

Многоимпульсный режим работы волоконного лазера диссипативных солитонов с нелинейным вращением поляризатора*

Х.Л.Ю, Х.Л.Ван, П.Чжоу, Дж.Б.Чен

Сообщается об экспериментальном наблюдении состояний множественных диссипативных солитонов (ДС) в лазере на легированном Yb волокне с полностью нормальной дисперсией и пассивной синхронизацией мод, включая связанное и колебательное состояния ДС. В связанном состоянии в резонаторе могут сосуществовать несколько (вплоть до 11) ДС. В колебательном состоянии движения ДС не являются чисто случайными. Рассмотрены, обобщены и проиллюстрированы три типичных состояния. Моноимпульсное состояние с синхронизованными модами устанавливается при высокой мощности накачки при тщательной настройке контроллеров поляризации. Широкий спектр указывает на то, что это могут быть шумоподобные импульсы, которые можно использовать в качестве накачки для генерации суперконтинуума.

Ключевые слова: волоконные лазеры, синхронизация мод, диссипативный солитон.

1. Введение

Широкое исследование волоконных лазеров с пассивной синхронизацией мод (ВЛПСМ) обусловлено их значением для научных исследований [1, 2] и практических приложений для генерации сверхкоротких импульсов высокой энергии [3–5]. В частности, в последние несколько лет большое внимание привлекли волоконные лазеры диссипативных солитонов (ДС), работающие в диапазоне длин волн 1 мкм с резонатором с полностью нормальной дисперсией (ПНД), из-за существенно более высокой энергии выходных импульсов и лучшей устойчивости по отношению к нарушению режима генерации, чем у лазеров со спектрально-ограниченными солитонными импульсами, генерируемыми в резонаторе с аномальной дисперсией. В работах [3, 6] сообщалось о получении энергии импульса более 20 нДж в полностью волоконных лазерах с синхронизацией мод в ПНД-резонаторе.

Однако на практике всегда имеет место многоимпульсный режим генерации, что препятствует повышению энергии одиночного импульса. Такой режим экспериментально наблюдался в резонаторе как с аномальной [7, 8], так и с нормальной дисперсией [9–12]. В работе [11] впервые сообщалось о многоимпульсной генерации в волоконном лазере с ПНД-резонатором. Эволюция связанных диссипативных импульсов в ПНД-резонаторе изучалась в [12]. Для объяснения формирования и эволюции нескольких импульсов в ВЛПСМ было создано несколько теоретических моделей [13–16]. В работах [11, 13] предполагалось, что формирование множества импульсов мо-

жет быть приписано эффекту «прикрепления» пика импульсов резонатором. В [8] было показано, что различные солитонные состояния режимов работы являются прямым следствием взаимодействия солитонов. Использование схемы с длинным резонатором позволило значительно увеличить энергию импульса волоконного ДС-лазера за счет уменьшения частоты следования [17]. Изучение процессов формирования множественных ДС в длинном резонаторе имеет большое значение для предотвращения разрушения импульсов и получения существенно большей энергии импульсов в ВЛПС с ПНД. Тем не менее исследований этого явления в длинном резонаторе пока явно недостаточно.

В настоящей работе экспериментально исследованы состояния режима генерации множественных ДС легированного Yb волоконного лазера с длинным ПНД-резонатором и пассивной синхронизацией мод. Для обеспечения самостартующего режима синхронизации мод лазера используется техника нелинейного вращения поляризации (НВП). Посредством увеличения мощности накачки лазера или тонкой настройки контроллеров поляризации (КП) мы наблюдали также связанное состояние множественных ДС (вплоть до 11 суб-ДС) и колебательное состояние пяти ДС при мощности накачки 141 мВт. В отличие от предыдущих наблюдений [7, 8], в нашем лазере это колебательное состояние не является чисто случайным, мы обобщили и проиллюстрировали три типичных состояния. Кроме того, было показано, что состояние синхронизации мод, соответствующее генерации одиночного импульса, может быть достигнуто при высоком уровне мощности накачки посредством тонкой подстройки КП; широкий спектр генерации в этом состоянии указывает на то, что это может быть шумоподобный импульс.

2. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки на основе ВЛПСМ с резонатором кольцевой структуры приведена на рис. 1. В качестве усиливающей среды использовалось легиро-

* Перевод с англ. В.В.Шувалова.

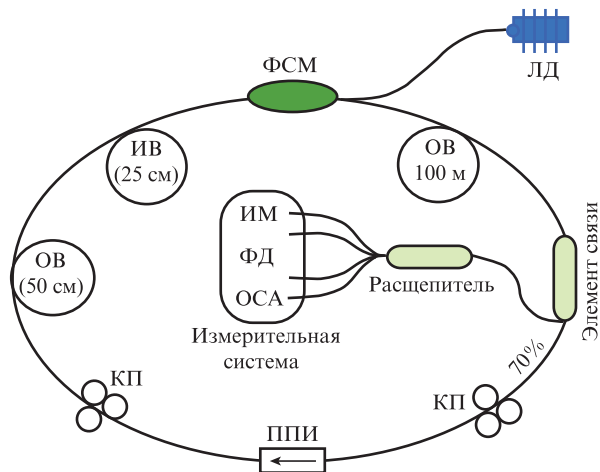


Рис.1. Принципиальная схема экспериментальной установки: ЛД – лазерный диод; ФСМ – спектральный мультиплексор на основе фильтра; ИВ – легированное Yb волокно; ОВ – одномодовое волокно; КП – контроллер поляризации; ППИ – изолятор, поддерживающий поляризацию; ИМ – измеритель мощности; ФД – фотодетектор; ОСА – анализатор оптического спектра.

ванное Yb волокно (ИВ) длиной 25 см с диаметрами сердцевины и оболочки 6 и 125 мкм соответственно и коэффициентом поглощения 300 дБ/м на длине волны 975 нм. Сердцевина волокна накачивалась с помощью лазерного диода (ЛД) с длиной волны 974 нм и максимальной выходной мощностью 334 мВт через спектральный мультиплексор на основе фильтра (ФСМ). Ширина полосы ФСМ с центром на длине волны 1060 нм составляла ± 3.5 нм. Два контроллера поляризации (КП) и поддерживающий поляризацию изолятор (ППИ) использовались для достижения синхронизации мод с помощью НВП. Кроме того, ППИ также обеспечивал однонаправленное распространение излучения по резонатору. Для усиления нелинейного эффекта в резонатор вставлялся отрезок (~ 100 м) стандартного одномодового волокна (ОВ). Во избежание непосредственного контакта ИВ с КП использовался отрезок (50 см) пассивного ОВ. Полная длина резонатора составляла около 110 м. Лазер работал в нормальном режиме дисперсии без каких-либо средств ее компенсации. Нормальная дисперсия резонатора на одном полном проходе оценивалась в 2.49 пс². Лазер был соединен с выходом через 30%-ный конец элемента связи 1×2 , который одновременно обеспечивал 70%-ную обратную связь. Лазерные характеристики измерялись одновременно с помощью разветвителя 1×4 . Спектры выходного излучения регистрировались оптическим анализатором спектра (ОСА) AQ6370C (YOKOGAWA). Временные характеристики цуга импульсов измерялись высокоскоростным фотодетектором (ФД) с шириной полосы пропускания 5 ГГц и наблюдались с помощью осциллографа с шириной полосы 1.5 ГГц.

3. Результаты и их обсуждение

В нашем эксперименте при мощности накачки ниже определенного порога (56.2 мВт) режим синхронизации мод может быть установлен только при определенной настройке обоих КП, однако работа лазера в непрерывном режиме возможна при мощности накачки выше порога (37.3 мВт). Самостартующая синхронизация мод достигается тогда, когда мощность накачки превышает порог

синхронизации мод и два КП повернуты должным образом. Типичная форма импульса в режиме синхронизации мод и цуг импульсов показаны на рис.2,а. Ширина импульса равна 537 пс. Время полного обхода резонатора лазера составляет около 538 нс, что означает, что цуг импульсов синхронизован с фундаментальной частотой повторения 1.86 МГц, заданной полной длиной резонатора. Пиковая мощность и энергия импульсов составляют около 3.4 Вт и 2.18 нДж.

