

Исследование поверхностно-излучающего полупроводникового лазера с внешним зеркалом на структуре InGaAs/AlGaAs при накачке электронным пучком

А.Ю.Андреев, Т.А.Багаев, М.Р.Бутаев, Н.А.Гамов, Е.В.Жданова,
М.М.Зверев, В.И.Козловский, Я.К.Скасырский, И.В.Яроцкая

Исследован поверхностно-излучающий полупроводниковый лазер с внешним зеркалом на структуре InGaAs/AlGaAs при накачке электронным пучком. Методом осаждения металлоорганических соединений из газовой фазы были выращены две отличающиеся дизайном структуры, которые содержали 10 квантовых ям и встроенное брэгговское зеркало. При импульсно-периодическом возбуждении электронным пучком (50 Гц, 250 нс) достигнута пиковая мощность 5.5 Вт на длине волны 1.062 мкм и 2.5 Вт на длине волны 1.013 мкм с полным углом расходимости не более 20 мрад.

Ключевые слова: поверхностно-излучающий полупроводниковый лазер с внешним зеркалом, структура InGaAs/AlGaAs, электронный пучок.

1. Введение

Поверхностно-излучающий полупроводниковый лазер с внешним зеркалом, или полупроводниковый дисковый лазер (ПДЛ), интенсивно изучается с момента выхода первой публикации в 1997 г. [1], где впервые была использована гетероструктура с резонансно-периодическим усилением и накачка осуществлялась излучением лазерного диода. Многочисленные применения этих лазеров связаны с высоким качеством лазерного пучка при мощности в несколько ватт, с возможностью плавной перестройки длины волны излучения и с освоением актуальных спектральных диапазонов – среднего УФ, видимого, среднего ИК и терагерцевого – путем нелинейного внутрирезонаторного преобразования частоты генерации.

Наилучшие результаты по ПДЛ были получены на структурах с квантовыми ямами (КЯ) InGaAs/GaAs. Так, в работе [2] достигнута мощность в непрерывном режиме в 106 Вт на длине волны вблизи 1.03 мкм при оптической накачке излучением лазерных диодов с длиной волны 808 нм. Путем использования внутрирезонаторного нелинейного преобразования частоты излучения такого ПДЛ в третью гармонику можно получить УФ излучение на длине волны вблизи 350 нм [3]. Дальнейшее продвиже-

ние в средний УФ диапазон связано с существенным усложнением оптической схемы лазерной системы [4].

Альтернативным подходом является использование широкозонных гетероструктур типа InGaN/GaN или гетероструктур на основе соединений A_2B_6 , излучающих в сине-зеленой области спектра, с последующим преобразованием во вторую гармонику. Однако поскольку для накачки таких структур коммерчески доступных и эффективных лазерных диодов пока нет, актуальной является накачка электронным пучком [5, 6]. ПДЛ лазер на основе гетероструктуры InGaAs/GaAs был исследован при накачке электронным пучком в работе [6]. Структура была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии. В настоящей работе мы представляем новые результаты аналогичных исследований с использованием гетероструктур, выращенных методом эпитаксии из металлоорганических соединений.

2. Характеристики структур

Две структуры (А и В) были выращены методом осаждения из газовой фазы металлоорганических соединений и содержали последовательно наращенные на подложку GaAs n-типа встроенное брэгговское зеркало из 30 пар слоев $Al_{1-x}Ga_xAs/Al_yGa_{1-y}As$, 10 КЯ $In_zGa_{1-z}As/GaAs$ с компенсирующими упругие напряжения слоями $GaAs_{1-u}P_u$, а также дополнительные согласующий слой GaAs и препятствующий диффузии слой $Al_{0.55}Ga_{0.45}As$. Структура В имела еще и покровный слой GaAs толщиной 6 нм. Параметры составов x , y , z , u и толщины слоев исследуемых структур различались и были выбраны из расчета получения генерации вблизи 1.02 мкм (структура А) и 1.06 мкм (структура В).

