

PACS 42.81.Dp; 42.65.Dr; 42.65.Ky; 42.55.Wd

Генерация суперконтинуума в оптических волокнах, легированных ионами тулия

А.С.Курков, В.А.Камынин, В.Б.Цветков, Я.Э.Садовникова, А.В.Маракулин, Л.А.Минашина

Исследована генерация суперконтинуума в оптических волокнах, легированных ионами тулия, при накачке на длине волны 1.59 мкм. Для волокна с концентрацией активной примеси $2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ обнаружено усиление суперконтинуума в области 1.8–2.0 мкм. Для волокна с концентрацией $2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ усиление наблюдалось также в полосе 2.1–2.45 мкм, что позволяет предположить наличие оптического перехода ${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_5$ в волокне. Заселение уровня ${}^3\text{H}_4$ может объясняться кооперативными эффектами.

Ключевые слова: генерация суперконтинуума, оптическое волокно, ионы тулия.

1. Введение

Генерация суперконтинуума в оптических волокнах вызывает большой интерес исследователей. Основные усилия в этом вопросе были направлены на получение широкополосной генерации в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра. В то же время интерес представляет и получение широкополосного излучения на длинах волн более 2 мкм. Источники такого излучения могут использоваться в спектроскопии, медицине, при анализе атмосферы и пр. Как правило, для получения суперконтинуума в этой части спектра используются специальные волокна. Так, в работе [1] применялось сапфировое волокно, в работе [2] – микроструктурированные волокна на основе оксидного стекла сложного состава. Использование флюоридного волокна с накачкой от фемтосекундного источника на 1.45 мкм позволило получить генерацию на длинах волн вплоть до 3.8 мкм [3]. В волокне на основе ZBLAN была получена генерация суперконтинуума вплоть до 4.8 мкм [4]. Значительно меньшее внимание уделялось генерации суперконтинуума в волокнах на основе кварцевого стекла, использование которых позволяет реализовать полностью волоконный компактный генератор суперконтинуума для практических применений. Так, генерация суперконтинуума на длинах волн вплоть до 2.4 мкм в стандартных кварцевых волокнах с накачкой импульсным волоконным лазером была продемонстрирована в [5, 6], а в [7] получена генерация вплоть до 2.7 мкм в волокне с сердцевиной, легированной оксидом германия с концентрацией около 64 мол.%.

К другому интересному направлению исследований в этой спектральной области относится использование активных волокон и усилителей для генерации суперконтинуума. Так, в [8] была получена генерация в диапазоне 1–1.75 мкм в иттербиевом волоконном усилителе. В работе [9] для получения генерации в диапазоне 2–2.5 мкм использовался гольмиевый усилитель. Цель настоящей работы – исследование генерации суперконтинуума длинноволнового диапазона в оптическом волокне, легированном ионами тулия. При этом для возбуждения активных ионов и последующей генерации использовался один и тот же источник.

2. Экспериментальная схема и исследуемые образцы

Схема эксперимента представлена на рис.1. В качестве задающего генератора использовался волоконный лазер с модуляцией добротности [10]. Активной средой лазера служило волокно, легированное ионами эрбия, с двойной оболочкой и диаметром сердцевины 20 мкм. Лазер накачивался полупроводниковым излучателем на длине волны 0.98 мкм. Режим модуляции добротности осуществлялся путем введения в резонатор лазера насыщающегося поглотителя на основе волокна, легированного ионами Тм с высокой концентрацией. Длина волны излучения лазера составила 1.59 мкм, максимальная средняя мощность – 0.85 Вт, максимальная частота повторения – 4 кГц, длительность импульса – 35 нс. Пиковая мощ-

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

Я.Э.Садовникова. Московский государственный университет приборостроения и информатики, Россия, 107966 Москва, ул. Стромывка, 20

А.В.Маракулин, Л.А.Минашина. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр» – ВНИИТФ, Россия, Челябинская обл., 456770 Снежинск, ул. Васильева, 13

Поступила в редакцию 4 июля 2012 г.