При фиксированном положении обоих КП и росте мощности накачки в резонаторе формируется связанное состояние множественных ДС и их число в каждом пакете солитонов увеличивается от 1 до 11 (рис.2,б). Относительное положение ДС в одном и том же солитонном пакете является фиксированным, но расстояние между ними изменяется случайным образом. Пакеты ДС следуют с фундаментальной частотой 1.86 МГц. Осциллограмма типичной реализации с 10 ДС в каждом пакете импульсов приведена на рис.2,в. Длительность импульса каждого суб-ДС одинакова и равна примерно 557 пс. Соответствующие спектры группы импульсов с разным числом ДС показаны на рис.2,г. Оптические спектры импульсов имеют крутые края, что является характерной особенностью ДС [18–20]. Фазовая самомодуляция приводит к неравномерности спектров. Более того, в спектрах наблюдается стоксово излучение первого порядка (см. рис.2,г) и уровень рамановского рассеяния сильно растет с увеличением мощности накачки. Выход ДС в присутствии ВКР экспериментально и теоретически исследовался в работах [1, 2]. Хотя рамановское рассеяние может приводить к дестабилизации волоконных лазеров с синхронизацией мод в длинном резонаторе [1], разрушение импульсов в нашем лазере не может быть связано с наличием ВКР, поскольку оно существует даже тогда, когда лазер работает в устойчивом одномпульсном состоянии синхронизации мод. В работе [2] также показано, что рамановские импульсы могут поддерживать формирование ДС в лазерном резонаторе без узкополосного фильтра (как в нашем случае). Мы полагаем, что разрушение импульсов в основном обусловлено эффектом «прикрепления» пика импульсов резонатором [11] и эффектом перегрузки нелинейности [21]. Благодаря эффекту «прикрепления» пика, ДС имеет фиксированную энергию, поэтому увеличение мощности накачки не может изменить такие параметры ДС, как пиковая мощность и ширина импульса, но может усилить нелинейный эффект в резонаторе, что приведет к генерации множественных ДС с почти теми же параметрами импульсов.

Когда положения КП зафиксированы, в связанном состоянии множественных ДС наблюдается явление гистерезиса [14, 15] (рис.3). По мере роста мощности накачки P_p лазер сперва работает в непрерывном режиме, а затем – в режиме множественных ДС с числом солитонов в каждом пакете импульсов, нарастающим от 1 до 11. С уменьшением P_p число ДС в каждом пакете последовательно уменьшается на единицу, и наконец, при $P_p = 43.7$ мВт лазер снова работает в непрерывном режиме. Однако это не обратный процесс по отношению к тому, что был при увеличении мощности накачки. Например, если лазер работает в трехимпульсном режиме, то необходимая для формирования третьего импульса мощность накачки (при ее увеличении) больше, чем мощность, при которой третий импульс исчезает (при уменьшении мощности накачки). Лазер также может находиться в бистабильном

