

09

Режимы излучения двухсекционных лазеров спектрального диапазона $1.06 \mu\text{m}$ с активной областью на основе квантовых точек

© И.М. Гаджиев¹, М.С. Буяло^{1,¶}, А.С. Паюсов¹, А.Е. Губенко²,
С.С. Михрин², В.Н. Неведомский¹, Е.Л. Портной¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Innolume GmbH, Dortmund, Germany

¶ E-mail: mikhail.buyalo@gmail.com

Поступило в Редакцию 26 июня 2018 г.

Исследованы двухсекционные полупроводниковые лазеры с активной областью, состоящей из пяти слоев квантовых точек InGaAs, излучающие в спектральном диапазоне вблизи $1.06 \mu\text{m}$. Реализованы режимы пассивной синхронизации мод, пассивной модуляции добротности и режим синхронизации мод с модулированной амплитудой импульсов. Исследованы условия перехода между режимами генерации. В режиме модуляции добротности с ростом тока накачки диапазон перестройки превышает 4 раза по частоте повторения импульсов. Длительность импульсов синхронизации мод составила 2 ps при частоте следования 44.3 GHz.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.21.46853.17440

Полупроводниковые лазеры спектрального диапазона вблизи $1.06 \mu\text{m}$ вызывают интерес, поскольку их излучение может быть усилено с помощью коммерчески доступных легированных иттербием волоконных усилителей для реализации оптических импульсов высокой мощности и преобразования частоты в нелинейных кристаллах. Наиболее исследованной конструкцией активного слоя для лазеров этого диапазона являются лазерные структуры на основе квантовых ям (КЯ) InGaAs/GaAs [1]. В таких лазерах на основе КЯ была реализована генерация коротких световых импульсов в режимах пассивной синхронизации мод (ПСМ) и пассивной модуляции добротности (ПМД),

причем было показано, что реализация этих режимов возможна на одном образце [2] за счет выбора условий накачки. В то же время лазеры на основе КЯ не лишены определенных недостатков. В частности, для реализации режима ПСМ приходится прикладывать существенные обратные смещения для уширения экситонного пика и сдвига края спектра поглощения в квантовых ямах [3].

Лазерные диоды, активная область которых состоит из нескольких слоев квантовых точек (КТ), обладают улучшенными характеристиками по сравнению с другими типами лазеров; в частности, они характеризуются низкой плотностью порогового тока и высокой температурной стабильностью [4]. Особенности структур с квантовыми точками InGaAs, а именно малый интеграл перекрытия с волноводным слоем и длительный процесс релаксации носителей на основной уровень, приводят к тому, что в лазерах на их основе сильно подавлен модуляционный отклик [5]. Это делает лазеры на основе КТ более предпочтительными по сравнению с другими типами лазеров для реализации режима ПСМ. В то же время большинство работ, посвященных лазерам на КТ, выполнено для спектральной области вблизи $1.3 \mu\text{m}$. В [6] была продемонстрирована синхронизация мод в лазерах на КТ, выращенных методом MOCVD (MOCVD — metalorganic chemical vapour deposition), спектрального диапазона $1.1 \mu\text{m}$, однако режим ПСМ был реализован только при импульсной накачке лазеров, а произведение длительности импульсов на ширину спектра в несколько раз больше теоретического предела.

Режим ПМД также был продемонстрирован в лазерах на основе КТ спектрального диапазона 1.3 [7] и $1.05 \mu\text{m}$ [8], но при импульсной накачке лазеров и длительности импульсов порядка 300 ps. Несмотря на то что реализация режима ПМД в лазерах с КТ осложнена большим фактором подавления усиления, в этом режиме возможно получение мощных импульсов света с частотами повторения в субгигагерцевом диапазоне. В то же время в лазерах на КТ могут существовать более сложные динамические режимы генерации. В частности, в [9] был продемонстрирован режим модулированной синхронизации мод, в котором на импульсы синхронизации мод наложена низкочастотная огибающая. В предельном случае лазер может излучать в смешанном режиме, когда импульсы пассивной модуляции добротности состоят из пачки импульсов синхронизации мод [2].

Цель настоящей работы состоит в реализации режимов пассивной синхронизации мод и пассивной модуляции добротности в двухсекционных лазерах на основе квантовых точек, работающих в спектральном диапазоне $1.06 \mu\text{m}$, и исследовании условий перехода между этими режимами.

