

InGaAs/GaAs/InGaP-лазеры с широким контактом, полученные методом МОС-гидридной эпитаксии

© Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, Д.Н. Николаев, А.Л. Станкевич, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, Н.В. Фетисова, И.Н. Арсентьев, И.С. Тарасов

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

(Получена 12 марта 2001 г. Принята к печати 2 апреля 2001 г.)

Разработана технология газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОС-гидридной эпитаксии) лазерных гетероструктур в системе твердых растворов InGaP/GaAs/InGaAs на модифицированной установке Epiquip VP-50-RP. Изготовлены меза-полосковые лазерные диоды с пороговыми плотностями тока $J_{th} = 100\text{--}200 \text{ А/см}^2$, внутренними оптическими потерями $\alpha_i = 1.3\text{--}1.7 \text{ см}^{-1}$ и внутренним квантовым выходом $\eta_i = 60\text{--}70\%$. Получена в непрерывном режиме генерации оптическая мощность излучения 5 Вт для лазерного диода с апертурой 100 мкм на длине волны излучения 1.03 мкм. Показано, что использование волноводных AlGaAs-слоев, увеличивающих глубину потенциальной ямы активной области для электронов, ослабляет температурную чувствительность лазерных гетероструктур в температурном диапазоне 10–80°C.

1. Введение

Тема мощных полупроводниковых лазеров актуальна в связи с широким спектром их применений. Накачка эрбиевых волоконных усилителей, твердотельных кристаллов и удвоителей частоты, лазерные прожекторы и технология обработки материалов — это не полный перечень применения мощных полупроводниковых излучателей.

Основные успехи в разработке мощных полупроводниковых излучателей достигнуты для лазерных диодов на основе системы твердых растворов GaAs/AlGaAs/InGaAs, излучающих на длине волны $\lambda = 0.98 \text{ мкм}$ [1–4]. Использование фосфорсодержащих соединений InGaAsP и InGaP при конструировании лазерных гетероструктур с отдельным ограничением расширяет возможности по подбору оптимальных составов не содержащих алюминий волноводных слоев и квантово-размерных активных областей [5].

В данной работе мы приводим результаты исследований эпитаксиальных слоев, фотолюминесцентных структур и лазерных диодов с широким полосковым контактом, полученных на базе системы твердых растворов InGaP/GaAs/InGaAs методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОС-гидридной эпитаксии).

2. Экспериментальная установка

Для изготовления структур использовалась модернизированная установка газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений Epiquip VP-50-RP с горизонтальным реактором и высокочастотным нагревом подложкодержателя. В установке штатная система прецизионной подачи газов была заменена на разработанную фирмой SIGM⁺. Эпитаксиальное осаждение слоев и гетероструктур производилось при пониженном давлении в реакторе 100 мбар и температурах роста $T_g = 600$,

700 и 750°C. В качестве источников химических элементов использовались TMGa (триметилгаллий), TMIIn (триметилиндий), AsH₃ (арсин) — 20% в водороде и PH₃ (фосфин) — 30% в водороде. Газом — носителем являлся водород.

3. Экспериментальные образцы эпитаксиальных слоев и гетероструктур

Электрические и люминесцентные свойства лазерных структур на основе твердых растворов InGaP/GaAs/InGaAs с активной областью из напряженного твердого раствора InGaAs во многом определяются морфологией и кристаллографическим совершенством широкозонного слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$. В нашем эксперименте рассогласование параметра решетки эмиттерного слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ и подложки GaAs не превышало $\Delta a/a = \pm 2 \cdot 10^{-4}$. Энергия максимума и полуширина линии фотолюминесценции эмиттерного слоя составляли $h\nu \approx 1.88 \text{ эВ}$ ($\lambda \approx 0.66 \text{ мкм}$) и $\Delta h\nu \approx 40 \text{ мэВ}$ при комнатной температуре. Рост структур проводился при температурах $T_g = 600$, 700 и 750°C. При этом отношение величины x , характеризующей состав твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$, к величине $x_v = [\text{In}]/\{[\text{In}] + [\text{Ga}]\}$, характеризующей состав газовой фазы, составляло $x/x_v = 0.73$ при температуре 600°C и слабо уменьшалось с увеличением температуры роста ($[\text{In}], [\text{Ga}]$ — молярные концентрации индия и галлия в газовой фазе). Эпитаксиальные слои, выращенные при $T_g = 600^\circ\text{C}$, имели большое количество дефектов (рис. 1, а). Они не влияли на фотолюминесцентные и электрические свойства эпитаксиальных слоев и гетероструктур, однако приводили к резкому увеличению внутренних оптических потерь в лазерных диодах. При увеличении температуры роста до 700°C плотность дефектов уменьшалась, и при $T_g = 750^\circ\text{C}$ дефекты в выращиваемых слоях не наблюдались