Спектры отражения и фотолуминесценции полученных структур представлены на рис.1. Абсолютное значение коэффициента отражения измерено с погрешностью $\pm 1\%$. Заметный провал в спектре отражения на длине волны вблизи 1.06 мкм для структуры В, практически совпадающий с максимумом фотолуминесценции, свидетельствует о том, что резонанс микрорезонатора, образо-

А.Ю.Андреев, Т.А.Багаев, И.В.Яроцкая. АО «НИИ "Полус" им. М.Ф.Степеляха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп.1
М.Р.Бутаев, В.И.Козловский. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: vikoz@sci.lebedev.ru

Н.А.Гамов, Е.В.Жданова. Московский технологический университет «МИРЭА», Россия, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78

М.М.Зверев. Московский технологический университет «МИРЭА», Россия, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78; Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: mzverev@mail.ru

Я.К.Скасырский. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

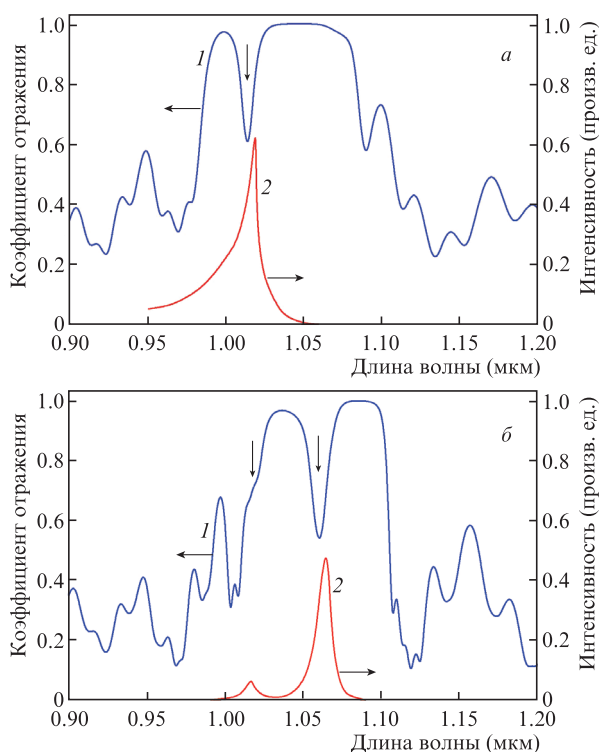


Рис.1. Спектры отражения (1) и фотолюминесценции (2) структур А (а) и В (б). Вертикальные стрелки указывают положение мод собственного резонатора структуры.

ванного поверхностью структуры и брэгговским зеркалом, хорошо совпадает с краем поглощения КЯ. Для структуры А соответствие пиков хуже.

3. Эксперимент

Схема лазера представлена на рис.2. Структура крепилась серебряной пастой к медному хладопроводу, ко-

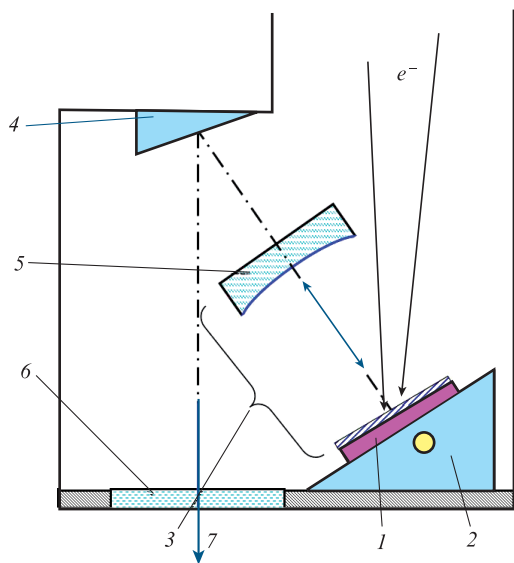


Рис.2. Схема лазера: 1 – полупроводниковая структура; 2 – медный хладопровод; 3 – оптический резонатор; 4 – поворотное зеркало; 5 – внешнее выходное зеркало; 6 – окно вакуумной камеры; 7 – лазерный пучок; e^- – пучок электронов.

торый находился внутри вакуумной камеры при комнатной температуре ($\sim 20^\circ\text{C}$). Внешнее плоскогнупное зеркало ПДЛ имело радиус кривизны $r = 30$ мм и коэффициент отражения 98% на длине волны $\lambda = 1.015$ мкм и 98.5% на $\lambda = 1.06$ мкм. Оно размещалось также внутри вакуумной камеры. Длина резонатора L составляла 26 мм. Расчетное значение диаметра $2w_0$ основной моды на структуре было равно около 80 мкм. Электронный пучок падал на структуру под углом примерно 30° и сканировал импульсно-периодически вдоль строки с частотой 50 Гц и скоростью $v_{sc} = 8 \times 10^4$ см/с. Положение строки можно было плавно перемещать в поперечном направлении до совпадения одной из ее точек с положением моды резонатора на поверхности структуры. Излучение ПДЛ выводилось из вакуумной камеры через окно из свинцового стекла ТФ-5 с помощью поворотного Al-зеркала. Излучение регистрировалось калиброванным фотокатодом ФЭК-29.

