602 от тока при комнатной температуре.

ной рекомбинацией. Пологий длинноволновый склон полосы излучения при этом указывает на присутствие хвостов плотности состояний в запрещенной зоне, наличие которых, однако, не влияет на спектральное положение максимума полосы.

Большая разница между энергией максимума полосы излучения и шириной запрещенной зоны объясняется большой концентрацией

равновесных электронов в активной области. Однако полуширина полосы оказывается в эксперименте меньше, чем должна быть при такой большой концентрации носителей заряда, если не учитывать поглощения коротковолнового излучения в самой активной области. Это поглощение может происходить вследствие того, что излучение, выходящее в направлении к параболическому отражателю, проходит путь длиной в несколько десятков микрон в активной области. Коротковолновое излучение при этом поглощается на межзонных переходах и затем частично переизлучается. Переизлучение способствует сверхлинейному росту интенсивности излучения с током. Основной причиной сверхлинейного роста интенсивности излучения с током при малых токах (< 0.5 А), по-видимому, является заполнение глубоких уровней. При токах > 0.5 А (> 200 А/см²) глубокие уровни становятся практически заполненными. Интервал токов от 0.5 до 2.5 А является интервалом с высоким внешним квантовым выходом излучения, близким к 1%. Увеличению эффективности светодиодов, безусловно, способствует хорошее удержание неравновесных дырок в активной области из-за высокого содержания Al в ограничительных слоях.

Сверхлинейная зависимость интенсивности излучения от тока при больших токах (> 1 А) позволяет надеяться на отсутствие заметной безызлучательной Оже-рекомбинации СННС, обусловленной переходом одной дырки в спин-орбитально отщепленную подзону валентной зоны и другой дырки в зону проводимости. Это вызвано большим содержанием Sb (большим, чем Ga), так как Sb увеличивает энергию спин-орбитального отщепления в активной области.

Таким образом, проведенные исследования на новой излучающей структуре $p\text{-AlGaAsSb}/n\text{-InGaAsSb}/n\text{-AlGaAsSb}$ на $p\text{-GaSb}$ (100) подложке с высоким содержанием Al в ограничительных слоях говорят о перспективности создания высокоэффективных светодиодных структур с узкой полосой излучения для длин волн 3.4–4.4 μm на подложке GaSb. Полученная высокая эффективность таких светодиодов объясняется хорошим согласованием постоянных решеток слоев структуры, значительной высотой барьера для эффективного удержания неравновесных носителей заряда в активной области и уменьшением ударной Оже-рекомбинации за счет увеличения энергии спин-орбитального отщепления в материале активной области. Реализованная светодиодная структура показала ее существенные преимущества перед структурой InAsSb/InAsSbP. Достигнуто увеличение импульсной оптической мощ-

ности и внешнего квантового выхода излучения по крайней мере в 3 раза по сравнению с обычной гетероструктурой InAsSb/InAsSbP, выращенной на подложке InAs. Это открывает принципиально новые возможности для конструирования светодиодов для диапазона 3.4–4.4 мкм.

Эта работа частично поддержана грантами РФФИ 99–02–18109 и 00–02–17047.

Список литературы

- [1] *Есина Н.П., Зотова Н.В., Матвеев Б.А., Стусь Н.И., Талалакин Г.Н., Абишев Т.Д.* // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. В. 7. С. 391.
- [2] *Matveev B., Zotova N., Karandashov S., Remennyi M., Il'inskaya N., Stus' N., Shustov V., Talalakin G., Malinen J.* // IEE Proceedings. Optoelectronics. 1998. V. 145 (5). P. 254–256.
- [3] *Popov A.A., Sherstnev V.V., Yakovlev Y.P., Baranov A.N., Alibert C.* // Electr. Lett. 1997. V. 33. P. 86–88.
- [4] *Попов А.А., Степанов М.В., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 8. С. 596–598.
- [5] *Krier A., Gao H.H., Sherstnev V.V., Yakovlev Yu.P.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001 (to be published).