

07.2;07.3

Генерация пикосекундных импульсов волоконным лазером с полупроводниковым оптическим усилителем в спектральном диапазоне 1.06 μm

© И.М. Гаджиев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: idris.intop@mail.ru

Поступило в Редакцию 15 августа 2022 г.

В окончательной редакции 8 сентября 2022 г.

Принято к публикации 9 сентября 2022 г.

Исследован режим генерации пикосекундных оптических импульсов в кольцевом волоконном лазере с полупроводниковым оптическим усилителем. Показано, что при работе на основной частоте кольцевого резонатора длиной 4.5 м ширина оптического спектра минимальна и составляет 0.7 nm, а при увеличении частоты она увеличивается на порядок. При этом длительность импульсов уменьшается до 18 ps, а мощность увеличивается до 0.5 W. За счет эффекта накопления носителей при коротких импульсах накачки мощность пикосекундных оптических импульсов на выходе полупроводникового усилителя в 7 раз больше, чем в непрерывном режиме излучения.

Ключевые слова: полупроводниковый оптический усилитель, кольцевой резонатор, модуляция усиления.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.21.53705.19341

Источники лазерных импульсов диапазона 1.06 μm находят широкое применение в системах сканирования с временным разрешением [1], томографии биологических сред [2], приборах оптической связи на GaAs-компонентах [3]. Это обусловлено тем, что излучение в диапазоне 0.9–1.2 μm слабо поглощается многими практически важными средами, а также тем, что в этом диапазоне существуют доступные полупроводниковые и редкоземельные лазеры. Одним из наиболее простых способов получения коротких оптических импульсов является их генерация полупроводниковыми лазерами в режиме модуляции усиления или в режиме модуляции добротности [4]. В то же время существуют методы генерации коротких импульсов в кольцевых волоконных лазерах на основе полупроводниковых оптических усилителей (ПОУ), которые позволяют получить меньшую длительность. В работе [5] на основе такого метода были получены импульсы с длительностью 4 ps на частоте 10 GHz. Там же отмечалось, что для получения импульсов с длительностью, определяемой шириной спектра, нужно использовать оптическое волокно с компенсацией дисперсии и спектральный фильтр. Для практических приложений важным фактором является то, что ПОУ имеют значительный спектральный диапазон усиления, поэтому в кольцевых лазерах на их основе перестройка по длине волны может составлять десятки нанометров в диапазоне 1060 nm [6].

Длительность импульсов в несколько пикосекунд в кольцевых лазерах с ПОУ обычно достигается вследствие использования регенеративного усиления с оптоэлектронной обратной связью. Такая схема довольно сложна, при этом частота следования импульсов, как правило, велика (10 GHz и более [5]), а пиковая мощ-

ность на выходе небольшая (порядка 10 mW). На такой частоте в резонаторе одновременно существуют десятки и сотни импульсов, т.е. лазер излучает на высокой гармонике основной частоты. В практических приложениях часто требуется меньшая частота и большая мощность оптических импульсов [1], что может быть реализовано при работе на основной частоте резонатора.

Целью настоящей работы являются реализация и исследование кольцевого волоконного лазера в режиме генерации пикосекундных импульсов, а также увеличение пиковой мощности при скважности импульсов более 10^2 .

Схема кольцевого лазера с ПОУ представлена на вставке к рис. 1, а. Обратная связь, необходимая для лазерной генерации, возникла за счет того, что 10% излучения с выхода ПОУ возвращалось на его вход, а 90% выводилось из резонатора волоконным Y-разветвителем. Также присутствовал ручной поляризационный контроллер PC, настраиваемый по максимуму сигнала. Основная частота резонатора составляла 45.074 MHz и определялась в основном длиной (4.5 м) оптического кабеля. Обычно в кольцевых лазерах присутствует оптический изолятор, чтобы исключить режим бегущих навстречу волн. В настоящей работе использовался ПОУ, у которого сигнал, распространяющийся в прямом направлении, усиливался больше, чем в обратном. За счет такой асимметрии отпадала необходимость в изоляторе, что упрощало схему и снижало внутрирезонаторные потери. ПОУ был изготовлен в фирме Innolume GmbH (Германия) из лазерной структуры с квантовой ямой InGaAs/GaAs, выращенной методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Спектр усиления находился в диапазоне от 1050 до 1110 nm [7], коэффициент усиления в

