

# Генерация пикосекундных импульсов в волоконном иттербиевом лазере с нелинейным волоконным зеркалом (эксперимент и математическое моделирование)

А.А.Бородкин, Д.В.Худяков, С.К.Вартапетов

*Исследованы режимы работы импульсного волоконного лазера с нелинейным волоконным зеркалом, выполненного полностью на волокнах с нормальной дисперсией и с поддержкой поляризации, что обеспечивало поляризационную и температурную стабильность выходного излучения. Экспериментально определены пороги инициализации процесса генерации импульсов и стабильной импульсной генерации данного лазера. Спектральный фильтр, установленный в резонаторе, позволял изменять центральную частоту генерации в диапазоне 1.02–1.05 мкм при полной ширине спектра на полувысоте 2 нм. Средняя мощность излучения на выходе из резонатора составила 7 мВт, что соответствует энергии в импульсе 0.8 нДж. Ширина автокорреляционной функции импульса на выходе резонатора равна 50 пс. При внешней компрессии с использованием пары дифракционных решеток достигнута минимальная длительность импульса 1.8 пс. С помощью математического моделирования, основанного на численном решении нелинейного уравнения Шредингера, изучена динамика изменения временных и спектральных параметров импульса волоконного резонатора. Результаты моделирования с большой точностью совпадают с экспериментальными данными.*

**Ключевые слова:** волоконный лазер, сверхкороткие лазерные импульсы, иттербий, нелинейное волоконное зеркало, нелинейное уравнение Шредингера.

## 1. Введение

Область применения волоконных лазеров и скорость их внедрения во многие отрасли науки, техники, медицины увеличиваются с каждым годом. Так, импульсные волоконные лазеры используются в технологиях тонкой обработки материалов, для гравировки и резки металла, изучения нелинейных процессов, в медицине и т. д. Неоспоримыми преимуществами волоконных лазеров является их компактность, простота изготовления, возможность получения больших мощностей, стабильность характеристик. Одним из перспективных направлений развития волоконных лазеров является генерация ультракоротких импульсов. Нормальная дисперсия групповой скорости при распространении короткого импульса в прозрачной среде приводит к временным и спектральным изменениям первоначального импульса – импульс уширяется во временной области, а в спектральной области появляется чирп. Большинство импульсных волоконных лазеров работает на длине волны 1.55 мкм, и проблему дисперсионного расплывания импульса решают с помощью введения участков волокна с аномальной дисперсией, которые компенсируют влияние участков с нормальной дисперсией.

Задача усложняется при переходе на длину волны генерации вблизи 1 мкм. Существует ограниченное количество методов получения аномальной дисперсии для излу-

чения на этой длине волны – это микроструктурированные и многомодовые волокна с аномальной дисперсией в области 1 мкм [1], использование в резонаторе дифракционных решеток [2], а также волоконные чирпованные брэгговские решетки [3]. В случае микроструктурированных волокон возникают большие проблемы их приварки к обычному волокну. Использование дифракционных решеток предполагает прерывание волоконной схемы и оптическую настройку сложной схемы компрессора. Волоконные чирпованные брэгговские решетки в настоящее время слишком дороги и сложны в изготовлении. В любом из этих случаев схема волоконного лазера усложняется, по этой причине в настоящее время широко обсуждаются способы создания импульсных волоконных лазеров со схемой резонатора, где применяются элементы только с нормальной дисперсией групповой скорости.

Для получения импульсного режима генерации в волоконных лазерах используют эффект нелинейного вращения эллипса поляризации в одномодовом волокне [4, 5], характеризующийся как разнообразием режимов генерации импульсов, так и нестабильностью, связанной с дрейфом состояния поляризации вследствие внешнего изменения температуры и внутренних напряжений в одномодовом волокне. Полупроводниковые насыщающиеся зеркала [6] сложны в изготовлении и используются преимущественно в линейных схемах резонатора. Схемы импульсных лазеров с нелинейным волоконным зеркалом (НВЗ) предназначены в основном для работы на длине волны 1.55 мкм на одномодовых пассивных и эрбиевых активных волокнах без поддержки поляризации [7, 8].

