

ПИСЬМА

РОС-лазеры с высоким коэффициентом связи для спектральной области 1.55 мкм

В.В.Дюделев, Д.А.Михайлов, Д.В.Чистяков, Е.А.Когновицкая, А.В.Лютецкий, С.О.Слипченко, Н.А.Пихтин, А.Г.Гладышев, Д.В.Денисов, К.О.Воропаев, А.С.Ионов, А.В.Бабичев, И.И.Новиков, Л.Я.Карачинский, В.И.Кучинский, А.Ю.Егоров, Г.С.Соколовский

Разработана технология создания полупроводниковых лазеров с распределённой обратной связью с высоким коэффициентом обратной связи для спектральной области 1.55 мкм. Продемонстрирована устойчивая одночастотная генерация в широком диапазоне температур. Максимальный коэффициент подавления боковых мод составил более 30 дБ.

Ключевые слова: распределённая обратная связь, одночастотная генерация, величина подавления боковых мод, полупроводниковый лазер.

Источники одночастотного лазерного излучения в спектральной области 1.55 мкм на основе полупроводниковых лазеров с распределённой обратной связью (РОС) являются ключевыми компонентами волоконно-оптических линий связи. Практическая разработка таких лазеров была начата ещё в 1970-е годы [1]. Несмотря на существенные успехи развития технологии РОС-лазеров в конце прошлого века [2], развитие данной технологии продолжается и в настоящее время, поскольку она является ключевой для создания перестраиваемых одночастотных лазеров в указанной области спектра [3, 4]. Это, в первую очередь, связано с применением новой концепции источников излучения для волоконно-оптических линий связи, в которой предполагается унификация используемых компонентов [5], а также с созданием современных

систем для спектроскопии [6]. Существует целый ряд подходов к созданию компактных перестраиваемых лазеров, среди которых можно отметить применение миниатюрных внешних резонаторов [7, 8], управляемого распределённого брэгговского отражателя [9], а также использование массивов РОС-лазеров [3, 4].

В настоящей работе представлены результаты разработки технологии РОС-лазеров [10, 11] с высоким коэффициентом связи, излучающих в спектральной области 1.55 мкм (С-диапазон). Гетероструктуры, на основе которых были сформированы исследуемые лазеры, выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) в ООО «Коннектор Оптик» (С.-Петербург, Россия) на промышленной установке Riber 49. Послойный состав гетероструктур приведен в табл. 1.

Использовалась двухстадийная эпитаксия (с зарращиванием решеток, формирующей РОС). После выращивание слоя 4 процесс эпитаксиального роста был остановлен. Затем методом электронно-лучевой литографии на электронном литографе Raith Voyager в АО «ОКБ-Планета» (В.Новгород, Россия) в слое 4 были созданы дифракционные решетки для РОС, шаг которых составлял 468.6, 468, 467.4 и 466.8 нм. Решетки в слое $\text{In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{As}_{0.6}\text{P}_{0.4}$ формировались методом сухого травления через маску на основе SiO_2 толщиной 50 нм (нанесение плазмохимическим осаждением) в комбинации со слоем Al толщиной 30 нм. Топологическая маска в слое Al для травления SiO_2 формировалась методом взрывной литографии при использовании двухслойного резиста на основе LOR 1A и позитивного электронного резиста PMMA 600K, маска в котором формировалась методом электронно-лучевой литографии. Травление $\text{In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{As}_{0.6}\text{P}_{0.4}$ через маску на основе SiO_2 проводилось методом травления в индуктивно-связанной плазме.

Изображение типичной решетки в слое $\text{In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{As}_{0.6}\text{P}_{0.4}$, полученное методом сканирующей электронной микроскопии, приведено на рис. 1, а. Глубина травления на основе данных оптической профилометрии составила 80 нм. Зарращивание решеток (двухдюймовых пластин) фосфидом индия проводилось методом МПЭ в установке Riber 49 в ООО «Коннектор Оптик». В итоге были сформированы верхний эмиттерный слой 5 и контактный слой 6 (табл. 1). После двухстадийной эпитаксии

В.В.Дюделев, А.В.Лютецкий, С.О.Слипченко, Н.А.Пихтин, В.И.Кучинский, Г.С.Соколовский. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26; e-mail: v.dudelev@mail.ru

Д.А.Михайлов, Д.В.Денисов. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина), Россия, 197022 С.-Петербург, ул. Профессора Попова, 5
Д.В.Чистяков, А.Ю. Егоров. Университет ИТМО, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49

