

09

Генерация мощных ультракоротких оптических импульсов полупроводниковыми лазерами

© В.В. Дюделев^{1,2}, С.В. Зазулин³, Е.Д. Колыхалова^{1,4},
С.Н. Лосев¹, А.Г. Дерягин¹, В.И. Кучинский¹,
М.В. Ефанов³, Г.С. Соколовский^{1,¶}

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

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

³ ПК „ФИД-ТЕХНИКА“, Санкт-Петербург

⁴ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“

¶ E-mail: gs@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 30 мая 2016 г.

Исследованы полупроводниковые лазеры с выводом излучения через оптическое волокно при их накачке мощными короткими импульсами тока с длительностью 5 ns и передним фронтом импульса меньше 1 ns. Показано, что при такой накачке удается получить существенное обострение оптического выходного импульса: менее 80 ps для одномодового лазера и 120 ps для широкополоскового многомодового лазера с высокой выходной пиковой оптической мощностью: 1.5 W для одномодового и 27 W для многомодового соответственно.

Для многих областей науки и техники требуются лазеры, излучающие импульсы света с длительностью $t_{pulse} < 150$ ps и ниже, со значительной величиной пиковой оптической мощности ($P \geq 1$ W) [1–3]. Основными путями получения таких импульсов является применение в твердотельных и волоконных лазерах режима модуляции добротности.

Недостатками традиционных подходов являются дороговизна и низкая компактность данных источников лазерного излучения. Альтернативой традиционным подходам является применение полупроводниковых лазеров. В настоящее время продемонстрирована высокая пиковая мощность оптического излучения полупроводниковых лазеров с длительностями светового импульса излучения 2–100 ns [4]. В то же время получение мощных коротких оптических импульсов с пикосекундной длительностью от полупроводниковых лазеров остается несомненно актуальной задачей.

Насыщение усиления полупроводниковых лазеров оказывает серьезное влияние на их динамические характеристики [5–9]. Особенно ярким эффектом является срыв лазерной генерации при накачке полупроводниковых лазеров мощными импульсами тока с длительностями порядка 20–100 ns при 20–40-кратном превышении амплитудой импульса тока накачки величины порогового тока с последующим включением лазера через 10–80 ns в зависимости от длительности импульса тока и его амплитуды [7–10]. При этом длительность первого оптического импульса до выключения лазера не превышает 5 ns [9].

В настоящей работе представлены исследования по обострению импульсов лазерного излучения при накачке полупроводникового лазера мощными короткими импульсами тока с длительностью менее 5 ns и передним фронтом нарастания импульса меньше 1 ns. Импульсы формировались генераторами на основе мощных быстродействующих полупроводниковых ключей [10]. Объектами исследования выступили промышленные полупроводниковые лазеры с волоконным выводом излучения. Были исследованы два типа лазеров. Первый тип — это мощные многомодовые полупроводниковые лазеры с выводом излучения через многомодовое оптическое волокно с диаметром сердцевины 100 μm . Длина волны генерации находилась в спектральной области 960–980 nm. Мощность излучения в непрерывном режиме генерации в рабочей точке составляла 10 W при токе накачки 12 A. Второй тип исследуемых лазеров — это узкополосковые одномодовые полупроводниковые лазеры с выводом излучения через одномодовое оптическое волокно с максимальной оптической мощностью около 170 mW в непрерывном режиме генерации при рабочем токе накачки 300 mA. Длина волны генерации находилась вблизи 1060 nm. Следует отметить, что данные образцы полупроводниковых лазеров являются промышленными корпусированными изделиями и не подвергались дополнительному процессированию для получения коротких импульсов света,

предполагающему внесение в резонатор лазерного диода областей с насыщающимся поглотителем для обеспечения режима пичкования лазера [11] или подавления паразитных осцилляций [12].

Была проведена серия экспериментов по накачке лазеров данных типов импульсами тока с двумя длительностями по полуширине импульса 4 и 1 ns соответственно. Частота повторения импульсов тока в обоих случаях составляла 10 kHz. Регистрация формы оптического импульса производилась быстродействующим фотоприемником Optilab PD-30 с полосой пропускания 30 GHz, подключенным к 50 GHz стробоскопическому осциллографу Agilent 86100A. Волоконный вывод излучения исследуемых образцов полупроводниковых лазеров обеспечивал эффективное смешивание интенсивности всех мод выходного излучения, что позволяло провести корректные измерения, соответствующие среднему распределению интенсивности выходного сигнала.

