

06.3;07

## Исследование спонтанного и когерентного излучения в диапазоне длин волн $3 \div 4 \mu\text{m}$ в лазерной структуре на основе InGaAsSb/AlGaSbAs

© Е.А. Гребенщикова, О.Г. Ершов, Б.Е. Журтанов,  
А.Н. Именков, Н.М. Колчанова, Ю.П. Яковлев

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

Поступило в Редакцию 16 июля 1997 г.

Впервые получено когерентное излучение в спектральном диапазоне  $3 \div 4 \mu\text{m}$  в двойной гетероструктуре на основе InGaAsSb/AlGaSbAs, выращенной на подложке GaSb. Показано, что спонтанное и когерентное излучение генерируется в основном на межзонных переходах в узкозонном InGaAsSb слое. Установлено, что оптическое ограничение электромагнитной волны достаточно для работы лазера до температуры 120 К при питании меандром.

1. Широко известны лазерные структуры для спектрального диапазона  $3 \div 4 \mu\text{m}$ , выращенные на подложке InAs [1,2], в которых активная область выполнена на основе тройных твердых растворов InAsSb, а эмиттерные — на основе более широкозонных InAsSbP. Максимальное содержание фосфора составляет  $\approx 34\%$  и определяется областью существования изопериодных с подложкой InAs твердых растворов InAsSbP. Из-за близости составов узкозонного и широкозонного слоев разность показателей преломления оказывается в пределах  $\Delta n = 0.02 - 0.09$ . При столь малом  $\Delta n$  дифференциальная квантовая эффективность лазеров не превышает 10–15% из-за сильного проникновения излучения в широкозонные слои и подложку InAs и соответствующего его поглощения.

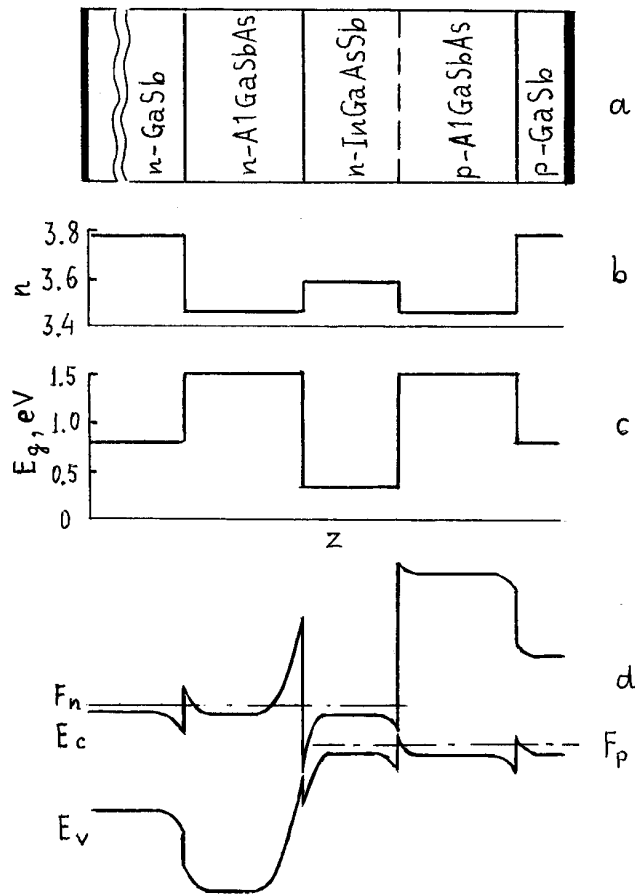
С ростом температуры выше 77 К не только увеличивается поглощение излучения, снижающее эффективность, но и, как показано в работе [3],  $\Delta n$  уменьшается из-за увеличения концентрации носителей заряда в узкозонном слое. Стремление  $\Delta n$  к нулю с повышением температуры делает проблематичным повышение рабочей температуры лазеров на основе этих структур выше 200 К.

В структурах AlGaSbAs–InGaAsSb–AlGaAsSb с содержанием In  $\sim 90\%$  в узкозонном слое и содержанием Al  $> 60\%$  в широкозонных слоях  $\Delta n$  может оказаться в пределах 0.1–0.3. С повышением температуры от азотной до комнатной  $\Delta n$  изменяется незначительно, так как решеточная составляющая показателя преломления в узкозонном слое увеличивается сильнее, чем в широкозонных слоях, и компенсирует уменьшение показателя преломления из-за роста пороговой концентрации неравновесных носителей заряда с температурой. Хорошее оптическое ограничение должно позволить создавать высокоэффективные лазеры с высокой рабочей температурой.

