

Экспериментальные исследования мощных одномодовых лазеров с асимметричным волноводом с длиной волны излучения 1.5–1.6 мкм

П.В.Горлачук, А.В.Иванов, В.Д.Курносков, К.В.Курносков, А.А.Мармалюк, В.И.Романцевич, В.А.Симаков, Р.В.Чернов

Экспериментально исследованы вольт-амперные, ватт-амперные и спектральные характеристики мощных одномодовых полупроводниковых лазеров с длиной волны излучения 1.5–1.6 мкм. Показано, что для лазера с длиной резонатора 1.6 мм и шириной мезаполоски 3 мкм, установленного в корпус диаметром 11 мм, возможно получение мощности излучения свыше 300 мВт. При сборке лазеров на С-маунтах можно достичь мощности излучения, превышающей 400 мВт. При сборке лазеров в стандартном корпусе DIL-14 pin на выходе одномодового волоконно-оптического кабеля (ВОК) мощность излучения составляла не менее 100 мВт, что с учетом потерь 50% при вводе излучения в ВОК соответствует мощности излучения лазерного диода более 200 мВт. Показано, что дифференциальное сопротивление лазера зависит не только от длины лазерного кристалла, но и от варианта его сборки (в медных корпусах диаметром 11 мм или на С-маунтах). Представлены зависимости длины волны и ширины спектров излучения от тока накачки и температуры окружающей среды. Определены характеристические температуры лазерного диода.

Ключевые слова: мезаполосковая конструкция, мощный лазерный диод, одномодовый режим генерации, характеристики лазерного диода, ширина спектра излучения.

1. Введение

В настоящее время резко возрос интерес к мощным лазерным диодам (ЛД), излучающим в диапазоне длин волн 1.4–1.6 мкм. В первую очередь это связано с их применением в волоконно-оптических линиях связи для передачи информации, в качестве источников накачки волоконно-оптических усилителей, легированных Er^{3+} , и рамановских волоконных усилителей, работающих в диапазоне длин волн 1.4–1.6 мкм. Для таких применений необходимы: стабильная выходная рабочая мощность излучения ЛД на уровне сотен милливатт, стабильная пиковая длина волны излучения, высокая излучательная эффективность ЛД и эффективность ввода его излучения в одномодовое оптическое волокно. Мощные полупроводниковые лазеры нашли широкое применение в медицине, в системах мониторинга окружающей среды, в системах обнаружения промышленных газов. Считается, что излучение с длинами волн 1.5–1.6 мкм не опасно для глаз человека.

В работе [1] сообщалось о разработке мощных одномодовых ЛД на основе квантово-размерных InGaAsP/InP -гетероструктур ($\lambda = 1.3–1.6$ мкм). Методом МОС-гидридной эпитаксии разработана InGaAsP/InP -гетероструктура раздельного ограничения со ступенчатым волноводом с пороговой плотностью тока 180 А/см^2 и внутренним квантовым выходом стимулированного излучения 93%–99%. Проведена оптимизация мезаполосковой конструкции лазерного диода для разработанной InGaAsP/InP -гетеро-

структуры с целью достижения максимальной мощности генерации в одномодовом режиме. Получена выходная мощность непрерывного излучения 185 мВт ($\lambda = 1480 \text{ нм}$) при одномодовом режиме работы лазерного диода с шириной мезаполоски $W = 4.5 \text{ мкм}$, а максимальная мощность достигала 300 мВт. Внешняя дифференциальная квантовая эффективность в ЛД с длиной резонатора $L = 1–1.5 \text{ мм}$ составила $0.47–0.57 \text{ Вт/А}$.

В работе [2] отмечалось, что оптимизировать параметры гетероструктуры (ГС) с целью достижения одновременно максимальной рабочей мощности и минимального порогового тока невозможно. Методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений изготовлены лазерные AlInGaAs/InP -гетероструктуры раздельного ограничения для длин волн излучения 1.2–1.5 мкм с четырьмя и шестью квантовыми ямами (КЯ). Абсолютные значения порогового тока достигали 10 мА для ЛД с шириной полоски $W = 4.5 \text{ мкм}$ и длиной резонатора 200 мкм. Пороговые плотности тока составили $500–650 \text{ А/см}^2$ при длине резонатора 1.0 мм. Продемонстрирована возможность генерации в непрерывном режиме при температуре окружающей среды 170°C без принудительного охлаждения. В диапазоне температур $10–80^\circ\text{C}$ величина характеристического параметра T_0 достигала 110 К. Показано, что для ЛД, изготовленного из гетероструктуры с четырьмя КЯ, с длиной резонатора $L = 1120 \text{ мкм}$ (при коэффициентах отражения 95% и 5% «глухого» и выходного зеркал соответственно) и при токе накачки 1400 мА максимальная мощность излучения в непрерывном режиме составила 300 мВт, и это не является предельной величиной.

В работе [3] проведено исследование влияния числа квантовых ям в активной области на линейность ватт-амперной характеристики (ВТAX) полупроводникового лазера. Показано, что использование двух КЯ в качестве активной области приводит к значительному увеличению внутренней квантовой эффективности стимулированного

П.В.Горлачук, А.В.Иванов, В.Д.Курносков, К.В.Курносков, А.А.Мармалюк, В.И.Романцевич, В.А.Симаков, Р.В.Чернов. АО «НИИ «Полос» им. М.Ф. Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп.1; e-mail: webeks@mail.ru

Поступила в редакцию 5 февраля 2018 г., после доработки – 9 апреля 2018 г.

