

Перестраиваемый солитонный волоконный лазер с синхронизацией мод на основе одностенных углеродных нанотрубок*

Х.Ахмад, С.А.Редуан, М.Ф.Исмаил, К.Тамбиратнам

Предложен и продемонстрирован солитонный волоконный перестраиваемый лазер с синхронизацией мод. В лазере использованы обычное волокно, легированное эрбием, и одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) в качестве насыщаемого поглотителя. Перестройка осуществляется с использованием перестраиваемого фильтра Маха–Цендера. Насыщаемый поглотитель на основе ОУНТ имеет глубину модуляции $\sim 19.0\%$ и интенсивность насыщения 45.3 МВт/см^2 . Синхронизация мод начинается при мощности накачки 6.0 МВт и позволяет генерировать импульсы на длине волны от 1550 до 1566 нм . Ширина полосы на уровне 3 дБ и длительность импульса слегка изменялись – от 6.34 до 6.90 нм и от 0.51 до 0.56 пс соответственно, что дает изменение произведения длительности импульса на ширину полосы в диапазоне 0.40 – 0.46 . Полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенный лазер может обеспечить значительные преимущества в ряде приложений, в частности в спектроскопии и телекоммуникациях.

Ключевые слова: волоконный лазер, модуляция добротности, одностенная нанотрубка, насыщаемый поглотитель, S-диапазон, перестраиваемый лазер, импульсный лазер, волокно, легированное эрбием.

1. Введение

Волоконные перестраиваемые лазеры с пассивной синхронизацией мод представляют большой интерес для таких приложений в науке и промышленности, как обработка материалов, телекоммуникации, спектроскопия и биомедицинские исследования [1–6]. Волоконный лазер с пассивной синхронизацией мод благодаря компактности, простоте и экономичности [1, 7–9] является предпочтительным по сравнению с аналогичной системой, использующей активную синхронизацию мод, которая требует дополнительной переключающей электроники [10]. Пассивная синхронизация мод обычно достигается введением в резонатор лазера нелинейного оптического элемента, известного как насыщаемый поглотитель (НП).

На пути к разработке НП для использования в лазерных резонаторах одними из первых промышленных НП для генерации лазерных импульсов стали полупроводниковые зеркала с насыщаемым поглощением (ППЗНП). Это объяснялось их превосходными рабочими характеристиками, которые, в свою очередь, были результатом хорошо разработанных полупроводниковых технологий [11]. Однако вскоре выявились присущие ППЗНП ограничения, связанные с исключительной сложностью их изготовления и необходимостью высокоспециализированного оборудования, а также дороговизной, громоздкостью и сложностью использования в волоконных приложениях [12, 13]. Это привело к поиску других потенциальных технологий изготовления НП, и новый кандидат был

найден в виде одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ). Нелинейные поглотители на основе ОУНТ оказались простыми и дешевыми в изготовлении [14]. Они обладают требуемыми оптическими характеристиками, такими как субпикосекундное время восстановления, низкая интенсивность насыщения и сверхбыстрый (за время менее пикосекунды) отклик, а также механической прочностью [12, 15–19].

Впоследствии ОУНТ нашли разнообразные применения как НП для генерации ультракоротких импульсов лазерными волоконными системами. Недавно был продемонстрирован перестраиваемый волоконный лазер с НП на основе ОУНТ [3, 20, 21], использующий перестраиваемые полосовые фильтры, волоконные тейперные фильтры и поляризационные контроллеры для перестройки длины волны. Однако использование этих устройств в солитонном волоконном лазере с синхронизацией мод в конце концов подавило (или исключило) бы боковые полосы Келли из-за присущего им эффекта спектрального ограничения [3, 22]. Авторы работы [23] сообщили об успешном применении перестраиваемого фильтра Маха–Цендера (ПФМЦ) в волоконном лазере с синхронизацией мод на основе графена, тем самым доказав, что ПФМЦ является весьма подходящим механизмом перестройки частоты для волоконных лазеров с синхронизацией мод, в частности для солитонных волоконных лазеров.

В настоящей работе предложен и продемонстрирован перестраиваемый волоконный лазер с синхронизацией мод с использованием НП на основе ОУНТ как механизма формирования импульса и ПФМЦ как механизма перестройки длины волны. Предлагаемый лазер способен обеспечить диапазон перестройки примерно в 16 нм с частотой следования выходных импульсов 12.7 МГц , что соответствует периоду 78.7 нс , при мощности накачки 6.0 МВт . Ширина полосы на уровне 3 дБ и длительность импульса слегка изменяются от 6.24 до 6.90 нм и от 0.51 до 0.56 пс соответственно; при этом произведение длительности импульса на ширину полосы (ПДШ) изменяет-

* Перевод с англ. В.Л.Дербова.

