

## Диодные лазеры с отдельным электрическим и оптическим ограничением на основе InAsSb, излучающие в области 3÷4 мкм

© Т.Н. Данилова, А.П. Данилова, О.Г. Ершов, А.Н. Именков, Н.М. Колчанова, М.В. Степанов, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев

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

(Получена 20 января 1997 г. Принята к печати 28 января 1997 г.)

Исследованы диодные лазеры на основе InAsSb/InAsSbP с отдельным электрическим и оптическим ограничением, излучающие в области 3÷4 мкм. Более высокая рабочая температура лазеров достигается в том случае, если электрическое ограничение осуществляется с помощью гетеропереходов II типа. В лазерах этого типа интерфейсная оже-рекомбинация подавляется, экспериментальная плотность тока близка к теоретически рассчитанной для случая преобладания объемной оже-рекомбинации при температуре 180÷220 К.

1. Лазеры, излучающие в средней инфракрасной области, привлекают к себе значительное внимание из-за возможности их практического использования, в частности, в оптической связи, основанной на флюоритных стеклах, и в молекулярной спектроскопии, позволяющей осуществлять прецизионный контроль в высоких технологиях индустрии, а также в медицине. Главной проблемой лазеров на основе  $A^{III}B^V$ , излучающих в области 3÷5 мкм, является их низкая рабочая температура. К настоящему времени имеются сообщения только о работе квантово-каскадных лазеров на основе GaInAs/AlInAs при температуре 320 К, излучающих на длине волны ~ 5 мкм [1], и лазеров с квантовыми ямами II типа с четырьмя составляющими в каждом периоде (InAs-Ga<sub>0.7</sub>In<sub>0.3</sub>Sb-InAs-AlSb), работающих до 350 К с импульсной оптической накачкой, излучающих на длине волны ~ 3 мкм при 300 К [2]. Этой же группой авторов (см. [2]) были созданы лазеры на основе InAs-Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>Sb-InAs-AlSb, излучающие в области 3.9÷4.1 мкм, работающие с импульсной оптической накачкой до 285 К [3]. В диодных гетеролазерах, излучающих на длине волны более 3 мкм, рабочая температура на уровне комнатной не достигнута. Для диодных гетеролазеров с несколькими квантовыми ямами в активной области на основе InAsSb/InAlAsSb, излучающих на длине волны 3.2÷3.55 мкм, достигнута максимальная рабочая температура 225 К в импульсном режиме [4]. В наших предыдущих работах исследовались диодные двойные лазерные гетероструктуры на основе InAsSb/InAsSbP [5-9], у которых достигалась рабочая температура ~ 180 К в импульсном режиме. В настоящей работе поставлена задача исследовать диодные лазерные структуры с отдельным электрическим и оптическим ограничением, с активной областью на основе InAsSb. С этой целью были изготовлены лазеры с гетеропереходами I и II типов между активной областью и слоями электрического ограничения. Гетеропереходы II типа имели оптимальное отношение величин разрывов в валентной зоне и зоне проводимости, определенное теоретически в работе [10].

2. Лазерные структуры изготавливались методом жидкофазной эпитаксии на подложке InAs, ориентированной

в плоскости (100). На рис. 1 представлены схемы расположения слоев в лазерной структуре и энергетические диаграммы в лазерном режиме для структур с гетеропереходом I типа (a) и с гетеропереходом II типа в качестве электрического ограничения (b), которые в дальнейшем будем называть структурами I и II типа соответственно.