излучения и существенно большей линейности ВТАХ лазера по сравнению с одноямной структурой. Использование же трех или более квантовых ям дает лишь незначительное улучшение мощностных характеристик лазера по сравнению с двухъямной структурой. Таким образом, с точки зрения получения высоких выходных мощностей и простоты выращивания двухъямная структура является оптимальной.

В работе [4] рассмотрено влияние на мощность излучения расположения квантовой ямы внутри лазерной структуры размером 1 мкм. Исследованы характеристики трех гетероструктур. В первой из них КЯ располагалась в центре лазерной структуры, во второй ГС она была смещена на 300 нм к *n*-прилегающему слою, а в третьей ГС – на 300 нм к *p*-эмиттеру. Показано, что максимальная мощность излучения в случае третьей ГС на 25% выше, чем в первых двух случаях.

При разработке мощных ЛД наибольшее распространение получила концепция асимметричных гетероструктур со сверхшироким (более 1 мкм) волноводом. Обзор работ по мощным ЛД дан в [5]. В работе [6] рассмотрено влияние асимметричного положения активной области ЛД в сверхшироком волноводе на подавление мод высших порядков. Для волновода толщиной 1.7 мкм активная область должна быть смещена на 0.2 мкм в сторону *p*-эмиттера, при этом толщина *p*-волновода составит 0.65 мкм, а толщина *n*-волновода – 1.05 мкм [6–8].

Разработке ЛД с максимальной выходной мощностью излучения и максимальной действующей температурой посвящены работы [9, 10]. Структуры с асимметричным волноводом теоретически исследованы в работах [11, 12].

При ширине мезаполоски 100 мкм можно пренебречь уширением активной области ЛД за счет растекания тока накачки по *p*-волноводу. Однако в одномодовых ЛД с шириной полоски 2–5 мкм такое уширение активной области ЛД недопустимо.

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования мощных одномодовых лазеров ($\lambda = 1.5–1.6$ мкм) с асимметричным волноводом. Отличие этих лазеров от ранее исследованных лазеров с асимметричным волноводом [6–8] заключается в том, что за счет резкого сокращения толщины *p*-волновода (до 0.01 мкм по сравнению с 0.65 мкм) удается приблизить активную область ЛД к радиатору. Это обеспечивает более эффективный отвод тепла из активной области ЛД, сокращает размеры излучающей области вдоль *p*–*n*-перехода за счет уменьшения бокового растекания тока накачки по *p*-волноводу и обеспечивает одномодовый режим генерации. Увеличение выходной мощности излучения достигается за счет увеличения толщины *n*-волновода, поскольку потери на свободных носителях в *n*-волноводе значительно меньше, чем в *p*-волноводе.

2. Параметры исследуемых гетероструктур и характеристики лазеров на их основе

Гетероструктуры выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии в системе $\text{In}_{1-x-y}\text{Ga}_y\text{Al}_x\text{As}/\text{InP}$. Были выращены две КЯ толщиной 70 Å каждая. Между квантовыми ямами размещался барьерный слой толщиной 120 Å, справа и слева от ям располагались волноведущие слои толщиной 0.01 мкм со стороны *p*-волновода и 0.73 мкм со стороны *n*-волновода. Толщины барьерных слоев составляли

0.1 мкм. В *p*-эмиттере на основе *InP* выращивался стоп-слой четвертого состава толщиной 0.012 мкм, который служил для остановки химического травления ГС при изготовлении ЛД. Активные области и волноведущие слои были нелегированными. Выращенная ГС по геометрии слоев и составам подобна лазерной гетероструктуре 2-го типа из работы [13, см. табл.2] за исключением толщины *p*-волновода (0.01 мкм вместо 0.73 мкм) и наличия стоп-слоя.

Из данной гетероструктуры были изготовлены ЛД мезаполосковой конструкции с шириной полоски 3 мкм. Для изоляции использовался *ZnSe*. Исследовались лазеры с длиной резонатора 1.0, 1.6 и 2.2 мм. На грани резонатора наносились отражающие и просветляющие покрытия с коэффициентами около 100% и 5% соответственно. Измерение характеристик излучения ЛД осуществлялось со стороны грани резонатора с 5%-ным покрытием.

Лазерные диоды монтировались в медные корпуса диаметром 11 мм и на *C*-маунты. Технология металлизации контактных пластин и *C*-маунтов была одинаковой. Лазерные диоды спаивались активной областью вниз на индий. 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 °С ($T = T_0 + \Delta T$, где $T_0 = 20$ °С и $\Delta T = 0, 10$ и 20 °С). Измерение характеристик ЛД, монтаж которых осуществлялся на *C*-маунты, проводился на другой установке, электронная схема которой поддерживала постоянную температуру 20 °С. При этих фиксированных температурах осуществлялось измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) и ВТАХ лазерных диодов при постоянном токе накачки.