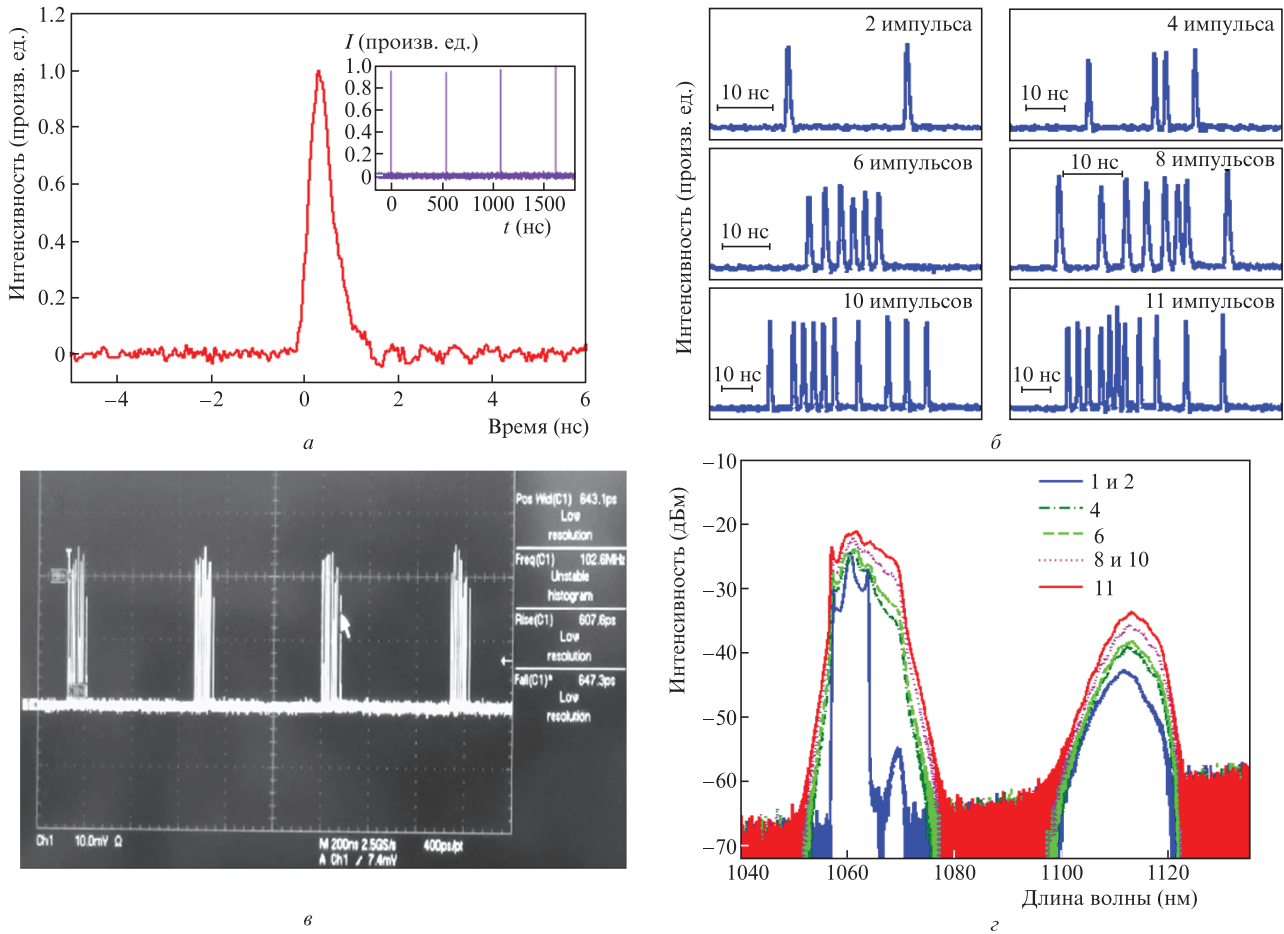


Рис.2. Характеристики связанного состояния множественных ДС: *a* – форма импульса с синхронизованными модами (на вставке цуг импульсов с фундаментальной частотой повторения 1.86 МГц); *б* – типичные состояния пакетов ДС; *в* – типичная осциллограмма пакетов ДС с десятью импульсами; *г* – спектры пакетов импульсов с разным числом (1, 2, 4, 6, 8, 10, 11) ДС в пакете.

