

# Лазеры на основе двойных гетероструктур InGaAsSb(Gd)/InAsSbP ( $\lambda = 3.0\text{--}3.3$ мкм) для диодно-лазерной спектроскопии

© М. Айдаралиев<sup>¶</sup>, Т. Вейер\*, Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев,  
М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин

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

\* Fraunhofer Institute of Physical Measurement Techniques,  
79110 Freiburg, Germany

(Получена 27 января 2000 г. Принята к печати 27 января 2000 г.)

Приведены данные о пороговых токах, дифференциальной квантовой эффективности, спектральном составе, токовой перестройке и мощности излучения диодных мезаполосковых лазеров на основе двойных гетероструктур InGaAsSb(Gd)/InAsSbP на диапазон длин волн  $\lambda = 3.0\text{--}3.3$  мкм с длиной резонатора 70–150 мкм в интервале температур 50–107 К. Получены значения пороговых токов  $I_{th} < 10$  мА, выходной мощности 0.5 мВт с грани и 0.43 мВт в одну спектральную моду при 77 К в непрерывном режиме генерации. Лазеры работали в одномодовом режиме до значений токов  $I \leq 6I_{th}$ , при соотношении интенсивностей основной и неосновной мод до 650:1, скорости и диапазоне токовой перестройки до  $210 \text{ см}^{-1}/\text{А}$  и  $10 \text{ см}^{-1}$  соответственно. Приведен пример детектирования линии метана  $3028.75 \text{ см}^{-1}$ .

## 1. Введение

В диапазоне длин волн  $\lambda = 3\text{--}4$  мкм лежат наиболее сильные полосы поглощения метана  $\text{CH}_4$ , формальдегида  $\text{H}_2\text{CO}$  и других углеводородов, интенсивности которых на 1–2 порядка превосходят интенсивности обертонов в ближней инфракрасной области спектра, где обычно детектируются газы. Поэтому применение перестраиваемых лазеров в диапазоне  $\lambda = 3.0\text{--}3.3$  мкм значительно расширяет возможности диодно-лазерной спектроскопии высокого разрешения и газового анализа. В последние годы активно исследуются диодные лазеры на основе двойных гетероструктур (ДГС) из твердых растворов соединений III–V и, в частности, твердых растворов на основе арсенида индия [1–4]. Однако работ, посвященных одномодовым лазерам, крайне мало. Лазеры мезаполосковой конструкции на основе таких структур имели пороговые токи  $I_{th} \approx 100$  мА при температуре  $T = 77$  К [5] и работали в квази-одномодовом режиме в интервале токов до 2-х пороговых значений [6], что не удовлетворяет требованиям большинства практических задач.

В работе [7] было показано, что в зависимости от состава активной области и ограничивающих слоев диодных лазеров на основе ДГС InGaAsSb/InAsSbP ( $\lambda = 3.0\text{--}3.6$  мкм) могут быть реализованы гетеропереходы I или II типа. Тип гетероперехода определяет различие в механизмах излучательной рекомбинации, температурных зависимостях энергии и типа поляризации излучения. Было показано также [8], что основным механизмом внутренних потерь является внутризонное поглощение (ВП) дырками с переходом их в спин-орби-

тально отщепленную зону, что приводит к ряду особенностей, в том числе, к токовой перестройке лазерной моды в коротковолновую область [9].

В этой работе, являющейся продолжением начатых ранее исследований [7–9], изучены спектральные характеристики лазеров на основе ДГС InGaAsSb/InAsSbP ( $\lambda = 3.0\text{--}3.3$  мкм) с активной областью InGaAsSb, выращенной из расплава с оптимальным содержанием гадолиния, и приведен пример использования одномодовых лазеров на основе InGaAsSb(Gd) в газовом анализе.

