

05

Многомодовые полупроводниковые лазеры с поверхностной распределенной обратной связью

© В.В. Золотарев, А.Ю. Лешко, В.Н. Малец, С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

e-mail: Zolotarev.bazil@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 02.05.2024 г.

В окончательной редакции 07.06.2024 г.

Принята к публикации 30.10.2024 г.

Разработаны многомодовые полупроводниковые лазеры с поверхностной распределенной обратной связью (РОС), излучающие на длине волны 1040 nm. Период РОС составил 20 μm . Данная конструкция позволяет отказаться от сложных технологических процессов двухэтапной эпитаксии и электронной литографии. Для образцов лазеров с просветляющими покрытиями на зеркалах продемонстрировано сужение спектра генерации до двух конкурирующих мод, расположенных по обе стороны от брэгговской длины волны. Его температурная стабильность составила менее 0.1 nm/K. Наличие конкурирующих мод Фабри–Перо свидетельствует о недостаточной величине коэффициента связи для разработанных образцов.

Ключевые слова: полупроводниковый лазер, распределенная обратная связь, спектр генерации, резонатор лазера.

DOI: 10.61011/OS.2024.11.59497.6509-24

Введение

Мощные полупроводниковые лазеры являются ключевым элементом современной промышленности и цифровых технологий. Они обладают рекордно высоким КПД, надежностью, компактностью, что определяет их преимущества перед другими источниками лазерного излучения. Классические полупроводниковые лазеры с торцевым выводом излучения с размером апертуры 100 μm генерируют оптическую мощность величиной порядка нескольких десятков ватт. При этом одним из недостатков полупроводниковых лазеров можно считать относительно широкий и температурно нестабильный спектр генерации [1,2]. Ширина спектра генерации лазера и его многомодовый состав определяются малым спектральным межмодовым расстоянием и одинаковыми потерями на выход для продольных мод резонатора Фабри–Перо с характерными для современных мощных лазеров длинами более 1 mm. Смещение спектра генерации с изменением температуры или тока накачки связано с температурной зависимостью ширины запрещенной зоны активной области (квантовой ямы). С целью селекции продольных мод резонатора полупроводникового лазера используется распределенная обратная связь (РОС), сформированная периодической модуляцией диэлектрической проницаемости вдоль оси резонатора. В классических РОС-лазерах модуляция сформирована внутри слоев гетероструктуры, а ее период соответствует 1–2 порядкам дифракции Брэгга ($\Lambda \approx 150\text{--}300\text{ nm}$ для длины волны генерации $\lambda \approx 1\ \mu\text{m}$) [3–5], что приводит к необходимости использования дорогостоящей технологии электронной литографии и двухступенчатого про-

цесса эпитаксиального роста, что значительно усложняет технологический процесс.

Современные подходы в конструировании лазерных гетероструктур, излучающих в диапазоне длин волн 900–1100 nm [6], позволили достичь рекордно низких внутренних оптических потерь ($\alpha_{\text{int}} < 0.5\text{ cm}^{-1}$), что позволило увеличить длину резонатора до значений 3 mm и более, что приводит к возможности формирования модуляции диэлектрической проницаемости с большим периодом при сохранении числа периодов. Увеличение периода позволяет, во-первых, перейти к более простой технологии фотолитографии, во-вторых, сформировать омический контакт внутри периода между зубцами решетки, что позволяет перейти к поверхностной РОС и отказаться от двухступенчатого процесса эпитаксиального роста [7,8].

При этом новая конструкция поверхностной РОС требует оптимизации ее параметров и дизайна гетероструктуры для достижения необходимого значения коэффициента связи, определяющего пороговые условия генерации селективных мод. В настоящей работе были изготовлены многомодовые лазеры с поверхностной РОС высокого порядка на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs/InGaAs. Для полученных образцов проводились измерения спектров генерации при различных значениях тока инжекции и различных температурах.

Описание образцов

Экспериментальные образцы были сформированы на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs/InGaAs, выращенной методом моc-гидридной эпитаксии на под-

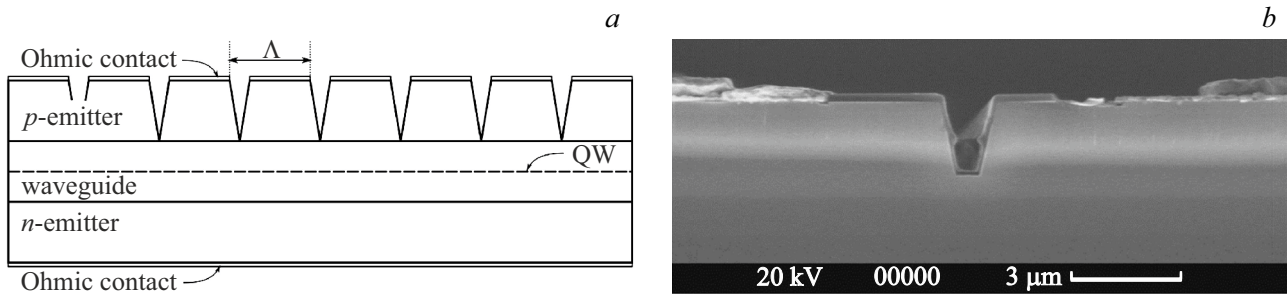


Рис. 1. (а) Схематичное изображение РОС-лазера с обозначениями слоев гетероструктуры; (б) изображение со сканирующего электронного микроскопа штриха поверхностной РОС.

