

УДК 535.015

НАСЫЩАЮЩИЙСЯ ПОГЛОТИТЕЛЬ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННОГО ОТВЕТВИТЕЛЯ С ПОКРЫТИЕМ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

© П. А. Итрин¹, В. А. Рибенек¹, Ю. П. Шаман², А. В. Сыса²,
Д. А. Коробко¹, С. В. Васин³, А. А. Фотиади¹

¹Ульяновский государственный университет,
432017, г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, 42

²НПК «Технологический центр»,
124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7

³Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН,
432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2
E-mail: itrin@mail.ru

Предложен новый тип элемента, обеспечивающего синхронизацию мод в волоконном лазерном источнике ультракоротких импульсов. Этот элемент представляет собой пару связанных микроволоконных тейперов, покрытых слоем углеродных нанотрубок, и объединяет в себе функции насыщающегося поглотителя и выходного ответвителя. Предлагаемый вариант изготовления насыщающегося поглотителя отличается технологической простотой и может применяться практически в любой оптической лаборатории. На основе полученного образца поглотителя-ответвителя и активных волокон, легированных эрбием, изготовлен кольцевой волоконный лазер, в котором экспериментально продемонстрирована синхронизация мод с генерацией пикосекундных солитонных импульсов.

Ключевые слова: волоконные лазеры, синхронизация мод, насыщающийся поглотитель, волоконный ответвитель, волоконный тейпер, углеродные нанотрубки.

DOI: 10.15372/AUT20250104

EDN: TPGVQK

Введение. На сегодняшний день лазерные источники ультракоротких импульсов весьма широко используются во многих сферах жизнедеятельности. Их можно встретить как в научных исследованиях, так и приложениях, применяемых массово потребителями, т. е. диапазон их применений крайне широк — от оптической связи до медицины, косметологии и т. д. Среди всех источников ультракоротких импульсов волоконные лазеры с синхронизацией мод занимают особое место в силу ряда своих потребительских преимуществ. Их компактность, сравнительно низкая себестоимость и удобный волоконный вывод при высоком качестве выходного пучка обеспечивают значительный интерес к ним в большом числе приложений [1–6]. Для генерации импульсов ультракороткой (т. е. пикосекундной и субпикосекундной) длительности в волоконных лазерах применяются методы как активной [7], так и пассивной синхронизации мод. В последнем случае ключевым элементом лазерной схемы является насыщающийся поглотитель (НП), обладающий оптическим пропусканием, зависящим от интенсивности излучения. Преимуществом пассивной синхронизации мод, применяемой на сегодняшний день в подавляющем большинстве волоконных генераторов ультракоротких импульсов, является не только отказ от сравнительно дорогих и ненадёжных активных устройств, но и возможность генерации импульсов с длительностью значительно меньшей, чем время переключения используемого модулятора [8]. Известно, что НП, в свою очередь, могут быть разделены на две большие группы:

искусственные и материальные. Примерами первой группы являются НП на основе кер-ровской линзы [9], нелинейного зеркала [10] и нелинейного вращения поляризации [11–13]. Последние, вероятно, наиболее часто встречаются в современных исследовательских схемах волоконных лазеров. Несмотря на простоту и удобство использования, лазеры на базе таких НП требуют подстройки при запуске и чувствительны к внешним условиям, что ограничивает их применение на практике. Примерами материальных НП, обеспечивающих самозапуск волоконного импульсного источника и стабильность синхронизации мод, являются полупроводниковые зеркала SESAM [14, 15] либо НП на основе топологических изоляторов [16], графена [17] и углеродных нанотрубок (УНТ) [18, 19]. Главное преимущество УНТ-технологии, помимо меньшей стоимости и простоты применения, по отношению к технологии SESAM заключается в возможности создания НП, работающих «на просвет», что существенно облегчает разработку лазерных схем на основе кольцевых волоконных резонаторов. В результате в ряде схем волоконных лазеров НП на базе УНТ заняли место полупроводниковых зеркал SESAM [20–22].

