

Полупроводниковые лазеры с асимметричным периодическим оптически связанным волноводом на длину волны излучения 1.5–1.6 мкм

О.О.Багаева, А.И.Данилов, А.В.Иванов, В.Д.Курносков, К.В.Курносков, Ю.В.Курнявко, М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк, В.И.Романцевич, Ю.Л.Рябоштан, В.А.Симаков, В.Н.Светогоров, Р.В.Чернов

Разработаны мощные полупроводниковые лазеры с асимметричным периодическим оптически связанным волноводом (длина волны излучения 1.5–1.6 мкм) и экспериментально исследованы их вольт-амперные, ватт-амперные и спектральные характеристики. Проведено сравнение характеристик указанных лазеров и традиционных лазеров на основе двойных гетероструктур раздельного ограничения. Показано, что разработанные лазеры имеют меньшую расходимость излучения и практически такие же пороговые и мощностные характеристики, что и обычные лазеры с резонатором Фабри–Перо. Разработанные лазеры с длиной резонатора 1.6 мм и шириной мезаполоскового контакта 3 мкм, установленные в корпус диаметром 11 мм, при токе накачки не более 700 мА генерируют не менее 200 мВт мощности при расходимости излучения 25–35°, против расходимости 45°, свойственной обычным лазерам.

Ключевые слова: полупроводниковый лазер, периодический оптически связанный волновод, вольт-амперная, ватт-амперная и спектральная характеристики, длина волны 1.5–1.6 мкм.

1. Введение

В настоящее время усилия разработчиков направлены на увеличение выходной оптической мощности излучения полупроводниковых лазеров в диапазоне длин волн 1.5–1.6 мкм. При этом в ряде практических применений требуется сочетание высокой выходной мощности и узкой диаграммы направленности лазеров.

Лазерные диоды (ЛД) данного спектрального диапазона на основе двойных гетероструктур раздельного ограничения AlGaInAs/InP обладают большой дифференциальной квантовой эффективностью и высокой температурной стабильностью. Однако их расходимость по быстрой оси составляет, как правило, ~45–50° по уровню 0.5 [1]. Традиционный подход уменьшения расходимости благодаря использованию расширенного волновода, хорошо зарекомендовавший себя для лазеров спектрального диапазона 0.8–1.1 мкм, в рассматриваемом случае не дает нужных результатов; зачастую, удается увеличить выходную мощность лазеров, но расходимость излучения при этом снижается незначительно.

Так, в работе [2] показано, что лазеры с $\lambda = 1.5–1.6$ мкм, с длиной резонатора 1.6 мм и шириной мезаполоски 3 мкм, установленные в корпус диаметром 11 мм, генерируют мощность до 300 мВт и более, а при сборке на С-маунтах – свыше 400 мВт. Изготовленные на основе той же гетероструктуры, что и в работе [2], лазеры с дли-

ной резонатора 2.6 мм и шириной мезаполоски 100 мкм, собранные на С-маунте, генерировали непрерывное излучение мощностью более 4 Вт при токе накачки 15 А [3]. Расходимость излучения лазеров в вертикальной плоскости по уровню 0.5 интенсивности составила ~45° [2, 3], причем эти лазеры были изготовлены на основе асимметричной гетероструктуры с расширенным волноводом. Мощные лазеры на основе другой конструкции гетероструктуры AlGaInAs/InP с расширенным волноводом и длиной волны излучения 1.5–1.6 мкм имели расходимость излучения 48° по уровню 0.5 [4]. Таким образом, необходим поиск альтернативных конструкций гетероструктур для получения мощных ЛД на основе AlGaInAs/InP с узкой диаграммой направленности.

Использование периодических оптически связанных волноводов позволяет существенно уменьшить расходимость излучения ЛД. Так, в работе [5] сообщается о сужении диаграммы направленности (по уровню 0.5) с 44 до 11.2° благодаря применению системы из четырех пассивных волноводов с периодом 1.0 мкм в лазерах с $\lambda = 850$ нм. Использование системы из шестнадцати пассивных волноводов с периодом 0.29 мкм позволило уменьшить расходимость с 46 до 23° по быстрой оси для лазеров, излучающих на длине волны 980 нм [6].