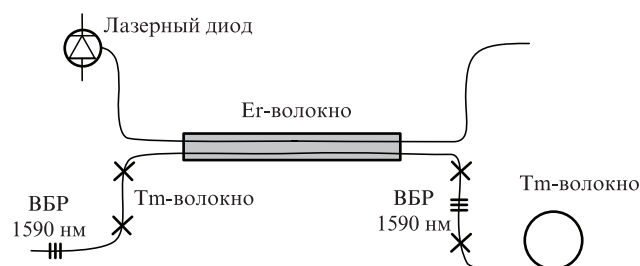


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

ность равна 6 кВт, энергия импульса – 0.21 мДж. Исследуемые образцы активных волокон приваривались к выходной волоконной брэгговской решетке (ВБР).

Для генерации суперконтинуума использовались два образца волокон с сердцевинной на основе алюмосиликатного стекла, легированной ионами тулия. В образце 1 концентрация активной примеси составила около $2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, а в образце 2 – около $2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Состав спектра выходного излучения анализировался монохроматором с фотоприемником на основе InGaAs, имеющим 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 (образец 1) длиной 3 м. Уширение спектра у основания возбуждающего импульса вызвано четырехволновым смещением. Преобразование спектра лазерного излучения в длинноволновое излучение обусловлено совместным действием вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в области большой аномальной дисперсии и усилением на переходе ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ (рис.3). Возбуждение на уровень 3F_4 происходит за счет накачки эрбиевым импульсным лазером. В результате спектр суперконтинуума имеет отчетливый максимум в области 1.95 мкм. Суммарная средняя мощность на выходе активного волокна составила 100 мВт.

Для образца 2 (длина волокна 0.5 м) с повышенной концентрацией ионов тулия наблюдалась качественно иная форма спектра суперконтинуума, представленного на рис.4. На спектре отчетливо видны две области усиления суперконтинуума – первая от 1.7 до 2 мкм, обусловленная переходом ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$, и вторая – от 2.1 до 2.45 мкм. Появление второй области усиления нельзя объяснить нелинейными эффектами, в частности ВКР, т. к. разность длин волн спектральных пиков не соответствует ВКР-сдвигу. Для объяснения этого эффекта следует вновь обратиться к схеме уровней ионов Tm^{3+} (рис.3), из которой видно, что существует оптический переход ${}^3H_4 \rightarrow {}^3H_5$ с длиной волны излучения в области 2.3 мкм. Следует отметить, что данный переход использовался ранее для получения в указанной области лазерной генерации в твердотельных лазерах на основе $\text{Tm}:\text{YLF}$ [11, 12]. Заселение

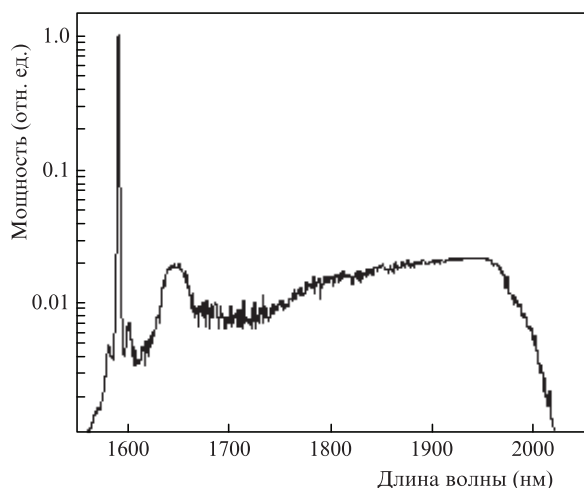


Рис.2. Спектр суперконтинуума в волокне с концентрацией ионов тулия $2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

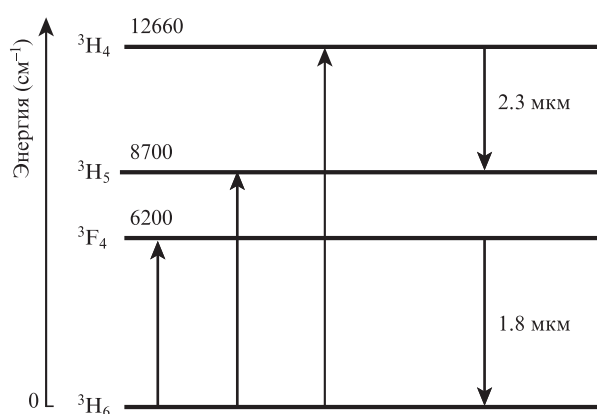


Рис.3. Схема уровней ионов тулия.