В качестве основных методов изготовления НП на базе УНТ выделим способы нанесения УНТ на плёнку или торец волокна [23, 24], химически вытравленную сердцевину (d-shape) [25] и микротейпер, полученный в ходе термической вытяжки обычного волокна [26]. Каждому из методов свойственны свои ограничения и недостатки, в частности, плёночный способ существенно ограничивает мощность излучения в резонаторе [27], а технология d-shape достаточно сложна в применении и накладывает ограничения на структуру волокна [25]. В предлагаемой работе основное внимание будет уделено микроволоконному методу изготовления НП, при котором УНТ наносятся на термически вытянутое до диаметров, сопоставимых с площадью моды излучения, волокно [26, 28]. Данные поглотители просты в изготовлении и применении, однако имеют ряд специфических недостатков. Из-за малого диаметра перетяжки (~ 10 мкм и менее) при нанесении УНТ в высокой концентрации либо из жидкой фазы НП свойственны высокие потери ввиду деформации волокна. Эти же ограничения препятствуют равномерному распределению УНТ по поверхности микроволокна. Более того, волоконные тейперы подвержены внешним воздействиям, сравнительно быстро ухудшающим их характеристики. Для решения данных проблем предложено применение полимерных композитов [29]. Наряду с дополнительной защитой микроволокна, полимер с низким показателем преломления (например, 2,2,2-trifluoroethyl methacrylate (PTFEMA) с $n = 1,42$) эффективно распределяет нанотрубки по его поверхности и противостоит образованию агломераций, что в результате сказывается на уменьшении потерь в НП с 50 до 15 % [30, 31]. В представленной работе рассмотрено дальнейшее развитие микроволоконного метода изготовления НП на основе УНТ. Для этого предлагается применение волоконных ответвителей, без которых не обходится ни одна волоконная схема. Известно, что при их изготовлении может быть использован метод совместной термической вытяжки двух параллельных волокон до диаметров, близких к размеру поля моды, и их последующего сплавления [32]. Таким образом, волокна, сплавленные в ответвитель, в достаточной степени вытянуты, чтобы обеспечить взаимодействие излучения с УНТ-плёнкой на их поверхности и осуществление насыщающегося поглощения. В то же время волоконный ответвитель является механически более прочной структурой в сравнении со стандартным микроволокном, что позволяет упростить технологию осаждения УНТ-плёнки в составе полимера при сохранении высокого коэффициента насыщающегося поглощения. В частности, упрощение технологии при данном подходе допускает более грубые (например, аэрозольный) способы нанесения наноматериала, что, в свою очередь, даёт возможность осаждения больших объёмов УНТ и оптимизации свойств НП.

Целью работы является оптимизация свойств насыщающегося поглотителя.

Изготовление ответвителя с покрытием УНТ. В качестве основы для структуры НП выбраны одностенные УНТ-80 производства ООО «Углерод ЧГ» (Россия), которые

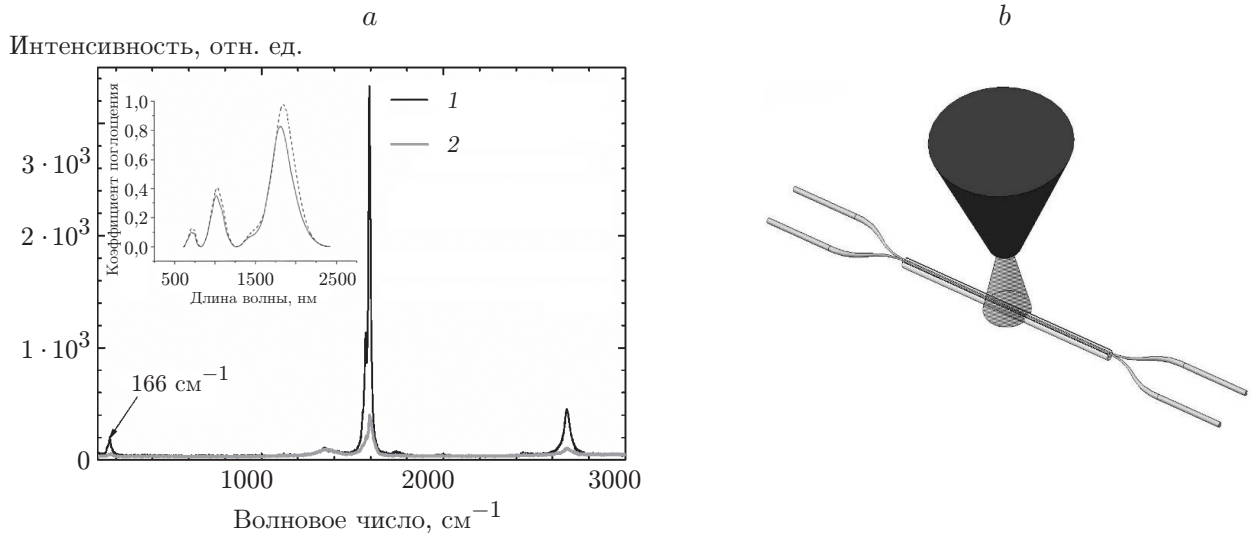


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния структуры УНТ до и после жидкофазной обработки (а). На вставке показан спектр поглощения УНТ. Обозначения: кривая 1 — до жидкофазной обработки, кривая 2 — после жидкофазной обработки. Схема нанесения УНТ на поверхность волоконного ответвителя (b)

