

ОСОБЕННОСТИ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ФЕМОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ВОЛОКНАХ ИЗ СТЕКЛА AR-GLASS

Бжеумихов К.А., Маргушев З.Ч.

Учреждение Российской академии наук Институт информатики и проблем регионального управления
Кабардино-Балкарского научного центра РАН

Аннотация

Изготовлены оптические волокна со сплошной сердцевинной диаметра несколько микрон и микроструктурированной оболочкой по технологии перетяжки размягчённого стекла марки AR-Glass (Schott). Проведены измерения спектров фемтосекундных импульсов Ti: сапфирового лазера на выходе данных волокон в зависимости от геометрических параметров структуры поперечного сечения волокон. На основе качественного анализа экспериментальных кривых спектрального распределения излучения показано, что нелинейно-оптическая трансформация спектра импульсов наблюдается уже при диаметре сердцевинны 6 мкм и происходит генерация дополнительных спектральных составляющих. При уменьшении геометрических параметров структуры поперечного сечения антистоксовая составляющая спектра сдвигается от инфракрасной в видимую область. Показано, что в случае фокусировки входного излучения в один из боковых каналов МС-оболочки, наряду с основной линией генерации источника в спектре, появляется ярко выраженная антистоксовая компонента с центральной длиной волны порядка 612 нм и интенсивностью, соизмеримой с таковой основной линии. На основе анализа модового состава фемтосекундных импульсов излучения показано, что на выходе волокна, наряду с основной модой, наблюдаются и высшие волноводные моды.

Ключевые слова: фемтосекундные лазерные импульсы, микроструктурированные волокна, нелинейная оптика, генерация суперконтинуума.

Введение

Управление процессом эффективного преобразования спектра лазерного излучения в широком диапазоне частот является актуальной проблемой современной науки и техники благодаря возможности многочисленных приложений [1-4]. Одним из подходов к решению данной задачи является применение достижений современной нелинейной оптики, которые, в первую очередь, связаны с появлением источников лазерного излучения фемтосекундной длительности. При прохождении таких импульсов через оптические волноводы со сплошной сердцевинной в несколько микрон и микроструктурированной (МС) оболочкой из полых капилляров [5], а также световодов конической формы с уменьшающимся диаметром поперечного сечения по длине [6], спектр может существенно трансформироваться. Этот эффект объясняется проявлением ряда нелинейно-оптических взаимодействий в МС-волокне, таких как фазовая самомодуляция, четырёхволновые и параметрические взаимодействия, генерация третьей гармоники, вынужденное комбинационное рассеяние [1]. Изменение формы импульса проявляется возникновением новых спектральных составляющих как в сторону больших, так и меньших длин волн. При сплошном уширении спектра возникает эффект генерации суперконтинуума (СК) – широкополосного когерентного излучения ультракороткой длительности [5]. Данное явление позволило совершить революционный прорыв в области высокоточной оптической метрологии и прецизионных оптических измерений [2].

Моделирование процесса прохождения фемтосекундных лазерных импульсов через МС-волокна [7] показывает, что эффективность проявления нелинейных эффектов определяется оптическими характеристиками материала и геометрической структурой волокна, которые в комплексе и задают форму импульса на его выходе [8]. Таким образом, задача управления спектром лазерного излучения сводится к оптимальному подбору материала и структуры волокон, что позволяет изготавливать их с заданными свойствами.

В качестве материала МС-волокон преимущественно используется кварцевое стекло. Значение коэффициента нелинейности порядка $\gamma = 100 \text{ вт}^{-1} \text{ км}^{-1}$. Нелинейный показатель преломления при этом $n_2 \approx (2 \div 3) \cdot 10^{-16} \text{ см}^2 / \text{вт}$. С другой стороны, использование кварцевого стекла сопряжено с определёнными технологическими трудностями, а также дороговизной материала.

По своим оптическим характеристикам для решения этой задачи подходят свинцово-силикатные стёкла. Нелинейный показатель преломления стёкол этого типа составляет $n_2 \approx 4,1 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2 / \text{вт}$ [9] на длине волны 1060 нм, т.е. более чем на порядок превышает нелинейность плавленого кварца. Однако склонность к образованию оксидных плёнок РbО и кристаллизации [10] ограничивает их широкое применение. Интерес представляют и халькогенидные стёкла [9]. Нелинейный показатель преломления для материалов этого класса может достигать значений порядка $10^{-13} \text{ см}^2 / \text{вт}$.