Лазерные диоды были изготовлены на основе лазерных структур, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии в Inpolume GmbH (Германия). Активная область состояла из пяти слоев квантовых точек InGaAs/GaAs, разделенных барьерами GaAs толщиной 33 nm , плотность точек на слой составляла примерно $4.5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ (рис. 1, *a*). Активная область была помещена в волновод из GaAs толщиной 340 nm , который в свою очередь граничит с легированными эмиттерами $\text{Al}_{0.35}\text{GaAs}$. Двухсекционные полосковые лазеры с шириной полоска $8 \mu\text{m}$ были изготовлены в ФТИ им. А.Ф. Иоффе методами стандартной фотолитографии. Длина резонатора лазера варьировалась от 0.4 до 2 mm , длина поглощающей секции составляла около 10% от длины резонатора, электрическое сопротивление между секциями было более $10 \text{ k}\Omega$. Кроме того, у части образцов на зеркало со стороны поглотителя было нанесено отражающее покрытие с коэффициентом отражения 95% . Лазеры монтировались на медный теплоотвод, измерения проводились при температуре 20°C .

Для определения зависимости спектрального положения максимума люминесценции от тока накачки были изготовлены короткие односекционные лазеры с длиной резонатора 0.3 mm . В таких лазерах усиления на основном состоянии недостаточно для лазерной генерации, а генерация происходит на одном из возбужденных состояний. При малых уровнях инжекции спектр люминесценции находится вблизи спектральной области $1.06 \mu\text{m}$, соответствующей основному состоянию квантовой точки. При увеличении тока накачки происходит постепенное заселение возбужденных состояний квантовых точек, приводящее к коротковолновому сдвигу максимума люминесценции и сопровождающееся уширением спектра с 90 meV при токе накачки 5 mA до 155 meV при токе накачки 40 mA (рис. 1, *b*). При дальнейшем росте тока накачки пик люминесценции сдвигается в диапазон длин волн $940\text{--}950 \text{ nm}$, в котором находится длина волны генерации этих коротких лазеров.

В лазерах со сколотыми зеркалами с длиной резонатора 2 mm длина волны излучения λ находилась вблизи $1.1 \mu\text{m}$. Сокращение длины лазера до 1 mm приводило к коротковолновому сдвигу до $1.064\text{--}1.07 \mu\text{m}$ и

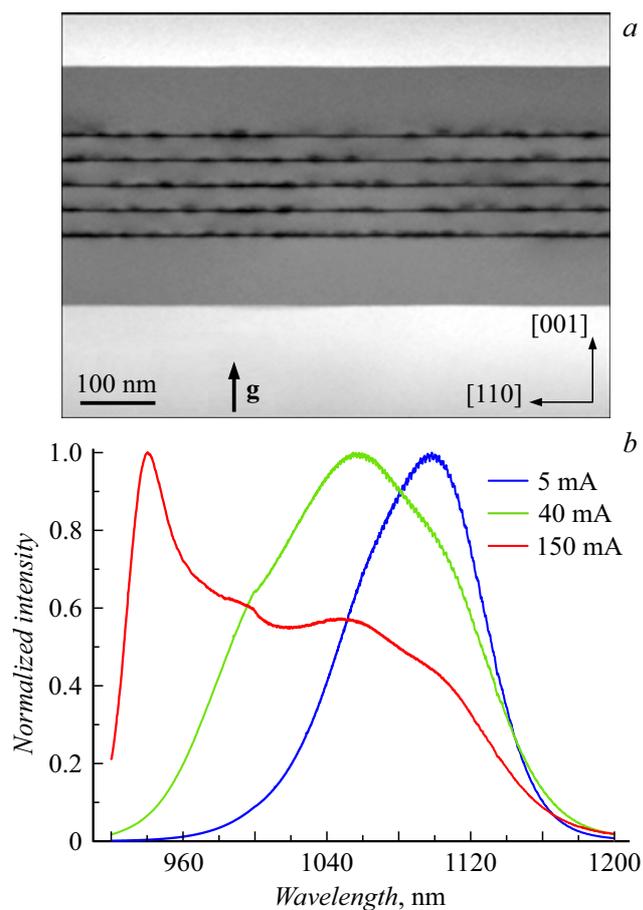


Рис. 1. *a* — ПЭМ-изображение активной области лазерной структуры, *b* — спектры люминесценции лазера длиной 0.3 мкм в зависимости от тока накачки, спектры при 5 и 40 мА измерены при постоянном токе накачки, спектр при 150 мА — при импульсной накачке длительностью 100 нс.

увеличению порогового тока. В области порога генерации наблюдалась типичная для лазеров на КТ [10] бистабильная ватт-амперная характеристика.