Активная область одинакова для структур обоих типов, имеет состав InAs<sub>0.95</sub>Sb<sub>0.05</sub> и ширину запрещенной зоны  $E_g \approx 0.376$  эВ, что соответствует длине волны излучения  $\lambda \approx 3.3$  мкм. Широкозонные слои оптического ограничения также одинаковы для структур обоих типов, имеют состав InAs<sub>0.5</sub>Sb<sub>0.16</sub>P<sub>0.34</sub> и  $E_g \approx 0.593$  эВ. Слои электрического ограничения в лазерной структуре с гетеропереходом II типа состоят из InAs с  $E_g \approx 0.413$  эВ и на границе с активной областью имеют разрывы валентной зоны  $\Delta E_v \approx 0.052$  эВ и зоны проводимости  $\Delta E_c \approx 0.015$  эВ, отношение  $\Delta E_v/\Delta E_c \approx 3.4$ . Слои электрического ограничения в лазерной структуре I типа имеют состав InAs<sub>0.85</sub>Sb<sub>0.05</sub>P<sub>0.1</sub> с  $E_g \approx 0.464$  эВ и разрывы зон на границе с активной областью  $\Delta E_v \approx 0.038$  эВ и  $\Delta E_c \approx 0.050$  эВ. Приведенные значения ширины запрещенных зон и разрывов зон — расчетные для температуры 77 К.

Активная область специально не легировалась и была *n*-типа проводимости с концентрацией электронов  $\sim 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Широкозонные слои *p*-InAsSbP легировались Zn до концентрации дырок  $\sim 2 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>, *n*-InAsSbP легировался Sn до концентрации электронов  $\sim 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Уровень легирования слоев электрического ограничения был примерно в 2 раза ниже. Толщины слоев активной области и областей электрического ограничения находились в интервале значений 0.65÷0.8 мкм, толщины слоев оптического ограничения составляли 2.5÷3 мкм. Лазеры имели меза-полосковую конструкцию с шириной полоска 15÷55 мкм и длиной резонатора 255÷350 мкм.

Лазеры исследовались в импульсном режиме при длительности импульса 100 нс и частотой следования 10<sup>5</sup> Гц в интервале температур от 77 К до максимальной рабочей температуры.

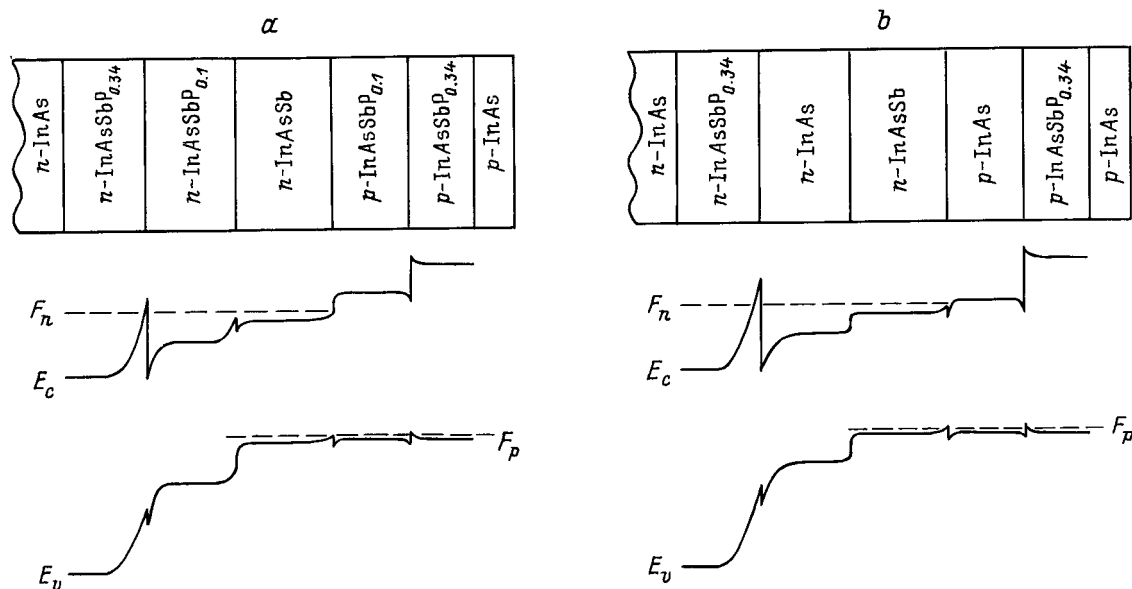


Рис. 1. Схема расположения слоев и энергетическая диаграмма в рабочем режиме лазера в лазерной структуре I типа (a) и II типа (b).

