

06.3;07;12

## Наблюдение отрицательной характеристической температуры порогового тока диодных лазеров для спектральной области $2.8 \mu\text{m}$

© А.А. Попов, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев,  
С. Цивиш, З. Зелингер

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург  
J. Heyrovsky Institute of Physical Chemistry, 18223 Prague 8, Czech

Поступило в Редакцию 17 июля 1997 г.

В лазерных гетероструктурах на основе InAs/InAsSbP для спектральной области  $2.7\text{--}2.9 \mu\text{m}$  при криогенных температурах ( $T = 32\text{--}85 \text{ K}$ ) наблюдалось уменьшение порога генерации с ростом температуры. При температурах ниже  $50 \text{ K}$  получена отрицательная характеристическая температура порогового тока  $T_0 = 70 \text{ K}$ . Исследованы особенности температурной зависимости порогового тока и выходной мощности лазеров.

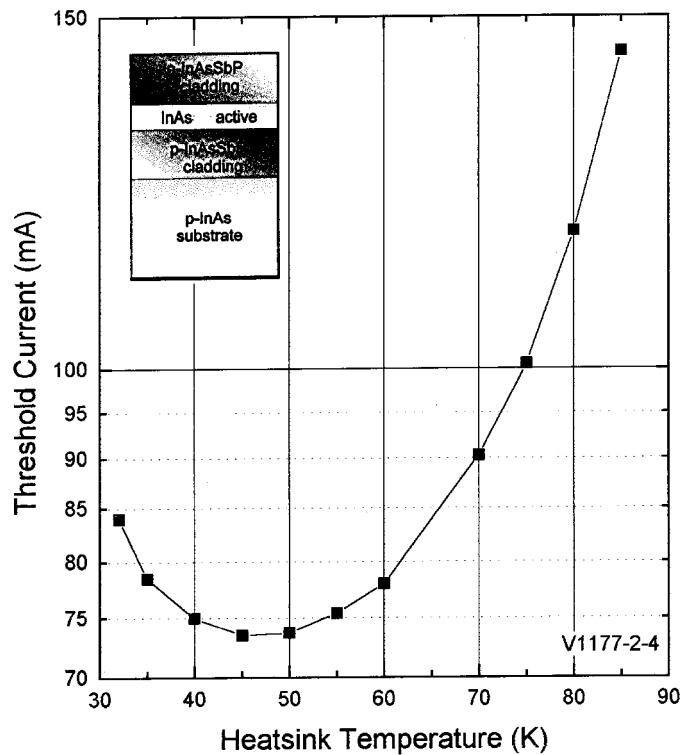
1. Успехи, достигнутые в последнее время в создании узкозонных полупроводниковых лазеров на основе антимонидных соединений  $A^3B^5$ , стимулируют возрастающий интерес к исследованиям диодов спектрального диапазона  $2.5\text{--}3 \mu\text{m}$ . Диоды для данной области длин волн создаются с использованием гетероструктур InAsSbP [1–5], InGaAs/InAs [6] и GaInAsSb/GaSb [7–8], выращиваемых на подложках GaSb и InAs. В отличие от широкозонных аналогов, генерация в таких узкозонных полупроводниках сопровождается сильной безызлучательной Оже-рекомбинацией, которая при  $T > 77 \text{ K}$  доминирует [1,3,9]. Другой особенностью зонной структуры соединений на основе InAs является близость энергии ширины запрещенной зоны  $E_g$  и спин-орбитального отщепления  $\Delta$ . Поэтому генерируемое в лазере излучение испытывает сильное поглощение дырками в валентной зоне, которые при этом возбуждаются в спин-орбитально отщепленную зону. Полученное для лазеров на основе таких соединений значение характеристической температуры порогового тока составляло  $25\text{--}30 \text{ K}$  [1–5] даже при температурах вблизи жидкого азота, а рабочая область генерации в

непрерывном режиме была ограничена криогенными температурами ( $T < 122$  К [5]). Излучательные характеристики лазеров изучались в основном в диапазоне температур 77–180 К. Специального внимания исследованию пороговых и мощностных характеристик в области ниже температуры жидкого азота не уделялось. Между тем данная область интересна тем, что позволяет рассмотреть генерацию в узкозонных лазерах в условиях, когда доминирующей оказывается излучательная рекомбинация.

Данная работа является продолжением наших предыдущих исследований узкозонных лазерных гетероструктур и посвящена изучению пороговых и мощностных характеристик лазерных диодов на основе InAs/InAsSbP, излучающих в области длин волн 2.7–2.9  $\mu\text{m}$ , при низких температурах ( $T = 32$ –85 К).

