

Волоконный лазер на 1500 нм с модуляцией добротности углеродными нанотрубками*

Ф.Д.Мухаммад, М.З.Зулкифли, Х.Ахмад

Предложен волоконный лазер с модуляцией добротности, работающий в области длин волн 1500 нм. В лазере использован насыщаемый поглотитель на основе углеродных нанотрубок для генерации импульсов в режиме модуляции добротности, а волокно длиной 30 м с депрессированной оболочкой, легированное эрбием (ДО-ВЛЭ), обеспечивает необходимое усиление в заданном диапазоне длин волн. Предложенный лазер имеет порог генерации в непрерывном и импульсном режимах 30 и 50 мВт соответственно; максимальная выходная мощность, энергия импульса и его пиковая мощность составляют 0.5 мВт, 7.6 нДж и 2.2 мВт. Максимальная частота следования выходных импульсов равна 59.4 кГц, а наименьшая длительность импульса – 3.4 пс. Выходные импульсы имеют плавную огибающую без признаков самосинхронизации мод.

Ключевые слова: модуляция добротности, волоконный лазер, углеродные нанотрубки, S-диапазон.

1. Введение

Компактные и стабильные импульсные лазеры нашли интересные применения в оптической связи и обработке материалов, для получения изображений и др. благодаря их небольшому размеру и низкой стоимости изготовления. В общем случае импульсные лазеры делятся на лазеры с синхронизацией мод и лазеры с модуляцией добротности, что, в свою очередь, достигается либо активными, либо пассивными средствами. Особый интерес представляют лазеры с пассивной генерацией импульсов, которые имеют сравнительно простую конфигурацию, но при этом способны генерировать импульсы фемто-, пико- и наносекундной длительности [1–6]. Несмотря на то что было предложено много волоконных лазеров с пассивной синхронизацией мод, путь к их реализации нередко оказывается весьма сложным, поскольку требует тщательного согласования дисперсии групповой скорости (ДГС), чтобы генерировать стабильные импульсы на выходе. С другой стороны, импульсы, генерируемые в режиме модуляции добротности, не являются полностью зависимыми от ДГС, и поэтому их легче получить, хотя и ценой снижения частоты следования и увеличения длительности импульса. Достоинством импульсов, получаемых за счет модуляции добротности, является большая энергия импульса и большая средняя выходная мощность лазера [7], что обеспечивает им широкое применение в тех приложениях, которые не требуют очень высокой частоты следования импульсов (например, в лазерных дальномерах, в лазерной обработке материалов и оптической рефлектометрии во временной области [8]).

* Перевод с англ. В.Л.Дербова.

F.D.Muhammad. Department of Physics, Faculty of Science, Universiti Putra Malaysia, 43400 UPM Serdang, Selangor, Malaysia; e-mail: farahdiana@upm.edu.my

M.Z.Zulkifli, H. Ahmad. 2Photonics Research Centre, Department of Physics, University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia

Поступила в редакцию 27 июня 2018 г.

Для достижения пассивной модуляции добротности в волоконном лазере в ранних работах использовались полупроводниковые зеркала с насыщаемым поглощением (ПЗНП) [9–11]. Недавно, однако, был продемонстрирован намного более простой подход с использованием в качестве насыщаемого поглотителя (НП) углеродных нанотрубок (УНТ) [12–14], а затем – слоев графена [15–17]. Хотя графен является лучшим материалом для применения в качестве НП, поскольку обладает сверхшироким диапазоном насыщения, покрывающим диапазон длин волн от видимого до среднего инфракрасного, УНТ по-прежнему имеют высокий потенциал в качестве нелинейного поглотителя в волоконно-лазерных приложениях. Это связано с простотой изготовления, требующего лишь нанесения УНТ на «материал-хозяин» (обычно доступный для приобретения), в сочетании со стабильной работой в области модуляции добротности.

В печати сообщалось об использовании УНТ в качестве НП для режима модуляции добротности в S- и L-диапазонах [13, 14, 18], а также в области 2 мкм [12]. Однако поскольку возрастающие требования к полосе частот требуют выхода в область 1500 нм (S-диапазон), применение УНТ в волоконных лазерах с модуляцией добротности может иметь исключительную важность.