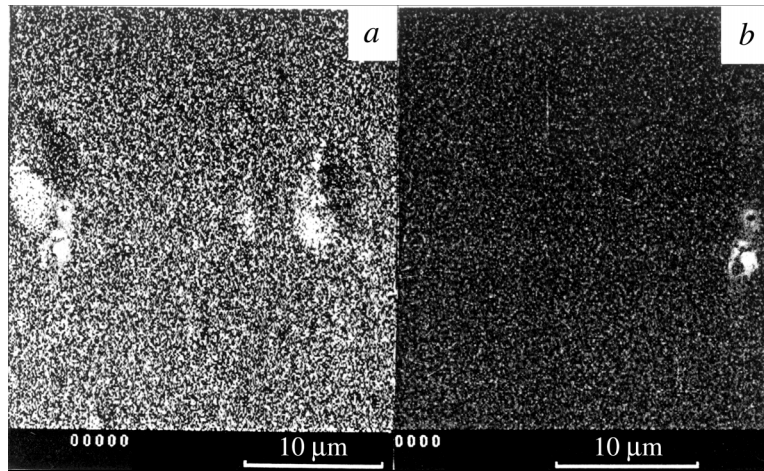


Рис. 1. Фотографии поверхности эпитаксиальных слоев $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$, выращенных при 600 (a) и 750°C (b).

(рис. 1, b). Возникновение дефектов, по нашему мнению, связано с низкой концентрацией фосфора в газовой фазе из-за малой скорости пиролиза PH_3 при низкой температуре во время эпитаксии (расчетное значение отношения компонентов $\text{V}^{\text{V}}/\text{A}^{\text{III}} \approx 200$). Повышение температуры роста приводило к увеличению скорости термического распада PH_3 и, соответственно, к уменьшению количества дефектов.

Для исследований изготавливались изотипные и анизотипные гетероструктуры раздельного ограничения. В качестве волноводных слоев в структуре были использованы эпитаксиальные слои GaAs толщиной 0.20–0.25 мкм. Активная область лазерной гетероструктуры состояла из одной напряженной квантовой ямы $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ толщиной 70–160 Å с составами твердого раствора, соответствующими $x = 10$ –25%. В изотипной гетероструктуре верхний широкозонный эмиттер $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ был толщиной 0.3–0.5 мкм. Энергетическая зонная диаграмма анизотипных гетероструктур раздельного ограничения при-

ведена на рис. 2. В качестве акцепторной легирующей примеси использовался Mg, а в качестве донорной — Si.

Расчетный уровень легирования широкозонных эмиттеров и волноводных слоев показан на диаграмме.

4. Экспериментальные исследования фотолюминесцентных структур

На рис. 3 приведены экспериментальные и расчетные зависимости энергии максимума полосы фотолюминесценции ($h\nu_m$) гетероструктур раздельного ограничения от состава твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ напряженных квантовых ям толщиной $d_w = 90$ и 115 Å. Во всем диапазоне изменения составов твердого раствора ($x = 10$ –25%) внутренний квантовый выход фотолюминесценции был близок к 100%.

Энергия максимума полосы фотолюминесценции возрастала с уменьшением молярной концентрации индия в газовой фазе. Вычисление энергии квантовых уровней проводилось в предположении прямоугольных напряженных квантовых ям в рамках модели [6], использующей гамильтониан Латтинжера–Кона. Константы деформационного потенциала для твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ рассчитывались линейной интерполяцией значений этих констант для GaAs и InAs [7]. Нами рассматривались пять наборов констант a^c , a^v и b (a^c , a^v — константы гидростатического потенциала для зоны проводимости и валентной зоны; b — константа сдвигового потенциала). Наилучшее согласие расчетных зависимостей с экспериментом (рис. 3 и 4) наблюдается для следующих значений констант: GaAs — $a^c = -7.17$ эВ, $a^v = -1.16$ эВ и $b = -2.79$ эВ; InAs — $a^c = -5.08$ эВ, $a^v = -1$ эВ и $b = -2.33$ эВ.

