

# Генерация суперконтинуума в диапазоне 1.6–2.4 мкм с использованием стандартных оптических волокон

В.А.Камынин, А.С.Курков, В.Б.Цветков

*Экспериментально продемонстрирована возможность использования стандартных оптических волокон для эффективного преобразования импульсного излучения наносекундной длительности на длине волны 1.59 мкм в суперконтинуум в диапазоне 1.6–2.4 мкм. Максимальная эффективность преобразования в спектральную область свыше 2 мкм достигнута в многомодовом градиентном волокне и составила 38% при спектральной плотности средней мощности в диапазоне 2–2.35 мкм около 1 мВт/нм и пиковой мощности около 10 Вт/нм. Для всех исследованных волокон практическая длинноволновая граница генерации составила 2.35 мкм.*

**Ключевые слова:** эрбиевый волоконный лазер, суперконтинуум, многомодовое градиентное волокно.

## 1. Введение

Генерации суперконтинуума в оптических волокнах посвящено большое число оригинальных работ и несколько обзоров [1, 2]. Такой интерес вызван широким применением широкополосного излучения в самых различных областях. Следует отметить, что основные усилия в этой области направлены на получение широкополосной генерации в видимом и ближнем ИК диапазонах. В то же время интерес представляет получение широкополосного излучения на длинах волн более 2 мкм. Источники такого излучения могут использоваться в спектроскопии, при анализе атмосферы, в медицине и пр. Как правило, для получения суперконтинуума в этой части спектра применяются специальные волокна. Так, в работе [3] применялось сапфировое волокно, в работе [4] – микроструктурированные волокна на основе оксидного стекла сложного состава. При использовании флюоридного волокна и накачки от фемтосекундного источника с длиной волны  $\lambda = 1.45$  мкм была получена генерация вплоть до 3.8 мкм [5]. В волокне на основе ZBLAN достигнута генерация суперконтинуума вплоть до 4.8 мкм [6]. К недостаткам такого подхода следует отнести плохую совместимость специальных волокон с волокнами на основе кварцевого стекла. Это не позволяет реализовать полностью волоконный компактный генератор суперконтинуума для практических применений. В то же время в работе [7] достигнута генерация суперконтинуума вплоть до 2.4 мкм в кварцевом волокне с накачкой импульсным волоконным лазером. Следует отметить, что в этой работе был продемонстрирован лишь факт генерации суперконтинуума двухмикронного диапазона в многомодовом оптическом волокне. Цель настоящей работы – исследование возможности получения эффективного преобразования излучения на-

качки в области длин волн  $\lambda > 2$  мкм в стандартных кварцевых волокнах разного типа при оптимизации длины волокна.

## 2. Экспериментальная схема и исследуемые образцы

В качестве нелинейной среды для генерации суперконтинуума использовались образцы стандартных телекоммуникационных волокон: одномодовые волокна SM332 и LEAF, а также многомодовое волокно с градиентным профилем показателя преломления J-fiber G-50-125-250. Параметры волокон приведены в табл.1. Для одномодовых волокон данные о диаметре поля моды и хроматической дисперсии приведены на  $\lambda = 1.6$  мкм, соответствующей длине волны возбуждения. Схема измерения дана на рис.1. В качестве задающего генератора использовался эрбиевый волоконный лазер с модуляцией добротности [8]. Активной средой лазера служило волокно, легированное ионами эрбия, с двойной оболочкой и диаметром сердцевинки 20 мкм [9]. Режим модуляции добротности был реализован за счет введения в резонатор лазера насыщающегося поглотителя на основе волокна, легированного ионами Tm. В качестве отражателей использовались волоконные брэгговские решетки (ВБР). Входная решетка записывалась в одномодовом волокне и обеспечивала одномодовый режим генерации. Выходная решетка была записана в отрезке многомодового градиентного волокна, что обеспечивало хорошее его согласование с

Табл.1. Параметры использованных волокон и характеристики суперконтинуума.