В настоящей работе предложен и продемонстрирован волоконный лазер с модуляцией добротности с НП на УНТ для работы в области 1500 нм. В качестве активной среды в системе используется легированное эрбием волокно с депрессированной оболочкой (ДО-ВЛЭ) длиной 30 м с заключенной между двумя коннекторами тонкой пленкой УНТ, служащей насыщаемым поглотителем. Пассивная модуляция добротности с помощью НП на УНТ, насколько известно авторам, впервые применена для генерации импульсов в данном диапазоне.

2. Экспериментальная установка

На рис.1 показана схема предлагаемого волоконного лазера с модуляцией добротности с НП на основе УНТ. В качестве линейно усиливающей среды лазерного резонатора используется тридцатиметровое ДО-ВЛЭ с коэффи-

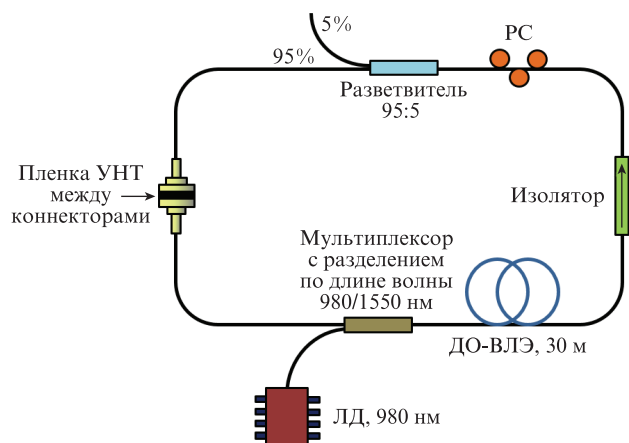


Рис.1. Экспериментальная схема волоконного лазера с модуляцией добротности с УНТ в качестве насыщаемого поглотителя.

циентом поглощения примерно 6.2 дБ/м на длине волны $\lambda = 1530$ нм, а также пики поглощения 7.6 и 1.2 дБ/м на $\lambda = 980$ и 1500 нм соответственно. Для обеспечения работы в области 1500 нм волокно намотано на катушку диаметром около 9 см, что подавляет генерацию на длинах волн более 1530 нм [19].

ДО-ВЛЭ накачивается лазерным диодом (ЛД) с $\lambda = 980$ нм, который подсоединен к порту 980 нм мультиплексора WDM 980/1550 нм. Общий порт последнего, в свою очередь, соединен с ДО-ВЛЭ, выход которого подключен к нечувствительному к поляризации оптическому изолятору на 1550 нм, что гарантирует однонаправленное распространение волн в резонаторе против часовой стрелки. Выходной порт изолятора, в свою очередь, через поляризатор PC подключен к сплавному разветвителю 95:5, 95%-ный порт которого соединен с НП на УНТ, причем тонкая пленка УНТ зажата между двумя волоконными коннекторами, соединенными FC/PC-адаптером. НП действует как элемент пассивной модуляции добротности. Другой конец НП подсоединен к порту WDM 1550 нм, завершая таким образом формирование резонатора. Часть сигнала, отделяемая 5%-ным портом разветвителя, сначала пропускается через разветвитель 1×2 (3 дБ), один порт которого соединен с оптическим спектральным анализатором (ОСА) Yokogawa AQ6317 с разрешением 0.02 нм и используется для анализа спектральных свойств генерируемого сигнала, а другой – с фотодетектором Agilent 83440C с полосой 20 ГГц; с фотодетектора сигнал подается на осциллограф LeCroy 352A для анализа изменения сигнала во времени.