2.1. Вольт- и ватт-амперные характеристики ЛД

Вольт- и ватт-амперные характеристики ЛД при различных температурах радиатора и длине резонатора 1.0 мм

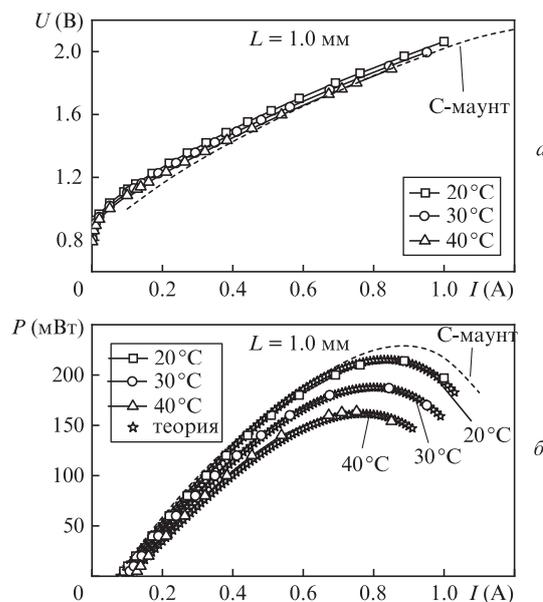


Рис.1. Экспериментальные вольт-амперные (а) и ватт-амперные (б) характеристики ЛД с длиной резонатора 1 мм, собранных в медных корпусах диаметром 11 мм (сплошные кривые) и на *C*-маунтах (штриховые кривые). Теоретически рассчитанные кривые показаны звездочками.

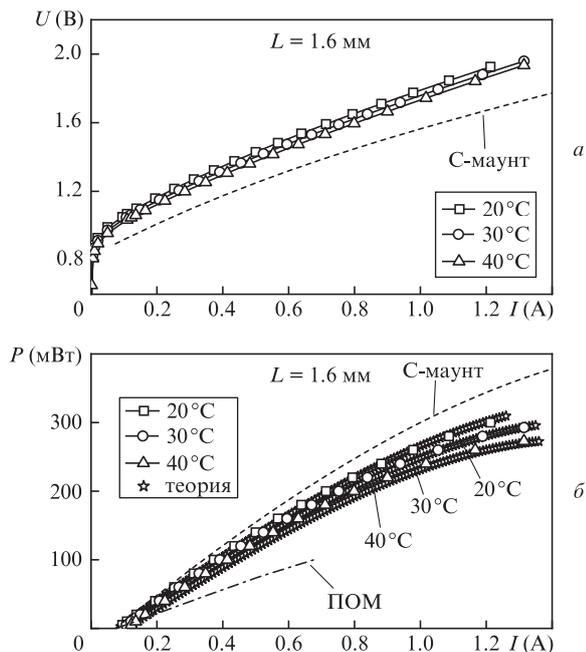


Рис.2. Экспериментальные вольт-амперные (а) и ватт-амперные (б) характеристики ЛД с длиной резонатора 1.6 мм, собранных в медных корпусах диаметром 11 мм (сплошные кривые) и на С-маунтах (штриховые кривые). Теоретически рассчитанные кривые показаны звездочками. Штрих-пунктирная кривая – мощность излучения на выходе однодиодового волоконно-оптического кабеля передающего оптического модуля (ПОМ).

представлены на рис.1, а при длине резонатора 1.6 мм – на рис.2.

Анализ ВАХ показывает, что падение напряжения на ЛД, монтируемых на С-маунтах, меньше падения напряжения на ЛД, монтируемых в медных корпусах, т.е. рассеиваемая ЛД электрическая мощность будет меньше, а мощность излучения больше в С-маунтах при одном и том же токе накачки, что подтверждается ВтАХ.

Для ЛД, монтируемых в медных корпусах, с длиной резонатора $L = 1$ мм мощность излучения $P > 200$ мВт может быть получена при температуре 20°C и токах накачки, превышающих 700 мА ($P = 215$ мВт при токе накачки 880 мА), а для ЛД с $L = 1.6$ мм мощность 300 мВт достигается при той же температуре при токах накачки, превышающих 1200 мА.

Для ЛД, собранных на С-маунтах, при $L = 1$ мм мощность излучения 230 мВт достигается при токе 900 мА, а для диодов с $L = 1.6$ мм мощность излучения 400 мВт может быть получена при токах накачки $I > 1500$ мА.

При сравнении ВтАХ на рис.1,б и рис.2,б видно, что для ЛД с длиной резонатора 1.6 мм, собранных на С-маунтах, мощность излучения с ростом тока накачки увеличивается быстрее, чем для ЛД с длиной резонатора 1.0 мм.

ВАХ и ВтАХ диодов с длиной резонатора 2.2 мм не приводятся в настоящей работе, т.к. они схожи с характеристиками ЛД с длиной резонатора 1.6 мм.

Для ЛД с длиной резонатора 2.2 мм мощность излучения 300 мВт может быть получена при температуре 20°C и токах накачки, превышающих 1450 мА. Для ЛД, монтируемых на С-маунтах, мощность излучения 420 мВт достигается при токах накачки, превышающих 1700 мА. Мощность излучения лазера с длиной резонатора 2.2 мм при одинаковых токах накачки меньше, чем мощность лазера

с длиной резонатора 1.6 мм. Однако насыщение ВтАХ для ЛД с длиной резонатора 2.2 мм происходит при больших мощностях излучения, чем для ЛД с длиной резонатора 1.6 мм.

Таким образом, у ЛД на С-маунтах меньше падение напряжения и больше мощность излучения, чем у ЛД, монтируемых в медных корпусах диаметром 11 мм. Для мощности излучения, не превышающей 300 мВт, оптимальной длиной резонатора ЛД является 1.6 мм.

