

Аддитивная синхронизация мод на основе кольцевого лазера с нелинейным петлевым зеркалом

Х. Дж. Кбаша

Экспериментально продемонстрирована аддитивная импульсная синхронизация мод в кольцевом лазере с нелинейным петлевым зеркалом, обеспечивающим нелинейные фазовые сдвиги импульсов. Интерференция между двумя перекрывающимися импульсами на выходе двух оптически связанных волокон, которые содержат нелинейную среду, вызывающую фазовую модуляцию, приводит к компрессии импульсов и может обеспечивать синхронизацию мод с различной частотой повторения в зависимости от модулирующей частоты (активная синхронизация мод) и нелинейности (пассивная синхронизация мод), возникающими в петлевом зеркале.

Ключевые слова: синхронизация мод, кольцевой лазер, нелинейное петлевое зеркало, нелинейное оптическое волокно.

1. Введение

Волоконные кольцевые лазеры находят широкое применение в оптической связи [1, 2], спектроскопии [3], температурных датчиках [4] и биомедицинской диагностике [5]. Волоконные кольцевые лазеры могут работать в непрерывном или импульсном режиме, линейных или нелинейных схемах, иметь быстрые или медленные частоты повторения, короткие или длинные импульсы и т. д. для разных приложений фотоники [6]. Существуют два основных типа нелинейного кольцевого лазера: нелинейное оптическое петлевое зеркало (НОПЗ) [7] и нелинейное усиливающее петлевое зеркало (НУПЗ) [8, 9]. Оба эти устройства работают на одном и том же общем принципе. В последнее время нелинейные волоконные петлевые зеркала стали использоваться в качестве быстрого переключателя для обработки сигналов и связи. Кроме того, они получили применение в качестве быстрого насыщающегося поглотителя для синхронизации мод лазера, а также для изменения формы оптических импульсов [10].

Синхронизация мод лазера делится на пассивную, активную и аддитивную. Волоконные лазеры с пассивной синхронизацией мод являются практической альтернативой объемным лазерным системам благодаря простоте, компактности, эффективной диссипации тепла и способности генерировать высококачественные импульсы [11]. Продольные моды лазера с пассивной синхронизацией мод фазируются не внешним высокочастотным сигналом, а за счет внутреннего нелинейного процесса, который эти моды связывает.

Активный режим синхронизации мод является одним из ключевых методов генерации сверхкоротких, спектрально-ограниченных оптических импульсов и достигается пу-

тем прямой модуляции светового поля в течение каждого полного обхода резонатора лазера. Этот метод чрезвычайно важен, особенно когда требуется синхронизация между оптическими и электрическими сигналами [12]. Преимуществом активной синхронизации мод является также возможность генерации импульсов с изменяющимися частотами.

Аддитивная, или аддитивно-импульсная, синхронизация мод (АСМ) обладает преимуществами как пассивной, так и активной синхронизации мод. Метод АСМ, иногда называемый синхронизацией мод в связанных резонаторах [12, 13], был одним из ключевых методов в начале эры сверхбыстрой оптики. Он широко используется для генерации сверхкоротких импульсов пико- или фемтосекундной длительности различными лазерными системами, включая Ti:сапфировые и Nd:YAG-лазеры, лазеры на центрах окраски и волоконные эрбиевые лазеры [14]. Общий принцип аддитивно-импульсной синхронизации мод заключается в получении искусственного насыщающегося поглотителя посредством использования нелинейных фазовых сдвигов в одномодовом волокне. Последнее помещается в резонатор, связанный с ним полупрозрачным диэлектрическим зеркалом и имеющий такое же время кругового обхода, что и лазерный резонатор. Импульсы, возвращающиеся из волоконной петли в главный лазерный резонатор, интерферируют с теми импульсами, которые уже находятся в главном резонаторе.

Кольцевой лазер с АСМ, осуществляемой с помощью НОПЗ, содержит устройство, состоящее из волоконной петли и элемента связи. Вместо того, чтобы использовать зеркала для многократного отражения пучка, проходящего через активную среду, применяется замкнутая волоконная петля вокруг активной среды; при этом излучение напрямую выводится из петли через волоконный разветвитель на выходе резонатора [15].

