

Мощные полупроводниковые лазеры ($\lambda = 0.89 - 1.06$ мкм) на основе квантоворазмерных напряженных структур в системе InGaAs/(Al)GaAs с малой расходимостью излучения

П.В.Булаев, А.А.Мармалюк, А.А.Падалица, Д.Б.Никитин, А.В.Петровский, И.Д.Залевский, В.П.Коняев, В.В.Оськин, М.В.Зверков, В.А.Симаков, Г.М.Зверев

Исследованы гетеролазеры с отдельным электронным и оптическим ограничением на основе квантоворазмерных напряженных структур с одной и двумя квантовыми ямами InGaAs и различными параметрами волновода. Проведена оптимизация конструкции гетероструктуры и условий технологии выращивания квантовых ям с целью повышения выходной мощности излучения и снижения расходимости излучения гетеролазера. Получены полупроводниковые лазеры с выходной мощностью до 4 Вт в непрерывном режиме и расходимостью излучения в плоскости, перпендикулярной плоскости p-n-перехода, менее 30°. Импульсная выходная мощность таких лазеров ограничена катастрофическим разрушением зеркал при линейной плотности мощности 3000 Вт/см.

Ключевые слова: мощные квантоворазмерные гетеролазеры, расходимость излучения, МОС-гидридная эпитаксия.

1. Введение

В настоящее время большое внимание уделяется разработке лазерных диодов (ЛД) на основе гетероструктур в системе AlGaAs/GaAs со сверхтонкими активными слоями (квантовыми ямами) InGaAs. Изменение содержания индия в активных слоях позволяет варьировать длину волны излучения в достаточно широком спектральном диапазоне (0.89–1.06 мкм), что в свою очередь делает возможным создание ЛД для применения в оптической связи, локации, медицине, при обработке материалов, накачке различных сред.

Основные технические требования предъявляются к мощности излучения ЛД и ресурсу его работы. Однако эффективное применение ЛД возможно только тогда, когда полная ширина диаграммы направленности (угловая расходимость) излучения по уровню 0.5 от максимума не превышает 30°, т. к. в большинстве случаев угловая апертура объективов составляет 30–40°.

Расходимость излучения в плоскости активного слоя ЛД определяется локализацией генерируемого светового потока в оптических каналах, возникающих случайным образом в процессе накачки. При этом типичная полуширина диаграммы направленности составляет 10–15° [1]. В плоскости, перпендикулярной слоям гетероструктуры, расходимость обусловлена дифракцией излучения на открытом конце диэлектрического волновода, сформированного слоями гетероструктуры, и при соответствующем выборе составов и геометрии этих слоев возможно целенаправленное изменение расходимости излучения ЛД.

В настоящей работе приведены результаты исследований по оптимизации параметров квантоворазмерных гетероструктур InGaAs/(Al)GaAs с целью создания лазерных диодов в спектральном диапазоне 0.89–1.06 мкм,

имеющих повышенную мощность и малую (менее 30°) полуширину диаграммы направленности излучения.

2. Моделирование распределения излучения в дальнем поле

Для нахождения пространственного распределения излучения ЛД численным методом решалось уравнение распространения электромагнитной волны ТЕ-поляризации в плоском диэлектрическом волноводе, образованном слоями гетероструктуры (рис.1). Показатели преломления слоев гетероструктуры на заданной длине волны излучения λ определялись в соответствии с модифицированной моделью одиночного осциллятора [2], которая хорошо согласуется с известными экспериментальными данными для твердых растворов AlGaAs [3–5]. Показатель преломления активного слоя InGaAs на длине волны излучения принимался равным 3.62.

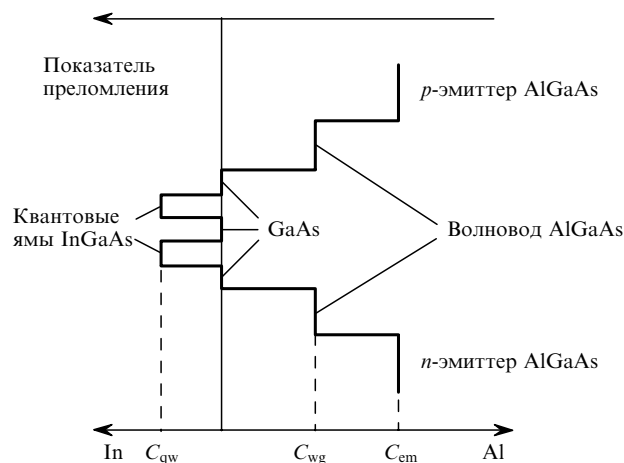


Рис.1. Конструкция гетероструктуры для лазерных диодов (C_{qw} , C_{wg} и C_{em} – концентрации AlAs в квантовых ямах, волноводных слоях и эмиттерах гетероструктуры).