подвергались многостадийной жидкофазной ультразвуковой обработке с целью формирования стабильных и однородных суспензий в растворе 2,2,2-трифторэтил метакрилата (компания Sigma-Aldrich № 373761) в N-метилпирролидоне [33]. На рис. 1, а представлены спектры комбинационного рассеяния света структуры УНТ до и после жидкофазной обработки. Спектры получены с помощью спектрометра LabRAM HR Evolution при длине волны возбуждающего излучения $\lambda_0 = 514$ нм. Анализ спектра комбинационного рассеяния показывает, что УНТ обладают, в основном, проводимостью полупроводникового типа [34]. Сопоставление интенсивностей структурных полос излучения D и G (I_G/I_D) позволяет оценить величину L_a , характеризующую длину бездефектных участков в структуре УНТ [35, 36]:

$$L_a(nm) = 2,4 \cdot 10^{-10} \lambda_0^4 \frac{I_G}{I_D}. \quad (1)$$

Проведённая оценка показывает, что после многостадийной жидкофазной обработки величина бездефектных участков уменьшается в среднем с 504 до 62 нм.

Волоконный ответвитель 50/50 изготовлен по технологии термической вытяжки ответвителей и мультиплексоров с помощью водородной горелки из стандартных оголённых одномодовых волокон. Область конусной перетяжки, на которой диаметр оболочки волокна изменяется от 125 мкм до значений, близких к диаметру поля моды (9–10 мкм), имеет длину $l = 18$ мм. Величина собственных потерь изготовленного ответвителя составила $L_0 = 0,5$ дБ. Перед нанесением структуры УНТ-ответвитель помещён в кварцевую ювету и закреплён с помощью клея для фиксации его перетяжки во взвешенном положении. Осаждение УНТ осуществлялось из аэрозоля приготовленной суспензии в среде азота при инфракрасном нагреве поверхности ответвителя до 50 °С (рис. 1, b).

Измерение насыщающегося поглощения. Главной характеристикой НП является зависимость вносимых им потерь от интенсивности (или мощности соответственно) входного излучения. Если вносимые НП потери снижаются при повышении входной мощности, следовательно, он может быть использован для настройки в резонаторе лазера положительной обратной связи, приводящей к синхронизации мод и импульсной генерации [11].