Для создания мощных ЛД важно обеспечить эффективный отвод тепла от активной области, в связи с чем часто отдается предпочтение асимметричным гетероструктурам, в которых активная область располагается по возможности ближе к поверхности [7]. При этом целесообразно размещать пассивный волновод со стороны подложки (n-стороны). Такой подход позволил снизить до 22° расходимость излучения ЛД с $\lambda = 1040$ нм [8].

Для уменьшения расходимости излучения лазера с периодическими оптически связанными волноводами в последнее время используется предложенная в работе [9] концепция, основанная на включении в состав гетеро-

О.О.Багаева, А.И.Данилов, А.В.Иванов, В.Д.Курносков, К.В.Курносков, Ю.В.Курнявко, М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк, В.И.Романцевич, Ю.Л.Рябоштан, В.А.Симаков, В.Н.Светогоров, Р.В.Чернов. АО «НИИ "Полюс" им. М.Ф.Степеля», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1; e-mail: webeks@mail.ru

Поступила в редакцию 25 февраля 2020 г., после доработки – 11 марта 2020 г.

структуры лазера одномерного фотонного кристалла (ФК), представляющего собой периодическую структуру из чередующихся слоев с различными показателями преломления с нарушением периодичности (дефект), которая позволяет получить излучение с низкой расходимостью в плоскости, перпендикулярной р–n-переходу. В этом случае активную область располагают в пределах дефекта, а сама периодическая структура ФК находится со стороны подложки.

Для лазеров с одномерным ФК ($\lambda = 645$ нм) в импульсном режиме получена выходная мощность излучения 20 Вт при токе накачки 18 А (ширина мезаполоскового контакта – 100 мкм, длина – 1500 мкм). Расходимость излучения в перпендикулярной плоскости составила $7-8^\circ$, против 17° для обычного лазера. Лазер с мезаполосковой шириной 4 мкм и длиной 1500 мкм генерировал непрерывное излучение мощностью 120 мВт при токе накачки 0.23 А с дифференциальной эффективностью 0.83 Вт/А и угловой расходимостью $\sim 6.5^\circ$. Продемонстрированы ИК лазеры (980 нм) с расходимостью 4.2° [10].

В работе [11] сообщалось о генерации лазера ($\lambda = 980$ нм) с шириной мезаполоски 7 мкм и длиной кристалла 3 мм; мощность излучения в одной моде составила 2 Вт при токе накачки 1.5 А, угловая расходимость – 7.2° в горизонтальной и 10.3° в вертикальной плоскости.

Мощный ЛД с фотонным кристаллом и оптимизированной структурой рассмотрен в работе [12]. В импульсном режиме (40 мкс, 40 Гц) при токе накачки 12 А получена мощность излучения 10 Вт при расходимости 10.8° в перпендикулярной и 9.6° в горизонтальной плоскости по уровню 0.5. В непрерывном режиме работы достигнута мощность 5.75 Вт при токе 8 А и расходимости 10.5 и 5.7° соответственно.

Как показал обзор литературы, концепция асимметричного периодического оптически связанного волновода весьма перспективна для уменьшения расходимости излучения мощных ЛД. Вместе с тем представленные в литературе результаты относятся к лазерам спектрального диапазона 0.63 – 1.1 мкм, а длины волн 1.5 – 1.6 мкм не рассматривались.

В настоящей работе описанные подходы по использованию периодических оптически связанных волноводов применены для создания лазеров спектрального диапазона 1.5–1.6 мкм с узкой диаграммой направленности. Впервые разработаны и исследованы мощные лазеры с асимметричным периодическим (многослойным) оптически связанным волноводом. За основу взята гетероструктура, описанная в [2], волновод со стороны подложки (n-волновод) структуры заменялся на периодический волновод с чередующимися слоями с высоким и низким показателем преломления (4 и 7 периодов).