Е.А.Когновицкая. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина), Россия, 197022 С.-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

А.Г.Гладышев. ООО «Коннектор Оптик», Россия, 194292 С.-Петербург, ул. Домостроительная, 16

К.О.Воропаев. АО «ОКБ-Планета», Россия, 1173004 Великий Новгород, ул. Федоровский ручей, 2/13; Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, Россия, 173003 Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, 41

А.С.Ионов. АО «ОКБ-Планета», Россия, 1173004 Великий Новгород, ул. Федоровский ручей, 2/13

А.В.Бабичев. Университет ИТМО, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49; ООО «Коннектор Оптик», Россия, 194292 С.-Петербург, ул. Домостроительная, 16

И.И.Новиков, Л.Я.Карачинский. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26; Университет ИТМО, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49; ООО «Коннектор Оптик», Россия, 194292 С.-Петербург, ул. Домостроительная, 16

Поступило в редакцию 25 июля 2019 г.

Табл.1. Конструкция гетероструктуры РОС-лазера.

Номер слоя	Слой	Состав слоя	Тип, уровень легирования (см ⁻³)	Толщина слоя (нм)
6	Контактный	In _{0.53} Ga _{0.47} As	n, 5 × 10 ¹⁸	150
5	Эмиттерный	InP	n, 3 × 10 ¹⁶	2000
4	Волноводный	In _{0.72} Ga _{0.28} As _{0.6} P _{0.4} (1.3 мкм)*	–	200
3	Активная область	In _{0.58} Ga _{0.42} As _{0.91} P _{0.09} (1.55 мкм)*	–	50
2	Волноводный	In _{0.72} Ga _{0.28} As _{0.6} P _{0.4} (1.3 мкм)*	–	150
1	Буферный	In _{0.52} Al _{0.48} As	p, 2 × 10 ¹⁷	3000
	Подложка	InP	p, 3 × 10 ¹⁸	

*Составы подбирались в соответствии с указанной длиной волны межзонного перехода.

по меткам совмещения на поверхности гетероструктуры методом жидкостного травления были сформированы полоски шириной ~5 мкм. Использовалась геометрия мелкой мезы, без протравливания волноводного слоя. После процессирования и утоньшения пластины были выколоты экспериментальные образцы РОС-лазеров с длинами резонаторов ~0.5 и ~0.25 мм, которые монтировались на первичный теплоотвод.

Исследования характеристик РОС-лазеров проводились в импульсном режиме. Длительность импульса тока накачки составляла 70–90 нс при частоте следования 48 кГц. Типичные пороговые токи исследуемых образцов с РОС были равны 300–600 мА при температуре $T = 288$ К. Типичная ватт-амперная характеристика лазера с длиной резонатора 0.25 мм при $T = 288$ К приведена на

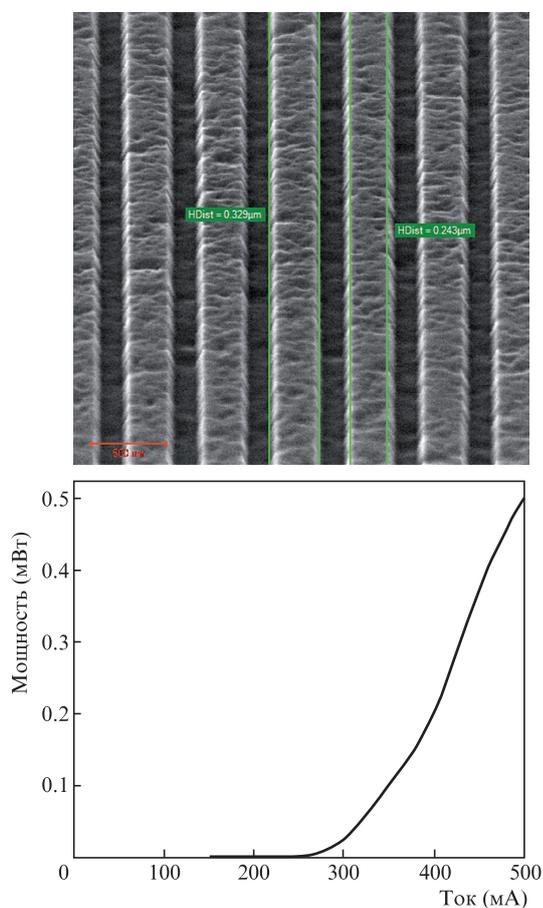


Рис.1. СЭМ-изображение типичной изготовленной решетки (а) и типичная ватт-амперная характеристика экспериментального образца РОС-лазера (б).