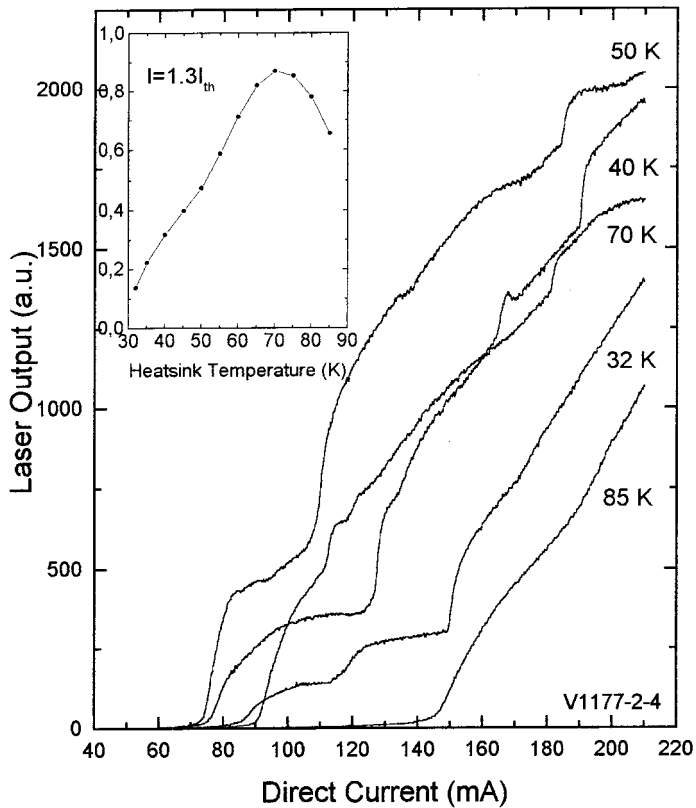
2. Лазерные гетероструктуры выращивались методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) на подложке InAs (100). Двойные гетероструктуры (см. вставку на рис. 1) состояли из 1.5  $\mu\text{m}$  активной области (расчетная ширина запрещенной зоны  $E_g^{77\text{K}} = 425$  meV), заключенной между двумя широкозонными эмиттерами InAsSbP ( $E_g^{77\text{K}} = 590$  meV), толщиной 2  $\mu\text{m}$ . В качестве контактного использовался слой InAs, толщина которого была 0.8  $\mu\text{m}$ . Концентрация электронов в активной области составляла  $(2\text{--}4) \cdot 10^{16}$   $\text{cm}^{-3}$ . Эмиттер *n*- InAsSbP был легирован Sn до концентрации  $(5\text{--}8) \cdot 10^{18}$   $\text{cm}^{-3}$ , *p*- InAsSbP–Zn до концентрации дырок  $(1\text{--}2) \cdot 10^{18}$   $\text{cm}^{-3}$ . Диоды имели глубокую меза-полосковую конструкцию с шириной 20  $\mu\text{m}$  и длиной резонатора 250–300  $\mu\text{m}$ . Лазерные кристаллы были смонтированы подложкой к специальному медному корпусу, который позволял поместить лазер в He-дюар закрытого типа (Laser Photonics, модель L5731). Для накачки лазеров и стабилизации температуры использовался токовый и температурный контроллер (Laser Photonics, модель L5820). Излучение лазера коллимировалось внеосевым тороидальным зеркалом на охлаждаемый InSb фотодетектор. После обработки по схеме синхронного детектирования и аналогово-цифрового преобразования (DAQ) данные накапливались в компьютере для последующего анализа.

3. Характеристики лазеров в диапазоне  $T = 32$ –85 К были исследованы в непрерывном (CW) режиме генерации. Максимальное значение тока накачки составляло 210 mA. При температуре  $T = 32$  К генерация наблюдалась с порогом  $I_{th} = 84$  mA. Полученная зависимость



**Рис. 1.** Температурные зависимости порогового тока диодного лазера в температурной области 32–85 К. Зависимости получены в непрерывном (CW) режиме генерации в области длин волн 2.7–2.9  $\mu\text{m}$  для лазера с шириной мезаполоска 20  $\mu\text{m}$  и длиной резонатора 300  $\mu\text{m}$ . Схема исследованной лазерной гетероструктуры представлена на вставке к рисунку.

порогового тока от температуры представлена на рис. 1. Температурная зависимость состояла из двух принципиально различных участков с точкой перегиба при  $T = 45$  К. На первом участке ( $T = 32\text{--}45$  К) было обнаружено, что значение порогового тока аномально уменьшается с ростом температуры до  $T = 45$  К. Такое поведение для  $\text{A}^3\text{B}^5$  полупроводниковых лазеров является необычным. Применяя к температурной зависимости порогового тока экспоненциальную зави-



**Рис. 2.** Зависимости выходной оптической мощности лазера от тока накачки, полученные при температурах 32, 40, 50, 70 и 85 К. На вставке приведена температурная зависимость выходной мощности лазера, построенная при фиксированном уровне превышения накачки над порогом  $I = 1.3I_{th}$ .