На рис. 4 приведены экспериментальные зависимости энергии максимума полосы фотолюминесценции от толщины квантовой ямы $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ для двух составов твердых растворов: $x = 0.19$ и 0.24. Линиями показаны расчетные значения энергии уровней квантовой ямы от

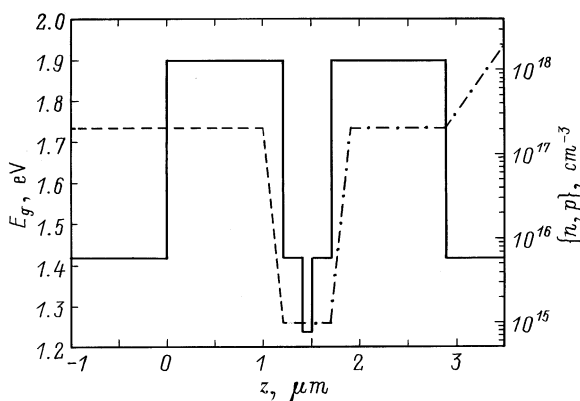


Рис. 2. Схематическая зонная диаграмма гетероструктур раздельного ограничения InGaP/GaAs/InGaAs (сплошная линия), расчетные профили легирования для донорной примеси Si (штриховая) и акцепторной примеси Mg (штрихпунктирная). z — координата в направлении роста структуры.

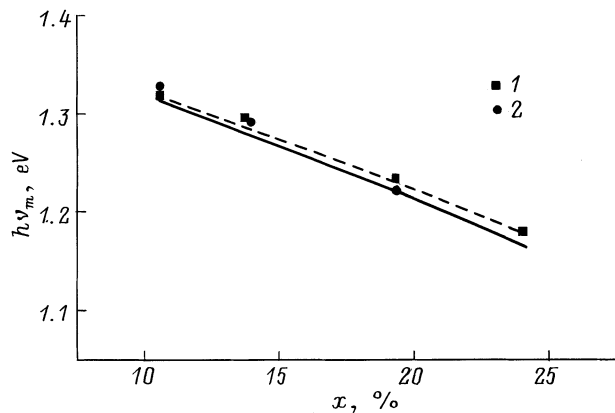


Рис. 3. Экспериментальные зависимости энергии максимума полосы фотолуминесценции $h\nu_m$ (точки) и расчетные зависимости положения уровней в напряженной квантовой яме твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (кривые) от x для толщин 90 (1, штриховая линия) и 115 Å (2, сплошная линия).

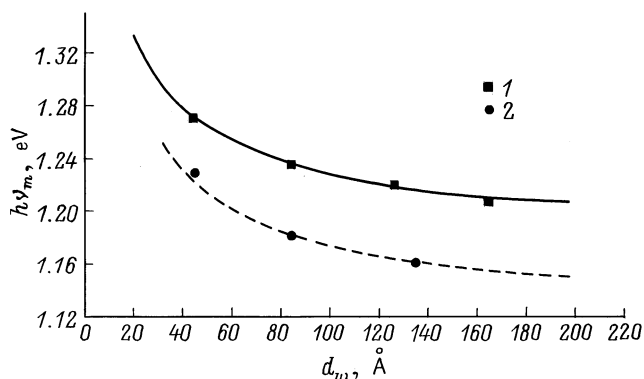


Рис. 4. Экспериментальные зависимости энергии максимума полосы фотолуминесценции $h\nu_m$ (точки) и расчетные зависимости положения уровней в напряженной квантовой яме твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (кривые) от толщины для составов с $x = 0.19$ (1, сплошная линия) и $x = 0.24$ (2, штриховая линия).

ее толщины для этих же составов твердого раствора ($x = 0.19$ и 0.24) с учетом напряжений. Совпадение экспериментальных и расчетных зависимостей, по нашему мнению, свидетельствуют о том, что форма квантовой ямы $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ близка к прямоугольной.

Наличие двух экспериментальных зависимостей позволяет варьировать положение квантовых уровней в потенциальной яме напряженной активной области гетероструктуры, подбирая два параметра: толщину эпитаксиального слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и его состав (x).