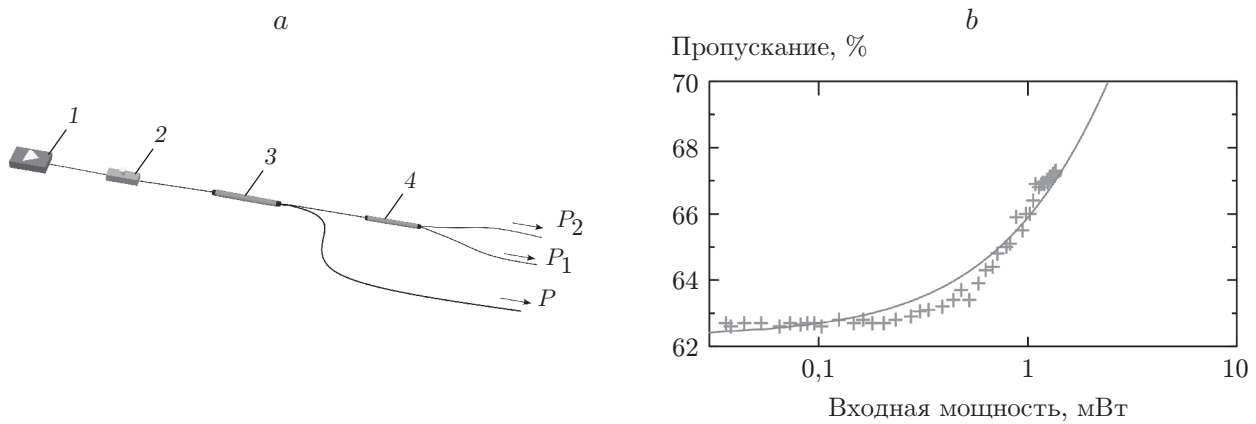


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для измерения насыщающегося поглощения в ответвителе с покрытием из УНТ (а): 1 — лазер 1,55 мкм; 2 — аттенюатор; 3 — ответвитель; 4 — УНТ-ответвитель. Экспериментально измеренный коэффициент пропускания ответвителя в зависимости от мощности излучения на его входе (б). Сплошная линия показывает аппроксимацию полученных данных зависимостью (2) для следующих значений параметров: $\alpha_0 = 12 \%$, $P_S = 500 \text{ Вт}$, $\alpha_{NS} = 25 \%$

Для оценки характеристик насыщающегося поглощения изготовленного УНТ-ответвителя собрана стандартная схема (рис. 2, а) [35, 36]. В качестве источника применялся импульсный лазер солитонного типа с длиной волны $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$, генерирующий импульсы длительностью $\sim 1,4 \text{ пс}$ с частотой следования 3,84 МГц. Аттенюатор с переменным уровнем вносимых потерь применялся для изменения мощности, подаваемой на вход изготовленного УНТ-ответвителя через стандартный ответвитель 50/50. Фиксируя мощность на всех выходах экспериментальной установки, возможно определить коэффициент пропускания УНТ-ответвителя. Результаты эксперимента, демонстрирующие изменение пропускания УНТ-ответвителя в зависимости от средней мощности на его входе, показаны на рис. 2, б. Изменению средней мощности соответствует изменение пиковой мощности P_0 входящего солитонного импульса (простая оценка показывает, что 1 мВт средней мощности соответствует $P_0 \approx 93 \text{ Вт}$). Таким образом, результаты эксперимента могут интерпретироваться как определение коэффициента пропускания УНТ-ответвителя в зависимости от пиковой мощности входного солитона. Отметим устойчивый рост пропускания при повышении пиковой мощности входного импульса, что является главным свойством НП, необходимым для осуществления синхронизации мод. Экспериментально измеренная глубина модуляции НП составила $\sim 4,5 \%$, однако, данные эксперимента ограничены выходной мощностью солитонного источника, соответствующей его переходу в режим многоимпульсной генерации. Некоторые теоретические оценки могут быть проведены исходя из модели НП с мгновенным временем релаксации. Согласно этой модели коэффициент поглощения НП α , зависящий от мощности излучения P , выражается через глубину модуляции α_0 , мощность насыщения P_S и величину ненасыщающихся потерь α_{NS} :

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + P/P_S} + \alpha_{NS}.$$

Для импульсов солитонного типа с огибающей вида гиперболического секанса и пиковой мощностью P_0 пропускание НП T с мгновенной релаксацией может быть выражено через

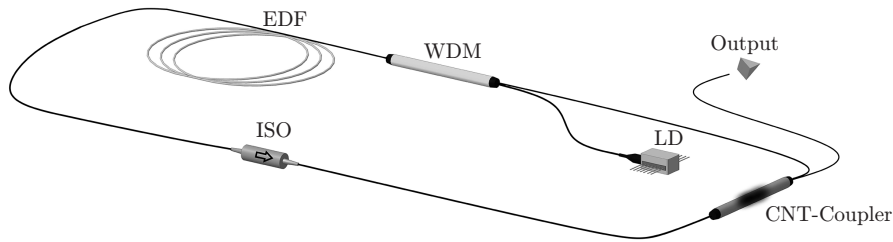


Рис. 3. Экспериментальная схема импульсного волоконного лазера, содержащая УНТ-ответвитель: LD — диод накачки; WDM — мультиплексор; EDF — волокно, легированное Er; ISO — волоконный изолятор; CNT-Coupler — волоконный ответвитель с УНТ; Output — выход

