

09

Обострение оптических импульсов в вертикально-излучающих лазерах с активной областью на основе субмонослойных квантовых точек InGaAs

© В.В. Дюделев^{1,2}, Н.А. Малеев¹, А.Г. Кузьменков^{1,3},
С.А. Блохин¹, В.Ю. Мильников^{1,4}, В.И. Кучинский¹,
В.М. Устинов³, Э.У. Рафаилов^{5,2}, Г.С. Соколовский^{1,2,¶}

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

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

³ Научно-технологический центр микроэлектроники РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Aston Institute of Photonic Technologies, Aston University, Birmingham, UK

¶ E-mail: gs@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 31 июля 2017 г.

Представлены результаты исследований вертикально-излучающих лазеров на основе субмонослойных квантовых точек InGaAs с оксидной апертурой диаметром $\sim 1 \mu\text{m}$. Продемонстрирована возможность обострения выходных оптических импульсов до 50–100 ps при накачке электрическими импульсами длительностью 10–100 ns с частотой повторения 10–100 kHz.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.24.45336.16992

Генерация оптических импульсов длительностью менее 100 ps полупроводниковыми лазерами представляет большой интерес в связи с широким спектром их научно-технических приложений, среди которых можно выделить лазерную локацию и дальнометрию, оптическую связь, нелинейное преобразование частоты, генерацию сигналов произвольной формы [1–3]. Существует несколько подходов для достижения генерации пикосекундных оптических импульсов. Наиболее распространенным яв-

ляется использование в полупроводниковых лазерах режима пассивной модуляции добротности или синхронизации мод, что приводит к работе лазера в режиме самопульсаций и позволяет получать пикосекундные световые импульсы при накачке лазера импульсами тока произвольной длительности. Для реализации режима самопульсаций необходимо поместить в лазерный резонатор насыщающийся поглотитель [4]. В настоящее время опубликовано значительное число экспериментальных и теоретических работ [5–7], в которых обсуждаются условия достижения режима самопульсаций как в полосковых торцевых полупроводниковых лазерах, так и в вертикально-излучающих лазерах (ВИЛ), где для ограничения тока инжекции используется ионная имплантация или селективное окисление, что обеспечивает формирование насыщающегося поглотителя в непрокачиваемой части активной области. Альтернативным подходом к генерации оптических импульсов пикосекундной длительности является использование режима переключения усиления, который реализуется при накачке полупроводниковых лазеров наносекундными импульсами тока [8–10].

К недостаткам метода модуляции добротности можно отнести сложность контроля частоты генерации импульсов, а также необходимость использования насыщающегося поглотителя. Режим переключения усиления, обеспечивая свободу контроля частоты следования импульсов, вместе с тем требует чрезвычайно тщательного подхода к реализации схемы электрической накачки лазера в связи с необходимостью согласования нагрузок и волновых сопротивлений электрической цепи.

В настоящей работе демонстрируется генерация оптических импульсов пикосекундной длительности вертикально-излучающими лазерами при сверхвысокой накачке импульсами тока (с амплитудой порядка десятков пороговых значений) с длительностями от 10 ns до 1 μ s. Отличие предлагаемого подхода от описанных выше состоит в том, что обострение выходного импульса относительно импульса накачки достигается за счет использования механизма насыщения усиления. Влияние подобных эффектов на возможность обострения импульсов накачки было показано ранее для торцевых лазеров, где при сверхвысоких уровнях накачки наблюдались срыв генерации [11,12] или переключение на генерацию с возбужденных квантовых состояний [13].

В наших экспериментах использовались ВИЛ спектрального диапазона 0.98 μ m с классической конструкцией вертикального оптического резонатора, в которой инжекция носителей осуществляется через

легированные распределенные брэгговские отражатели (РБО). Эпитаксиальные структуры для исследуемых ВИЛ, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs, состоят из нижнего РБО на основе 33 пар слоев GaAs/Al_{0.9}Ga_{0.1}As *n*-типа, оптического резонатора 1.5λ Al_{0.15}Ga_{0.85}As с активной средой, верхнего РБО на основе 33 пар слоев GaAs/Al_{0.9}Ga_{0.1}As *p*-типа с одним апертурным слоем. Активная среда состояла из трех слоев квантовых точек InGaAs толщиной 8 nm, сформированных в субмонослойном режиме осаждения (так называемые субмонослойные квантовые точки). Толщины и составы слоев были выбраны таким образом, чтобы получить резонансную длину волны 980 nm. Детали эпитаксиальной и приборной конструкций и особенности технологического процесса изготовления лазеров приведены в работе [14].