3. Рассмотрим экспериментальные результаты.

На рис. 2 приведены вольт-амперные характеристики лазерных структур I типа (лазер S221-2 № 2) (кривая 1) и II типа (лазер V1133-3) (кривая 2) при температуре 77 К. Обе вольт-амперные характеристики имеют отсечку на оси напряжений при ~0.36 В. При токах  $J > 0.5$  А вольт-амперная характеристика структур II типа выходит на прямолинейный участок с последовательным сопротивлением ~ 0.45 Ом. Вольт-амперная характеристика структур I типа выходит на прямолинейный участок при токах  $J > 1$  А с последовательным сопротивлением

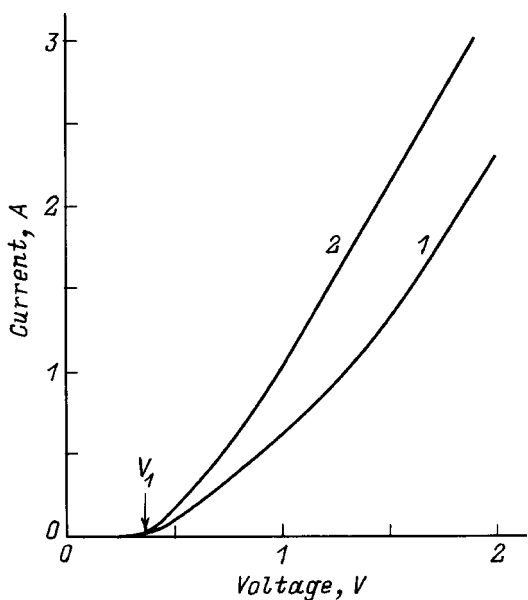


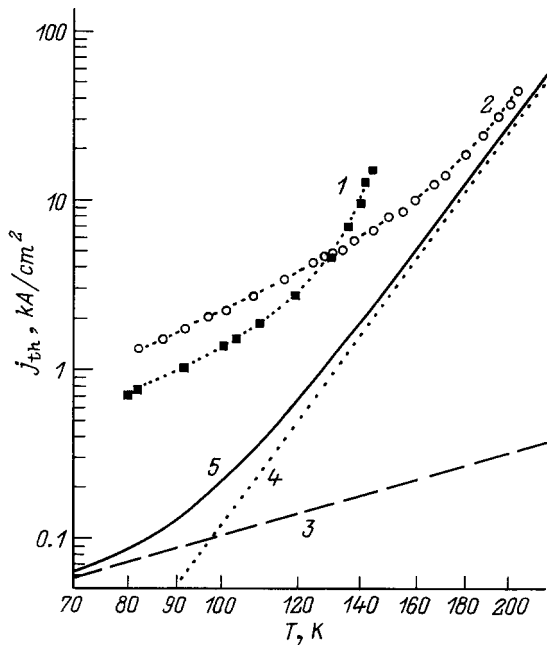
Рис. 2. Вольт-амперные характеристики лазера I типа S221-2 № 2 (1) и лазера II типа V1133-3 (2).  $T = 77$  К.

~0.55 Ом. С увеличением температуры вольт-амперные характеристики изменяются мало.

Пороговые плотности тока исследованных лазеров при температуре 77 К имеют величины для лучших образцов I типа  $j_{th} \approx 800$  А/см<sup>2</sup> и для лазеров II типа  $j_{th} \approx 1000$  А/см<sup>2</sup>. Температурные зависимости  $j_{th}$  приведены на рис. 3: кривая 1 — лазер I типа (S286), кривая 2 — лазер II типа (V1133-3 № 1). Для лазеров II и I типа характеристическая температура равна  $T_0 \approx 35$  и 22 К, максимальная рабочая температура ~ 203 и ~145 К соответственно. На этом же рисунке приведены расчетные температурные зависимости  $j_{th}$  при преобладании объемной рекомбинации, с учетом только излучательной рекомбинации (кривая 3), с учетом только оже-рекомбинации за счет СНСС- и СННС-переходов (см. [11]) (кривая 4) и суммарная (кривая 5). Расчет производился в соответствии с теорией, изложенной в работе [11].

