

Спектральные и модовые характеристики лазеров InAsSbP/InAsSb/InAsSbP в спектральной области вблизи 3.3 мкм

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

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

(Получена 28 января 1998 г. Принята к печати 10 февраля 1998 г.)

Показаны особенности спектров непрерывной генерации многомодовых диодных лазеров, созданных на основе двойной гетероструктуры InAsSbP/InAsSb/InAsSbP для спектральной области 3.3 мкм. Сообщается о наблюдении при криогенных температурах как длинноволнового, так и коротковолнового переключения мод. Показано, что подавление ближайших к основной боковых продольных мод приводит к большим модовым скачкам по энергии в процессе их токовой перестройки. Выявленные особенности объяснены неоднородностью спектра усиления вследствие спектрального выгорания дыр в узкозонных полупроводниках. Сделаны оценки времен внутризонной релаксации носителей заряда в активной области.

Введение

Перестраиваемые диодные лазеры для диапазона длин волн $3 \div 4$ мкм являются ключевым компонентом аппаратуры экологического мониторинга атмосферы и молекулярной спектроскопии [1–2]. К настоящему времени такие лазеры создаются на основе соединений узкозонных полупроводников GaSb и InAs. Исследования большинства групп направлены на получение высокотемпературной генерации и повышение оптической мощности (см. обзор [3]). Однако особую важность представляют характеристики лазеров, наиболее существенные с точки зрения их спектральных приложений. Подробно основные требования к лазерам среднего инфракрасного диапазона для спектральных приложений были сформулированы в работе [4]. Одним из них является возможность широкополосной токовой перестройки основной моды в непрерывном (CW) режиме генерации в отсутствие переключений мод. Если исследованиям токовой перестройки InAsSb-лазеров в непрерывном режиме [4–6] и при питании длинными импульсами [7–9] был посвящен ряд работ, то исследованию модового состава в широком интервале токов и температур особого внимания не уделялось. Между тем спектры генерации узкозонных полупроводниковых лазеров на $A^{III}B^V$ имеют особенности [10–12]. Исследование распределения оптической мощности по генерируемым модам в лазерах InAsSb/InAsSbP для спектральной области вблизи 3.6 мкм [11] показало увеличение модовой мощности при повышении температуры. Подавление боковых мод наблюдалось при температурах $T = 95$ К [11,12]. Для лазеров на основе антимонидных гетероструктур GaInAsSb/GaSb [9] и InAsSbP/InAsSb [5,12] с резонатором Фабри–Перо был продемонстрирован одночастотный режим генерации с подавлением боковых мод до 29 дБ. Кроме того, сообщалось о наблюдении коротковолновой перестройки длины волны генерации InAs(Sb)-лазеров током даже при превышении инжекционным током порогового значения [6]. Наблюдавшиеся к настоящему времени скорости перестройки (0.035 см⁻¹/мА и 0.3 см⁻¹/К) оказались по величине значительно меньше соответствующих харак-

теристик лазеров ближнего инфракрасного диапазона на основе соединений GaAs и InP и меньше, чем следует из температурной зависимости ширины запрещенной зоны (1.4 см⁻¹/К) [13]. Исследованию механизма перестройки длинноволновых лазеров на основе InAsSb при импульсном питании посвящено несколько работ [8,14]. Если при импульсном питании перестройка длины волны связывалась с ростом концентрации носителей заряда [8,15] и влиянием самофокусировки излучения [14], то в непрерывном режиме питания не были изучены спектральные и модовые характеристики InAsSb-лазеров и не объяснена их динамика в широком интервале токов и температур.

Цель данной работы — подробно проанализировать динамику изменения спектральных характеристик длинноволновых лазеров на основе InAsSb в непрерывном режиме генерации в широком интервале токов и температур. Исследование было выполнено путем анализа слабых неосновных мод на примере многомодовых диодов, излучающих при криогенных температурах в спектральной области вблизи 3.2 мкм. Указанный подход позволил выявить замедление времени внутризонной релаксации в лазерах на основе InAsSb и его влияние на направление модовой перестройки.

