

07.2;07.3

Генерация пикосекундных импульсов лазерами с распределенной обратной связью с длиной волны 1064 nm

© И.М. Гаджиев¹, М.С. Буяло¹, А.С. Паюсов¹, И.О. Бакшаев², Е.Д. Колыхалова², Е.Л. Портной¹¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия² Innolume GmbH, Dortmund, Germany

E-mail: idris.intop@mail.ru

Поступило в Редакцию 19 декабря 2019 г.

В окончательной редакции 19 декабря 2019 г.

Принято к публикации 25 декабря 2019 г.

Исследован режим генерации пикосекундных оптических импульсов полупроводниковыми лазерами с распределенной обратной связью и активной областью на основе квантовой ямы InGaAs/GaAs, излучающими в спектральном диапазоне вблизи 1064 nm. В режиме модуляции усиления длительность лазерных импульсов уменьшалась от 150 до 35 ps с увеличением температуры от 5 до 50°C. Продемонстрировано существование диапазона температур, в котором длительность импульсов была минимальной и составила 35 ps при ширине спектра на полувысоте 70 pm. Лазер был установлен в герметичный баттерфляй-корпус, что позволило получить температурную перестройку длины волны 3 nm в режиме генерации импульсов длительностью менее 45 ps. Выходная пиковая мощность составила 0.4 W на выходе одномодового волокна с сохранением поляризации.

Ключевые слова: полупроводниковый лазер, лазер с распределенной обратной связью, модуляция усиления.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.07.49212.18161

Полупроводниковые лазеры диапазона 1.06 μm широко используются в качестве задающих источников для волоконных усилителей для генерации мощных импульсов и удвоения частоты [1]. Наиболее просто получить пикосекундные импульсы с высокой частотой повторения в двухсекционных лазерах в режимах синхронизации мод или модуляции добротности [2]. Однако в этих режимах спектр импульсов значительно уширен, а в ряде приложений требуются импульсы со спектральной шириной не более 0.1 nm и произвольной частотой повторения [1,3]. Гетеролазеры с распределенной обратной связью (РОС-лазеры) являются наиболее подходящими для этих целей, поскольку позволяют получить импульсы длительностью в десятки пикосекунд с узким спектром в режиме модуляции усиления. Этот способ совмещает такие достоинства, как простота токовой накачки, произвольная частота повторения, доступность. Длительность импульсов, получаемых таким способом, может составлять несколько пикосекунд. Такая малая длительность импульсов достигается за счет компенсации частотной модуляции, возникающей при генерации пикосекундного лазерного импульса, при использовании волокна с отрицательной дисперсией длиной 300 m [4]. Эффект частотной модуляции практически отсутствует при генерации импульсов в лазере с дополнительной интегрированной поглощающей секцией [5], однако это значительно ограничивает мощность.

Следует отметить, что в практических приложениях требуется большая энергия, поэтому чаще предпочти-

тельнее иметь большую мощность и длительность импульсов [1]. Достичь одновременно большой энергии и малой длительности импульсов в лазерах на основе квантовых ям затруднительно, так как для этого нужно применять лазеры с коротким резонатором, в котором накопить большую энергию сложнее, чем в длинном резонаторе. Повысить энергию и мощность можно за счет дополнительной усиливающей секции, интегрированной с РОС-лазером. В работе [6] пиковая мощность пикосекундных импульсов была увеличена

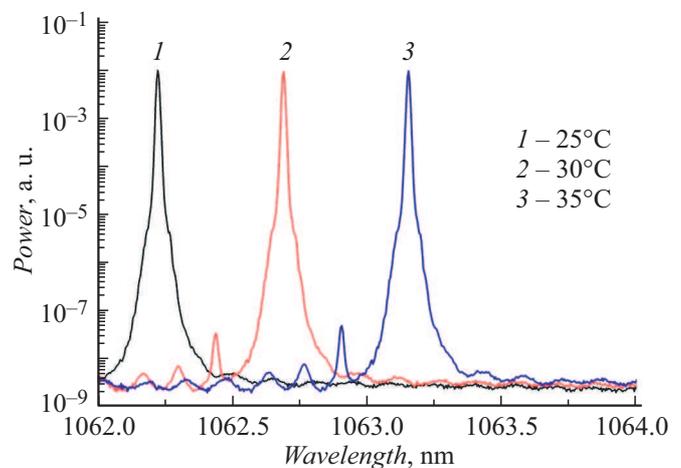


Рис. 1. Спектры излучения РОС-лазера при непрерывной накачке 150 mA и различных температурах лазера. Разрешение анализатора спектра 10 pm.

