

Векторные солитоны с однородным поляризационным состоянием, получаемые за счет поляризационной фильтрации в волоконном лазере

Вэй-Ченг Чен, Гуо-Джи Чен, Динг-Ан Хан, Джиа-Нинг Кси

Для достижения генерации векторного солитона с боковыми полосами Келли сконструирован волоконный лазер с SESAM в качестве пассивного синхронизатора мод. Посредством анализа особенностей боковых полос установлено, что поляризационные состояния неоднородны по спектральному профилю всего импульса, от переднего фронта до хвоста. Предлагается использовать эффект поляризационной фильтрации для получения векторного солитона с однородным поляризационным состоянием. Показано, что в процессе поляризационной фильтрации поляризатором, установленным в резонатор, постепенно расширяется спектральная ширина векторных солитонов и уменьшается мощность импульса. Установлено, что при максимальной спектральной ширине и минимальной мощности импульса достигается генерация векторных солитонов с однородным состоянием поляризации.

Ключевые слова: векторный солитон, волоконный лазер, спектральная боковая полоса.

1. Введение

Векторный солитон – это уединенный волновой объект, который может уцелеть в двулучепреломляющей среде и демонстрирует постоянные или периодически эволюционирующие формы в процессе распространения через двулучепреломляющую волоконную систему. Динамика солитона с двумя ортогональными поляризационными компонентами в закрепленных двулучепреломляющих волокнах впервые изучена в [1] посредством численного расчета связанных нелинейных уравнений Шредингера. Такой солитон позже назван другими исследователями векторным солитоном с захватом групповой скорости (GVLS). Поляризационные компоненты GVLS испытывают самозахват во временном представлении в процессе распространения в звене из двулучепреломляющего волокна. Затем в [2] теоретически был предсказан векторный солитон с захватом фазы и предложено определение векторного солитона [2]. Первое экспериментальное наблюдение векторного солитона с захватом поляризации (PLVS) было выполнено в [3], что привлекло большое внимание к векторным солитонам в целом. Более того, в этой работе была дана классификация векторных солитонов GVLS и PLVS. В PLVS как групповые, так и фазовые скорости двух поляризационных компонент синхронизованы [3]. Нужно отметить, что упомянутые векторные солитоны с захватом фазы являются по своей физической сущности PLVS-солитоном. Различные типы векторных солитонов, такие как индуцированные векторные солитоны [4], векторные солитоны высокого порядка с

захватом поляризации [5] и поляризационные optical domain wall векторные солитоны [6], были впоследствии тщательно исследованы. Некоторые исследователи пришли к мнению, что векторный солитон может иметь одно и то же состояние поляризации по всему профилю импульса. Однако это мнение не было проверено в дальнейших экспериментальных и теоретических работах. Другие исследователи полагали, что для некоторых типов векторных солитонов состояние поляризации не однородно по всему импульсу [7–9].

Генерация векторного солитона была реализована в волоконных лазерах с различными механизмами пассивной синхронизации мод. Одним из них является искусственный насыщающийся поглотитель (НП), другим – реальный НП. Типичными способами пассивной синхронизации мод, сконструированными на основе искусственных НП, являются нелинейное вращение поляризации [10–12] и использование нелинейных волоконных петлевых зеркал [13–15]. В случае искусственного НП реализация самостартующей синхронизации мод требует подходящих параметров резонатора, таких как равновесие между нелинейными эффектами, дисперсией, двулучепреломлением, потерями и усилением. Таким образом, порог синхронизации мод векторного солитона невысок и векторный солитон подвержен воздействию случайного двулучепреломления. Однако самостартующая синхронизация мод легко достигается в случае реального НП, используемого в лазерном резонаторе, и состояние синхронизации мод является устойчивым в течение длительного времени. Эффективными и популярными НП являются одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) [16, 17], графен [18, 19] и полупроводниковые зеркала с насыщающимся поглощением (SESAM) [20, 21]. Волоконные лазеры с различными синхронизаторами мод на основе реальных НП рассматривались как перспективные установки для генерации устойчивого векторного солитона.