H.Ahmad, S.A.Reduan, M.F.Ismail, K.Thambiratnam. Photonics Research Center, University of Malaya, Kuala Lumpur 50603, Malaysia; e-mail: harith@um.edu.my

Поступила в редакцию 17 января 2018 г., после доработки – 17 февраля 2018 г.

ся от 0.40 до 0.46. Предлагаемая система способна успешно сохранять боковые полосы Келли солитонного спектра при использовании ПФМЦ в качестве фильтра для перестройки частоты. Насколько известно авторам, перестраиваемый волоконный лазер с синхронизацией мод на основе ОУНТ с применением ПФМЦ для перестройки длины волны описан и продемонстрирован впервые.

2. Экспериментальная установка

2.1. Волоконный лазер

На рис.1 показана схема предлагаемого перестраиваемого солитонного волоконного лазера с синхронизацией мод в кольцевой конфигурации. Резонатор лазера включает волокно, легированное эрбием (ВЛЭ), длиной 3 м марки M-12 980/125 (Fiberscope, Inc.), которое имеет длину волны отсечки 911 нм и числовую апертуру $NA = 0.21$. ВЛЭ действует как усиливающая среда лазера и накачивается излучением лазерного диода (ЛД) с длиной волны 974 нм через порт 980 нм сплавного 980/1550-нм мультиплексора с разделением по длине волны (МРДВ). Изолятор (ИЗО) установлен после ВЛЭ для обеспечения однонаправленного распространения света в резонаторе и последовательно соединен с выходным разветвителем 95/5. У разветвителя 5%-ный порт используется для отделения порции выходного сигнала и его последующего анализа, а 95%-ный порт возвращает излучение обратно в резонатор через НП, который образован прослойкой ОУНТ между соединительными муфтами волокна, как показано на вставке к рис.1.

Пленка ОУНТ, используемая в настоящей работе, подготовлена в Центре передовой фотоники и электроники (CAPE) Кембриджского университета (Великобритания), а затем помещена в полимер поливинилового спирта для образования тонкой пленки НП. Через НП излучение подается на ПФМЦ, выход которого соединен с 1550-нм портом МРДВ, завершая таким образом формирование лазерного резонатора. В результате резонатор имеет полную длину около 15.7 м, из которых 3 м приходится на ВЛЭ и 12.7 м – на одномодовое волокно. Эти участки имеют дисперсию групповой скорости (ДГС), оцениваемую как $+23.2 \text{ ps}^2/\text{km}$ [24, 25] и $-23.3 \text{ ps}^2/\text{km}$ соответственно на длине волны 1550 нм (см. табл.1).

Дисперсия групповой скорости всего резонатора составляет -0.2261 ps^2 , что вносит вклад в аномальную дисперсию, необходимую для осуществления солитонного режима работы лазера.

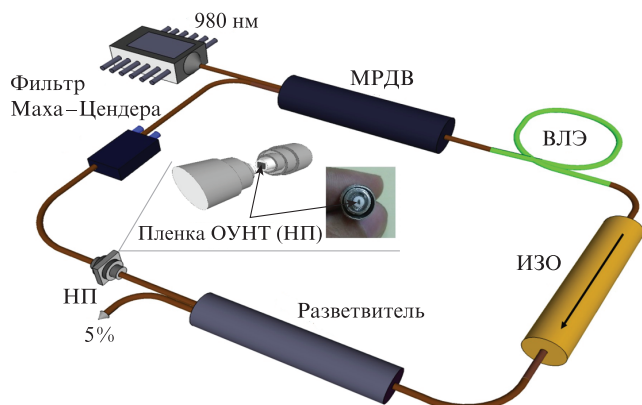


Рис.1. Экспериментальная схема предлагаемого лазера.

Табл.1. Численная оценка ДГС для оптических волокон, используемых в настоящем эксперименте.

Тип волокна	Длина волокна (м)	D ($\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$)	λ (нм)	ДГС ($\text{ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$)
Одномодовое волокно	12.7	18	1550	-23.3
ВЛЭ	3	-18		+23.2

Для мониторинга и измерения выходного спектра солитонного волоконного лазера используется оптический спектральный анализатор (ОСА) Yokogawa AQ6370с, а для исследования временных свойств излучения в режиме синхронизации мод – автокоррелятор Alnair HAC-200. Характеристики цуга импульсов в режиме синхронизации мод измеряются осциллографом Yokogawa DLM2054 в сочетании с фотоприемником с полосой 1.2 ГГц. Отношение сигнал/шум (ОСШ) для генерируемых импульсов в режиме синхронизации мод измеряется с помощью радиочастотного анализатора спектра Anritsu MS2683A.