Существующие на данном этапе волокна согласно сложившейся в литературе терминологии различаются по топологии и структуре поперечного среза следующим образом [7]:

- волокно со сплошной сердцевинной;
- волокно с поллой сердцевинной (фотонно-кристаллическое);
- интегрированные волноводные каналы.

Соответственно применяются разные технологические подходы для изготовления МС-волокон. Классическим считается метод, основанный на стандартной волоконной технологии. Суть подхода состоит в монтаже требуемой структуры в нормальном для человека масштабе и дальнейшей перетяжке методом размягчённого стекла с целью пропорционального уменьшения элементов до требуемых размеров. Эта технология позволяет получать волокна из разных типов стёкол, разной конфигурации и видом укладки: гексагональной, квадратной, треугольной и т.д., разной топологии расположения дефектов. Эта технология широко используется для изготовления микроканальных пластин для приборов ночного видения, а также рентгенооптических элементов [11].

Другой способ изготовления МС-волокон состоит в том, что волокно заданного размера и профиля получается путём перетяжки предварительной формы из заготовки, полученной на этапе вытяжки из расплавленной стекломассы [12].

Сравнение технологий изготовления волокон показывает, что первый способ, несмотря на сложность, наиболее предпочтительный, так как позволяет гибко менять топологию и основные геометрические размеры микроструктур в широком диапазоне.

Таким образом, на основе анализа применяемых на данном этапе материалов и технологий изготовления МС-волокон, с нашей точки зрения, научный и коммерческий интерес представляет проведение дальнейших исследований в направлении увеличения эффективности управления спектром фемтосекундных импульсов с их помощью.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального характера по трансформации спектра фемтосекундного Ti:сапфирового лазера при прохождении через МС-волокна из стекла марки AR-Glass фирмы Schott в зависимости от геометрических размеров структуры поперечного среза волокон. МС-волокна изготовлены на технологическом комплексе перетяжки стекла (разработан в отделе компьютерных рентгенооптических систем ИИПРУ Кабардино-Балкарского научного центра РАН).

Эксперимент

На первом этапе работы нами были изготовлены образцы МС-волокон по технологии структурированного стекла. Принципиально она не отличается от классической волоконной технологии и основана на принципе перетяжки размягчённого стекла. С одной стороны заготовка вводится в высокотемпера-

турную печь, с другой стороны размягчённое стекло вытягивается с помощью высокоточной механики. Соотношение скорости ввода стекла в печь и скорости вытягивания определяет фактор перетяжки 10-20. Одна и та же заготовка циклично перетягивается несколько раз, и в итоге конечный фактор перетяжки может достигать десятков тысяч. Вначале заготовка монтируется механически и представляет собой сборку из разных типов стёкол разной конфигурации, с разным видом укладки, разной топологии расположения дефектов (сердцевинной). Размеры наименьших элементов на начальном этапе составляют единицы миллиметров, в то время как после перетяжки могут достигать микронных размеров и меньше. Преимуществом данной технологии является возможность монтажа требуемой структуры в удобном для человека масштабе, после чего методом перетяжки элементы уменьшаются до требуемых размеров. Уровень технологии дошёл до того, что размер минимального элемента в структуре достиг десятков нанометров.

В качестве исходного материала выбраны трубки и стержни из стекла марки AR-Glass фирмы «Schott» со следующими физико-химическими параметрами:

- коэффициент линейного температурного расширения – 91;
- температура размягчения – 720°C ,
- коэффициент преломления (на длине волны 687,6 нм) – 1,514;
- химический состав – SiO₂ – 69%, B₂O₃ – 1%, K₂O – 3%, Al₂O₃ – 4%, Na₂O – 13%, BaO – 2%, CaO – 5%, MgO – 3%.

В качестве базового выбран профиль волокна из сплошной сердцевинной, окружённой МС-оболочкой из 168 капилляров. Волокно было изготовлено по отработанному ранее технологическому маршруту поэтапной перетяжки до приемлемых размеров основных параметров волокна (диаметр сердцевинной, диаметр воздушных каналов структурированной оболочки и шаг структуры – расстояния между центрами воздушных каналов). На определённых этапах маршрута для повышения прочности образцов микроструктуры укладывались в трубку из стекла той же марки для очередной перетяжки с одновременной откачкой воздуха между микроструктурой и внутренней стороной трубки. В итоге были получены образцы МС-волокон с гексагональным профилем сечения и разных размеров параметров структуры. В табл. 1 приведены указанные выше геометрические параметры волокон.