Тип волокна	$d$ (мкм)	$\sigma$ (пс·нм <sup>-1</sup> ·км <sup>-1</sup> )	$L$ (м)	$P$ (мВт)	$\eta$ (%)
SM332	11	20	12	480	33.5
LEAF	9.5	7	7	480	29.9
Многомодовое градиентное	(50)	–	20	850	38

Примечания:  $d$  – диаметр поля моды (сердцевинки),  $\sigma$  – дисперсия,  $L$  – длина,  $P$  – средняя мощность суперконтинуума,  $\eta$  – доля мощности в области 2–2.4 мкм.

В.А.Камынин, А.С.Курков, В.Б.Цветков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: kurkov@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 3 июня 2011 г., после доработки – 25 июля 2011 г.

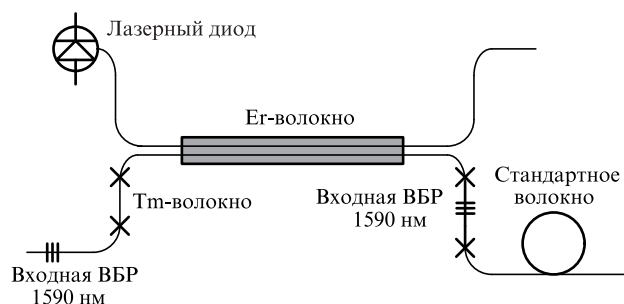


Рис.1. Экспериментальная установка (крестами отмечены места сварки).

активным волокном, имеющим большой диаметр сердцевины [10]. Задающий генератор накачивался полупроводниковым лазером с  $\lambda = 0.98$  мкм и мощностью до 10 Вт. Длина волны излучения волоконного лазера составила 1.59 мкм, максимальная выходная средняя мощность – около 1 Вт при частоте следования импульсов 4.4 кГц, длительность и энергия импульса – соответственно 35 нс и 0.21 мДж, пиковая мощность – 6 кВт. Исследуемые образцы приваривались к выходному отрезку волоконного лазера с ВБР. Таким образом, в настоящей работе реализована чисто волоконная схема.

Следует отметить, что по энергетическим характеристикам использованный эрбиевый лазер выгодно отличается от других типов импульсных волоконных источников. Так, волоконные лазеры с синхронизацией мод и длинным резонатором [11] имеют энергию импульса, не превышающую несколько мкДж, и пиковую мощность порядка 100 Вт. В случае иттербиевого волоконного лазера такие энергетические характеристики позволяют эффективно генерировать суперконтинуум в области 1.1–1.6 мкм [12], однако требуют применения в преобразователе волокон длиной  $\sim 100$  м, что неприемлемо для двухмикронного диапазона, где уровень оптических потерь достигает 1 дБ/м.

Для анализа спектрального состава выходного излучения использовался монохроматор с фотоприемником на основе InGaAs, имеющий рабочий спектральный диапазон 1.2–2.6 мкм и частотный отклик до 15 МГц.

### 3. Экспериментальные результаты

На рис.2 представлен спектр суперконтинуума на выходе отрезка волокна SM-332 длиной 12 м. Уширение спектра у основания импульса вызвано четырехволновым смещением (ЧВС), при большем разрешении (вставка на рис.2) отчетливо видны сопутствующие пики. Преобразование в длинноволновое излучение обусловлено действием вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в области большой аномальной дисперсии. В ходе эксперимента были использованы волокна различной длины.

Длина волокна оптимизировалась по величине максимального преобразования в двухмикронный диапазон. При этом малая длина волокна не позволяет эффективно развиваться ВКР-процессу, а избыточная – приводит к большим оптическим потерям на крае фоновой полосы поглощения. Для оптимизации длины волокна была построена зависимость относительной доли мощности в области  $\lambda > 2$  мкм от длины волокна, представленная на рис.3. Максимальное преобразование достигается для волокна длиной 12 м. Дальнейшее увеличение длины приводит к

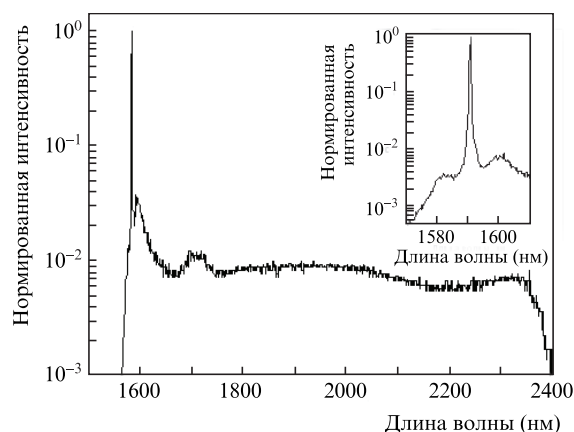


Рис.2. Спектр суперконтинуума для одномодового волокна SM-332.