2.2. Характеристики ПФМЦ

Действие фильтра Маха–Цендера основано на интерференции излучения двух когерентных монохроматических источников, результат которой зависит от разности хода и, в конечном счете, от разности фаз между двумя плечами [26, 27] (рис.2). Оптическая мощность на входе делится направленным ответвителем 1 поровну между двумя плечами фильтра Маха–Цендера с разностью хода ΔL . На направленном ответвителе 2 свет снова смешивается с различными фазами, так что каждая из волн интерферирует конструктивно на одном из выходных портов и деструктивно на другом выходном порте в зависимости от изменения фазы и положения выходного волокна [26, 27]. Таким образом, устанавливая ΔL , можно настраивать фильтр Маха–Цендера так, чтобы получить искомым фазовый сдвиг на выходном порте. Следовательно, управление временем задержки распространения по пути $L + \Delta L$ по сравнению с L позволяет управлять фазовым сдвигом. Характеристики ПФМЦ, используемого в настоящей работе, приведены на рис.3.

Характеризация ПФМЦ проведена для режимов перестройки длины волны и коэффициента экстинкции, как в работе [23]. На рис.3,а показан выходной спектр, характеризующий механизм перестройки коэффициента экстинкции ПФМЦ. Видно, что с увеличением коэффициента экстинкции провалы интенсивности становятся глубже

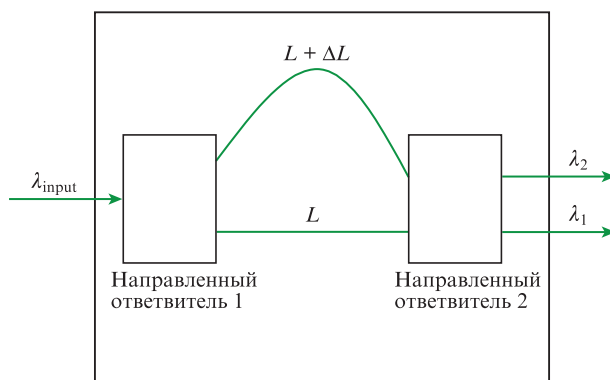


Рис.2. Принцип работы перестраиваемого фильтра Маха–Цендера.

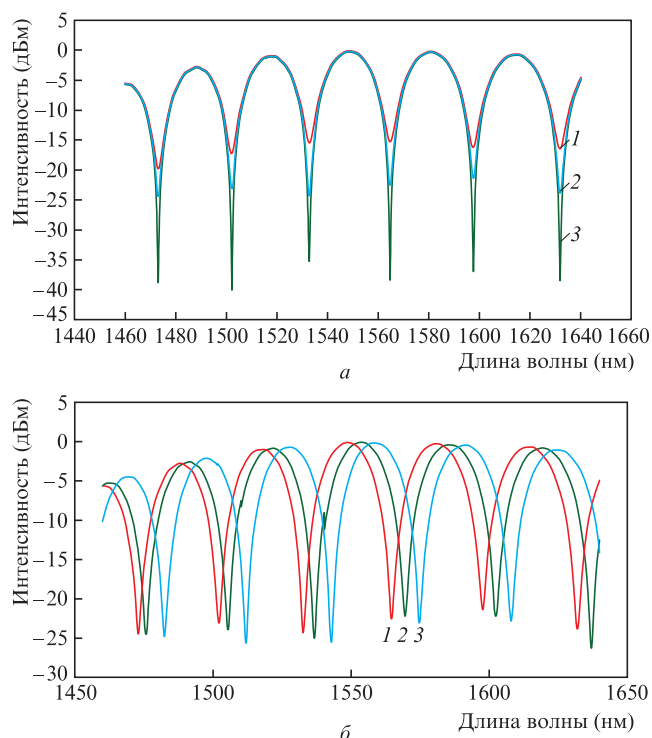


Рис.3. Выходной спектр ПФМЦ, полученный в режиме перестройки коэффициента экстинкции (а) и длины волны фильтра (б).

(кривые 2 и 3). Сигнал, запускаемый в ПФМЦ для построения данной характеристики, поступал от перестраиваемого источника света, а выходной спектр регистрировался ОСА.