Таблица 1. Размеры элементов микроструктур опытных образцов МС-волокна

n/n	Диаметр сердцевинной, мкм	Диаметр воздушных каналов, мкм	Шаг структуры, мкм
1	6	5,01	6,68
2	1,55	1,29	1,86
3	1,2	1	1,43

На рис. 1 представлено электронно-микроскопическое изображение поперечного среза образцов.

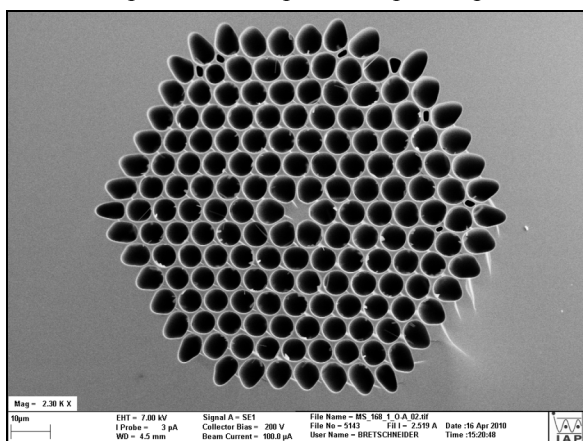


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение поперечного среза МС-волокна

На следующем этапе были проведены экспериментальные измерения спектров излучения на выходе волокон в соответствии с экспериментальной схемой (рис. 2).

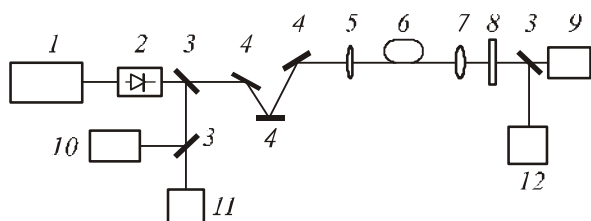


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

- 1 – Ti:Sa лазер; 2 – изолятор Фарадея; 3, 4 – поворотные зеркала; 5, 7 – микрообъективы; 6 – МС-волокно; 8 – нейтральный фильтр; 9 – CCD-камера; 10 – спектрометр; 11 – автокоррелятор, 12 – спектрометр

Излучение фемтосекундного лазерного источника (1) после изолятора Фарадея (2) попадает на поворотное полупрозрачное зеркало (3) и делится на два пучка. Основной пучок с помощью зеркала (4) и микрообъектива (5) (Nikon 60×) фокусируется на торец волокна (6), который закреплён на 3D-столике с микрометрической подачей. Другой конец закреплён на таком же столике, с помощью которого излучение с выхода волокна позиционируется на микрообъектив (Nikon 40×) (7). После ослабления нейтральным фильтром (8) пучок от полупрозрачного зеркала делится опять на две части, которые соответственно попадают на приёмное окно спектрометра HR4000 (Ocean Optics) (12) и объектив CCD-камеры EO-50-12 (Edmund Optics) (9). Вторая часть пучка после зеркала (3) попадает на приёмное окно спектроанализатора USB2000+ (10) и автокоррелятора Femtometer (Eurolasers) (11). Вся схема собрана на виброизолирующем оптическом столе фирмы Thorlabs. В качестве источника фемтосекундных импульсов использовался Ti:сапфировый лазер (Fusion, Femtolasers) с пассивной синхронизацией мод на основе керровской линзы, генерирующий гауссовы им-

пульсы длительностью 20 фс с частотой следования 75 МГц. Центральная длина волны генерации лазера 805 нм с полосой (FWHM) порядка 50 нм. Диаметр пучка не более 2 мм. Средняя мощность излучения на входе волокна составляла 700 мВт при энергии импульса 9,5 нДж. Спектр импульса исходного излучения лазера и автокорреляционная функция представлены на рис. 3.