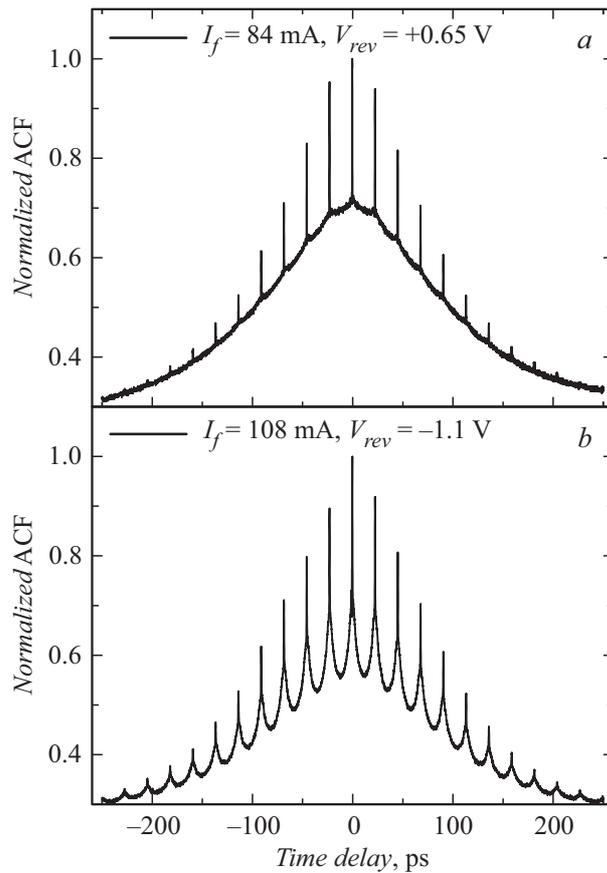


Рис. 2. Автокорреляционные функции излучения двухсекционного лазера, измеренные при оптической мощности $P = 15$ mW. *a* — режим пассивной модуляции добротности, $F_{QS} = 550$ MHz, $\Delta\tau_{QS} = 140$ ps; *b* — режим модулированной синхронизации мод, $F_{slow} = 625$ MHz, $\Delta\tau_{slow} = 135$ ps.

Управление двухсекционным лазером осуществлялось постоянным током I_g , приложенным к усиливающей секции, и обратным смещением V_{rev} , приложенным к секции поглотителя. При малых отрицательных или положительных обратных смещениях на секции поглотителя

наблюдался режим ПМД. На рис. 2, *a* представлена типичная автокорреляционная функция излучения лазера в этом режиме с частотой следования импульсов $F_{QS} = 550$ МГц, длительностью $\Delta\tau_{QS} = 140$ ps, вычисленной по автокорреляционной функции в предположении гауссовой формы импульса, и средней оптической мощностью $P = 15$ mW. В лазерах с зеркалами без покрытий при увеличении тока I_g диапазон перестройки частоты F_{QS} составил от 200 до 820 МГц, при этом длительность импульсов сокращалась с 370 до 150 ps. При дальнейшем увеличении накачки происходило увеличение длительности импульсов и появлялись „хвосты“ импульсов. Большая длительность импульсов, составляющая величину порядка десяти времен обхода резонатора, а также малая наибольшая частота F_{QS} по сравнению с таковыми для лазеров на основе КЯ могут быть объяснены демпфированием коэффициента усиления g при больших мощностях: $g \sim 1/(1 + \varepsilon P)$, где ε — фактор подавления усиления, а P — усредненная по пространственным координатам плотность фотонов [11]. В режиме малого сигнала можно показать, что максимальная частота $f_{\max} \sim g_0/\varepsilon$, где g_0 — сечение усиления. Режим ПМД для двухсекционного лазера может быть описан системой скоростных уравнений (см., например, [12]), анализ которых показывает, что увеличение ε также приводит к уменьшению частоты следования импульсов. При этом в лазерах на основе квантовых точек типичные значения фактора подавления усиления, полученные при анализе методом малых сигналов, составляют $(4-8) \cdot 10^{-16}$ cm³ [11,13]. Это на порядок больше, чем для лазеров на основе квантовых ям, и на два порядка больше, чем для лазеров с двойной гетероструктурой, для которых частоты следования импульсов в режиме ПМД составляют несколько единиц гигагерц и около десяти гигагерц соответственно.

Для увеличения выходной мощности на зеркало со стороны поглотителя было нанесено отражающее покрытие, а также добавлено сопротивление около 50Ω в цепь управления поглотителем. При вскрытии поглотителя фототок компенсирует приложенное смещение к поглощающей секции и соответственно увеличивает добротность резонатора. Таким образом в режиме ПМД была достигнута пиковая мощность 340 mW при частоте следования импульсов 450 МГц и длительности импульса 100 ps.