Из рис.3,б следует, что каждый выходной спектр ПФМЦ состоит из многих пиков. Кривые 2 и 3 получают-ся при перестройке средней длины волны ПФМЦ.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Характеристика нанотрубок

Для характеристики НП на основе ОУНТ использовался спектроскоп комбинационного рассеяния Renishaw. Полученный спектр комбинационного рассеяния показан на рис.4. На частоте 1593.57 см^{-1} наблюдается G-пик, отражающий присутствие углеродных нанотрубок в анализируемом образце. Спектр сопоставим с таковыми из работ [28–30], авторы которых подтверждают существование G-пика на этой длине волны для ОУНТ. Однако от-

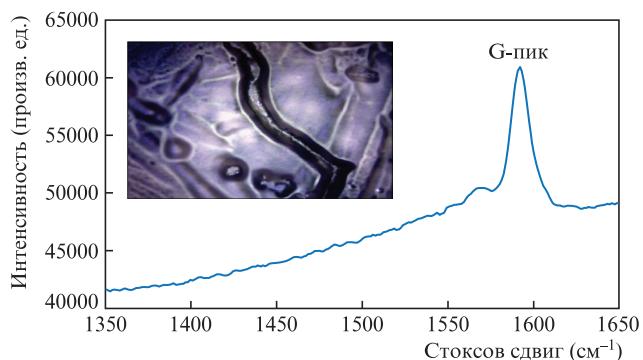


Рис.4. Спектр комбинационного рассеяния пленки ОУНТ и изображение НП, полученное с помощью рамановского микроскопа при длине волны возбуждения 532 нм (вставка).

четливые пики в спектре можно наблюдать также при использовании и более коротких длин волн возбуждения, таких как $\lambda = 633$ или 785 нм [14, 31].

На рис.5,а показано линейное оптическое поглощение НП на основе ОУНТ как функция длины волны в диапазоне $900\text{--}1600 \text{ нм}$ с использованием белого света в качестве источника сигнала. Видно, что пик поглощения НП на основе ОУНТ перекрывает область С-полосы в диапазоне длин волн вблизи 1.5 мкм , а поскольку диапазон расположен внутри области усиления эрбия, то появляется возможность оптимального функционирования предлагаемого лазера. На рис.5,б показан результат измерения нелинейного поглощения НП на основе ОУНТ. При измерении применялся метод двух детекторов и использовалось затравочное излучение лазера с синхронизацией мод на центральной длине волны 1560 нм [32]. Импульсы синхронизации мод имели частоту следования 27.78 МГц и длительность 0.74 пс .

Собранные нормированные данные затем аппроксимировались с использованием формулы, моделирующей насыщение [3, 32]:

$$\alpha(I) = \frac{\alpha_s}{1 + I/I_s} + \alpha_{ns}, \tag{1}$$

где $\alpha(I)$ – зависящий от интенсивности коэффициент поглощения; I – входная интенсивность; I_s – интенсивность насыщения; α_s и α_{ns} – насыщаемый и ненасыщаемый коэффициенты поглощения соответственно. Измеренные насыщаемый коэффициент поглощения (глубина модуляции) и интенсивность насыщения составили $\sim 19.0\%$ и 45.3 МВт/см^2 . Эти значения сопоставимы с опубликованными в работах [28, 33]. Характеристики образцов ОУНТ

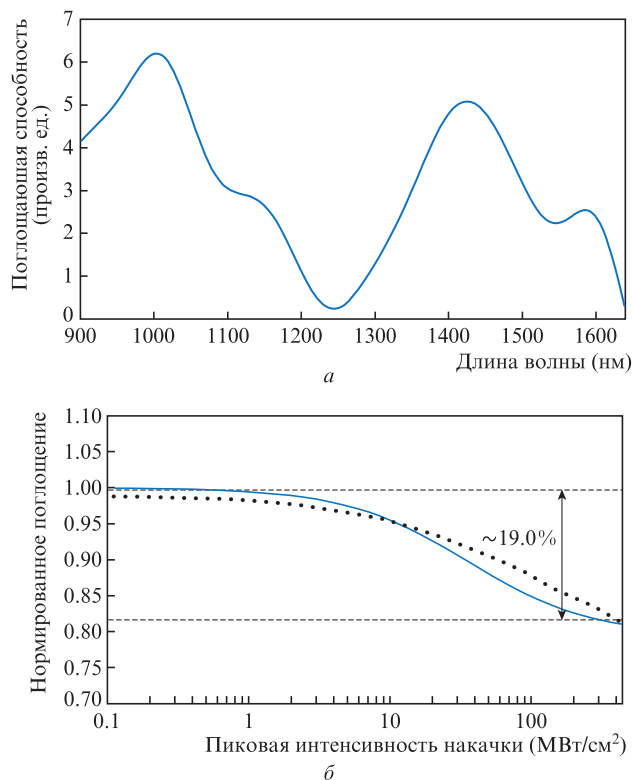


Рис.5. Оптические характеристики пленки ОУНТ: линейное поглощение (а) и нелинейное поглощение как функция пиковой интенсивности накачки (б) (точки – эксперимент, сплошная линия – подгоночная кривая).