3. Результаты и их обсуждение

Зависимость средней выходной мощности волоконного лазера с модуляцией добротности от мощности накачки ($\lambda_p = 980$ нм) показана на рис.2. Измерения проводились с насыщаемым поглотителем на УНТ, включенным в оптическую схему. Порог стационарной генерации в таком лазере S-диапазона составляет примерно 30 мВт; при меньших мощностях накачки лазерная генерация отсутствует. Стационарная генерация продолжается, пока мощность накачки не достигнет примерно 50 мВт, когда наблюдаются первые импульсы модуляции добротности со средней мощностью около 0.1 мВт. Средняя мощность измеряется интегрирующей сферой ILX Lightwave OMM-

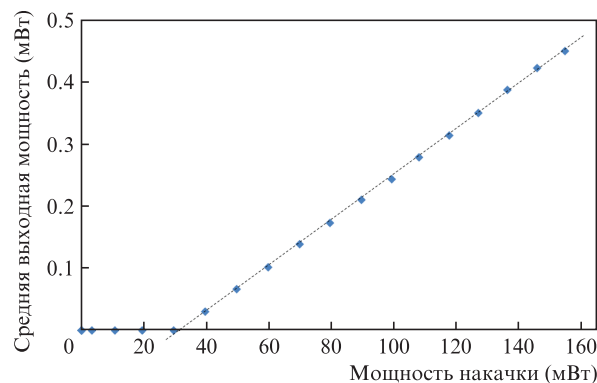


Рис.2. Средняя выходная мощность лазера как функция мощности накачки.

6810В, которая обеспечивает измерение полной мощности. Дальнейшее увеличение мощности накачки приводит к линейному росту средней мощности на выходе, и при максимальной мощности накачки 155 мВт средняя мощность на выходе составляет 0.5 мВт. Дифференциальная эффективность, определяемая наклоном кривой выходной мощности как функции мощности накачки, составляет $\sim 0.4\%$.

На рис.3 показан выходной спектр волоконного лазера S-диапазона с модуляцией добротности на УНТ, измеренный ОСА (разрешение 0.02 нм) при четырех значениях мощности накачки P_p : примерно 90, 108, 127 и 155 мВт. Видно, что ширина полосы лазера, как и пиковая амплитуда выходного спектра, увеличивается по мере роста мощности накачки. Ширина полосы лазерного спектра измеряется на уровне выходной мощности -45 дБм. При таком уровне выходной мощности и мощности накачки $P_p = 90$ мВт длина волны изменяется от 1495.5 до 1499.7 нм, что дает ширину полосы $\Delta\lambda$ около 4.2 нм. С ростом P_p до 108 мВт $\Delta\lambda$ увеличивается до 4.6 нм (от 1495.3 до 1499.9 нм). При максимальной мощности накачки (155 мВт) $\Delta\lambda = 5.9$ нм, покрывая наибольший для данной системы диапазон 1495.1–1501.0 нм. При мощности накачки 90 мВт пиковая мощность составляет -22.3 дБм на 1498.3 нм; она возрастает до -20.9 дБм на 1498.3 нм (при мощности накачки $P_p = 108$ мВт), до -19.6 дБм на 1498.4 нм (при $P_p = 127$ мВт) и достигает -19.6 дБм на 1498.3 нм при максимальной мощности накачки 155 мВт.

Частота следования импульсов (ЧСИ) в режиме модуляции добротности и их длительность при различных мощностях накачки показаны на рис.4. Как уже указыва-

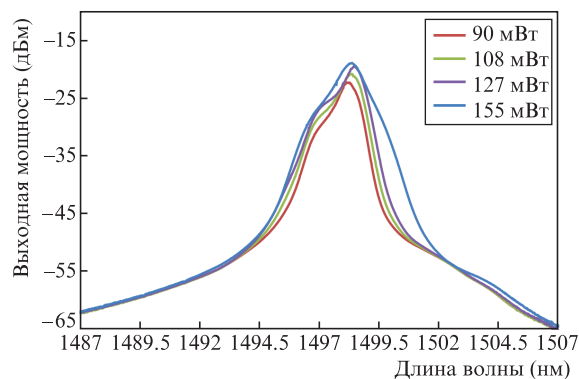


Рис.3. Выходные спектры лазера при различных мощностях накачки. Цветной вариант рис.3 помещен на сайте нашего журнала <https://www.quantum-electron.ru>