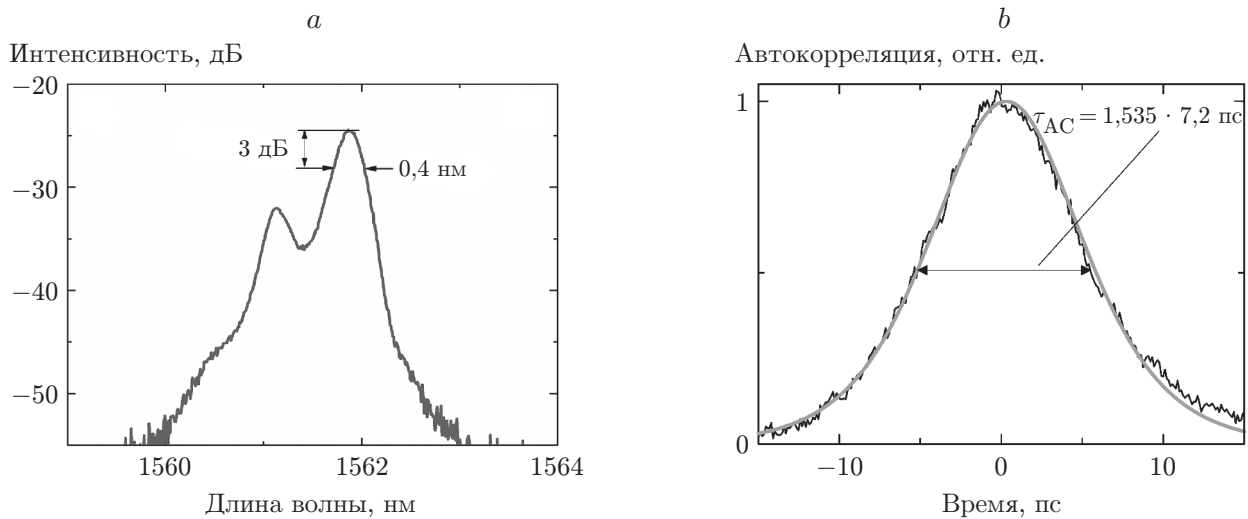


Рис. 4. Оптический спектр (a) и автокорреляция лазерного импульса, генерируемого в лазерной схеме с синхронизацией мод, осуществляемой с помощью УНТ-ответвителя (b). Сплошная линия соответствует sech^2 -огибающей

отношение $s = P_0/P_S$ [36]:

$$T = \frac{\alpha_0}{\sqrt{s(1+s)}} \operatorname{atanh} \left(\sqrt{\frac{s}{1+s}} \right) + 1 - \alpha_{NS}. \quad (2)$$

Согласно таким оценкам глубина модуляции изготовленного НП $\alpha_0 > 10 \%$, при этом величина мощности насыщения P_S достаточно велика: $P_S > 350$ Вт. На рис. 2, b показана аппроксимация соотношения (2) для следующих значений параметров: $\alpha_0 = 12 \%$, $P_S = 500$ Вт, $\alpha_{NS} = 25 \%$.

Исследования УНТ-ответвителя в схеме кольцевого волоконного лазера. Для исследования синхронизации мод, осуществляемой с помощью изготовленного УНТ-ответвителя, последний был включён в стандартную схему кольцевого волоконного лазера на основе активного усиливающего волокна, легированного Er. Конфигурация лазера (рис. 3) не содержит поляризационно-чувствительных элементов, таким образом в ней исключена синхронизация мод за счёт нелинейного вращения поляризации.

Резонатор лазера содержит 0,5 м Er-легированного волокна EDF-150 с нормальной дисперсией $19 \text{ пс}^2/\text{км}$ на 1550 нм, остальные элементы соединены волокном SMF-28 с

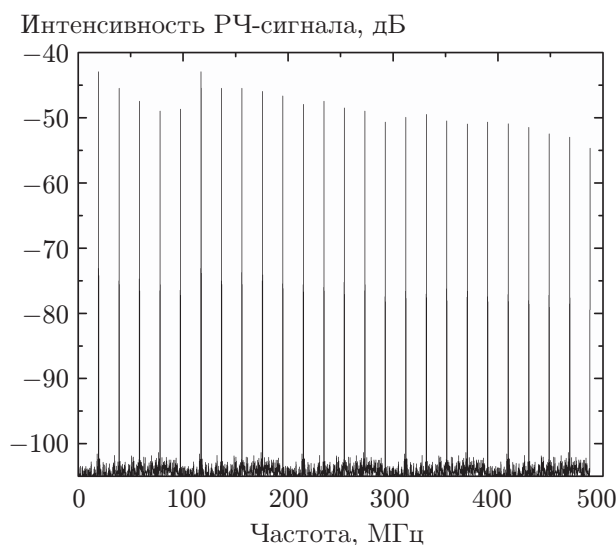


Рис. 5. Радиочастотный спектр волоконного лазера с синхронизацией мод при помощи УНТ-ответвителя