Особенностью данной конструкции ВИЛ является формирование ненакачиваемых током областей активной среды вблизи токовой оксидной апертуры с клиновидной формой. В результате для одномодовых ВИЛ с характерным размером токовой оксидной апертуры 1 μ m в непрерывном режиме генерации наблюдаются области самопульсаций в ограниченном диапазоне токов накачки [15]. Порог генерации таких лазеров в непрерывном режиме накачки составил 1.5 mA. При величине тока накачки около 4–5 mA наблюдается тепловой загиб ватт-амперной характеристики, связанный с саморазогревом лазера при повышении тока накачки. При токе накачки, превышающем 8–10 mA, лазерная генерация отсутствует.

В настоящей работе нами исследовалась возможность использования данных ВИЛ для генерации одиночных пикосекундных оптических импульсов при накачке импульсами тока с амплитудой, многократно превышающей порог генерации в непрерывном режиме. Накачка осуществлялась генерируемыми цифровым источником импульсами напряжения, передаваемыми на лазер по 50-омному каналу. Длительность импульсов составляла от 10 ns до 1 μ s при частоте повторения от 10 до 100 kHz. Длительность переднего и заднего фронтов импульсов накачки составляла 5 ns.

Как показали проведенные эксперименты, при импульсной накачке насыщение усиления оказывает определяющее влияние на динамические характеристики ВИЛ с малым размером оксидной апертуры. После первоначального включения при достижении порога генерации релаксационные процессы приводят к выключению лазера после завершения

первого цикла релаксационных колебаний. Однако ожидаемого повторного включения ВИЛ на втором цикле релаксационных колебаний не происходит в силу насыщения усиления и перехода лазера в режим полного подавления генерации. При этом деградации ВИЛ, несмотря на достижение (и многократное превышение) критического тока, не происходит, так как насыщение усиления в лазере с размером оксидной апертуры, составляющим около $1 \mu\text{m}$, определяется не температурными эффектами, а чрезвычайно малым объемом активной области.

При накачке ВИЛ микросекундными электрическими импульсами генерировались оптические импульсы длительностью 150–200 ps. Снижение длительности импульсов накачки на порядок до 100 ns приводило к снижению длительности генерируемых лазерных импульсов до 100 ps. В силу цифровой архитектуры использовавшегося в наших экспериментах источника электрической накачки длительность фронта нарастания импульса накачки не менялась при изменении длительности импульса и составляла 5 ns. Поэтому снижение длительности генерируемых оптических импульсов при уменьшении длительности импульсов накачки объяснялось уменьшением нагрева лазерного чипа при снижении скважности электрической накачки. По этой причине следовало ожидать дальнейшего снижения длительности лазерных импульсов при дальнейшем уменьшении длительности импульсов накачки.

На рис. 1 представлены осциллограммы, демонстрирующие генерацию одиночных оптических импульсов при накачке ВИЛ импульсами тока с длительностями 30 и 10 ns. Минимальная длительность полученных импульсов, измеренная на полувысоте, составила 67 и 52 ps соответственно.

Следует отметить, что при неизменной длительности фронта накачки увеличение амплитуды импульса накачки приводит к увеличению скорости нарастания тока накачки ВИЛ и ускорению проявления эффекта насыщения усиления. Действительно, в наших экспериментах увеличение амплитуды импульсов накачки приводило к уменьшению длительности генерируемых лазерных импульсов. На рис. 2, *a* представлена эволюция выходных оптических импульсов при накачке ВИЛ электрическими импульсами длительностью 10 ns различной амплитуды. Отметим одновременное увеличение интенсивности генерируемых импульсов и уменьшение их длительности при увеличении амплитуды импульсной накачки. Рис. 2, *b* демонстрирует обратную зависимость длительности выходных оптических импульсов,