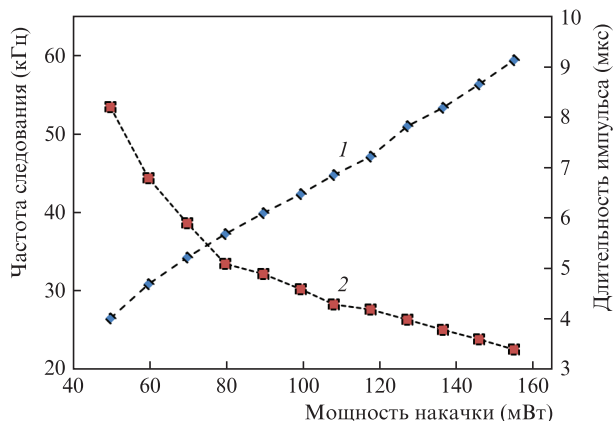


Рис.4. Зависимости частоты следования $f(I)$ и длительности импульсов (2) от мощности накачки.

лось выше (см. также рис.4) режим модуляции добротности возникает при мощности накачки ~ 50 мВт с начальной ЧСИ 26.6 кГц. Из рисунка видно, что ЧСИ практически линейно зависит от мощности накачки. При максимальном значении мощности накачки (~ 155 мВт) ЧСИ достигает 59.4 кГц. В отличие от ЧСИ, зависимость длительности импульса от мощности накачки имеет участки с двумя разными наклонами: сначала крутой спад с коэффициентом наклона 10.3% при $P_p = 50-80$ мВт, а затем более медленное убывание (с коэффициентом 2.3%) при P_p в диапазоне 80–155 мВт. При наименьшей мощности накачки (50 мВт) длительность импульса составляет 8.2 мкс, затем она быстро сокращается (примерно до 5.1 мкс) при мощности накачки около 80 мВт. Это сокращение составляет примерно 0.1 мкс на каждый добавляемый милливатт мощности накачки. Однако при росте мощности накачки выше 80 мВт импульс не сужается уже так сильно, и при максимальной мощности накачки 155 мВт самый короткий импульс имеет длительность 3.4 мкс, что соответствует сжатию около 0.02 мкс/мВт. Аналогичное поведение импульса было зафиксировано в работе [20].

Из характера зависимости ЧСИ от мощности накачки волоконного лазера со слоями УНТ можно предположить, что дальнейшее увеличение мощности накачки, если бы оно было возможно, позволило бы еще повысить ЧСИ. Однако из аналогичной зависимости для длительности импульса видно, что слои УНТ начинают проявлять признаки насыщения, поэтому дальнейшее повышение мощ-

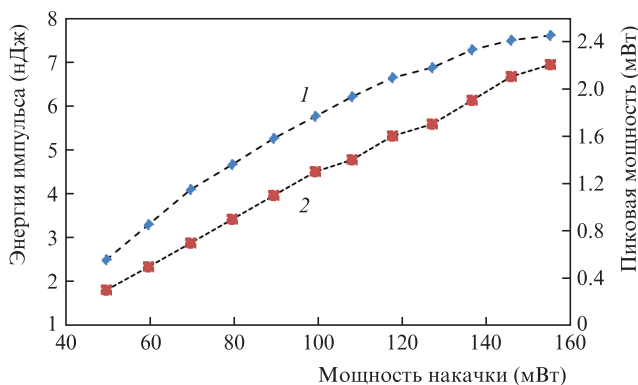


Рис.5. Энергия (1) и пиковая мощность (2) генерируемого импульса в режиме модуляции добротности в зависимости от мощности накачки.

ности накачки не будет сильно влиять на длительность импульса.

На рис.5 приведены зависимости от мощности накачки энергии и пиковой мощности импульсов, генерируемых в режиме модуляции добротности. Видно, что обе зависимости линейно растут с увеличением мощности накачки. При минимальной $P_p = 50$ мВт, которая является пороговой для режима модуляции добротности, энергия импульса составляет примерно 2.5 нДж, а соответствующая пиковая мощность – 0.3 мВт. При максимальной мощности накачки энергия импульса достигает 7.6 нДж, а пиковая мощность – 2.2 мВт. В среднем наклон кривой зависимости энергии импульса от P_p составляет 4.8%, что соответствует средней скорости роста 0.04 нДж/мВт.