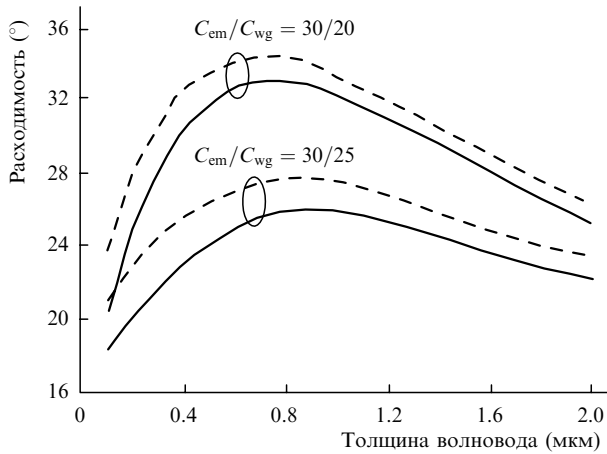


Рис.2. Зависимость полуширины диаграммы направленности излучения от толщины оптического волновода при разных концентрациях AlAs в волноводных слоях и эмиттерах гетероструктуры для одной (сплошные кривые) и двух (штриховые кривые) квантовых ям InGaAs в активной области.

Были рассчитаны зависимости полуширины диаграммы направленности излучения в плоскости, перпендикулярной плоскости активных слоев, от толщины и состава оптического волновода и числа квантовых ям в активной области. В ходе расчетов установлено, что при заданных толщине волновода и составе волноводных слоев и эмиттеров полуширина диаграммы направленности слабо изменяется с длиной волны излучения в спектральном диапазоне 0.85–1.06 мкм. Это объясняется тем, что при концентрациях AlAs $C = 0.15 - 0.45$ показатель преломления твердого раствора AlGaAs линейно уменьшается с увеличением длины волны, вследствие чего разность показателей преломления на границе волноводный слой–эмиттер остается практически постоянной. Типичные результаты расчета приведены на рис.2.

Из полученных данных следует, что увеличение числа квантовых ям в активной области ЛД приводит к росту расходимости излучения вследствие увеличения общей толщины волновода. Однако при соответствующем выборе составов и толщин слоев гетероструктуры возможна реализация достаточно узкой (менее 30°) диаграммы направленности ЛД с активной областью, содержащей

как одну, так и две квантовых ямы. При этом в конусе с углом при вершине 30° будет сконцентрировано не менее 70 % полного потока генерируемого излучения.

3. Эксперимент

Результаты расчетов были использованы при оптимизации параметров гетероструктур на основе InGaAs/GaAs/AlGaAs, предназначенных для работы в диапазоне 0.89–1.06 мкм. Лазерные симметричные гетероструктуры выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии на поверхности (100) подложки *n*-GaAs. Концентрация AlAs в эмиттерах различных структур (30–40 %) и толщина волноводных слоев в каждой гетероструктуре выбирались таким образом, чтобы расчетная полуширина диаграммы направленности излучения ЛД не превышала 30° .

На выращенной лазерной гетероструктуре методом фотолитографии и ионно-плазменного травления до поверхности эмиттера *p*-AlGaAs изготавливались мезаполоски шириной 100–200 мкм, которые зарастивались изолирующей пленкой ZnSe. На зеркальные грани ЛД с помощью электронного испарения в вакууме наносились многослойные диэлектрические покрытия с коэффициентами отражения $R_1 = 0.08 - 0.1$ (выходная грань) и $R_2 = 0.95 - 0.98$ (задняя грань). ЛД монтировались *p*-стороной на медной пластине, которая затем устанавливалась в корпус излучателя.

Контроль параметров ЛД проводился в непрерывном режиме и при накачке импульсами тока длительностью 90–110 нс с частотой повторения 10–20 кГц.

4. Результаты и их обсуждение

При исследовании зависимости дифференциальной эффективности и плотности порогового тока от длины резонатора ЛД было установлено, что внутренние потери в слоях выращенных гетероструктур составляют $3 - 5 \text{ см}^{-1}$, плотность тока инверсии $j_0 = 80 - 120 \text{ А/см}^2$.

В табл.1 представлены средние пороговые плотности тока j_{th} и дифференциальные эффективности s , определенные для выборок из 14 ЛД, изготовленных из одной гетероструктуры. Здесь же приведены эксперименталь-

Табл.1.