позволяют заключить, что глубина модуляции и интенсивность насыщения изготовленных НП достаточны для формирования импульсов и их стабилизации [34].

3.2. Перестраиваемые выходные импульсы синхронизации мод с ПФМЦ

Стационарная генерация предлагаемого перестраиваемого волоконного лазера с синхронизацией мод начинается при пороговой мощности накачки 4.5 мВт, тогда как для самопроизвольного запуска синхронизации мод пороговая мощность составляет 6.0 мВт. Наблюдаемый на выходе оптический спектр имеет боковые полосы, которые подтверждают работу импульсного лазера в солитонном режиме. Диапазон перестройки в данном эксперименте составляет 16 нм, покрывая область центральных длин волн от 1550 до 1566 нм за счет одновременной регулировки коэффициента экстинкции и длины волны ПФМЦ (рис.6). При перестройке центральной длины волны боковые полосы Келли сохраняются. Когда центральная длина волны превышает 1566 нм при пороговой мощности накачки 6.0 мВт, происходит срыв синхронизации мод. Однако увеличение мощности накачки приводит к восстановлению синхронизации мод с возникновением солитонного спектра при центральных длинах волн выше 1566 нм – примерно при 1567, 1568 и 1569 нм. Такое поведение отнесено на счет спектра усиления ВЛЭ, поскольку по мере того как центральная длина волны смещается за

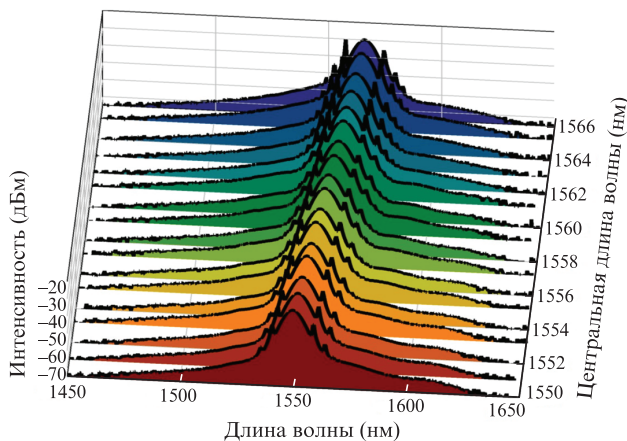


Рис.6. Выходные спектры перестраиваемого лазера с синхронизацией мод для 17 различных значений центральной длины волны при сохранении боковых полос Келли.

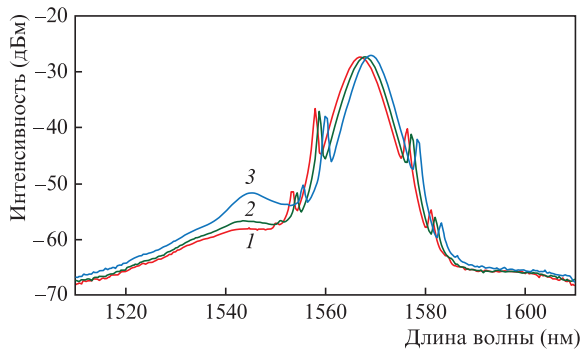


Рис.7. Выходные спектры перестраиваемого лазера с синхронизацией мод для центральных длин волн 1567 (1), 1568 (2) и 1569 нм (3) при мощности накачки 7.0 мВт. Цветной вариант рис.7 помещен на сайте нашего журнала <https://www.quantum-electron.ru>.

пределы оптимальной области усиления активного волокна, усиление падает, и лазерная генерация становится нестабильной. Однако рост мощности накачки увеличивает усиление в более протяженной области длин волн, что позволяет расширить диапазон перестройки, в котором возможна синхронизация мод.

На рис.7 показаны выходные спектры лазерного излучения при различных центральных длинах волн и неизменной мощности накачки 7.0 мВт. Как и ожидалось, видна небольшая потеря интенсивности на выходе фильтра для длин волн, превышающих 1560 нм, что и приводит к прекращению режима синхронизации мод на длинах волн выше 1566 нм. Таким образом, можно сделать вывод, что ограничивающим фактором является не НП на основе ОУНТ, а профиль усиления активного волокна. Рабочие характеристики системы могут быть усовершенствованы путем использования перестраиваемого фильтра с низкими потерями для перестройки центральной длины волны в более широких пределах.

