

# Стабилизация длины волны излучения наносекундного волоконного лазера на основе пассивного нелинейного кольцевого зеркала

С.С.Алешкина, О.И.Медведков, М.И.Беловолов, М.М.Бубнов, М.Е.Лихачев

*Предложен и реализован метод стабилизации длины волны излучения волоконного наносекундного лазера с синхронизацией мод. Продемонстрирована генерация наносекундных импульсов излучения с шириной спектра 50 МГц, соответствующей ширине спектрально-ограниченного импульса.*

**Ключевые слова:** волоконный световод, волоконный лазер, импульсы наносекундной длительности, пассивное нелинейное кольцевое зеркало, спектрально-ограниченный импульс.

## 1. Введение

Лазерные источники, генерирующие импульсы наносекундной длительности, нашли широкое применение в различных областях обработки материалов, а также в системах отслеживания пространственно удаленных объектов (LIDAR). В то же время, несмотря на большое количество предложенных конструкций волоконных наносекундных лазеров, до сих пор остается открытым вопрос достижения их высокой надежности, стабильности и низкой себестоимости. Так, задающие лазеры на основе насыщающихся поглотителей типа SESAM [1, 2] или углеродных нанотрубок [3, 4] в режиме модуляции добротности подвержены деградации структуры, которая может возникать при старте лазерной системы. Критическим фактором является также влияние постоянно изменяющихся внешних условий на поляризационную составляющую рабочей моды волоконных световодов, что ограничивает число практически перспективных схем. В частности, использование в схемах на основе механизма вращения поляризации [5, 6] поляризационно-нечувствительных компонентов делает невозможным создание коммерческого продукта, работающего вне лабораторных условий. В ряде работ для генерации наносекундных импульсов предложено использовать схемы с активной модуляцией добротности [7, 8]. Однако наличие в схеме сложной электроники приводит к существенному увеличению стоимости такого лазера. Кроме того, требование точного совпадения частоты модуляции активного элемента с частотой обхода излучением лазерного резонатора делает проблематичным применение таких источников вне лаборатории, поскольку изменение температуры приводит к изменению длины волоконного резонатора и соответствующей резонансной частоты. Таким образом, поиск простых и, что более важно, стабильных схем генерации импульсов нано- и субнаносекундной длительности на данный

момент является важной и актуальной с практической точки зрения задачей.

Ранее нами была предложена и реализована схема задающего лазера с пассивным нелинейным кольцевым зеркалом (ПНКЗ) для спектральных диапазонов вблизи 1 мкм [9] и 1.55 мкм [10]. Принципиальная схема лазера с ПНКЗ приведена на рис.1 и включает в себя одномодовый объединитель сигнала и накачки (WDM), активный световод, изолятор, волоконный ответвитель X-типа с типичным коэффициентом деления от 5:95 до 30:70, контроллер поляризации (для схемы, не поддерживающей распространение поляризованного света) и ответвитель Y-типа, выводящий часть излучения из лазерной системы. Преимуществом такой конструкции лазера является отсутствие объемных элементов: излучение полностью сосредоточено внутри волоконной системы. Кроме того, схема может быть реализована на основе поляризационно-чувствительного волокна, что способствует росту такого важного параметра, как долговременная стабильность работы лазера, которая была протестирована в течение более 1000 ч непрерывной работы источника. Стоит также отметить простоту реализации волоконной схемы: для ее построения используются коммерчески доступные стандартные одномодовые световоды со ступенчатым профилем показателя преломления. Кроме того, важной особенностью схемы, полная дисперсия которой отрицательна, является возможность синхронизации мод и генерации наносекундных импульсов излучения, шири-

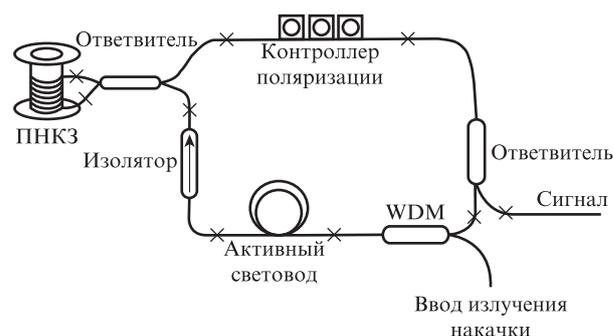


Рис.1. Принципиальная схема задающего источника с ПНКЗ (крестики – точки сварки).