2.2. Дифференциальное сопротивление и дифференциальная эффективность

На рис.3 представлены зависимости дифференциального сопротивления ЛД ($R_g = \Delta U / \Delta I$, отношение приращения напряжения на ЛД к приращению тока накачки) от тока накачки I для ЛД с длинами резонатора 1.0 (а) и 1.6 мм (б). Величины ΔU , ΔI и I определялись как $\Delta U = U_{i+1} - U_i$, $\Delta I = I_{i+1} - I_i$, $I = (I_{i+1} + I_i) / 2$, где U_{i+1} , U_i , I_{i+1} , I_i – экспериментально измеренные величины напряжения и тока накачки на $(i + 1)$ -м и i -м шагах.

Видно, что дифференциальные сопротивления ЛД с длиной резонатора 1.6 мм по абсолютной величине меньше, чем дифференциальные сопротивления ЛД с длиной резонатора 1.0 мм.

У ЛД с длиной резонатора 1.0 мм, монтируемых в медных корпусах, дифференциальное сопротивление меньше, чем у ЛД на С-маунтах (штриховая кривая лежит выше сплошных кривых при $I < 800$ мА). Наоборот, ЛД с длиной резонатора 1.6 мм, выполненные в медных корпусах, имеют большее дифференциальное сопротивление, чем ЛД, монтируемые на С-маунтах.

Для ЛД с длиной резонатора 2.2 мм, монтируемых в медных корпусах, дифференциальное сопротивление при токах накачки менее 600 мА практически совпадает с дифференциальным сопротивлением ЛД, собранных на С-

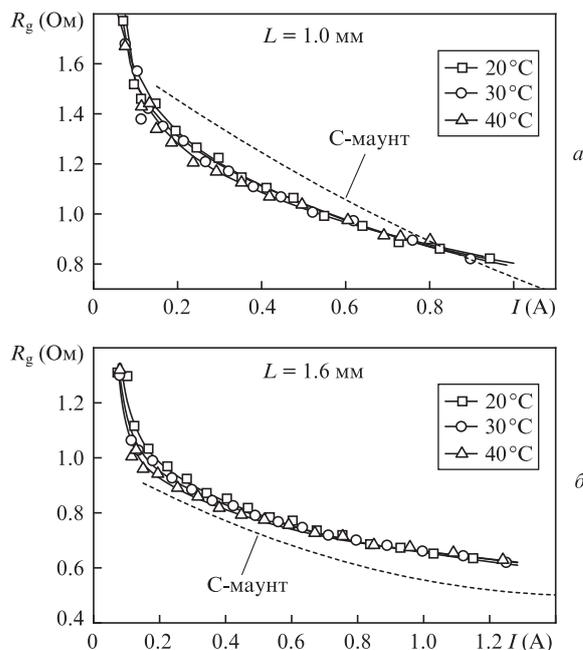


Рис.3. Экспериментальные зависимости дифференциального сопротивления от тока накачки для ЛД с длинами резонатора 1 (а) и 1.6 мм (б), собранных в медных корпусах (при температурах радиатора 20, 30, 40°C) и на С-маунтах (штриховые кривые).

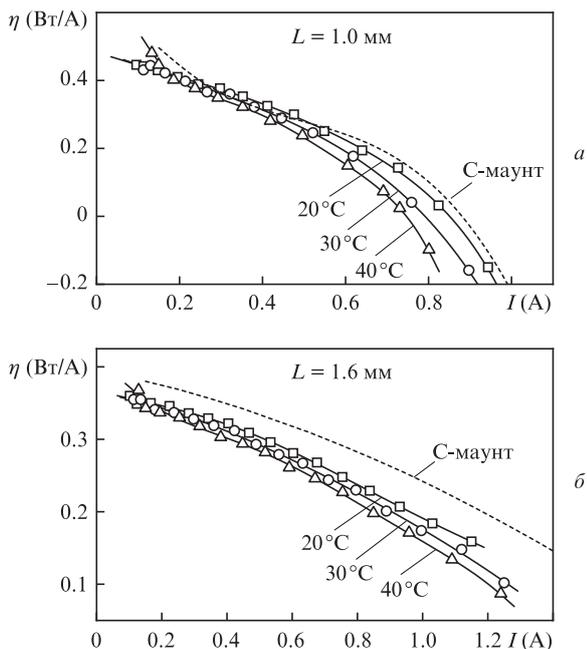


Рис.4. Экспериментальные зависимости ватт-амперной эффективности от тока накачки для ЛД с длинами резонатора 1 (а) и 1.6 мм (б), собранных в медных корпусах (сплошные кривые) и на С-маунтах (штриховые кривые).

унтах. При токах накачки, превышающих 600 мА, дифференциальное сопротивление ЛД на С-маунтах меньше дифференциального сопротивления ЛД, монтируемых в медных корпусах.

В работе [14] показано, что дифференциальное сопротивление слабо влияет на величину порога и эффективность лазера, но сильно влияет на величину максимальной мощности излучения ЛД. Иными словами, чем ниже дифференциальное сопротивление, тем выше максимальная мощность излучения. Аналогичный вывод можно сделать и по результатам нашей работы.

На рис.4 представлены зависимости дифференциальной ватт-амперной эффективности ($\eta = \Delta P / \Delta I$, отношение приращения мощности излучения к приращению тока накачки) от величины тока накачки для ЛД с длинами резонатора 1.0 и 1.6 мм, монтируемых в медных корпусах (сплошные кривые) и на С-маунтах (штриховые кривые). Видно, что ватт-амперная эффективность для ЛД, монтируемых на С-маунтах, больше, чем для ЛД, собранных в медных корпусах (особенно это заметно для ЛД с длиной резонатора 1.6 мм). Таким образом, монтаж ЛД на С-маунты приводит к увеличению дифференциальной эффективности и мощности излучения по сравнению с ЛД, собранным в медных корпусах.