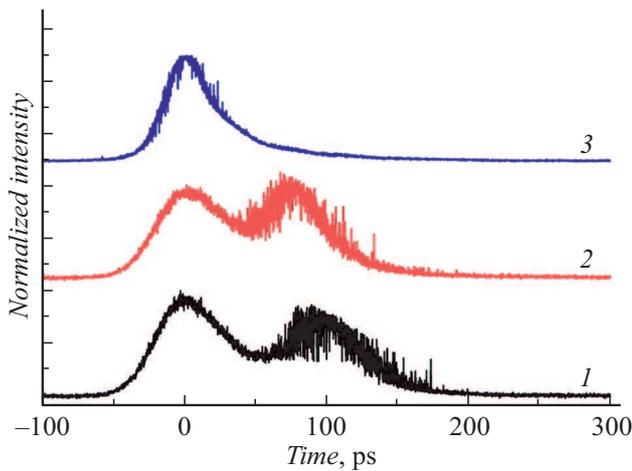


Рис. 2. Временные профили импульсов при температуре лазера -3.5 (1), 5 (2) и 50°C (3).

с 0.1 до 0.3 W за счет использования синхронно накачиваемой секции усилителя, реализованной на одном чипе с РОС-лазером. Другим способом увеличения усиления является использование нескольких квантовых ям, однако в системе напряженных материалов InGaAs/GaAs это может приводить к образованию дефектов в эпитаксиальных слоях активной области и соответственно меньшему сроку службы лазера, а также к уширению оптического спектра. Задачей настоящей работы является экспериментальное исследование режима модуляции усиления в РОС-лазерах на основе квантовой ямы в зависимости от температуры лазерного диода.

Лазерные диоды были изготовлены в Innolume GmbH (Германия) из лазерной структуры с квантовой ямой InGaAs/GaAs, выращенной методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Пространственное ограничение для волны в продольном направлении обеспечивается оксидацией слоя с высокой концентрацией алюминия, дифракционная решетка первого порядка располагается над волноводом [7]. Лазерные чипы были смонтированы в стандартный герметичный 14-пиновый баттерфляй-корпус. Для снижения паразитных отражений на зеркало лазера было нанесено антиотражающее покрытие, а сам чип расположен под углом к оптическому волокну.

При накачке постоянным током лазер излучает на единственной спектральной моде, обусловленной распределенным брэгговским отражателем. В измеренном диапазоне температур от 25 до 35°C коэффициент подавления боковых мод превышает 50 dB. Сдвиг длины волны генерации (рис. 1) при различных температурах чипа обусловлен температурным сдвигом отражения спектра решетки и составляет 93 pm/K. Мощность лазера при этом остается практически постоянной и равняется 50 mW на выходе одномодового волокна.

Режим модуляции усиления достигался при накачке лазера генератором электрических импульсов длительностью порядка 300 ps при постоянной амплитуде импульсов с непрерывной подкачкой существенно ниже порога генерации. Лазерные модули монтировались на теплоотвод при комнатной температуре. Применение герметичного баттерфляй-корпуса, заполненного сухим воздухом, позволило задавать температуру чипа в диапазоне от -3.5 до 60°C без риска образования росы на поверхности чипа. Излучение из одномодового волокна с сохранением поляризации вводилось в высокоскоростной (24 GHz) приемник и анализировалось с помощью 50 GHz стробоскопического осциллографа, синхронизация осуществлялась по отщепленному оптическому сигналу. Спектральные измерения были выполнены с помощью монохроматора с разрешением 40 pm.