При накачке импульсами тока с полушириной 4 ns обострение выходного оптического импульса для многомодовых лазеров наблюдалось только при небольшом превышении амплитуды тока накачки порогового значения. Полуширина оптического импульса при этом составляла ~ 400 ps. При увеличении амплитуды накачки происходило существенное уширение выходного оптического импульса. Осциллограммы, представляющие форму импульса токовой накачки и форму оптического выходного импульса для значения амплитуды импульса тока 1.7 A, приведены на рис. 1, а. Нижняя кривая соответствует току накачки, а верхняя — оптическому импульсу. Длительная задержка между импульсом тока накачки и выходным оптическим импульсом на осциллограмме объясняется различными длинами линий регистрации оптического и электрического сигналов.

При накачке одномодовых лазеров импульсами тока той же длительности наблюдалось сужение оптического импульса по мере увеличения амплитуды тока вплоть до значения амплитуды тока накачки 250 mA. Длительность импульса по полуширине при этом составляла ~ 200 ps. При значениях амплитуды тока выше 250 mA наблюдался рост пьедестала импульса, энергией которого нельзя пренебречь. При превышении амплитуды импульса тока 850 mA наблюдалась генерация второго оптического импульса, опережающего первый на время порядка 1.6 ns. С увеличением амплитуды тока частота следования импульсов увеличивалась, а также увеличивалось число наблюдаемых пиков до 5 при значении амплитуды тока накачки 2.8 A. При достижении амплитуды

1* Письма в ЖТФ, 2016, том 42, вып. 24

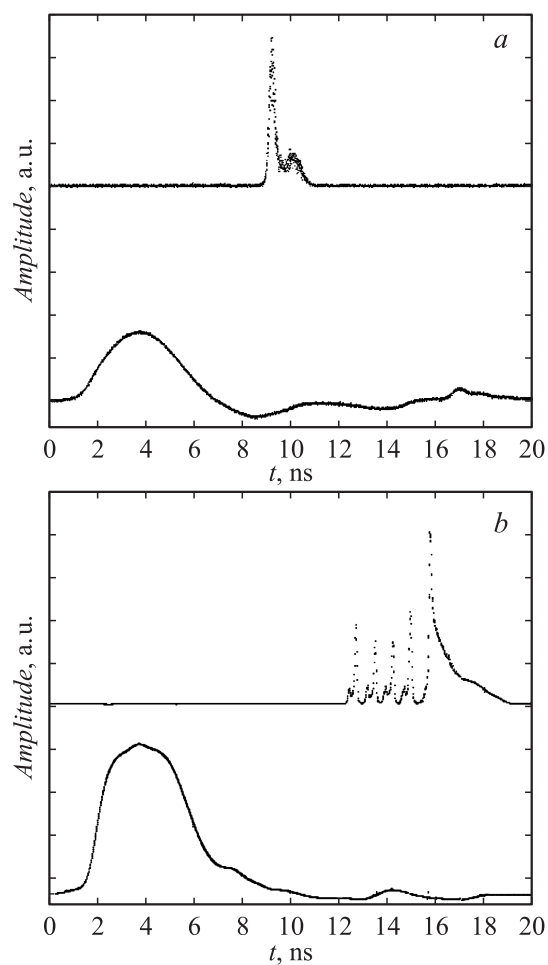


Рис. 1. Осциллограммы импульса тока накачки длительностью 4 ns и ответного оптического выходного импульса при накачке многомодового лазера импульсом тока амплитудой 1.7 А (*a*) и одномодового лазера импульсом тока амплитудой 2.8 А (*b*). На обеих частях рисунка нижняя кривая соответствует импульсу тока накачки, а верхняя — оптическому импульсу. Длительная задержка между импульсом тока накачки и выходным оптическим импульсом на осциллограммах объясняется различием длин линий регистрации оптического и электрического сигналов.