Мощность излучения ЛД может быть существенно увеличена, если вместо лазера с мезаполоской шириной 3 мкм использовать лазеры с мезаполоской 4–5 мкм. Выходную мощность излучения можно также увеличить, если ЛД монтировать на F-, а не на С-маунты [15].

2.3. Спектральные характеристики ЛД

Представленные далее спектральные характеристики ЛД относятся только к диодам, собранным в медных корпусах диаметром 11 мм, поскольку установка не позволяла прописывать спектры излучения ЛД, смонтированных на С-маунтах.

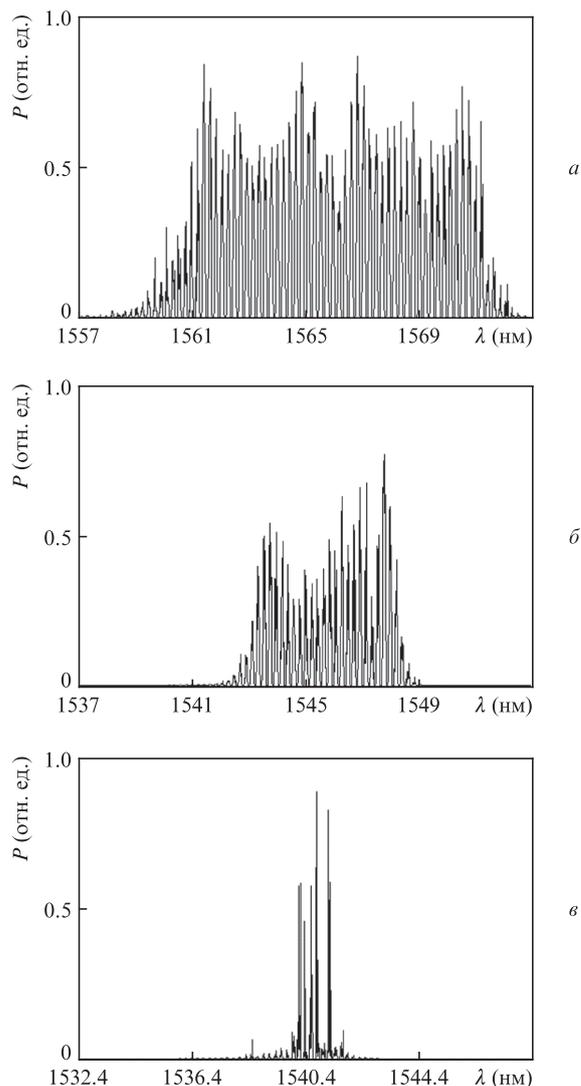


Рис.5. Спектры излучения ЛД с длиной резонатора 1.6 мм, собранных в медных корпусах, при мощностях излучения 300 (а), 60 (б) и 5 мВт (в).

На рис.5 приведены экспериментальные спектры излучения ЛД с длиной резонатора 1.6 мм при мощностях излучения 300, 60 и 5 мВт и температуре радиатора 20°C. Видно, что длина волны и ширина спектра излучения увеличиваются с ростом мощности излучения.

Зависимости средней длины волны генерации, соответствующей центральной длине волны спектров, показанных на рис.5, от величины тока накачки приведены на рис.6 для ЛД с длиной резонатора 1.0 и 1.6 мм. В обоих случаях длина волны излучения увеличивается с увеличением температуры радиатора и тока накачки ЛД. Зависимости ширины спектров генерации (по уровню 0.5 максимального значения их интенсивности) от температуры радиатора и тока накачки для этих ЛД даны на рис.7, из которого следует, что ширина спектра увеличивается с ростом тока накачки, но слабо изменяется при увеличении температуры радиатора.

Зависимости от тока накачки длины волны и ширины спектров излучения ЛД с длиной резонатора 2.2 мм подобны приведенным на рис.6, 7. Заметим также, что увеличение ширины спектров излучения с увеличением тока накачки отмечается практически во всех работах по исследованию мощных ЛД.

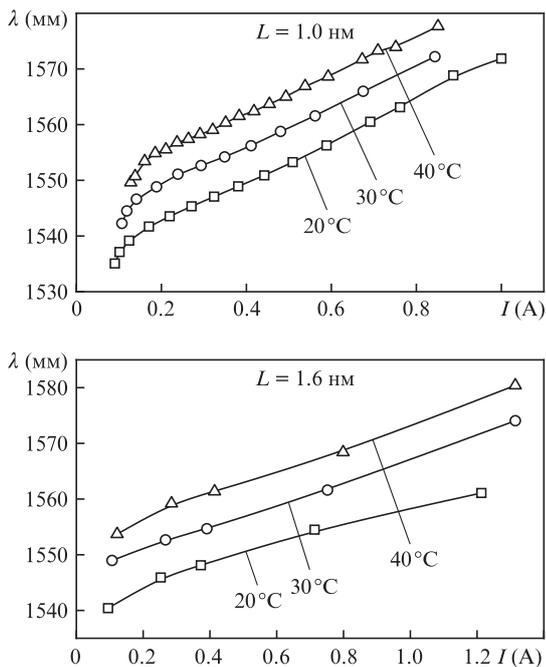


Рис.6. Зависимости средней длины волны генерации от величины тока накачки для ЛД (собранных в медных корпусах) с длиной резонатора 1 (а) и 1.6 мм (б).