Лазерный диод	Число квантовых ям	λ (мкм)	j_{th} (А/см ²)		s (Вт/А)	Расходимость (°)	
			Эксперимент	Теория		Эксперимент	Теория
S-823	1	891	324	201	0.966	26.9–28.0	27.6
S-912	1	905	260	210	1.02	25.6–26.3	26.1
S-967	1	885	307	351	0.836	21.4–22.3	21.9
S-968	1	892	400	389	0.91	18–24	21.3
S-969	2	903	241	297	0.8	20.2–24.0	25.2
S-971	2	909	262	293	0.82	23–25.1	26.1
S-990	2	947	275	284	0.93	30.8–32.6	31.5
S-992	2	970	245	294	0.96	28.5–30.3	29.7
S-991	2	1005	290	295	0.89	28.9–30.1	29.1
S-1209	2	1020	280	284	0.76	30.5–33.0	32.1
S-818	2	1040	220	304	0.79	25.0–28.0	27.3
S-578	2	1055	215	363	0.88	23.0–26.0	24.3
S-635	2	1058	230	310	0.91	25.5–30.1	29.7
S-1211	2	1060	285	286	0.84	28.9–32.0	31.5

Примечание. Расчет проводился при $j_0 = 100 \text{ А/см}^2$, $R_1 R_2 = 0.1$, длине резонатора 0.08 мм и потерях в слоях гетероструктур 5 см^{-1} .

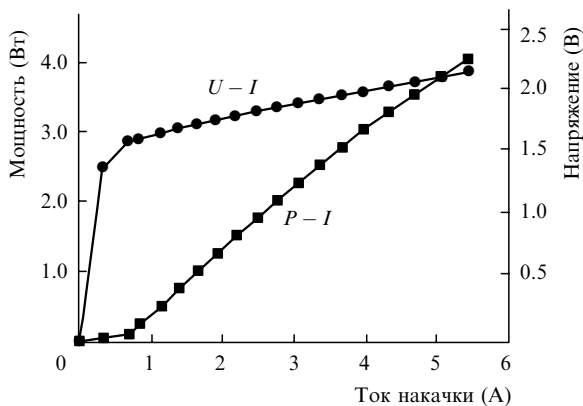


Рис.3. Типичная вольт-амперная (●) и ватт-амперная (■) характеристики лазерных диодов с шириной контакта 200 мкм.

ные данные по расходимости излучения в плоскости, перпендикулярной $p - n$ -переходу. Для сравнения в табл.1 приведены j_{th} и расходимости, рассчитанные с учетом геометрии и составов слоев гетероструктуры.

Сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов показало, что полученные значения порогового тока и расходимости излучения близки к ожидаемым, и это свидетельствует как о корректности выбранных теоретических моделей, так и о хорошем уровне технологии выращивания гетероструктур.

Нами была исследована зависимость предельной мощности импульса излучения P_{max} , при которой происходит разрушение зеркальной грани резонатора, от ширины мезаполоскового контакта W . Было установлено, что линейная плотность мощности на зеркале ЛД в момент катастрофической деградации составляла ~ 3000

Вт/см. Это соответствует плотности оптического потока $35 - 40$ МВт/см², что является рекордно большим значением для импульсных ЛД.

Характеристическая температура T_0 всех типов ЛД была равна $130 - 150$ К и достигала $170 - 180$ К на лучших образцах. Последовательное сопротивление ЛД r практически не зависело от типа гетероструктуры и составляло в исследованных ЛД $0.22 - 0.28$ Ом. Типичные напряжения отсечки вольт-амперной характеристики ЛД составляли $1.4 - 1.5$ В.

Достаточно высокие характеристическая температура T_0 и дифференциальная эффективность ϵ и сравнительно низкое последовательное сопротивление излучающего элемента позволили реализовать высокую мощность непрерывного излучения. При 20°C мощность излучения ЛД с шириной контакта 100 мкм составляла 2.5 Вт при токе накачки $3.2 - 3.5$ А, а мощность излучения ЛД с шириной контакта 200 мкм достигала 4 Вт при токе накачки $5.4 - 5.6$ А. Типичные ватт-амперные и вольт-амперные характеристики указанных ЛД приведены на рис.3.

Исследование ресурсных характеристик ЛД с шириной контакта 100 мкм проводилось при мощности непрерывной генерации 1.5 Вт и температуре окружающей среды 50°C . При этом температура активного элемента составляла, по нашим оценкам, $75 - 80^\circ\text{C}$. После 200 часов непрерывной работы снижение мощности излучения не превышало 0.5% от начального значения.

1. Богатов А.П., Дракин А.Е., Стратонников А.А., Коняев В.П. *Квантовая электроника*, **30**, 401 (2000).
2. Utaka K. et al *IEEE J. Quantum Electron.*, **17**, 651 (1981).
3. Afromowitz M.A. *Solid State Commun.*, **15**, 59 (1974).
4. Utaka K. et al *Jpn. J. Appl. Phys.*, **19**, L137 (1980).
5. Kaufman R.G. *J. Appl. Phys.*, **75**, 8053 (1994).