Полностью волоконная схема иттербиевого импульсного лазера, генерирующего на длине волны 1.03 мкм, собранная на волокне с поддержкой поляризации, с НВЗ, описана в работе [9] (это схема с двумя активными элементами, один из которых представляет собой волокон-

А.А.Бородкин, Д.В.Худяков, С.К.Вартапетов. Центр физического приборостроения Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 142190 Москва, Троицк;  
email: borodkin\_andrey@mail.ru, dimakh65@yahoo.com, svart@pic.troitsk.ru

Поступила в редакцию 9 июня 2014 г., после доработки – 2 сентября 2014 г.

ную петлю с усиливающим сегментом). Наличие усиливающего элемента в петле, с одной стороны, позволяет в широком диапазоне изменять параметры излучения в петле и тем самым изменять режимы генерации лазера, но, с другой стороны, существенно усложняет конструкцию лазера.

В настоящей статье исследовались режимы работы волоконного импульсного иттербиевого лазера с НВЗ без усиливающего элемента в петле. Все элементы кольцевого волоконного резонатора имели нормальную дисперсию групповой скорости и были выполнены на волокне с поддержкой поляризации для достижения поляризационной и температурной стабильности излучения. Параметры волоконного зеркала как нелинейного элемента варьировались путем изменения длины волокна или соотношения двух встречных излучений в петле.

## 2. Схема импульсного лазера с нелинейным волоконным зеркалом

Схема волоконного лазера с нелинейным зеркалом, состоящая из элементов с нормальной дисперсией групповой скорости, представлена на рис.1. Волоконные сегменты кольцевого резонатора выполнены на волокне с поддержкой поляризации (PM) с диаметром сердцевины 6 мкм и диаметром оболочки 125 мкм. Полная дисперсия кольцевого резонатора равна  $0.6 \text{ ps}^2$ . В качестве активной среды использовалось легированное ионами иттербия PM-волокно с диаметром сердцевины 6 мкм и поглощением 250 дБ/м на длине волны 975 нм. Накачка активного волокна осуществлялась одномодовым лазерным диодом с максимальной средней мощностью 460 мВт на длине волны 976 нм. Излучение диода заводилось в резонатор при помощи волоконного мультиплектора PM WDM 980/1030, выполненного на волокне с поддержкой поляризации. Два выходных канала – через 20%-ный и 10%-ный ответвители – использовались для вывода излучения из резонатора и диагностики излучения в резонаторе соответственно. Линейная поляризация излучения в резонаторе выставлялась вдоль медленной оси PM-волокна при помощи волоконного изолятора-поляризатора. В месте разрыва волокна (участок 6–6) излучение выводилось в воздух и вновь заводилось в волокно с помощью коллиматоров. В воздушной части находился пленочный спектральный фильтр с полной шириной пропускания на полувысоте 10 нм. Изменяя угол наклона спектрального фильтра, мож-

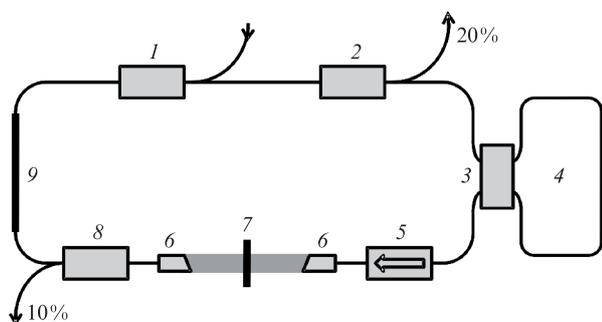


Рис.1. Схема волоконного пикосекундного лазера с НВЗ: 1 – мультиплексор PM WDM 980/1030; 2 – выходной ответвитель 20/80; 3 – ответвитель 10/90; 4 – волоконная петля длиной  $\sim 13.3$  м; 5 – изолятор-поляризатор; 6 – коллиматор; 7 – пленочный спектральный фильтр; 8 – выходной ответвитель 10/90; 9 – активное волокно.