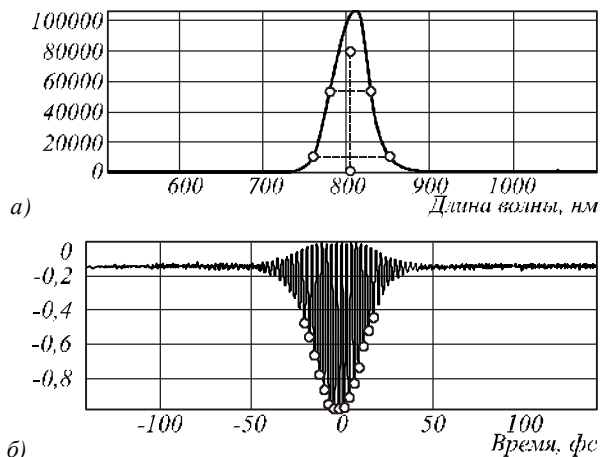


Рис. 3. Спектр (а) и автокорреляционная функция (б) интенсивности излучения Ti:Sapphire лазера

Спектр излучения на выходе волокна регистрировался анализатором HR4000 (12) с рабочим диапазоном 200-1100 нм, а пространственное распределение излучения – CCD-камерой (9).

Результаты и обсуждение

Спектры на выходе волокон были измерены в положениях, когда входное излучение фокусировалось в различные точки поперечного сечения МС-волокон. Спектры рис. 4 соответствуют положению, когда пучок попадает в сердцевину, в то время как спектр рис. 5 снят при фокусировке в один из боковых микроканалов волокна 1.

Анализ экспериментальных кривых спектрального распределения излучения показывает, что нелинейно-оптическая трансформация спектра импульсов фемтосекундного лазера наблюдается уже при диаметре сердцевины 6 мкм и проявляется в том, что спектр исходного импульса сдвигается в антистоксовую (высокочастотную) область. Сравнение спектров рис. 4 показывает, что при уменьшении диаметра сердцевины антистоксовая составляющая спектра сдвигается от инфракрасной в видимую область. По спектру рис. 5 можно сказать, что в случае фокусировки входного излучения в один из боковых каналов МС-оболочки, наряду с основной линией генерации источника в спектре, появляется ярко выраженная антистоксовая компонента с центральной длиной волны порядка 612 нм и интенсивностью, соизмеримой с таковой основной линии. Экспериментальные спектры на выходе исследованных волокон укладываются в диапазон 550-950 нм, что в 7-8 раз шире начального импульса накачки.

Теоретические и экспериментальные исследования [5-8] показывают, что наиболее широкий спектр (от одной и более октавы) СК получается при введении затравочного импульса с длиной волны близкой к длине волны нулевой дисперсии нелинейной среды.

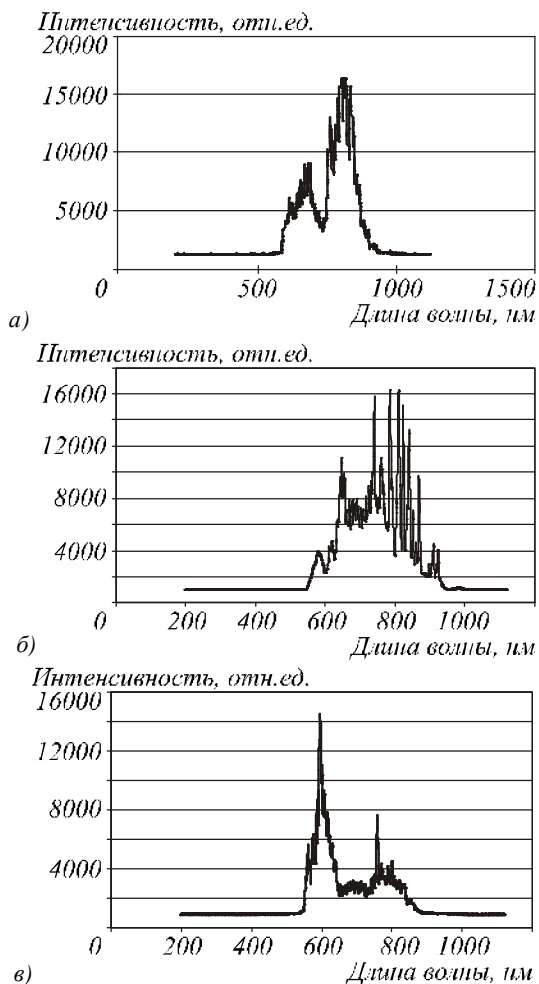


Рис. 4. Спектры излучения на выходе волокна при фокусировке входного излучения в сердцевину: «1» – (а), «2» – (б), «3» – (в)