5. Экспериментальные образцы лазерных диодов

Из лазерных гетероструктур раздельного ограничения $\text{InGaP}/\text{GaAs}/\text{InGaAs}$ изготавливались по стандартной технологии лазерные диоды с длиной волны излучения

$\lambda = 1.03$ мкм и шириной полоска $w = 100$ мкм [3,4]. Диоды монтировались полосковым контактом вниз на медный теплоотвод. На торцы резонатора Фабри–Перо наносились отражающие и просветляющие диэлектрические покрытия [3,4]. Исследовались ватт-амперные и вольт-амперные характеристики лазерных диодов в диапазоне температур $T = 10\text{--}80^\circ\text{C}$ при постоянной температуре теплоотвода. В таблице приведены характерные параметры исследуемых лазерных диодов, изготовленных из структур, полученных при разных температурах роста. Во всех лазерных гетероструктурах пороговые плотности тока в зависимости от длины лазерных диодов составляли величину $J_{\text{th}} = 100\text{--}250$ А/см² и не зависели от температуры эпитаксиального роста. Величина внутренних оптических потерь составляла $\alpha_i = 1.3\text{--}4.3$ см⁻¹ и была выше в лазерных диодах на основе гетероструктур, изготовленных при температуре $T_g = 600^\circ\text{C}$. В лазерных диодах, полученных из этих же структур, наблюдался более низкий порог оптической деградации [8] (таблица) по сравнению с лазерными диодами из структур, изготовленных при $T_g = 700^\circ\text{C}$. По нашему мнению, это коррелирует со снижением плотности дефектов в слое InGaP при увеличении температуры эпитаксиального роста до 700°C . Величина внутреннего квантового выхода в лазерных диодах, изготовленных из всех гетероструктур, была 60–70%, что ниже лучших опубликованных результатов [1–4]. Дифференциальная квантовая эффективность не превышала 65% в лазерных диодах с длиной резонатора 1–2 мм. Поэтому в серии лазерных гетероструктур была достигнута максимальная мощность оптического излучения 5 Вт в непрерывном режиме генерации лазера с шириной меза-полоска 100 мкм.

Другой причиной снижения максимальной мощности оптического излучения в исследуемых лазерных диодах является сильная температурная чувствительность пороговой плотности тока и дифференциальной квантовой эффективности. Применение в качестве волноводных слоев GaAs имеет преимущества технологического плана, позволяющие избежать сложности подбора режимов переключения газовых потоков в процессе эпитаксии. Однако это ограничивает глубину потенциальной квантовой ямы для электронов и для дырок. Даже использование в качестве активной области эпитаксиального слоя напряженного твердого раствора InGaAs с длиной волны излучения $\lambda = 1.03$ мкм не сильно увеличивает глубину квантовой ямы для электронов — до ~ 75 мэВ. В исследуемых образцах лазерных диодов температурные зависимости пороговой плотности тока имеют вид, приведенный на рис. 5 (кривые 1–3). Температурная чувствительность пороговой плотности тока традиционно характеризуется параметром T_0 , входящим в эмпирическую зависимость $J_{\text{th}} = J_0 \exp(T/T_0)$. Однако даже в диапазоне температур $T = 10\text{--}80^\circ\text{C}$ зависимость порогового тока от температуры в полулогарифмическом масштабе сильно отличается от линейной, хотя и может быть аппроксимирована прямой для определения T_0 . Температурная чувствительность пороговой плотности

Параметры лазерных диодов

Номер структуры (температура роста)	Пороговая плотность тока J_{th} , А/см ² ($L = 1.5-2$ мм)	Дифференциальная квантовая эффективность η_d %, ($L = 1.5-2$ мм)	Внутренний квантовый выход η_i %	Внутренние оптические потери α_i , см ⁻¹
X-2570 (600°C)	110	53	65-70	3.2-4.3
X-2578 (700°C)	120	56	60-65	1.4-1.7
X-2582 (700°C)	130	53	60-65	1.3-1.8
X-2611 (700°C)	140	65	65-70	1.3-1.7

Примечание. L — длина резонатора.

тока зависит от длины лазерных диодов и возрастает с уменьшением длины резонатора. Это связано с возрастанием концентрации носителей в активной области лазерных диодов при уменьшении длины резонатора [9].

