

06.3;07;12

2.2 μm одномодовые диодные лазеры, работающие в непрерывном режиме с термоэлектрическим охлаждением

© А.А. Попов, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев

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

Поступило в Редакцию 7 апреля 1997 г.

Сообщается о достижении непрерывной (CW) генерации диодных лазеров, созданных на основе двойной гетероструктуры GaAlAsSb/GaSb/GaInAsSb с использованием термоэлектрического охлаждения в одномодовом режиме в спектральной области 2.2 μm . Вблизи комнатной температуры исследованы температурные зависимости порогового тока как для непрерывного, так и для импульсного режимов накачки. Достигнуто рекордное значение характеристической температуры $T_0 = 132\text{ K}$.

Одномодовые инфракрасные полупроводниковые лазеры являются незаменимым источником перестраиваемого излучения с высокой спектральной плотностью мощности для детектирования разнообразных молекулярных компонент методами абсорбционной диодной лазерной спектроскопии (TDLAS) с минимальной объемной обнаружительной способностью до $10^{-9} - 10^{-12}$ [1,2]. В частности, для детектирования нитридосодержащих молекул, таких как N_2O , NO_2 и другие, перспективной является область вблизи 2.2 μm [3]. Лазеры на основе напряженных гетероструктур соединений InGaAs/InP успешно выращиваются для области длин волн короче 2.0 μm [4]. Создание более длинноволновых источников требует использования узкозонных твердых растворов на основе GaInAsSb/GaSb [5–7]. О достижении генерации на длине волны 2.1 μm в GaInAsSb MQW лазерах с широким контактом и характеристической температурой 110–115 K ($T < 40^\circ\text{C}$) сообщалось в [8,9]. Одночастотный режим генерации GaInAsSb лазеров был исследован авторами работ [10,11]. Недавно спектральная область генерации данного класса лазеров была расширена до 2.7 μm [12,13]. Данные полупроводники являются наиболее привлекательным материалом для создания диодов, работающих в области более сильных линий поглощения, что позволяет

на два порядка поднять чувствительность детектирования. Требование одночастотной генерации в непрерывном режиме на термоэлектрическом теплоотводе является одним из основных, предъявляемых к лазерным диодам для спектральных приложений [1].

В настоящей работе сообщается о достижении непрерывной (CW) одномодовой генерации в GaInAsSb полупроводниковых лазерах с использованием термоэлектрического охлаждения в спектральной области $2.2 \mu\text{m}$. Для непрерывного и импульсного режимов исследована температурная зависимость порогового тока и впервые достигнута характеристическая температура до $T_0 = 132 \text{ K}$, являющаяся максимальной из известных для данного типа узкозонных полупроводниковых лазеров.

Исследовались двойные гетероструктурные лазеры с активной областью $n\text{-GaInAsSb}$. Эмиттерные слои GaAlAsSb симметрично ограничивали активную область с обеих сторон. Глубокая мезаполосковая конструкция с шириной полоска $6\text{--}10 \mu\text{m}$, созданная методом фотолитографии, формировала ограничение в боковом направлении. Слой $p\text{-GaSb}$ использовался в качестве контактного. Активный слой GaInAsSb характеризовался содержанием индия 0.16 ($E_g = 0.64 \text{ eV}$) и был легирован Te до концентрации $(1\text{--}2) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Широкозонные слои GaAlAsSb n - и p -типа проводимости, примыкавшие к активной области, выращивались с содержанием Al-0.50 ($E_g = 1.11 \text{ eV}$) и легировались Te и Ge до концентрации $(2\text{--}4) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ и $(6\text{--}8) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ соответственно. Толщина активной области составляла $1.0 \mu\text{m}$, слоев GaAlAsSb — по $2.5 \mu\text{m}$, контактного — $0.8 \mu\text{m}$. Исследованные структуры были выращены методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ). Лазерные диоды с длиной резонатора Фабри–Перо $150\text{--}350 \mu\text{m}$ образовывались скальванием и крепились подложкой к трехстадийному термоохладителю ТВЗ-1.3, размещенному в стандартном корпусе SDL-3050 (рис. 1). Пиковая мощность теплоотвода была ограничена 3.5 W . В корпусе был также смонтирован фотодиод обратной связи на основе твердого раствора GaInAsSb диаметром $500 \mu\text{m}$ и термосопротивление стабилизации температуры.