4. Характеристики лазера и обсуждение полученных результатов

На рис.3 представлены спектры излучения лазеров на основе структур А и В. Максимум спектра генерации структуры А соответствовал длине волны 1.013 мкм, структуры В – 1.062 мкм. Ширина спектра на полувысоте была равна 3.5 нм для структуры А и 0.9 нм для структуры В. Спектр генерации структуры А был промодулирован с расстоянием между сублиниями $\delta\lambda = 0.36$ нм. Эта модуляция, вероятно, вызвана дополнительным отражением от обратной поверхности ростовой подложки GaAs толщиной 350 мкм. Действительно, $\delta\lambda$ можно оценить по формуле $\delta\lambda = \lambda^2 / (2HN^*)$, где $\lambda = 1.013$ мкм – длина волны генерации, $H = 350$ мкм – толщина подложки GaAs и $N^* \approx 4.23$ – эффективный показатель преломления GaAs на длине волны 1.013 мкм с учетом дисперсии. В результате имеем $\delta\lambda = 0.347$ нм, что практически совпадает с измеренной величиной 0.36 нм.

У структуры В подобная модуляция не наблюдалась, поскольку вторая поверхность подложки GaAs у нее была матовой. Заметная модуляция спектра свидетельствует о том, что брэгговское зеркало недостаточно глухое и коэффициент поглощения излучения в подложке GaAs на длине волны генерации мал. Это кажется удивительным, поскольку расчетное значение коэффициента отражения брэгговского зеркала на длине волны генерации превышает 99.98%.

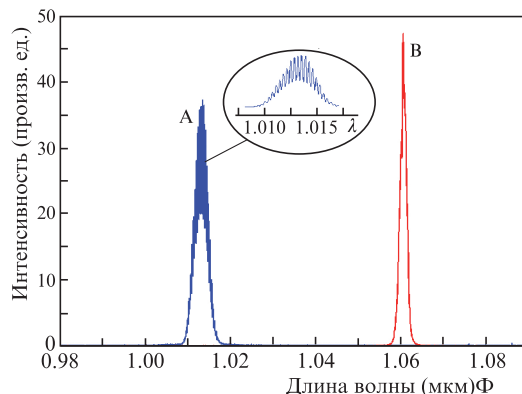


Рис.3. Спектры излучения лазеров на структурах А и В. На вставке – спектр излучения лазера на структуре А с большим разрешением.

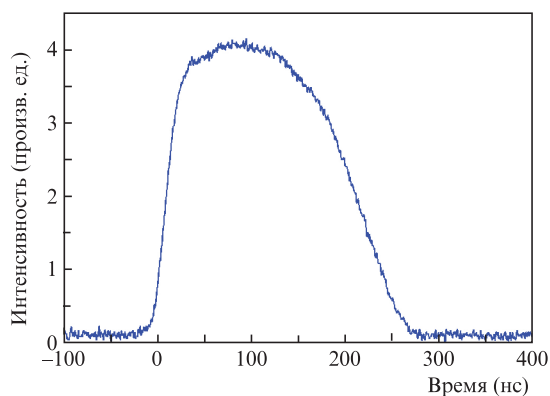


Рис.4. Оциллограмма импульса излучения ПДЛ на структуре В при токе $I_e = 1$ мА.

Оциллограмма импульса генерации ПДЛ на структуре В при максимальной пиковой мощности представлена на рис.4. Длительность импульса по основанию немного больше 250 нс. Форма и длительность импульса зависела от диаметра d_e и тока I_e электронного пучка. При d_e , заметно меньшем $2w_0$, длительность импульса сокращалась до ~ 100 нс, что соответствовало времени пролета электронного пучка через поперечный размер основной моды резонатора $t_p = 2w_0/v_{sc} = 100$ нс. Однако при $d_e < 2w_0$ пиковая мощность падала. Вероятно, это связано с тем, что вне области возбуждения имеет место достаточно высокое поглощение излучения генерации.