На рис. 2 представлены временные профили импульсов для температур -3.5 , 5 и 50°C . При -3.5°C излучаемый импульс длительностью 150 ps имеет два отстоящих друг от друга на 100 ps максимума. Увеличение температуры приводит к уменьшению длительности импульса и сближению максимумов. При температуре 50°C лазер излучает одиночный импульс с измеренной длительностью по осциллографу 40.5 ps. Принимая во внимание быстродействие фотоприемника 19 ps, реальную длительность импульса можно оценить как 35 ps. Энергия импульса на выходе волокна составляет 19.2 pJ, а пиковая мощность — 0.4 W. В настоящей работе приводятся заниженные значения пиковой мощности, поскольку она измерялась по амплитуде осциллограммы, полученной детектором с полосой 24 GHz, который занижает амплитуду импульсов короче 40 ps. Следует отметить, что в исследованных лазерных модулях коэффициент ввода излучения в оптическое волокно максимален при работе в непрерывном режиме при температуре 25°C , поэтому при существенно отличных от этой температурах коэффициент ввода в волокно может уменьшаться. Дальнейшее увеличение температуры до 60°C приводило к незначительному укорочению импульса на 2 ps при сохранении его формы. Диапазон перестройки длины волны при изменении температуры лазера от 25 до 60°C составил 1062.8 – 1065.8 nm в режиме генерации импульсов длительностью менее 45 ps.

Качественное изменение динамических характеристик лазера сопровождается изменением спектральных свойств излучения. Спектр излучения РОС-лазера (рис. 3) в режиме генерации коротких импульсов состоит из двух частей: коротковолновой широкой части, обусловленной спонтанным излучением лазера, и длинноволновой части с узкой линией, обусловленной положением отражения дифракционной решетки лазера. Положение максимума спонтанной части соответствует спектру усиления лазерной структуры и при температуре 25°C отстоит от положения решетки на 10 nm в синюю область спектра для обеспечения высокой

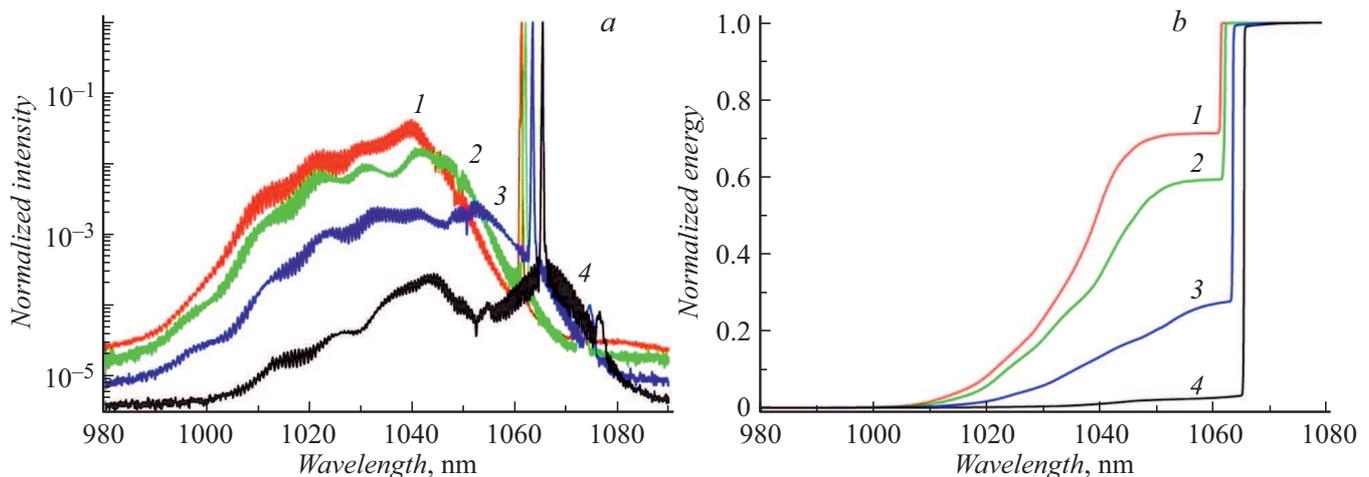


Рис. 3. Спектры излучения РОС-лазера в режиме модуляции усиления (а) и энергия импульса (b), определенная как интеграл от спектра, при температурах лазера -3.5 (1), 5 (2), 25 (3) и 50°C (4).

