

06.3:07

©1994

ЛАЗЕРЫ НА ОСНОВЕ InAsSbP ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 2.7–3.0 мкм ($T = 77 \text{ K}$)

*Т.Н.Данилова, О.Г.Ершов, А.Н.Именков,
И.Н.Тимченко, В.В.Шерстнев, Ю.П.Яковлев*

1. Гетеролазеры на основе полупроводников A^3B^5 работают в широком спектральном интервале от 0.5 до 3.9 мкм. Однако в этом диапазоне имеется сравнительно узкий спектральный участок от 2.5 до 3.0 мкм, где когерентное излучение не достигнуто.

Было сделано несколько безуспешных попыток проникнуть в этот узкий спектральный диапазон как с коротковолновой, так и с длинноволновой стороны.

Когерентное излучение, соответствующее коротковолновой границе этого диапазона ($\lambda = 2.50 \text{ мкм}$), было получено при комнатной температуре в гетероструктурах, изготовленных методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) на основе GaInAsSb/AlGaAsSb с активной областью предельного состава $\text{Ga}_{0.745}\text{In}_{0.255}\text{As}_{0.230}\text{Sb}_{0.770}$ [1]. Более длинноволновое излучение от упомянутой структуры авторам [1] не удалось достичь из-за приближения к границе несмешиваемости твердых растворов GaSb-InAs [2]. Другая попытка была предпринята авторами [3], где получено когерентное излучение с $\lambda = 2.52 \text{ мкм}$ в гетероструктурах на основе InGaAs/InAsSbP , но с более низкой рабочей температурой ($T_{\text{max}} = 190 \text{ K}$). Такие структуры выращивались методом газофазной эпитаксии на подложке InP и имели рассогласование в параметрах решетки около 2%. Продвижение в более длинноволновую область в данных структурах затруднено, вероятно, из-за возрастания рассогласования параметров решеток структуры и подложки.

Существенно большее количество попыток по получению когерентной генерации в диапазоне 2.5–3.0 мкм предпринято с длинноволновой стороны.

В работе [4] достигнута длинноволновая генерация ($\lambda = 3 \text{ мкм}$) с очень низкой пороговой плотностью тока ($J_{\text{th}} = 100\text{--}300 \text{ A/cm}^2$) при 77 K в гетеролазерах на основе твердых растворов InAsSbP/InGaAs , полученных методом ЖФЭ и несколько более длинноволновых ($\lambda = 3.2 \text{ мкм}$,

$T = 77$ К) в гетеролазерах на основе твердых растворов $\text{InAsSbP}/\text{InAsSb}$ [5,6].

Для продвижения в коротковолновую область с длинноволновой стороны ($\lambda = 3$ мкм, $T = 77$ К) авторы [7] использовали в активной и широкозонных областях один и тот же изопериодный с подложкой InAs твердый раствор InAsSbP , но разного состава. Более коротковолновая генерация ($\lambda = 2.55\text{--}2.7$ мкм) достигнута [8] на основе этих же растворов, но при температуре 55 К. Небольшое содержание фосфора в ограничительных областях (0.1 в [7] и 0.2 в [8]) не могло обеспечить удовлетворительного оптического и электрического ограничения, и в результате в таких лазерных структурах наблюдались большие пороговые токи и резкая температурная зависимость порогового тока.

Данная работа посвящена созданию низкопороговых инжекционных лазеров в диапазоне 2.7–3.0 мкм с высоким содержанием фосфора в ограничительных областях.

2. В качестве лазерной гетероструктуры использовалась структура с активной и широкозонными областями, изготовленными из одного и того же твердого раствора InAsSbP , но разного состава.

Для получения твердого раствора InAsSbP с максимально возможным содержанием фосфора изопериодного с подложкой InAs и были рассмотрены условия его получения методом ЖФЭ при использовании термодинамической модели жидкой и твердой фазы [9].

Существуют два независимых ограничения на получение твердого раствора в системе A^3B^5 [9]. Первое ограничение по спинодальному распаду при температуре эпитаксии, вытекающее из условий фазового равновесия твердое тело I–твердое тело II. Область неустойчивости относительно спинодального распада расширяется с падением температуры. Второе ограничение по условию молекулярности, вытекающее из условий фазового равновесия расплав–твердое тело. Область этого ограничения сужается с падением температуры.

