

НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПИКОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В МНОГОМОДОВЫХ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СВЕТОВОДАХ С УМЕРЕННОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

В.В. Демидов^{1*}, К.В. Дукельский^{2,3}, С.О. Леонов⁴, А.С. Матросова¹

¹Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург, 192171, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

³Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

⁴Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

*Адрес для переписки: demidov@goi.ru

Информация о статье

УДК 681.7.068, 535.3

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Демидов В.В., Дукельский К.В., Леонов С.О., Матросова А.С. Нелинейно-оптические преобразования пикосекундных лазерных импульсов в многомодовых микроструктурированных световодах с умеренной нелинейностью // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 1. С. 61–66.

Аннотация: Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований преобразования импульсов пикосекундной длительности иттербиевого лазера ($\lambda = 1030$ нм) в кварцевых микроструктурированных световодах с предельно высокой долей пустот в оболочке и сердцевинной диаметром от 8 до 11 мкм, обладающих умеренной оптической нелинейностью ($\gamma = 2-3$ 1/(Вт·км)). Установлена преобладающая роль процесса четырехволнового смешения в нелинейном преобразовании излучения в антистоксовой части спектра при накачке световодов в режиме нормальной дисперсии.

Ключевые слова: микроструктурированный световод, многомодовый режим, оптическая нелинейность, преобразование излучения, суперконтинуум, четырехволновое смешение.

На протяжении нескольких последних десятилетий спектральное уширение и генерация новых частотных компонент электромагнитного излучения за счет гаммы нелинейно-оптических процессов является объектом интенсивных исследований [1–13]. Уширение лазерного импульса в излучение со сверхшироким спектром носит название суперконтинуума [14, 15]. Средами с наибольшим потенциалом для генерации спектрального суперконтинуума служат волоконные световоды нового поколения – микроструктурированные, – направляющие свойства которых обеспечиваются образованием геометрически упорядоченной системы пустот в оболочке [16–18]. От традиционных световодов со сплошной оболочкой такие оптические элементы отличает возможность управления в широких пределах дисперсионными характеристиками за счет варьирования относительного размера пустот и диаметра сердцевин [17–19]. Дисперсионный

профиль световода определяет сценарии протекания нелинейно-оптических процессов и, как следствие, эффективность генерации спектрального суперконтинуума [20].

Высокомощные генераторы широкополосного когерентного излучения востребованы для разнообразного круга приложений, таких как оптическая когерентная томография с высоким разрешением, гиперспектральные флуоресцентные системы, приборы сверхбыстрого зондирования атмосферы, мультиспектральные лазерные системы видения, оборонные приложения. Однако максимально достижимая средняя мощность генераторов суперконтинуума, о которой на данный момент известно из литературных источников, достигает нескольких десятков Вт [21]. Такой результат был получен в процессе преобразования непрерывного лазерного излучения в микроструктурированном световоде с сердцевинной диаметром менее 5 мкм.

Дальнейшее увеличение энергосодержания спектра вторичного излучения на современных типах нелинейных микроструктурированных световодов представляется затруднительным вследствие сложности технического порядка, возникающих при вводе импульсов накачки короткой длительности с высокой пиковой мощностью в чрезмерно малую по размеру сердцевину.

Одним из методов дальнейшего увеличения выходной мощности генераторов суперконтинуума может стать использование многомодовых микроструктурированных световодов с увеличенным (более 8 мкм) диаметром сердцевины в условиях перехода от импульсов накачки длительностью в несколько сотен фемтосекунд к импульсам с длительностью от единиц до десятков пикосекунд. До настоящего момента процесс генерации спектрального суперконтинуума пикосекундными лазерными импульсами в таких элементах не изучен в достаточной мере [22–24], что определяет актуальность разработки нелинейно-оптических преобразователей излучения на основе многомодовых микроструктурированных световодов с сердцевинной большого размера, использующих в качестве источника накачки относительно недорогие пикосекундные лазеры.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований преобразования импульсов пикосекундной длительности иттербиевого лазера (длина волны излучения $\lambda = 1030$ нм) в микроструктурированных световодах с сердцевинной из парофазного кварцевого стекла диаметром от 8 до 11 мкм и гексагональной системой пустот в оболочке (рисунок 1).

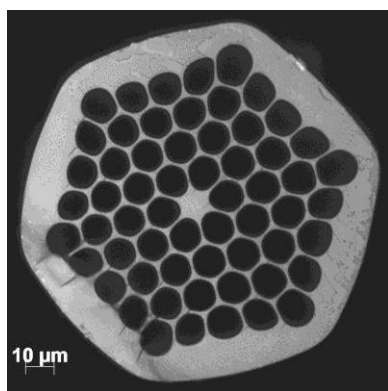


Рис. 1. Изображение структуры поперечного сечения световода с сердцевинной диаметром 8 мкм

Световоды были изготовлены традиционным методом двукратного перетягивания поликапиллярной сборки [25, 26]. Длина образцов варьировалась от 2 до 5 м. Как видно из рисунка 1, коэффициент заполнения оболочки пустотами, определяемый как отношение диаметра единичного отверстия к шагу структуры, для каждого из образцов составлял приблизительно 0,95, регламентируя тем самым многомодовый режим распространения из-

лучения во всем спектральном диапазоне (подразумевается спектральный диапазон максимальной прозрачности кварцевого стекла) [27–29]. Выраженная шестиугольная форма наружной кварцевой оболочки явилась следствием раздувания пустот в процессе вытягивания. Дополнительными исследованиями было установлено, что указанная форма оболочки не оказывает существенного влияния на оптические свойства световодов.