выходной мощности в непрерывном режиме генерации. Как видно из рис. 3,а, спектр усиления и положение решетки с увеличением температуры сдвигаются в длинноволновую область спектра со скоростями 0.4 и 0.08 nm/K соответственно. При отрицательных и близких к нулю температурах положение линии генерации находится на краю усиления (кривые 1 и 2). При этом большая часть энергии излучения сосредоточена в коротковолновой части спектра (рис. 3,б) — 75 и 60% для температур -3.5 и 5°C соответственно. Увеличение энергии в области 1064 nm также сопровождается увеличением амплитуды второго максимума импульса лазера. Таким образом, первый максимум может быть соотнесен со спонтанным излучением лазера, а второй — с генерацией, заданной решеткой, что соответствует литературным данным [8]. Дальнейшее увеличение температуры приводит к уменьшению спектрального расстояния между решеткой и максимумом спектра усиления лазера, а также к уменьшению доли энергии последнего. При температуре 50°C положения решетки и максимума спектра усиления совпадают, при этом доля энергии в диапазоне решетки составляет 97% . Ширина спектра на полувысоте составляет 70 nm, а коэффициент подавления боковых мод — более 30 dB. Увеличение ширины спектра при температурах менее 25°C может быть объяснено подавлением усиления на частоте, соответствующей периоду решетки, и большей долей спонтанного излучения по сравнению с непрерывным режимом генерации лазера. Произведение длительности импульсов на ширину спектра составляет 0.7 , однако форма спектра отличается от гауссовой.

Таким образом, в РОС-лазерах в стандартном баттерфляй-корпусе был получен режим модуляции усиления в широком диапазоне температур. При низких температурах спектральное положение решетки лазера

сильно сдвинуто в длинноволновую область относительно максимума усиления, что приводит к излучению двойных импульсов. С увеличением температуры максимум усиления совпадает со спектральным диапазоном решетки, что приводит к уменьшению длительности импульсов и высокому коэффициенту подавления боковых мод. Минимальная длительность импульсов составила 35 ps при ширине оптического спектра 0.07 nm.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-32-00820 мол_а.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Patokoski K., Rissanen J., Noronen T., Gumenyuk R., Chamorovskii Y., Filippov V., Toivonen J. // Opt. Express. 2019. V. 27. N 22. P. 31532–31541.
- [2] Гаджиев И.М., Буяло М.С., Губенко А.Е., Егоров А.Ю., Усикова А.А., Ильинская Н.Д., Лютецкий А.В., Задиранов Ю.М., Портной Е.И. // ФТП. 2016. Т. 50. В. 6. С. 843–847.
- [3] Di Teodoro F., Morais J., McComb T.S., Hemmat M.K., Cheung E.C., Weber M., Moyer R. // Opt. Lett. 2013. V. 38. N 13. P. 2162–2164.
- [4] Calvani R., Caponi R., Naddeo C., Roccatto D., Rosso M. // Opt. Fiber Technol. 1995. V. 1. N 4. P. 346–351.
- [5] Tanaka H., Suzuki M., Matsushima Y. // IEEE J. Quant. Electron. 1993. V. 29. N 6. P. 1708–1713.

- [6] Yokoyama Y., Takada K., Kageyama T., Tanaka S., Kondo H., Kanbe S., Maeda Y., Mochida R., Nishi K., Yamamoto T., Takemasa K., Sugawara M., Arakawa Y. // Opt. Fiber Technol. 2014. V. 20. N 6. P. 714–724.
- [7] Gubenko A., Livshits D., Mikhrin S., Krestnikov I. Single-step-grown transversely coupled distributed feedback laser. US9350138B2. 2016.
- [8] Riecke S.M., Wenzel H., Schwertfeger S., Lauritsen K., Paschke K., Erdmann R., Erbert G. // IEEE J. Quant. Electron. 2011. V. 47. N 5. P. 715–722.