Эксперимент

Исследовались лазеры, созданные на основе двойных гетероструктур InAsSbP/InAsSb/InAsSbP с активной областью *p*-InAsSb (рис. 1). Эмиттерные слои InAsSbP симметрично ограничивали активную область с обеих сторон. Глубокая меза-полосковая конструкция с шириной полоска $12 \div 14$ мкм, созданная методом фотолитографии, формировала ограничение в боковом направлении. Слой *p*-InAs использовался в качестве контактного. Активный слой InAsSb специально не легировался. Естественная концентрация примеси в нем составляла $(1 \div 2) \cdot 10^{16}$ см⁻³. Широкозонные слои InAsSbP *N*- и *P*-типа проводимости, примыкавшие к активной области, выращивались с содержанием фосфора 0.28 (расчетная

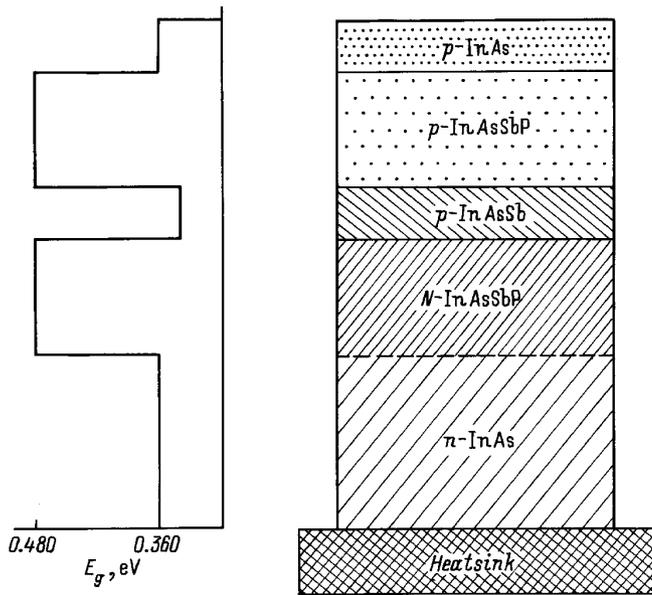


Рис. 1. Схема исследованной двойной лазерной гетероструктуры InAsSb/InAsSbP. Энергетическая диаграмма гетероструктуры представлена в левой части рисунка.

ширина запрещенной зоны $E_g = 480$ мэВ) и легировалась Sn и Zn до концентрации $(2 \div 5) \cdot 10^{18}$ и $(0.8 \div 1.2) \cdot 10^{18}$ см^{-3} соответственно. Толщина активной области составляла 0.6 мкм, толщины слоев InAsSbP по 2.5 мкм, контактного слоя — 0.8 мкм. Лазерные диоды с длиной резонатора Фабри–Перо $250 \div 300$ мкм изготавливались скалыванием и напаивались подложкой к специальному медному корпусу. Верхний контакт создавался с помощью золотой проволоки диаметром 30 мкм, припаянной к меза-полоску.

Лазер монтировался в вакуумированной части стандартного оптического дьюара LA-5736, позволявшего стабилизировать температуру в области $80 \div 100$ К с точностью до 0.1 К. Низкошумящий лазерный контроллер PLX Lightwave LDC 3742 был использован в качестве стабилизированного источника постоянного тока. Мощностные измерения были сделаны с использованием пирозлектрического радиометра Laser Precision RS5900 с электронной самокалибровкой, точность которой достигала 1%. Дальнее поле излучения лазера визуализировалось с помощью инфракрасной видеокамеры. Спектр излучения контролировался с использованием монохроматора Digikrom 480 с разрешением лучше 0.5 нм. Оптический сигнал детектировался HgCdTe-фотодетектором (Polytec HCT70) и усиливался синхронным детектором Standford Research SR530. Сохранение спектров, их последующий анализ и автоматическое управление установкой осуществлялось через интерфейс IEEE-488 с помощью стандартного компьютерного обеспечения. Отличительной чертой экспериментальной установки был высокий динамический диапазон (~ 50 дБ) аналогово-цифрового преобразователя, что позволило достичь разрешения слабых боковых мод.