но изменять центральную частоту генерации в диапазоне 1.02–1.05 мкм. В качестве элемента для синхронизации мод в лазере применялось НВЗ, выполненное на кольцевом отрезке PM-волокна длиной 13.3 м. Стабильная генерация импульсов достигалась при использовании ответвителя 3 в петле НВЗ с соотношением 90/10.

Поскольку в схеме резонатора использовались только волоконные элементы с поддержкой поляризации, импульсная генерация была стабильной и не реагировала на изменения температуры и изгибы оптических волокон.

## 3. Эксперимент и обсуждение результатов

Верхний порог стабильной импульсной генерации лазера достигался при мощности накачки вблизи 350 мВт. После инициализации процесса генерации импульсов мощность диода накачки можно было уменьшить до нижнего порога 200 мВт при сохранении режима стабильной генерации импульсов. Частота следования импульсов при выбранной длине резонатора была 8.5 МГц. Если мощность накачки превышала 350 мВт, лазер переходил в режим генерации стохастических импульсов.

Средняя мощность на выходе лазера составляла 7 мВт, что соответствует энергии в импульсе 0.8 нДж. Оптический спектр выходного излучения в режиме импульсной генерации, измеренный с помощью спектрометра Yokogawa AQ6370C с разрешением 0.5 нм, представлен на рис.2. Спектр выходного импульсного излучения имеет резкие краевые фронты, что говорит о работе лазера в режиме нормальной дисперсии. Центральная длина волны и ширина спектра на полувысоте составляли 1048 и 2 нм соответственно. Для измерения длительности импульса использовался метод неколлинеарной генерации второй гармоники в нелинейном кристалле, с помощью которого определялась автокорреляционная функция импульса (рис.3). Полная ширина автокорреляционной функции на полувысоте была 50 пс; ее форма близка к треугольной, что говорит об отклонении формы импульса от гауссовой в сторону прямоугольной.

Выходной импульс лазера сжимался на двух дифракционных решетках с плотностью штрихов  $1200 \text{ mm}^{-1}$ . Расстояние между решетками для оптимальной компрессии было 74 см, что соответствует аномальной дисперсии  $-7.38 \text{ ps}^2$ . Длительность сжатого импульса составила 1.8 пс, что соответствует коэффициенту компрессии  $\sim 30$ . Импульсы до и после компрессии для сравнения представлены на рис.3 и 4. Импульс после компрессии практически не имеет пьедестала, что говорит о линейности чир-

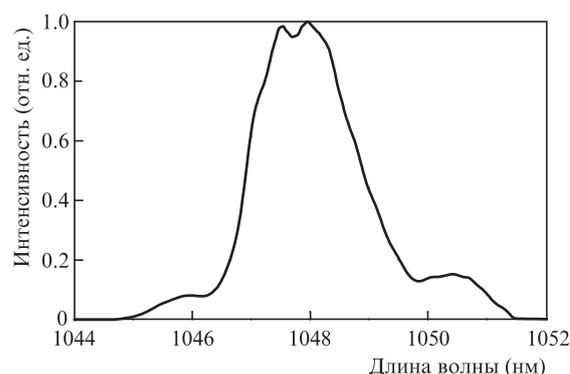


Рис.2. Спектр импульсной генерации пикосекундного волоконного лазера с НВЗ, зарегистрированный с разрешением 0.5 нм.

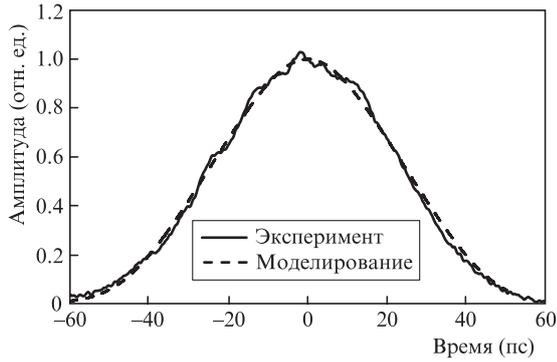


Рис.3. Экспериментальная и расчетная автокорреляционные функции импульсов лазерной генерации волоконного лазера с НВЗ до компрессии.

