

# Цельноволоконный эрбиевый лазер в режиме самосинхронизации мод с низкой частотой следования и высокой энергией импульсов

В.И.Денисов, Б.Н.Нюшков, В.С.Пивцов

*Впервые реализован режим самосинхронизации мод в цельноволоконном эрбиевом лазере с длиной резонатора более 1 км и сильно положительной (нормальной) внутрирезонаторной дисперсией. Оригинальная линейно-кольцевая схема резонатора с компенсацией поляризационной нестабильности обеспечивает высокую устойчивость режима и хорошую частотную стабильность. Лазер генерирует импульсы с рекордно низкой частотой следования (82.4 кГц) и рекордно высокой энергией (564.3 нДж).*

**Ключевые слова:** волоконный лазер, синхронизация мод, низкая частота следования импульсов, высокая энергия импульсов, нормальная дисперсия, линейно-кольцевой резонатор.

Цельноволоконные лазеры с самосинхронизацией мод являются очень надежными и компактными источниками коротких лазерных импульсов с хорошей частотной стабильностью и высоким качеством пучка. Изначально частота следования импульсов  $f$  таких лазеров составляла от единиц до нескольких десятков мегагерц, а их энергия не превышала нескольких наноджоулей. В то же время для целого ряда задач (например, для лидарных измерений, дальней оптической связи, прецизионной обработки материалов) требуются лазеры с более низкой (субмегагерцевой) частотой следования импульсов и их значительно более высокой энергией. Недавно были реализованы первые цельноволоконные лазеры с пассивной синхронизацией мод с субмегагерцевой частотой следования импульсов [1–5]. В единственном среди них эрбиевом лазере [5] синхронизация мод осуществлялась с помощью полупроводникового насыщающегося зеркала (SESAM), а максимальная энергия импульсов составляла 14 нДж при  $f = 250.7$  кГц.

Целью настоящей работы является разработка и создание на основе коммерческих телекоммуникационных волокон и типовых оптоволоконных элементов стабильного цельноволоконного эрбиевого лазера, работающего в режиме самосинхронизации мод с субмегагерцевой частотой следования, максимально высокой энергией импульсов и высоким качеством пучка.

Значительная часть одномодовых телекоммуникационных волокон, которые могут быть использованы для создания резонатора большой длины с субмегагерцевой межмодовой частотой, имеет аномальную хроматическую дисперсию на длине волны  $\lambda = 1.55$  мкм. Как известно, синхронизация мод в условиях аномальной внутрирезонаторной дисперсии приводит к солитонному ре-

жиму генерации. При этом квантование энергии солитонов накладывает жесткое ограничение на максимальную энергию генерируемых импульсов. При дальнейшем увеличении внутрирезонаторной энергии лазер переходит в многоимпульсный режим [5–7]. В то же время пассивная синхронизация мод в условиях полностью нормальной внутрирезонаторной дисперсии позволяет генерировать так называемые диссипативные солитоны [8], которые не имеют подобного ограничения по максимальной энергии. Недавно режим диссипативных солитонов был реализован в цельноволоконных эрбиевых лазерах [9, 10]. В одном из них [9] была достигнута энергия в импульсе 281.2 нДж при  $f = 1.225$  МГц.

Нами реализован цельноволоконный эрбиевый лазер с сильно положительной внутрирезонаторной дисперсией на основе специального одномодового волокна DCF, используемого в волоконно-оптических линиях связи для компенсации дисперсии обычных одномодовых волокон SMF. Схема лазера изображена на рис.1. Взятый за ос-

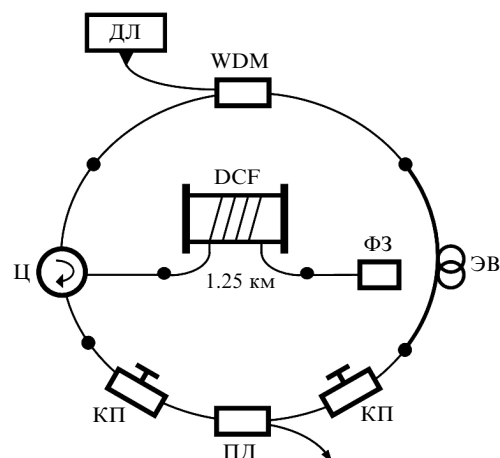


Рис.1. Схема лазера:

ДЛ – диодный лазер накачки; WDM – спектральный мультиплексор; ЭВ – эрбиевое волокно; КП – контроллер поляризации; ПД – поляризационный делитель; Ц – циркулятор; DCF – катушка одномодового волокна длиной 1.25 км с нормальной хроматической дисперсией; ФЗ – фарадеевское зеркало.