Существует важная особенность векторных солитонов: как PLVS, так и GVLS имеют спектральные боковые полосы, несмотря на искусственные или реальные

Wei-Cheng Chen, Ding-An Han. Department of Photoelectric Information and Engineering, Foshan University, Foshan 528000, China; e-mail: chenwch@163.com

Guo-Jie Chen, Jia-Ning Xie. School of Science, Foshan University, Foshan 528000, China

Поступила в редакцию 23 июля 2012 г., после доработки 17 октября 2012 г.

НП, включенные в лазерный резонатор. Генерация спектральных боковых полос происходит из-за конструктивной интерференции между векторным солитоном с синхронизованными модами и дисперсионными волнами, что было объяснено в [22]. Спектральные боковые полосы Келли были впервые проанализированы в скалярном случае, однако полученные результаты могут быть распространены на векторный случай, поскольку в волоконно-оптических системах всегда существует двулучепреломляющее окружение. С точки зрения физики наличие спектральных боковых полос Келли означает, что поляризационное состояние векторного солитона меняется по профилю всего импульса – от переднего фронта до хвоста. В настоящей статье мы предлагаем использовать эффект поляризационной фильтрации для генерации векторного солитона с однородным по профилю импульса состоянием поляризации.

2. Экспериментальная установка

Конфигурация волоконного лазера с синхронизацией мод в SESAM (рис.1) похожа на конфигурацию волоконного лазера с векторным солитоном из работы [20]. Резонатор лазера содержит отрезок легированного эрбием волокна (EDF) длиной 1.7 м, элемент связи 90:10, трехпортовый циркулятор, SESAM, поляризационный контроллер (ПК) из трех волновых пластинок, лазерный диод накачки ЛД (длина волны излучения 980 нм) с максимальной мощностью 400 мВт и WDM 980/1550. Коэффициенты поглощения EDF составляют 15.5 дБ/м на 980 нм и 21.5 дБ/м на 1530 нм, числовая апертура равна 0.22. SESAM является пассивным синхронизатором мод в резонаторе лазера. Поглощение и время релаксации SESAM – 30% и 10 пс соответственно. Спектральная ширина векторного солитона связана с временем релаксации SESAM. В нашем случае при использовании SESAM спектральная ширина импульса с синхронизованными модами составляет около 3.4 нм. Циркулятор осуществляет важные функции, например оптического изолятора, обеспечивающего однонаправленную генерацию лазерного излучения, и соединителя используемого SESAM с резонатором. Полная длина резонатора составляет около 6 м. Выходом волоконного лазера является 10%-ный порт элемента связи. Волокна в резонаторе одномодовые. Анализатор оптического спектра (Anritsu MS9710C), осциллограф с фотоэлектрическим детектором и автокоррелятор (FR-103XL) используются для измерения спектрального профиля, временного отклика и временной ширины импульсов солитонов с синхронизованными модами соответственно. Мощность импульса оценивается измерителем мощности.

Чтобы обеспечить различные поляризационные смещения в лазерном резонаторе, осуществляется юстировка

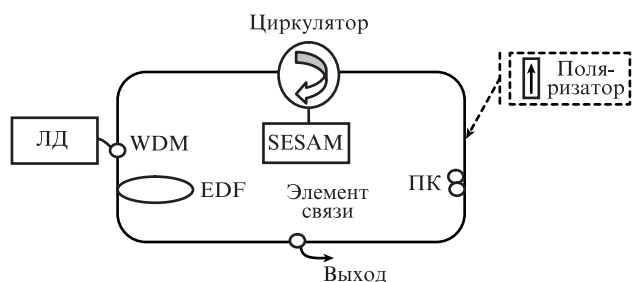


Рис.1. Конфигурация предлагаемого волоконного лазера.

