

Оптимизация гетеролазеров InGaP/GaAs/InGaAs с туннельно-связанными волноводами

© И.В. Самарцев^{†¶}, В.Я. Алешкин^{*†}, Н.В. Дикарева⁺, А.А. Дубинов^{*‡},
Б.Н. Звонков⁺, Д.А. Колпаков⁺, С.М. Некоркин⁺

⁺ Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

^{*} Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603087 Нижний Новгород, Россия

[‡] Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 22 апреля 2015 г. Принята к печати 12 мая 2015 г.)

Проведена оптимизация лазерных структур InGaP/GaAs/InGaAs с туннельно-связанными волноводами с целью сужения диаграммы направленности излучения. В созданных лазерах расходимость излучения в плоскости, перпендикулярной $p-n$ -переходу, уменьшена до 28° .

1. Введение

Полупроводниковые лазеры с длиной волны излучения около 1 мкм применяются для накачки мощных оптических систем, а также в волоконно-оптических линиях связи, что требует от них высокой мощности излучения. Важным параметром является расходимость излучения в плоскости, перпендикулярной $p-n$ -переходу, так как она определяет эффективность ввода излучения в оптические схемы.

В настоящее время выделяют три основных пути решения данной проблемы: применение широких и сверхшироких волноводов [1,2], использование вытекающей моды [3,4], разработка асимметричных алюминийсодержащих гетероструктур [5–7]. Применение широких и сверхшироких волноводов позволяет получить достаточно высокую мощность полупроводниковых лазеров, однако увеличение ширины волновода ухудшает оптическую селективность структуры и способствует появлению волноводных мод высокого порядка. Одной из разновидностей лазеров со сверхшироким волноводом являются лазеры с волноведущими квантовыми ямами [8,9]. Волноводы таких лазеров обладают отличной модовой селективностью, однако из-за небольшого фактора оптического ограничения пороговые плотности тока в таких лазерах велики. В лазерах с вытеканием излучения в подложку можно добиться сверхузкой диаграммы направленности, однако эти лазеры обладают большим пороговым током и заметным поглощением излучения в легированной подложке. Применение асимметричных алюминийсодержащих гетероструктур способствует снижению порога катастрофической деградации лазерных зеркал вследствие большой скорости окисления алюминия. Тем самым ужесточаются требования, предъявляемые к материалам и способу нанесения диэлектрических покрытий. В этом отношении перспективны лазеры InGaP/GaAs, в частности на гетероструктурах

с туннельно-связанными волноводами, в которых возможно компенсировать проблему ограниченной растворимости компонентов твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$, при этом сохраняются положительные качества структур с широкими и сверхширокими волноводами. Впервые такие лазеры были представлены в работах [10,11], однако расходимость излучения в плоскости, перпендикулярной $p-n$ -переходу, оставалась все еще довольно большой ($\sim 36^\circ$), что сдерживает применение таких лазеров в ряде современных приложений.

В настоящей работе была проведена оптимизация лазерных структур InGaP/GaAs/InGaAs с туннельно-связанными волноводами с целью улучшения их пространственных и электрофизических характеристик. Оптимизация коснулась конструкции ограничительных слоев и активной области.

2. Расчет параметров лазерной структуры

Был проведен расчет порогового усиления (методом, изложенным в [12]) для основных четырех волноводных TE мод (TE_0-TE_3 , см. рис. 1) в зависимости от ширины центрального (активного) волновода d при фиксированных значениях толщин ограничительных слоев и пассивных волноводов (см. таблицу). Длина резонатора полагалась равной 1 мм, коэффициенты отражения зеркал — 0.95 и 0.05. Для каждой из мод существует оптимальная толщина d , при которой пороговое усиление минимально. Из рисунка видно, что при выбранном диапазоне толщин d пороговое усиление достигает минимального значения для мод TE_0 (475 см^{-1} при $d = 0.7 \text{ мкм}$) и TE_3 (5250 см^{-1} при $d = 0.775 \text{ мкм}$). Минимальное значение порогового усиления в основном определяется максимальным фактором оптического ограничения Γ . При уменьшении d от оптимального значения для данной моды Γ уменьшается из-за уменьшения локализации этой моды в центральном волноводном слое (значительная часть моды располагается в пассивных волноводных