Обычно отражающее петлевое зеркало становится полностью прозрачным, и его нелинейное пропускание может быть использовано для формирования импульсов и коммутации.

Если не учитывать дисперсию, то пропускание НОПЗ задается выражением

* Перевод с англ. В. В. Шувалова.

H.J.Kbashi. School of Physics and Astronomy, University of Southampton, Southampton, SO17 1BJ, UK; Department of Physics, College of Science, University of Baghdad, Baghdad, Iraq; e-mail: H.Kbashi@soton.ac.uk

Поступила в редакцию 16 августа 2011 г., после доработки – 6 декабря 2011 г.

$$|E_2|^2 = |E_{in}|^2 \left(1 - 2\alpha(1 - \alpha) \times \left\{ 1 + \cos \left[(1 - 2\alpha) |E_{in}|^2 2 \frac{\pi n_2 L}{\lambda} \right] \right\} \right), \quad (1)$$

где α – коэффициент расщепления пучка элементом связи; n_2 – нелинейный коэффициент; L – длина петли; λ – рабочая длина волны; E_{in} и E_2 – поля входного и выходного сигналов.

В представленном в настоящей работе лазере с кольцевым резонатором и АСМ, основанном на НОПЗ, мы пренебрегаем групповой дисперсией, поскольку используем лазерное излучение на длине волны 1300 нм. АСМ возникает за счет использования волокна, легированного Ge, в петлевом зеркале в качестве элемента пассивной синхронизации мод и прямой модуляции оптического поля во время каждого кругового обхода для активной синхронизации мод.

2. Эксперимент

Экспериментальная схема макета кольцевого лазера с использованием волоконного петлевого зеркала для аддитивной синхронизации мод показана на рис.1. Основными элементами системы являются: генератор частоты; лазерный источник, работающий на 1300 нм (нулевая дисперсия для типичных световодов, используемых в волоконной связи); 2×2-разветвитель; замкнутая оптическая петля из нелинейного оптического волокна, легированного Ge; оптический детектор и быстродействующий осциллограф.

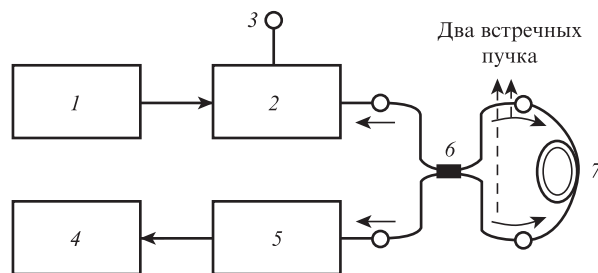


Рис.1. Схема макета НОПЗ для аддитивной синхронизации мод кольцевого лазера: 1 – генератор частоты; 2 – лазерный источник на 1300 нм; 3 – постоянное смещение; 4 – быстродействующий осциллограф; 5 – оптический детектор; 6 – 2×2- разветвитель; 7 – легированное Ge волокно длиной 1 м.

Генератор частоты обеспечивает периодическую последовательность импульсов для получения регулярного цуга импульсов, в то время как нелинейное волокно укорачивает импульс по сравнению с импульсом, который ожидается от генератора.

Для синхронизации мод лазера применяется простое волоконное НОПЗ, которое создается посредством подключения легированного Ge оптического волокна к двум гибким выводам волоконного 2×2-разветвителя. Легированное Ge волокно используется для создания дифференциального фазового сдвига, обусловленного нелинейностью показателя преломления волокна, что приводит к появлению излучения, которое в случае его малой мощности отражается в лазерный резонатор для генерации

