

06:07

Излучательные характеристики мезаполосковых лазеров ($\lambda = 3.0-3.6 \mu\text{m}$) на основе двойных гетероструктур InGaAsSb/InAsSbP

© М. Айдаралиев, 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 РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 20 января 1998 г.

Исследованы диаграммы направленности, ватт-амперные и спектральные характеристики мезаполосковых лазеров с $\lambda = 3.0-3.6 \mu\text{m}$ (77 К), активным слоем InGaAsSb и пороговыми токами $\geq 15 \text{ mA}$ ($j_{th} \geq 200 \text{ A/cm}^2$). Максимальная выходная мощность составила 1.4 mW ($\lambda \sim 3.3 \mu\text{m}$), дифференциальная квантовая эффективность $\sim 3\%$ ($\tau = 5-30 \mu\text{s}$, $f = 500 \text{ Hz}$) при генерации в продольной моде с расходимостями $\Delta\Theta_{\parallel} \sim 15^\circ$ и $\Delta\Theta_{\perp} \sim 30^\circ$. Показана связь дифференциальной квантовой эффективности с порядком пространственной моды генерации. Одномодовый, перестраиваемый током ($-30 \text{ cm}^{-1}/\text{A}$) лазер был использован для измерения пропускания метана в области полосы поглощения ν_3 .

1. Диодные лазеры на основе узкозонных полупроводников III-V, генерирующие в средней ИК области спектра ($3-4 \mu\text{m}$), могут найти применение в спектроскопии и контроле за загрязнением окружающей среды, поскольку в указанном спектральном диапазоне лежат полосы поглощения многих промышленных газов, например углеводородов [1,2].

Данная работа является продолжением исследований мезаполосковых лазеров на основе двойных гетероструктур (ДГС) InGaAsSb/InAsSbP, излучающих в спектральном диапазоне $3.0-3.6 \mu\text{m}$ [3].

2. Двойные гетероструктуры выращивались методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) на нелегированной подложке $n\text{-InAs}$ (111)A ($n = 1 - 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) и состояли из трех слоев: широкозонного ограничивающего слоя $n\text{-InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y$ ($0.05 \leq x \leq 0.09$, $0.09 \leq y \leq 0.18$), активного слоя лазера $n\text{-In}_{1-v}\text{Ga}_v\text{As}_{1-z}\text{Sb}_z$ ($v \leq 0.07$, $z \leq 0.07$) и

широкозонного эмиттера $p\text{-(Zn)-InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y$ ($0.05 \leq x \leq 0.09$, $0.09 \leq y \leq 0.18$). Толщины широкозонных слоев были $4\text{--}6\ \mu\text{m}$, активного слоя $1\text{--}4\ \mu\text{m}$. Мезаполосковые лазеры с шириной полоска 10 и $20\ \mu\text{m}$ и длиной резонатора $150\text{--}600\ \mu\text{m}$ были изготовлены с использованием фотолитографии.

Спектры электролюминесценции регистрировались спектрометром ДФС-12 по схеме синхронного детектирования. В качестве фотоприемника использовался охлаждаемый InSb фотодиод. Для измерения ватт-амперных характеристик и картины дальнего поля использовалось калиброванное PbSe фотосопротивление. Измерения проводились в импульсном ($\tau = 5\text{--}30\ \mu\text{s}$, $f = 500\ \text{Hz}$) и непрерывном режимах при $T = 77\ \text{K}$.

3. Экспериментальное распределение интенсивности излучения в дальней зоне $I(\Theta)$ характеризуется порядком моды m (m — число узлов интенсивности поля по рассматриваемой оси) и расходимостью луча $\Delta\Theta$ (полный угол, измеренный на уровне половины максимальной интенсивности).

