

Волоконный лазер на фториде тулия, генерирующий импульсы переменной длительности в режиме синхронизации мод с использованием нелинейно-оптического петлевого зеркала*

Х.Ахмад, С.Н.Аидит, С.И.Оои, З.С.Тью

Предложен и продемонстрирован работающий в S-диапазоне длин волн волоконный лазер на фториде тулия с нелинейно-оптическим петлевым зеркалом (НОПЗ), генерирующий импульсы перестраиваемой длительности в режиме синхронизации мод. Стабильные выходные импульсы при синхронизации мод в режиме диссипативного солитонного резонанса (ДСР) достигаются при мощности излучения накачки 186.8 мВт и сохраняют устойчивость вплоть до максимальной мощности накачки 249.7 мВт. В указанном диапазоне рабочих мощностей излучения накачки длительность импульсов изменяется от 70.8 до 120.3 нс при частоте следования 97.4 кГц. Максимальные средняя выходная мощность и энергия импульса составили 0.99 мВт и 10.21 нДж соответственно. При максимальной мощности накачки для выходного лазерного импульса получено отношение сигнал/шум ~ 69 дБ, что указывает на высокую степень устойчивости режима. Варьируемая длительность импульса может найти важные применения в модулированных источниках света для различных оптических и оптоэлектронных систем.

Ключевые слова: нелинейно-оптическое петлевое зеркало, диссипативный солитонный резонанс, волоконный лазер с синхронизацией мод.

1. Введение

Источники света с модуляцией длительности импульсов (МДИ) перспективны для разнообразных применений, в частности в области оптоэлектроники. Это оптические устройства памяти, аналоговые волоконно-оптические системы связи и др. (см., напр., [1–4]). МДИ применяется для получения переменного уровня освещенности – от черного (выключено) до белого (включено), что обычно используется для улучшения разрешения дисплеев. Кроме того, она может применяться для управления лазерным пучком при записи и предварительном нагреве оптических дисков. Аналогичным образом МДИ реализуется при естественной или равномерной дискретизации входного аналогового сигнала [4] и используется при конвертировании в аналоговые сигналы для облегчения прохождения через цифровые логические элементы [3], а также позволяет сократить межсимвольные помехи [2] в оптической коммуникационной системе. Однако текущее развитие техники МДИ отстает от требований, предъявляемых большинством оптических и оптоэлектронных приложений, из-за ряда ограничений, таких как необходимость дополнительного модулятора, обеспечивающего нужное изменение длительности импульсов. Последнее неизбежно влечет за собой увеличение стоимости и делает систему более сложной.

* Перевод с англ. В.Л.Дербова.

H.Ahmad. Photonics Research Center, University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia; Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Airlangga University, Surabaya 60115, Indonesia; e-mail: harith@um.edu.my
S.N.Aidit, S.I.Ooi, Z.C.Tiu. Photonics Research Center, University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia

Поступила в редакцию 27 июня 2018 г., после доработки – 3 сентября 2018 г.

В этой связи были предприняты значительные усилия исследователей, направленные на создание эффективного источника света, способного генерировать выходное излучение с МДИ в широком диапазоне рабочих длин волн. Один из простых и экономически эффективных путей преодоления указанных выше ограничений – использование нелинейно-оптического петлевого зеркала (НОПЗ) в резонаторе предлагаемого лазера. Данный подход был апробирован, и системы с МДИ на основе НОПЗ начали широко использоваться в качестве источников излучения в S- и L-диапазонах, в областях вблизи 1.0 и 2.0 мкм [5–8]. Однако при этом остается еще значительное число «окон» в спектре излучения таких источников, в частности в S-диапазоне. Для создания лазерного источника с МДИ на основе НОПЗ в S-диапазоне длин волн можно использовать легированные эрбием волокна с депрессированной оболочкой (DC-EDF) в резонаторе волоконного лазера, генерирующего на длинах волн от 1.49 до 1.53 мкм [9, 10], а также другие специализированные волокна, например легированные эрбием волокна на основе висмута, позволяющие генерировать стабильные импульсы в режиме синхронизации мод [11]. Отметим, что в обоих указанных случаях длительность импульса не регулируется.