Поскольку максимальная рабочая температура определяется не только температурной зависимостью пороговой плотности тока лазера, но и оптическими потерями, увеличивающимися с повышением температуры, сравнивались температурные зависимости дифференциальных квантовых эффективностей  $\eta$  лазеров I и II типа (рис. 4). Как видно, дифференциальная квантовая эффективность лазеров I типа (лазер S286, кривая 1) и II типа (лазер V1133-3, кривая 2) уменьшается с повышением температуры, причем при некоторой температуре ~ 120 К для лазеров I типа и ~150 К для лазеров II типа крутизна зависимости увеличивается.

Для того чтобы сравнить влияние гетерограницы I и II типа на когерентное излучение лазеров, исследовались зависимости от тока степени поляризации излучения лазеров  $\alpha = (F_{TM} - F_{TE}) / (F_{TM} + F_{TE})$ , где  $F_{TM}$  и  $F_{TE}$  —



**Рис. 3.** Зависимости пороговой плотности тока ( $j_{th}$ ) от температуры ( $T$ ): 1 — лазер I типа S286, 2 — лазер II типа V1133-3 № 1, 3 — расчет при преобладании излучательной рекомбинации в объеме, 4 — расчет при преобладании оже-рекомбинации за счет СНСС- и СННС-переходов, 5 — суммарная теоретическая зависимость.

интенсивности излучения ТМ- и ТЕ-поляризованного света соответственно. Лазеры I и II типа имеют высокую степень ТМ-поляризации, при которой вектор  $\mathbf{E}$  электрического поля световой волны перпендикулярен плоскости  $p$ - $n$ -перехода. Максимальная величина  $\alpha$  наблюдается при токе  $j \sim 1.5j_{th}$  и составляет для лазеров II типа  $\sim 80\%$ , а для лазеров I типа  $\sim 73\%$ .

#### 4. Обсудим полученные результаты.

Из сравнения энергетических диаграмм лазеров I и II типа (рис. 1) видно, что вольт-амперные характеристики лазерных диодов не должны существенно различаться, что и подтверждают измерения. Отсечки на вольт-амперной характеристике  $V_1$ , соответствующие минимальной ширине запрещенной зоны, т.е.  $E_g$  в активной области, говорят о том, что в лазерах и того и другого типа основной вклад в сопротивление дает  $p$ - $n$ -переход, а не изотипные переходы. Изгиб вольт-амперных характеристик означает, что сопротивление изотипных переходов изменяется с увеличением тока.

Для анализа температурной зависимости пороговой плотности тока учитывалась только объемная рекомбинация, так как разрывы энергетических зон на гетерограницах активной области соизмеримы с  $kT$  и для таких малых разрывов теория [10] дает только качественные закономерности.

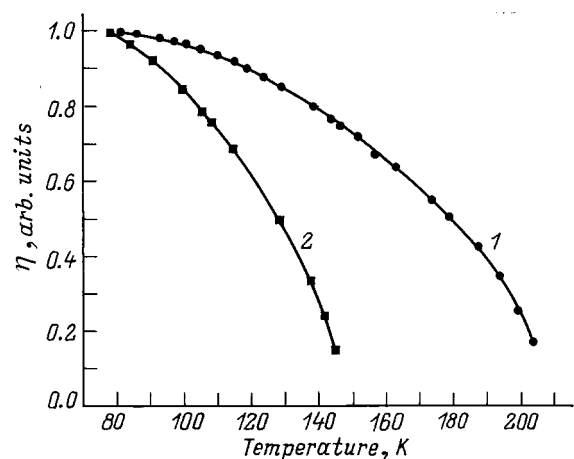
Пороговая плотность тока  $j_{th}$  при преобладании излучательной рекомбинации в объеме должна увеличиваться с температурой  $T$  по закону  $j_{th} \sim T^{3/2}$  (рис. 3, кривая 3). При преобладании оже-рекомбинации за счет СНСС- и