## 2. Изучаемые объекты и методики исследования

Двойные гетероструктуры выращивались методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) и состояли из нелегированной подложки  $n\text{-InAs}$  (111)А (концентрация электронов  $n = (1\text{--}2) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) и трех эпитаксиальных слоев: прилегающего к подложке широкозонного ограничивающего слоя  $n\text{-InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y$  ( $0.05 \leq x \leq 0.09$ ,  $0.09 \leq y \leq 0.18$ ), активной области лазера  $n\text{-In}_{1-v}\text{Ga}_v\text{As}_{1-w}\text{Sb}_w$  ( $v \leq 0.07$ ,  $w \leq 0.07$ ) и широкозонного эмиттера  $p\text{-(Zn)-InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y$  ( $0.05 \leq x \leq 0.09$ ,  $0.09 \leq y \leq 0.18$ ). При выращивании активной области использовался расплав, содержащий гадолиний в количестве  $X_{\text{Gd}} = 0.004\text{--}0.005 \text{ ат}\%$ , что, согласно [10], приводит к наименьшему содержанию остаточных примесей в твердом растворе  $n\text{-In}_{1-v}\text{Ga}_v\text{As}_{1-w}\text{Sb}_w$  ( $n = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) и максимальной подвижности носителей. При этом, так же как и в работах [10,11], наблюдается увеличение интенсивности фотoluminesценции до 10 раз по сравнению со слоями, выращенными без использования Gd. Улучшение параметров слоев и снижение пороговых токов [6], связанное с использованием Gd в качестве легирующей добавки,

<sup>¶</sup> Факс: 7(812)247 43 24  
E-mail: bmat@iropt3.ioffe.rssi.ru

обусловлено геттерирующим действием редкоземельных элементов, а именно, взаимодействием Gd с посторонними примесями, находящимися в расплаве (главным образом с Si, C, O), и формированием плохо растворимых соединений. Следствием этого является снижение концентрации дефектов (безызлучательных центров) и уменьшение свободных носителей в кристаллизующейся твердой фазе. Последнее также приводит к увеличению квантового выхода из-за уменьшения скорости оже-рекомбинации.

Толщины широкозонных слоев составляли 3–5 мкм, активной области — 1 мкм; подложка, исходно имевшая толщину 350 мкм, утоньшалась до толщины ~ 100 мкм. Лазеры имели глубокую мезаполосковую конструкцию с шириной полоска  $w = 20$  мкм и длиной резонатора  $L = 70$ –150 мкм. Структуры раскалывались на чипы размерами  $(70$ –150) × (150–300) мкм<sup>2</sup>, которые припаивались  $p$ -слоем на медный теплоотвод.

Измерения фотолюминесценции (ФЛ) при  $T = 77$  К проводились в импульсном режиме по схеме синхронного детектирования. Для возбуждения ФЛ использовался диодный лазер из GaAs (ЛПИИ-14, длина волны излучения  $\lambda = 0.8$  мкм, мощностью  $P \sim 50$  Вт, длительность импульса  $\tau = 5$  мкс, частота  $f = 500$  Гц), излучение которого направлялось на широкозонный эмиттер  $P$ -InAsSbP. Регистрация сигнала происходила в геометрии "на отражение". ФЛ анализировалась с использованием спектрометра ИКС-21.

Измерения электролюминесценции (ЭЛ) проводились в непрерывном режиме ( $cw$ ) при температурах  $T = 30$ –110 К с разрешением  $\leq 0.75$  см<sup>-1</sup>; мощность излучения определялась с помощью калиброванного пирозлектрического фотоприемника. При этом излучение собиралось в телесном угле  $\pi/6$  стер. Для измерения спектров пропускания излучение лазера направлялось через газовую кювету с длиной оптического пути 10 см, наполненную смесью метана и азота с концентрацией метана 1% при следующих давлениях: 1000 (атмосферном), 200, 150, 100, 50, 20, 10 ГПа. Скорость токовой перестройки в области линейного увеличения тока накачки измерялась эталоном Фабри–Перо (Ge), при этом на лазер подавались импульсы тока пилообразной формы ( $\tau = 150$  мкс,  $f = 500$  Гц).