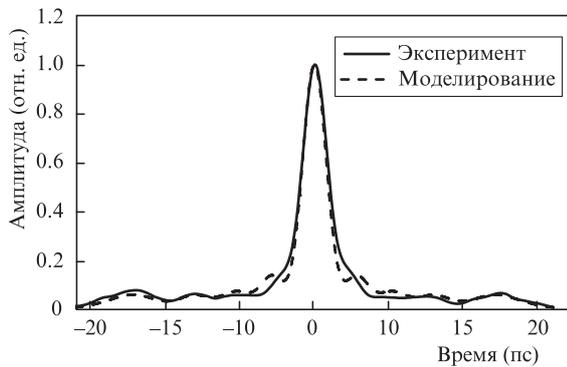


Рис.4. Экспериментальная и расчетная автокорреляционные функции сжатого импульса.

па, а также о незначительном вкладе высших порядков дисперсии и нелинейной фазовой самомодуляции при прохождении импульса по резонатору волоконного лазера.

Для математического моделирования динамики изменения временных и спектральных параметров импульса волоконного лазера с НВЗ использовалось нелинейное уравнение Шредингера

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \frac{g - \alpha}{2} A - i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial \tau^3} + i \gamma |A|^2 A, \quad (1)$$

где  $A(z, \tau)$  – медленно изменяющаяся амплитуда огибающей импульса, которая зависит от координаты распространения в волокне  $z$  и времени  $\tau$ , измеряемого в системе отсчета, движущейся с групповой скоростью импульса;  $g$  – коэффициент усиления в волокне (не равен нулю только в активном волокне);  $\alpha$  – потери в волокне;  $\beta_2$  и  $\beta_3$  – показатели дисперсии групповой скорости второго и третьего порядков соответственно;  $\gamma = n_2 \omega_0 / (c A_{\text{eff}})$  – нелинейный коэффициент фазовой самомодуляции ( $n_2$  – нелинейный показатель преломления,  $\omega_0$  – центральная угловая частота,  $c$  – скорость света в вакууме,  $A_{\text{eff}}$  – эффективная площадь сечения пучка). Мы не включали в расчет эффект насыщения усиления, т.к. внутрирезонаторная мощность излучения была незначительной. Спектр усиления иттербия аппроксимировался функцией Гаусса с полной шириной на полувысоте 40 нм и максимумом усиления на длине волны 1030 нм [12]. Спектральная ширина пропускания светофильтра на полувысоте составляла 10 нм. Отклоняя спектральный фильтр на небольшой угол от

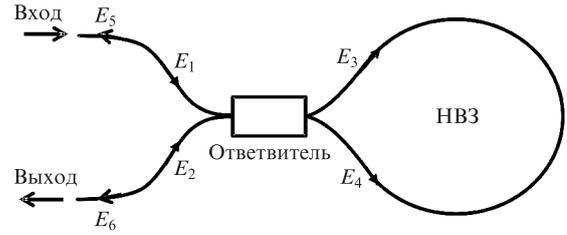


Рис.5. Схема нелинейного волоконного зеркала с отношением ответвителя  $\alpha_0$ .

нормали, можно было изменять центральную длину волны от 1.05 до 1.02 мкм при небольшом уменьшении коэффициента пропускания в коротковолновой области. Уравнение решалось стандартным фурье-методом расщепления по физическим переменным [13].

Вычисления проводились для следующих параметров волокна:  $\beta_2 = 2.5 \times 10^{-26} \text{ с}^2/\text{м}$ ,  $\beta_3 = 2.45 \times 10^{-41} \text{ с}^3/\text{м}$ ,  $\gamma = 4.7 \times 10^{-3} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ . В качестве быстрого модулятора в осцилляторе использовалось НВЗ, состоящее из ответвителя с двумя сваренными между собой выходными каналами, образующими кольцо (рис.5).