В настоящей работе предлагается и демонстрируется сравнительно простой и недорогой лазерный источник с МДИ на основе волоконного лазера на фториде тулия (ВЛФТ) с синхронизацией мод для спектрального S-диапазона. Предлагаемый источник может генерировать в наносекундном диапазоне импульсы перестраиваемой длительности с относительно постоянной амплитудой при использовании в резонаторе НОПЗ [7, 12, 13]. Использование ВЛФТ обеспечивает генерацию излучения, перекрывающего достаточно широкий (~ 70 нм) спектральный интервал 1.45–1.51 мкм (S-диапазон) [14]. Полоса излучения ВЛФТ шире, чем у активных сред на основе эрбия, что увеличивает область применения ВЛФТ в оптике и оптоэлектронике.

2. Экспериментальная установка

На рис.1 приведена экспериментальная схема предлагаемого лазера с МДИ. Тулий-фторидное волокно (ТФВ) длиной 11.6 м с концентрацией ионов Tm^{3+} 3.200 ppm и числовой апертурой 0.28 используется как линейно усиливающая активная среда. Активная среда, поставляемая компанией Fiberlab Inc. в виде герметически запаянного модуля, снабженного FC/APC-коннекторами (см. вставку к рис.1), имеет диаметр поля моды 4.5 мкм на длине волны 1.5 мкм и коэффициент поглощения ~ 0.15 дБ/м на длине волны 1.40 мкм. Накачка ТФВ осуществляется излучением лазерного диода (ЛД) с длиной волны 1.40 мкм и максимальной выходной мощностью 250 мВт через порт 1.40 мкм мультиплексора спектрального уплотнения каналов (WDM) на 1.40/1.50 мкм. Один конец ТФВ соединен с общим портом WDM, а другой – с поляризационно-независимым оптическим изолятором (ОИ), который обеспечивает однонаправленное распространение сигнала в резонаторе, а также предотвращает возможное отражение излучения от НОПЗ (при проходе назад через активное ТФВ излучение может повредить ЛД).

НОПЗ образовано присоединением одномодового волокна длиной 2.07 км (SMF-28) к 95%-ному и 5%-ному портам 2×2 оптического разветвителя 95:5 (ОР1). Еще один порт ОР1 соединен с ОИ, а четвертый порт – с входным портом оптического разветвителя 80:20 (ОР2). В такой конфигурации петля волокна SMF-28 образует НОПЗ, которое служит искусственным насыщающимся поглотителем для индуцирования ультракоротких импульсов. Второй разветвитель ОР2 используется для вывода $\sim 20\%$ распространяющегося излучения для дальнейшего анализа, а порт 80% соединен с портом 1.50 мкм WDM и таким образом замыкает лазерный резонатор.

Полная длина предложенного резонатора составляет ~ 2.09 км, что соответствует времени его обхода излучением ~ 10.1 нс (с учетом показателя преломления одномодового волокна SMF-28, равного 1.45). Резонатор включает ТФВ длиной 11.6 м, одномодовое волокно SMF-28 длиной 2.07 км, образующее петлю НОПЗ, а также волок-

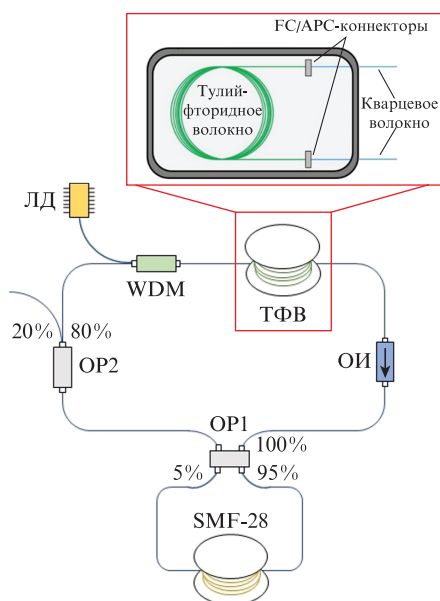


Рис.1. Экспериментальная схема резонатора ТФВ-лазера с НОПЗ. На вставке – модуль с ТФВ.