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

#### 3.1. Пороговый ток, дифференциальная квантовая эффективность и выходная мощность

На рис. 1 и 2 представлены ватт-амперные характеристики, температурные зависимости порогового тока и дифференциальной квантовой эффективности лазера на длину волны  $\lambda = 3.2$  мкм с длиной резонатора  $L = 140$  мкм. Максимальное значение мощности состави-

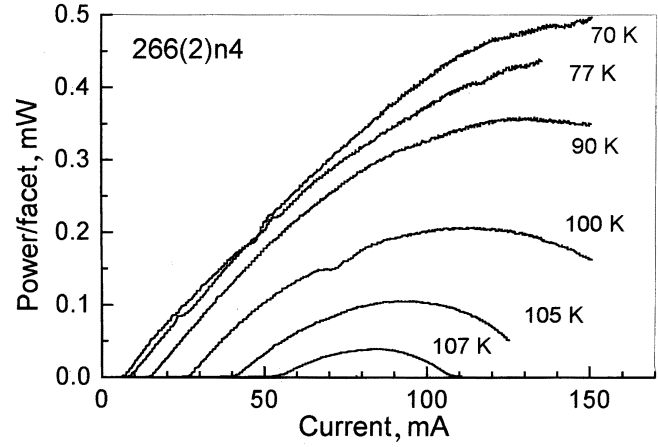


Рис. 1. Ватт-амперные характеристики ( $cw$ ) лазера с длиной волны излучения  $\lambda = 3.2$  мкм,  $L = 140$  мкм при  $T = 100$  К.

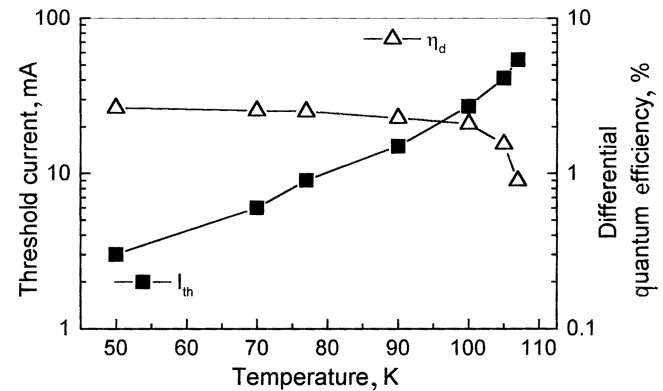


Рис. 2. Температурные зависимости порогового тока и дифференциальной квантовой эффективности лазера с длиной волны излучения  $\lambda = 3.2$  мкм,  $L = 140$  мкм.

ло 0.5 мВт с одной грани в непрерывном режиме при сборе излучения в телесном угле  $\pi/6$  стер, максимальное значение мощности в одну спектральную моду составило 0.42 мВт. Увеличение мощности происходило вплоть до значений тока  $> 30I_{th}$ , при этом значения суммарной мощности с двух граней (1 мВт) в 2 раза превосходят значения, полученные в аналогичных лазерах, не оптимально легированных Gd [10].

Пороговый ток составил  $I_{th} = 9$  мА (плотность тока 320 А/см<sup>2</sup>) при 77 К ( $cw$ ), что в 1.5 раза меньше опубликованных ранее данных для лазера с той же длиной резонатора [8] и меньше известных нам значений порогового тока для лазеров на основе ДГС, излучающих в этой области спектра. Аппроксимация экспериментальной зависимости плотности порогового тока позволяет ожидать значений плотности пороговых токов  $\sim 50$  А/см<sup>2</sup> для лазеров с длиной резонатора  $\sim 1$  мм, что сравнимо с лучшими данными для лазеров на основе квантовых ям [12].

