

Эффективная генерация первой волноводной моды в гетеролазере InGaAs/GaAs/InGaP

© А.А. Бирюков, Б.Н. Звонков, С.М. Некоркин, В.Я. Алёшкин⁺,
А.А. Дубинов^{+†}, В.В. Кочаровский^{*°}, Вл.В. Кочаровский[°]

Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета,
603950 Нижний Новгород, Россия

⁺ Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

^{*} Физический факультет Техасского A&M университета,
Колледж Стейшн, США

[°] Институт прикладной физики Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 3 июля 2007 г. Принята к печати 21 августа 2007 г.)

Исследована генерация первой возбужденной поперечной моды (TE₁) в диодном гетеролазере InGaAs/GaAs/InGaP новой конструкции, центральная часть волновода которого содержит тонкий слой InGaP. Данная конструкция лазера снижает конкуренцию первой и основной мод и обеспечивает генерацию моды TE₁ при величине порогового тока, сравнимого с величиной порогового тока обычного лазера, генерирующего основную моду TE₀.

PACS: 42.55.Px, 42.65.An, 42.70.Nq, 78.67.De

1. Введение

В последние годы возник значительный интерес к исследованию лазерных диодов на основе GaAs, обеспечивающих генерацию возбужденных мод лазерного волновода. Среди возможных применений таких лазеров можно указать генерацию разностной частоты в среднем инфракрасном диапазоне длин волн (см., например, [1–3]) при использовании лазеров с составным резонатором [4].

Данная работа посвящена созданию эффективного лазерного диода на гетероструктуре InGaAs/GaAs/InGaP с квантовой ямой для генерации первой возбужденной моды волновода с длиной волны $\lambda \approx 1$ мкм. Для увеличения эффективности предложена и реализована необычная конструкция лазерного волновода.

2. Волновод лазера для генерации первой моды

Для того чтобы лазерный диод генерировал только какую-то одну возбужденную моду волновода, необходимо, чтобы коэффициент усиления на пороге генерации для этой моды был существенно ниже, чем коэффициент усиления на пороге генерации других мод. Значение этого коэффициента усиления для каждой моды определяется из следующего выражения [5]:

$$g = [\alpha - \ln(R_1 R_2)/L]/\Gamma, \quad (1)$$

где α — коэффициент потерь на поглощение и рассеяние, R_1 и R_2 — коэффициенты отражения от первого и второго зеркал лазера соответственно, L — длина

лазера, Γ — коэффициент оптического ограничения, определяющий долю излучения, приходящуюся на активную область лазера. Наиболее простой способ достижения генерации только одной возбужденной моды — это управление параметром Γ . В этом случае квантовую яму (или ямы, если в лазере их несколько) необходимо располагать вблизи максимума поля моды, которую необходимо возбудить (рис. 1). Однако в волноводе обычной конструкции [5] коэффициент α для основной моды в не слишком широких волноводах (в широких волноводах очень мал параметр Γ) значительно меньше, чем коэффициент α для возбужденных мод. Это связано

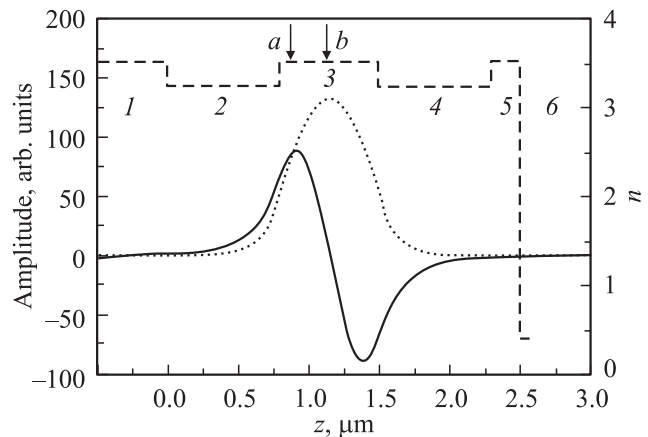


Рис. 1. Зависимость от координаты z (в направлении поперек p - n -перехода) действительной части коэффициента преломления n (штриховая линия), электрических полей в модах TE₁ (сплошная кривая) и TE₀ (пунктирная кривая). Стрелками показано оптимальное положение квантовых ям для генерации моды TE₁ (а) и TE₀ (b). Слои структуры: 1, 3, 5 — GaAs; 2 и 4 — InGaP; 6 — Au.