С.С.Алешкина, О.И.Медведков, М.И.Беловолов, М.М.Бубнов, М.Е.Лихачев. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: sv\_alesh@fo.gpi.ru

Поступила в редакцию 30 сентября 2016 г., после доработки – 17 октября 2016 г.

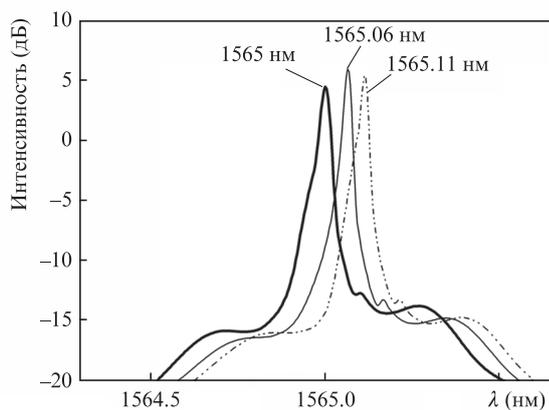
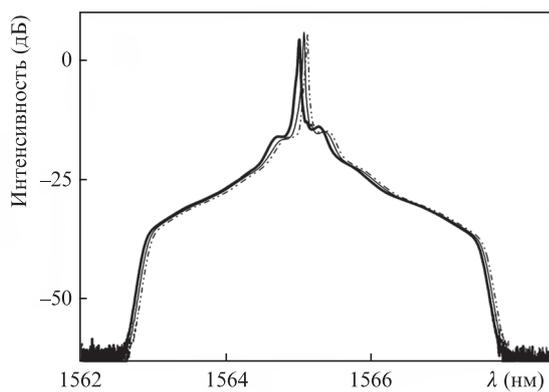


Рис.2. Три последовательно зарегистрированных спектра генерации лазера с ПНКЗ с нормальной полной дисперсией (а) и увеличенное изображение спектральной области центральной длины волны генерации лазера (б).

на спектра которого не превышает разрешения коммерчески доступного спектроанализатора ( $\Delta\lambda \leq 0.01$  нм).

Необходимо отметить, что измерение реальной ширины спектральной линии излучения в предыдущих работах было затруднено временной нестабильностью центральной длины волны генерации лазера (рис.2), что было вызвано отсутствием в схеме спектрально-селективных элементов, позволяющих фиксировать положение линии генерации. Целью настоящей работы являлась стабилизация длины волны излучения волоконного лазера с ПНКЗ и определение спектральной ширины излучения такого лазера.

## 2. Схема лазера на основе ПНКЗ со стабилизацией длины волны

Наиболее очевидным методом стабилизации длины волны генерации лазера является использование узкополосного фильтра. В настоящей работе таким фильтром служила волоконная брэгговская решетка (ВБР). Для этой цели схема лазера была модифицирована (рис.3): ВБР подваривалась к порту 2 коммерческого циркулятора, расположенного между кольцевым зеркалом и ответвителем 10:90, выводящим излучение из лазерной системы. Чтобы подавить нежелательное отражение от торца световода, выходной конец решетки был сколот под углом. Для экспериментов были изготовлены две ВБР с разными величинами коэффициента отражения и разными спектральными ширинами. Первая ВБР имела коэффициент отражения 95% со спектральной шириной по уровню пропу-

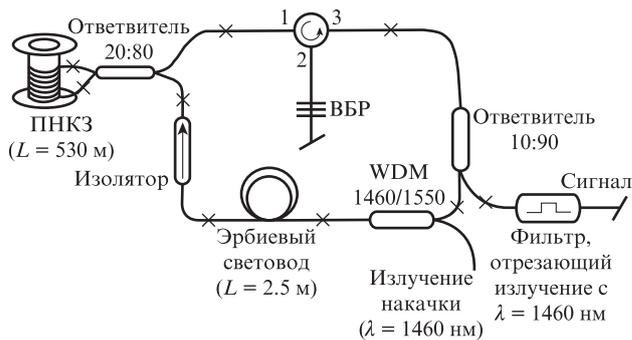


Рис.3. Схема лазера с ПНКЗ со стабилизацией длины волны излучения при помощи ВБР.