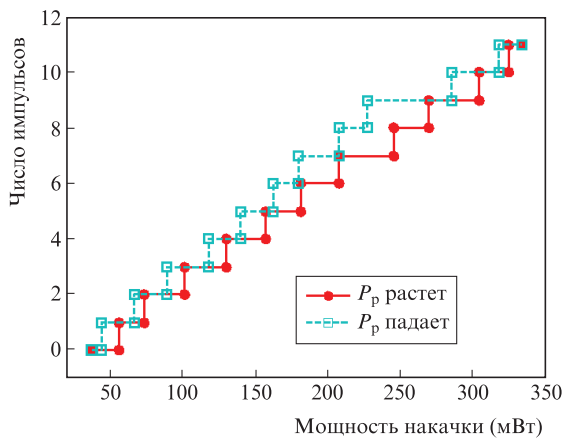


Рис.3. Зависимость числа ДС от мощности накачки за время полного обхода резонатора.

состоянии [14] между непрерывным режимом и режимом синхронизации мод, когда значение P_p лежит между 43.7 и 56.2 мВт.

В эксперименте при точной подстройке двух КП и $P_p = 141$ мВт может наблюдаться осциллирующее состояние с пятью ДС (рис.4). Положение главного ДС является неизменным, но остальные четыре суб-ДС в пакете непрерывно осциллируют. Их относительные положения и ти-

пичные состояния приведены на рис.4.а. Движения суб-ДС не являются чисто случайными в отличие от предыдущих наблюдений [7, 8]. Можно определить три типичных состояния. В первом четыре суб-ДС находятся в квазисвязанном состоянии, в котором разделения между ними почти фиксированы и одинаковы. Они медленно удаляются от основного ДС как целое, однако их приближение к основному ДС характеризуется сильным взаимодействием и более высокой скоростью. Расстояния между четырьмя суб-ДС оказываются меньше пятикратной ширины импульса.

Квазисвязанное состояние суб-ДС является результатом прямого взаимодействия солитонов [8]. Лазер в основном работает в этом состоянии, однако оно неустойчиво и легко разрушается из-за неизбежных возмущений окружения. Затем, без изменения параметров резонатора, происходит спонтанный переход во второе и третье состояния. Во втором состоянии большинство явлений остаются теми же, что и в первом, за исключением того, что расстояния между суб-ДС перестают быть одинаковыми. В этом состоянии разделение трех суб-ДС по-прежнему фиксировано и однородно, но еще один суб-ДС находится далеко от них. В третьем состоянии четыре суб-ДС с непрерывно меняющимися разделениями осциллируют около основного ДС в более сложном режиме, который, вероятно, обусловлен существованием опосредованного