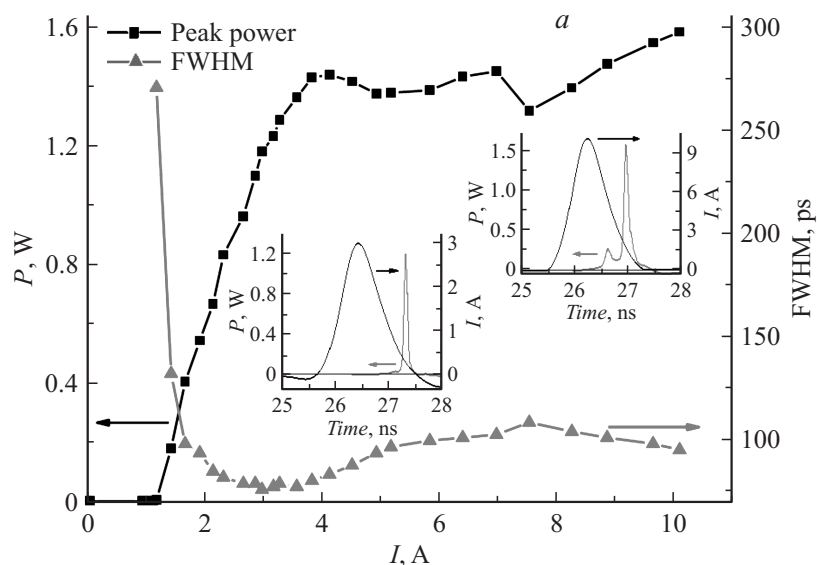


Рис. 2. Зависимость пиковой мощности (квадраты) и полуширины (треугольники) выходного оптического импульса одномодового (*a*) и многомодового (*b*) лазеров в зависимости от амплитуды импульса тока накачки длительностью менее 1 ns. На вставках представлены осциллограммы импульса тока накачки и выходного оптического импульса при накачке одномодового лазера импульсами тока амплитудой 2.9 и 10.5 А (*a*) и многомодового лазера импульсами тока амплитудой 7.5 и 35 А (*b*) соответственно.

импульса тока 3 А наблюдалось постепенное разрушение режима пичкования. Осциллограммы, представляющие форму импульса токовой накачки и форму оптического выходного импульса для значения амплитуды импульса тока 2.8 А, приведены на рис. 1, *b* (нижний график — импульс тока накачки, верхний график — оптический импульс). Полученные результаты свидетельствуют, что для достижения качественного обострения выходного оптического импульса необходимо уменьшать длительность импульса накачки, а также время спада заднего фронта импульса накачки.

Эксперименты по накачке исследуемых образцов полупроводниковых лазеров импульсами тока длительностью менее 1 ns показали

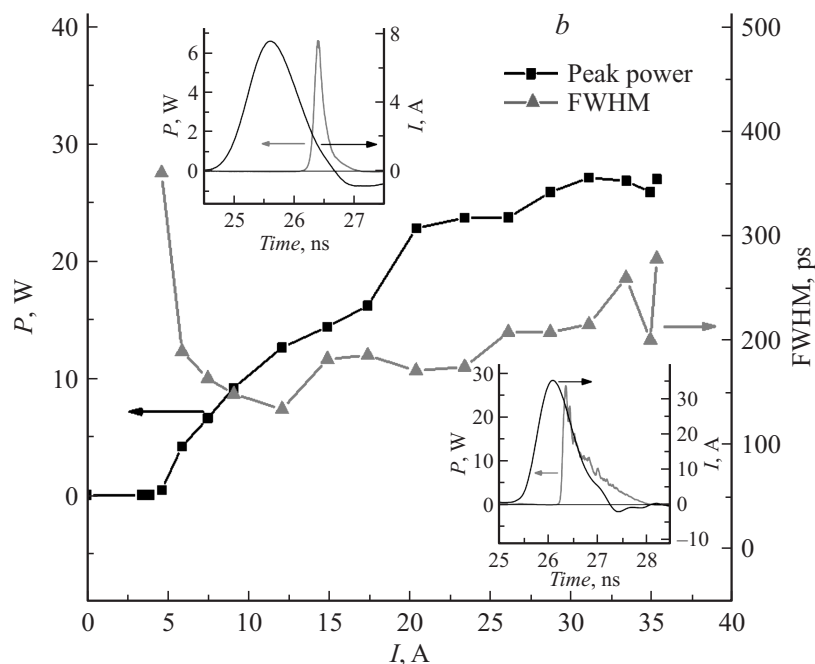


Рис. 2 (продолжение).