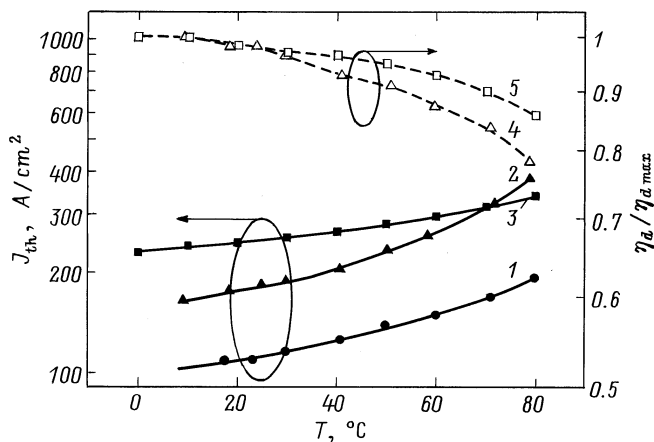


Рис. 5. Зависимости пороговой плотности тока J_{th} (1-3) и нормированной на максимальное значение дифференциальной квантовой эффективности $\eta_d/\eta_{d,max}$ (4, 5) от температуры T для лазерных диодов с различной длиной резонатора L и различной шириной запрещенной зоны волноводных слоев E_{gw} : 1, 4 — $L = 1600$ мкм, $E_{gw} = 1.42$ эВ; 2 — $L = 600$ мкм, $E_{gw} = 1.42$ эВ; 3, 5 — $L = 1300$ мкм, $E_{gw} = 1.7$ эВ.

На рис. 6 приведены зависимости от длины резонатора лазерного диода пороговой плотности тока при температуре теплоотвода 20°C и характеристического параметра T_0 . Видна хорошая корреляция в зависимостях пороговой плотности тока и T_0 . На основании этого мы сделали вывод, что в мелкой квантовой яме при увеличении температуры в коротких лазерных диодах включается дополнительный механизм возрастания порогового тока, возможно, определяемый выбросом электронов из активной области в волноводные слои.

Однако более существенным является снижение дифференциальной квантовой эффективности при увеличении температуры (рис. 5, кривая 4). В работе [10] мы показали, что активная область лазерного диода перегре-

вается относительно медного теплоотвода на 40-60°C в непрерывном режиме генерации. Если увеличение порогового тока не сильно влияет на достижение максимальной оптической мощности, то снижение дифференциальной квантовой эффективности может приводить к срыву генерации лазерного излучения [10].

Также нами проводились исследования лазерных диодов на основе гетероструктур раздельного ограничения в системе твердых растворов GaAs/AlGaAs/InGaAs. Глубина потенциальной ямы для электронов в этих структурах достигала ~ 200 мэВ за счет использования волноводного слоя из твердого раствора AlGaAs с большей шириной запрещенной зоны, $E_{gw} = 1.6-1.7$ эВ. В лазерных диодах с потенциальной ямой для электронов 200 мэВ наблюдалась температурная зависимость пороговой плотности тока с высокой степенью линейности в полулогарифмическом масштабе в температурном интервале 10-80°C (рис. 5, кривая 3). Величина характеристического параметра T_0 возрастала до 200-230°C. Вместе с тем снижалась температурная чувствительность дифференциальной квантовой эффективности (рис. 5, кривая 5).

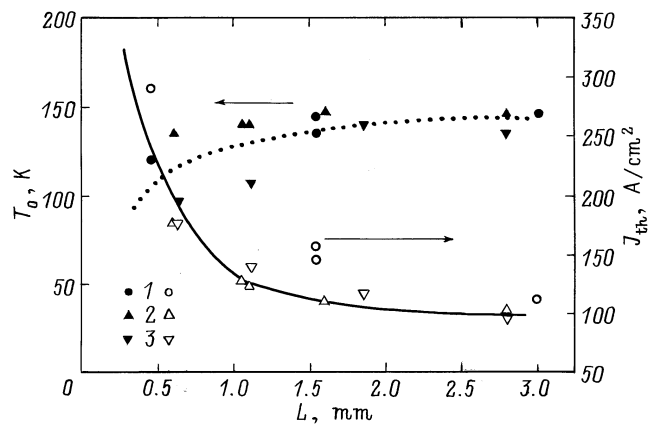


Рис. 6. Зависимости характеристической температуры T_0 и пороговой плотности тока J_{th} при $T = 20^\circ\text{C}$ от длины резонатора L в лазерных диодах из структур X-2570 (1), X-2578 (2), X-2582 (3).

Температурные зависимости пороговой плотности тока и дифференциальной квантовой эффективности являются чрезвычайно важными параметрами при разработке мощных полупроводниковых лазеров в связи с тем, что активная область лазерного диода разогревается на несколько десятков градусов при пропускании непрерывного рабочего тока [10]. Поэтому борьба за снижение температурной чувствительности лазерных гетероструктур для мощных полупроводниковых лазеров является актуальной задачей, которую можно решать путем увеличения глубины потенциальной ямы для носителей заряда.

6. Заключение

В результате проведенной работы были получены следующие результаты.

Разработана технология МОС-гидридной эпитаксии лазерных гетероструктур в системе твердых растворов InGaP/GaAs/InGaAs на модифицированной установке Epiquip VP-50-RP.