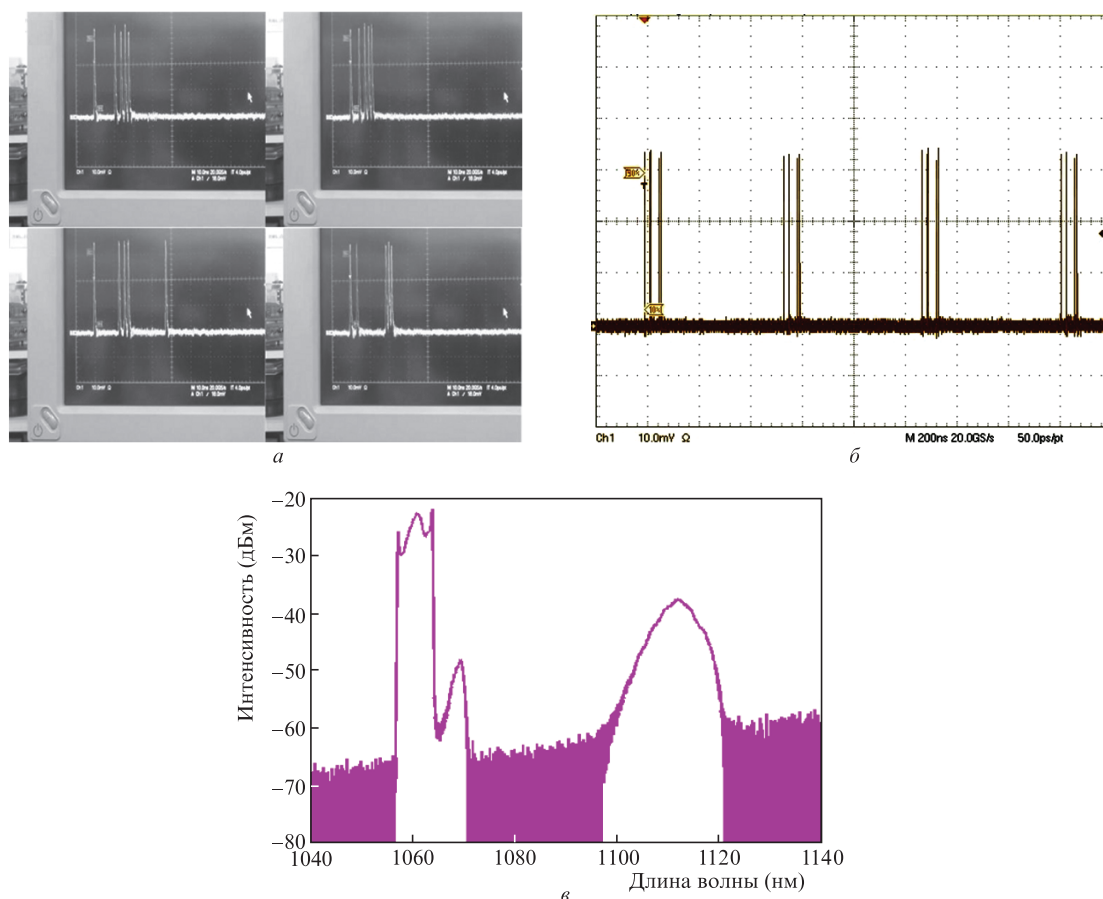


Рис.4. Характеристики осциллирующего состояния пяти ДС в пакете импульсов: типичное состояние пяти ДС (а), осциллограмма цуга импульсов (б) и спектр излучения (в).

через дисперсионные волны дальнедействующего солитонного взаимодействия [8]. Развернутое изображение пакета импульсов с пятью ДС на цифровом осциллографе приведено на рис.4,б, из которого видно, что пакеты импульсов циркулируют в резонаторе с фундаментальной частотой следования 1.86 МГц. На рис.4,в показан спектр с крутыми краями и стоксовым излучением первого порядка. В этом состоянии ВКР может также быть ответственным за осциллирующее состояние ДС за счет передачи энергии между рамановскими импульсами и ДС.

Следует отметить, что при высокой мощности накачки ($P_p = 334$ мВт) и подстройке обоих КП может быть получено состояние одиночного импульса с синхронизованными модами (рис.5). Измеренная длительность импульса составляет 292 пс, а частота следования – около 1.86 МГц. Реальная ширина импульса может быть короче 292 пс из-за ограниченности полосы пропускания осциллографа. Амплитуда импульса (рис.5,б) неустойчива, а спектр излучения (рис.5,в) гладкий и широкий, что указывает на возможность работы лазера в режиме генерации шумоподобных импульсов [22, 23]. В этом состоянии потери в резонаторе сильно увеличиваются, и средняя выходная мощность составляет всего 8.4 мВт (против 62.1 мВт в связанном состоянии множественных ДС при том же уровне мощности накачки). Расчетные энергия и пиковая мощность выходного импульса составляют 4.5 нДж и 13 Вт соответственно. Поскольку пиковая мощность уменьшается, нелинейные эффекты в резонаторе становятся недостаточно сильными для того, чтобы привести к разру-

шению импульса. Излучение лазера, работающего в этом режиме, может быть усилено и использовано в качестве накачки для генерации суперконтинуума [24, 25].

4. Заключение

В работе продемонстрирован лазер на легированном Yb волокне с пассивной синхронизацией мод и различными рабочими состояниями при использовании НВП. Увеличение мощности накачки без изменения параметров резонатора приводит к установлению связанного состояния множественных ДС, максимальное число ДС в одном пакете импульсов составляет 11. Посредством подстройки двух КП при мощности накачки 141 мВт исследовано осциллирующее состояние пяти ДС. Их осцилляции не являются чисто случайными, три типичных состояния суб-ДС обобщены и проиллюстрированы. Также показали, что при высоком уровне мощности накачки и тонкой подстройке КП для увеличения потерь в резонаторе может быть реализовано состояние одиночного импульса с синхронизацией мод. Широкий спектр излучения говорит о том, что это скорее всего шумоподобные импульсы, которые можно использовать в качестве затравки с последующим усилением для получения суперконтинуума.