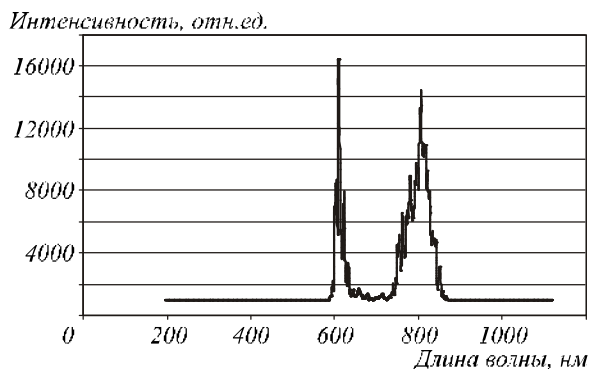


Рис. 5. Спектр излучения на выходе волокна «3» при фокусировке входного излучения в боковой канал

В случае распространения импульса в области нормальной дисперсии волновода уширение спектра сопровождается существенным нелинейным рас-

плыванием импульса. Расплывание импульса вызывается ФСМ в нелинейной среде и осуществляется за счёт генерации новых световых колебаний. Возникающее при этом спектральное уширение импульса оценивается следующим образом [7]:

$$\Delta\omega = \frac{\omega}{c} n_2 L \frac{I_0}{\tau},$$

где ω – центральная частота импульса накачки, c – скорость света, n_2 – нелинейный показатель преломления среды, L – расстояние, которое проходит импульс накачки в среде, I_0 – пиковая интенсивность светового импульса, τ – длительность импульса.

Спектр импульса уширяется неоднородно, сильнее в антистоксовую область. Из-за расплывания импульса его интенсивность уменьшается, нелинейные эффекты ослабевают и на некотором расстоянии в волноводе спектральная плотность стабилизируется. При распространении в волноводах импульсов со спектром в области нулевой или малой аномальной дисперсии происходит генерация СК с шириной, вдвое и более превышающей начальную центральную частоту [5]. Очевидно, исходя из вышеприведённых рассуждений, что импульсы накачки, заводимые в МС-волокна в наших экспериментах, преимущественно находятся в области нормальной групповой дисперсии.

Между тем, повышения эффективности нелинейно-оптических процессов можно добиться за счёт повышения степени локализации поля в сердцевине волокна путём уменьшения её диаметра и за счёт увеличения разности показателя преломления сердцевины и эффективного показателя преломления МС-оболочки. Спектры на рис. 4 показывают, что уменьшение одного диаметра сердцевины не способствует в достаточной степени повышению степени локализации поля в ней. Наряду с уменьшением диаметра сердцевины, необходимо увеличить содержание воздуха в МС-оболочке путём увеличения диаметра капилляров при укладке заготовки. С другой стороны, эффективность преобразования фемтосекундных лазерных импульсов можно увеличить, используя в качестве капилляров для МС-оболочки материал с заведомо меньшим показателем преломления по сравнению с сердцевиной, создав тем самым мультикомпонентные МС-волокна.

Известно, что при распространении фемтосекундных лазерных импульсов в МС-волокне нелинейно-оптическая трансформация спектра сопровождается изменением модового состава первичного излучения. Подтверждение этому рис. 6, где изображены характерные модовые структуры излучения, генерируемого в одном из МС-волокон. Как видно на рис. 6, при небольшом изменении начальных условий возбуждения волноводной моды наблюдается преобразование коль-

цевой моды (рис. 6а) видимой части спектра в двудольную моду (рис. 6б). Данное обстоятельство позволяет выделить (путём спектральной фильтрации) изолированные пространственные моды излучения для различных спектральных областей. Однако критерием оценки качества пространственных мод, пригодности излучения, генерируемого в МС-волокнах для измерений, выполняемых по схеме накачка-зондирование, служит эффективность дальнейшего преобразования частотных компонент в нелинейной среде. В качестве такой нелинейной среды может быть использован, в частности, нелинейный кристалл LBO.