Температурная зависимость порогового тока при аппроксимации функцией  $\exp(T/T_0)$  характеризуется величиной  $T_0 \approx 20$  К, характерной для оже-процессов. Значение дифференциальной квантовой эффективности  $\eta_d$  составило  $> 2\%$  (10 мВт/А) при 77 К. В интервале температур  $T < 105$  К уменьшение  $\eta_d$  связано с уменьшением внутреннего квантового выхода из-за увеличения скорости оже-рекомбинации. При  $T > 105$  К внутризонное поглощение приводит к резкому уменьшению  $\eta_d$  и срыву лазерной генерации [8].

### 3.2. Спектры излучения и токовая перестройка

Как правило, лазеры с короткими резонаторами,  $L = 70\text{--}150$  мкм, работали в одномодовом режиме при токах  $I \leq 6I_{\text{th}}$ . При токах  $I = (3\text{--}6)I_{\text{th}}$  соотношение интенсивностей основной и наиболее сильной неосновной мод составляло не менее 100 : 1 и определялось шумами регистрирующей схемы. На рис. 3 приводится модовый состав излучения лазера при  $T = 100$  К. При токе 150 мА соотношение интенсивностей основной и неосновной мод составило 650 : 1. Столь высокая стабильность одномодовой генерации может быть связана с нелинейностями при спектральном выжигании дырок или модуляции инверсной населенности из-за биений полей основной и неосновной мод [13]. Эти эффекты приводят к подавлению усиления на частотах, отличающихся на несколько межмодовых интервалов от частоты излучения, и объясняют ситуацию, представленную на рис. 3, когда при  $I > 50$  мА генерация возникает на частоте, отстоящей от первоначальной на три межмодовых интервала.

Токовая перестройка лазерной моды обусловлена увеличением концентрации носителей заряда за порогом генерации, которое приводит к уменьшению показателя преломления активной области и сдвигу мод в коротковолновую сторону [9]. Этот процесс связан с внутризонным поглощением в валентной зоне, которое приводит к росту внутренних потерь за порогом генерации и увеличению концентрации носителей, необходимой для выполнения порогового условия. Достоинствами вышеописан-

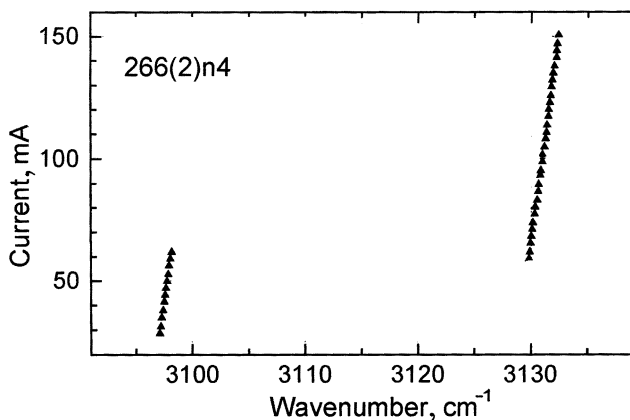


Рис. 3. Модовая характеристика лазера при  $T = 100$  К.

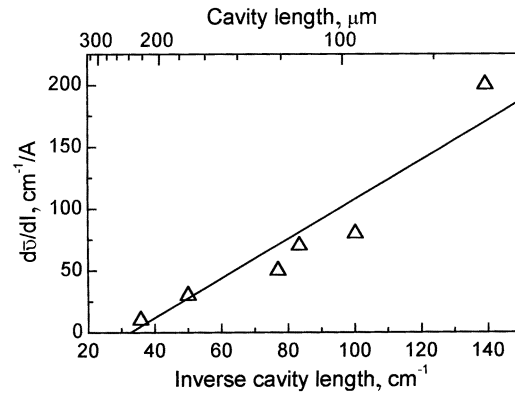


Рис. 4. Зависимость скорости токовой перестройки от длины резонатора.