[†] E-mail: sanya@ipm.sci-nnov.ru

Таблица 1. Параметры слоев лазерной гетероструктуры 1

№ слоя	Название слоя	Состав слоя	Тип проводимости	Концентрация носителей, см ⁻³	Толщина слоя, мкм
1	Подложка	GaAs	<i>n</i>	$2 \cdot 10^{18}$	150
2	Буферный	GaAs	<i>n</i>	$(1-2) \cdot 10^{18}$	0.5
3	Ограничивающий	In _{0,49} Ga _{0,51} P	<i>n</i>	$(1-2) \cdot 10^{18}$	0.8
4	Волноводный	GaAs	Нелегированный		0.075
5	Активный (КЯ)	In _{0,13} Ga _{0,87} As	» »		0.01
6	Волноводный	GaAs	» »		0.5
7	Активный (КЯ)	In _{0,13} Ga _{0,87} As	» »		0.01
8	Волноводный	GaAs	» »		0.075
9	Ограничивающий	In _{0,49} Ga _{0,51} P	<i>p</i>	$(2-4) \cdot 10^{18}$	0.8
10	Контактный	GaAs	<i>p</i>	10^{19}	0.25

Таблица 2. Параметры слоев лазерной гетероструктуры 2

№ слоя	Название слоя	Состав слоя	Тип проводимости	Концентрация носителей, см ⁻³	Толщина слоя, мкм
1	Подложка	GaAs	<i>n</i>	$2 \cdot 10^{18}$	150
2	Буферный	GaAs	<i>n</i>	10^{17}	3
3	Ограничивающий	In _{0,49} Ga _{0,51} P	<i>n</i>	10^{18}	0.78
4	Волноводный	GaAs	Нелегированный	–	0.088
5	Активный (КЯ)	In _{0,22} Ga _{0,78} As	» »	–	0.01
6	Волноводный	GaAs	» »	–	0.102
7	Промежуточный	In _{0,49} Ga _{0,51} P	<i>p</i>	$2 \cdot 10^{18}$	0.1
8	Волноводный	GaAs	<i>p</i>	$2 \cdot 10^{18}$	0.4
9	Ограничивающий	In _{0,49} Ga _{0,51} P	<i>p</i>	$2 \cdot 10^{18}$	0.78
10	Контактный	GaAs	<i>p</i>	10^{19}	0.2

со следующим обстоятельством: чем больше номер моды, тем более глубоко проникает поле этой моды в сильно легированные обкладочные слои и подложку лазерного волновода. Например, для параметров лазера, приведенных в табл. 1 при оптимальном расположении квантовой ямы для генерации первой моды, ее коэффициент усиления на пороге g всего лишь в 1.5 раза меньше, чем коэффициент g для основной моды в этом лазере. Из-за небольшого различия этих коэффициентов усиления для первой и основной мод, возможна одновременная генерация обеих мод при такой конструкции лазерного диода.

Сравнение коэффициентов усиления на пороге для лазера, предназначенного для генерации основной моды, и для лазера, генерирующего первую моды, показывает, что g в лазере для генерации первой моды оказывается примерно в 1.5 раза выше. Следовательно, при такой конструкции волновода лазер, генерирующий первую моды, будет обладать значительно большим пороговым током, чем традиционный лазер на основной моде. Поэтому можно сделать заключение, что использование традиционной конструкции волновода для генерации моды первого порядка неэффективно.

В работе предложена и реализована новая конструкция волновода лазера, которая обеспечивает генерацию только первой моды при пороговом токе, сопостави-

мом с пороговым током лазера, предназначенного для генерации основной моды. Для достижения указанной цели в центральный слой лазерного волновода (GaAs) был добавлен тонкий слой материала обкладочных слоев

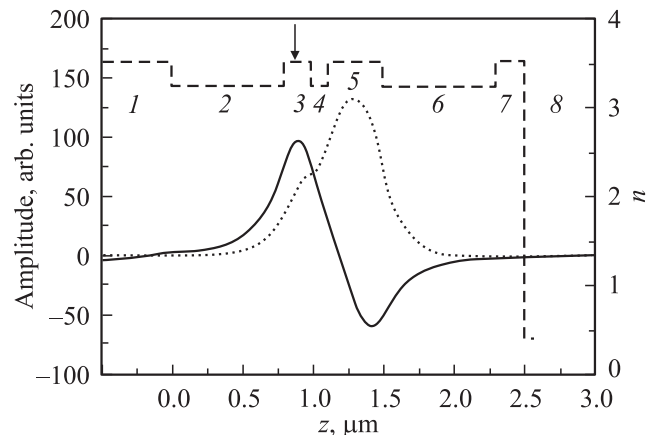


Рис. 2. Зависимость от координаты z (в направлении поперек p - n -перехода) действительной части коэффициента преломления n (штриховая линия) и электрических полей в модах TE_1 (сплошная кривая) и TE_0 (пунктирная кривая) для структуры 2. Стрелкой показано оптимальное положение квантовой ямы для генерации моды TE_1 . Слои структуры: 1, 3, 5, 7 — GaAs; 2, 4, 6 — InGaP; 8 — Au.