Значения полей, характеризующих НВЗ с отношением для ответвителя  $\alpha_0$ , находили из выражений [11]

$$E_3 = \alpha_0^{1/2} E_1 + i(1 - \alpha_0)^{1/2} E_2, \quad (2)$$

$$E_4 = i(1 - \alpha_0)^{1/2} E_1 + \alpha_0^{1/2} E_2. \quad (3)$$

Рассчитывались параметры излучения в петле по двум противоположным путям (поля  $E_3$  и  $E_4$ ), а затем пришедшее обратно к ответвителю излучение складывалось с учетом формул (2) и (3). При моделировании первоначально брали заведомо более длинный импульс, чем получали в эксперименте, с чирпом, равным нулю. Вычисления продолжались до тех пор, пока параметры излучения не становились неизменными в течение некоторого количества круговых проходов по резонатору. Полная нормальная дисперсия групповой скорости в волоконном резонаторе составила  $0.6 \text{ пс}^2$ . Совместное действие усиливающей среды, фазовой самомодуляции, дисперсии, спектрального фильтра и НВЗ через несколько проходов приводило к формированию стабильного выходного импульса (рис.6) и спектра (рис.7), характерного для импульсной генерации при нормальной дисперсии резонатора [14]. Расчетная длительность чирпированного импульса на

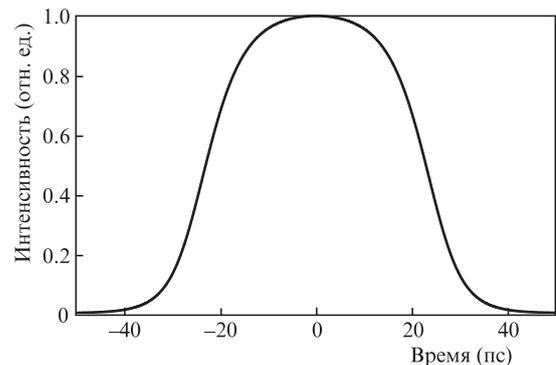


Рис.6. Выходной импульс волоконного лазера с НВЗ, полученный численным моделированием.

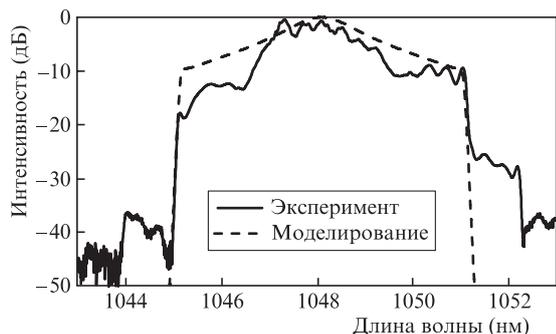


Рис.7. Экспериментальный и расчетный спектры лазерной генерации волоконного лазера с НВЗ.

выходе осциллятора составила 46 пс (рис.6). Автокорреляционная функция импульса, полученная в результате моделирования, хорошо согласуется с измеренной с помощью метода неколлинеарной генерации второй гармоники (рис.3). Форма импульса близка к прямоугольной, что соответствует результатам других работ по волоконным импульсным источникам с НВЗ [10].

Такую форму импульса легко объяснить, используя зависимость коэффициента пропускания волоконной петли НВЗ от пиковой интенсивности проходящего излучения (рис.8), построенной на основе выражения [11]

$$K = \frac{|E_6|^2}{|E_1|^2} = 1 - 2\alpha_0(1 - \alpha_0) \times \left\{ 1 + \cos \left[ (1 - 2\alpha_0) |E_1|^2 \frac{2\pi n_2 L}{\lambda} \right] \right\}, \quad (4)$$

где  $K$  – коэффициент пропускания петли;  $L$  – длина волоконной петли;  $\lambda$  – длина волны излучения. Пиковая интенсивность импульса на входе в волоконную петлю составляла 0.22 ГВт/см<sup>2</sup> (отмечена штриховой линией на рис.8). Фронты импульса находились в области 1, где петля работала как насыщающийся поглотитель, в результате чего фронты становились более резкими. Вершина же импуль-

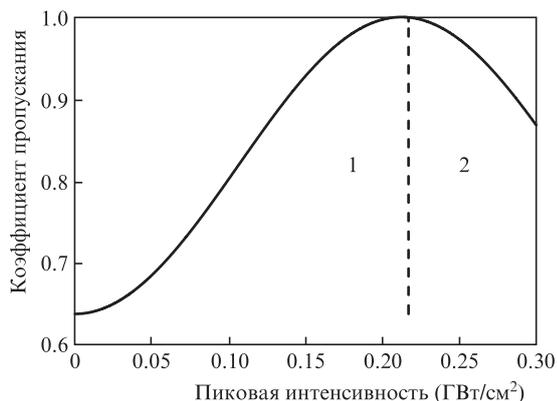


Рис.8. Зависимость коэффициента пропускания волоконной петли НВЗ от пиковой интенсивности входящего в петлю излучения.