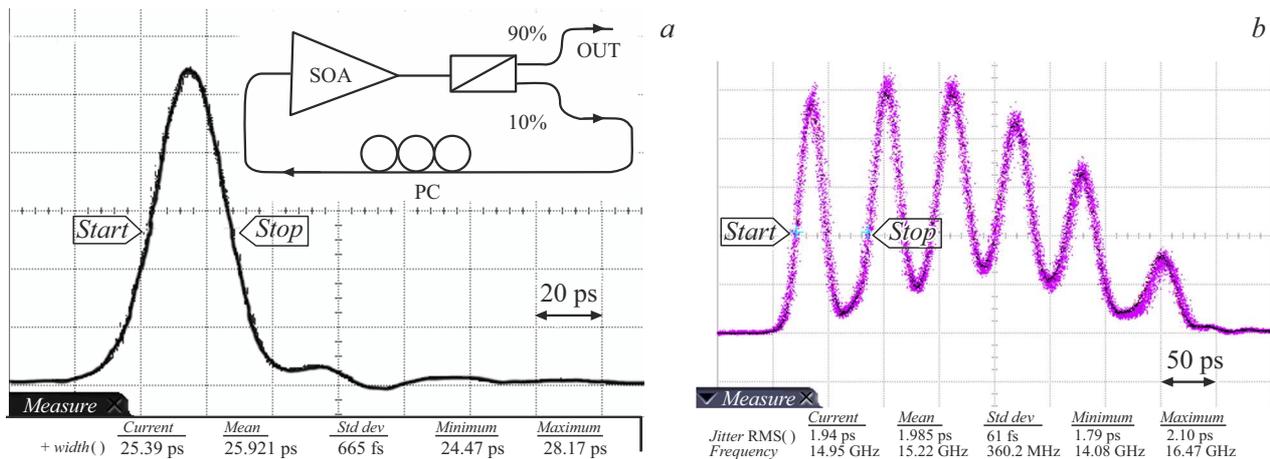


Рис. 1. *a* — осциллограмма лазерного импульса при среднем (370 мА) уровне накачки на частоте $f_0 + 2 \cdot 10^{-4} f_0 \approx 45$ МГц. На вставке — схема лазера. *b* — осциллограмма при высоком (600 мА) уровне накачки.

режиме малого сигнала составлял 24 dB, максимальная выходная мощность в непрерывном режиме 0.1 W. Полупроводниковый чип был смонтирован в стандартный герметичный 14-пиновый корпус, вывод и ввод излучения осуществлялись одномодовым волокном без сохранения поляризации, температура теплоотвода поддерживалась на уровне 25°C. Частота следования импульсов накачки задавалась стандартным радиочастотным генератором HP8648, синусоидальный сигнал которого преобразовывался обострителем (comb generator) в импульсы тока длительностью 0.3 ns с максимальной величиной 600 mA. Амплитуда накачки регулировалась дискретно с интервалом 1 dB. Контроль временных параметров проводился высокоскоростным (24 GHz) приемником, они анализировались с помощью 50 GHz стробоскопического осциллографа, синхронизация которого осуществлялась по части электрического сигнала, служащего триггером накачки.