на, входящие в остальные элементы, такие как WDM, ОИ, ОР1 и ОР2. Коэффициент дисперсии ТФВ равен примерно -20 пс/(нм·км), тогда как для SMF-28 этот коэффициент составляет 14 пс/(нм·км) для длины волны 1500 нм (для $\lambda = 1550$ нм коэффициент дисперсии равен ~ 17 пс/(нм·км)). Полная дисперсия резонатора равна ~ 28.75 пс/нм. Вычисленная дисперсия групповой скорости составила около -34.34 пс², что соответствует режиму аномальной дисперсии. Выходное излучение лазера исследуется с использованием оптического спектроанализатора Yokogawa AQ6370B, осциллографа Yokogawa DLM2054 с шириной полосы 500 МГц, фотодетектора с шириной полосы 1.2 ГГц и радиочастотного (РЧ) спектроанализатора Anritsu MS2683A.

3. Результаты и их обсуждение

Свойства ТФВ как усилителя спонтанного излучения (УСИ) иллюстрирует рис.2,а. ТФВ накачивается на $\lambda = 1400$ нм излучением лазерного диода мощностью 197 мВт и имеет спектр испускания, соответствующий переходу $^3H_4 - ^3F_4$ и покрывающий широкую область длин волн $1420 - 1530$ нм с максимумом на $\lambda = 1480$ нм. Спектр поглощения ТФВ приведен на рис.2,б. Как видно из рисунка, коэффициент поглощения ТФВ на $\lambda = 1400$ нм составляет ~ 0.17 дБ/м.

Устойчивая синхронизация мод начинается при пороговой мощности излучения накачки 186.8 мВт и продолжается до достижения максимальной мощности накачки 249.7 мВт. В пределах этого диапазона мощностей излучение на выходе лазерного резонатора с НОПЗ демонстрирует характеристики типичного диссипативного солитонного резонанса (ДСР) [7, 12, 13]. Это происходит благодаря установлению баланса между дисперсией резонатора, нелинейностью волокна, лазерным усилением и потерями, а также в результате спектральной фильтрации [5, 7, 15–17]. Действие НОПЗ вызывает эффект ограничения (фиксации) пиковой мощности импульса. Соответственно, фиксация пиковой мощности уменьшает накопление нелинейного эффекта в резонаторе, ограничивая спектр импульса полосой пропускания резонатора. Таким образом, механизм разрушения импульса перестает действовать, обеспечивая работу предложенного лазера в режиме ДСР [7].

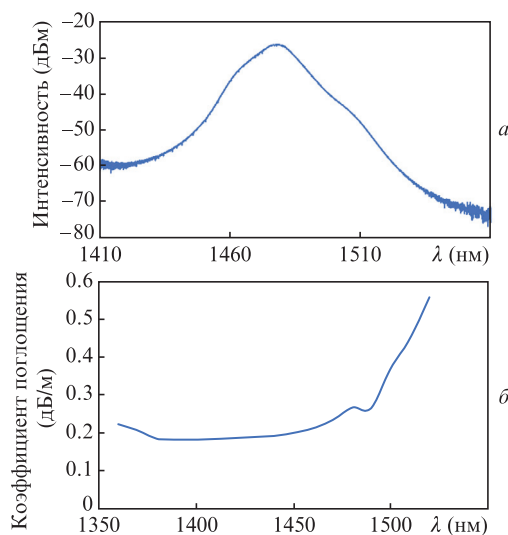


Рис.2. Спектры испускания (а) и поглощения (б) ТФВ.

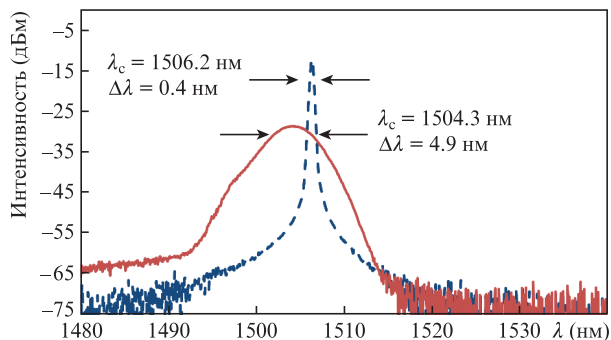


Рис.3. Оптический спектр на выходе ВЛФТ в режиме синхронизации мод.