В этой работе мы впервые делаем попытку создать лазерную структуру в длинноволновой области спектра  $3 \div 4 \mu\text{m}$  с большим значением  $\Delta n$  (разница показателей преломления в активной и эмиттерных областях) и более высокой величиной электронного ограничения.

Лазерная структура представляла собой изопериодную гетероструктуру AlGaSbAs–InGaAsSb–AlGaSbAs, выращенную на подложке из GaSb. Содержание Al в широкозонном слое составляло 64%, а содержание In в узкозонных твердых растворах составляло  $\sim 90\%$ . Оптическое ограничение в данной структуре еще невелико (0.13), но мы рассчитываем его существенно улучшить, используя широкозонные твердые растворы с большим содержанием Al (до 90%). Большая разница между шириной запрещенных зон ограничительных слоев и активного слоя (рис. 1, *c*) обеспечивает хорошее электрическое ограничение как для электронов, так и для дырок (рис. 1, *d*).

2. Лазерные структуры изготавливались методом жидкофазной эпитаксии на подложке *n*-GaSb, ориентированной по плоскости [100] (рис. 1, *a*). Сначала выращивался широкозонный ограничительный слой *n*-AlGaAsSb с содержанием Al 64%, затем узкозонный активный слой *n*-InGaAsSb с содержанием Ga  $\sim 10\%$  и далее широкозонный инжектор *p*-AlGaSbAs с содержанием Al 64% и контактный слой *p*-GaSb. Все слои выращивались изопериодными с подложкой GaSb (рассогласование периодов решетки не превышало 0.2%). Толщина активной области составляла  $1.7 \mu\text{m}$ , а широкозонных слоев по  $1.6 \mu\text{m}$ . Расчетная разность показателей преломления широкозонного и узкозонного слоев составляла  $\Delta n = 0.13$  при 77 К (рис. 1, *b*). Из лазерных структур были изготовлены полосковые лазеры с шириной полоска  $20 \mu\text{m}$  и длиной резонатора 200–300  $\mu\text{m}$ . На лазерных структурах были исследованы вольт-амперная, люкс-амперная и спектральная характеристики при раз-



**Рис. 1.** Схема исследуемой структуры (а), послойный профиль показателя преломления  $n$  (b) и ширины запрещенной зоны  $E_g$  (c) и энергетическая диаграмма в рабочем режиме (d).

личных температурах в интервале 77–300 К по методикам, описанным в работе [1].

3. Впервые на структурах типа AlGaSbAs–InGaAsSb–AlGaSbAs было получено как спонтанное, так и когерентное излучение в широком

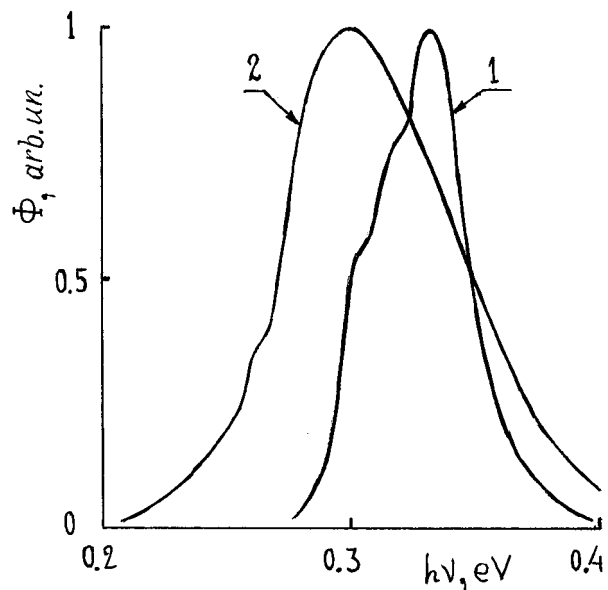
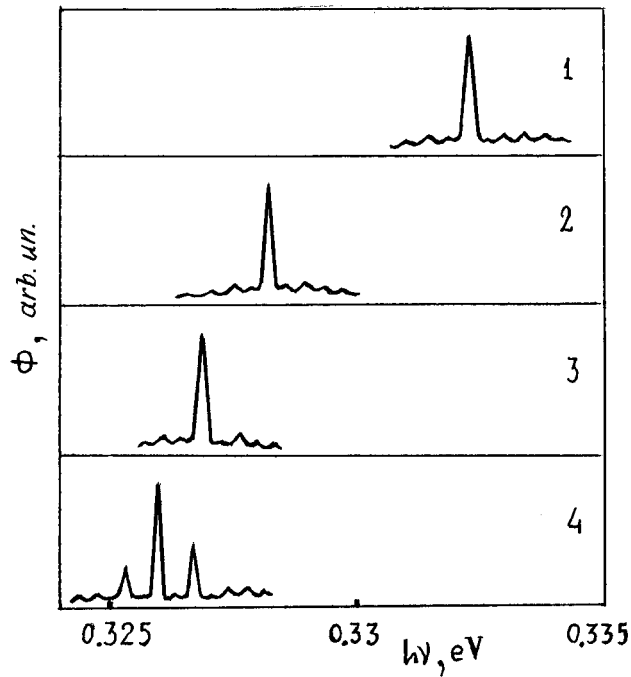


Рис. 2. Спектры спонтанного излучения при 77 К (1) и 300 К (2).