Полученные результаты

Лазеры исследовались в непрерывном режиме генерации в диапазоне температур $T = 78 \div 90$ К. Пороговый ток генерации I_{th} составлял $65 \div 90$ мА при температуре $T = 78$ К. Температурное возрастание величины порогового тока лазера описывалось экспоненциальной зависимостью с характеристической температурой $T_0 = 21$ К (см. вставку к рис. 2).

Подробные исследования спектров были выполнены вплоть до токов накачки I , превышающих порог генерации в $1.8 \div 2.2$ раза. Полученные зависимости выходной оптической мощности P_{out} для трех температур представлены на рис. 2. Оптическая мощность возрастала во всем исследованном диапазоне токов и температур. Насыщения мощности не наблюдалось. Если при $T = 80$ К зависимость состояла из двух участков, то с ростом температуры первый участок, соответствовавший меньшей квантовой эффективности, исчезал. Максимальная выходная оптическая мощность составляла до 1 мВт на грань при $T = 80$ К и уменьшалась с ростом температуры. Однако во всем исследованном диапазоне токов мощность возрастала, а ватт-амперная характеристика значительных разрывов не содержала. Это свидетельствует об отсутствии жесткого переключения мод.

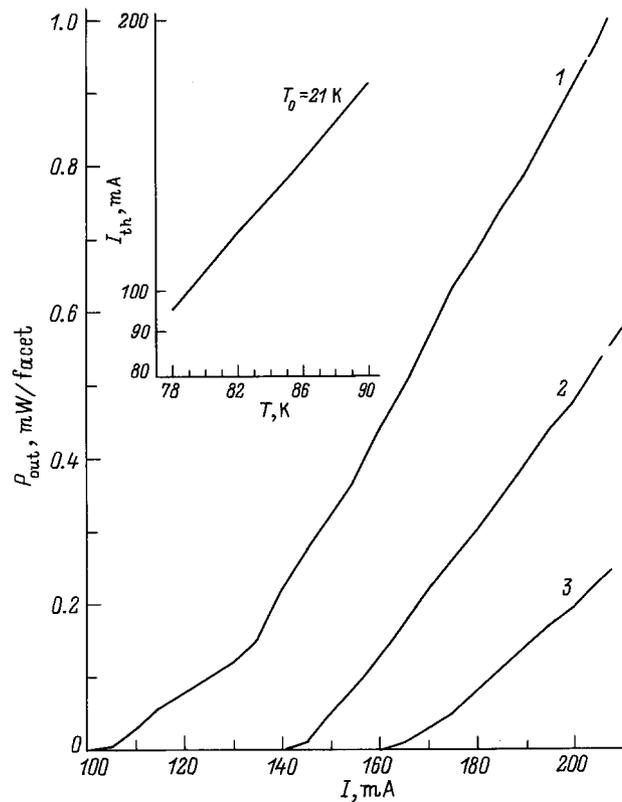


Рис. 2. Токовые зависимости выходной оптической мощности диодного лазера V1126-39, полученные в непрерывном режиме генерации при $T = 80$ (1), 85 (2), 90 К (3). Температурная зависимость порогового тока I_{th} приведена на вставке.

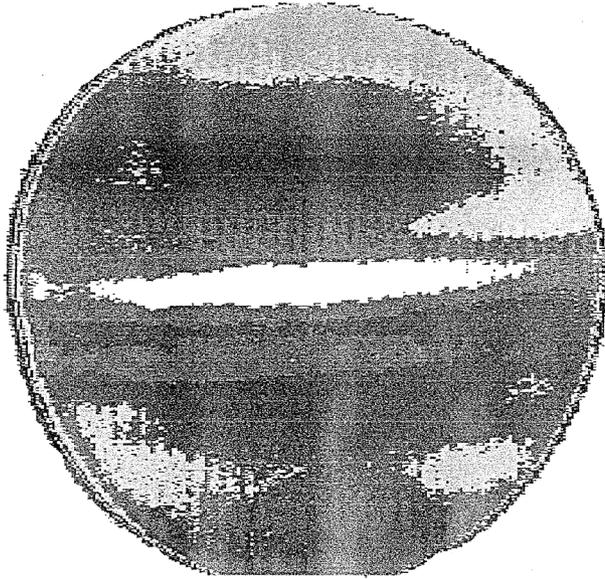


Рис. 3. Вид дальнего поля излучения лазерного диода V1126-39 при $T = 80$ К и токе накачки 140 мА. Поле визуализировано инфракрасной видеокамерой, выходное окно которой было расположено на расстоянии 30 мм от лазерного кристалла.