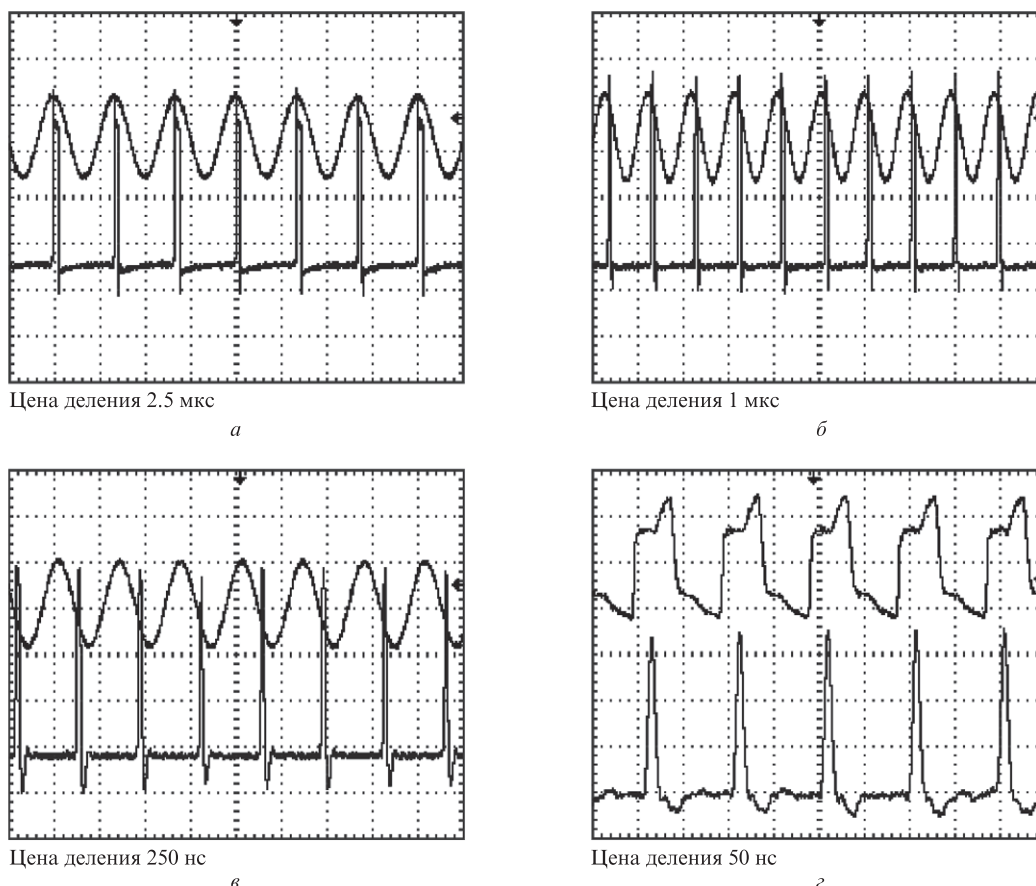


Рис.2. Осциллограммы импульсов при временах полного обхода резонатора 3 (а), 1 (б), 0.3 (в) и 0.1 мкс (г). Верхние треки соответствуют сигналу на входе НОПЗ, нижние – на выходе.

импульсов, отвечающих режиму синхронизации мод. Элемент связи действует как отражатель, когда его коэффициент связи равен 50%, а при других значениях коэффициента связи отражение неполное.

3. Результаты и их обсуждение

Выходное излучение лазера исследовалось с помощью автокоррелятора и быстродействующего цифрового осциллографа. Оптимальные выходные параметры с точки зрения кратчайшей длительности импульса и наивысшей частоты повторения имели место при максимальной частоте модуляции. Приведенные на рис.2 осциллограммы показывают, что период следования импульсов соответствует частоте модуляции и времени полного обхода резонатора. Это подтверждает тот факт, что лазер работал в режиме синхронизации мод с единственным импульсом, циркулирующим внутри резонатора. Показанные осциллограммы соответствуют времени полного обхода резонатора волоконного лазера 3, 1, 0,3 и 0.1 мкс. Вариации частоты повторения импульсов обусловлены изменением частоты и тока модуляции, а также их взаимодействием с нелинейным фазовым сдвигом, возникающим в отрезке волокна, легированного Ge. Пички на импульсах вызваны «звоном» в электронной системе, возбуждаемым реакцией фотодиода на очень короткие оптические импульсы.

Длительность этих пичков (~ 10 нс) значительно превышает измеренные ширины автокорреляционной функции (1.0–1.5 пс для импульсов с синхронизацией мод). При увеличении частоты модуляции длительность импульсов и период их следования сокращаются.