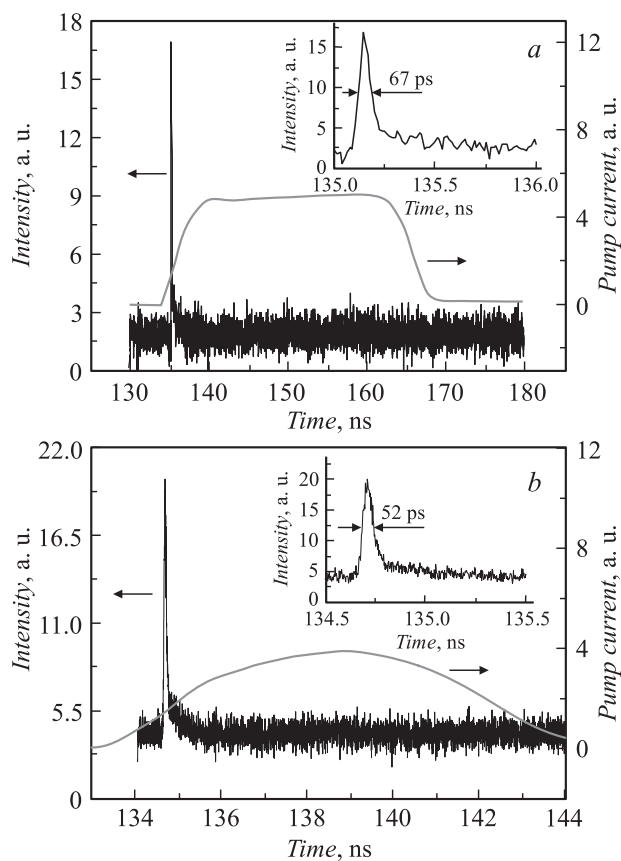


Рис. 1. Обострение электрических импульсов накачки длительностью 30 (a) и 10 ns (b) до длительности оптических импульсов ВИЛ, составляющей 67 и 52 ps соответственно. На вставках показаны осциллограммы выходных оптических импульсов в увеличенном виде.

измеренной на полувывоте, от амплитуды импульсов накачки. Также на рис. 2, b представлена зависимость максимальной амплитуды оптических импульсов от амплитуды импульсов накачки. Из представленной зависимости следует, что пиковая мощность продолжает расти линейно с увеличением тока накачки во всем измеренном диапазоне.

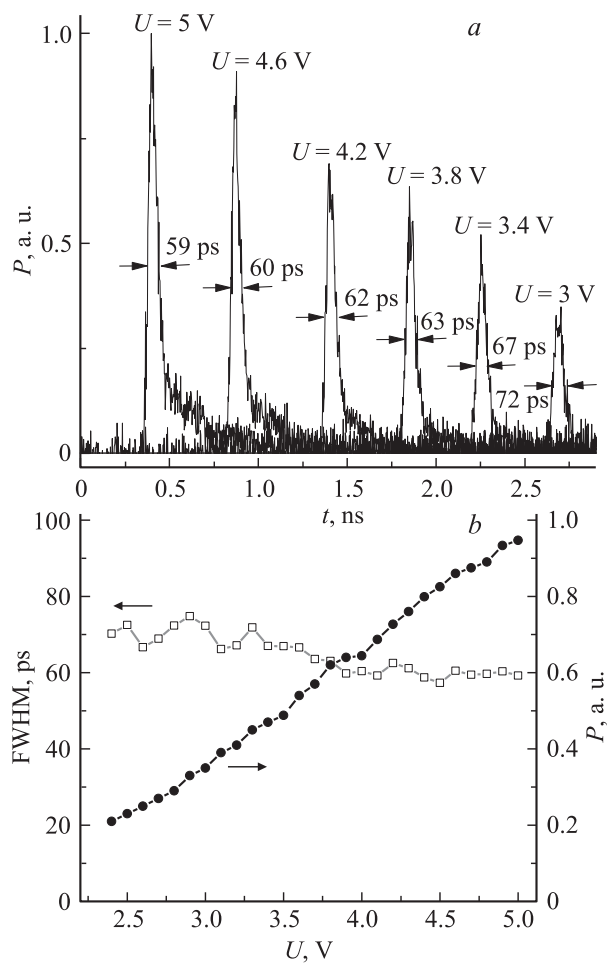


Рис. 2. *a* — эволюция выходных оптических импульсов при накачке ВИЛ электрическими импульсами длительностью 10 ns с различной амплитудой. *b* — зависимости длительности оптических импульсов, измеренной на половине амплитуды, и их максимальной амплитуды от амплитуды импульсов накачки.