Лазеры тестировались при рабочих температурах Пельтье-охладителя как в непрерывном, так и в импульсном режимах накачки. Импульсный режим генерации с малой скважностью, а также данные низкотемпературных измерений, полученные при криогенном охлаждении, были использованы с целью сравнительного исследования температурной зависимости порогового тока. Длительность импульса при этом

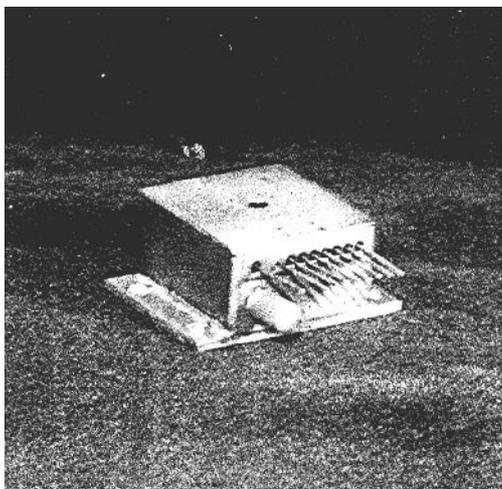


Рис. 1. Внешний вид лазерного диода LD22 (V22716), смонтированного в стандартном герметизированном корпусе SDL-3050. В корпусе был смонтирован трехстадийный термоэлемент ТВЗ-1.3, фотодиод обратной связи на основе твердого раствора GaInAsSb диаметром $500 \mu\text{m}$ и термосопротивление стабилизации температуры. В правой части рисунка представлен спектр генерации, записанный в непрерывном (CW) режиме при температуре -35°C . Ток накачки составлял 300 mA DC.

составляла 100 ns, скважностью 10^{-5} . Оптический сигнал детектировался GaInAsSb-фотодетектором, усиливался дифференциальным усилителем с быстродействием 30 ns. Спектр излучения контролировался на монохроматоре МДР-2 с разрешением лучше 0.5 ns. Отбирались одночастотные лазеры с длиной волны генерации в области $2.2 \mu\text{m}$ при комнатной температуре.

Генерация наблюдалась в непрерывном режиме до температуры -24°C . Продвижение в сторону больших температур ограничивалось мощностью примененного термоэлектрического теплоотвода и теплопроводностью лазерного кристалла. При всех тестируемых температурах спектр генерации был одномодовым вплоть до токов накачки, превышавших порог генерации I_{th} в 2.5 раза. С повышением температуры наблюдалось смещение генерируемой моды в длинноволновую область

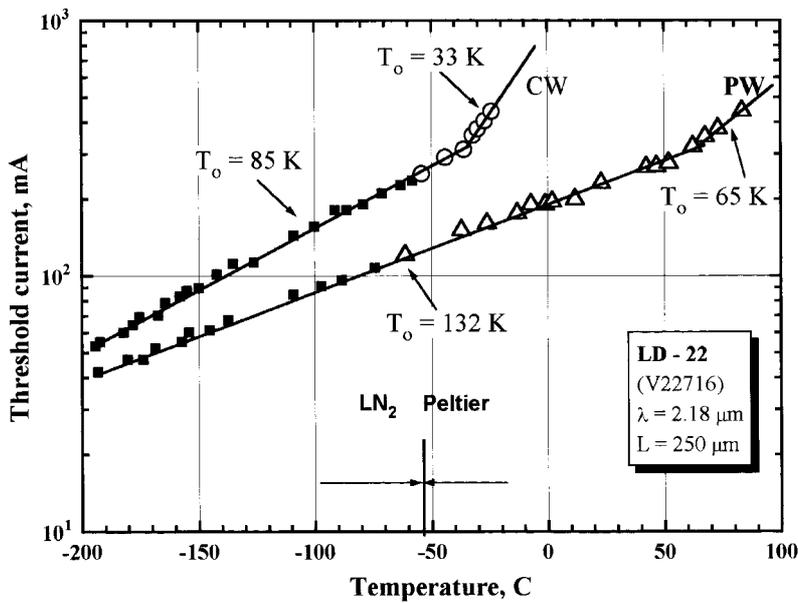


Рис. 2. Температурные зависимости порогового тока диодного лазера, полученные в непрерывном (CW) и импульсном (PW) режимах генерации вблизи комнатной температуры. В импульсном режиме длительность импульса накачки составляла 100 ns, частота повторения — 10 kHz.