ложке GaAs. Гетероструктура состояла из волновода $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ толщиной $1.2\ \mu\text{m}$, эмиттеров $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$ и активной области, сформированной одиночной квантовой ямой $\text{In}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{As}$ толщиной $9\ \text{nm}$, обеспечивающей максимум электролюминесценции на длине волны $1040\ \text{nm}$. Поверхностная РОС была сформирована методами контактной фотолитографии и реактивного ионного травления. Период РОС составил $20\ \mu\text{m}$, ширина протравленного штриха составила $1.2\ \mu\text{m}$. Между штрихами был нанесен омический p -контакт (рис. 1, а). Глубина штриха соответствовала положению гетерограницы волновод-эмиттер и составила более $1.9\ \mu\text{m}$ (рис. 1, б). Штрих РОС закрывался слоем SiO_2 с целью защиты от электрической утечки через протравленные слои гетероструктуры. Ширина полоскового контакта составила $100\ \mu\text{m}$.

Были исследованы образцы с длиной резонатора 1, 2, 3 и $4\ \text{mm}$ с естественно сколотыми гранями, с нанесенным антиотражающим покрытием на одну грань резонатора и с антиотражающими покрытиями на обеих гранях резонатора. Образцы были смонтированы на медные теплоотводы p -стороной вниз для измерения характеристик в непрерывном режиме генерации. Измерения спектров проводились с помощью спектроанализатора Thorlabs OSA 202 с разрешающей способностью $14\ \text{pm}$.

Результаты исследования

Для полученных образцов измерялись спектры генерации в непрерывном режиме при различных температурах. Для образцов с естественно сколотыми гранями в спектрах наблюдались как моды, связанные с РОС, так и моды Фабри–Перо. Данная модовая конкуренция связана с низким коэффициентом связи РОС, что обуславливает приблизительно равные пороговые условия РОС-мод с модами Фабри–Перо. Для повышения порога генерации мод Фабри–Перо проводились исследования образцов с нанесенными просветляющими покрытиями. Для образцов с одним просветляющим покрытием и одной естественно сколотой гранью ($R_1 = 0.05$, $R_2 = 0.32$, где R_1 , R_2 коэффициент отражения выходного и заднего зеркала резонатора соответственно) генерация только

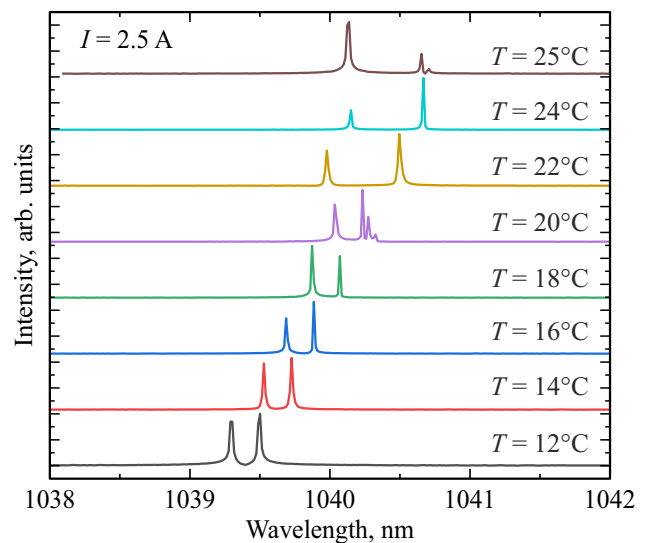


Рис. 2. Спектры генерации РОС-лазера с одним просветленным и одним естественно сколотым зеркалом при различных температурах, указанных на рисунке, при токе накачки $I = 2.5\ \text{A}$.

РОС-мод наблюдалась при длинах резонатора $3\ \text{mm}$ и более. В спектрах наблюдается две конкурирующие моды с минимальным порогом по разные стороны брэгговской длины волны.

Для данных образцов были измерены спектры при различной температуре (рис. 2). Измерения продемонстрировали, что температурное смещение длинноволнового края спектра составляет менее $0.1\ \text{nm/K}$. Межмодовое расстояние в диапазоне температур $12\text{--}20^\circ\text{C}$ не меняется и составляет $0.19\ \text{nm}$, а затем скачкообразно увеличивается до $0.51\ \text{nm}$, что свидетельствует о модовом перестроении и изменении коэффициента связи.