2. Эксперимент и обсуждение результатов

Были выращены три гетероструктуры (типа А, В и С). Все структуры имели две напряженно-компенсированные квантовые ямы с остаточным напряжением +1.4%. Для улучшения отвода тепла активная область располагалась в активном волновом в непосредственной близости от р-эмиттера. Гетероструктура типа А содержала расширенный асимметричный волновод, описанный в [2]. В гетероструктуре типа В волновод с n-стороны был заменен на семь пар периодически повторяющихся слоев с низким и высоким коэффициентом преломления (период –

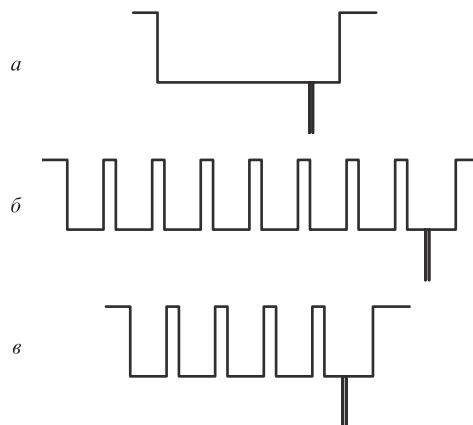


Рис.1. Схематическое изображение зонных диаграмм волноводной части исследованных лазеров типа А (а), В (б) и С (в).

0.43 мкм). Гетероструктура типа С повторяла гетероструктуру типа В, но содержала всего лишь четыре пары слоев с тем же периодом. Схематические изображения зонных диаграмм исследованных гетероструктур представлены на рис.1.

На основе гетероструктур были изготовлены ЛД мезаполосковой конструкции с шириной контакта 3 мкм и длиной резонатора $L = 1.6$ мм. На грани резонатора наносились отражающие и просветляющие покрытия $\sim 100\%$ и 5% соответственно. Как и в [2], монтаж ЛД осуществлялся на медные контактные пластины. Технология металлизации контактных пластин была одинаковой. ЛД напаялись на индий активной областью вниз. Контактная пластина с ЛД устанавливалась в цилиндрический корпус диаметром 11 мм. Корпус излучателя монтировался на радиаторе, температура которого с помощью электронной схемы стабилизации поддерживалась постоянной при 20, 30 и 40°C ($T = T_0 + \Delta T$, где $T_0 = 20^\circ\text{C}$ и $\Delta T = 0, 10$ и 20°C). При этих фиксированных температурах и постоянном токе накачки измерялись вольт-амперные (ВАХ) и ватт-амперные характеристики (ВтАХ) лазерных диодов.

На рис.2 представлены ВАХ и ВтАХ лазеров типа А и В при температуре 20 и 40°C . Видно, что ВтАХ лазеров типа В лежат несколько выше ВтАХ лазеров типа А. Отметим, что порог генерации лазеров типа В ниже, чем у лазеров типа А. При токах накачки 700 мА выходная мощность излучения лазеров с одного зеркала превышала 200 мВт. ВАХ лазеров различались заметнее – лазеры типа В имели большее падение напряжения по сравнению с лазерами типа А, что приводило к насыщению ВтАХ лазеров В при токах, превышающих 700 мА.

Подобное поведение характеристик свойственно и лазерам типа С – их порог генерации ниже, чем у лазеров типа А. При токе накачки 700 мА выходная мощность излучения с одного зеркала превышала 200 мВт, однако расходимость излучения была больше, чем у лазеров типа В.

Спектральные характеристики лазера типа В в диапазоне температур 20– 50°C ведут себя подобно спектральным характеристикам лазеров типа А – наблюдается один максимум длины волны излучения, который сдвигается в длинноволновую область при увеличении тока накачки и температуры (рис.3).

Отметим, что мощности излучения, полученные в настоящей работе, не уступают результатам, полученным в [2], однако это справедливо для токов накачки не выше 700 мА и мощностей излучения, не превышающих 200 мВт.