В.И.Денисов, Б.Н.Нюшков, В.С.Пивцов. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630092 Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20; e-mail: denisov@laser.nsc.ru

Поступила в редакцию 14 июля 2009 г., после доработки – 9 сентября 2009 г.

нову комбинированный резонатор линейно-кольцевого типа [11] объединяет в себе такие преимущества кольцевых и линейных резонаторов, как простота настройки, режим бегущей волны в активной среде, оптимальный вывод излучения, минимальная межмодовая частота, возможность компенсации поляризационной нестабильности. Линейная часть резонатора содержит модуль компенсации дисперсии N-DCFM-C-10-FA (Sumitomo), который представляет собой катушку одномодового волокна DCF длиной 1.25 км с нормальной хроматической дисперсией ( $\beta_2 \approx 217 \text{ пс}^2$  на  $\lambda = 1.55 \text{ мкм}$ ). Эта часть резонатора оканчивается 100 %-ным фарадеевским зеркалом, при отражении от которого плоскость поляризации излучения поворачивается на  $90^\circ$ , компенсируя тем самым поляризационную нестабильность почти по всей длине резонатора (длина кольцевой части резонатора не превышает 3 м). Обе части резонатора связаны между собой посредством волоконно-оптического циркулятора, который также играет роль оптического диода для кольцевой части, обеспечивая в ней однонаправленный режим генерации.

Усиливающей средой лазера служит расположенное в кольцевой части резонатора высоколегированное эрбиевое волокно длиной 1.8 м (ЛЕККИ) с коэффициентом поглощения  $40 \pm 4 \text{ дБ/м}$  на  $\lambda = 1530 \text{ нм}$ . Данное волокно на длине волны генерации имеет нормальную хроматическую дисперсию. Накачка лазера осуществляется на длине волны 980 нм, максимальная мощность излучения накачки составляет 450 мВт. Самосинхронизация мод в лазере реализуется, как и в классических фемтосекундных волоконных лазерах, за счет нелинейного изменения поляризации [6, 7]. В качестве поляризационного дискриминатора и выходного ответвителя используется волоконный поляризационный делитель, расположенный перед активным волокном в кольцевой части резонатора. Все используемые в резонаторе световоды с аномальной дисперсией (выводы оптоволоконных элементов) имеют длину не более 20 см. Суммарная величина дисперсии, вносимой ими на  $\lambda = 1.55 \text{ мкм}$ , составляет около  $-0.04 \text{ пс}^2$ .

При мощности накачки более 150 мВт происходит самозапуск режима синхронизации мод. В зависимости от настроек контроллеров поляризации может быть инициирован как многоимпульсный режим (гармоническая синхронизация мод), так и режим с одним импульсом на периоде резонатора. Форма и длительность импульсов также зависит от этих настроек. Ниже приведены характеристики наиболее оптимального режима, при котором обеспечивается устойчивая генерация импульсов с фундаментальной частотой следования, максимальной энергией и наименьшей длительностью.

Центральная длина волны генерации находится вблизи 1560 нм, а ширина оптического спектра (на полувысоте) составляет примерно 7 нм (рис.2). Измеренный с помощью осциллографа период следования импульсов составляет  $\sim 12 \text{ мкс}$  (что соответствует времени полного обхода резонатора), а их длительность – около 5 нс (рис.3). Исследование спектров межмодовых биений (рис.4) с помощью радиочастотного анализатора спектра выявило хорошую спектральную чистоту и частотную стабильность. Даже высокие гармоники биений (с частотами  $\sim 10 \text{ МГц}$ ) имеют отношение сигнал/шум не хуже 50 дБ, ширину линии не более 10 Гц (разрешение анализатора) и температурный дрейф частоты не более 60 Гц/мин. Изме-

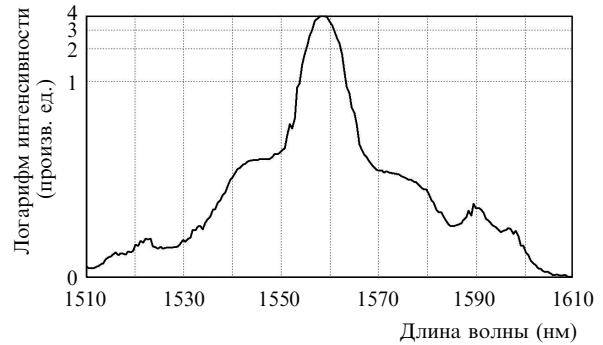


Рис.2. Оптический спектр лазера в логарифмическом масштабе.