рис.1,б. Регистрация спектра проводилась на монохроматоре МДР-23 с использованием техники синхронного детектирования. Размер входной/выходной щели монохроматора при проведении исследований составил 0.1 мм, это обеспечивало спектральное разрешение 0.26 нм, существенно меньшее межмодового расстояния резонатора Фабри–Перо для исследуемых образцов. Проведенные спектральные измерения показали, что максимальный коэффициент подавления боковых мод (SMSR) составил более 30 дБ. Типичный спектр генерации приведен на рис.2,а.

Важным вопросом в процессе отработки технологии создания РОС-лазеров является выявление величины ко-

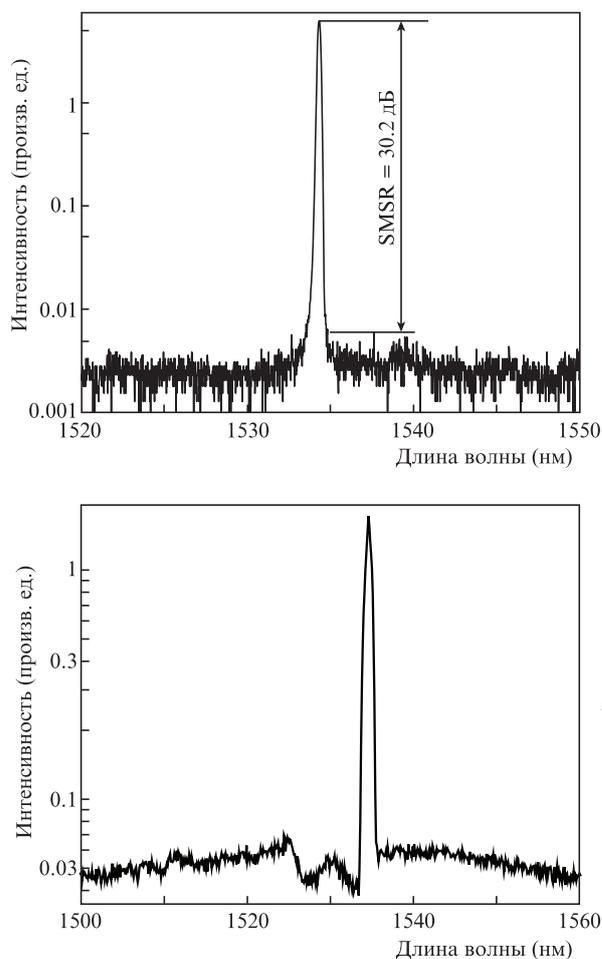


Рис.2. Типичный спектр генерации РОС-лазера с длиной резонатора 0.5 мм при $T = 288$ К (а) и спектр того же лазера вблизи порога генерации при той же температуре (б).

эффициента связи κ , т. к. она определяет устойчивость одночастотной генерации. Коэффициент связи может быть вычислен из следующего выражения [12]:

$$\kappa = \frac{\pi N \Delta \lambda_s}{\lambda_B^2}, \quad (1)$$

где N – эффективный показатель преломления; $\Delta \lambda_s$ – спектральная ширина брэгговской щели; λ_B – длина волны РОС-генерации. Спектральную ширину брэгговской щели можно легко определить по провалу в спектре спонтанного излучения вблизи порога генерации.

На рис.2,б приведён спектр того же образца РОС-лазера, что и на рис.2,а, но вблизи порога генерации. Хорошо виден провал в спектре спонтанного излучения, ширина которого ($\Delta \lambda_s$) составляет ~ 9.5 нм, что по формуле (1) даёт $\kappa \sim 400$ см⁻¹. Столь большое значение коэффициента связи свидетельствует о высоком качестве сформированных дифракционных решёток РОС. Большой коэффициент связи и, следовательно, большая ширина брэгговской щели позволяют перестраивать длину волны излучения в широком температурном диапазоне без возбуждения конкурирующей брэгговской моды.

Были проведены исследования температурной перестройки экспериментальных образцов РОС-лазеров. На рис.3 представлены зависимости длины волны генерации и коэффициента SMSR от температуры для РОС-лазера с длиной резонатора 0.5 мм в температурном диапазоне 15–35 °С (288–308 К). Диапазон спектральной перестройки составил 2.1 нм, что соответствует температурному сдвигу линии генерации $d\lambda/dT \approx 0.1$ нм/К.