(InGaP) с меньшим показателем преломления n . Этот слой должен быть смещен от центра волновода (рис. 2) так, что центральный волноводный слой GaAs оказывается разделенным на широкую и узкую части.

В таком волноводе основная мода локализована в основном в широкой части волноводного слоя GaAs, а первая мода — в узкой части. В этом лазере квантовую яму разумно располагать в максимуме поля первой моды в узкой части волновода. Расчеты показывают, что для лазера с параметрами из табл. 2 величина Γ для первой моды увеличивается в 1.5 раза по сравнению с Γ для первой моды в обычной конструкции (см. рис. 1), а Γ для основной моды уменьшается в 2 раза по сравнению с Γ для основной моды в обычной конструкции. Однако внесение слоя InGaP, обладающего существенно большей шириной запрещенной зоны по сравнению с GaAs, приводит к необходимости сильного легирования широкой части волновода и тонкого слоя InGaP для протекания тока через p - n -переход. Это приводит к дополнительным потерям для всех мод, особенно для основной моды.

Из выражения (1) видно, что это приведет к более сильной дискриминации основной моды по сравнению с первой модой. Однако потери первой моды в таком волноводе будут тоже больше, чем в волноводе обычной конструкции. Проведенные расчеты показывают, что пороговый ток генерации первой моды в предложенной конструкции и пороговый ток генерации основной моды в оптимальной для нее конструкции должны быть примерно одинаковы.

3. Экспериментальные результаты

Две лазерные гетероструктуры InGaAs/GaAs/InGaP были выращены методом МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений) при атмосферном давлении. Одна из них представляла предложенную нами структуру для оптимальной генерации моды TE_1 (структура 2), и для сравнения с ней была выращена вторая структура (обычной конструкции, структура 1), которая также была предназначена для генерации моды TE_1 . Параметры слоев гетероструктур обычной и новой предложенной конструкции приведены в табл. 1 и 2 соответственно. В качестве квантовых ям использовались слои $In_xGa_{1-x}As$ толщиной 10 нм.

Лазерные диоды с шириной активной области 100 мкм были изготовлены путем химического травления контактного слоя вне активной полоски с последующей протонной имплантацией вскрытой поверхности InGaP. После раскалывания чипы напайвались на медные теплоотводы структурой вниз для работы лазеров в непрерывном режиме генерации. Зеркалами служили сколы граней (100). Длина резонатора была выбрана 1 мм.

На рис. 3 показаны ватт-амперные и спектральные характеристики гетеролазеров, изготовленных из структур 1 и 2. Для лучших образцов лазерных диодов из

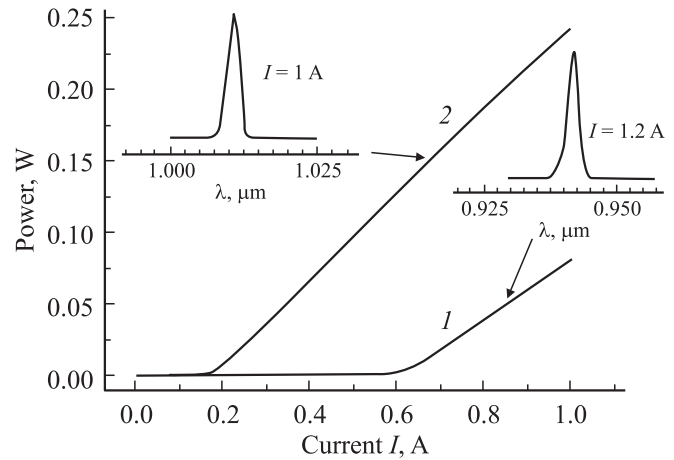


Рис. 3. Ватт-амперные характеристики исследуемых лазерных диодов. 1 — структура 1, 2 — структура 2. На вставках — спектральные характеристики.

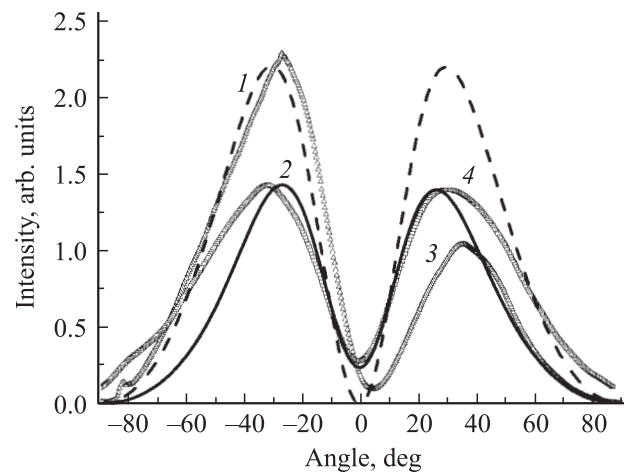


Рис. 4. Рассчитанные (1, 2) и измеренные (3, 4) диаграммы направленности излучения в плоскости, перпендикулярной p - n -переходу. 1, 3 — лазер 1; 2, 4 — лазер 2.