На рис.3 показан оптический спектр импульсов излучения ВЛФТ при работе в режиме синхронизации мод. Как и ожидалось, спектр выходных импульсов излучения обнаруживает существенное уширение, и ширина его полосы на уровне -3 дБ составляет ~ 4.9 нм на центральной длине волны 1504.3 нм. На рис.4 приведены профили лазерных импульсов при синхронизации мод и различных значениях мощности излучения накачки, зарегистрированные с помощью осциллографа. На вставке показан цуг импульсов в режиме синхронизации мод при мощности накачки 249.7 мВт. Из рисунка видно, что длительность генерируемого импульса существенно увеличивается от наименьшего значения при мощности накачки 186.8 мВт до наибольшего значения при мощности 249.7 мВт. Во всем диапазоне изменения мощности накачки амплитуда импульсов почти одинакова и составляет ~ 1900 мВ со слабой флуктуацией в пределах 2.1% . Изменения длительности импульса и его пиковой мощности с ростом мощности накачки хорошо согласуются с теорией ДСР, в которой длительность генерируемого импульса растет с увеличением мощности накачки, тогда как амплитуда импульса остается неизменной [7, 12, 13]. Именно это свойство генерируемых импульсов обеспечивает хорошее соответствие предложенного МДИ-лазера требованиям перечисленных выше приложений. Изменяющаяся длительность импульса позволяет использовать изменение коэффициента заполнения (скважности) для индуцирования нескольких эффектов в различных приложениях (дис-

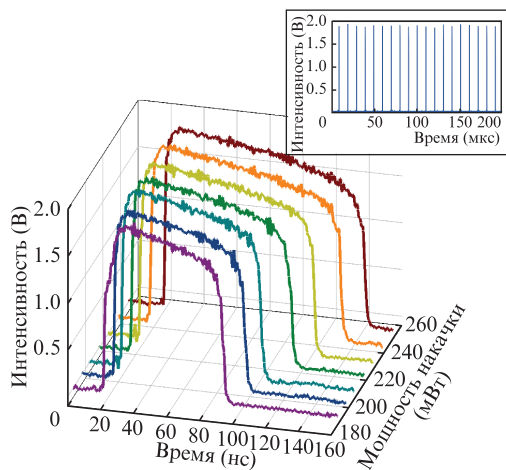


Рис.4. Профиль одиночного импульса в режиме синхронизации мод при различных мощностях излучения накачки. На вставке показан цуг импульсов при синхронизации мод и максимальной мощности накачки 249.7 мВт.

плеи, принтеры, приводы оптических дисков, а также телекоммуникационные системы).

На рис.5 приведены зависимости длительности и частоты следования импульсов исследуемого лазера с НОПЗ и синхронизацией мод от мощности излучения накачки. Длительность импульса линейно растет от 70.8 нс при мощности 186.8 мВт до 120.3 нс при максимальной мощности накачки 249.7 мВт. Во всем рабочем диапазоне ДСР не наблюдается значительных изменений частоты следования импульсов. Постоянство этой частоты отражает устойчивость работы лазера с НОПЗ в режиме синхронизации мод.

Нами были измерены также средняя выходная мощность и энергия импульса предлагаемого лазера (рис.6). Видно, что выходная мощность лазера линейно растет от 0.54 до 0.99 мВт с увеличением мощности накачки от 186.8 до 249.7 мВт. Также линейно растет средняя энергия импульса, увеличиваясь в этом диапазоне мощности накачки от 5.59 до 10.21 нДж. Отметим, что зависимости средней выходной мощности и длительности импульса лазера от мощности накачки не обнаруживают признаков насыщения, что позволяет рассчитывать на получение еще больших выходной мощности и длительности импульса, если станут доступными более высокие значения мощности излучения накачки.

Измерение радиочастотной составляющей выходного сигнала проводилось при максимальной мощности накачки 249.7 мВт с использованием анализатора РЧ спектра Anritsu MS2683A RFSA и выявило основную частоту ~ 97.40 кГц. Как и ожидалось, основная частота соответствует полной длине лазерного резонатора. Более того, как показано на рис.7, других частотных компонент в РЧ спектре излучения лазера не наблюдалось даже в более широком ($0-1.0$ МГц) частотном промежутке. Это согласуется с теорией устойчивых импульсов при ДСР.