Для образцов, отобранных для последующих исследований, был выполнен контроль пространственного поля лазера в дальней области. Результаты измерений свидетельствовали о наличии генерации на основной продольной моде (рис. 3). Это соответствует результатам выполненного ранее исследования структуры пространственных мод [14], где было показано, что генерация в меза-полосковых InAsSb-лазерах с резонатором Фабри–Перо при ширине полоска менее 14 мкм возбуждается только на основной продольной моде. Это заключение соответствовало геометрии диодов, выбранных для представленного исследования.

Спектры генерации для температур 80, 85 и 90 К представлены на рис. 4, *a, b, c*. Каждый рисунок представляет собой срез трехмерных спектров генерации по оптической мощности. На рис. 4, *a* приведены результаты измерений, выполненных вблизи температуры жидкого азота ($T = 80$ К). Спектр можно условно разделить на два участка. Первый соответствует токам до $I = 1.4I_{th}$, где спектр остается одномодовым. Межмодовое расстояние составляло порядка 4.3 см^{-1} и соответствовало показателю преломления 3.58, близкому к показателю преломления InAs [13]. Однако особенностью данной области является модовая перестройка в коротковолновую сторону. При этом эффективность излучательной рекомбинации растет с током незначительно (пологий участок на ватт-амперной зависимости — рис. 2). На втором участке, при $I > 1.4I_{th}$, регистрируется многомодовая генерация. Первая мода, описанная выше, стабилизируется по длине волны. Генерация на ней наблюдается при отсутствии дальнейших модовых переключений

в широком диапазоне токов накачки, вплоть до двукратного превышения порога генерации. Однако спектр генерации становится неоднородным. Особенностью данной области является то, что с ростом тока генерация наблюдается в длинноволновой области, отстоящей на 5 межмодовых интервалов. С ростом тока ($I > 170$ мА) энергетическая ширина области, в которой генерация подавлена, возрастает до 8 межмодовых интервалов. Для данной области, в отличие от первой, мода перестраивается в длинноволновую область. Модовые переключения наблюдаются на соседнюю моду, отделенную интервалом $\sim 4.2 \div 4.9 \text{ см}^{-1}$. Мода стабилизируется. Боковые моды начинают возбуждаться в спектральной области, где генерация до сих пор была подавлена. Дальнейшее увеличение тока накачки до $I = 2I_{th}$ приводит к возбуждению всех ближайших к основной боковых мод. Спектр генерации однородно уширяется и становится типичным для многомодовых диодных лазеров.

Модовая карта, полученная при температуре 85 К, представлена на рис. 4, *b*. Ее отличает то, что область одночастотной, стабильной к модовым переключениям, генерации пропадает. Если одна из мод по-прежнему перестраивается в коротковолновую сторону, то с длинноволновой стороны мода перестраивается в длинновол-