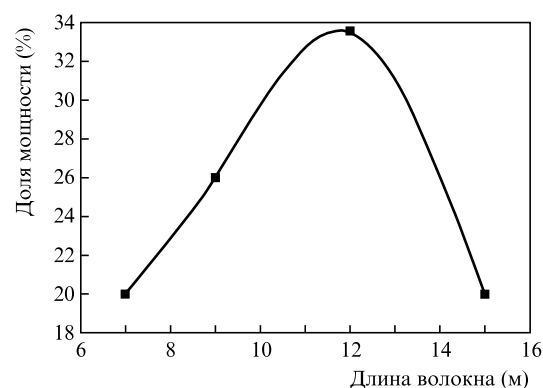


Рис.3. Зависимость доли мощности в диапазоне 2–2.4 мкм от длины волокна SM-332.

уменьшению мощности в области 2–2.4 мкм, т. к. возрастают оптические потери на крае фоновой полосы поглощения. Суммарная средняя мощность на выходе волокна составила 480 мВт. Уменьшение мощности по сравнению с мощностью эрбиевого лазера вызвано потерями на сварку исследуемого волокна с выходным отрезком лазера. Доля мощности области  $\lambda > 2$  мкм равнялась 33.5%.

В волокне типа LEAF, имеющем меньший диаметр поля моды, оптимальная длина составила около 7 м. При этом коэффициент преобразования в диапазон 2–2.4 мкм составил около 30%. Это может быть объяснено лучшим выполнением условий фазового синхронизма для ЧВС, что приводит к сильному уширению спектра в диапазоне 1.6–1.8 мкм и, следовательно, к меньшей перекачке мощности в диапазон 2–2.4 мкм. Спектр суперконтинуума приведен на рис.4. Суммарная мощность на выходе этого волокна была практически такой же, как и в предыдущем случае.

Суперконтинуум с максимальной средней мощностью 850 мВт был получен при использовании для спектрального преобразования многомодового градиентного волокна. Это объясняется отсутствием потерь на сварку данного волокна с выходным отрезком задающего лазера. Благодаря тому, что градиентные волокна поддерживают входное распределение поля, выходное излучение локализовано в области диаметром 20–25 мкм. Поскольку плотность мощности в этом волокне примерно в 2 раза ниже, чем в одномодовых, оптимальная длина волокна для генерации суперконтинуума составила около 20 м. Спектр суперконтинуума для этого случая представлен на рис.5. В спектре наблюдается характерный стоксовый пик на

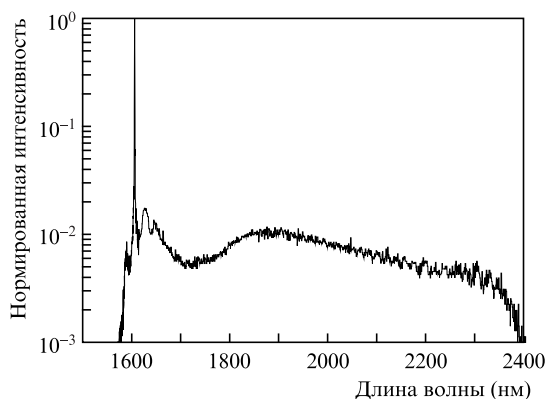


Рис.4. Спектр суперконтинуума для одномодового волокна LEAF.

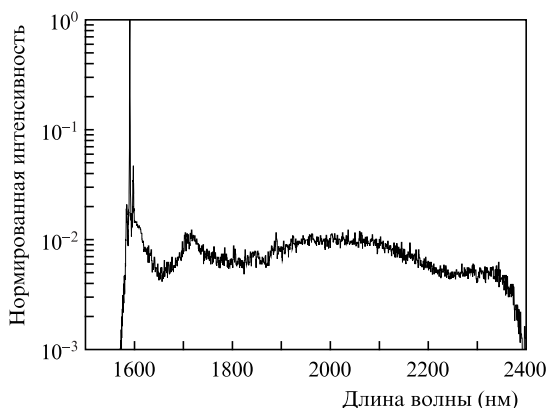


Рис.5. Спектр суперконтинуума для многомодового волокна.