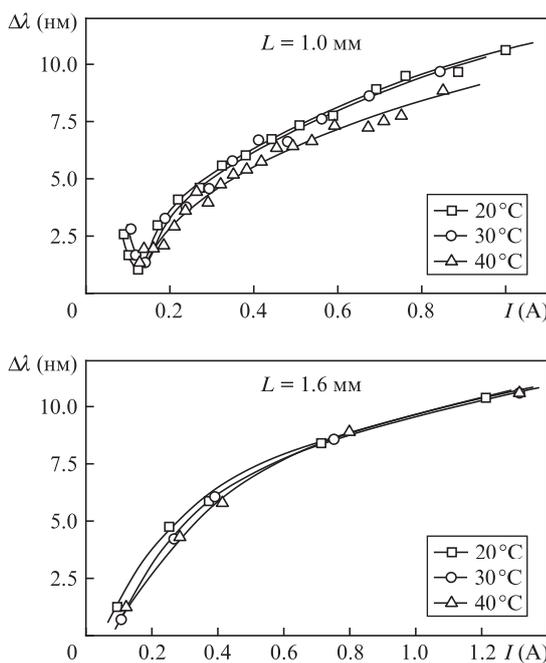


Рис.7. Зависимости ширины спектра генерации от величины тока накачки для ЛД (собранных в медных корпусах) с длиной резонатора 1 (а) и 1.6 мм (б).

2.4. Расходимость и поляризация излучения ЛД

В работе исследовалась также расходимость излучения ЛД вдоль двух взаимно перпендикулярных осей по уровням 0.1 и 0.5 максимального значения интенсивности. В табл.1 сведены данные о расходимости излучения вдоль перпендикулярной (\perp) и параллельной (\parallel) р-п-переходу осей для ЛД с длинами резонаторов 1.0, 1.6 и 2.2 мм при мощности излучения $P = 50$ и 100 мВт. Видно, что расходимость излучения вдоль оси, параллельной р-п-пе-

Табл.1.

Номер ЛД	L (мм)	P (мВт)	Расходимость излучения (град)			
			уровень 0.1		уровень 0.5	
			\perp	\parallel	\perp	\parallel
16	1	50	93.4	16.6	44.5	6.9
		100	92.2	17.8	44.1	7.6
6	1.6	50	91	17	45.7	6.7
		100	86	18	44.5	7.5
12	2.2	50	100	14.7	45	5.1
		100	100	16.2	45	5.9

редуху, увеличивается с ростом мощности излучения и уменьшается при увеличении длины резонатора ЛД от 1.0 до 2.2 мм. Вдоль оси, перпендикулярной р-п-переходу, расходимость излучения не зависит от мощности излучения и длины резонатора и составляет $44^\circ - 46^\circ$ по уровню 0.5.

Практически аналогичные результаты получены в работе [1]. В ней сообщается, что ширина диаграммы направленности излучения на половине максимума интенсивности увеличивается незначительно: от 8° (вблизи порога генерации) до 9° (при выходной мощности 185 мВт). Измеренная картина дальнего поля в плоскости, перпендикулярной р-п-переходу, свидетельствует о том, что происходит генерация фундаментальной оптической моды. Расходимость составляет $38^\circ - 40^\circ$ во всем диапазоне токов накачки.

Следуя работе [1], для подтверждения одномодовости режима генерации ЛД в настоящей работе проводилось измерение ширины диаграммы направленности излучения вдоль оси, параллельной р-п-переходу. Для ЛД с длиной резонатора 1.6 мм и шириной мезаполоски 3 мкм при мощности излучения 5 мВт расходимость излучения составляла 6.7° , при 60 мВт – 7.1° , при 100 мВт – 7.5° , при 200 мВт – 8.7° , при 300 мВт – 12° . Однако по этим данным трудно сделать однозначное заключение об одномодовости излучения во всем диапазоне мощностей. Поэтому был собран передающий оптический модуль (ПОМ) в стандартном корпусе DIL-14 pin, используемый для передачи информации в волоконно-оптических линиях связи с одномодовым волоконно-оптическим кабелем (ВОК). На рис.2,б штрих-пунктирной кривой представлена ВтАХ на выходе ПОМ. Мощность излучения на выходе ВОК превышала 100 мВт при токе накачки $I > 650$ мА. С учетом потерь излучения 50% при его вводе в ВОК мощность излучения ЛД превышала 200 мВт. При $I > 700$ мА электронная схема стабилизации температуры ЛД не обеспечивала отвод тепла от термоэлектрического охладителя и отключала ПОМ. Таким образом, экспериментально подтверждено, что мощность одномодового излучения ЛД составляла не менее 200 мВт.

Измерения показали, что излучение ЛД сильно поляризовано. В табл.2 представлены результаты измерения $\eta = (P_{\max} - P_{\min}) / (P_{\max} + P_{\min})$ и $K = P_{\max} / P_{\min}$ для ЛД с длинами резонатора 1.0, 1.6 и 2.2 мм для мощности излучения $P = 50$ и 100 мВт (P_{\max} и P_{\min} – это максимальные и минимальные значения мощности излучения на выходе поляризатора для двух его взаимно перпендикулярных положений).

Данные табл.2 показывают, что отношение мощности излучения с ТЕ поляризацией к мощности излучения с ТМ поляризацией может превышать 700.