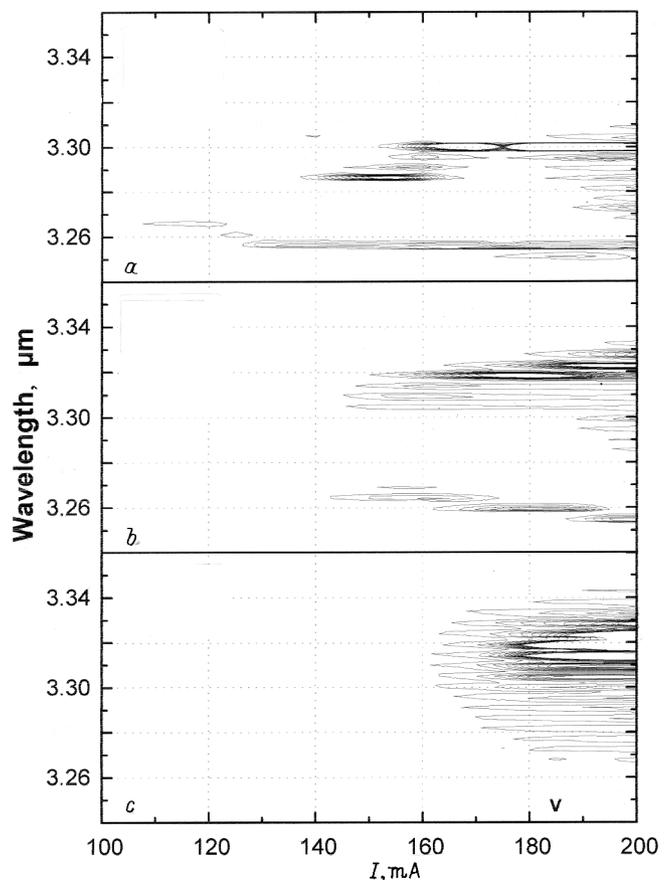


Рис. 4. Зависимости модового состава диодного лазера, полученные в непрерывном режиме генерации при $T = 80$ (*a*), 85 (*b*), 90 К (*c*). Изображен разрез трехмерных спектров генерации по мощности.