ПК, которая, однако, не оказывает существенного влияния на спектр векторного солитона, т.к. явно поляризационно-зависимые устройства в резонаторе отсутствуют. В процессе настройки ПК спектр солитона очевидных изменений не испытывает. Для поляризационной фильтрации в резонатор включен дополнительный поляризатор, входным и выходным портами которого являются волокно SMF-28 и сохраняющее поляризацию волокно PMF (длина 1 м) соответственно. Ось быстрой поляризации поляризатора заблокирована. Место включения поляризатора показано на рис.1.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

3.1. Векторный солитон в волоконном лазере с SESAM

Самостартующее состояние с синхронизацией мод может быть достигнуто автоматически за счет увеличения мощности накачки. Порог этого состояния составляет около 180 мВт. На рис.2 представлены спектральный и временной профили солитонов с синхронизованными модами при использовании SESAM в качестве синхронизатора мод. Центральная длина волны, ширина спектра по уровню 3 дБ и средняя мощность составляют 1562 нм, 3.4 нм и 3.84 дБм соответственно. Имеются две пары боковых полос Келли, разнесенные по двум краям спектра солитона. Интенсивности пары боковых полос первого порядка гораздо больше, чем у полос второго порядка. Две ортогональные поляризационные компоненты векторного солитона измеряются с помощью поляризационного делителя пучка и оптического анализатора спектра (рис.2,а). Верхняя (сплошная) и нижняя (штриховая) кривые относятся к быстрой и медленной компонентам векторного солитона соответственно. Из рис.2,а видно, что поляризационные компоненты векторного солитона имеют одинаковое распределение спектральных боковых полос. Юстировка ПК вносит в резонатор различные поляризационные смещения, которые приводят к периодическому изменению интенсивности импульсов цуга во времени. Наблюдается векторная природа векторного солитона с синхронизацией мод.

На рис.3 иллюстрируется удвоение периода векторных солитонов в наших экспериментах. Насколько нам известно, удвоение периода может наблюдаться независимо от наличия либо отсутствия поляризатора перед фотоэлектрическим детектором [20,23]. Явление периодического изменения интенсивности связано с присущими волоконному лазеру динамическими особенностями внутррезонаторного двулучепреломления. Таким образом, векторный солитон может сформироваться в волоконном лазере со слабо двулучепреломляющим резонатором при синхронизации мод посредством SESAM. В действительности явление периодического изменения интенсивности векторных солитонов может возникать и для других двулучепреломляющих волоконных лазеров в результате других механизмов синхронизации мод [24,25]. Двулучепреломление является ключевым фактором для появления векторных солитонов, невзирая на конфигурацию резонатора. Следует отметить, что формы импульсов на осциллографе (рис.2,б и рис.3) не являются истинными временными профилями импульсов из-за временных ограничений электрического отклика фотоэлектрического детектора, они демонстрируют лишь импульсный отклик детектора и по-