Еще одним путем увеличения мощности импульса в режиме ПМД является увеличение времени накопления инверсной заселенности за счет увеличения обратного смещения на поглощающей секции. Однако

увеличение обратного смещения на секции поглотителя приводило к качественному изменению режима генерации лазера. На рис. 2 показан переход от режима пассивной модуляции добротности в режим модулированной синхронизации мод в лазере длиной 1 мм с нанесенным отражающим покрытием на зеркало резонатора при постоянной излучаемой оптической мощности. При положительных обратных смещениях автокорреляционная функция соответствует чистому режиму ПМД с узкими „спайками“, разнесенными на полное время обхода резонатора лазера, и контрастом 3:2.1:0.93 (рис. 2, *a*). Затем, как видно на рис. 2, *b*, при увеличении обратного смещения наблюдаются уширение „спайков“ и некоторое увеличение контраста до 3:1.68:0.93, что соответствует переходу лазера в режим, в котором импульсы ПСМ модулированы по амплитуде. При этом длительность импульсов в режиме ПМД и модулированной ПСМ практически совпадает. Следует отметить, что амплитуда „спайков“ спадает до нуля на краю медленной огибающей, т.е. между импульсами с медленной огибающей нет сигнала. В самом импульсе с медленной огибающей автокорреляционная функция не спадает до уровня нуля, что свидетельствует о том, что часть оптической мощности в импульсе излучается не в режиме ПСМ. Это может быть объяснено тем, что за все время длинного импульса не происходит полной синхронизации мод.

Дальнейшее увеличение обратного смещения на поглощающей секции и тока накачки приводит к переходу лазера в режим ПСМ. На рис. 3, *a* представлена соответствующая автокорреляционная функция излучения лазера, из которой видно, что происходит полная синхронизация мод без каких-либо огибающих. Частота следования импульсов соответствует времени полного обхода резонатора и составляет 44.3 GHz, длительность импульсов в гауссовом приближении 2 ps, а произведение длительности импульсов на ширину спектра $\Delta t \Delta \nu$ составляет 0.89 при теоретическом наименьшем значении 0.44. При этом спектр излучения лазера (рис. 3, *b*) сдвинут в длинноволновую область на 20 nm по сравнению с режимом ПМД, т.е. в спектральную область с меньшим коэффициентом поглощения. Этот сдвиг может быть объяснен тем, что в режиме пассивной модуляции добротности вскрытие поглотителя более вероятно в коротковолновой области, где усиление больше, в то время как для синхронизации мод требуется более быстрое насыщение усиления и не требуется большой величины модуляции поглощения.

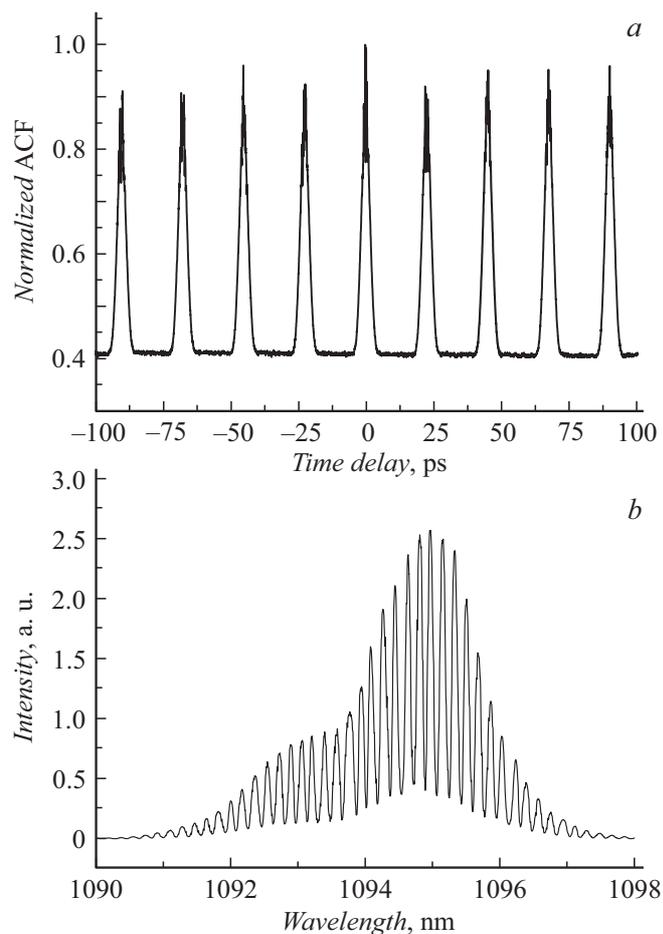


Рис. 3. Режим пассивной синхронизации мод в двухсекционном лазере. $I_f = 118$ mA, $V_{rev} = -1.5$ V, $P_{peak} = 252$ mW, $F_{ML} = 44.3$ GHz, $\Delta\tau = 2$ ps, $\Delta\tau\Delta\nu = 0.89$.

