

Локализация света и спектральное уширение фемтосекундных импульсов в волокне с минимально микроструктурированной оболочкой

А.М.Жёлтиков¹, Пинг Жу², В.В.Темнов², Ю.Н.Кондратьев³, С.Н.Багаев⁴, В.С.Шевандин³, К.В.Дукельский³, А.В.Хохлов³, В.Б.Смирнов⁵, А.П.Тарасевич², Д. фон дер Линде²

Создано и исследовано микроструктурированное оптическое волокно, оболочка которого состоит из одного ряда воздушных отверстий, а минимальный диаметр сердцевины составляет 1 мкм. Волноводные моды, поддерживаемые данным волокном, характеризуются высокой степенью локализации светового поля с пространственной симметрией его распределения, соответствующей точечной группе C_{6v} . Большая разность показателей преломления сердцевины и оболочки в созданном волокне обеспечивает высокую степень локализации светового поля в сердцевине волокна. Представлены результаты экспериментального исследования спектрального уширения малоомощных фемтосекундных лазерных импульсов в волокне данного типа.

Ключевые слова: микроструктурированные волокна, нелинейная оптика.

Микроструктурированные волокна [1–3] находят все более широкое применение в нелинейной оптике, оптике сверхкоротких импульсов и оптической метрологии. Уникальные свойства волокон данного типа связаны с возможностью управления волноводной дисперсией путем изменения геометрии оболочки и сердцевины [4], а также с высокой степенью локализации светового поля в сердцевине микроструктурированного волокна вследствие большой разности показателей преломления сердцевины и оболочки [5, 6]. Сочетание этих свойств делает возможным существенное увеличение эффективности целого ряда нелинейно-оптических взаимодействий. Одним из наиболее значительных достижений нелинейной оптики микроструктурированных волокон является возможность генерации суперконтинуума с использованием неусиленных фемтосекундных импульсов с энергией порядка нано- и субнанождоулей [7]. Явление генерации суперконтинуума в микроструктурированных волокнах в последние годы привело к революционным изменениям в оптической метрологии [8–10].

Путем изменения геометрии сердцевины и оболочки микроструктурированного волокна удается создавать волокна, предназначенные для решения различных задач оптической физики [4] и биомедицинских приложений [11, 12]. В частности, волокна с периодическим расположением воздушных отверстий в оболочке образуют

класс фотонно-кристаллических волокон [1]. Нарушение симметрии расположения воздушных отверстий позволяет создавать волокна со значительным двулучепреломлением [13, 14].

В настоящей работе сообщается о создании и исследовании линейных и нелинейных оптических свойств минимально микроструктурированных волокон, оболочка которых состоит из одного ряда воздушных отверстий, окружающих сердцевину волокна.

Для изготовления минимально структурированного волокна применялась технология, аналогичная стандартной методике вытяжки микроструктурированных световодов [1]. В качестве изначальной заготовки, однако, использовалась не система одинаковых капилляров, а набор оптических волокон различного диаметра. Центральная часть заготовки состояла из волокна наименьшего диаметра, окруженного шестью капиллярами. Изображение поперечного сечения минимально структурированного волокна, получаемого путем вытяжки подобной заготовки, приведено на рис.1. Минимальный

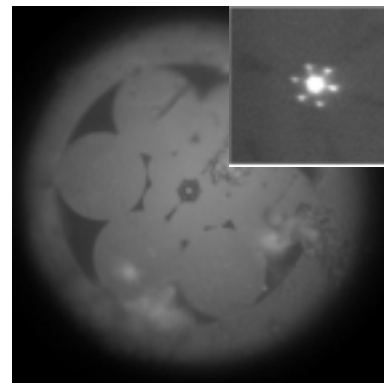


Рис.1. Изображение поперечного сечения минимально структурированного волокна с диаметром сердцевины 2 мкм. На вставке показано характерное распределение интенсивности светового поля на выходе из волокна.

¹Международный учебно-научный лазерный центр и физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы; e-mail: zheltikov@top.phys.msu.su

²Institut für Laser- und Plasmaphysik, Universität Essen, D-45117 Essen, Germany

³ВНЦ «ГОИ им. С.И.Вавилова», Россия, 199034 С.-Петербург, Менделеевская линия, 1

⁴Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 13/3

⁵НИИ «Российский центр лазерной физики» Санкт-Петербургского государственного университета, Россия, 198504 С.-Петербург, Петродворец

диаметр сердцевины изготовленных волокон составлял 1 мкм. Воздушные отверстия, как видно из рис.1, занимают большую часть оболочки созданного волокна, обеспечивая значительный скачок показателя преломления при переходе от сердцевины к оболочке.