На рис. 1 представлены ограничения на получение методом ЖФЭ твердых растворов $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_y\text{P}_x$. Вертикальные линии — область ограничения по спинодальному распаду, горизонтальные линии — область ограничения по условию молекулярности. Точка пересечения кривых, ограничивающих эти две области, является теоретически предельным значением содержания фосфора (~ 0.40) в четвертом растворе. Ей соответствует температура эпитаксии $T = \sim 820$ К. Практически нами был получен твердый раствор $\text{InAsSbP}_x/\text{InAs}$ с максимальным содержанием фосфора $x = 0.35$ при температуре эпитаксии $\sim 570^\circ\text{C}$. На его осно-

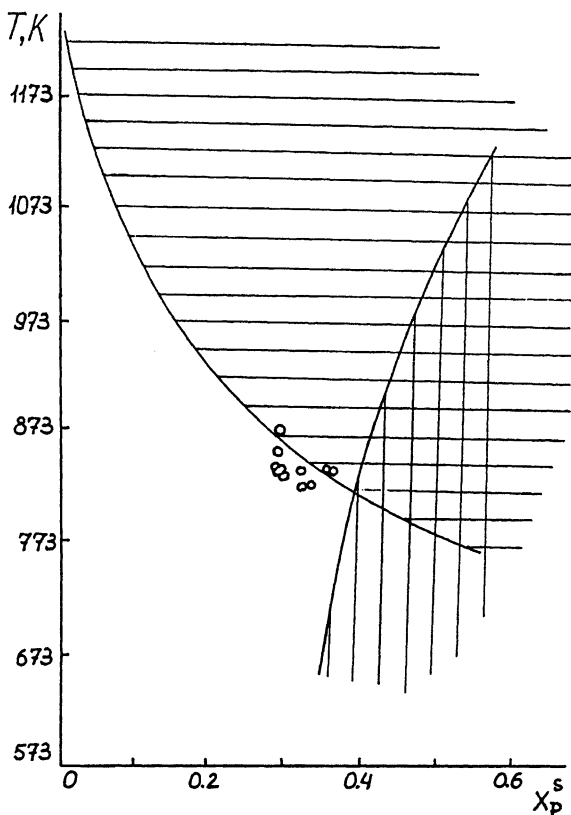


Рис. 1. Ограничение на получение методом ЖФЭ твердых растворов $\text{InAsSbP}/\text{InAs}$ в углу, прилегающем к фигуративной точке InAs : вертикальная штриховка — область ограничения по спинопальному распаду, горизонтальная штриховка — область ограничения по условию молекулярности.

○ — экспериментально полученные точки.

ве изготовлены широкозонные слои лазеров, излучающих с области 2.7–3.0 мкм. В узкозонной области x варьировался от 0.02 до 0.10.

Лазеры представляли собой двойную гетероструктуру (ДГС) с активным слоем n -типа, расположенным между ограничительными слоями n - и p -типа (рис. 2,а). Толщина активной области 0.5 мкм, толщина каждой из широкозонных областей ~ 3 мкм. Ширина запрещенной зоны (рис. 2,б) активной области варьировалась в интервале 0.42–0.47 эВ, а широкозонных областей составляла 0.602 эВ. Расчетная разность показателей преломления (рис. 2,в) активной области и ограничивающих областей составляла 0.04–0.07.

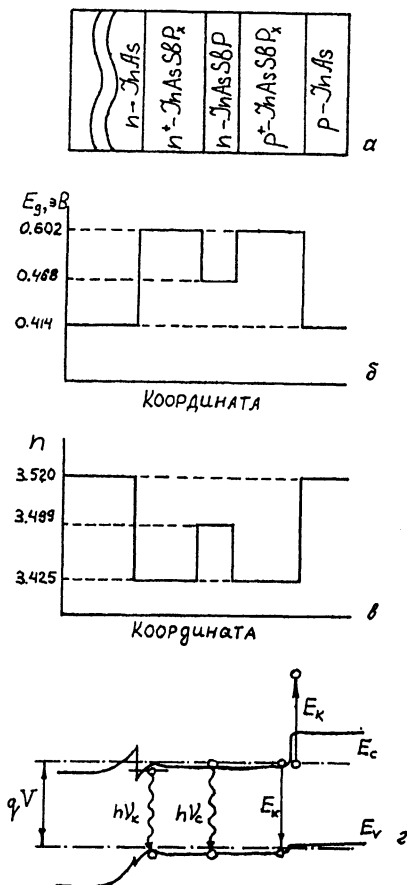


Рис. 2. Схема расположения слоев в лазерной структуре (а). Изменение ширины запрещенной зоны E_g (б) и показателя преломления n (в) по толщине структуры, $T = 77$ К. Энергетическая диаграмма структуры в лазерном режиме (г).