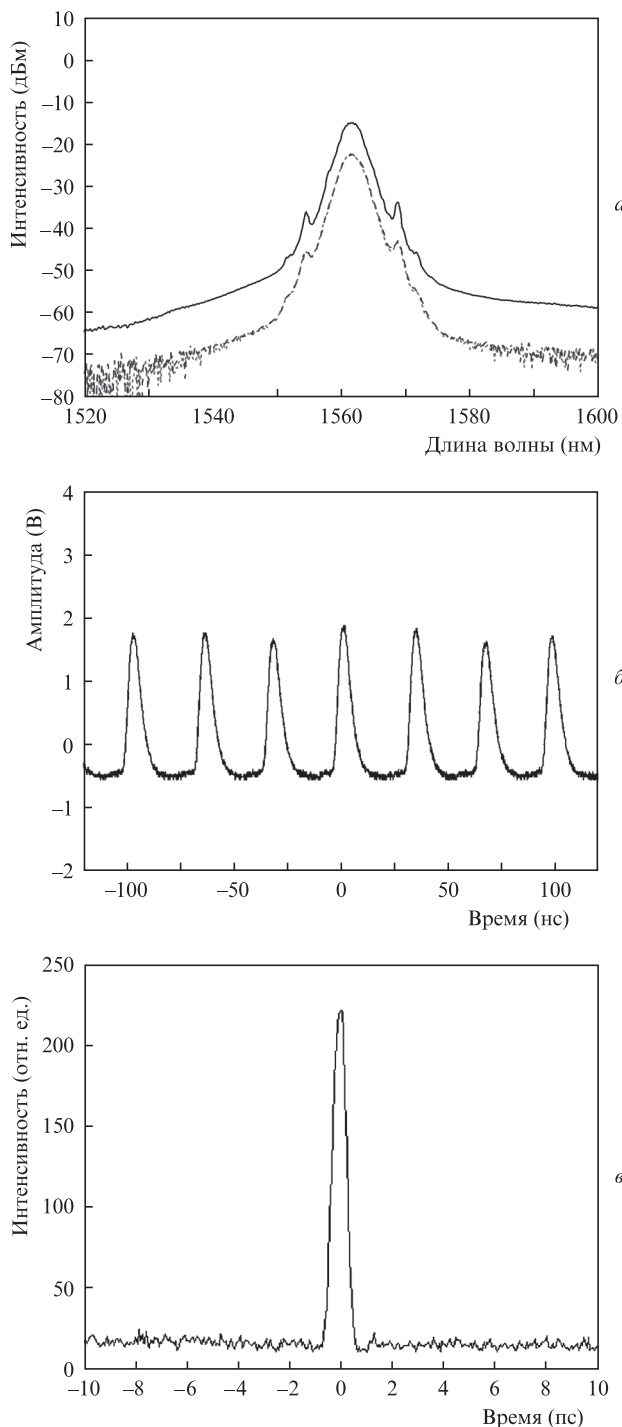


Рис.2. Спектральный (а) и временной (б) профили и автокорреляционная функция (в) векторных солитонов.

казывают, каковы относительные интенсивности импульсов. Действительная длительность импульсов должна быть измерена автокоррелятором. На рис.2,в представлена автокорреляционная функция импульса. Ширина этой функции на полувысоте составляет примерно 1.25 пс, что соответствует ширине импульса 813 фс, если предположить, что форма имеет вид гиперболического секанса. Произведение длительности импульса на ширину полосы составляет 0.34, что близко к соответствующему значению для идеального спектрально-ограниченного солитонного импульса.

Было также обнаружено, что поляризационные смещения, введенные подстройкой ПК, слабо влияют на спектры

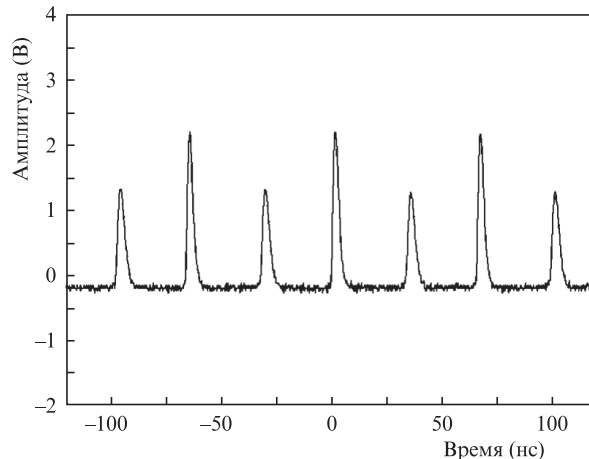


Рис.3. Удвоение периода изменения интенсивности векторных солитонов.

солитонов при синхронизации мод и на боковые полосы Келли. Такое поведение существенно отличается от наблюдавшегося в волоконных лазерах с синхронизацией мод и нелинейным вращением поляризации [26–28]. При юстировке ПК центральная длина волны и ширина спектра по уровню 3 дБ меняются на ± 0.1 нм и ± 0.2 нм соответственно. При этом мощность накачки влияет только на выходную мощность солитонных импульсов и практически не сказывается на центральной длине волны, ширине спектра и конфигурации боковых полос.