Степень локализации поля в сердцевине волокна является ключевым фактором, определяющим возможность увеличения эффективности нелинейно-оптических взаимодействий в микроструктурированном волокне. Структура пространственного распределения поля в волноводной моде волокна оказывает существенное влияние на характер распространения световых импульсов, волноводные потери и нелинейно-оптические процессы в волноводных модах.

Для исследования пространственного распределения поля в созданном волокне и определения степени локализации поля в волокно при помощи объектива с числовой апертурой 0.3 вводилось лазерное или некогерентное излучение. При помощи аналогичного объектива изображение пространственного распределения светового поля на выходе из волновода строилось в плоскости CCD-камеры. Характерное распределение интенсивности поля на выходе минимально структурированного волокна показано на вставке к рис.1.

Представленная картина распределения интенсивности свидетельствует о высокой степени локализации света в сердцевине волокна. Волноводная мода, как видно из результатов измерений, характеризуется практически идеальной пространственной симметрией точечной группы C_{6v} , повторяющей симметрию оболочки волокна. Шесть симметричных боковых лепестков показывают пространственные области утечки энергии из волноводной моды. При использовании минимально структурированного волокна в схемах лазерной генерации и нелинейно-оптических взаимодействий с накачкой через внешнюю оболочку эти каналы могут применяться для передачи энергии внешнего источника сердцевине волокна.

Благодаря высокой степени локализации света в сердцевине минимально структурированное волокно позволяет достичь высокой эффективности спектрального уширения фемтосекундных световых импульсов. Наши эксперименты выполнялись с использованием излучения лазера на сапфире с титаном, в состав которого входили задающий генератор и регенеративный усилитель. Длительность импульсов лазерного излучения с $\lambda = 790$ нм составляла 50 фс. Максимальная энергия фемтосекундных импульсов была равна 0.2 мДж, однако в волокно вводилось излучение с энергией, изменяемой в диапазоне 1–50 нДж. Длина волокна, применяемого для исследования спектрального уширения, составляла 5 см.

Лазерные импульсы испытывали значительное спектральное уширение уже при энергиях излучения, вводимого в волокно, порядка нескольких наноджоулей. На рис.2 представлены результаты измерений, выполненных с использованием минимально структурированного волокна с диаметром сердцевины 3.5 мкм. Для анализа экспериментальных данных воспользуемся выражением элементарной теории фазовой само модуляции для оценки спектрального уширения $\Delta\omega$ лазерного импульса с частотой ω [15]:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{n_2 P_0 L}{c S \tau},$$

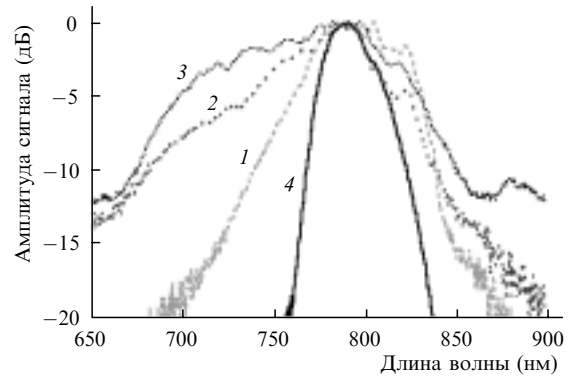


Рис.2. Спектральное уширение фемтосекундных импульсов с энергией 6 (1), 11 (2) и 16 нДж (3) в минимально структурированном волокне с диаметром сердцевины 3.5 мкм при длительности импульса, вводимого в волокно, 50 фс и длине волокна 5 см. Кривая 4 – начальный спектр лазерного импульса.

где n_2 – нелинейный показатель преломления; c – скорость света; P_0 – пиковая мощность лазерного импульса; S – эффективная площадь волноводной моды; τ – длительность импульса; L – длина волновода. С помощью данного выражения можно получить следующую оценку для эффективной площади моды в волокне: $S \approx 25$ мкм². Данная оценка согласуется с результатами прямых измерений площади волноводной моды на основе полученных изображений пространственного распределения интенсивности светового поля на выходе из волокна и свидетельствует о высокой локализации поля в сердцевине волокна, приводящей к увеличению эффективностей нелинейно-оптических взаимодействий.

Использование минимально структурированных волокон с диаметрами сердцевины 1–2.5 мкм позволило существенно увеличить эффективность спектрального уширения фемтосекундных импульсов за счет уменьшения эффективной площади волноводной моды. В частности, при введении в волокно с диаметром сердцевины 2 мкм и длиной 6 см импульсов излучения лазера на сапфире с титаном с длительностью 50 фс и энергией 10 нДж ширина спектра излучения на выходе из волокна по уровню $1/e$ составляла 180 нм. При увеличении энергии входных импульсов до 30 нДж наблюдалась генерация суперконтинуума со спектральной шириной, превышающей одну октаву. Подробности исследования свойств генерации суперконтинуума в созданных волокнах будут опубликованы в работе [16].