[¶] E-mail: woterbox@mail.ru

Параметры лазера с туннельно-связанными волноводами

Номер слоя	Слой	Название слоя	Толщина, мкм	Легирование, см ⁻³
1	<i>n</i> -GaAs	Буферный	0.54	10 ¹⁸
2	<i>n</i> -In _{0.49} Ga _{0.51} P	Ограничивающий	0.66	2.5 · 10 ¹⁷
3	<i>n</i> -GaAs	Пассивный волновод	0.67	7 · 10 ¹⁷
4	<i>n</i> -In _{0.49} Ga _{0.51} P	Ограничивающий	0.31	1.6 · 10 ¹⁷
5	<i>i</i> -GaAs	Активный волновод	0.28	–
6	<i>i</i> -InGaAs	Квантовая яма	0.009	–
7	<i>i</i> -GaAs	Активный волновод	0.1	–
8	<i>i</i> -InGaAs	Квантовая яма	0.009	–
9	<i>i</i> -GaAs	Активный волновод	0.28	–
10	<i>p</i> -In _{0.49} Ga _{0.51} P	Ограничивающий	0.31	8.3 · 10 ¹⁸
11	<i>p</i> -GaAs	Пассивный волновод	0.67	1.9 · 10 ¹⁸
12	<i>p</i> -In _{0.49} Ga _{0.51} P	Ограничивающий	0.33	8.3 · 10 ¹⁸
13	<i>p</i> -In _{0.49} Ga _{0.51} P	Ограничивающий	0.33	10 ¹⁹
14	<i>p</i> -GaAs	Покровный	0.3	10 ¹⁹

слоях). При увеличении d от оптимального значения для данной моды Γ тоже уменьшается из-за уменьшения абсолютной величины электрического поля в моде в области квантовых ям.

Кроме того, была рассчитана ширина диаграммы направленности (ϑ) основной моды в плоскости, пер-

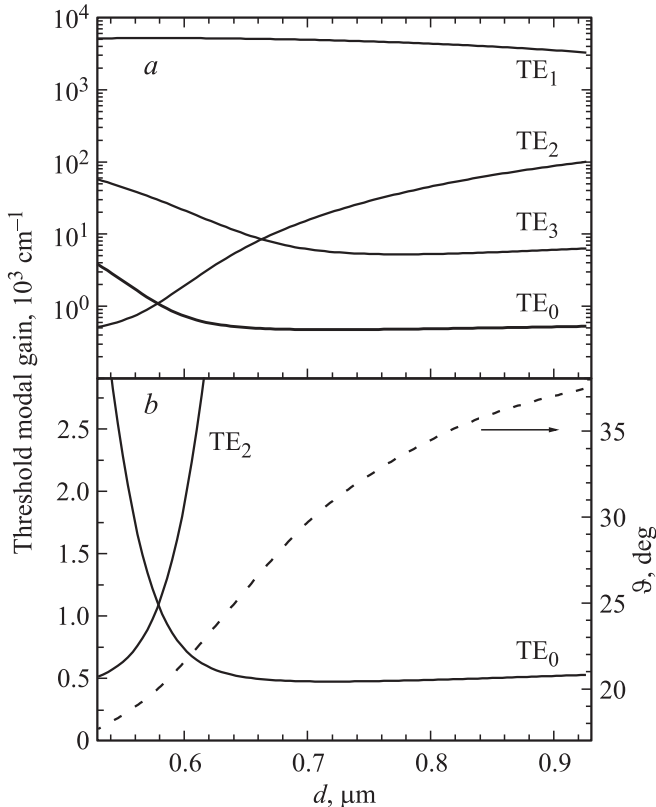


Рис. 1. Зависимости порогового коэффициента усиления для основных четырех волноводных мод TE₀–TE₃ (а, б) и ширины диаграммы направленности на полувысоте ϑ для основной моды TE₀ (б) от ширины центрального волновода d .