скания 3 дБ около 0.5 нм. Спектральная ширина коэффициента отражения второй ВБР была увеличена до 1.7 нм (по уровню 3 дБ), а коэффициент отражения составлял 50%. В последнем случае увеличение спектральной ширины достигалось за счет уменьшения числа штрихов (длины решетки), этим же было обусловлено снижение коэффициента отражения. Центральные длины волн коэффициентов отражения обеих ВБР лежали вблизи 1553 нм. Чтобы устранить влияние поляризационных эффектов на выходные характеристики лазера, все элементы реализованной схемы были изготовлены на основе стандартного волокна, сохраняющего поляризацию. Поскольку в области 1.5 мкм стандартные световоды имеют аномальную дисперсию, то для достижения режима генерации с малой спектральной шириной линии ПНКЗ было изготовлено на основе специально разработанного одномодового световода, сохраняющего поляризацию и имеющего аномальную дисперсию [10]. Измеренная дисперсия световода на рабочей длине волны составила  $23 \text{ пс} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$ , а его длина – 530 м. В качестве активного световода был выбран эрбиевый световод длиной 2.5 м, поглощение в котором на длине волны накачки составляло 11.8 дБ/м.

Измерения спектра осуществлялись с помощью спектроанализатора Yokogawa AQ6370C, а временная развертка с помощью осциллографа Tektronics TDS3054C.

## 3. Результаты экспериментов

Использование ВБР с шириной спектра отражения 0.5 нм не позволило реализовать режим синхронизации мод. При малой мощности накачки лазер в квазинепрерывном режиме излучал на длине волны 1553 нм, а с увеличением мощности накачки начинались пульсации выходной мощности. Отсутствие режима синхронизации мод связано, вероятно, с недостаточным количеством мод, генерируемых в лазерной системе: как видно из рис.2, при достижении стабильной генерации выходной спектр имеет широкое «основание» (по уровню 20 дБ ширина спектра составляет несколько нанометров), которое полностью будет «обрезаться» узкополосной решеткой. Замена узкополосной ВБР на ВБР с шириной спектра отражения 1.7 нм позволило реализовать самозапуск лазера в импульсном режиме, однако частота следования импульсов не соответствовала времени обхода ими резонатора, а генерация имела нестабильный характер. В данном случае можно предположить, что низкая спектральная селективность решетки не позволяла в должной степени стабилизировать длину волны излучения и генерация могла развиваться одновременно на нескольких длинах волн.

Использование одновременно двух ВБР («широкополосной» и «узкополосной»), расположенных одна за другой, позволяет достичь широкого спектра отражения и при этом обеспечить максимум отражения в достаточно узком спектральном диапазоне. Именно в схеме с двумя ВБР удалось реализовать одноимпульсный режим генерации лазера. Как и в работах [9, 10], импульс имел прямоугольную форму (вставка на рис.3,а). Длительности импульсов, их средняя и пиковая мощности увеличивались при увеличении мощности накачки. Зависимости выход-

ной мощности и длительности импульсов от мощности накачки приведены на рис.4,а. Частота следования импульсов составляла 382 кГц и соответствовала времени обхода ими резонатора. Спектр лазерного излучения, зарегистрированный спектроанализатором с разрешением 0.02 нм в спектральном диапазоне 1551–1556 нм, приведен на рис.4,б. Прецизионное измерение ширины спектра, выполненное с помощью сканирующего конфокального интерферометра (диапазон сканирования 1500 МГц, разрешающая способность 15 МГц), показало, что при длительности импульсов 24 нс и выходной мощности 240 мкВт спектр излучения имеет ширину  $\sim 4 \times 10^{-4}$  нм (50 МГц), что соответствует длительности спектрально-ограниченного импульса.