Когда период повторения импульсов накачки совпадает с временем обхода оптическими импульсами кольцевого резонатора, выполняется условие лазерной генерации. Это условие выполняется вблизи резонансной частоты f_0 , когда накачка перекрывается с лазерными импульсами. Грубо оценить величину относительной перестройки по частоте можно величиной $\Delta t/T$, где Δt — длительность накачки, а T — период повторения. Длительность оптического импульса короче импульса накачки за счет того, что передний фронт бегущей волны снимает инверсную заселенность и усиливается больше заднего. Временная форма импульса при частоте выше центральной представлена на рис. 1, *a*. Когда частота увеличивается, оптический импульс начинает запаздывать и попадает на задний фронт накачки, где усиление больше, чем на переднем фронте. Поэтому длительность оптических импульсов меньше при частоте, несколько большей чем f_0 . Это иллюстрирует рис. 2, на котором кривая, соответствующая зависимости длительности им-

пульсов от частоты, сильно асимметрична относительно центра. Минимальная длительность достигается в диапазоне отстройки $\Delta f \approx 5 \cdot 10^{-4} f_0$ выше центральной частоты f_0 . С учетом быстродействия детектора минимальная длительность лазерного импульса составляет 18 ps. Энергия импульсов достигает максимального значения (рис. 2) также в диапазоне Δf ; соответствующая мощность превышает 0.5 W, что на один-два порядка больше мощности высокочастотных кольцевых лазеров с ПОУ [5]. Обусловлено это тем, что при высокой частоте повторения носители не успевают накапливаться, и энергия импульсов снижается с ростом частоты. На выходе усилителя мощность еще больше, так как на рис. 2 представлены данные для энергии после разветвителя, в котором есть потери. В непрерывном режиме мощность на выходе усилителя около 0.1 W при токе 0.7 A, т.е. в режиме пикосекундных импульсов она в 7 раз больше с учетом потерь в выводящем разветвителе. Причиной этого является накопление носителей, ответственных за инверсную заселенность, при длительности накачки меньше времени жизни неравновесных носителей. При кратном изменении частоты повторения на $2f_0$, $3f_0$ параметры оптических импульсов менялись незначительно, что является распространенным эффектом для резонансных систем.

С увеличением тока накачки лазерный импульс состоит из нескольких пиков, интервал между которыми около 70 ps (рис. 1, *b*). Этот режим в работе не исследовался, но было установлено, что интервал между пиками уменьшается с увеличением накачки и зависит от частоты токовых импульсов.

Спектр излучения меняется радикально при переходе через резонансную частоту (рис. 3), одновременно с этим длительность уменьшается в ~ 2 раза. При увеличении частоты на малую величину $\sim 1.5 \cdot 10^{-4} f_0$ и более ширина спектра увеличивается с 0.7 до 7 nm. Это свидетельствует об изменении режима работы. На

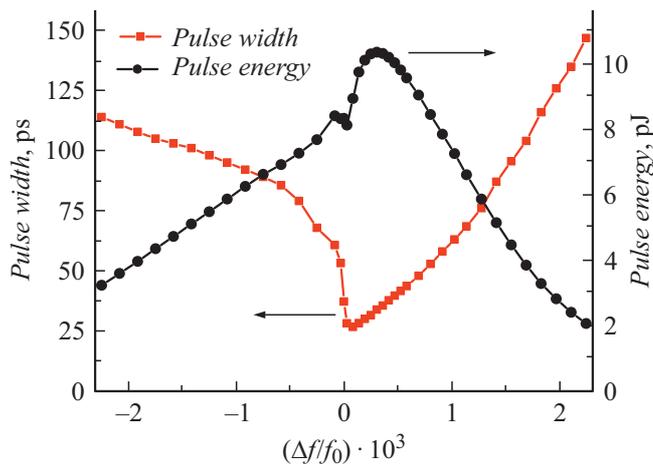


Рис. 2. Длительность и энергия импульсов в зависимости от относительной отстройки от резонансной частоты f_0 .