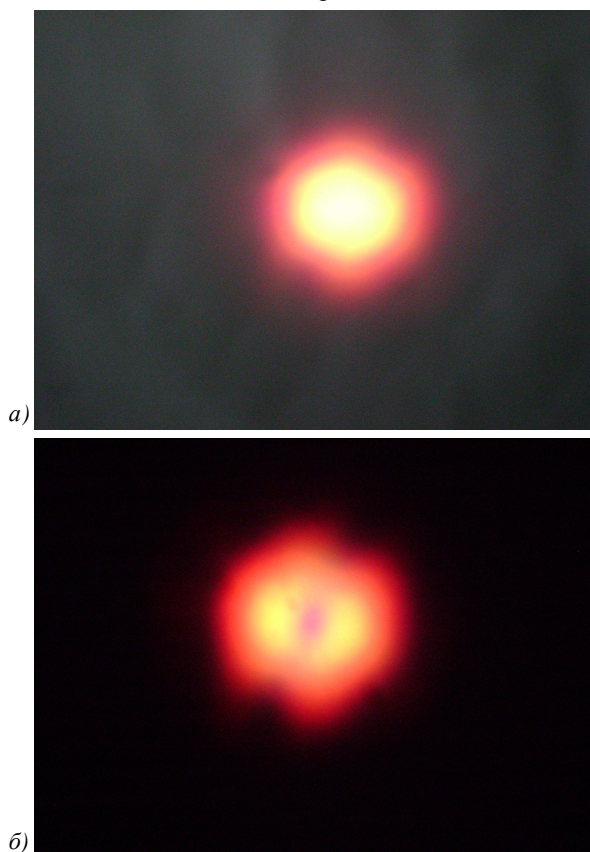


Рис. 6. Характерная модовая структура излучения на выходе из МС-волокна (а), двудольная мода (б)

Выводы

Изготовлены образцы МС-волокон по технологии перетяжки размягчённого стекла марки AR-Glass фирмы «Schott». Проведена качественная оценка эффективности нелинейно-оптических преобразований лазерных импульсов длительности 20 фс, энергии 9,5 нДж Ti:сапфирового лазера на выходе данных волокон в зависимости от геометрических параметров структуры поперечного среза. Показано, что нелинейно-оптические преобразования проявляются в виде уширения начального спектра импульса в 7-8 раз. Анализ спектров свидетельствует о генерации новых изолированных частотных компонент, которые сопровождаются переносом значительной части энергии импульсов накачки из

ИК-области (805 нм) в видимую часть (612 нм). На основе полученных экспериментальных данных сделан вывод о том, что для повышения эффективности нелинейно-оптических преобразований в выбранном материале и топологии структуры, наряду с уменьшением диаметра сердцевинки, необходимо увеличить содержание воздуха в МС-оболочке волокна путём увеличения диаметра канала капилляров. Другой путь повышения эффективности, как нам представляется, это использование для МС-оболочки материала с заведомо меньшим показателем преломления на длине волны накачки по сравнению с сердцевинкой. Таким образом создаются мультикомпонентные МС-волокна. Оба пути в результате должны привести к росту степени локализации излучения в сердцевине волокна, а значит, эффективности нелинейно-оптических преобразований. Анализ модового состава фемтосекундных импульсов излучения на выходе волокна показал, что, наряду с основной модой, наблюдаются и высшие волноводные моды.

Полученные результаты в целом свидетельствуют о том, что выбранный нами в работе материал стекла марки AR-Glass может представлять интерес, но для окончательных выводов необходимо продолжить экспериментальные исследования по предложенным направлениям.

Благодарности

Работа выполнялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Министерства науки и образования КБР, региональный проект: 09-02-96509-р-юг.