Таким образом, в работе показано, что стабилизация длины волны излучения лазера с ПНКЗ может быть достигнута с помощью системы волоконных брэгговских решеток. Реализация такой схемы позволила установить, что наносекундные импульсы, генерируемые в лазере с ПНКЗ с нормальной дисперсией, являются спектрально-ограниченными.

Авторы благодарят Е.М.Дианова за интерес, проявленный к работе, и оказанную поддержку. Работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-19-01572).

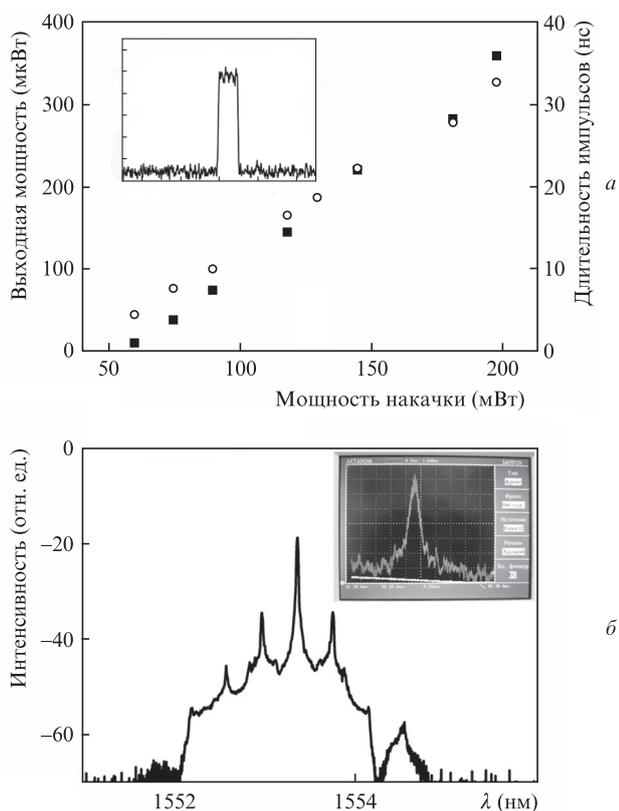


Рис.4. Зависимости средней мощности выходного излучения (■) и длительности импульсов (○) от мощности накачки (на вставке – типичная осциллограмма импульса) (а) и спектр выходного излучения (на вставке – спектр излучения, полученный с помощью сканирующего конфокального интерферометра) (б).

1. Liu J., Wang P. *Proc. CLEO: 2013* (San Jose, CA, 2013, p.1).
2. Jin C., Yang S., Wang X., Chen M., Chen H., Xie S. *Proc. Asia Commun. Photon. Conf. 2015* (SA, 2015, paper AM3B.5).
3. Ismail M.A., Harun S.W., Zulkepely N.R., Nor R.Md, Ahmad F., Ahmad H. *Appl. Opt.*, **51**, 8621 (2012).
4. Kelleher E.J.R., Travers J.C., Sun Z., Rozhin A.G., Ferrari A.C., Popov S.V., Taylor J.R. *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 111108 (2009).
5. Wu X., Tang D.Y., Zhang H., Zhao L.M. *Opt. Express*, **17**, 5580 (2009).
6. Li W., Qiang H., Ming Y., Heping Z. *Opt. Express*, **17**, 10113 (2009).
7. Myrén N., Margulis W. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **17**, 2047 (2005).
8. Villegas I.L., Cuadrado-Laborde C., Abreu-Afonso J., Díez A., Cruz J.L., Martínez-Gómez M.A., Andrés M.V. *Laser Phys. Lett.*, **8**, 227 (2011).
9. Likhachev M.E., Aleshkina S.S., Bubnov M.M. *Laser Phys. Lett.*, **11**, 125104 (2014).
10. Aleshkina S.S., Bubnov M.M., Senatorov A.K., Lipatov D.S., Likhachev M.E. *Laser Phys. Lett.*, **13**, 035104 (2016).