со средней скоростью $-2.4 \text{ cm}^{-1}/\text{K}$, близкой к температурной зависимости ширины запрещенной зоны. При изменении температуры модовые скачки наблюдались на соседнюю длинноволновую моду, отделенную межмодовым интервалом $\sim 6.7 \text{ cm}^{-1}$.

Температурная зависимость порогового тока представлена на рис. 2. В непрерывном режиме пороговый ток возрастал от значения $\sim 53 \text{ mA}$ при -194°C до 440 mA DC при -24°C . Измерения показали экспоненциальный рост порогового тока с температурой. Характеристическая температура T_0 составила 85 K для температурной области $-194^\circ\text{C} - -30^\circ\text{C}$ и 33 K для области выше -30°C . Излом характеристики наблюдался в области $\sim -30^\circ\text{C}$.

С целью исследования физических причин, ограничивающих область рабочих температур, рассмотрим особенности температурной зависимости порогового тока генерации в режиме накачки короткими импульсами с малой скважностью (длительность импульса ~ 100 ns, скважность $\sim 10^{-5}$). Наиболее существенные отличия от непрерывного режима следующие. Во всем измеренном интервале температур порог генерации наблюдался при меньших токах накачки, причем с ростом температуры разность нарастала. Предельная температура генерации оказалась существенно выше и составила $+84^\circ\text{C}$. Более того, значение характеристической температуры T_0 для двух участков оказалось существенно выше и составило 132 и 65 К. Точка перегиба температурной зависимости порогового тока оказалась смещена к температуре $+62^\circ\text{C}$. Особо отметим, что достигнутое значение характеристической температуры $T_0 = 132$ К оказалось наивысшим из известных нам для GaInAsSb лазеров. Хотелось бы подчеркнуть, что данное значение также превосходит характеристическую температуру $T_0 = 110$ К, полученную для $2\ \mu\text{m}$ InGaAs/InP лазера [4].

Обратимся к анализу возможных потерь, ограничивающих рабочую температуру одномодовых GaInAsSb полупроводниковых лазеров спектрального диапазона $2.2\ \mu\text{m}$. Теоретический анализ возможных безызлучательных потерь, влияющих на пороговый ток и предельную температуру генерации в лазерах на основе твердого раствора GaInAsSb, ранее был сделан в работе [14]. Было показано, что в интервале температур $-208^\circ\text{C} - +30^\circ\text{C}$ зависимость пороговой плотности тока от температуры соответствует трем механизмам рекомбинации неравновесных носителей заряда в активной области. Было показано, что до -70°C доминирует излучательная рекомбинация, в температурной области $-70^\circ\text{C} - +20^\circ\text{C}$ — СННС Оже-рекомбинация, выше $+20^\circ\text{C}$ — СНСС Оже-процесс. Отметим, что в целом токовая зависимость порогового тока при импульсной накачке находится в хорошем соответствии с данной моделью. Однако результаты, полученные нами для непрерывного режима генерации, имеют заметные отличия. Сравнительный анализ зависимостей (рис. 2) свидетельствует о сильном влиянии скважности тока накачки на уровень безызлучательных потерь в GaInAsSb. Как было показано ранее [15], основными факторами, приводящими к срыву ватт-амперной характеристики узкозонных полупроводниковых лазеров, являются токовый разогрев активной области джоулевым теплом, инжекция горячих носителей, Оже-рекомбинация, утечки через