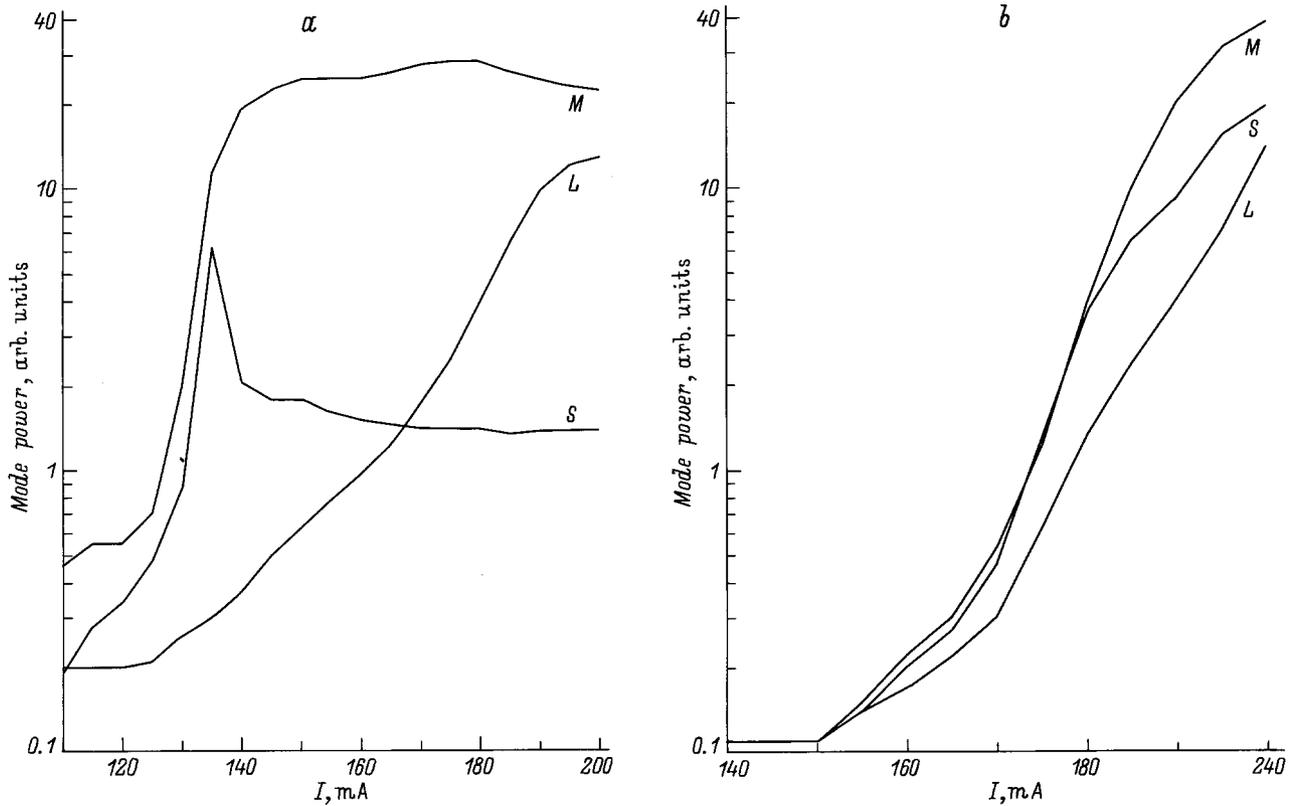


Рис. 5. Зависимости выходной мощности диодного лазера V1126-39 от тока для основной (M) моды и ближайших боковых коротковолновой (S) и длинноволновой (L) мод при температуре 80 (a) и 90 К (b).

новую область. С момента возникновения генерации переключения соответствуют одному межмодовому интервалу. Спектральная область, в которой генерация подавлена, и неоднородности, наблюдавшиеся при $T = 80$ К, сохраняются. Отличием является то, что энергетический разрыв достигает $8 \div 10$ межмодовых интервалов уже на пороге генерации. При больших уровнях тока ($I \sim 180$ мА) спектр генерации вновь стремится к однородному уширению. Увеличение температуры до 90 К (рис. 4, c) приводило к однородному уширению уже на пороге генерации. Хотя основная мода слегка смещена в длинноволновую область спектра, наблюдается обычная многомодовая генерация, спектр которой соответствует генерации многомодового полупроводникового лазера. Область одномодовой генерации и неоднородности не наблюдались.

Обсуждение результатов

Суммируя выявленные особенности генерации, можно отметить, что их главной характерной чертой является неоднородность модового спектра. Эта неоднородность связана с наличием большого разрыва в спектре продольных мод, наблюдаемого при криогенных температурах. Данные неоднородности должны быть следствием особенностей спектра усиления в лазерных диодах на

основе узкозонных полупроводников InAsSb. Вблизи температуры жидкого азота и при малом превышении усиления над порогом ($I < 1.4I_{th}$, $T = 80$ К) генерация наблюдается на одиночной частоте. Для этой области температурное уширение спектрального контура усиления мало и однородно. Этому соответствует возрастание мощности как основной, так и ближайших коротковолновой и длинноволновой мод с ростом тока накачки до $135 \div 140$ мА (рис. 5, a). С ростом тока наблюдается коротковолновый сдвиг генерации. Он может быть связан с ростом поглощения излучения на свободных носителях и изменениям эффективного показателя преломления при росте концентрации носителей заряда. Ранее подобное поведение было обнаружено для импульсного режима генерации [7]. Следует также отметить значительное поглощение в валентной зоне, которое весьма интенсивно в соединениях GaSb и InAs, где наблюдается резонанс энергий ширины запрещенной зоны и спин-орбитального отщепления [16]. Вследствие спектрального ограничения модового усиления, максимум усиления моды может сдвигаться в сторону коротких волн. Поэтому в лазерах на основе InAs, в отличие от более широкозонных аналогов на основе $A^{III}B^V$ InP и GaAs, коротковолновый сдвиг наблюдается и над порогом генерации.