существенное обострение оптического импульса как для одномодовых лазеров, так и для многомодовых. На рис. 2 приведены результаты измерения характеристик оптических импульсов для одномодового и многомодового лазеров соответственно. Показано существенное обострение выходного оптического импульса — менее 80 ps для одномодового лазера и 120 ps для многомодового лазера. Максимальные достигнутые мощности составляли 1.6 и 27 W для одномодовых и многомодовых лазеров соответственно. На вставках к рис. 2, *a* и *b* представлены осциллограммы импульсов тока накачки и оптического излучения для значения амплитуды тока накачки 2.9 и 10.5 A для одномодового лазера (рис. 2, *a*) и 7.5 и 35 A для многомодового (рис. 2, *b*). Как видно из приведенных данных, генерация оптического импульса начинается на окончании заднего фронта электрического импульса и сдвигается в сторону переднего фронта по мере увеличения амплитуды тока накачки.

Однопиковый характер генерации наблюдался для одномодового лазера во всем диапазоне токов накачки. Минимальное значение длительности оптического импульса наблюдалось при амплитуде тока накачки 3 А. В дальнейшем наблюдалось небольшое уширение длительности оптического импульса. Минимальное значение длительности оптического импульса с хорошей точностью совпадает с началом насыщения ватт-амперной характеристики, что свидетельствует о связи наблюдаемого эффекта с насыщением усиления.

Характеристики выходного оптического импульса многомодовых лазеров отличались от характеристик одномодовых лазеров. После достижения амплитуды импульса тока 10 А наблюдался существенный рост пьедестала импульса, который существенно ухудшал временные характеристики. Полуширина оптического импульса уменьшалась вплоть до менее чем 120 ps при значении амплитуды тока 12.5 А, после чего наблюдалось ее увеличение до 300 ps. Существенный рост оптической пиковой мощности наблюдался вплоть до значений амплитуды тока 20 А.

Таким образом, в работе продемонстрирована генерация ультракоротких оптических лазерных импульсов от полупроводниковых лазеров при прямой токовой накачке за счет управления параметрами импульсов тока накачки. Показано, что использование эффекта насыщения усиления при накачке полупроводниковых лазеров импульсами тока с длительностями менее 1 ns и характерными временами спада/нарастания переднего и заднего фронтов менее 1 ns позволяет получить существенное обострение выходного оптического импульса с высокой выходной пиковой оптической мощностью.

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60714X0101).

Список литературы

- [1] Hou L. Haji M.; Marsh J.H. // IEEE J. Select. Topics Quant. Electr. 2013. V. 19. N 4. P. 1100808.
- [2] Huikari J.M.T., Avrutin E.A., Ryvkin B.S., Nissinen J.J., Kostamovaara J.T. // IEEE J. Select. Topics Quant. Electr. 2015. V. 21. N 6. P. 1501206.
- [3] Ryvkin B.S., Avrutin E.A., Kostamovaara J.T. // J. Lightwave Technol. 2009. V. 27. N 12. P. 2125–2131.
- [4] Slipchenko S., Podoskin A., Soboleva O. et al. // Proc. SPIE. 2016. V. 9571. P. 95 710P.

- [5] *Sokolovskii G.S., Dudelev V.V., Deryagin A.G., Kuchinskii V.I.* // Tech. Phys. Lett. 2012. V. 38. N 7. P. 613615.
- [6] *Sokolovskii G.S., Dudelev V.V., Kolykhalova E.D.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. P. 081109.
- [7] *Sokolovskii G.S., Vinokurov D.A., Deryagin A.G., Dudelev V.V.* et al. // Tech. Phys. Lett. 2008. V. 34. N 8. P. 708–710.
- [8] *Sokolovskii G.S., Viktorov E.A., Abusaa M.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106. P. 261103.
- [9] *Sokolovskii G.S., Cataluna M.A., Deryagin A.G.* // Tech. Phys. Lett. 2007. V. 33. N 1. P. 4–7.
- [10] *Efanov V.M., Kriklenko A.V., Yarine P.M.* // IEEE Conference on Pulsed Power Plasma Science. 17–22 June 2001. 10.1109/PPPS.2001.961232.
- [11] *Portnoi E.L., Venus G.B., Khazan A.A.* et al. // IEEE J. Select. Topics Quant. Electr. 1997. V. 3. P. 256–260.
- [12] *Lanz B.I., Ryvkin B.S., Avrutin E.A., Kostamovaara J.T.* // Opt. Exp. 2013. V. 21. N 24. P. 29780–29791.