В то же время для второй зависимости (см. рис.5) наклон составляет около 1.8%, что соответствует росту пиковой мощности примерно на 0.02 мВт на 1 мВт увеличения мощности накачки. Отметим, что при мощностях накачки выше 140 мВт кривая энергии импульса проявляет признаки начинающегося насыщения. Этот вывод можно сделать и из рис.4, где видно ослабление сужения импульса при высоких мощностях накачки.

На рис.6,а и б показаны временные развертки цугов импульсов в режиме модуляции добротности, полученные на осциллографе с фотоприемником с полосой 6 ГГц,

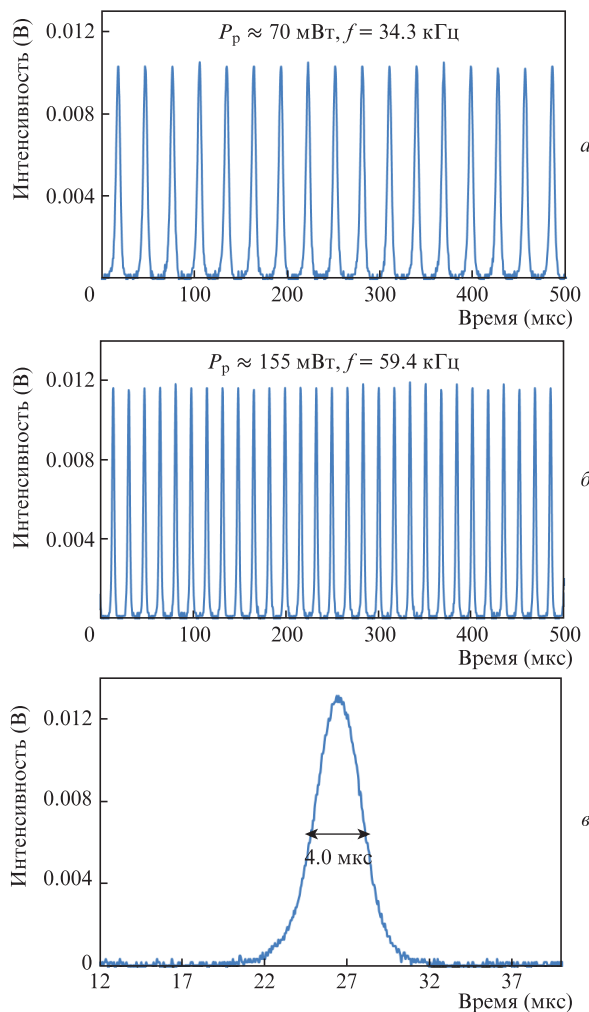


Рис.6. Цуги импульсов в режиме модуляции добротности при мощности накачки 70 мВт ($f = 34.3$ кГц) (а) и 155 мВт ($f = 59.4$ кГц) (б), а также профиль одиночного импульса длительностью 4.0 мкс при мощности накачки около 127 мВт (в).

при мощности накачки 70 и 155 мВт соответственно. При $P_p \approx 70$ мВт пуг импульсов имеет частоту следования $f = 34.3$ кГц при длительности импульса 5.9 мкс, а при наибольшем значении P_p (примерно 155 мВт) максимальная ЧСИ составляет 59.4 кГц при минимальной для лазера длительности импульса 3.4 мкс.

Пример огибающей одного из импульсов цуга с длительностью 4.0 мкс при мощности накачки ~ 127 мВт показан на рис.6,в. Видно, что генерируемые цуги импульсов имеют гладкую и одинаковую форму. Этот факт подтверждает отсутствие у предлагаемого лазера проявлений самосинхронизации мод. Насколько известно авторам, это первая успешная демонстрация волоконного лазера с модуляцией добротности в S-диапазоне с НП на УНТ.