С дальнейшим ростом тока и концентрации носителей спектральный контур усиления деформируется. Следствием этого является возникновение генерации на

продольных модах, отстоящих на $5 \div 10$ межмодовых интервалов. Этому соответствует подавление ближайшей длинноволновой моды при усилении основной и коротковолновой мод в области токов $I > 140$ мА (рис. 5, а). В результате в спектре усиления формируется провал вблизи генерируемой моды. Усиление подавляется с коротковолновой и усиливается с длинноволновой стороны. Область, где усиление мод подавлено (рис. 4, а), соответствует энергетическому провалу в контуре усиления $2 \div 7$ мэВ. Величина провала позволяет через соотношение неопределенности $\tau \sim 2\pi\hbar/\Delta E$ грубо оценить время внутризонной релаксации, оно составляет $0.1 \div 0.6$ пс. Это время оказывается в несколько раз больше соответствующих времен для InP- и GaAs-лазеров [13]. Калиброванные мощностные измерения позволяют оценить уровень внутренних потерь α_{int} через соотношение [13]

$$P_{\text{out}} = \frac{h\nu}{2q} \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \alpha_{\text{int}}} (I - I_{\text{th}}), \quad (1)$$

где P_{out} — оптическая мощность, $h\nu$ — энергия фотона, q — заряд электрона, α_m — потери на выход излучения (39 см^{-1}). Расчеты согласно (1) дают величину $\alpha_{\text{int}} = 80 \div 130 \text{ см}^{-1}$, свидетельствующую о высоком уровне потерь в активной области. Высокий уровень внутренних потерь в лазерах InAsSb/InAsSbP подтверждается также расчетами, выполненными в работе [17]. Физическими причинами этого могут быть сильные процессы безызлучательной оже-рекомбинации, когда характеристическая температура $T_0 = 21$ К. Замедление времен внутризонной релаксации и малые, по сравнению с шириной запрещенной зоны, величины гетеробарьеров в узкозонных полупроводниках $A^{III}B^V$ способствуют утечке инжектированных горячих носителей из активной области. Время жизни фотона в резонаторе τ_p можно легко оценить с использованием соотношения [13]

$$\tau_p = 1 / \left\{ v_g [\alpha_{\text{int}} + 1/L \ln(1/R)] \right\}, \quad (2)$$

где v_g — групповая скорость, α_{int} — внутренние потери, L — длина резонатора, R — коэффициент отражения зеркал, определяющий потери на выход излучения. По оценке, с использованием соотношения (1) и (2) время жизни фотона составляет $1.0 \div 0.7$ пс. Поэтому в области подавления мод время термализации носителей приближается ко времени жизни фотонов в резонаторе. Это соответствует тому, что "дырка" в спектре усиления служит причиной ослабления мощности генерации вблизи основной генерируемой моды. Замедление времен релаксации наблюдается при низких температурах. Результатом разогрева (непрерывным током при повышении уровня накачки к $I \sim 170 \div 180$ мА, равно как и повышением температуры к $T = 90$ К) становится однородное тепловое уширение контура усиления. Это приводит к регистрируемому возбуждению многомодовой генерации на всех соседних модах и соответствует одновременному однородному усилению коротковолновой и длинноволновой мод (рис. 5, б). Поэтому при больших токах

и повышенных температурах переключение происходит на соседнюю моду, а большие модовые переключения отсутствуют. Длинноволновая перестройка мод при этих условиях подтверждает рост температуры в активной области и тепловой механизм смещения собственных мод лазерного резонатора при высоких уровнях накачки и температурах. Для объяснения наблюдаемой коротко- и длинноволновой перестройки током в лазерах на основе узкозонных полупроводников важно, что если при $T = 80$ К усиление нарастает с ростом тока быстрее для коротковолновой моды, то уже при токе $I = 140$ мА коротковолновая перестройка насыщается в связи с истощением усиления с коротковолновой стороны. При высоких уровнях накачки и высоких температурах усиление нарастает для коротко- и длинноволновых мод с примерно равной скоростью. Насыщение модовой перестройки в этом случае не наблюдается.

Таким образом, большие времена внутризонной релаксации приводят к особенностям спектра усиления диодных лазеров на основе двойной гетероструктуры InAsSbP/InAs/InAsSbP. Главной из них является неоднородность спектров усиления при низких температурах. При криогенных температурах это приводит к наличию как длинноволнового, так и коротковолнового переключения мод. Подавление ближайших к основной продольных мод вследствие спектрального выгорания дыр в контуре усиления приводит к большим модовым переключениям (через $5 \div 10$ мод) в процессе их токовой перестройки непрерывной генерации лазерного диода, отмечавшимся ранее [10–12] и не получившим объяснения. Хотя замедление внутризонной релаксации увеличивает вероятность безызлучательной утечки инжектированных горячих носителей в эмиттерные области, в условиях малого превышения усиления над потерями это может приводить к подавлению боковых мод и формированию одночастотной генерации, что наблюдается в узкозонных лазерных диодах с резонатором Фабри–Перо на основе слабо легированных полупроводниковых соединений InAsSb.