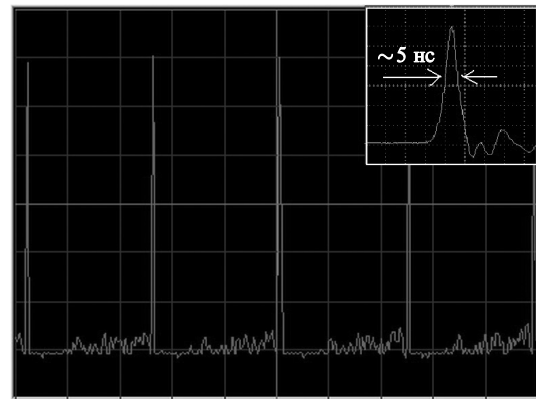


Рис.3. Осциллограмма последовательности генерируемых импульсов (развертка осциллографа 5 мкс/дел). На вставке – один импульс (развертка осциллографа 5 нс/дел).

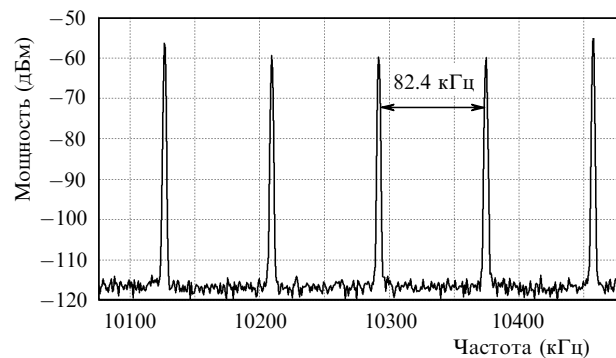


Рис.4. Спектр межмодовых биений лазера (разрешение 1 кГц).

ренная межмодовая частота составляет  $\sim 82.4 \text{ кГц}$ . Средняя выходная мощность лазера при максимальной мощности накачки достигает 46.5 мВт, соответственно максимальная энергия в импульсе равна  $\sim 564.3 \text{ нДж}$ . Данный режим генерации очень устойчив: в лабораторных условиях он поддерживается на протяжении всего рабочего дня, несмотря на отсутствие термостабилизации и виброакустической изоляции лазера.

Таким образом, с использованием коммерческого телекоммуникационного волокна и типовых оптоволоконных элементов реализован цельноволоконный эрбиевый лазер с самосинхронизацией мод с субмегагерцевой частотой следования импульсов. При сильно положительной внутррезонаторной дисперсии низкая частота следования позволила достичь рекордно высокой для таких лазеров энергии импульсов (564.3 нДж), которая ограничивалась мощностью накачки. Оригинальная схема резонатора с компенсацией поляризационной нестабильно-

сти обеспечивает хорошую стабильность характеристик лазера, несмотря на большую длину резонатора и использование волокон, не сохраняющих поляризацию. Использование в резонаторе только одномодовых волокон обеспечивает высокое качество лазерного пучка, соответствующее фундаментальной пространственной моде.

1. Xiaolong Tian et al. *Opt. Lett.*, **34** (9), 1432 (2009).
2. Xiaolong Tian et al. *Opt. Express*, **17** (9), 7222 (2009).
3. Zhang M. et al. *Laser Phys. Lett.*, Publ. Online, DOI: 10.1002/lapl.200910047 (2009).
4. Kobtsev S. et al. *Proc.CLEO/Europe-EQEC 2009* (Munich, Germany, 2009, CJ8.4).
5. Chen L. et al. *Electron. Lett.*, **45** (14), 731 (2009).
6. Nelson L.E. et al. *Appl. Phys. B*, **65**, 277 (1997).
7. Таусенев А.В., Крюков П.Г. *Квантовая электроника*, **34** (2), 106 (2004).
8. Frank W. Wise et al. *Laser & Photon. Rev.*, **2** (1–2), 58 (2008).
9. Wu X. et al. *Opt. Express*, **17** (7), 5580 (2009).
10. Xueming Liu. *Opt. Express*, **17** (12), 9549 (2009).
11. Денисов и др. *Квантовая электроника*, **38** (9), 801 (2008).