дисперсией $-20 \text{ пс}^2/\text{км}$ на 1550 нм . Общая длина резонатора $10,5 \text{ м}$ соответствовала фундаментальной частоте повторения $19,07 \text{ МГц}$, при этом общая дисперсия резонатора составляла $\sim -0,196 \text{ пс}^2$. Накачка осуществлялась лазерным диодом с длиной волны 975 нм с максимальной мощностью 550 мВт . Вывод излучения производился через УНТ-ответвитель. Лазер стартует в импульсном режиме при мощности накачки 50 мВт , при этом выходная мощность составляет $1,8 \text{ мВт}$. При увеличении накачки одноимпульсный режим генерации сохраняется до мощности 150 мВт , при этом выходная мощность возрастает до $3,2 \text{ мВт}$. Соответствующие этому режиму оптический спектр и автокорреляция импульса показаны на рис. 4.

Несмотря на неполное подавление побочных линий генерации, приводящее к заметной асимметрии спектра, огибающая импульса близка к sech^2 , при этом значение произведения длительности ($\sim 7,2 \text{ пс}$) на ширину спектра импульса ($\sim 0,4 \text{ нм}$) составляет $\sim 0,354$, подтверждая, что импульс близок к спектрально-ограниченному солитону. На рис. 5 представлен радиочастотный (РЧ) спектр лазера, записанный с разрешением 100 кГц . Он демонстрирует стабильный, без паразитных модуляций и фильтраций спектр гармоник фундаментальной частоты, соответствующих модам кольцевого резонатора. Отношение сигнал/шум для основной (первой) гармоники превышает 60 дБ и затем медленно снижается с увеличением порядкового номера гармоники, показывая высокое качество сигнала лазера.

Заключение. В работе продемонстрирован новый способ изготовления НП для импульсных волоконных лазеров, связывающий технологии волоконных ответвителей и НП на основе УНТ. Предложенный способ развивает технологию микроволоконных тейперов с покрытием из УНТ, при этом упрощая её, в частности, допуская более грубые способы осаждения наноматериала. Простота предложенной технологии УНТ-ответвителя подтверждается использованием широкодоступных материалов и стандартного лабораторного оборудования.

Стандартный эксперимент по измерению коэффициента пропускания доказал, что изготовленный образец УНТ-ответвителя обладает главным признаком НП, т. е. его пропускание возрастает при увеличении пиковой мощности входного импульса. Проведённые оценки показывают, что данный образец обладает достаточно высокой глубиной модуля-

ции ($>5\%$), однако, его мощность насыщения также достаточно высока ($P_S > 350$ Вт). Отметим, что использование в эксперименте импульсного источника с пиковой мощностью солитонных импульсов $P_0 < 150$ Вт не привело к изменению или деградации характеристик УНТ-ответвителя.

Эксперимент подтвердил возможность использования УНТ-ответвителя в качестве элемента, ответственного за синхронизацию мод в кольцевом волоконном лазере солитонного типа. В рассмотренной схеме лазера исключена синхронизация мод посредством нелинейного вращения поляризации, таким образом показано, что изготовленный образец обладает характеристиками НП, достаточными для генерации пикосекундных солитонных импульсов. Одним из интересных свойств предложенной технологии является то, что она способна поддерживать генерацию импульсов пикосекундной длительности в конфигурациях со сравнительно невысокой добротностью резонатора, так как коэффициент вывода изготовленного УНТ-ответвителя составляет 50/50, а сам ответвитель обладает весьма существенными собственными потерями (>2 дБ). Дальнейшие исследования должны будут доказать возможности усовершенствования предложенной технологии, в частности, планируется исследовать улучшение характеристик НП на основе УНТ-ответвителя (снижение мощности насыщения, уменьшение ненасыщающихся потерь) за счёт повышения качества технологии подготовки и нанесения УНТ, определения оптимальных параметров (количества, геометрии) наноматериала, изучения наилучших вариантов изготовления и закрепления ответвителя и т. д. Весьма перспективным должно быть применение НП подобного вида в конфигурациях волоконных лазеров с так называемой гармонической синхронизацией мод [12, 15, 37–39].