С увеличением диаметра электронного пучка длительность импульса возрастает, поскольку генерация начинается и закачивается при неполном перекрытии бегущего электронного пучка с основной модой резонатора. Когда $d_e > 2w_0$, возможна генерация более высоких поперечных типов колебаний резонатора (особенно при больших значениях I_e). При этом t_p может увеличиваться вплоть до 500 нс с одновременным уменьшением пиковой мощности. Картина дальнего поля ПДЛ на структуре В при различных значениях I_e представлена на рис.5. Она регистрировалась цифровой камерой Canon 350D без объектива на расстоянии 220 мм от поверхности структуры. При небольшом превышении порога генерации диаграмма направленности имеет поперечное распределение интенсивности излучения, близкое к гауссову. На двумерной картине видны кольца, которые являются следствием интерференции излучения на плосковогнутой подложке выходного зеркала. Полный угол расходимости излучения по уровню e^{-1} составил 6 мрад. Расчетная расходимость гауссова пучка $\theta = \lambda/(\pi 2w_0)$ равна примерно 4 мрад. Расхождение с экспериментальным значением связано с прохождением излучения через рассеивающую линзу, каковой является подложка внешнего зеркала.

С увеличением тока электронного пучка возбуждаются более высокие поперечные колебания резонатора, и

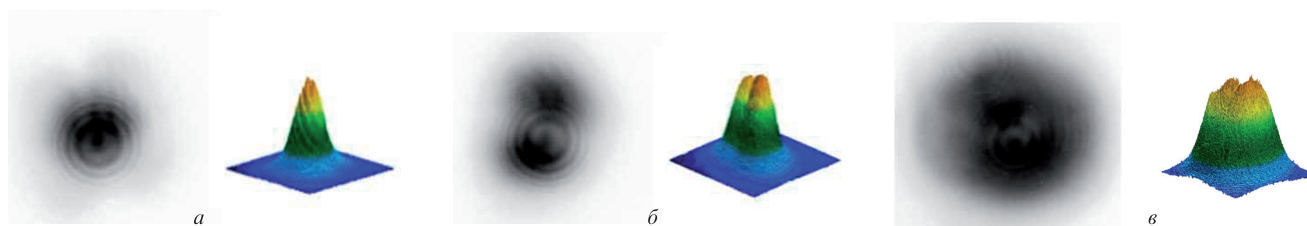


Рис.5. Двумерная (слева) и трехмерная (справа) картины дальнего поля излучения ПДЛ на структуре В при $I_e = 0.2$ (а), 0.65 (б) и 1.4 мА (в).

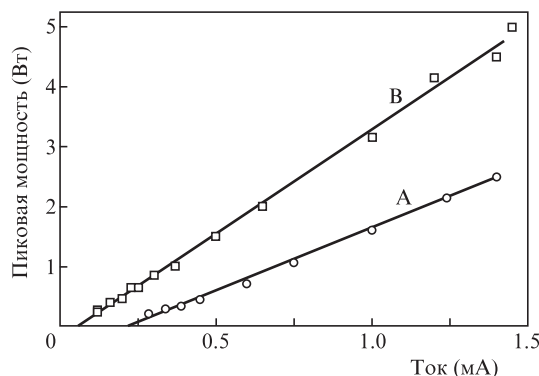


Рис.6. Зависимости пиковой мощности ПДЛ на структурах А и В от тока электронного пучка при энергии электронов 32 кэВ. Диаметр электронного пучка оптимизировался при каждом значении I_e для получения максимальной пиковой мощности.

при максимальных значениях I_e полный угол расходимости увеличивается примерно в три раза. При этом наблюдается «вытягивание» диаграммы в направлении, параллельном направлению сканирования электронного пучка.

На рис.6 показаны зависимости пиковой мощности ПДЛ для структур А и В от тока электронного пучка. Пороговый ток, определенный по линейной аппроксимации полученных данных, был равен 0.2 мА для первой структуры и 0.06 мА для второй. При диаметре электронного пучка 80 мкм эти значения соответствуют пороговым плотностям тока соответственно 4 и 1.2 А/см², которые сравнимы с оценкой (2.2 А/см²), полученной в [6].

Низкопороговый лазер на структуре В излучал максимальную мощность 5 Вт на длине волны 1.062 мкм при энергии электронов 32 кэВ. На другом лазере максимальная мощность составляла примерно 2.5 Вт на $\lambda = 1.013$ мкм. Пороговый ток и мощность лазера на структуре А были хуже из-за рассогласования периода повторения КЯ с периодом расположения пучностей моды резонатора.