В работе были исследованы лазеры на основе квантовых точек InGaAs/GaAs, работающие в спектральном диапазоне вблизи $1.06 \mu\text{m}$. Диапазон перестройки частоты следования импульсов в режиме ПМД

составил от 200 до 820 МГц. Длительность импульсов свыше 100 ps и низкая предельная частота повторения импульсов в режиме ПМД обусловлены высоким коэффициентом подавления усиления. Была достигнута пиковая мощность 0.34 W в одномодовых лазерах в режиме модуляции добротности. Увеличение обратного смещения приводит к генерации пикосекундных импульсов в режиме пассивной синхронизации мод. Таким образом, режимы пассивной модуляции добротности и пассивной синхронизации мод, а также модулированной синхронизации мод были реализованы в одном и том же лазере за счет выбора обратного смещения на секции поглотителя.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00820 мол_а.

Список литературы

- [1] *Weber C., Klehr A., Knigge A., Breuer S.* // Int. Conf. Transparent Opt. Networks. IEEE, 2016. P. 7–10.
- [2] *Буяло М.С., Горбацевич А.А., Егоров А.Ю., Гаджиев И.М., Бахшаев И.О., Задиранов Ю.М., Ильинская Н.Д., Портной Е.Л.* // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 7. С. 31–39.
- [3] *Гаджиев И.М., Буяло М.С., Бахшаев И.О., Григорьев Р.И., Слипченко С.О., Пухтин Н.А., Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Винокуров Д.А., Тарасов И.С., Портной Е.Л.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 22. Р. 29–36.
- [4] *Mikhrin S.S., Kovsh A.R., Krestnikov I.L., Kozhukhov A.V., Livshits D.A., Ledentsov N.N., Shernyakov Y.M., Novikov I.I., Maximov M.V., Ustinov V.M., Alferov Z.I.* // Semicond. Sci. Technol. 2005. V. 20. N 5. P. 340–342.
- [5] *Capua A., Rozenfeld L., Mikhelashvili V., Eisenstein G., Kuntz M., Laemmlin M., Bimberg D.* // Opt. Express. 2007. V. 15. N 9. P. 5388–5393.
- [6] *Thompson M.G., Tan K.T., Marinelli C., Williams K.A., Sellin R.L., Pentz R.V., White I.H., Kuntz M., Ouyang D., Kaiander I.N., Ledentsov N.N., Bimberg D., Ustinov V.M., Zhukov A.E., Kovsh A.R., Visinka F., Jochum S., Hansmann S., Kang D.-J., Blamire M.G.* Mode locking of InGaAs quantum dot lasers // Proc. of SPIE. The International Society for Optical Engineering, 2004. V. 5452. N 1. P. 117.
- [7] *Huang X., Stintz A., Li H., Lester L.F., Cheng J., Malloy K.J.* Demonstration of passive Q-switching and passive mode-locking in 1.3 μm , two-section InAs quantum dot lasers // Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO'01). Technical digest. Optical Society of America, 2001. P. 359.

-
- [8] *Liu H., Snowton P., Summers H., Edwards G., Drexler W.* // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95. N 10. P. 101111.
- [9] *Bandelow U., Radziunas M., Vladimirov A., Hüttl B., Kaiser R.* // Opt. Quant. Electron. 2006. V. 38. N 4-6. P. 495–512.
- [10] *Thompson M.G., Tan K.T., Marinelli C., Williams K.A., Penty R.V., White I.H., Kuntz M., Ouyang D., Bimberg D., Ustinov V.M., Zhukov A.E., Kovsh A.R., Ledentsov N.N., Kang D.-J., Blamire M.G.* // Electron. Lett. 2004. V. 40. N 5. P. 346–347.
- [11] *Ghosh S., Pradhan S., Bhattacharya P.* // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81. N 16. P. 3055–3057.
- [12] *Rafailov E.U., Avrutin E.* Ultrafast pulse generation by semiconductor lasers // Semiconductor lasers. Elsevier, 2013. P. 149–217.
- [13] *Su H., Lester L.F.* // J. Phys. D.: Appl. Phys. 2005. V. 38. N 13. P. 2112–2118.