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-79-30017).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shi W., Fang Q., Zhu X. et al. Fiber lasers and their applications // Appl. Opt. 2014. **53**, Iss. 28. P. 6554–6568.
2. Fermann M. E., Hartl I. Ultrafast fibre lasers // Nat. Photonics. 2013. **7**. P. 868–874.
3. Крюков П. Г. Лазеры ультракоротких импульсов // Квантовая электроника. 2001. **31**, № 2. С. 95–119.
4. Трикшев А. И., Камынин В. А., Цветков В. Б., Егорова О. Н. Мощный импульсный итербиевый волоконный лазер с энергией импульса 10 мкДж // Квантовая электроника. 2016. **46**, № 12. С. 1085–1088.
5. Рибенек В. А., Золотовский И. О., Итрин П. А., Коробко Д. А. Волоконный лазер с гармонической синхронизацией мод: стабилизация и контроль частоты следования импульсов при помощи узкополосной компоненты в спектре // Квантовая электроника. 2022. **52**, № 7. С. 604–609.
6. Gattass R. R., Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials // Nat. Photonics. 2008. **2**. P. 219–225.
7. Bello-Jiménez M., Hernández-Escobar E., Camarillo-Avilés A. et al. Actively mode-locked all-fiber laser by 5 MHz transmittance modulation of an acousto-optic tunable bandpass filter // Laser Phys. Lett. 2018. **15**, N 8. 085113.
8. Haus H. A. Mode-Locking of Lasers // Journ. Selected Topics in Quant. Electron. 2000. **6**, N 6. P. 1173–1185.
9. Brabec T., Spielmann Ch., Curley P. F., Krausz F. Kerr lens mode locking // Opt. Lett. 1992. **17**, N 18. P. 1292–1294.

10. **Li J., Zhang Z., Sun Z. et al.** All-fiber passively mode-locked Tm-doped NOLM-based oscillator operating at 2- μm in both soliton and noisy-pulse regimes // *Opt. Exp.* 2014. **22**, Iss. 7. P. 7875–7882.
11. **Chen C.-J., Wai P. K. A., Menyuk C. R.** Soliton fiber ring laser // *Opt. Lett.* 1992. **17**, N 6. P. 417–419.
12. **Трикшев А. И., Камынин В. А., Цветков В. Б., Итрин П. А.** Пассивная гармоническая синхронизация мод в эрбиевом волоконном лазере // *Квантовая электроника*. 2018. **48**, № 12. С. 1109–1112.
13. **Korobko D. A., Ribenek V. A., Fotiadi A. A.** Gain Depletion and Recovery as a Key Mechanism of Long-Range Pulse Interactions in Soliton Fiber Laser // *Journ. Lightwave Technol.* 2024. **42**, Iss. 17. P. 6049–6056.
14. **Isomaki A., Vainionpaa A.-M., Lyytikainen J., Okhotnikov O. G.** Semiconductor mirror for optical noise suppression and dynamic dispersion compensation // *IEEE Journ. Quant. Electron.* 2003. **39**, Iss. 11. P. 1481–1485.
15. **Stoliarov D. A., Itrin P. A., Ribenek V. A. et al.** Linear cavity fiber laser harmonically mode-locked with SESAM // *Laser Phys. Lett.* 2020. **17**, N 10. 105102.
16. **Zhao C., Zhang H., Qi X. et al.** Ultra-short pulse generation by a topological insulator based saturable absorber // *Appl. Phys. Lett.* 2012. **101**, Iss. 21. 211106.
17. **Bao Q., Zhang H., Wang Y. et al.** Atomic-Layer Graphene as a Saturable Absorber for Ultrafast Pulsed Lasers // *Adv. Funct. Mater.* 2009. **19**, Iss. 19. P. 3077–3083.
18. **Chernysheva M., Rozhin A., Fedotov Y. et al.** Carbon nanotubes for ultrafast fibre lasers // *Nanophotonics*. 2017. **6**, Iss. 1. P. 1–30.
19. **Таусенев А. В., Образцова Е. Д., Лобач А. С. и др.** Самосинхронизация мод в эрбиевых волоконных лазерах с насыщающимися поглотителями в виде полимерных плёнок, содержащих синтезированные методом дугового разряда одностенные углеродные нанотрубки // *Квантовая электроника*. 2007. **37**, № 3. С. 205–208.
20. **Wang J., Chen Y., Blau W. J.** Carbon nanotubes and nanotube composites for nonlinear optical devices // *Journ. Mater. Chem.* 2009. **19**, Iss. 40. P. 7425–7443.
21. **Avouris P., Freitag M., Perebeinos V.** Carbon-nanotube photonics and optoelectronics // *Nat. Photonics*. 2008. **2**. P. 341–350.
22. **Martinez A., Sun Z.** Nanotube and graphene saturable absorbers for fibre lasers // *Nat. Photonics*. 2013. **7**. P. 842–845.
23. **Chernov A. I., Obratsova E. D., Lobach A. S.** Optical properties of polymer films with embedded single-wall carbon nanotubes // *Physica Status Solidi B*. 2007. **244**, Iss. 11. P. 4231–4235.
24. **Solodyankin M. A., Obratsova E. D., Lobach A. S. et al.** Mode-locked 1.93 μm thulium fiber laser with a carbon nanotube absorber // *Opt. Lett.* 2008. **33**, Iss. 12. P. 1336–1338.
25. **Steinberg D., Zapata J. D., Thoroh de Souza E. A., Saito L. A. M.** Mechanically Exfoliated Graphite Onto D-Shaped Optical Fiber for Femtosecond Mode-Locked Erbium-Doped Fiber Laser // *Journ. Lightwave Technol.* 2018. **36**, Iss. 10. P. 1868–1874.
26. **Luo Z. C., Liu M., Liu H. et al.** 2 GHz passively harmonic mode-locked fiber laser by a microfiber-based topological insulator saturable absorber // *Opt. Lett.* 2013. **38**, Iss. 24. P. 5212–5215.
27. **Sui Y., Gokhale V. J., Shenderova O. A. et al.** A Thin-Film Infrared Absorber using CNT/Nanodiamond Nanocomposite // *MRS Online Proc. Library*. 2012. **1452**, Iss. 1. P. 8–13.
28. **Song Y. W., Morimune K., Set S. Y., Yamashita S.** Polarization insensitive all-fiber mode-lockers functioned by carbon nanotubes deposited onto tapered fibers // *Appl. Phys. Lett.* 2007. **90**, Iss. 2. 021101.