Табл.2.

Номер ЛД	L (мм)	P (мВт)	P_{\max} (мВт)	P_{\min} (мкВт)	η	K
16	1	50	14.38	52	0.99	277
		100	29.98	40	0.997	749
6	1.6	50	15.48	57	0.993	271
		100	31.38	69	0.996	455
12	2.2	50	14.38	62	0.991	231
		100	29.58	130	0.991	228

2.5. Внутренние оптические потери в ЛД

Важными параметрами для достижения высокой мощности и эффективности работы лазерных диодов являются значения внутренних оптических потерь α и эффективности инжекции η_{in} , которые определяются из соотношения [16, 17]

$$\frac{\hbar\omega}{q\eta_t} = \frac{1}{\eta_{in}} \left(1 + \frac{\alpha}{\alpha_m}\right), \quad (1)$$

где η_t – ватт-амперная эффективность ЛД; $\alpha_m = L^{-1} \ln(1/\sqrt{R_1 R_2})$; L – длина резонатора ЛД; R_1, R_2 – коэффициенты отражения зеркал; $\hbar\omega$ – энергия фотона; q – заряд электрона.

На рис.8 показана зависимость η_t^{-1} от $1/\alpha_m$ для ЛД с длинами резонаторов 1.0, 1.6 и 2.2 мм, $R_1 = 100\%$, $R_2 = 5\%$, собранных на контактных пластинах и в медных корпусах диаметром 11 мм (вариант сборки ЛД не влияет на полученные результаты). С использованием метода наименьших квадратов проведена аппроксимирующая прямая, которая позволила определить $\alpha = 3.3 \text{ см}^{-1}$ и $\eta_{in} = 0.7$.

В настоящей работе для двух КЯ полученное значение α равно 3.3 см^{-1} . В работе [1] для системы InGaAsP/InP с двумя КЯ $\alpha = 5-7 \text{ см}^{-1}$ для всех исследованных партий ГС. В работе [2] для системы AlInGaAs/InP для излучения с $\lambda = 1.2-1.5 \text{ мкм}$ параметр α составил 8 см^{-1} для четырех КЯ и 12 см^{-1} для шести КЯ.

3. Определение характеристических температур ЛД

Для определения характеристических температур лазерного диода воспользуемся результатами работы [17]. Мощность излучения ЛД рассчитывалась по формуле

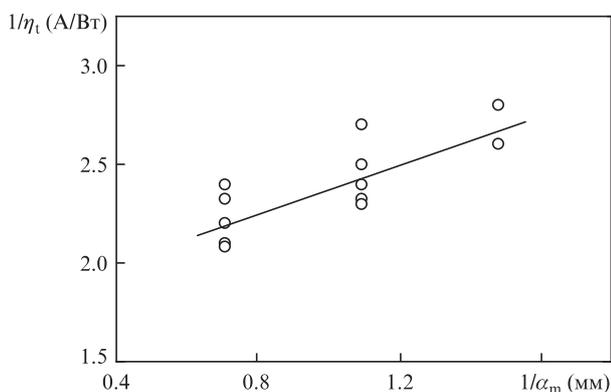


Рис.8. Зависимость обратной величины ватт-амперной эффективности от величины $1/\alpha_m = L[\ln(1/\sqrt{R_1 R_2})]^{-1}$ для ЛД с длинами резонаторов $L = 1.0, 1.6$ и 2.2 мм.

$$P = \eta_t(I, P, \Delta T)[I - I_t(I, P, \Delta T)]. \quad (2)$$

Зависимости порогового тока I_t и ватт-амперной эффективности η_t от тока накачки, мощности излучения и температуры могут быть представлены в виде

$$I_t(I, P, \Delta T) = I_{t0} \exp\left(\frac{\Delta T_{ld}(I, P, \Delta T)}{T_l}\right), \quad (3)$$

$$\eta_t(I, P, \Delta T) = \eta_{t0} \exp\left(\frac{-\Delta T_{ld}(I, P, \Delta T)}{T_p}\right), \quad (4)$$

где I_{t0}, η_{t0} – пороговый ток и ватт-амперная эффективность без учета нагрева активной области ЛД; T_l и T_p – характеристические температуры ЛД для порогового тока накачки и ватт-амперной эффективности.

Изменение температуры активной области ЛД из-за нагрева запишем как

$$\Delta T_{ld}(I, P, \Delta T) = R_{T0} \left(\frac{T_0 + \Delta T_{ld}(I, P, \Delta T)}{T_0}\right)^k (UI - P) + \Delta T, \quad (5)$$

где $T_0 = 293 \text{ К}$ и $\Delta T = 0, 10, 20 \text{ К}$. Температура ЛД $T = T_0 + \Delta T$ с помощью электронной схемы стабилизации поддерживалась постоянной при 20, 30 и 40 °С.

Одним из основных параметров, определяющих максимальную мощность излучения ЛД, является его тепловое сопротивление. Тепловое сопротивление границы активной области ЛД – контактная пластина рассчитывалась по формуле [18]

$$R_{ld} = \frac{1}{k_T \pi L} \ln\left(\frac{16h_{ld}}{\pi w}\right), \quad (6)$$

где k_T – коэффициент теплопроводности; h_{ld} – высота кристалла ЛД; w – ширина мезаполоски. Коэффициент теплопроводности k_T кристалла InP принимался равным $0.68 \text{ Вт/(см} \cdot \text{К)}$, а структуры $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ – равным $0.05-0.07 \text{ Вт/(см} \cdot \text{К)}$ в зависимости от величины x при $1-x-y = 0.52$ [19, рис.2.34].