В плоскости, перпендикулярной плоскости $p\text{--}n$ перехода, в лазерах с толщиной активной области $d = 1\text{--}2\ \mu\text{m}$ наблюдалась продольная мода $m = 0$, $\Delta\Theta_{\perp} \sim 30\text{--}35^{\circ}$. На рис. 1, *a* (кривая 1, сплошная линия) представлена экспериментальная картина дальнего поля $I(\Theta_{\perp})/I(0)$ лазера с $\lambda = 3.475\ \mu\text{m}$ и $d = 2\ \mu\text{m}$. Там же (пунктирная линия I') приведен расчет $I(\Theta_{\perp})/I(0)$ по формуле $I(\Theta_{\perp})/I(0) = \gamma^4 / (\gamma^2 + k_0^2 \sin^2 \Theta_{\perp})^2$, где $\gamma \approx (n_2^2 - n_1^2)k_0d/2$, n_2 и n_1 — показатели преломления активной области и ограничивающего слоя соответственно, $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ — длина волны излучения в вакууме, d — толщина активной области. Совпадение экспериментальной и расчетной зависимостей было получено при величине $n_2 - n_1 = 0.065$, близкой к рассчитанной линейной интерполяцией.

При $d = 2.5\text{--}4\ \mu\text{m}$ наблюдалась поперечная мода $m = 1$ (рис. 1, *a*, кривая 2) с $\Delta\Theta_{\perp} \sim 50\text{--}60^{\circ}$.

В плоскости, параллельной плоскости $p\text{--}n$ перехода, диаграмма направленности зависела от ширины полоска w . При $w = 10\ \mu\text{m}$ наблюдалась продольная мода ($m = 0$) с расходимостью $\Delta\Theta_{\parallel} \sim 15^{\circ}$ (рис. 1, *b*, кривая 1), при $w = 20\ \mu\text{m}$ чаще реализовывалась поперечная мода $m = 1$ (рис. 1, *b*, кривая 2) с $\Delta\Theta_{\parallel} \sim 40\text{--}45^{\circ}$. Близкие результаты были получены в [4].

Лазеры имели пороговые токи I_m^{puls} от 15 до $100\ \text{mA}$, $I_{th}^{cw} = 1.1I_{th}^{puls}$ (плотность порогового тока $\geq 200\ \text{A/cm}^2$). Как правило, лазер, излуча-

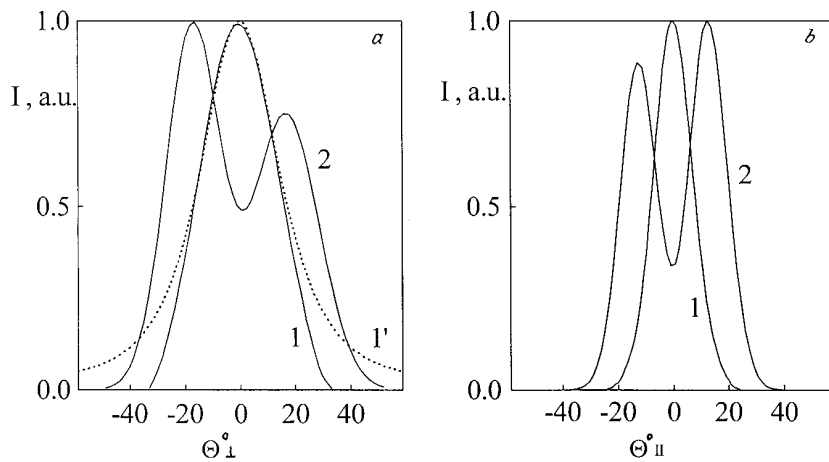


Рис. 1. *a* — диаграммы направленности в плоскости, перпендикулярной плоскости p - n перехода: $m = 0$ (кривая 1), $m = 1$ (кривая 2), $m = 0$ (расчет, пунктирная линия 1'); *b* — диаграммы направленности в плоскости, параллельной плоскости p - n перехода: $m = 0$ (кривая 1), $m = 1$ (кривая 2).