На рис.7,а представлена зависимость максимальной пиковой мощности ПДЛ на структуре В от энергии электронов. Максимальная мощность 5.5 Вт достигнута при энергии 44 кэВ; с уменьшением энергии до 15 кэВ мощность падает до нуля. Одним из факторов этого падения является снижение максимального тока в нашей установке с уменьшением энергии электронов.

На рис.7,б показана зависимость эффективности такого лазера от энергии электронов. Максимальная эффективность достигается при 26 кэВ и составляет 10.5%. При увеличении энергии электронов падение эффективности связано с тем, что часть электронов пролетает активную часть структуры и поглощается в брэгговском зеркале. При уменьшении энергии электронов ионизационная кривая потерь энергии электронов «прижимается» к поверхности структуры и часть электронов, достигаю-

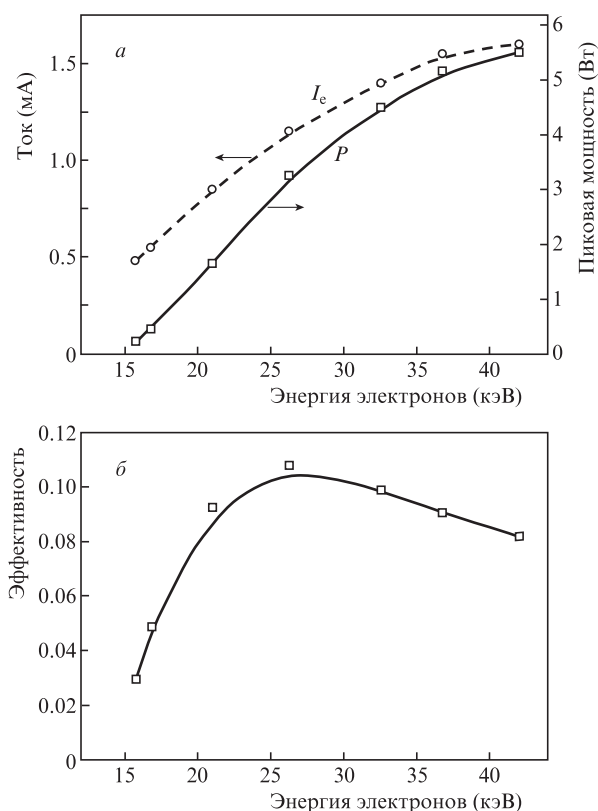


Рис.7. Зависимости тока и максимальной выходной мощности (а), а также эффективности (б) ПДЛ на основе структуры В от энергии электронов.

щая КЯ, уменьшается. Эффективность генерации можно увеличить (особенно при малых энергиях электронов), уменьшив толщины барьерного и согласующего слоев. Первую КЯ можно поместить на расстояние, равное половине длины волны от поверхности структуры.

5. Заключение

Итак, реализованы и исследованы ПДЛ с накачкой электронным пучком на основе гетероструктур InGaAs/AlGaAs, выращенных методом осаждения из газовой фазы металлоорганических соединений. На лучшей из полученных структур был реализован лазер, работающий в импульсно-периодическом режиме с мощностью излучения 5.5 Вт на длине волны 1.062 мкм.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-02-00436) и Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (Договор № 02.a03.21.0005).

1. Kuznetsov M., Nakimi F., Sprague R., Mooradian A. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **9**, 1063 (1997).
2. Heinen B., Wang T.-L., Sparenberg M., Weber A., Kunert B., Hader J., Koch S.W., Moloney J.V., Koch M., Stolz W. *Electron. Lett.*, **48**, 516 (2012).
3. Shu Q.-Z., Caprara A.L., Berger J.D., Anthon D.W., Jerman H., Spinelli L. *Proc. SPIE*, **7193**, 719319 (2009).
4. Kaneda Y., Wang T.-L., Yarborough J.M., Fallahi M., Moloney J.V., Yoshimura M., Mori Y., Sasaki T. *Proc. SPIE*, **7193**, 719318 (2009).
5. Козловский В.И., Кузнецов П.И., Свиридов Д.Е., Якушева Г.Г. *Квантовая электроника*, **42**, 583 (2012) [*Quantum Electron.*, **42**, 583 (2012)].
6. Kozlovsky V.I., Okhotnikov O.G., Popov Y.M. *IEEE J. Quantum Electron.*, **49**, 108 (2013).