Данные, приведённые на рис.3, свидетельствуют об устойчивой одночастотной генерации во всём исследованном диапазоне температур при высоком коэффициенте подавления боковых мод. Максимальный коэффициент SMSR составил более 30 дБ. Этот результат демонстрирует возможность создания на основе разработанной технологии перестраиваемых массивов РОС-лазеров. Разработанная технология также может быть масштабирована для создания широкоапертурных РОС-лазеров с искривленными штрихами решётки, обеспечивающих фокусировку выходного излучения [13, 14].

Таким образом, в настоящей работе продемонстрирована технология изготовления РОС-лазеров с высоким коэффициентом связи для спектральной области 1.55 мкм. Полученные образцы РОС-лазеров обладают устойчивой одночастотной генерацией. Максимальный коэффициент подавления боковых мод превышает 30 дБ. Продемонстрирована устойчивая одночастотная генерация в широком

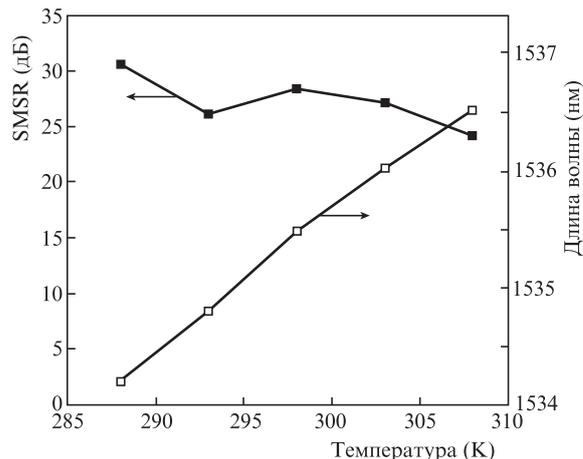


Рис.3. Зависимости длины волны генерации и коэффициента SMSR от температуры.

диапазоне температур, что указывает на возможность использования разработанной технологии для создания массивов перестраиваемых РОС-лазеров, сформированных на одном кристалле.

1. Алферов Ж.И., Гуревич С.А., Клепикова Н.В., Кучинский В.И., Мизеров М.Н., Портной Е.Л. *Письма в ЖТФ*, **1**, 645 (1975).
2. Барышев В.И., Голикова Е.Г., Дураев В.П., Кижаяев К.Ю., Куксенков Д.В., Кучинский В.И., Портной Е.Л., Смирницкий В.Б. *Квантовая электроника*, **15**, 2196 (1988) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **18**, 1376 (1988)].
3. Gotoda M., Takabayashi Y., Horiguchi K., Matsumoto K., Ishimura E. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **23**, 6000406 (2017).
4. Pezeshki B., Vail E., Kubicky J., Yoffe G., Zou S., Heanue J., Epp P., Rishon S., Ton D., Faraji B., Emanuel M., Hong X., Sherback M., Agrawal V., Chipman C., Razazan T. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **14**, 1457 (2002).
5. <http://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF-ITLA-MSA-01.3.pdf>.
6. Yang R., Dong X., Bi Y., Lv T. *Opt. Commun.*, **410**, 782 (2018).
7. Sato K., Mizutani K., Sudo S., Tsuruoka K., Naniwae K., Kudo K. *J. Lightwave Technol.*, **25**, 2226 (2007).
8. Liu A. Q., Zhang X.M. *J. Micromech. Microeng.*, **17**, R1 (2007).
9. Yagi H., Kaneko T., Kono N., Yoneda Y., Uesaka K., Ekawa M., Takechi M., Shoji H. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **24**, 6100411 (2018).
10. Казаринов Р.Ф., Суриц Р.А. *ФТП*, **6**, 1359 (1972).
11. Kogelnik H., Shank C.V. *J. Appl. Phys.*, **43**, 2327 (1972).
12. Hillmer H., Hansmann S., Burkhard H. *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 534 (1990).
13. Sokolovskii G.S., Rafailov E.U., Birkin D.J.L., Sibbett W. *J. Opt. Quantum Electron.*, **31**, 215 (1999).
14. Sokolovskii G.S., Rafailov E.U., Birkin D.J.L., Sibbett W. *IEEE J. Quantum Electron.*, **36**, 1412 (2000).