Работа выполнена при финансовой поддержке Научно-исследовательского фонда Национального университета оборонных технологий (грант № JC12-07-03) и Программы научных исследований Департамента образования провинции Hunan (грант № YB2013B003).

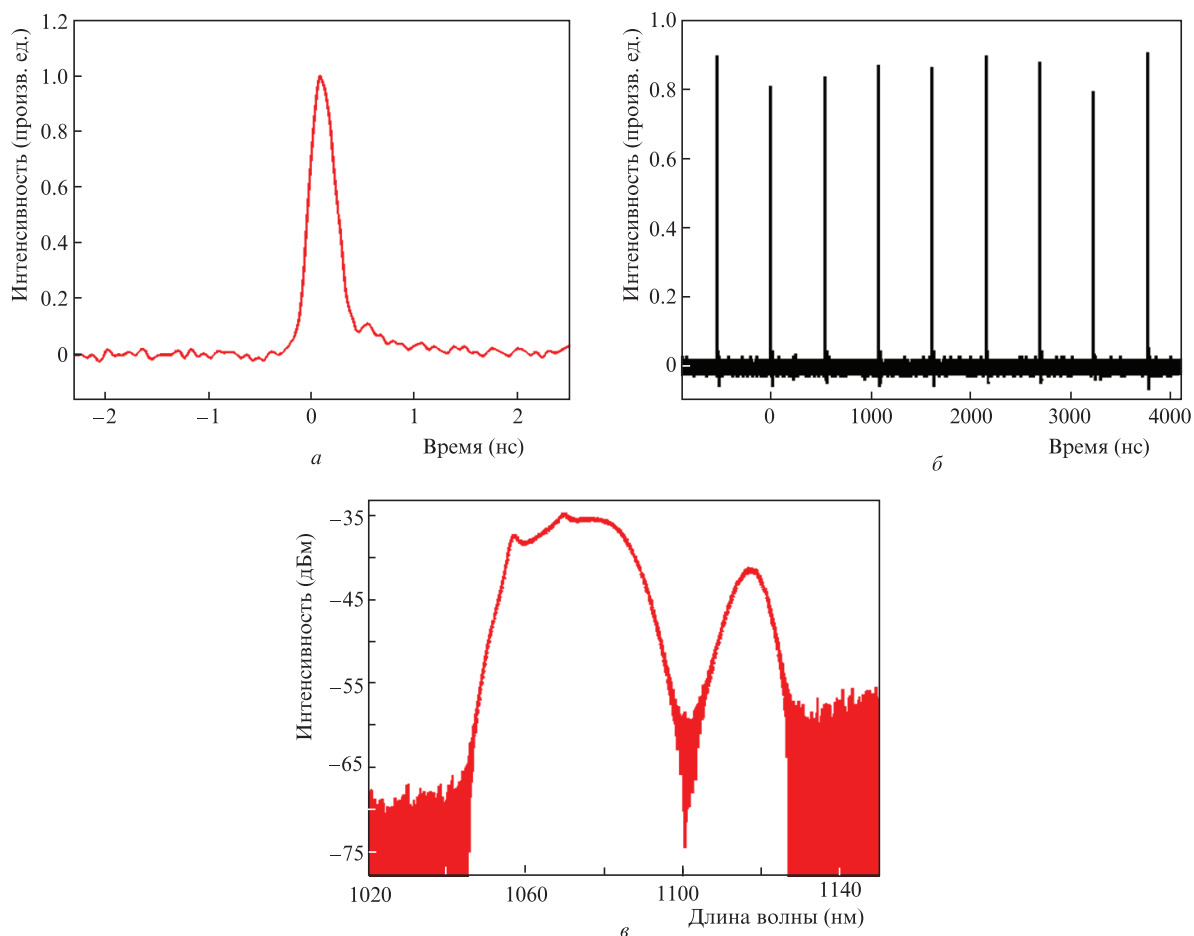


Рис.5. Характеристики состояния одиночного импульса с синхронизованными модами при мощности накачки 334 мВт: форма импульса (а), цуг импульсов (б) и спектр (в).