Пропускание излучения через петлевое зеркало зависит от коэффициента расщепления пучка α элементом связи в соответствии с (1). Мы использовали $\alpha = 0.5$ с тем, чтобы получить $|E_2|^2 = |E_{in}|^2$. В этом случае световой пучок будет расщеплен на две равные части, причем пучок приобретет фазовый сдвиг $\pi/2$ при прохождении через нелинейное волокно, если его интенсивность достаточно велика. После прохождения петли пучки интерферируют на выходном волоконном выводе. Пучок, который снова проходит мимо элемента связи, вновь приобретает фазовый сдвиг $\pi/2$, так что, когда пучки объединяются, один имеет нулевой полный фазовый сдвиг, а другой сдвинут на π . Поэтому на выходе сигнал отсутствует, и согласно закону сохранения энергии весь свет отражается обратно на вход.

Вследствие этого, как и ожидалось, расстояние между импульсами сократилось до 100 нс, а их частота повторения выросла до 10 МГц. Отметим, что полоса пропускания импульсов на рис.2,в и г в 10 раз больше, чем импульсов на рис.2,а и б. Это связано с действием петли как периодического фильтра, когда имеет место индуцированное двойное лучепреломление.

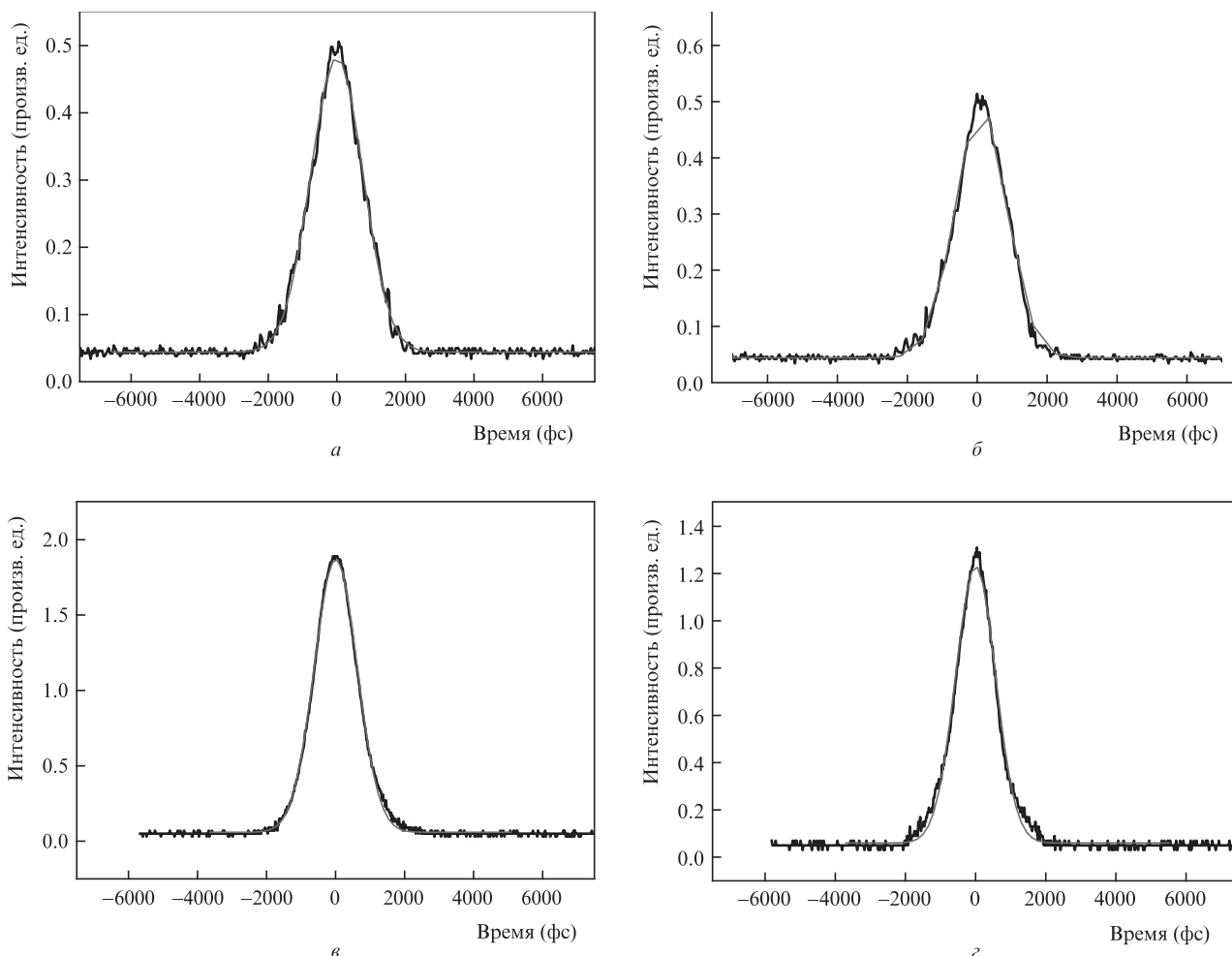


Рис.3. Экспериментально зарегистрированные автокорреляционные функции ряда лазерных импульсов. Тонкая линия – аппроксимация функцией sech^2 . Полные ширины автокорреляций, полученные из аппроксимирующих кривых, равны 1.54 (а), 1.47 (б), 1.2 (в) и 1 пс (г).

Типичные автокорреляционные функции ряда лазерных импульсов, измеренные с помощью InGaAs-фотодиода, показаны на рис.3. Длительность импульсов волоконного лазера составляет 1–1.54 пс в зависимости от взаимодействия между модулирующим сигналом и нелинейностью, возникающей в легированном Ge волокне. Это отображает сочетание активной и пассивной синхронизаций мод.

4. Заключение