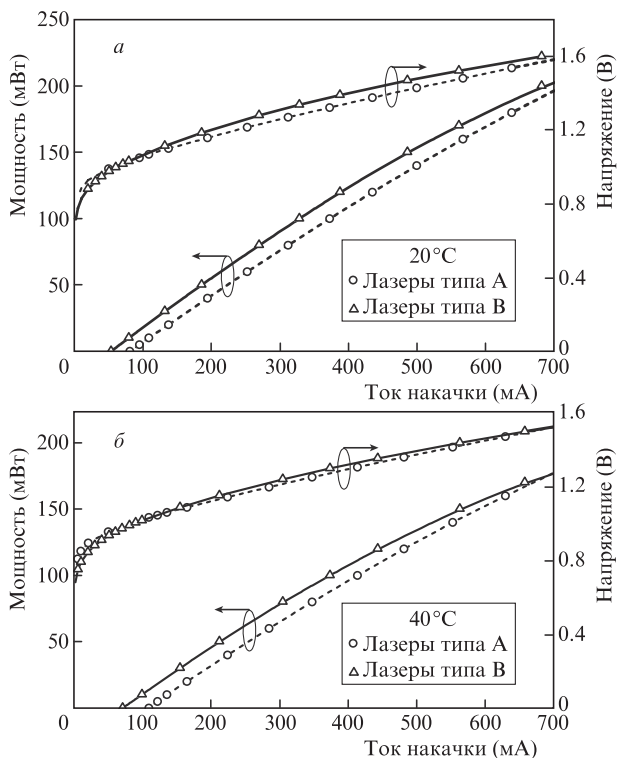


Рис.2. ВАХ и ВtАХ лазеров типов А и В при $T = 20$ (а) и 40°C (б).

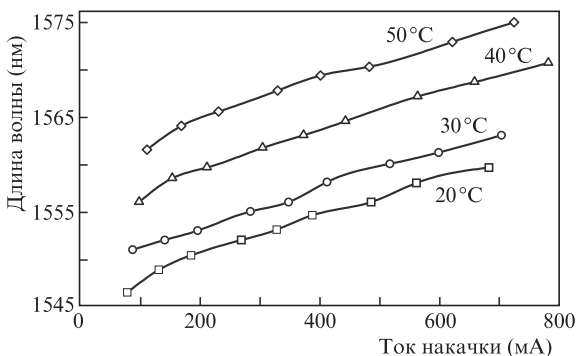


Рис.3. Спектральные характеристики лазера типа В при различных температурах.

Исследования расходимости излучения ЛД трех типов в двух плоскостях показали, что расходимость излучения лазеров В и С в плоскости, перпендикулярной р–п-переходу, при мощностях излучения 50 и 100 мВт находится в диапазоне $25\text{--}35^\circ$.

На рис.4 представлены экспериментальная и расчетная зависимости распределения излучения ЛД типа В в дальней зоне при мощности излучения $P = 100$ мВт. Видно, что экспериментально измеренная расходимость излучения хорошо совпадает с расчетными значениями, полученными согласно [13].

В табл.1 приведены средние значения расходимости излучения перпендикулярно (\perp) и параллельно (\parallel) р–п-переходу для ЛД с $L = 1.6$ мм при $P = 50$ и 100 мВт и различных токах накачки I , а также отношения мощностей поляризованного излучения.