Показания автокоррелятора для 17 различных центральных длин волн приведены на рис.8. Принимая для аномальной дисперсии форму импульса sech^2 , получаем длительность импульса (FWHM) от 0.51 до 0.56 пс.

На рис.9 показаны изменения ширины полосы на уровне 3 дБ, длительности импульса и ПДШ импульсы в зависимости от центральной длины волны. Видно, что значения ширины полосы слегка изменяются от 6.24 до 6.90 нм, при этом длительность импульса и ПДШ демонстрируют значительно меньший разброс – от 0.51 до 0.56 пс и от 0.40 до 0.46 соответственно. Слабые изменения ПДШ в зависимости от центральной длины волны отражают факт сохранения солитонного характера импульса при перестройке длины волны. Полученные зна-

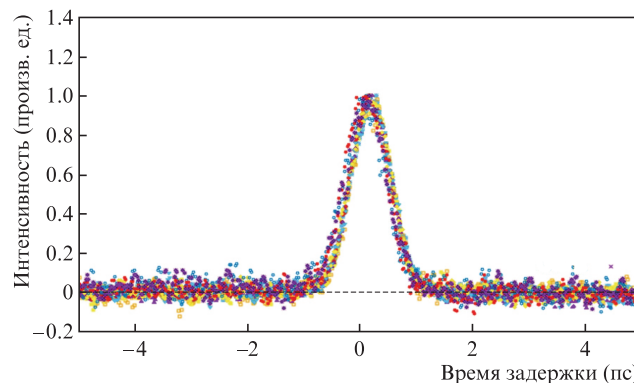


Рис.8. Показания автокоррелятора для импульсов лазера с синхронизацией мод, записанные при 17 значениях центральной длины волны в диапазоне от 1550 до 1566 нм.

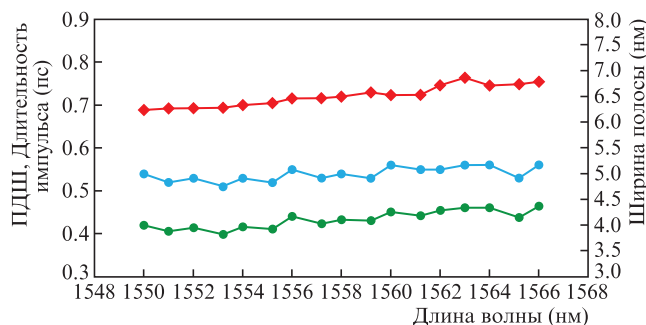


Рис.9. Вариации ПДШ (●), длительности импульса (●) и ширины полосы на уровне 3 дБ (◆) при изменении центральной длины волны.

чения ПДШ выше, чем у спектрально-ограниченных импульсов вида sech^2 (для них ПДШ = 0.315) [27], что отражает наличие чирпа у наблюдаемых импульсов [35].

Осциллограмма цуга импульсов перестраиваемого лазера с синхронизацией мод приведена на рис.10. Частота следования импульсов (ЧСИ) в режиме синхронизации мод равна 12.7 МГц, что соответствует периоду следования 78.7 нс. Полученная ЧСИ для предлагаемой системы выше, чем для перестраиваемого лазера с синхронизацией мод на основе графена [23]. При наличии синхронизации мод ЧСИ зависит от длины резонатора – более длинные резонаторы имеют более низкую частоту следования (и наоборот):

$$f_r = c/(nL), \quad (2)$$

где f_r – частота следования импульсов; c – скорость света в вакууме ($\sim 3 \times 10^8$ м/с); n – показатель преломления резонатора, равный приблизительно 1.5. Измеренная энергия импульса лазера с синхронизацией мод составляет около 2 пДж.

Из рис.11 следует, что отношение сигнал/шум при синхронизации мод на основной частоте 12.7 МГц составляет около 60 дБ. На вставке показан радиочастотный (РЧ) спектр в более широком диапазоне, типичный для импульсов в режиме синхронизации мод [36–39]. Измеренное ОСШ свидетельствует о высокой стабильности импульсного лазера с синхронизацией мод, низком уровне шумовых флуктуаций и малом джиттере импульсов [28, 40].