Для образцов с двумя просветленными зеркалами температурные зависимости спектра генерации измерялись в более широком диапазоне (рис. 3). При увеличении температуры спектр сдвигался в длинноволновую сторону с той же скоростью. При достижении существенного рассогласования между модами РОС и спектром усиления активной области наблюдалась па-

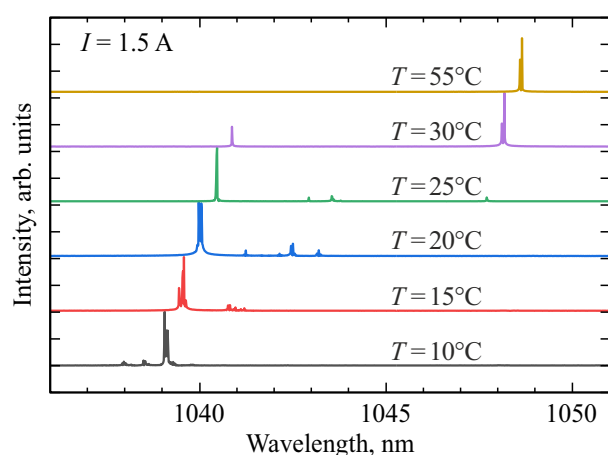


Рис. 3. Спектры генерации РОС-лазера с обоими просветленными торцевыми гранями при различных температурах, указанных на рисунке, при токе накачки $I = 1.5$ А.

разитная генерация мод Фабри–Перо очень слабой интенсивности. При дальнейшем увеличении температуры генерация осуществлялась на новом брэгговском порядке РОС. Расстояние между брэгговскими порядками составило 7.3 nm, что хорошо согласуется с расчетами. При этом межмодовое расстояние для двух самых низкопороговых мод для каждого брэгговского порядка с увеличением температуры не изменялось, что говорит об отсутствии изменения коэффициента связи.

Таким образом, были получены многомодовые полупроводниковые лазеры с поверхностной РОС, излучающие на длине волны порядка 1040 nm. Наличие конкуренции РОС-мод и мод Фабри–Перо свидетельствует о том, что для сформированной поверхностной решетки коэффициент связи получился слишком низким.

В дальнейших исследованиях планируется оптимизировать дизайн лазерной гетероструктуры для увеличения фактора оптического ограничения волноводной моды в области РОС.

Для образцов с просветляющими покрытиями продемонстрировано сужение спектра генерации. Его температурная стабильность составила менее 0.1 nm/К. Спектры состоят из двух конкурирующих мод, расположенных по обе стороны от брэгговской длины волны.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] И.С. Шашкин, А.Ю. Лешко, В.В. Шамахов, Н.В. Воронкова, В.А. Капитонов, К.В. Бахвалов, С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин, П.С. Копьев. ФТП, **55** (4), 344 (2021). DOI: 10.21883/FTP.2021.04.50736.9565

[2] Y. Zhao, Z. Wang, A. Demir, G. Yang, S. Ma, B. Xu, C. Sun, B. Li, B. Qiu. IEEE Photonics J., **13** (3), 1500708 (2021). DOI: 10.1109/JPHOT.2021.3073732

[3] Z. Dong, Y. Zhao, Q. Zhang, C. Wang, W. Li, S. Liu, X. Ma. J. Semicond., **37** (2), 024010 (2016). DOI: 10.1088/1674-4926/37/2/024010

[4] A. Maaßdorf, C.M. Schultz, O. Brox, H. Wenzel, P. Crump, F. Bugge, A. Mogilatenko, G. Erbert, M. Weyers, G. Tränkle. J. Cryst. Growth, **370**, 226 (2013). DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2012.08.012

[5] C.M. Schultz, P. Crump, H. Wenzel, O. Brox, A. Maaßdorf, G. Erbert, G. Traänkle. Electron. Lett., **46** (8), 580 (2010). DOI: 10.1049/el.2010.3347

[6] S.O. Slipchenko, D.A. Vinokurov, N.A. Pikhtin, Z.N. Sokolova, A.L. Stankevich, I.S. Tarasov, Z.I. Alferov. Semiconductors, **38**, 1430–1439 (2004). DOI: 10.1134/1.1836066

[7] J. Decker, P. Crump, J. Fricke, A. Maaßdorf, M. Traub, U. Witte, T. Brand, A. Unger, G. Erbert, G. Tränkle. IEEE Photonics Technol. Lett., **27** (15), 1675 (2015). DOI: 10.1109/LPT.2015.2435251

[8] V.V. Zolotarev, A.Y. Leshko, V.V. Shamakhov, D.N. Nikolaev, V.S. Golovin, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhtin. Semicond. Sci. Technol., **35** (1), 015009 (2020). DOI: 10.1088/1361-6641/ab5435.