29. **Kieu K., Mansuripur M.** Femtosecond laser pulse generation with a fiber taper embedded in carbon nanotube/polymer composite // Opt. Lett. 2007. **32**, Iss. 15. P. 2242–2244.
30. **Xu B., Omura M., Takiguchi M. et al.** Carbon nanotube/polymer composite coated tapered fiber for four wave mixing based wavelength conversion // Opt. Exp. 2013. **21**, Iss. 3. P. 3651–3657.
31. **Martinez A., Al Araimi M., Dmitriev A. et al.** Low-loss saturable absorbers based on tapered fibers embedded in carbon nanotube/polymer composites // APL Photonics. 2017. **2**, Iss. 12. 126103.
32. **Agrawal G. P.** Nonlinear Fiber Optics / Eds. by P. L. Christiansen, M. P. Sorensen, A. C. Scott // Nonlinear Science at the Dawn of the 21st Century. Vol. 542. Lecture Notes in Physics. Berlin—Heidelberg: Springer-Verlag, 2000. P. 195–211.
33. **Labunov V. A., Tabulina L. V., Komissarov I. V. et al.** Features of the reduction of graphene from graphene oxide // Russian Journ. Phys. Chem. A. 2017. **91**, Iss. 6. P. 1088–1092.
34. **Kataura H., Kumazawa Y., Maniwa Y. et al.** Optical Properties of Single-Wall Carbon Nanotubes // Synthetic Metals. 1999. **103**. P. 2555–2558.
35. **Sobon G., Duzynska A., Świniarski M. et al.** CNT-based saturable absorbers with scalable modulation depth for Thulium-doped fiber lasers operating at 1.9 μm // Sci. Rep. 2017. **7**. 45491.
36. **Lee C.-C., Miller J. M., Schibli T. R.** Doping-induced changes in the saturable absorption of monolayer graphene // Appl. Phys. B. 2012. **108**. P. 129–135.
37. **Ribenek V. A., Itrin P. A., Korobko D. A., Fotiadi A. A.** Double harmonic mode-locking in soliton fiber ring laser acquired through the resonant optoacoustic coupling // APL Photonics. 2024. **9**, Iss. 5. 056105.
38. **Korobko D. A., Ribenek V. A., Itrin P. A., Fotiadi A. A.** Birth and annihilation of solitons in harmonically mode-locked fiber laser cavity through continuous wave injection // Opt. Fiber Technol. 2023. **75**. 103216.
39. **Ribenek V. A., Korobko D. A., Fotiadi A. A., Taylor J. R.** Supermode noise mitigation and repetition rate control in a harmonic mode-locked fiber laser implemented through the pulse train interaction with co-lased CW radiation // Opt. Lett. 2022. **47**, Iss. 19. P. 5236–5239.

Поступила в редакцию 10.10.2024

После доработки 06.12.2024

Принята к публикации 10.01.2025