Тепловое сопротивление границы активной области ЛД – радиатор, используемое в расчетах, определялось как $R_{T0} = R_{ld} + R_{rad}$, где R_{rad} – тепловое сопротивление радиатора (вместе с корпусом ЛД). Величина $R_{rad} = 4.8 \text{ К/Вт}$ для ЛД, смонтированных в медных корпусах, заимствована из работы [17]. В расчетах для ЛД с $w = 3 \text{ мкм}$ и $h_{ld} = 100 \text{ мкм}$ принималось: $R_{T0} = 32 \text{ К/Вт}$ при $L = 1.0 \text{ мм}$, $R_{T0} = 21 \text{ К/Вт}$ при $L = 1.6 \text{ мм}$, $R_{T0} = 17 \text{ К/Вт}$ при $L = 2.2 \text{ мм}$.

На рис.1,б звездочками представлены расчетные величины мощности излучения со стороны просветленной грани лазерных диодов с длиной резонатора 1.0 мм, собранных в медных корпусах. Наилучшее совпадение экспериментальных и расчетных данных наблюдается при $T_l = 70 \text{ К}$, $T_p = 190 \text{ К}$, $I_{t0} = 0.072 \text{ А}$, $\eta_{t0} = 0.45 \text{ Вт/А}$, $k = 1.7$.

На рис.2,б звездочками показаны расчетные величины мощности излучения со стороны просветленной грани ЛД с длиной резонатора 1.6 мм, собранных в медных корпусах. Наилучшее совпадение экспериментальных и расчетных данных в этом случае наблюдается при $T_l = 80 \text{ К}$, $T_p = 280 \text{ К}$, $I_{t0} = 0.08 \text{ А}$, $\eta_{t0} = 0.35 \text{ Вт/А}$, $k = 1.4$.

Анализ результатов проведенных расчетов позволяет сделать следующие выводы: характеристическая температура T_l изменяется в диапазоне 70–80 К, а характеристи-

ческая температура T_p – в диапазоне 190–280 К. Определенные в работе [17] характеристические температуры составили: $T_l = 53$ К, $T_p = 100$ К. По-видимому, большие значения характеристических температур, полученные в нашей работе, связаны с приближением активной области ЛД к радиатору и с более эффективным отводом тепла, чем в работе [17], в которой толщины волноведущих слоев были 0.65 и 1 мкм.

4. Заключение

В настоящей работе показано, что для лазера с длиной резонатора 1.6 мм и шириной мезаполоски 3 мкм, напаянной на контактную пластину или установленной в медный корпус диаметром 11 мм, можно получить мощности излучения, превышающие 300 мВт. При сборке лазеров на С-маунтах достигаются мощности излучения 400 мВт и более. При сборке лазеров в стандартном корпусе DIP-14 pin на выходе одномодового кабеля можно получить мощность излучения не менее 100 мВт, что с учетом потерь излучения 50% при его вводе в ВОК соответствует мощности одномодового излучения ЛД, превышающей 200 мВт.

1. Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Слипченко С.О. и др. *ФТП*, **36**, 1393 (2002).

2. Слипченко С.О., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А. и др. *Письма в ЖТФ*, **29**, 65 (2003).
3. Соколова З.Н., Тарасов И.С., Асрян Л.В. *ФТП*, **46**, 1067 (2012).
4. Lysevych M., Tan N.H., Karouta F., Jagadish C. *Opt. Express*, **22**, 8156 (2014).
5. Тарасов И.С. *Квантовая электроника*, **40**, 661 (2010) [*Quantum Electron.*, **40**, 661 (2010)].
6. Слипченко С.О., Винокуров Д.А., Пихтин Н.А. и др. *ФТП*, **38**, 1477 (2004).
7. Лютецкий А.В., Борщев К.С. и др. *ФТП*, **42**, 106 (2008).
8. Кабанов В.В., Лебедев У.В., Рябцев Г.И. и др. *ФТП*, **46**, 1339 (2012).
9. Makino T., Evans J.D., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 2871 (1997).
10. Elenkrig V.B., Smetona S., Simmons J.G., et al. *Appl. Phys.*, **85**, 2367 (1999).
11. Ryvkin B.S., Avrutin E.A. *Appl. Phys.*, **97**, 113106 (2005).
12. Ryvkin B.S., Avrutin E.A. *Appl. Phys.*, **101**, 123115 (2007).
13. Веселов Д.А., Шашкин И.С., Бахвалов К.В. и др. *ФТП*, **50**, 1247 (2016).
14. Elenkrig V.B., Smetona S., Simmons J.G., et al. *Appl. Phys.*, **87**, 1 (2000).
15. Безотосный В.В., Крохин О.Н., Олещенко В.А. и др. *Квантовая электроника*, **45**, 1088 (2015) [*Quantum Electron.*, **45**, 1088 (2015)].
16. Жуков А.Е. *Лазеры на основе полупроводниковых наноструктур* (СПб.: Элмор, 2007).
17. Горлачук П.В., Иванов А.В., Курносков В.Д., Курносков К.В. и др. *Квантовая электроника*, **44**, 149 (2014) [*Quantum Electron.*, **44**, 149 (2014)].
18. Amann M.-C. *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 4 (1987).
19. Adachi S. *Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors* (John Wiley & Sons, 2009).