СННС-переходов  $j_{th} \sim T^7$  (рис. 3, кривая 4). Расчетные скорости излучательной и безызлучательной объемной рекомбинации одинаковы при температуре около 100 К. Суммарная плотность тока (рис. 3, кривая 5) выражается зависимостью  $j_{th} \sim T^{2.5}$  при  $T = 77 \div 90$  К и  $j_{th} \sim T^7$  при  $T = 180 \div 200$  К. Отметим, что в лазерах с узкозонным слоем InGaAsSb ( $E_g = 0.62$  эВ) большой толщины (2 мкм) и ограничительными слоями GaAlAsSb рассчитанная по этой теории плотность тока совпадает с экспериментальной [11].

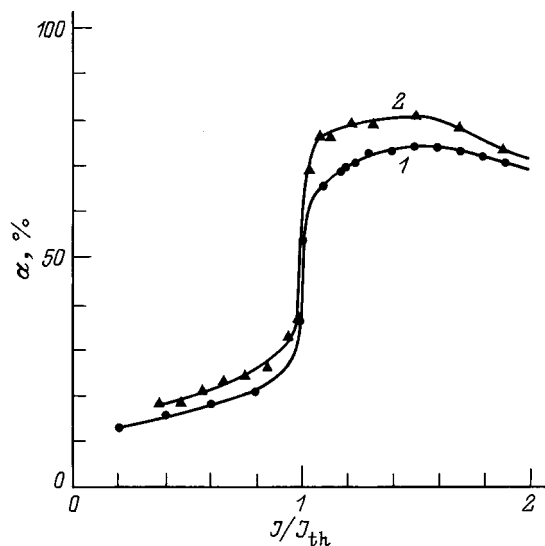
В исследованных в данной работе лазерах пороговая плотность тока почти на порядок больше расчетного значения при  $T = 77 \div 90$  К, но возрастает с температурой с тем же наклоном. Малый наклон говорит о преобладании излучательной рекомбинации, но эта излучательная рекомбинация, по-видимому, является интерфейсной. В лазерах II типа она больше, чем в лазерах I типа. Интерфейсная оже-рекомбинация в лазерах II типа, вероятно, подавляется [10], так как экспериментальная плотность тока близка к теоретически рассчитанной для случая преобладания объемной оже-рекомбинации при температуре  $180 \div 220$  К. В лазерах I типа интерфейсная оже-рекомбинация, по-видимому, существенна, так как экспериментальная плотность тока превышает теоретическую, рассчитанную с учетом объемной оже-рекомбинации, почти на порядок во всем интервале температур.

Поскольку максимальная рабочая температура определяется не только повышением порогового тока, но и резким падением дифференциальной квантовой эффективности с температурой (рис. 4), это означает, что с увеличением температуры возрастают потери излучения за счет поглощения на свободных носителях. Так как активные области у двух сравниваемых типов лазеров одинаковые, то, вероятно, большие потери на поглощение в лазерах I типа происходят либо в слоях электрического ограничения, либо на их гетерограницах.

О том, что гетерограницы оказывают существенное влияние на генерацию излучения, свидетельствует харак-



**Рис. 4.** Зависимости дифференциальной квантовой эффективности ( $\eta$ ) от температуры ( $T$ ) лазера I типа S286 (1) и лазера II типа V1133-3 (2).



**Рис. 5.** Зависимости степени поляризации излучения ( $\alpha$ ) от отношения тока к пороговому току ( $J/J_{th}$ ) лазера I типа S286 (1) и лазера II типа V1133-3 (2).