Предлагаемый лазер может генерировать перестраиваемые импульсы в режиме синхронизации мод с частотой следования 12.7 МГц при мощности накачки 6.0 мВт, более низкой, чем у перестраиваемого волоконного лазера с синхронизацией мод на графене [23]. Более того, перестраиваемый импульсный волоконный лазер с синхронизацией мод на ОУНТ способен обеспечить меньшие «уходы» центральной частоты (~ 1 нм) в пределах диапазона перестройки с сохранением боковых полос Келли [3]. Он может найти важные применения там, где требуется стабильная импульсная генерация с широким диапазоном перестройки длины волны при низких мощностях накачки.

4. Заключение

Предложен и продемонстрирован волоконный солитонный лазер с синхронизацией мод, использующий насыщаемый поглотитель на основе ОУНТ и перестраиваемый фильтр Маха–Цендера в качестве механизма перестройки. Солитонные импульсы в режиме синхронизации мод генерируются при мощности накачки 6.0 мВт в диапазоне перестройки длины волн 1550–1566 нм с девиацией ~ 1 нм. Глубина модуляции и интенсивность насыщения НП составляют $\sim 19.0\%$ и 45.3 МВт/см² соответственно. Ширина полосы на уровне 3 дБ и длительность импульса на выходе лазера изменяются в пределах 6.24–6.90 нм и 0.51–0.56 пс соответственно. При изменении центральной длины волны слабо изменяется ПДШ (от 0.40 до 0.46). Данный лазер хорошо подходит для разнообразных приложений в таких областях, как спектроскопия, телекоммуникации, зондирование и биомедицинские исследования.

Авторы выражают благодарность Университету Малайя за предоставление финансовой поддержки настоящей работы (гранты LRGS (2015) NGOD/UM/ KPT, GA 010-2014 (ULUNG) и BR003-2016).

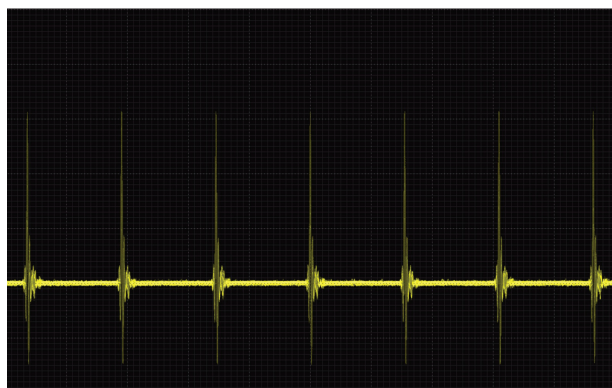


Рис.10. Осциллограмма цуга импульсов перестраиваемого лазера с синхронизацией мод.

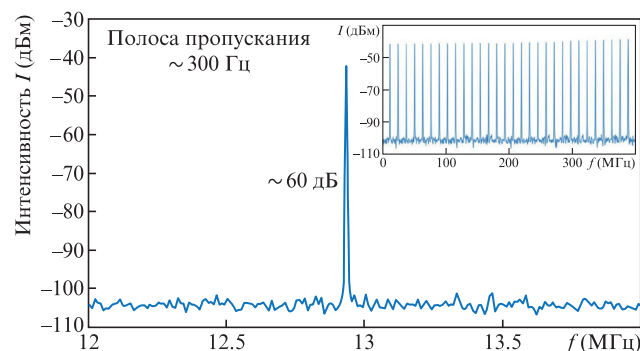


Рис.11. Оптический радиочастотный спектр вблизи основной частоты ($f = 12.7$ МГц). На вставке – РЧ спектр в широком диапазоне частот.