структуры 2 порог генерации составил 150 мА, дифференциальная квантовая эффективность с одной грани лазера — 28%. Для структуры 1 порог генерации — 600 мА, дифференциальная эффективность для лучших образцов не превышала 20%. Спектральные характеристики измерялись с помощью решеточного монохроматора МДР-23 при накачке лазеров постоянным током. На рис. 3 (на вставках) приведены спектральные зависимости интенсивности излучения лазеров из структур 1 и 2. Спектры излучения типичны для многомодовой в продольном направлении генерации.

Для исследования модового состава излучения лазеров были проведены измерения диаграмм направленности излучения, т.е. зависимостей интенсивности излучения лазерных диодов от угла в плоскости, перпендикулярной p - n -переходу. Диаграммы представлены на рис. 4. Как ясно из рисунка, интенсивность стиму-

лированного излучения лазера 2 имеет два максимума при углах $\pm 30^\circ$, положения и относительные амплитуды которых согласуются с полученными из расчета для моды первого порядка TE_1 . Можно отметить, что для структуры 1 интенсивность одного лепестка диаграммы направленности (со стороны подложки) больше интенсивности другого и существует только качественное совпадение с расчетной кривой. Вероятно, причина этого состоит в том, что (как было указано выше) лазер 1 генерирует две моды, основную и первую, вследствие близких порогов генерации для обеих мод.

4. Заключение

В работе получена и исследована генерация моды TE_1 в диодном лазере новой конструкции, центральная часть волновода которого содержит тонкий слой с меньшим показателем преломления. Данная конструкция лазера снижает конкуренцию первой и основной мод и обеспечивает одномодовую генерацию моды TE_1 при величине порогового тока, сравнимого с величиной порогового тока обычного лазера, генерирующего основную моду TE_0 .

Работа поддержана грантами CRDF (грант #RUE1-2657-NN-05), AFOSR, NSF, the Research Corporation, Отделения физических наук РАН (программа „Когерентное оптическое излучение полупроводниковых соединений и структур“), Президиума РАН (программа „Электромагнитные волны терагерцового диапазона“), Совета по поддержке ведущих научных школ Российской Федерации (грант 1744.2003.2), РФФИ (гранты № 06-02-81020, № 07-02-00486), Министерства образования РФ (BRHE, REC-NN-001, #Y1-P-01-06), NATO (SfP-973799 Semiconductors), президента РФ (МК-3344.2007.2).

Список литературы

- [1] M. Jager, G.I. Stegeman, M.C. Flipse, M. Diemeer, G. Mohlmann. *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 4139 (1996).
- [2] В.Я. Алёшкин, А.А. Афоненко, Н.Б. Звонков. *ФТП*, **35**, 1256 (2001).
- [3] А.А. Белянин, Д. Демпе, В.В. Кочаровский, Вл.В. Кочаровский, Д.С. Пестов, М.О. Скалли. *УФН*, **173**, 1015 (2003).
- [4] A.A. Biryukov, V.Ya. Aleshkin, S.M. Nekorkin, V.V. Kocharovsky, V.I.V. Kocharovsky. *J. Mod. Opt.*, **52**, 2323 (2005).
- [5] Х. Кейси, М. Паниш. *Лазеры на гетероструктурах* (М., Мир, 1981) т. 2, гл. 7, с. 204.

Редактор Л.В. Шаронова

Effective generation of the first waveguide mode in InGaAs/GaAs/InGaP heterolaser

A.A. Biryukov, B.N. Zvonkov, S.M. Nekorkin, V.Ya. Aleshkin⁺, A.A. Dubinov⁺, V.V. Kocharovsky^{*°}, V.I.V. Kocharovsky[°]

Research Physical-Technical Institute of the Nizhny Novgorod State University, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

⁺ Institute for Physics of Microstructures, Russian Academy of Sciences, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

^{*} Department of Physics, Texas A&M University, College Station, USA

[°] Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The first-order transverse mode (TE_1) generation in a new design InGaAs/GaAs/InGaP diode heterolaser with a thin layer InGaP in the central part of the waveguide has been investigated. This laser design reduced first-order and fundamental modes competition and supports TE_1 mode generation at a threshold current value, which comparable with a threshold current value of a fundamental mode TE_0 generative conventional laser.