тер поляризации излучения (рис. 5). Излучение лазеров I и II типа имеет преимущественно ТМ-поляризацию. Как показано в [8], преимущественно ТМ-поляризацию имеют непрямые излучательные переходы, связанные с взаимодействием носителей заряда с гетерограницей. Поскольку степень ТМ-поляризации у лазеров II типа выше, у них взаимодействие носителей заряда с гетерограницей сильнее. Напомним, что преимущественная генерация излучения на гетерограницах следует также из превышения пороговой плотности тока над теоретической при  $T = 77 \div 90$  К, когда преобладает излучательная рекомбинация.

Таким образом, исследование лазеров на основе InAsSb с раздельным оптическим и электрическим ограничением показало, что у таких лазерных конструкций может быть достигнута более высокая максимальная рабочая температура в том случае, если электрическое ограничение осуществляется с помощью гетерограницы II типа.

Работа частично поддержана Европейским отделением аэрокосмических исследований и разработок США (US EOARD), контракт F 6170894C0011 и проектом Министерства науки Российской Федерации "Лазерная физика и оптика", № 4.14.

## Список литературы

- [1] J. Faist, F. Capasso, C. Sirtori, D.L. Sivco, J.N. Baillargeon, A.L. Hutchinson, S.-N.G. Chu, A.Y. Cho. Appl. Phys. Lett., **68** 3680 (1996).
- [2] J.I. Malin, C.L. Felix, J.R. Meyer, C.A. Hoffman, J.F. Pinto, C.-H. Lin, P.C. Chang, S.J. Murry, S.-S. Pai. Electron. Lett., **32**, 1593 (1996).

- [3] J.I. Malin, J.R. Meyer, C.L. Felix, J.R. Lindle, L. Goldberg, C.A. Hoffman, F.J. Bartoli, C.-H. Lin, P.C. Chang, S.J. Murry, R.Q. Yang, S.-S. Pai. Appl. Phys. Lett., **68**, 2976 (1996).
- [4] H.K. Choi, G.W. Turner, M.J. Manfra, M.K. Cannors. Appl. Phys. Lett., **68**, 2936 (1996).
- [5] А.Н. Баранов, Т.Н. Данилова, О.Г. Ершов, А.Н. Именков, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **18**, 6 (1992).
- [6] А.Н. Баранов, Т.Н. Данилова, О.Г. Ершов, А.Н. Именков, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **19**, 30 (1993).
- [7] A.N. Baranov, A.N. Imenkov, V.V. Sherstnev, Yu.P. Yakovlev. Appl. Phys. Lett., **64**, 2480 (1994).
- [8] Т.Н. Данилова, О.Г. Ершов, Г.Г. Зегря, А.Н. Именков, М.В. Степанов, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **29**, 1604 (1995).
- [9] Т.Н. Данилова, О.Г. Ершов, А.Н. Именков, М.В. Степанов, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **30**, 1265 (1996).
- [10] Г.Г. Зегря, А.Д. Андреев. ЖЭТФ, **109**, 615 (1996).
- [11] А.А. Андаспаева, А.Н. Баранов, Б.Л. Гельмонт, Б.Б. Джуртанов, Г.Г. Зегря, А.Н. Именков, Ю.П. Яковлев, С.Г. Ястребов. ФТП, **25**, 394 (1991).

Редактор Л.В. Шаронова

## InAsSb/InAsSbP diode lasers with separate electrical and optical confinement emitting at $3 \div 4 \mu\text{m}$

T.N. Danilova, A.P. Danilova, O.G. Ershov, A.N. Imenkov, N.M. Kolchanova, M.V. Stepanov, V.V. Sherstnev, Yu.P. Yakovlev

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

**Abstract** InAsSb/InAsSbP diode lasers with separate electrical and optical confinement emitting at  $3 \div 4 \mu\text{m}$  have been investigated. A higher maximum working temperature was obtained for lasers with electrical confinement by type II heterojunction. The interface Auger-recombination process in such lasers is suppressed. Experimental threshold current density is close to the theoretical one calculated for main contribution of the bulk Auger-recombination processes at temperature  $180 \div 220$  K.

Phone: (812)2479956

Fax: (812)2470006

E-mail: yak@iropt1.ioffe.rssi.ru