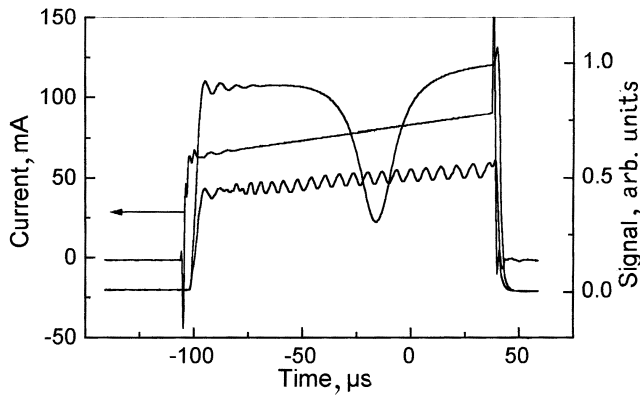
ного механизма являются его высокое быстродействие, а также большая скорость токовой перестройки, которая на порядок превышает расчетное значение для скорости перестройки, обусловленной джоулевым разогревом [9].

Для простоты можно считать, что токовая перестройка обусловлена изменением показателя преломления  $\bar{n}$ , связанным только с увеличением концентрации носителей  $N$  за порогом генерации. Производная показателя преломления по плотности тока (или концентрации носителей) постоянна ( $d\bar{n}/dj = \text{const}$ ) в приближении внутризонного поглощения, линейно зависящего от концентрации носителей:  $\alpha_i = \alpha_0 + k_0N$ ,  $\alpha_i$  — внутренние потери,  $\alpha_0$  — потери в активной области в отсутствие инжекции,  $k_0$  — коэффициент внутризонного поглощения,  $N$  — концентрация инжектированных носителей. Скорость токовой перестройки при вышеуказанных допущениях обратно пропорциональна длине резонатора, поскольку  $d\lambda/dI \sim d\bar{n}/dI = (1/Lw)(d\bar{n}/dj)$ , где  $w$  — ширина полоска. Нетрудно видеть, что эксперимент (рис. 4) хорошо согласуется с вышеприведенными предположениями.

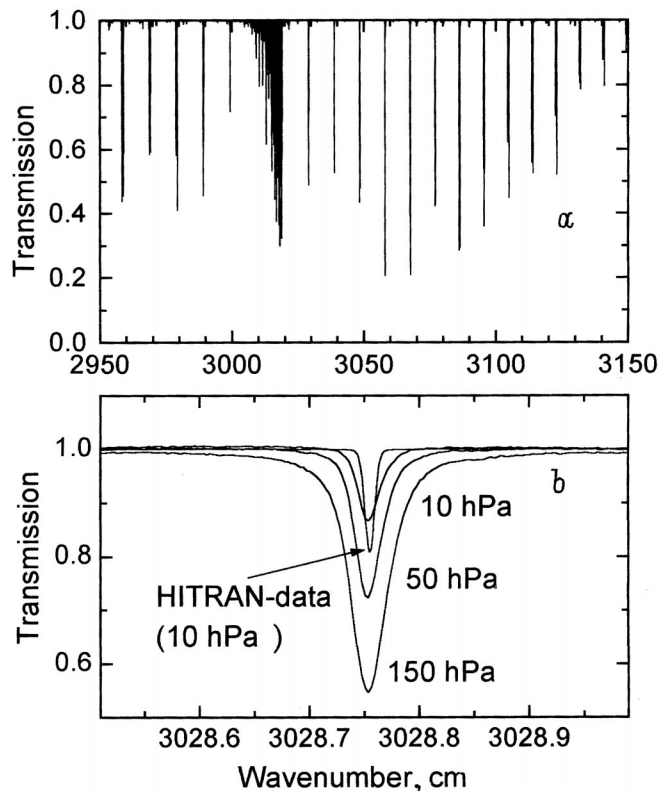
Уменьшение длины резонатора лазера приводит к увеличению потерь на выход и внутренних потерь, вызванных внутризонным поглощением [8]. Поэтому ранее нами были исследованы лазеры с длиной резонатора до 600 мкм, хотя лазеры с короткими резонаторами привлекательны вследствие одномодовой генерации и малости пороговых токов. Увеличение внутреннего квантового выхода в лазерах в данной работе, полученное при оптимальном легировании Gd, привело к уменьшению пороговых токов, увеличению мощности излучения и возможности достижения лазерной генерации в более "коротких" лазерах, с длиной резонатора 70–140 мкм. В лазере с длиной резонатора 70 мкм было получено наибольшее значение скорости токовой перестройки  $d\nu/dI = 210 \text{ см}^{-1}/\text{А}$  и наибольший интервал токовой перестройки одной моды  $\sim 10 \text{ см}^{-1}$  ( $\Delta I = 40 \text{ мА}$ ). Полученные значения превосходят параметры традиционных лазеров на ДГС в системе PbSrSe [14], имеющих при  $T = 95$  К  $I_{\text{th}} = 510 \text{ мА}$ , диапазон перестройки одной моды  $\sim 5 \text{ см}^{-1}$  ( $\Delta I = 60 \text{ мА}$ ),  $d\nu/dI = 80 \text{ см}^{-1}/\text{А}$ .