1.7 мкм, и довольно пологий участок от 1.8 до 2.35 мкм. Эффективность преобразования в диапазон 2–2.4 мкм составляет 38% при спектральной плотности средней мощности в этом диапазоне около 1 мВт/нм и пиковой мощности – около 10 Вт/нм.

В табл.1 приведены данные о средней мощности и коэффициенте преобразования в диапазон 2–2.4 мкм для исследованных волокон. Несмотря на некоторые различия, все исследованные волокна демонстрируют резкий спад интенсивности излучения в области длин волн свыше 2.35 мкм. По всей видимости, эту длину волны можно считать практическим пределом для стандартных волокон при импульсной накачке с пиковой мощностью по-

рядка нескольких киловатт. Дальнейшее продвижение в длинноволновую область может быть достигнуто за счет уменьшения длины волокна, т. к. уширение спектра ограничивается резким ростом оптических потерь при увеличении длины волны. Это, в свою очередь, потребует либо увеличения мощности накачки, либо использования волокон с повышенной нелинейностью.

#### 4. Выводы

Таким образом, экспериментально продемонстрирована возможность эффективного преобразования импульсного излучения наносекундной длительности на длине волны 1.59 мкм в суперконтинуум в диапазоне 2–2.4 мкм с использованием стандартных оптических волокон. Показано, что эффективность преобразования существенно зависит от длины волокна. Максимальная эффективность преобразования в средний ИК диапазон составила 38% и была достигнута в многомодовом градиентном волокне. В этом случае спектральная плотность средней мощности в области 2–2.35 мкм составила около 1 мВт/нм, а пиковой мощности – около 10 Вт/нм. Для всех исследованных волокон практическая длинноволновая граница генерации равна 2.35 мкм.

Настоящая работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 10-02-01006-а).

1. Желтиков А.М. *УФН*, **176**, 623 (2006).
2. Dudley J. M., Genty G., Coen S. *Rev. Mod. Phys.*, **78**, 1135 (2006).
3. Kim J.H., Chen M.-K., Yang C.-E., Lee J., Yin S., Ruffin P., Edwards E., Brantley C., Luo C. *Opt. Express*, **16**, 4085 (2008).
4. Buczynski R., Bookey H.T., Pysz D., Stepien R., Kujawa I., McCarthy J.E., Waddie A.J., Kar A.K., Taghizadeh M.R. *Laser Phys. Lett.*, **7**, 666 (2010).
5. Qin G., Yan X., Kito C., Liao M., Chaudhari C., Suzuki T., Ohishi Y. *Opt. Lett.*, **34**, 2015 (2009).
6. Xia C., Kumar M., Kulkarni O.P., Islam M.N., Terry F.L., Jr., Freeman M.J., Poulain M., Mazé G. *Opt. Lett.*, **31**, 2553 (2006).
7. Kurkov A.S., Sadovnikova Ya.E., Sholokhov E.M. *Laser Phys. Lett.*, **8**, 598 (2011).
8. Kurkov A.S., Sadovnikova Ya.E., Marakulin A.V., Sholokhov E.M. *Laser Phys. Lett.*, **7**, 795 (2010).
9. Курков А.С., Парамонов В.М., Яшков М.В., Гончаров С.Е., Залевский И.Д. *Квантовая электроника*, **37**, 343 (2007).
10. Kurkov A.S., Sadovnikova Ya.E., Sholokhov E.M., Medvedkov I.O. *Laser Phys.*, **21**, 287 (2011).
11. Nyushkov B.N., Denisov V.I., Kobtsev S.M., Pivtsov V.S., Kolyada N.A., Ivanenko A.V., Turitsyn S.K. *Laser Phys. Lett.*, **7**, 661 (2010).
12. Kobtsev S.M., Kukarin S.V., Smirnov S.V. *Laser Phys.*, **20**, 375 (2010).