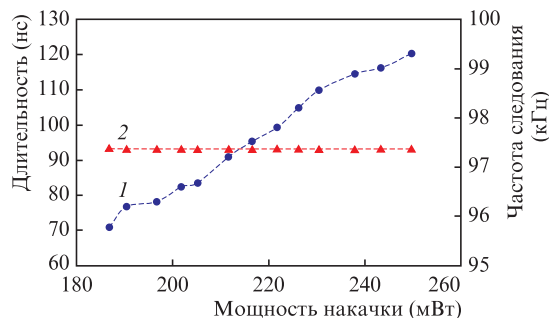


Рис.5. Длительность (1) и частота следования (2) импульсов на выходе лазерного резонатора с НОПЗ в режиме синхронизации мод как функции мощности излучения накачки.

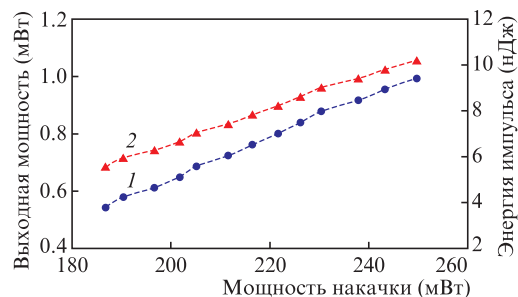


Рис.6. Средняя выходная мощность (1) и энергия (2) импульса на выходе лазера с НОПЗ в режиме синхронизации мод в зависимости от мощности излучения накачки.

Табл.1. Результаты, полученные для лазерных систем с МДИ на основе НОПЗ с различными рабочими длинами волн.

Рабочая длина волны (нм)	Частота следования импульсов (кГц)	Максимальная энергия импульса (нДж)	ОСШ (дБ)	Диапазон длительностей импульса (нс)	Источник
1565 (С-диапазон)	100	33.34	45	25.1–81.5	[6]
1567 (L-диапазон)	31.25	236.80	31.25	135–2272	[5]
1068 (область 1 мкм)	13.40	2.96	70	0.063–0.147	[7]
1975 (область 2 мкм)	1065	~ 85.47	55	3.74–72.19	[8]
1505 (S-диапазон)	97.40	10.21	69	70.8–120.3	Настоящая работа

Полученное отношение сигнал/шум (ОСШ) ~ 69 дБ отражает весьма высокую устойчивость генерации лазерных импульсов в режиме синхронизации мод. В дополнение к РЧ спектрам в диапазонах 0–120 кГц и 0–1.0 МГц был зарегистрирован также спектр сигнала при синхронизации мод в большем частотном диапазоне 0–40 МГц (рис.8). Он представляет собой РЧ спектр, модулированный на частоте $f_m = 8.4$ МГц. Во временном масштабе эта частота соответствует ~ 120 нс, т.е. длительности импульса лазера с синхронизацией мод при максимальной мощности накачки 249.7 мВт. Таким образом, модулированный РЧ спектр подтверждает генерацию прямоугольных импульсов при синхронизации мод в лазерном резонаторе с НОПЗ.

В табл.1 приведены результаты работ по генерации импульсов переменной длительности с помощью техники НОПЗ. Как видно из таблицы, для лазерных систем, работающих на близких длинах волн, характерно различие значений одного и того же параметра выходного излучения. Эти различия можно отнести на счет использования в этих работах разных активных сред и различных значений мощности излучения накачки. Некоторые результаты, полученные в настоящей работе, сравнимы по ряду параметров с результатами предыдущих работ, а другие – нет. Так или иначе, настоящая работа заслуживает внимания, поскольку предлагаемый в ней лазер представляет собой источник света с МДИ для неосвоенной спектральной области между С-, L-диапазонами и областями длин волн 1 и 2 мкм.

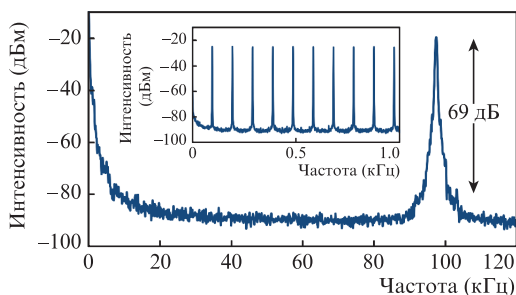


Рис.7. РЧ спектр выходного излучения предлагаемого лазера.