Авторы благодарят А.М. Монахова и Т.Н. Данилову за полезные дискуссии и обсуждение результатов работы.

Работа частично поддержана грантом по лазерной оптике Министерства РФ, грантом INCO-COPERNICUS от Европейского сообщества и Конкурсным центром фундаментального естествознания Санкт-Петербургского научного центра и Правительства Санкт-Петербурга.

Список литературы

- [1] R.U. Martinelli. *Laser Focus World*, **3**, 77 (1996).
- [2] P. Werle. *Spectrochimica Acta*, A **54** (1998) in press.
- [3] H.K. Choi. *Current Opinion In Sol. St.&Mater. Sci.*, **1**, 212 (1996).
- [4] A. Popov, V. Sherstnev, Yu. Yakovlev, R. Muecke, P. Werle. *Proc. SPIE*, **2834**, 46 (1996).

- [5] A. Popov, V. Sherstnev, Yu. Yakovlev, R. Muecke, P. Werle. *Spectrochimica Acta*, **A52**, 863 (1996).
- [6] A.N. Baranov, A.N. Imenkov, V.V. Sherstnev, Yu.P. Yakovlev. *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 2480 (1994).
- [7] Т.Н. Данилова, А.П. Данилова, О.Г. Ершов, А.Н. Именков, М.В. Степанов, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **31**, 1392 (1997).
- [8] Т.Н. Данилова, О.И. Евсеенко, А.Н. Именков, Н.М. Колчанова, М.В. Степанов, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. *Письма ЖТФ*, **22**, 7 (1996).
- [9] Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременний, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. *Письма ЖТФ*, **23**, 72 (1997).
- [10] H.K. Choi, S.J. Eglash, M.K. Connors. *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 3271 (1994).
- [11] A. Popov, V. Sherstnev, Yu. Yakovlev, R. Muecke, P. Werle. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 2790 (1996).
- [12] A. Popov, V. Sherstnev, Yu. Yakovlev, R. Muecke, P. Werle. *Proc. SPIE*, **3001**, 52 (1997).
- [13] K. Petermann. *Laser diode modulation and noise* (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1988).
- [14] А.Н. Баранов, Т.Н. Данилова, О.Г. Ершов, А.Н. Именков, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. *Письма ЖТФ*, **19**, 30 (1993).
- [15] Т.Н. Данилова, А.П. Данилова, О.Г. Ершов, А.Н. Именков, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **31**, 1119 (1997).
- [16] М.П. Михайлова, А.А. Рогачев, И.Н. Ясневич. *ФТП*, **10**, 1460 (1976).
- [17] Т.Н. Данилова, А.Н. Именков, Н.М. Колчанова, А.А. Попов, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **30**, 1265 (1996).

Редактор Л.В. Шаронова

Spectral and modal characteristics of InAsSbP/InAsSb/InAsSbP lasers of the spectral range near 3.3 μm

A.A. Popov, V.V. Sherstnev, Yu.P. Yakovlev

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

Abstract Features of CW lasing spectra have been studied for 3.2 μm wavelength multimode diode lasers based on narrow band-gap double heterostructure InAsSbP/InAsSb/InAsSbP. The both long- and short-wavelength mode jumps have been reported at cryogenic temperatures. It has been shown that the suppression of side longitudinal modes nearest to the main mode lead to big mode hops during current tuning. The features have been explained by inhomogeneous of gain spectrum due to spectral hole burning. The intraband carrier relaxation times have been estimated for the active area.

Tel.: (812)2479956

Fax.: (812)2470006

E-mail: AP@iropto.ioffe.rssi.ru