Энергетическая диаграмма лазерной структуры при прямом смещении представлена на рис. 2, г. Согласно расчетам, структура имеет на границах узкозонной и широкозонной областей гетеропереход II типа.

Из лазерной эпитаксиальной структуры методом фотолитографии были изготовлены мезаполосковые лазеры с шириной полоска 20–40 мкм и длиной резонатора 250–500 мкм. Спектральные измерения проводились при $T = 77$ К в импульсном режиме с длительностью импульса 200 нс и частотой следования 10^5 Гц.

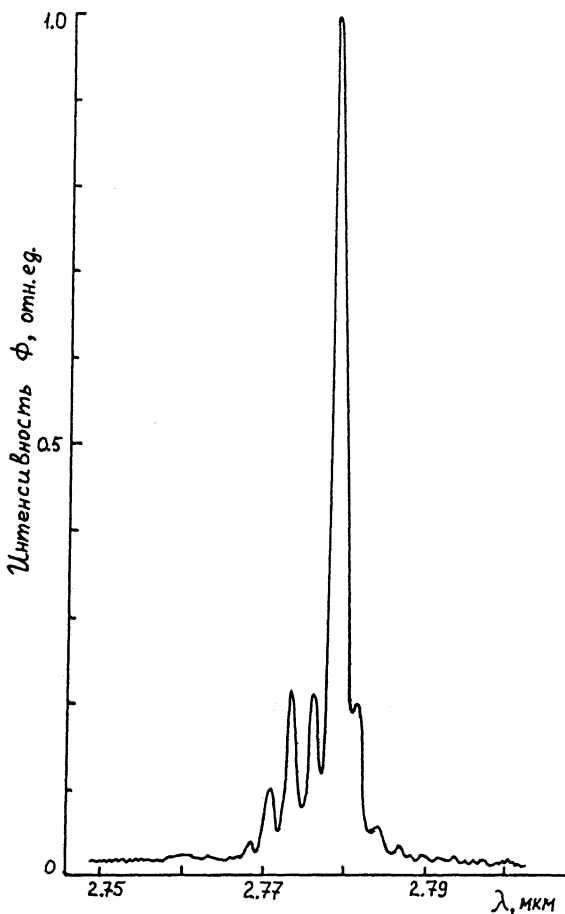


Рис. 3. Спектр излучения лазера V-1141 № 1 с шириной полоска 20 мкм и длиной резонатора 350 мкм, ток 0.56 А, $T = 77$ К.

3. Спектр когерентного излучения лазера при токе 560 мА ($I_{th} = 400$ мА) представлен на рис. 3. Спектр практически одномодовый.

В работе была исследована зависимость порогового тока I_{th} от состава твердого раствора. Длина волны лазерного излучения уменьшается с увеличением содержания фосфора в узкозонной области. Пороговая плотность тока уменьшается с увеличением длины волны, причем спектральный диапазон продлен на лазеры с активной областью InAsSb (рис. 4). В пределах разброса пороговых плотностей тока зависимость $I_{th}(\lambda)$ является практически линейной. При изменении длины волны от 2.77 до 3.20 мкм порого-