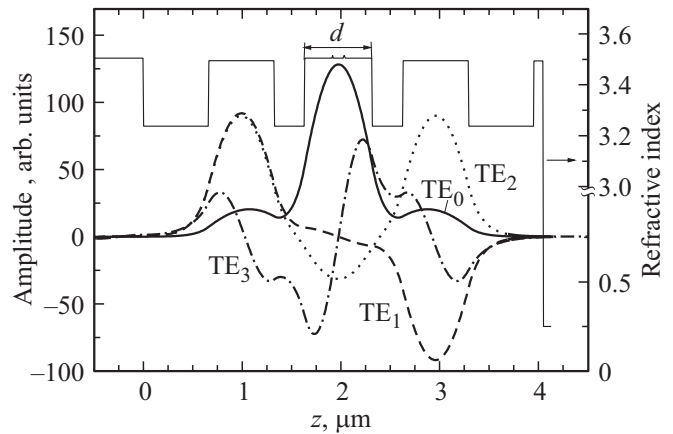


Рис. 2. Зависимости показателя преломления и распределения электрического поля четырех основных TE мод (TE₀–TE₃) от координаты z в направлении роста лазерной структуры.

пендикулярной p – n -переходу. Отметим, что толщина d равняется суммарной толщине слоев 5–9, приведенных в таблице. Показатели преломления слоев при расчете брались равными 3.51 для GaAs и 3.24 для In_{0.49}Ga_{0.51}P при длине волны 1 мкм [13]. Расчетные зависимости показателя преломления и распределения электрического поля четырех основных TE мод структуры с туннельно-связанными волноводами приведены на рис. 2.

В работе [10] было показано, что толщины активных и пассивных волноводов следует выбирать на основе компромисса между сужением диаграммы направленности и возможностью селекции мод. С уменьшением толщины центрального (активного) волновода d при фиксированных значениях толщин остальных слоев происходит увеличение доли электрического поля моды TE₀ в пассивных волноводах. Это приводит к эффективному увеличению области распространения моды TE₀, а следовательно, к сужению диаграммы направленности (рис. 1, б). В настоящей работе в результате опти-

мизации толщина центрального (активного) волновода выбрана равной 0.68 мкм. Из рис. 1 видно, что при таком значении d должно наблюдаться близкое к минимальному значению порогового усиления основной моды и достаточно узкая диаграмма направленности. При этом порог усиления для остальных мод остается достаточно высоким, что должно обеспечивать высокую селективность волновода (приводить к одномодовой генерации). Расчетное значение расходимости излучения в плоскости, перпендикулярной p – n -переходу, составило $\vartheta = 28^\circ$.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Исследуемые лазерные структуры InGaP/GaAs/InGaAs были выращены методом МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений) при атмосферном давлении в горизонтальном кварцевом реакторе на подложке n -GaAs. По сравнению с конструкцией, представленной в работе [11], были уменьшены толщина активного волновода и число квантовых ям в активной области. Отношение толщин пассивного и активного волновода близко к единице. Кроме этого, была увеличена в 1.4 раза толщина ограничивающих n - и p -слоев $In_{0.49}Ga_{0.51}P$ (см. таблицу).

На основе выращенных гетероструктур были изготовлены лазерные диоды с шириной полоскового контакта 100 мкм и длиной резонатора 1 мм. После нанесения отражающих (отражение 95%) и просветляющих (отражение 5%) покрытий структура монтировалась на медный теплоотвод.

Спектральные, пространственные и электрофизические характеристики получены при комнатной температуре в непрерывном режиме накачки.