ющий в пространственной моде $m = 0$, имел меньший пороговый ток по сравнению с лазером, излучающим в поперечных модах.

В интервале токов $(1 - 2)I_{th}$ спектр излучения был одномодовый, в многомодовом режиме межмодовое расстояние составляло $20 - 90 \text{ \AA}$, соответствуя значению $\Delta\lambda = \lambda^2/2nL$, где n — показатель преломления активной области, L — длина резонатора. С увеличением тока накачки длина волны отдельной моды испытывает дрейф в длинноволновую сторону со скоростью $dk/dI \sim 30 \text{ см}^{-1}/\text{A}$. В многомодовом режиме с ростом тока доминирующей становилась более длинноволновая мода.

На рис. 2 приведены ватт-амперные характеристики лазеров, излучающих в продольной (кривая 1) и в поперечной ($m = 1$) (кривая 2) модах ($w = 20 \text{ \mu m}$, $d = 2 \text{ \mu m}$, $\lambda_1 = 3.335$, $\lambda_2 = 3.304 \text{ \mu m}$). При генерации в продольной пространственной моде дифференциальная квантовая эффективность η_{dif} в ~ 4 раза выше по сравнению с генерацией в моде с $m = 1$ (3 и 0.8% соответственно, $I = 1.1I_{th}$). Такое поведение согласуется с предсказываемым теорией [5] уменьшением оптического ограничения с ростом порядка моды.

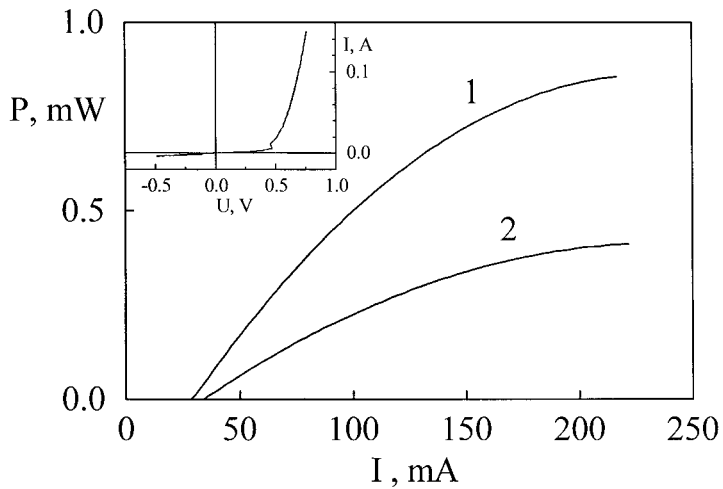


Рис. 2. Ватт-амперные характеристики лазеров, излучающих в моде $m = 0$ (кривая 1) и $m = 1$ (кривая 2). На вставке — вольт-амперная характеристика лазера (параметры лазеров смотри в тексте).

На вставке к рис. 2 представлена вольт-амперная характеристика лазера с $\lambda = 3.012 \mu\text{m}$, $L = 300 \mu\text{m}$, $w = 20 \mu\text{m}$. Напряжение отсечки составляет $\sim 0.54 \text{ V}$, что близко к величине ширины запрещенной зоны ($\sim 0.41 \text{ V}$), при $I > 70 \text{ mA}$ вольт-амперная характеристика выходит на линейный участок с последовательным сопротивлением $R \sim 1.4 \Omega$.

Ватт-амперная характеристика сублинейная, максимальная импульсная мощность с двух граней $\sim 1.4 \text{ mW}$ ($w = 20 \mu\text{m}$, $I = 20I_{th}$, $T = 77 \text{ K}$). При работе лазера в непрерывном режиме происходило уменьшение максимальной мощности до $\sim 0.4 \text{ mW}$. Достижение большей мощности ограничивалось обратимым срывом генерации, сопровождаемым сменой знака дифференциальной квантовой эффективности. Сопоставление токовых и температурных зависимостей дифференциальной квантовой эффективности и длины волны доминирующей моды позволило сделать вывод о разогреве активной области на $\Delta T \sim 5\text{--}15 \text{ K}$ при трехкратном превышении порогового тока.