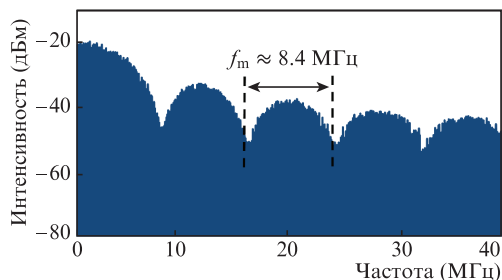


Рис.8. Широкополосный РЧ спектр выходного излучения предлагаемого лазера с синхронизацией мод.

4. Заключение

Использование нелинейно-оптического петлевого зеркала в резонаторе ВЛФТ позволяет создать источник стабильных лазерных импульсов при синхронизации мод в режиме диссипативного солитонного резонанса, для которого продемонстрирована возможность модуляции длительности импульсов. Полученный лазер с синхронизацией мод работает с частотой следования импульсов 97.40 кГц, что соответствует длине резонатора 2.09 км. Эволюция профиля импульса с увеличением мощности накачки согласуется с теорией диссипативного солитонного резонанса. Для всего диапазона рабочих мощностей излучения накачки (186.8–249.7 мВт) реализована генерация импульсов с возрастающей длительностью, но сравнительно постоянной амплитудой. Генерация в режиме синхронизации мод с наименьшей длительностью импульса 70.8 нс достигается при наименьшей мощности накачки. Наивысшая средняя выходная мощность ~ 0.99 мВт и энергия импульса ~ 10.21 нДж достигаются при максимальной мощности излучения накачки. Регистрация модулированного РЧ спектра в широком РЧ диапазоне подтверждает генерацию прямоугольных импульсов в предлагаемом лазерном резонаторе с НОПЗ. Генерация импульсов с частотой следования 97.40 кГц и с ОСШ ~ 69 дБ отражает устойчивость работы этого лазера в режиме синхронизации мод.

Авторы выражают благодарность Университету Малайя за финансовую поддержку настоящего исследования (гранты RU001-2017 и RP029A-15AFR).

- Ohno E., Nishiuchi K., Ishibashi K., Yamada N., Akahira N. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30**, 677 (1991).
- Fan Y., Green R. *Opt. Eng.*, **46**, 65001 (2007).
- Suh S.Y. *J. Light. Technol.*, **5**, 102 (1987).
- Wilson B., Ghassemlooy Z. *Int. J. Optoelectron.*, **4**, 3 (1989).
- Liu T., Jia D., Liu Y., Wang Z., Yang T. *Opt. Commun.*, **356**, 416 (2015).
- Wang P., Tang Y., Peng H., Shi G., He T., Li H., Liu Y. *J. Mod. Opt.*, **64**, 122 (2017).
- Li D., Li L., Zhou J., Zhao L., Tang D., Shen D. *Sci. Rep.*, **6** (1), 23631 (2016).
- Zhao J., Ouyang D., Zheng Z., Liu M., Ren X., Li C., Ruan S., Xie W. *Opt. Express*, **24**, 12072 (2016).
- Yeh C., Lee C., Chi S. *Photon. Technol. Lett. IEEE*, **15**, 1053 (2003).
- Harun S.W., Dimiyati K., Jayapalan K.K., Ahmad H. *Laser Phys. Lett.*, **4**, 10 (2007).
- Harun S.W., Akbari R., Arof H., Ahmad H. *Laser Phys. Lett.*, **8**, 449 (2011).
- Cheng Z., Li H., Wang P. *Opt. Express*, **23**, 5972 (2015).
- Wang S.-K., Ning Q., Luo A.-P., Lin Z.-B., Luo Z.-C., Xu W.-C. *Opt. Express*, **21**, 2402 (2013).
- Ahmad H., Reduan S.A., Zulkifli A.Z., Tiu Z.C. *Appl. Opt.*, **56**, 3841 (2017).
- Yun L., Liu X., Mao D. *Opt. Express*, **20**, 20992 (2012).
- Liu X., Wang L., Li X., Sun H., Lin A., Lu K., Zhao W. *Opt. Express*, **17**, 8506 (2009).
- Oktem B. et al. *Nature Photon.*, **4**, 307 (2010).