симось  $I_{th} = I_{th}^0 \exp(T/T_0)$ , получаем значение характеристической температуры  $T_0 = 70$  К. В области температур  $T = 45-50$  К зависимость проходит через минимум  $I_{th} = 74$  мА. Второй участок наблюдался при температурах выше 50 К и сопровождался слабым ростом порога генерации с характеристической температурой  $T_0 = 180$  К ( $T < 65$  К). Такие высокие значения  $T_0$  также до сих пор для  $2.8 \mu\text{m}$  InAs/InAsSbP

лазеров не сообщались. При дальнейшем повышении температуры наблюдался более резкий рост порога, причем скорость роста существенно возрастала при  $T > 75$  К. На участке  $T = 65–75$  К и выше 75 К его температурная зависимость описывается значением  $T_0 = 60$  К и  $T_0 = 27$  К соответственно. Следует отметить, что последнее значение, полученное при высоких температурах ( $T > 75$  К), хорошо согласуется с характеристической температурой  $T_0 = 25–30$  К, уже наблюдавшейся ранее в лазерных диодах спектрального диапазона  $3.3 \mu\text{m}$  в интервале  $T = 80–95$  К [4–5]. По-видимому, оно является типичным для мезополосковых лазеров на основе соединений InAs.

Токовые зависимости выходной мощности лазера были тестированы по температуре с шагом 5 К. Наиболее характерные зависимости, записанные при значениях температуры  $T = 32, 40, 50, 70$  и 85 К, приведены на рис. 2. При каждой из выбранных температур в интервале  $T = 32–85$  К наблюдался нормальный рост оптической мощности с током инжекции. Однако при температурах  $T < 70$  К кривые содержали в себе нескольких участков по току. На границах участков наблюдался жесткий режим переключения. С ростом температуры в области низких значений ( $T = 32–50$  К) эффективность излучательной рекомбинации вблизи порога резко возрастала, а границы начального участка по току сужались. При высоких значениях тока накачки ( $I > 1.75–1.45 I_{th}$ ) эффективность слабо убывала. При более высоких температурах ( $T > 75$  К), как правило, мощностные характеристики имели монотонную зависимость. Эффективность излучательной рекомбинации была практически неизменна вблизи порогового тока ( $I < 1.2–1.4 I_{th}$ ) и плавно уменьшалась при больших уровнях накачки. Изменение мощности лазера от температуры при фиксированном уровне превышения накачки над порогом ( $I = 1.3 I_{th}$ ) представлено на вставке рис. 2. Отличительной чертой представленной зависимости является увеличение выходной оптической мощности с ростом температуры до  $T = 65$  К с примерно равной скоростью. При более высоких температурах выходная мощность падает.

4. Обсудим полученные результаты. Проведенные исследования позволили наблюдать в диапазоне температур  $T = 32–85$  К ряд особенностей пороговых и мощностных характеристик лазерных диодов на основе гетероструктур InAs/InAsSbP для спектральной области  $2.7–2.9 \mu\text{m}$ . В первую очередь следует отметить аномальное поведение температурной зависимости порогового тока, связанное с наличием

участка, описываемого отрицательной характеристической температурой. Ее отличает большая крутизна ( $T_0 = -70$  К) и то, что она была получена для узкозонного объемного полупроводника в условиях отсутствия существенного вклада безызлучательной Оже-рекомбинации ( $T < 70-75$  К для рассматриваемого в настоящей работе лазера, см. рис. 2), когда излучательная рекомбинация является доминирующей. Среди возможных физических причин, вызывающих его проявление, следует отметить внутризонное поглощение (существенное для InAs при  $h\nu > \Delta$ ), изменение скорости накачки, внутреннего квантового выхода и формы спектра усиления [10]. Подробный макроскопический анализ зависимости пороговых характеристик InAs/InAsSbP лазера с учетом излучательной, Оже-рекомбинации и внутризонного поглощения [9] показал рост квантовой эффективности рекомбинации в области температур ниже 100–150 К. Это качественно согласуется с нашими экспериментальными результатами, представленными на вставке к рис. 2. Однако в нашем случае нарастание эффективности генерации наблюдалось в области температур  $T < 65$  К. Кроме того, представленная в [9] температурная зависимость порогового тока не содержит представленного на рис. 1 минимума и не может служить объяснением наблюдаемой аномалии порога генерации. На наш взгляд, это может быть связано с тем, что принятая теоретическая модель не учитывает особенностей энергетического распределения носителей при низких температурах. Между тем значительная часть температурной зависимости пороговых характеристик инжекционных лазеров связана с влиянием на спектр усиления энергетического распределения плотности состояний. Выражение для пороговой плотности тока может быть записано в виде [10]

$$I_{th} = \left( [\mu_e^* kT / e^* F_{1/2}(F_e/kT) / F_{-1/2}(F_e/kT)] / \tau_e \right)^{1/2},$$