1. Aguergaray C., Runge A., Erkintalo M., Broderick N.G.R. *Opt. Lett.*, **38**, 2644 (2013).
2. Bednyakova A.E., Babin S.A., Kharenko D.S., Podivilov E.V., Fedoruk M.P., et al. *Opt. Express*, **21**, 20556 (2013).
3. Kharenko D.S., Podivilov E.V., Apolonski A.A., Babin S.A. *Opt. Lett.*, **37**, 4104 (2012).
4. Fermann M.E., Hartl I. *Nature Photon.*, **7**, 868 (2013).
5. Smirnov S.V., Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Turitsyn S.K. *Laser Systems for Applications*, 39 (2011).
6. Wang Y., Martinez A., Yamashita S. *CLEO'2013* (OSA, San Jose, California, 2013, pp W1M-W7M).
7. Song Y.F., Li L., Zhang H., Shen D.Y., Tang D.Y., Loh K.P. *Opt. Express*, **21**, 10010 (2013).
8. Tang D.Y., Zhao B., et al. *Phys. Rev. E*, **72**, 16616 (2005).
9. Wei-Qing G., Huan Z., Li-Xin X., An-Ting W., Hai M., Qi A., Hu-Cheng H., Yun-Cai W. *Chin. Phys. Lett.*, **24**, 1267 (2007).
10. Yun L., Han D. *Opt. Commun.*, **313**, 70 (2014).
11. Zhao L.M., Tang D.Y., Cheng T.H., Tam H.Y., Lu C. *Opt. Lett.*, **32**, 1581 (2007).
12. Liu X., Wang H., Wang Y., Zhao W., Zhang W., Tan X., Yang Z., Shen D., Li C., et al. *Laser Phys. Lett.*, **10**, 95103 (2013).
13. Tang D.Y., Zhao L.M., Zhao B., Liu A.Q. *Phys. Rev. A*, **72**, 43816 (2005).
14. Komarov A., Leblond H., Sanchez F. *Phys. Rev. A*, **71**, 53809 (2005).
15. Liu X. *Phys. Rev. A*, **81**, 23811 (2010).
16. Abdelalim M.A., Logvin Y., Khalil D.A., Anis H. *Opt. Express*, **17**, 13128 (2009).
17. Guang-Zhen Z., Xiao-Sheng X., Jia-Wei M., Chang-Xi Y. *Chin. Phys. Lett.*, **29**, 34207 (2012).
18. Cabasse A., Martel G., Oudar J.L. *Opt. Express*, **17**, 9537 (2009).
19. Chang W., Ankiewicz A., Soto-Crespo J.M., Akhmediev N. *Phys. Rev. A*, **78**, 23830 (2008).
20. Zhao L., Tang D., Wu X., Zhang H. *Opt. Lett.*, **35**, 2756 (2010).
21. Haboucha A., Komarov A., Leblond H., Sanchez F., Martel G. *Opt. Fiber Technol.*, **14**, 262 (2008).
22. Zhao L.M., Tang D.Y., Wu J., Fu X.Q., Wen S.C. *Opt. Express*, **15**, 2145 (2007).
23. Zaytsev A.K., Lin C.H., You Y.J., Tsai F.H., Wang C.L., Pan C.L. *Laser Phys. Lett.*, **10**, 45104 (2013).
24. Lin S., Hwang S., Liu J. *Opt. Express*, **22**, 4152 (2014).
25. Dou L., Gao Y., Xu A. *Nano-Optoelectronics Workshop, 2007. i-NOW'07*. International, 2013.