3.2. Однородное поляризационное состояние векторного солитона, индуцированное поляризационной фильтрацией

Коммерческий анализатор поляризации не способен последовательно измерять поляризационное состояние по временному профилю всего импульса. Хотя некоторые исследователи считают, что состояние поляризации векторного солитона может быть однородным по профилю импульса, прямых экспериментальных и теоретических доказательств этого нет. Проанализировать изменения состояния поляризации векторных солитонов можно через особенности боковых полос Келли, поскольку они существуют в местах конструктивной интерференции между солитонным импульсом и дисперсионными волнами с тем же состоянием поляризации. Условие конструктивной интерференции, генерирующей боковые полосы Келли, можно записать в следующем виде:

$$|\beta(\omega_0) + \beta_1\delta\omega + k_s - \beta(\omega_0 + \delta\omega)|L = 2n\pi, \tag{1}$$

где $\beta(\omega_0) + \beta_1\delta\omega$, k_s и $\beta(\omega_0 + \delta\omega)$ – константы распространения несущей частоты солитона, центра солитонного импульса и дисперсионных волн соответственно; L – длина резонатора; $n = 0, 1, 2, \dots$. Поскольку поляризационное состояние волн определяется их фазами, возникновение интерференции означает, что у разных волн оно одинаково. Из уравнения (1) следует, что для возникновения интерференции разность фаз солитона и дисперсионных волн за время одного полного прохода резонатора должна быть кратна 2π , т. е. они имеют одинаковое состояние поляризации в областях боковых полос Келли (разность фаз в спектрах солитонов изменяется на 2π либо от центра до боковой полосы первого порядка, либо от боковой поло-

сы одного порядка до боковой полосы другого порядка). Таким образом, спектры векторного солитона с боковыми полосами Келли указывают на неоднородность поляризационных состояний векторных солитонов. Чем больше пар боковых полос наблюдается на краях солитонного спектра, тем большее число раз происходит вращение плоскости поляризации на профиле импульса.

Как отмечалось выше, для поляризационной фильтрации в резонатор волоконного лазера с SESAM включался поляризатор (см. рис.1), устраняющий поляризационные различия между центральной областью спектра и краями солитонных импульсов. Нами было обнаружено, что при включении поляризатора в резонатор лазера выходной со-

литон имеет различную поляризационную динамику (см. также [25]). Поляризационное смещение, введенное ПК, оказывает модуляционное воздействие на векторные солитоны. Благодаря периодической фильтрации внутрирезонаторным поляризатором те компоненты в солитонном импульсе, чье состояние поляризации не согласовано с ориентацией поляризатора, отфильтровываются, в результате чего различия в состояниях поляризации в центре импульса и на его краях постепенно исчезают по мере циркуляции импульса векторного солитона в резонаторе. В эксперименте мы наблюдали, что боковые полосы Келли постепенно исчезают в процессе настройки ПК, а спектры векторных солитонов постепенно уширяются (рис.4). В случае, представленном на рис.4,а, боковые полосы второго порядка ослаблены по сравнению со случаем, приведенным на рис.2. Таким образом, совместная работа поляризатора и ПК приводит к фильтрации частей импульса, поляризационные состояния которых сильно отличаются от такового в центральной части. В результате поляризационной фильтрации ширина спектра векторных солитонов по уровню 3 дБ увеличивается до 4.8 нм, что превышает максимальную ширину спектральной полосы, определяемую временем восстановления SESAM. Центральная длина волн солитона слегка смещается (не более чем на 1 нм). Мощность импульса составляет 3.64 дБм. Однако существование боковых полос Келли означает, что поляризационное состояние по спектральному профилю векторного солитона все еще неоднородно.

Случай, представленный на рис.3,б, соответствует моменту исчезновения боковых полос. Ширина спектра по уровню 3 дБ увеличивается до 10.0 нм. Это показывает, что края спектра импульса полностью отфильтрованы. В то же время уверенности в том, что векторные солитоны в области центра имеют однородное поляризационное состояние, нет. Однако угол вращения плоскости поляризации поперек профиля импульса не превышает 2π .