Деградация лазера с необратимым изменением вольт-амперных характеристик происходила при плотностях тока $\geq 50 \text{ kA/cm}^2$.

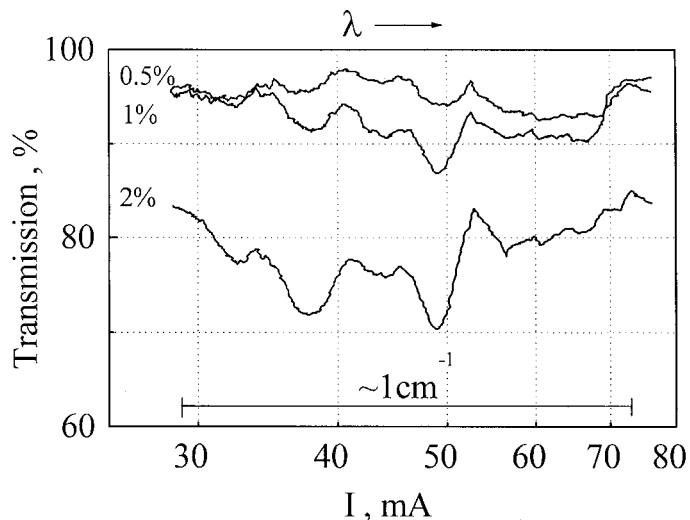


Рис. 3. Спектры пропускания газовой смеси (0.53, 1.05, 2.06% метана) лазерного излучения $\lambda = 3.320 \mu\text{m}$.

Лазер с $\lambda = 3.320 \mu\text{m}$, $I_{th} = 20 \text{ mA}$, $dk/dI \sim 30 \text{ cm}^{-1}/\text{A}$ (дрейф в сторону длинных волн) был использован для измерения пропускания газовой смеси $\text{CH}_4/\text{воздух}$ (объемная доля метана 0.53, 1.05 и 2.06%) в интервале $\Delta k \sim 1 \text{ cm}^{-1}$. Излучение лазера, находящегося в откачиваемом криостате, пропускалось через кювету со смесью с длиной оптического пути 10 см и фокусировалось с помощью линз (LiF) на PbSe фотосопротивлении. На рис. 3 представлены кривые пропускания излучения в зависимости от тока накачки, которые демонстрируют возможность применения данных лазеров в приборах газового анализа и диодной лазерной спектроскопии.

В заключение авторы выражают благодарность Н.Д. Ильинской за техническую помощь, оказанную при выполнении работы, и Ю.П. Яковлеву за внимание и интерес к работе.

Работа поддержана МНТП Министерства науки Российской Федерации "Оптика. Лазерная физика", проект № 4.14.

Список литературы

- [1] *Aidaraliev M., Zotova N.V., Karandashov S.A., Matveev B.A., Stus N.M., Talalakin G.N.* // *Infrared Physics & Technology*. 1996. V. 37. P. 83–86.
- [2] *Popov A., Sherstnev V., Yakovlev Y., Mucke R., Werle P.* // *Spectrochimica Acta. Part A*. 1996. V. 52. P. 863–870.
- [3] *Айдаралиев М., Зотова Н.В., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н.* // *Письма в ЖТФ*. 1997. Т. 23. В. 1. С. 72–76.
- [4] *Баранов А.Н., Данилова Т.Н., Еришов О.Г., Именков А.Н., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П.* // *Письма в ЖТФ*. 1993. Т. 19. В. 17. С. 30–36.
- [5] *Кейси Х., Паниш М.* Лазеры на гетероструктурах. М.: Мир, 1981. Т. 1.