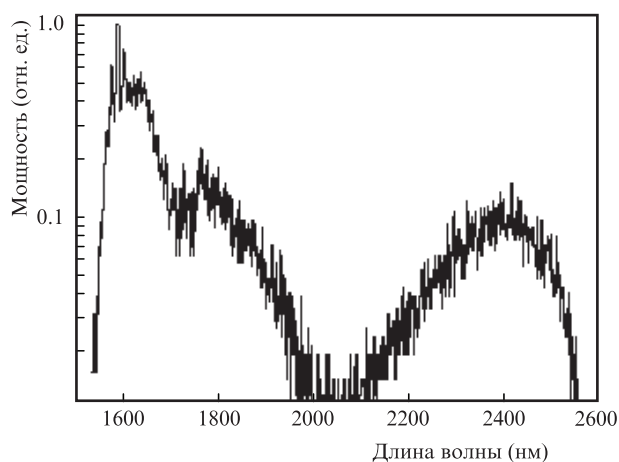


Рис.4. Спектр суперконтинуума в волокне с концентрацией ионов тулия $2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

уровня 3H_4 может происходить за счет передачи энергии в паре ионов при их возбуждении на уровень 3F_4 . Этот кооперативный процесс характерен для волокон с высокой концентрацией активных ионов и достаточно хорошо исследован для волокон, активированных ионами эрбия [13, 14]. В образце 1 с относительно невысокой концентрацией активных ионов в пары объединяется лишь небольшая их доля, поэтому эффективного заселения уровня 3H_4 не происходит, что и объясняет различие в спектрах суперконтинуума, полученных для двух образцов.

4. Заключение

В настоящей работе впервые исследована генерация суперконтинуума в оптических волокнах, легированных ионами тулия. Полученные спектры существенно отличаются от спектров суперконтинуума для обычных или высоконелинейных волокон, поскольку возбуждающее излучение на 1.59 мкм не только вызывает генерацию суперконтинуума, но и накачивает тулиевый усилитель. В волокне с высокой концентрацией ионов тулия помимо ожидаемого усиления в области 1.8 – 2.0 мкм обнаружено усиление в области 2.1–2.45 мкм, что свидетельствует о возможности оптического перехода ${}^3H_4 \rightarrow {}^3H_5$ в волокне. Заселение уровня 3H_4 может объясняться кооперативными процессами возбуждения ионов тулия.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 10-02-01006-а).

1. 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).
2. 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).
3. Qin G., Yan X., Kito C., Liao M., Chaudhari C., Suzuki T., Ohishi Y. *Opt. Lett.*, **34**, 2015 (2009).
4. 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).
5. Kurkov A.S., Sadovnikova Ya.E., Sholokhov E.M. *Laser Phys. Lett.*, **8**, 598 (2011).
6. Камынин В.А., Курков А.С., Цветков В.Б. *Квантовая электроника*, **41**, 986 (2011).
7. Kamynin V.A., Kurkov A.S., Mashinsky V.M. *Laser Phys. Lett.*, **9**, 219 (2012).
8. Pioger P. H., Couderc V., Leproux P., Champert P. A. *Opt. Express*, **15**, 11358 (2007).
9. Kurkov A.S., Kamynin V.A., Sholokhov E.M., Marakulin A.V. *Laser Phys. Lett.*, **8**, 754 (2011).
10. Kurkov A.S., Sadovnikova Ya.E., Marakulin A.V., Sholokhov E.M. *Laser Phys. Lett.*, **7**, 795 (2010).
11. Caird J.I., DeShazer L.G., Nella J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-11**, 874 (1975).
12. De Matos P.S.F., Wetter N.U., Gomes L., Ranieri I.M., Baldochi S.L. *J. Opt. A: Pure and Applied Optics*, **10**, 104009 (2008).
13. Myslinski P., Nguen D., Chrostowski J. *IEEE J. Lightwave Technol.*, **15**, 112 (1997).
14. Плоцкий А.Ю., Курков А.С., Яшков М.Ю., Бубнов М.М., Лихачев М.Е., Сысолятин А.А., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **35**, 559 (2005).