Таким образом, созданное микроструктурированное оптическое волокно, оболочка которого состоит из одного ряда воздушных отверстий, а минимальный диаметр сердцевины составляет 1 мкм, поддерживает волноводные моды, характеризующиеся высокой степенью локализации светового поля с пространственной симметрией, соответствующей точечной группе C_{6v} . Волокно этого типа может быть использовано для преобразования спектра сверхкоротких импульсов для целей спектроскопии, оптической метрологии, оптической когерентной томографии и сжатия световых импульсов, а также позволяет методически последовательным образом исследовать основные свойства, присущие волноводным модам микроструктурированных волокон. Большая разность показателей преломления сердцевины и оболочки в созданном волокне обеспечивает высокую степень локализации светового поля в сердцевине волокна, по-

зволюя рассчитывать на достижение значительных эффективностей нелинейно-оптических взаимодействий маломощных фемтосекундных лазерных импульсов.

Авторы благодарны А.Б.Федотову, А.Н.Наумову, Д.А.Сидорову-Бирюкову, С.О.Конорову за помощь и полезные обсуждения. Работа выполнена при поддержке гранта № 00-15-99304 Президента РФ, гранта РФФИ № 00-02-17567, гранта Volkswagen Foundation I/76 869, гранта CRDF № RP2-2266, а также гранта Государственной научно-технической программы РФ «Фундаментальная метрология».

1. Knight J.C., Birks T.A., Russell P.St.J., Atkin D.M. *Opt. Lett.*, **21**, 1547 (1996).
2. Knight J.C., Broeng J., Birks T.A., Russell P.St.J. *Science*, **282**, 1476 (1998).
3. Желтиков А.М. *УФН*, **170**, 1203 (2000).
4. *Opt. Express* (special issue), **9** (2001).
5. Broderick N.G.R., Monro T.M., Bennett P.J., Richardson D.J. *Opt. Lett.*, **24**, 1395 (1999).
6. Fedotov A.B., Zheltikov A.M., Tarasevitch A.P., von der Linde D. *Appl. Phys. B*, **73**, 181 (2001); Желтиков А.М., Алфимов М.В., Федотов А.Б., Иванов А.А., Сырчин М.С., Тарасевич А.П., фон дер Линде Д. *ЖЭТФ*, **120**, 570 (2001).
7. Ranka J.K., Windeler R.S., Stentz A.J. *Opt. Lett.*, **25**, 25 (2000).
8. Diddams S.A., Jones D.J., Jun Ye, Cundiff S.T., Hall J.L., Ranka J.K., Windeler R.S., Holzwarth R., Udem T., Hänsch T.W. *Phys. Rev. Lett.*, **84**, 5102 (2000); Jones D.J., Diddams S.A., Ranka J.K., Stentz A., Windeler R.S., Hall J.L., Cundi S.T. *Science*, **288**, 635 (2000).
9. Holzwarth R., Udem T., Hänsch T.W., Knight J.C., Wadsworth W.J., Russell P.St.J. *Phys. Rev. Lett.*, **85**, 2264 (2000).
10. Bagayev S.N., Dmitriyev A.K., Chepurov S.V., Dychkov A.S., Klementyev V.M., Kolker D.B., Kuznetsov S.A., Matyugin Yu.A., Okhupkin M.V., Pivtsov V.S., Skvortsov M.N., Zakharyash V.F., Birks T.A., Wadsworth W.J., Russell P.St.J., Zheltikov A.M. *Laser Phys.*, **11**, 1270 (2001).
11. Ivanov A.A., Alifimov M.V., Fedotov A.B., Podshivalov A.A., Chorvat D., Chorvat D. Jr., Zheltikov A.M. *Laser Phys.*, **11**, 158 (2001).
12. Hartl I., Li X.D., Chudoba C., Rhanta R.K., Ko T.H., Fujimoto J.G., Ranka J.K., Windeler R.S. *Opt. Lett.*, **26**, 608 (2001).
13. Ortigosa-Blanch A., Knight J.C., Wadsworth W.J., Arriaga J., Mangan B.J., Birks T.A., Russell P.St.J. *Opt. Lett.*, **25**, 1325 (2000).
14. Steel M.J., White T.P., Martijn de Sterke C., McPhedran R.C., Botten L.C. *Opt. Lett.*, **26**, 488 (2001).
15. Agrawal G.P. *Nonlinear fiber optics* (San Diego: Academic, 2001).
16. Fedotov A.B., Ping Zhou, Temnov V.V., Tarasevitch A.P., Kondrat'ev Yu.N., Bagayev S.N., Shevandin V.S., Dukel'skii K.V., Smirnov V.B., von der Linde D., Zheltikov A.M. *Laser Phys.* (to be published).