Из сравнения представленных в табл.1 значений расходимости излучения лазера типа А ($\theta_{\perp} \approx 45^\circ$ и $\theta_{\parallel} \approx 6.6^\circ$) с аналогичными характеристиками лазеров типа В и С ($\theta_{\perp} \approx 30.4^\circ$ и $\theta_{\parallel} \approx 7.3^\circ$) видно, что введение периодичес-

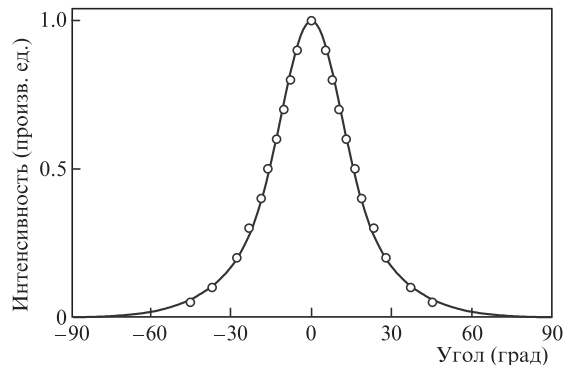


Рис.4. Экспериментальная (точки) и расчетная (кривая) зависимости распределения излучения в дальней зоне при $P = 100$ мВт.

Табл.1. Выходные характеристики лазеров различных типов.

Тип ЛД	P/I (мВт/мА)	Расходимость по уровню 0.5 (град)		Степень поляризации	
		\perp	\parallel	P_{\max}/P_{\min}	$10\lg(P_{\max}/P_{\min})$ (дБ)
А	50/220	45.1	6.8	269	24.3
	100/390	45.3	7.6	646	28.1
В	50/183	30.4	7.3	676	28.3
	100/321	31.7	7.7	661	28.2
С	50/196	31.3	7.3	282	24.5
	100/328	32.1	7.9	372	25.7

Примечание: P_{\max} и P_{\min} – максимальные и минимальные значения мощности излучения на выходе поляризатора для двух его взаимно перпендикулярных положений.

кого оптически связанного волновода способствует уменьшению расходимости излучения в плоскости, перпендикулярной р–п-переходу, при практически неизменной расходимости излучения в плоскости, параллельной р–п-переходу; причем увеличение количества периодов многослойного волновода позволяет достигнуть более узкой диаграммы направленности.

Итак, показано, что использование лазеров с асимметричным периодическим оптически связанным волноводом позволяет уменьшить расходимость излучения с 45° до $25\text{--}35^\circ$ при практически неизменных пороговых и мощностных характеристиках, свойственных обычным лазерам с резонатором Фабри–Перо.

1. Иванов А.В., Курносос В.Д., Курносос К.В., Мармалюк А.А., Романцевич В.И. и др. *Квантовая электроника*, **37**, 545 (2007) [*Quantum Electron.*, **37**, 545 (2007)].
2. Горлачук П.В., Иванов А.В., Курносос В.Д., Мармалюк А.А. и др. *Квантовая электроника*, **48**, 495 (2018) [*Quantum Electron.*, **48**, 495 (2018)].
3. Багаева О.О., Данилов А.И., Иванов А.В. и др. *Квантовая электроника*, **49**, 649 (2019) [*Quantum Electron.*, **49**, 649 (2019)].
4. Горлачук П.В., Рябоштан Ю.Л., Мармалюк А.А., Курносос В.Д., Курносос К.В. и др. *ФТП*, **48**, 100 (2014).
5. Chen Y.C., Waters R.G., Dalby R.J. *Electron. Lett.*, **26**, 1348 (1990).
6. Chen Y.K., Wu M.C., Hobson W.S., Chin M.A., Choquette K.D., Freund R.S., Sergent A.M. *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 2784 (1991).
7. Kaul T., Erbert G., et al. *Semicond. Sci. Technol.*, **33**, 035005 (2018).
8. Gordeev N.Yu., Payusov A.S., et al. *Opt. Lett.*, **40**, 2150 (2015).
9. Ledentsov N.N., Shchukin V.A. *Proc. SPIE Opt. Eng.*, **41**, 3193 (2002).
10. Maximov M.V., Shemyakov Y.M., et al. *Proc. SPIE*, **6115**, 611513 (2006).
11. Zhao S., Wang Y., et al. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **29**, 2005 (2017).
12. Liu L., Qu H., Liu Y., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **105**, 231110 (2014).
13. Кейси Х., Паниш М. *Лазеры на гетероструктурах* (М.: Мир, 1981, т.1).