са переходила в область 2, где потери возрастали с увеличением пиковой интенсивности, благодаря чему формировалась плоская вершина импульса.

Экспериментальный и расчетный спектры выходного импульсного излучения, представленные на рис.7, совпадают с достаточной степенью точности и имеют одинаковую ширину спектра на полувысоте (2 нм). Минимальная длительность импульса, полученная при моделировании, составила 1.5 пс и достигалась при внешней аномальной дисперсии  $-7.3 \text{ пс}^2$ , что весьма близко к величине  $-7.38 \text{ пс}^2$ , на которую был настроен внешний компрессор для оптимального сжатия импульса. Экспериментальная и расчетная автокорреляционные функции импульса после компрессии показаны на рис.4.

## 4. Заключение

Представлен волоконный иттербиевый пикосекундный лазер с пассивной синхронизацией мод на нелинейном волоконном зеркале. Схема резонатора выполнена на волокне с нормальной дисперсией групповой скорости. Экспериментальная автокорреляционная функция выходного излучения соответствует импульсам прямоугольной формы с длительностью 46 пс. Импульсы имеют линейный чирп и могут быть сжаты внешним компрессором до длительности  $\sim 1.8$  пс. Частота следования импульсов лазера равна 8.5 МГц. Средняя мощность выходного излучения составляет 7 мВт, ширина спектра – 2 нм. Кольцевой резонатор выполнен полностью на волокне с поддержкой поляризации, что обеспечивает меньшую чувствительность лазера к внешним условиям и стабильное состояние поляризации на выходе. Численное моделирование импульсного волоконного лазера показало хорошее совпадение экспериментальных и теоретических выходных характеристик.

- Nicholson J.W., Ramachandran S., Ghalmi S. *Opt. Express*, **15**, 6623 (2007).
- Ilday F.O., Buckley J.R., Lim H., Wise F.W., Clark W.G. *Opt. Lett.*, **28**, 1365 (2003).
- Katz O., Sintov Y. *Opt. Commun.*, **281**, 2874 (2008).
- Kharenko D.S., Podivilov E.V., Apolonski A.A., Babin S.A. *Opt. Lett.*, **37**, 4104 (2012).
- Matsas V.J., Richardson D.J., Newson T.P., Payne D.N. *Opt. Lett.*, **18**, 358 (1993).
- Okhotnikov O., Grudinin A., Pessa M. *New J. Physics*, **6**, 177 (2004).
- Duling I.N., Chen C.-J., Wai P.K.A., Menyuk C.R. *IEEE J. Quantum Electron.*, **30**, 194 (1994).
- Zhao L.M., Tang D.Y., Cheng T.H., Lu C. *Opt. Commun.*, **272**, 431 (2007).
- Aguergaray C., Broderick G. R., Erkintalo M., Chen S. Y., Kruglov V. *Opt. Express*, **20**, 10545 (2012).
- Ozgoran K., Oktem B., Yilmaz S., Ilday F., Eken K. *Opt. Express*, **19**, 17647 (2011).
- Doran N. J., Wood D. *Opt. Lett.*, **13**, 56 (1988).
- Pask H.M., Arman R.J., Hanna D.C., Tropper A.C., Mackechnie C.J., Barber P.R., Dawes J.M. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **1** (1), 2 (1995).
- Fisher R. A., Bischel W. K. *Appl. Phys. Lett.*, **23**, 661 (1973).
- Chong A., Renninger W.H., Wise F.W. *Opt. Lett.*, **32** (16), 2408 (2007).