### 3.3. Измерение спектров пропускания метана

На рис. 5 приводятся снятые с экрана осциллографа временные развертки пилообразного импульса тока накачки однододового ( $L = 120$  мкм,  $d\bar{\nu}/dI = 70$  см<sup>-1</sup>/А) лазера (левая шкала) и сигналов фотоприемника, ре-



**Рис. 5.** Осциллограммы импульса тока накачки (левая шкала) и сигналов с фотоприемника после пропускания излучения через эталон Фабри–Перо и газовую кювету, заполненную смесью 1% CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub> при атмосферном давлении (правая шкала).



**Рис. 6.** *a* — спектры пропускания смеси 1% CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub> при давлении 50 гПа и длине оптического пути 10 см (HITRAN-Database). *b* — экспериментальные спектры пропускания смеси 1% CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub> при давлениях 10, 50 и 150 гПа и спектр пропускания (HITRAN) при давлении 10 гПа.

гистрирующего излучение, прошедшее через эталон Фабри–Перо и газовую кювету, наполненную смесью 1% CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub> при атмосферном давлении (правая шкала). Измерения проводились при температуре лазера  $T = 98$  К, когда был получен наиболее глубокий минимум сигнала, отвечающий поглощению метана. Соответствующие спектры пропускания для смеси, содержащей 1% CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub> при давлениях 10, 50 и 150 гПа, приведены на рис. 6. Спектры симметричны, имеют синусоидальную форму; уменьшение ширины линии пропускания согласуется с уменьшением ширины линии пропускания по мере уменьшения давления паров метана. На рисунке показаны также линия пропускания смеси 1% CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub> при давлении 10 гПа в области  $\bar{\nu} = 3028.8$  см<sup>-1</sup> и серия линий пропускания в интервале  $\bar{\nu} = 2950$ –3150 см<sup>-1</sup> ( $\lambda \approx 3.4$ –3.15 мкм) по данным атласа HITRAN (длина оптического пути 10 см). Как видно, расстояние между линиями поглощения сравнимо с интервалом токовой перестройки, получаемой в лазерах с короткими резонаторами. Мы не делаем каких-либо выводов из сравнения форм измеренных нами линий и данных HITRAN, поскольку в экспериментах использовался генератор импульсов с большим уровнем шумов, что, как известно, приводит к уширению лазерной линии, но отмечаем хорошее разрешение, полученное в наших опытах.

### 4. Заключение

Таким образом, легирование гадолинием раствора–расплава позволило создать однододовые мезаполосковые лазеры на основе ДГС InGaAsSb/InAsSbP ( $\lambda = 3.0$ –3.3 мкм) с рекордно низкими значениями пороговых токов менее 10 мА, выходной мощностью до 0.43 мВт с грани в одну спектральную моду (cw, 77 К). Изготовление лазеров с короткими резонаторами ( $L < 150$  мкм) позволило получить однододовый режим генерации до значений токов  $I \leq 6I_{th}$  при коэффициенте подавления неосновной моды  $\sim 650$ , рекордно высокой скорости токовой перестройки 210 см<sup>-1</sup>/А и диапазоне перестройки одной моды более 10 см<sup>-1</sup>.