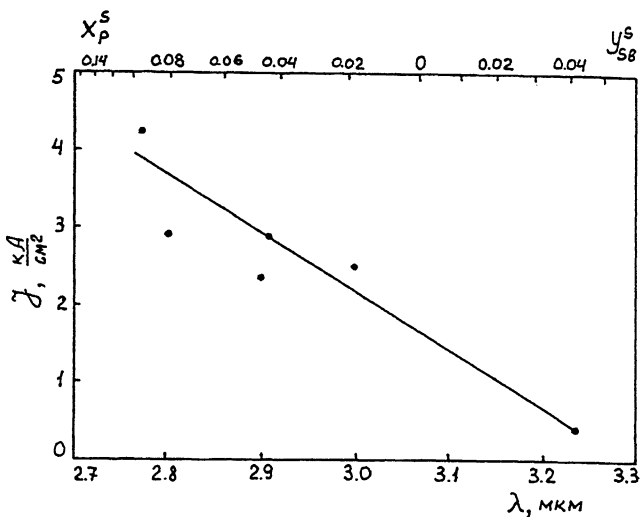


Рис. 4. Зависимость пороговой плотности тока J_{th} от длины волны λ , и соответствующее λ содержание фосфора X_p^s в активной области InAsSbP и содержание сурьмы Y_{Sb}^s в активной области InAsSb.

вая плотность тока уменьшается на порядок. На рис. 4 показано соответствующее длине волны содержание фосфора в активной области InAsSbP и содержание сурьмы в активной области InAsSb при одном и том же составе широкозонных областей.

4. Проанализируем полученные экспериментальные результаты.

Если сопоставить энергии кванта лазерного излучения $h\nu$ с E_g соответствующего состава, то $h\nu$ оказываются на 20 мэВ меньше E_g . Достаточно большая разница E_g и $h\nu$ говорит в пользу того, что когерентное излучение возникает не при межзонной рекомбинации в узкозонной области. Энергетическая диаграмма структуры (рис. 2,г) подобна энергетической диаграмме ДГС лазеров GaInAsSb/AlGaAsSb, исследованных нами в работе [10]. По аналогии можно сделать предположение, что у рассматриваемых в данной работе лазеров когерентное излучение $h\nu_k$ может происходить за счет переходов между двумерными состояниями для электронов и дырок в узкозонном слое вблизи n - n -границы.

Увеличение пороговой плотности тока почти на порядок с уменьшением длины волны лазерного излучения (рис. 4) объясняется тем, что с увеличением содержания фосфора и уменьшением содержания сурьмы увеличивается E_g узкозонной области и, тем самым, уменьшается энергетический

барьер, обеспечивающий электронное ограничение. Разность показателей преломления между узкозонной и широкозонными областями также уменьшается с увеличением содержания фосфора в узкозонной области, что ухудшает оптическое ограничение. Однако при достигнутом содержании фосфора в широкозонных областях InAsSbP электрическое и оптическое ограничения оказываются достаточными для создания лазеров в диапазоне длин волн 2.7–3.0 мкм, работающих при 77 К. Авторы выражают благодарность А.А.Рогачеву за помощь и поддержку работы.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований.

Список литературы

- [1] Баранов А.Н., Гребенщикова Е.А., Джуртанов Б.Е., Данилова Т.Н., Именков А.Н., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 20. С. 1839–1844.
- [2] Именков А.Н., Капранчик О.П., Литвак А.М., Попов А.А., Чарыков Н.А., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 24. С. 19–24.
- [3] Ramon V. Martinelli, Thomas J. Zamerowski. // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 56. N 2. P. 125–127.
- [4] Айдаралиев М., Зотова Н.В., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Стусь Н.М., Талалахин Г.Н. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 15. С. 49–52.
- [5] Mani H., Joullie A., Boissier G., Tournie E., Pitard F., Joullie A.-M., Alibert C. // Electronics Letters. 1988. V.24. N 25. P. 1542–1543.
- [6] 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. 6–10.
- [7] Kobayashi N., Horikoshi Y. // Jpn. J. Appl. Phys. 1990. V. 19. N 10. P. 4641–4644.
- [8] Akiba S., Matsushima Y., Iketani T., Usami M. // Electronics Letters. 1988. V. 24. N 17. P. 1069–1071.
- [9] Баранов А.Н., Джуртанов Б.Е., Литвак А.М., Чарыков Н.А., Чернякский А.Г., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П. // ЖНХ. 1990. Т. 35. № 12. С. 3008–3012.
- [10] Баранов А.Н., Белкин С.Ю., Данилова Т.Н., Ершов О.Г., Именков А.Н., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 17. С. 18–23.

Физико-технический институт
им.А.Ф.Иоффе
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
19 января 1994 г.