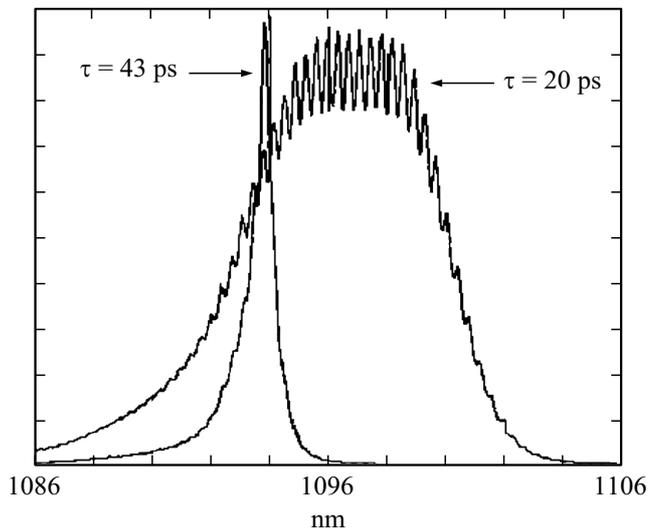


Рис. 3. Спектры лазера при резонансной частоте f_0 (длительность 43 ps) и при отстройке от резонанса $f_0 + 1.5 \cdot 10^{-4} f_0$ (длительность 20 ps).

частоте резонанса лазер работает в режиме частичной синхронизации мод кольцевого резонатора, для которого характерен узкий спектр. При отстройке от резонанса спектральные моды не синхронизованы, и лазер работает в гибридном режиме модуляции усиления и регенеративного усилителя. Расстояние между модами кольцевого резонатора столь мало, что не может быть разрешено дифракционными спектрометрами, а небольшая модуляция спектра связана с остаточным отражением от элементов резонатора.

В заключение отметим, что исследован режим генерации пикосекундных импульсов повышенной мощности в регенеративном волоконном кольцевом лазере на основе волоконного полупроводникового усилителя. Продемонстрировано, что наименьшая длительность 18 ps при мощности, превышающей 0.5 W, достигается на частоте

выше резонансной. Минимальная ширина оптического спектра, наоборот, реализуется при большей длительности (~ 40 ps) на резонансной частоте кольцевого резонатора.

Благодарности

Автор выражает благодарность фирме Innolume GmbH за предоставление экспериментальных образцов.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] I. Akkaya, S. Tozburun, *Optik*, **266**, 169648 (2022). DOI: 10.1016/j.ijleo.2022.169648
- [2] E. Ferocino, E. Martinenghi, A. Dalla Mora, A. Pifferi, R. Cubeddu, P. Taroni, *Biomed. Opt. Express*, **9** (2), 755 (2018). DOI: 10.1364/BOE.9.000755
- [3] A. Larsson, E. Simpanen, J.S. Gustavsson, E.P. Haglund, E.P. Haglund, T. Lengyel, P.A. Andrekson, W.V. Sorin, S. Mathai, M. Tan, S.R. Bickham, *Opt. Fiber Technol.*, **44**, 36 (2018). DOI: 10.1016/j.yofte.2018.01.001
- [4] И.М. Гаджиев, М.С. Буяло, А.С. Паюсов, И.О. Бакшаев, Е.Д. Колыхалова, Е.Л. Портной, *Письма в ЖТФ*, **46** (7), 12 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.07.49212.1816 [I.M. Gadzhiev, M.S. Buyalo, A.S. Payusov, I.O. Bakshaev, E.D. Kolykhalova, E.L. Portnoi, *Tech. Phys. Lett.*, **46** (4), 316 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020040069].
- [5] M. Yoshida, A. Ono, M. Nakazawa, *Opt. Lett.*, **32** (24), 3513 (2007). DOI: 10.1364/OL.32.003513
- [6] S.-K. Liaw, D.-C. Li, H.-C. Lee, Y.-Z. Huang, C.-S. Shin, Y.-W. Lee, *Opt. Spectrosc.*, **127** (6), 1057 (2019). DOI: 10.1134/S0030400X19120361
- [7] <https://www.innolume.com/innoproducts/semiconductor-optical-amplifiers-soa/>