При тонкой подстройке ПК спектры векторных солитонов испытывают дальнейшее уширение. Случай на рис.4,в соответствует их максимальной спектральной ширине, достигнутой в эксперименте. Спектральная ширина по уровню 3 дБ составляет 13.8 нм, т.е. она в четыре раза больше, чем в случае, показанном на рис.2. Поляризационная фильтрация спектральных краев импульсов эквивалентна вторичной пассивной синхронизации мод.

На рис.5 демонстрируется зависимость ширины спектра солитона от его выходной мощности, полученная при различных настройках ПК, – снижение мощности векторного солитона с 3.84 дБм при ширине спектра 3.4 нм до 2.85 дБм при ширине спектра 13.8 нм. На рис.6 показана автокорреляционная функция векторного солитона для случая рис.4,в. Соответствующая длительность импульса составила около 180 фс (в предположении, что огибающая импульса по форме соответствует гиперболическому секансу). В автокорреляционной функции наблюдаются крылья, происхождение которых связано с самокомпрессией ультракороткого импульса за счет фазовой самомодуляции в выходном волокне между резонатором лазера и автокоррелятором. Произведение длительности этого импульса на его ширину спектра составляет 0.3049, что меньше, чем для спектрально-ограниченного солитонного импульса. Таким образом, случай на рис.4,в соответствует векторному солитону с однородным состоянием поляризации.