- Okhotnikov O., Grudinin A., Pessa M. *New J. Phys.*, **6** (1),177 (2004).
- Letokhov V. *Nature*, **316**, 325 (1985).
- Wang F., Rozhin A., Scardaci V., Sun Z., Hennrich F., White I., et al. *Nature Nanotechnology*, **3** (12), 738 (2008).
- Sun Z., Popa D., Hasan T., Torrisi F., Wang F., Kelleher E.J., et al. *Nano Research*, **3** (9), 653 (2010).
- Marshall J., Stewart G., Whitenett G. *Measurement Science and Technology*, **17** (5), 1023 (2006).
- Zhang H., Tang D., Zhao L., Bao Q., Loh K.P., Lin B., et al. *Laser Phys. Lett.*, **7** (8), 591 (2010).
- Nelson L., Jones D., Tamura K., Haus H., Ippen E. *Appl. Phys. B*, **65** (2), 277 (1997).
- Fermann M., Galvanauskas A., Sucha G., Harter D. *Appl. Phys. B*, **65** (2), 259 (1997).
- Cao W., Wang H., Luo A., Luo Z., Xu W. *Laser Phys. Lett.*, **9** (1), 54 (2011).
- Svelto O. *Principles of Lasers* (Berlin-Heidelberg: Springer, 2010).
- Keller U. *Nature*, **424**, 831 (2003).
- Martinez A., Sun Z. *Nature Photon.*, **7** (11), 842 (2013).
- Sotor J., Sobon G., Macherzynski W., Abramski K. *Laser Phys. Lett.*, **11** (5), 055102 (2014).
- Sun Z., Hasan T., Ferrari A. *Phys. E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, **44** (6), 1082 (2012).
- Set S.Y., Yaguchi H., Tanaka Y., Jablonski M. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **10** (1), 137 (2004).
- Della Valle G., Osellame R., Galzerano G., Chiodo N., Cerullo G., Laporta P., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **89** (23), 231115 (2006).
- Rozhin A., Scardaci V., Wang F., Hennrich F., White I., Milne W., et al. *Phys. Stat. Solidi (b)*, **243** (13), 3551 (2006).
- Nicholson J., Windeler R., DiGiovanni D. *Opt. Express*, **15** (15), 9176 (2007).

19. Travers J., Morgenweg J., Obraztsova E., Chernov A., Kelleher E., Popov S. *Laser Phys. Lett.*, **8** (2), 144 (2011).
20. Fang Q., Kieu K., Peyghambarian N. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **22** (22), 1656 (2010).
21. Chamorovskiy A.Y., Marakulin A., Kurkov A., Okhotnikov O. *Laser Phys. Lett.*, **9** (8), 602 (2012).
22. Tamura K., Doerr C., Haus H., Ippen E. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **6** (6), 697 (1994).
23. Ahmad H., Muhammad F., Zulkifli M., Harun S. *IEEE Photon. J.*, **5** (5), 1501709 (2013).
24. Gerlein F., Cloutier S.G., in *Frontiers Optics 2010/Laser Science XXVI* (OSA, 2010, FTuJ4).
25. Sun Z., Mou C., Song Y., Yan Z., Zhou K., Zhang L., in *Advanced Photonics* (OSA, 2014, paper BW3D.4).
26. Djordjevic I., Ryan W., Vasic B. *Fundamentals of Optical Communication. Coding for Optical Channels* (Berlin-Heidelberg: Springer, 2010, pp.25–73).
27. Agrawal G. *Applications of Nonlinear Fiber Optics* (New York: Academic Press, 2001).
28. Sun Z., Hasan T., Wang F., Rozhin A.G., White I.H., Ferrari A.C. *Nano Research*, **3** (6), 404 (2010).
29. Kim S.-J., Park J., Jeong Y., Go H., Lee K., Hong S., et al. *Nanoscale Res. Lett.*, **9** (1), 1 (2014).
30. Gauffrès E., Tang N.-W., Lapointe F., Cabana J., Nadon M.-A., Cottenye N., et al. *Nature Photon.*, **8** (1), 72 (2014).
31. Hasan T., Sun Z., Wang F., Bonaccorso F., Tan P.H., Rozhin A.G., et al. *Adv. Mater.*, **21** (38–39), 3874 (2009).
32. Ahmad H., Reduan S., Ali Z.A., Ismail M., Ruslan N., Lee C., et al. *IEEE Photon. J.*, **8** (1), 1 (2016).
33. Chiu J.-C., Lan Y.-F., Chang C.-M., Chen X.-Z., Yeh C.-Y., Lee C.-K., et al. *Opt. Express*, **18** (4), 3592 (2010).
34. Keller U. *Progress Opt.*, **46**, 1 (2004).
35. Set S.Y., Yaguchi H., Tanaka Y., Jablonski M. *J. Lightwave Technol.*, **22** (1), 51 (2004).
36. Dou Z., Song Y., Tian J., Liu J., Yu Z., Fang X. *Opt. Express*, **22** (20), 24055 (2014).
37. Yin K., Zhang B., Li L., Jiang T., Zhou X., Hou J. *Photon. Research*, **3** (3), 72 (2015).
38. Luo Z., Li Y., Zhong M., Huang Y., Wan X., Peng J., et al. *Photon. Research*, **3** (3), A79 (2015).
39. Li X., Yu X., Sun Z., Yan Z., Sun B., Cheng Y., et al. *Sci. Rep.*, **5**, 16624 (2015).
40. Von der Linde D. *Appl. Phys. B*, **39** (4), 201 (1986).