Литература

1. **Жёлтиков, А.М.** Микроструктурированные световоды в оптических технологиях / А.М. Жёлтиков. – М.: Физматлит, 2009. – 192 с.
2. **Хэнш, Т.В.** Страсть к точности / Т.В. Хэнш // УФН. – 2006. – Т. 176, № 12. – С. 1368-1380.
3. **Hartl, I.** Ultrahigh-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air-silica microstructure optical fiber / I. Hartl, X.D. Li, C. Chudoba, R.K. Rhanta, T.H. Ko, J.G. Fujimoto, J.K. Ranka, R.S. Windeler // Optic Lett. – 2001. – V. 26. – P. 608.
4. **Bjarklev, A.** Photonic Crystal Fibers/ A.Bjarklev, J. Broeng, A.S. Bjarklev. – Boston: Kluwer Acad. Publ., 2003.
5. **Knight, J.C.** All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding/ J.C. Knight, T.A. Birks, P.St.J. Russell, and D.M. Atkin // Opt. Lett. – 1996. – Vol. 21. – P. 1547-1549.
6. **Кобцев, С.М.** Управление шириной спектра фемтосекундного континуума, генерируемого в световоде малого диаметра / С.М. Кобцев, С.В. Кукарин, Н.В. Фатеев // Квантовая электроника. – 2002. – Т. 32, № 1. – С. 11-13.
7. **Жёлтиков, А.М.** Оптика микроструктурированных волокон / А.М. Жёлтиков – М.: Наука, 2004. – 281 с.
8. **Шуюпова, Я.О.** Расчёт мод фотонно-кристаллического световода разными методами / Я.О. Шуюпова, В.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33, № 1. – С. 27-35.

9. **Friberg, S.R.** Nonlinear optical glasses for ultrafast optical switches / S.R. Friberg, P.W. Swith // IEEE J. Quantum Electron. – 1987. – V. 23. – P. 2089-2094.
10. http://www.nextgenpcf.eu/TrainingDay/NextGenPCF_Kobelke_nonsilica_Jan08.pdf.
11. **Arkadiev, V.A.** Polycapillary structure as x-ray window for differential vacuum pumping / V.A. Arkadiev, V.I. Beloglazov, A.A. Bzhaumikhov, H.-E. Gorny, N. Langhoff, Z. Margushev, J. Schmalz, R. Wedell, H. Wolff // Proceeding of SPIE. – 1988. – Vol. 3444. – P. 436-442.
12. **Ravi Kumar, V.V.** Extruded soft glass photonic crystal fiber for ultrabroad supercontinuum generation / V.V. Ravi Kumar, A. George, W. Reeves, J. Knight, P. Russell, F. Omenetto, and A. Taylor // Opt. Express. – 2002. – Vol. 10. – P. 1520-1525.

References

1. **Zheltikov, A.M.** Microstructure fibers for optical technology / A.M. Zheltikov – Moscow: "Fizmatlit" Publisher, 2009. – 192 p. – (in Russian).
2. **Hansch, T.W.** Passion to accuracy / T.W. Hansch // UFN. – 2006. – V. 176, No. 12. – P. 1368-1380. (in Russian).
3. **Hartl, I.** Ultrahigh-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air-silica microstructure optical fiber / I. Hartl, X.D. Li, C. Chudoba, R.K. Rhanta, T.H. Ko, J.G. Fujimoto, J.K. Ranka, R.S. Windeler // Optic Let. – 2001. – V. 26. – P. 608.
4. **Bjarklev, A.** Photonic Crystal Fibers / A. Bjarklev, J. Broeng, A.S. Bjarklev. – Boston: Kluwer Acad. Publ., 2003.
5. **Knight, J.C.** All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding / J.C. Knight, T.A. Birks, P.St.J. Russell, and D.M. Atkin // Opt. Lett. – 1996. – Vol. 21. – P. 1547-1549.
6. **Kobtsev, S.M.** Controlling the width of a femtosecond continuum generated in a small-diameter fibre / S.M. Kobtsev, S.V. Kukarin, N.V. Fateev // Quantum Electron. – 2002. – No. 32(1). – P. 11-13. – (in Russian).
7. **Zheltikov, A.M.** Optics of microstructure fibers / A.M. Zheltikov – Moscow: Nauka, 2004. – 281 p. – (in Russian).
8. **Shuyupova, Ya.O.** Calculation of modes photonic crystal fiber by different methods/ Ya.O. Shuyupova, V.V. Kotlyar // Computer Optics. – 2009. – Vol. 33, No. 1. – P. 27-35. (in Russian)
9. **Friberg, S.R.** Nonlinear optical glasses for ultrafast optical switches / S.R. Friberg, P.W. Swith // IEEE J. Quantum Electron. – 1987. – V. 23. – P. 2089-2094.
10. http://www.nextgenpcf.eu/TrainingDay/NextGenPCF_Kobelke_nonsilica_Jan08.pdf.
11. **Arkadiev, V.A.** Polycapillary structure as x-ray window for differential vacuum pumping / V.A. Arkadiev, V.I. Beloglazov, A.A. Bzhaumikhov, H.-E. Gorny, N. Langhoff, Z. Margushev, J. Schmalz, R. Wedell, H. Wolff // Proceeding of SPIE. – 1988. – Vol. 3444. – P. 436-442.
12. **Ravi Kumar, V.V.** Extruded soft glass photonic crystal fiber for ultrabroad supercontinuum generation / V.V. Ravi Kumar, A. George, W. Reeves, J. Knight, P. Russell, F. Omenetto, and A. Taylor // Opt. Express. – 2002. – Vol. 10. – P. 1520-1525.