гетеробарьер и поглощение на свободных носителях заряда. В твердых растворах GaInAsSb посредством анализа соотношения характерных времен безызлучательной рекомбинации было установлено [16], что релаксацию избыточной энергии горячих носителей определяет межэлектронное взаимодействие. В условиях нашего эксперимента длительность импульса накачки больше характерных рекомбинационных времен в GaInAsSb [16], а температурная перестройка длины волны генерации соответствует температурному коэффициенту ширины запрещенной зоны активной области. В связи с этим следует связать с перегревом активной области полученные результаты, которые являются одними из основных, подавляющих непрерывную генерацию вблизи комнатной температуры. Из приведенной температурной зависимости порогового тока следует важный вывод, что вклад в разогрев Оже-процессов, инжекция горячих носителей и утечки носителей через гетеробарьер не являются определяющими при установлении предельной температуры непрерывной генерации. Большие плотности накачки, разогревающие активную область, приводят к усилению Оже-рекомбинации, что выравнивает скорости безызлучательной и излучательной рекомбинации и подавляет непрерывную генерацию в GaInAsSb гетеролазерах.

Таким образом, нами созданы лазерные диоды, работающие в непрерывном режиме в спектральной области $2.2 \mu\text{m}$ при термоэлектрическом охлаждении. Показано, что главной причиной, ограничивающей рабочую температуру непрерывной генерации одномодовых GaInAsSb лазеров, являются процессы токового разогрева активной области. Для импульсного режима достигнута наивысшая из известных нам характеристическая температура порогового тока $T_0 = 132 \text{ K}$ ($T < 60^\circ\text{C}$).

Список литературы

- [1] *Werle P., Muecke R., Slemr F.*, // Appl. Phys. 1993. B57. P. 131–139.
- [2] *Martinelli R.U.* // Laser Focus World. 1996. N 3. P. 77–81.
- [3] *Rothman L.S., Gamache R.R., Tipping R.H., Rinsland C.P., Smith M.A.H., Chris Benner D., Malathy Devi V., Flaud J.-M., Camy-Peyret C., Perrin A., Goldman A., Massie S.T., Brown L.R., Toth R.A.* // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1992. V. 48. P. 469–507.
- [4] *Forouhar S., Ksendzov A., Larsson A., Temkin H.* // Electron. Lett. 1993. V. 29. P. 574–576.

- [5] Caneau C., Zyskind J.L., Sulhoff J.W., Glover T.E., Centanni J., Burrus C.A., Dentai A.G., Pollack M.A. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51. P. 764–766.
- [6] Bochkarev A.E., Dolginov L.M., Drakin A.E., Eliseev P.G., Sverdlov B.N. // Sov. J. Quantum Electron. 1988. V. 18. P. 1362–1363.
- [7] Baranov A.N., Danilova T.N., Dzhurtanov B.E., Imenkov A.N., Konnikov S.O., Litvak A.M., Umanskii V.E., Yakovlev Yu.P. // Sov. Techn. Phys. Lett. 1988. V. 14. P. 727–729.
- [8] Baranov A.N., Fouillant C., Grunberg P., Lazzari J.L., Gaillard S., Joullie A. // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65 (5). P. 616–617.
- [9] Choi H.K., Eglash S.J. // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 61 (10). P. 1154–1156.
- [10] Choi H.K., Eglash S.J., Connors M.K. // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 63 (24). P. 3271–3272.
- [11] Imenkov A.N., Kondrat'ev B.S., Popov A.A., Yakovlev Yu.P. // Tech. Phys. Lett. (USA). 1993. V. 19 (12). P. 743–745.
- [12] Baranov A.N., Sherstnev V.V., Alibert C., Krier A. // Appl. Phys. 1996. V. 79 (6). P. 3354.
- [13] Garbuzov D.Z., Martinelli R.U., Menna R.J., York P.K., Lee H., Narayan S.Y., Connolly J.C. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67 (10). P. 1346–1348.
- [14] Андаспаева А.А., Баранов А.Н., Гельмонт Б.Л., Джуртанов Б.Е., Зебря Г.Г., Именков А.Н., Яковлев Ю.П., Ястребов С.Г. // ФТП. 1991. Т. 25 (3). P. 394–401.
- [15] Belenky G.L., Kastalsky A., Luryi S., Garbinski P.A., Cho A.Y., Sivco D.L. // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64 (17). P. 2247–2249.
- [16] Kolchanova N.M., Popov A.A., Sukach G.A., Bogoslavskaya A.B. // Semiconductors. 1994. V. 28. N 12. P. 1137–1140.