интервале температур. Спонтанное излучение было зарегистрировано в интервале от 77 до 300 К. Энергия максимума полосы спонтанного излучения (рис. 2) близка к ширине запрещенной зоны узкозонного материала при соответствующей температуре. Длинноволновый склон полосы излучения более пологий, чем следует из теории межзонной рекомбинации. На нем при низкой температуре можно выделить еще две полосы с энергиями максимумов меньше, чем энергия максимума преобладающей полосы на 10–15 и 15–20 meV соответственно. С повышением температуры от азотной до комнатной интенсивность излучения при фиксированном токе уменьшается приблизительно в 10 раз.

Когерентное излучение регистрируется в интервале температур 77–120 К. На рис. 3 спектры когерентного излучения представлены для четырех температур при питании лазера меандром. Во всех случаях доминирующая мода подавляет две соседние моды резонатора. Другие моды резонатора проявляются слабо. Поэтому преимущество доминирующей моды оказывается большим.



**Рис. 3.** Спектры лазерного излучения вблизи порога генерации при различных температурах  $T$ , К: 1 — 100, 2 — 113, 3 — 116, 4 — 120 и соответственно токах  $I$ , mA: 1 — 140, 2 — 150, 3 — 160, 4 — 180.

#### 4. Проанализируем полученные экспериментальные результаты.

Преобладающая полоса в спектре спонтанного излучения близка по форме к теоретической для межзонной рекомбинации в  $n$ -материале. По ее полуширине можно определить концентрацию электронов в активной области при малых токах, когда стимуляция излучения невелика. Из спектров, измеренных при малых токах (менее 10 mA), концентрация электронов оказывается  $4 \div 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Это, по-видимому, соответствует концентрации собственных доноров в специально нелегированной активной области.

Поскольку энергия фотонов лазерного излучения близка к энергии максимума полосы межзонного спонтанного излучения, то можно сде-

лать вывод, что лазерный эффект достигается на межзонных переходах. Учитывая характер энергетической диаграммы, можно предположить, что более слабые длинноволновые полосы в спектре спонтанного излучения вызваны интерфейсной рекомбинацией на  $p-n$ -гетеропереходе II типа и на  $n-n$ -гетеропереходе. В соответствии с тем, что глубина потенциальных ям на  $p-n$ -переходе меньше, чем на  $n-n$ -переходе, можно предположить, что более коротковолновая и более интенсивная из рассматриваемых полос генерируется на  $p-n$ -переходе, а более длинноволновая — на  $n-n$ -переходе. При уменьшении толщины узкозонного слоя доля межзонной рекомбинации будет уменьшаться и можно получить когерентное излучение на интерфейсных переходах. В исследованных структурах с шириной узкозонного слоя  $1.7 \mu\text{m}$ , однако, преобладает межзонная рекомбинация. Высокое содержание Al в широкозонных слоях приводит к тому, что с повышением температуры разности коэффициентов преломления узкозонного и широкозонных слоев изменяется незначительно. Это позволило достигнуть рабочей температуры лазера при питании меандром 120 К, что находится на уровне лучших достижений для лазеров на диапазон  $3-4 \mu\text{m}$ . Дальнейшее повышение содержания Al должно еще увеличить рабочую температуру лазера.

Уменьшение интенсивности спонтанного излучения только в  $\sim 10$  раз с повышением температуры от 77 до 300 К при фиксированном токе позволит изготавливать из созданных структур также и высокоэффективные светодиоды.

Работа частично поддержана научной программой "Copernicus", грант № СІРА-СТ94-0158.

## Список литературы

- [1] Баранов А.Н., Данилова Т.Н., Ершов О.Г., Именков А.Н., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 22. С. 6–9.
- [2] Данилова Т.Н., Именков А.Н., Колчанова Н.М., Попов А.А., Яковлев Ю.П. // ФТП. 1996. Т. 30. В. 7. С. 1244–1250.
- [3] Данилова Т.Н., Евсеенко О.И., Именков А.Н., Колчанова Н.М., Степанов М.В., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П. // ФТП. 1997. Т. 31. В. 6.