Изготовлены меза-полосковые лазерные диоды и исследованы ватт-амперные и вольт-амперные характеристики в диапазоне температур 10–80°C. Достигнуты пороговые плотности тока $J_{th} \approx 100 \text{ А/см}^2$, внутренние оптические потери составляют $\alpha_i = 1.3\text{--}1.7 \text{ см}^{-1}$, внутренний квантовый выход $\eta_i = 60\text{--}70\%$.

Получена в непрерывном режиме генерации оптическая мощность излучения 5 Вт для лазерного диода с апертурой 100 мкм на длине волны излучения $\lambda = 1.03 \text{ мкм}$.

Показано, что использование волноводных AlGaAs-слоев, увеличивающих глубину потенциальной ямы активной области для электронов до $> 200 \text{ мэВ}$, ослабляет температурную чувствительность лазерных гетероструктур.

В заключение авторы выражают признательность И.Д. Залевскому и А.А. Мармалюку за предоставленные для температурных исследований лазерные гетероструктуры в системе твердых растворов GaAs/AlGaAs/InGaAs, Т.Н. Дрокину, Е.И. Кухареву, Т.А. Налет, Е.А. Третьякову благодарят за помощь в изготовлении и подготовке образцов лазерных диодов и Д.А. Лившица за плодотворное обсуждение результатов.

Список литературы

- [1] A.Al-Muhanna, L.J. Mawst, D. Botez, D.Z. Garbuzov, R.U. Martinelli, J.C. Connolly. *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 2402 (1993).
- [2] X. He, S. Srinivasan, S. Wilson, C. Mitchell, R. Patel. *Electron. Lett.*, **34**, 2126 (1998).
- [3] D.A. Livshits, I.V. Kochnev, V.M. Lantratov, N.N. Ledentsov, T.A. Nalyot, I.S. Tarasov, Zh.I. Alferov. *Electron. Lett.*, **36**, 1848 (2000).
- [4] Д.А. Лившиц, А.Ю. Егоров, И.В. Кочнев, В.А. Капитонов, В.М. Лантратов, Н.Н. Леденцов, Т.А. Налет, И.С. Тарасов. *ФТП*, **35** (3), 380 (2001).
- [5] J.K. Wade, L.J. Mawst, D. Botez, J.A. Morris. *Electron. Lett.*, **34**, 1100 (1998).
- [6] S.L. Chuang. *Phys. Rev. B*, **43**, 9649 (1991).
- [7] S. Adachi. *Physical Properties of 3–5 Semiconductor Compounds* (John Wiley & Sons Inc., 1992).
- [8] K.H. Park, J.K. Lee, D.H. Jang, H.S. Cho, C.S. Park, K.E. Pyun, J.Y. Jeong, S. Nahm, J. Jeong. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 2567 (1998).
- [9] В.П. Евтихийев, Д.З. Гарбузов, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов, В.Б. Халфин, В.П. Чальый, А.В. Чудинов. *ФТП*, **19** (8), 1420 (1985).
- [10] Е.Г. Голикова, В.А. Курешов, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, Ю.А. Рябоштан, Г.А. Скрынников, И.С. Тарасов, Ж.И. Алфёров. *ФТП*, **34** (7), 886 (2000).

Редактор Л.В. Шаронова

MOCVD-grown InGaAs/GaAs/InGaP broad area laser diodes

D.A. Vinokurov, V.A. Kapitonov, D.N. Nikolaev, A.L. Stankevich, A.V. Lyutetskiy, N.A. Pikhtin, S.O. Slipchenko, Z.N. Sokolova, N.V. Fetisova, I.N. Arsent'ev, I.S. Tarasov

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

Abstract Metal-organic chemical vapour deposition (MOCVD) technology on a modified Epiquip VP-50-RP installation has been developed for growth of InGaAs/GaAs/InGaP laser heterostructures. Mesa stripe laser diodes with threshold current densities $J_{th} = 100\text{--}200 \text{ А/см}^2$, internal optical losses $\alpha_i = 1.3\text{--}1.7 \text{ см}^{-1}$ and internal quantum efficiencies $\eta_i = 60\text{--}70\%$ have been fabricated. 5 W continuous wave optical output power has been obtained for a single 100- μm -wide aperture mesa stripe laser diode emitting at 1.03 μm wavelength. It has been shown, that the use of AlGaAs-waveguide layers, which increase the conduction band barrier offset, decreases the temperature sensitivity of laser heterostructures within 10–80°C temperature range.