4. Заключение

Предложен и продемонстрирован волоконный лазер S-диапазона с модуляцией добротности с помощью насыщенного поглотителя на базе УНТ, предназначенный для работы в области 1500 нм. Предложенный лазер имеет линейно усиливающую среду в виде тридцатиметрового волокна с депрессированной оболочкой, легированного эрбием, а режим модуляции добротности достигается с помощью НП. Волоконный лазер имеет порог 30 мВт или 50 мВт в случаях непрерывной генерации или генерации импульсов в режиме модуляции добротности. При максимальной мощности накачки 155 мВт лазер с модулированной добротностью имеет дифференциальную эффективность 0.4%, выходную мощность, ЧСИ и длительность импульса 0.5 мВт, 59.4 кГц и 3.4 мкс соответственно. При этом максимальная энергия импульса и его пиковая мощность составляют 7.6 нДж и 2.2 мВт. Генерируемые импульсы гладкие и одинаковые по форме, что свидетельствует об отсутствии самосинхронизации мод. Насколько известно авторам, это первое сообщение об использовании УНТ для осуществления модуляции добротности в данном диапазоне длин волн.

Авторы благодарят Министерство высшего образования Малайзии (МОНЕ) за предоставление гранта FRGS/1/2016/STG02/UPM/02/5 и Университет Путра Малайзия за предоставление гранта GP-IPM/2016/9484300.

1. Liu J., Wu S., Yang Q.H., Wang H. *Opt. Lett.*, **36**, 4008 (2006).
2. Chong A., Buckley J., Renninger W., et al. *Opt. Express*, **14**, 10095 (2006).
3. Pierrot S., Saby J., Bertrand A., Liegeois F., Duterte C., Coquelin B., Hernandez Y., Salin F., Giannone D. *IEEE Lasers and Electro-Optics (CLEO) and Quantum Electronics and Laser Science Conf.* (San Jose, USA, 2010, paper CFD3).
4. Kelleher E.J.R., Travers J.C., Sun Z., Rozhin A.G., Ferrari A.C., Popov S.V., Taylor J.R. *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 111108 (2009).
5. Sun Z., Rozhin A.G., Wang F., Hasan T., Popa D., O'Neill W., Ferrari A.C. *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 253102 (2009).
6. Yap Y.K., De La Rue R., Pua C.H., Harun S.W., Ahmad H. *Chin. Opt. Lett.*, **10**, 041405 (2012).
7. Svelto O. *Principles of Lasers* (New York: Plenum, 1998).
8. Ahmad H., Muhammad F.D., Zulkifli M.Z., Harun S.W. *IEEE Photon. J.*, **4**, 2205 (2012).
9. Paschotta R., Haring R., Gini E., Melchior H., Keller U., Offerhaus H.L., Richardson D.J. *Opt. Lett.*, **24**, 388 (1999).
10. Kivistö S., Hakulinen T., Guina M., Röbner K., Forchel A., Okhotnikov O. *Proc. SPIE*, **6998**, 69980Q-8 (2008).
11. Spühler G.J., Paschotta R., Fluck R., Braun B., Moser M., Zhang G., Gini E., Keller U. *J. Opt. Soc. Am. B*, **16**, 376 (1999).
12. Jung M., Koo J., Chang Y.M., Debnath P., Song Y.W., Lee J.H. *Laser Phys. Lett.*, **9**, 669 (2012).
13. Dong B., Hao J., Hu J., Liaw C.Y. *Opt. Fiber Technol.*, **17**, 105 (2011).
14. Dong B., Hu J., Liaw C.Y., Hao J., Yu C. *Appl. Opt.*, **50**, 1442 (2011).
15. Ahmad H., Zulkifli M.Z., Muhammad F.D., Jemangin M.H., Dimiyati K., Pal B.P., Harun S.W. *IEEE Photon. J.*, **4**, 2050 (2012).
16. Popa D., Sun Z., Hasan T., Torrisi F., Wang F., Ferrari A.C. *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 073106 (2011).
17. Cao W.J., Wang H.Y., Luo A.P., Luo Z.C., Xu W.C. *Laser Phys. Lett.*, **9**, 54 (2011).
18. Song Y.W. *Appl. Opt.*, **51**, 290 (2012).
19. Ahmad H., Saat N.K., Harun S.W. *Laser Phys. Lett.*, **2**, 369 (2005).
20. Wei L., Zhou D.P., Fen H.Y., Liu W.K. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **24**, 309 (2012).