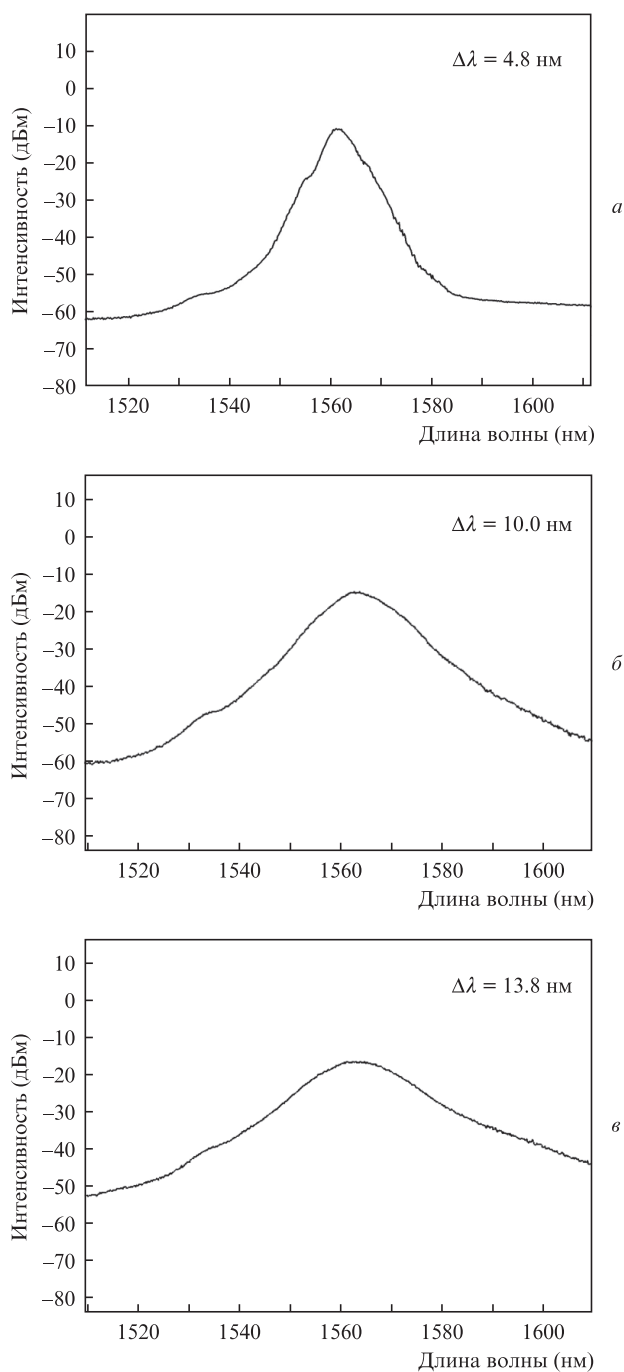


Рис.4. Спектры векторных солитонов с поляризатором в резонаторе в случае подавления боковых полос второго (а) и первого (б) порядков, а также в случае максимальной спектральной ширины солитона (в).

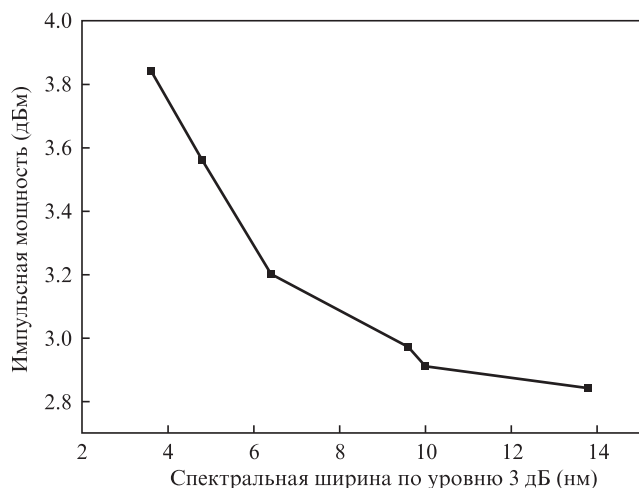


Рис.5. Зависимость мощности векторного солитона от его спектральной ширины по уровню 3 дБ при различных настройках ПК.

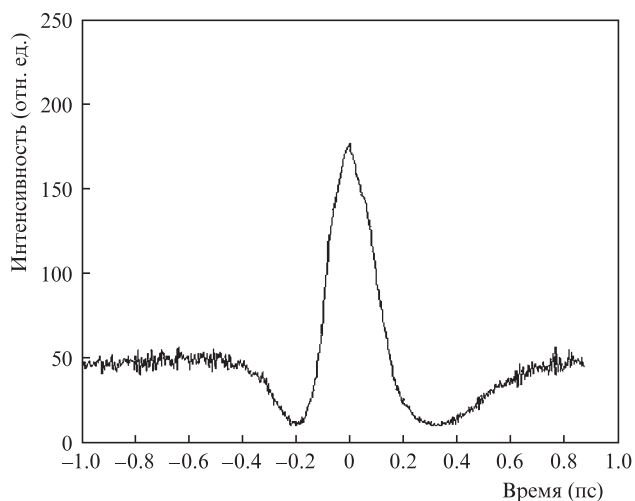


Рис.6. Автокорреляционная функция векторного солитона для случая рис.4,в.

4. Заключение

Создан волоконный кольцевой лазер с SESAM в качестве пассивного синхронизатора мод. Реализована генерация векторных солитонов с боковыми полосами Келли. Спектральная ширина векторных солитонов по уровню 3 дБ составила 3.4 нм, что определяется временем восстановления SESAM. Анализ особенностей боковых полос показал, что поляризационные состояния векторных солитонов неоднородны по всему спектральному профилю импульса.

Для поляризационной фильтрации излучения в резонатор добавлен поляризатор. Юстировка контроллера поляризации приводит к подавлению боковых полос и к

увеличению спектральной ширины векторных солитонов. При использовании в качестве критерия юстировки максимальной спектральной ширины солитонов достигнута генерация векторных солитонов с однородным состоянием поляризации.

Работа поддержана Национальным фондом естественных наук (гранты № 11204037, 61178030 и 61008063), Фондом поддержки выдающихся молодых талантов в высшем образовании провинции Guangdong (грант № LYM08099) и Фондом развития науки и технологий города Foshan (грант № 200701015), Китай.