Работа поддержана МНТП Министерства науки Российской Федерации ”Оптика. Лазерная физика”, проект № 4.14, Nato expert visit stipendium PST.EV. 975482 и European Office of Aerospace Research and Development, Air Force Office of Scientific Research, Air Force Lab under SPC-994016 Contract#F61775-99-WE016.

### Список литературы

- [1] М. Айдаралиев, Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, Н.М. Стус, Г.Н. Талалакин. *Semicond. Sci. Technol.*, **8**, 1575 (1993).
- [2] H.K. Choi, G.W. Turner, Z.L. Liao. *Appl. Phys. Lett.*, **65** (18), 2251 (1994).
- [3] A. Rybaltowski, Y. Xiao, D. Wu, B. Lane, H. Yi, H. Fend, J. Diaz, M. Razeghi. *Appl. Phys. Lett.*, **71** (17), 2430 (1997).
- [4] A.N. Baranov, A.N. Imenkov, V.V. Sherstnev, Y.P. Yakovlev. *Appl. Phys. Lett.*, **64** (19), 2480 (1994).

- [5] А.А. Попов, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **32** (9), 1139 (1998).
- [6] Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. Письма ЖТФ, **23** (1), 72 (1997).
- [7] М. Айдаралиев, Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. ФТП, **33** (2), 233 (1999).
- [8] М. Айдаралиев, Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. ФТП, **33** (6), 759 (1999).
- [9] М. Айдаралиев, Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин, Т. Бeyer, R. Brunner. ФТП, **34** (4), 124 (2000).
- [10] Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. ФТП, **33** (8), 1010 (1999).
- [11] A. Krier, H.H. Gao, V.V. Sherstnev. *Abstracts Third Int. Conf. on Midinfrared Optoelectronics. Materials and Devices (MIOMD III)* (Aachen, 1999) p. O 20.
- [12] W.W. Bewley, H. Lee, I. Vurgaftman, R.J. Menna, C.L. Felix, R.U. Martinelli, D.W. Stokes, D.Z. Garbuzov, J.R. Meyer, M. Maiorov, J.C. Connolly, A.R. Sugg, G.H. Olsen. *Appl. Phys. Lett.*, **76** (3), 256 (1999).
- [13] У. Тсанг. *Полупроводниковые инжекционные лазеры* (М., Радио и связь, 1990).
- [14] U.P. Schiesl, H.E. Wagner. *Proc. 5th Int. Symp. on Gas Analysis by Tunable Diode Lasers* [VDI Berichte, **1366**, 251 (1998)].

Редактор Л.В. Шаронова

### InGaAsSb(Gd) / InAsSbP double heterostructure lasers $\lambda = 3.0-3.3 \mu\text{м}$ for diode laser spectroscopy

M. Aydaraliev, T. Beyer\*, N.V. Zotova, S.A. Karandashev, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, N.M. Stus', G.N. Talalakin

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

\* Fraunhofer Institute  
of Physical Measurement Techniques,  
79110 Freiburg, Germany

**Abstract** We report on threshold currents, differential quantum efficiency, emission mode chart, current tuning rate and power of the stripe diode lasers with cavity lengths 70–150  $\mu\text{м}$  and based on InGaAsSb(Gd)/InAsSbP ( $\lambda = 3.0-3.3 \mu\text{м}$ ) double heterostructures operating in the 50–107 K temperature range. A total optical output power of 0.5 mW / facet, single mode power of 0.43 mW / facet and threshold current ( $I_{\text{th}}$ ) less than 10 mA are observed at 77 K at a *cw* operation. Single mode emission is measured up to  $6I_{\text{th}}$  with a spectral purity as high as 650:1, tuning rate and range of 210  $\text{cm}^{-1} / \text{A}$  and 10  $\text{cm}^{-1}$ , respectively. Methane gas detection at 3028.75  $\text{cm}^{-1}$  is demonstrated.