FEATURES OF NONLINEAR-OPTICAL TRANSFORMATIONS FEMTOSECOND OF LASER PULSES IN THE MICROSTRUCTURED FIBRES FROM A GLASS AR-GLASS

K.A. Bzheumikhov, Z.Ch. Margushev

Institution of Russian Academy of Sciences Institute of Computer Science and Problem Regional Managements

Kabardino-Balkarian Centre of Science RAS

Abstract

The optical fibres with a continuous core of a diameter a little micron and microstructured environment on extend technology of the softened glass of the stamp AR-Glass (Schott) are made. The measurements of spectra femtosecond of pulses Ti:sapphire of the laser on an output of the given fibres are carried out depending on geometrical parameters of structure of cross section of fibres. On the basis of the qualitative analysis of experimental curve spectral distribution of radiation is shown, that the nonlinear-optical transformation of a spectrum of pulses is observed already at a diameter of a core 6mkm and there is a generation of additional spectral components. At reduction of geometrical parameters of structure of cross section anti-Stokes the component of a spectrum is moved together from infra-red in seen area. Is shown, that in a case of hit of entrance radiation in one of lateral channels of a environment, alongside with the basic line of generation of a source in a spectrum occurs brightly expressed anti-Stokes of a component with central length of a wave about 612nm and intensity, commensurable from that basic line. On the basis of the mode analysis of structure femtosecond of pulses of radiation on an output of a fibre, is marked, that alongside with the basic style maximum are observed also waveguide of a style.

Key words: femtosecond laser pulses, microstructured fibres, nonlinear optics, supercontinuum generation.

Сведения об авторах

Бжеумихов Казбек Абубович, 1965 года рождения, в 1989 году окончил Кабардино-Балкарский государственный университет по специальности «Микроэлектроника и полупроводниковые приборы», работает научным сотрудником в Учреждении Российской академии наук Институт информатики и проблем регионального управления Кабардино-Балкарского научного центра РАН. Область научных интересов: автоматизация научных экспериментов, оптика микроструктур, лазерная физика.

E-mail: kazbek_ba@inbox.ru

Kazbek Abubovich Bzheumikhov (b.1965) graduated from Kabardino-Balkarian State University in 1989, speciality "Microelectronics and semiconductor devices". Currently he works as scientific employee at Institution of Russian Academy of Sciences Institute of Computer Science and Problems of Regional Managements Kabardino-Balkarian Centre of Science RAS. Research interests are automation of research experiments, optics of microstructures, laser physics.



Маргушев Заур Чамилович, 1963 года рождения. В 1986 году окончил Московский инженерно-физический институт (МИФИ) по специальности «Физика твёрдого тела». Кандидат физико-математических наук (1990 год), ведущий научный сотрудник Учреждения Российской академии наук Институт информатики и проблем регионального управления Кабардино-Балкарского научного центра РАН. Область научных интересов: рентгеновская оптика, рентгеновские аналитические методы определения состава и структуры материалов, оптика микроструктурированных волокон, лазерная физика.

E-mail: zmargush@yandex.ru

Zaur Chamilovich Margushev (b.1963) graduated from Moscow Engineering Physics Institute (MEPHI) in 1989, speciality "Physics of a solid state". He received his Candidate in Physics & Maths degrees (1990) from MEPHI. Currently he works as leader scientific employee at Institution of Russian Academy of Sciences Institute of Computer Science and Problems of Regional Managements Kabardino-Balkarian Centre of Science RAS. Research interests are X-ray optics, X-ray analytical methods, optics of microstructures, laser physics.

Поступила в редакцию 4 октября 2010 г.