Продемонстрирован кольцевой лазер с аддитивно-импульсной синхронизацией мод на основе нелинейного петлевого зеркала, работающий со средней выходной мощностью –8 дБм на длине волны 1300 нм при различных частотах следования и длительностях импульсов. Показано, что оптическое волокно, легированное Ge, является полезным пассивным волоконным элементом для создания лазеров коротких импульсов. Динамика лазера, который включает в себя НОПЗ, чувствительна к частоте следования и длительности импульса.

1. Chen Z., Ma S., Dutta N.K. *Opt. Express*, **17** (3), 1234 (2009).
2. Zhu T., Bao X., Chen L. *J. Lightwave Technol.*, **29** (12), 1802 (2011).
3. Qian J., Su J., Wang X., Zhu B. *Chin. Opt. Lett.*, **5** (4), 229 (2007).
4. Yin Z., Gao L., Liu S., Zhang L., Wu F., Chen L., Chen X. *J. Lightwave Technol.*, **28** (23), 3403 (2010).
5. Choma M., Hsu K., Izatt J. *J. Biomed. Opt.*, **10** (4), 044009 (2005).
6. Gupta K.K., Onodera N., Hyodo M. *Electron. Lett.*, **37** (15), 948 (2001).
7. Doran N.J., Wood D. *Opt. Lett.*, **13** (1), 56 (1988).
8. Fermann M.E., Haberl F., Hofer M., Hochreiter H. *Opt. Lett.*, **15** (13), 752 (1990).
9. Duling N., Chen C., Wai P., Menyuk C. *IEEE J. Quantum Electron.*, **30** (1), 194 (1994).
10. Hudson D.D., Holman K.W., Jones R.J., Cundiff S.T., Ye J., Jones D.J. *Opt. Lett.*, **30** (21), 2948 (2005).
11. Sun Z., Rozhin A.G., Wang F., Scardaci V., Milne W.I., White I.H., Hennrich F., Ferrari A. *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 061114 (2008).
12. Mark J., Liu L.Y., Hall L., Haus H.A., Ippen E.P. *Opt. Lett.*, **14** (1), 48 (1989).
13. Ippen E.P., Haus H.A., Liu L.Y. *J. Opt. Soc. Am. B*, **6** (9), 1736 (1989).
14. Wei D., Lin G.C., Yang C.C. *IEEE J. Quantum Electron.*, **35** (2), 138 (1999).
15. Zarikas V., Vlachos K. *Opt. Commun.*, **263**, 239 (2006).