1. Menyuk C.R. *Opt. Lett.*, **12**, 614 (1987); *J. Opt. Soc. Am. B*, **5**, 392 (1988).
2. Christodoulides D.N., Hasegawa R.I. *Opt. Lett.*, **13**, 53 (1988).
3. Cundiff S.T., Collings B.C., Akhmediev N.N., Soto-Crespo J.M., Bergman K., Knox W.H. *Phys. Rev. Lett.*, **82**, 3988 (1999).
4. Zhang H., Tang D.Y., Zhao L.M., Tam H.Y. *Opt. Lett.*, **33**, 2317 (2008).
5. Tang D.Y., Zhang H., Zhao L.M., Wu X. *Phys. Rev. Lett.*, **101**, 153904 (2008).
6. Pitois S., Millot G., Wabnitz S. *Phys. Rev. Lett.*, **81**, 1409 (1998).
7. Tratik M.V., Sipe J.E. *Phys. Rev. A*, **38**, 2011 (1988).
8. Silberberg Y., Barad Y. *Opt. Lett.*, **20**, 246 (1995).
9. Agrawal G.P. *Nonlinear Fiber Optics* (Singapore: Acad. Press, 2009, p.212).
10. Komarov A., Leblond H., Sanchez F. *Opt. Commun.*, **26**, 162 (2006).
11. Chen W.C., Luo Z.C., Xu W.C., Han D.A., Cao H. *Laser Phys.*, **21**, 1919 (2011).
12. Liu X.S., Zhan L., Hu X., Li H.G., Shen Q.S., Xia Y.X. *Opt. Commun.*, **282**, 2913 (2009).
13. Feng X., Tam H.-Y., Liu H., Wai P.K.A. *Opt. Commun.*, **268**, 278 (2006).
14. Al-Mansoori M.H., Mahdi M.A. *J. Lightwave Technol.*, **27**, 5038 (2009).
15. Amrani F., Salhi M., Leblond H., Haboucha A., Sanchez F. *Opt. Express*, **19**, 13134 (2011).
16. Mou C., Sergeyev S., Rozhin A., Turistyn S. *Opt. Lett.*, **36**, 3831 (2011).
17. Song Y.-W., Yamashita S., Einarsson E., Maruyama S. *Opt. Lett.*, **32**, 1399 (2007).
18. Zhang H., Tang D., Zhao L., Bao Q., Loh K.P. *Opt. Commun.*, **283**, 3334 (2010).
19. Zhao L.M., Tang D.Y., Zhang H., Wu X., Bao Q., Loh K.P. *Opt. Lett.*, **35**, 3622 (2010).
20. Zhao L.M., Tang D.Y., Zhang H., Wu X. *Opt. Express*, **17**, 8103 (2009).
21. Luo Z.-C., Luo A.-P., Xu W.-C. *Appl. Opt.*, **50**, 2831 (2011).
22. Kelly S.M. *J. Electron. Lett.*, **28**, 806 (1992).
23. Zhao L.M., Tang D.Y., Zhang H., Wu X., Lu C., Tam H.Y. *Opt. Commun.*, **281**, 5614 (2008).
24. Luo Z.-C., Xu W.-C., Song C.-X., Luo A.-P., Chen W.-C. *Chin. Phys. B*, **18**, 2328 (2009).
25. Wu J., Tang D.Y., Zhao L.M., Chan C.C. *Phys. Rev. E*, **74**, 046605 (2006).
26. Chen W.C., Xu W.C., Song F., Shen M.C., Han D.A., Chen L.B. *Eur. Phys. J. D*, **48**, 255 (2008).
27. Luo Z.C., Luo A.P., Xu W.C., Song C.X., Gao Y.X., Chen W.C. *Laser Phys. Lett.*, **6**, 582 (2009).
28. Chen W.C., Luo Z.C., Xu W.C. *Laser Phys. Lett.*, **6**, 816 (2009).