Результаты исследования спектральных характеристик показывают наличие устойчивой лазерной генерации на длине волны 1.007 мкм (рис. 3). Характерная картина дальнего поля при постоянном режиме накачки в

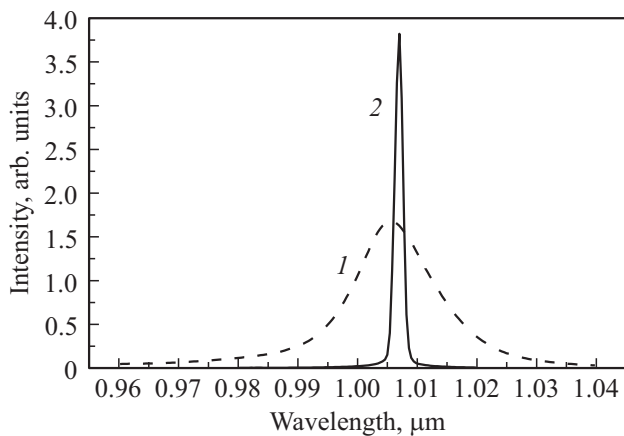


Рис. 3. Спектры излучения лазера до порога при токе 0.2 А (1) и после порога при токе 0.26 А (2).

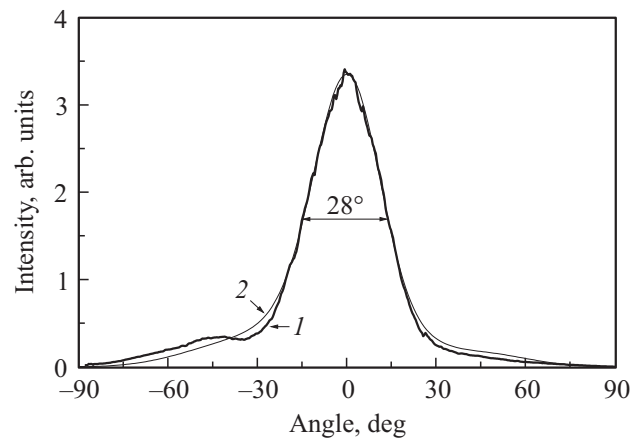


Рис. 4. Экспериментальная (1) и теоретическая (2) диаграммы направленности излучения в плоскости, перпендикулярной p – n -переходу, при непрерывном режиме накачки (ток 1.5 А).

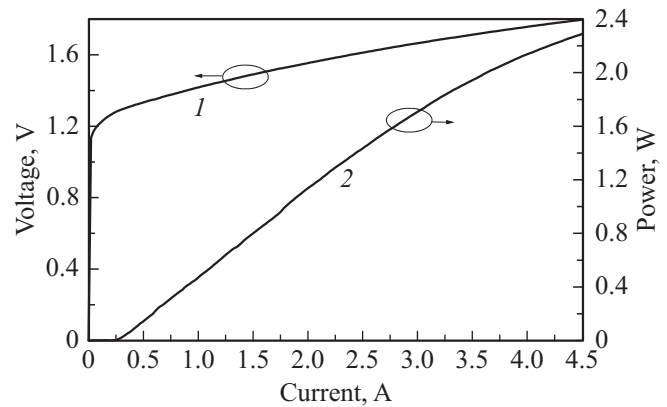


Рис. 5. Вольт-амперная (1) и ватт-амперная (2) характеристики лазера при комнатной температуре.

плоскости, перпендикулярной p – n -переходу, для таких лазеров показана рис. 4. Ширина диаграммы направленности на полувысоте составила 28° , что хорошо согласуется с расчетным значением. Из рис. 4 видно, что экспериментальная диаграмма направленности — асимметричная. Асимметрию можно объяснить генерацией в лазере дополнительно моды TE_3 , кроме основной моды, что подтверждается и теоретическим расчетом (рис. 4). Для согласования с экспериментальными результатами в расчете диаграммы направленности на рис. 4 интенсивность моды TE_3 полагалась на 2 порядка меньше интенсивности основной моды. Для использованных параметров структуры генерация остальных мод маловероятна (рис. 1).