Таким образом, в настоящей работе продемонстрирована возможность обострения оптических импульсов до 50–100 ps при накачке ВИЛ спектрального диапазона $0.98 \mu\text{m}$ на основе субмонослойных квантовых

точек InGaAs электрическими импульсами длительностью 10–100 ns с частотой повторения 10–100 kHz.

Список литературы

- [1] Hou L., Haji M., Marsh J.H. // IEEE J. Select. Topics Quant. Electr. 2013. V. 19. Iss. 4. P. 1100808.
- [2] Huikari J.M., Avrutin E.A., Ryvkin B.S., Nissinen J.J., J.T. Kostamovaara // IEEE J. Select. Topics Quant. Electr. 2015. V. 21. Iss. 6. P. 1501206.
- [3] Fedorova K.A., Sokolovskii G.S., Nikitichev D.I., Battle P.R., Livshits D.A., Rafailov E.V. // Opt. Lett. 2013. V. 38. Iss. 15. P. 2835–2837.
- [4] Portnoi E.L., Venus G.B., Khazan A.A., Gadjiev I.M., Shmarcev A. Yu., Frahm J., Kuhl D. // IEEE J. Select. Topics Quant. Electr. 1997. V. 3. Iss. 2. P. 256–260.
- [5] Lim S.F., Hudgings J.A., Li G.S., Yuen W., Lau K.Y., Chang-Hasnain C.J. // Electron. Lett. 1997. V. 33. N 20. P. 1708–1710.
- [6] Tierno A., Radwell N., Ackemann T. // Phys. Rev. A. 2011. V. 84. N 4. P. 043828.
- [7] Viktorov E.A., Erneux T. // Phys. Rev. E. 2014. V. 90. N 5. P. 052914.
- [8] Lanz B., Ryvkin B.S., Avrutin E.A., Kostamovaara J.T. // Opt. Exp. 2013. V. 21. N 24. P. 29780–29791.
- [9] Дюделев В.В., Зазулин С.В., Кольхалова Е.Д., Лосев С.Н., Дерягин А.Г., Кучинский В.И., Ефанов М.В., Соколовский Г.С. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 24. С. 1–8.
- [10] Кольхалова Е.Д., Дюделев В.В., Зазулин С.В., Лосев С.Н., Дерягин А.Г., Кучинский В.И., Ефанов М.В., Соколовский Г.С. // ЖТФ. 2017. Т. 87. В. 12. С. 1887–1891.
- [11] Соколовский Г.С., Каталуна М.А., Дерягин А.Г., Кучинский В.И., Новиков И.И., Максимов М.В., Жуков А.Е., Устинов В.М., Сиббет В., Рафаилов Э.У. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 1. С. 9–16.
- [12] Sokolovskii G.S., Viktorov E.A., Abusaa M., Danckaert J., Dudelev V.V., Kolykhalova E.D., Soboleva K.K., Deryagin A.G., Novikov I.I., Maximov M.V., Zhukov A.E., Ustinov V.M., Kuchinskii V.I., Sibbett W., Rafailov E.U., Erneux T. // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106. Iss. 26. P. 261103.
- [13] Соколовский Г.С., Винокуров Д.А., Дерягин А.Г., Дюделев В.В., Кучинский В.И., Лосев С.Н., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Слипченко С.О., Соколова З.Н., Тарасов И.С. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 16. С. 58–64.
- [14] Блохин С.А., Малеев Н.А., Кузьменков А.Г., Шерняков Ю.М., Новиков И.И., Гордеев Н.Ю., Дюделев В.В., Соколовский Г.С., Кучинский В.И., Кулагина М.М., Максимов М.В., Устинов В.М., Ковш А.Р., Михрин С.С., Леденцов Н.Н. // ФТП. Т. 40. В. 5. С. 633–638.
- [15] Kuzmenkov A.G., Ustinov V.M., Sokolovskii G.S., Maleev N.A., Blokhin S.A., Deryagin A.G., Chumak S.V., Shulenkov A.S., Mikhrin S.S., Kovsh A.R., McRobbie A.D., Sibbett W., Cataluna M.A., Rafailov // Appl. Phys. Lett. 2007. V.91. Iss. 12. P. 121106.