где  $\mu_e = \mu_e(T)$ ,  $F_j(F_e/kT)$ ,  $\tau_e$  — подвижность, интегралы Ферми и время жизни носителей заряда. Возможной причиной наблюдавшейся аномалии может быть переход при  $T = 45$  К через характеристическую температуру  $T^* = E_0/kT$ , отвечающую вырождению хвостов плотности состояний в активной области. Это позволяет грубо оценить для лазеров на основе InAs/InAsSbP энергию  $E_0$  значением 3.9 meV. В связи с этим величина оптического усиления на пороге, отвечающего компенсации потерь в активной области, для температур, соответствующих вырожден-

ному и невырожденному заполнению состояний ( $T < 45$  К и  $T > 45$  К), оказывается отличной. Этому соответствует отсутствие резкого порога инверсии при низких температурах. С изменением уровня вырождения при росте температуры выше  $T = 50$  К порог инверсии становится более резким. Обратимся вновь к наблюдаемым при  $T < 45$  К мощностным характеристикам лазера, связанным с наличием жесткого переключения. Такие зависимости могут быть характерны для случаев генерации, сильно различающихся по эффективности вынужденной рекомбинации и их интенсивного взаимодействия, когда степень их пространственного перекрытия является функцией температуры. Усиление диффузии электронно-дырочных пар и подвижности носителей при  $T < T^*$  ростом температуры должно приводить к сильному пространственному перекрытию мод в объеме активной области. В условиях доминирования излучательной рекомбинации пространственное перекрытие мод должно приводить к их сильной конкуренции и проявляться, в частности, в жестком режиме переключения. Изменение области генерации  $V_v$  в пределах объема активной области одновременно с увеличением локальной интенсивности лазерного излучения порождает тенденцию к сверхлинейному росту мощности  $P_v = h\nu^*V_v^*(N_v/\tau_v^{\text{ext}})$  с увеличением накачки. По мере стабилизации области генерации ватт-амперная характеристика лазера вновь приобретает более пологую форму. В связи с этим причиной наблюдавшейся аномалии температурной зависимости порогового тока также может быть изменение области рекомбинации. В целом наблюдавшееся аномальное поведение температурной зависимости порогового тока, скорее всего, вызвано одновременным влиянием рассмотренных механизмов, более подробный анализ которых станет предметом последующих исследований.

Таким образом, в данной работе сообщается о наблюдении особенностей температурной зависимости порогового тока и выходной мощности лазерных гетероструктур на основе InAs/InAsSbP ( $\lambda = 2.7\text{--}2.9 \mu\text{m}$ ), имеющих место при криогенных температурах 32–85 К. При температурах ниже 45 К в лазерах был обнаружен участок с отрицательной характеристической температурой порогового тока  $T_0 = -70$  К. Показан слабый рост порогового тока с температурой в интервале  $T = 50\text{--}70$  К и установлено, что оптическая мощность лазера достигает максимума при температуре  $T \sim 65$  К. Сделанные предположения о природе наблюдавшейся аномальной зависимости порогового тока станут предметом последующих детальных исследований.

Настоящая работа была поддержана ЕС в рамках программы INCO-Corpernicus.

## Список литературы

- [1] *Baranov A.N., Imenkov A.N., Sherstnev V.V., Yakovlev Yu.* // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. (19). P. 2480-2481.
- [2] *Яковлев Ю.П., Данилова Н., Ершов О.Г., Именков А.Н., Шерстнев В.В.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 4. С. 87–93.
- [3] *Aydaraliev N., Zotova N.V., Karandashev S.A., Matveev B.A., Stus N.M., Talalakin G.N.* // Semicond. Sci. Technol. 1993. V. 8. P. 1575–1580.
- [4] *Popov A., Sherstnev V., Yakovlev Yu., Muecke R., Werte P.* // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68. (20). P. 2790-2792.
- [5] *Popov A., Sherstnev V., Yakovlev Yu., Muecke R., Werle P.* // SPIE Proc. 1997. V. 3001.
- [6] *Baranov A.N., Sherstnev V.V., Alibert C., Krier A.* // J. Appl. Phys. 1996. V. 79 (6). P. 3354.
- [7] *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.
- [8] *Choi H.K., Eglash S.J., Turner G.W.* // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68 (21). P. 2936–2938.
- [9] *Гулько Н.А., Зегря Г.Г., Соколова З.Н., Стусь Н.М., Халфин Б.Б.* // ФТП. 1997 (в печати).
- [10] *Елисеев П.Г.* Введение в физику инжекционных лазеров. М.: Наука, 1983. 295 с.