Результаты измерения вольт-амперной и ватт-амперной характеристик представлены на рис. 5. Из рис. 5 видно, что пороговый ток составляет 0.25 А, а излучаемая мощность лазеров в непрерывном режиме накачки составляет 2.3 Вт при токе 4.5 А, дифференциальная квантовая эффективность равна 53%.

4. Заключение

Таким образом, проведенная оптимизация лазера с туннельно-связанными волноводами позволила уменьшить расходимость излучения в плоскости, перпендикулярной p – n -переходу, до 28° по сравнению с ранее изготовленными лазерами подобной конструкции [10,11].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 14-02-31287 мол_а, 15-42-02327 р_поволжье_а).

Список литературы

- [1] С.О. Слипенко, А.А. Подоскин, Д.А. Винокуров, А.Д. Бондарев, В.А. Капитонов, Н.А. Пихтин, П.С. Копьев, И.С. Тарасов. ФТП, **47** (8), 1082 (2013).
- [2] A. Pietrzak, P. Crump, H. Wenzel, G. Erbert, F. Bugge, G. Tränkle. J. Select. Topics. Quant. Electron., **17**, 1715 (2011).
- [3] В.И. Швейкин, В.А. Геловани. Квант. электрон., **32** (8), 683 (2002).
- [4] В.А. Геловани, А.П. Скороходов, В.И. Швейкин. *Высокомощные диодные лазеры нового типа* (М., URSS: КомКнига, 2005).
- [5] B.S. Ryvkin, E.A. Avrutin. J. Appl. Phys., **98**, 026 107 (2005).
- [6] D.R. Scifers, W. Streifer, R.D. Burnham. Appl. Phys. Lett., **29**, 23 (1976).
- [7] В.Я. Алешкин, Т.С. Бабушкина, А.А. Бирюков, А.А. Дубинов, Б.Н. Звонков, М.Н. Колесников, С.М. Некоркин. Квант. электрон., **40** (10), 855 (2010).
- [8] В.Я. Алешкин, Н.В. Дикарева, А.А. Дубинов, Б.Н. Звонков, М.В. Карзанова, К.Е. Кудрявцев, С.М. Некоркин, А.Н. Яблонский. Квант. электрон., **43** (5), 401 (2013).
- [9] В.Я. Алешкин, А.А. Афоненко, Н.В. Дикарева, А.А. Дубинов, К.Е. Кудрявцев, С.В. Морозов, С.М. Некоркин. ФТП, **47** (11), 1486 (2013).
- [10] И. А. Авруцкий, Е.М. Дианов, Б.Н. Звонков, Н.Б. Звонков, И.Г. Малкина, Г.А. Максимов, Е.А. Ускова. Квант. электрон., **24** (2), 123 (1997).
- [11] Н.Б. Звонков, С.А. Ахлестина, А.В. Ершов, Б.Н. Звонков, Г.А. Максимов, Е.А. Ускова. Квант. электрон., **26** (3), 217 (1999).
- [12] Х. Кейси, М. Паниш. *Лазеры на гетероструктурах* (М., Мир, 1981).
- [13] O. Madelung. *Semiconductors: Data Handbook* (Springer-Verlag, 2003).

Редактор Л.В. Шаронова

Optimization of InGaP/GaAs/InGaAs heterolasers with tunnel-coupled waveguides

I.V. Samartsev⁺, V.Y. Aleshkin^{*‡}, N.V. Dikareva⁺, A.A. Dubinov^{*‡}, B.N. Zvonkov⁺, D.A. Kolpakov⁺, S.M. Nekorkin⁺

⁺ Physicotechnical Research Institute, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

^{*} Institute for Physics of Microstructures, Russian Academy of Sciences, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

[‡] Nizhny Novgorod State University, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract Optimization of InGaP/GaAs/InGaAs laser structures with tunnel-coupled waveguides was done to reduce the directivity diagram. The width of the directivity diagram in the plane, normal to p – n -junction, is reduced to 28° in the lasers produced.