На основании значений эффективного модового показателя преломления, полученных в многофункциональной программной среде COMSOL Multiphysics [30], были рассчитаны дисперсионные и нелинейные характеристики изготовленных микроструктурированных световодов. Для корректной интерпретации оптических свойств использовалась модель световода с идеальным согласованным слоем в качестве неотражающего граничного условия для системы уравнений Максвелла [31]. Поиск мод выполнялся в плоскости поперечного сечения световода и основывался на решении системы линейных уравнений Максвелла для случая однородного изотропного диэлектрика в отсутствии свободных зарядов и токов. Уравнения Максвелла сводились к волновым уравнениям для векторов напряженности электрического (E) и магнитного (B) поля. В силу идентичности записи волновых уравнений для обоих указанных векторов приведем только выражение для вектора E [13]:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times E \right) - k_0^2 \epsilon E = 0, \quad (1)$$

где k_0 – волновое число в вакууме ($k_0 = 2\pi/\lambda$), ϵ – диэлектрическая проницаемость ($\epsilon = n^2$, n – показатель преломления среды), μ – магнитная проницаемость.

С учетом наличия идеального согласованного слоя уравнение (1) преобразовывалось к виду [32]:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu'} \nabla \times \frac{1}{[S]} E \right) - k_0^2 \epsilon' \frac{1}{[S]} E = 0, \quad (2)$$

где ϵ' и μ' – модифицированные диэлектрическая и магнитная проницаемости соответственно, $[S]$ – матрица коэффициентов идеального согласованного слоя [32].

Решением уравнения (2) было уравнение электромагнитной волны, распространяющейся вдоль направления z оси световода [13]:

$$E(z, t) = E_0 \exp \left[j \left(\omega t - \frac{\omega}{c} n_{\text{eff}} z \right) \right], \quad (3)$$

где E_0 – амплитуда напряженности электрического поля; ω – круговая частота; c – скорость света в вакууме; t – время.

Вещественные части комплексных значений n_{eff} из уравнения (3), синтезированных в результате численного анализа, представляли собой значения эффективных показателей преломления мод мик-

рооструктурированного световода. Их точная идентификация производилась путем сопоставления поперечных распределений мощности и силовых линий поля с известными однозначно интерпретируемыми распределениями [33].

Параметр дисперсии групповой скорости распространения волны в микроструктурированных световодах D определялся в соответствии с известным выражением [13]:

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n_{\text{eff}}(\lambda)}{\partial \lambda^2}. \quad (4)$$

Значение эффективной площади поля моды A_{eff} , необходимое для расчета коэффициента нелинейности световода, вычислялось с использованием следующей формулы [13]:

$$A_{\text{eff}} = \frac{(\iint_{-\infty}^{\infty} |E_z(x, y)|^2 dx dy)^2}{\iint_{-\infty}^{\infty} |E_z(x, y)|^4 dx dy}, \quad (5)$$

где $E_z(x, y)$ – поперечная составляющая электрического поля.

Оценка коэффициента нелинейности микроструктурированных световодов γ осуществлялась согласно выражения [13]:

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}}, \quad (6)$$

где n_2 – нелинейный показатель преломления материала световода – кварцевого стекла ($n_2 = 3 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2/\text{Вт}$).

Обсуждаемые параметры серии изготовленных образцов световодов применительно к фундаментальной моде приведены в таблице 1 (λ_0 – длина волны нулевой дисперсии групповой скорости распространения волны).

ТАБЛИЦА 1. Оптические характеристики фундаментальной моды микроструктурированных световодов с сердцевинной диаметром от 8 до 11 мкм

Диаметр сердцевины, мкм	A_{eff} , мкм ²	γ , 1/(Вт·км)	λ_0 , нм
8	33,8	3,61	1115
9	42,6	2,86	1145
10	52,5	2,32	1158
11	63,4	1,92	1174

Из данных таблицы 1 следует, что изготовленные микроструктурированные световоды характеризуются умеренной оптической нелинейностью, составляющей несколько единиц 1/(Вт·км). По этой причине сценарии протекания в них нелинейно-оптических процессов могут принципиально отличаться от таковых в высоконелинейных световодах [15, 20]. При этом очевидна достаточная удаленность спектрального положения нулевой дисперсии фундаментальной моды от длины волны излучения накачки иттербиевого лазера, который в дальнейшем использовался в экспериментах по генерации суперконтинуума. Отмеченная тенденция прогрессирует с увеличением размеров сердцевины.

На рисунке 2 представлена спектральная зависимость параметра дисперсии для фундаментальной и первой высшей мод микроструктурированного световода с сердцевинной диаметром 8 мкм, полученная с использованием выражения (4).

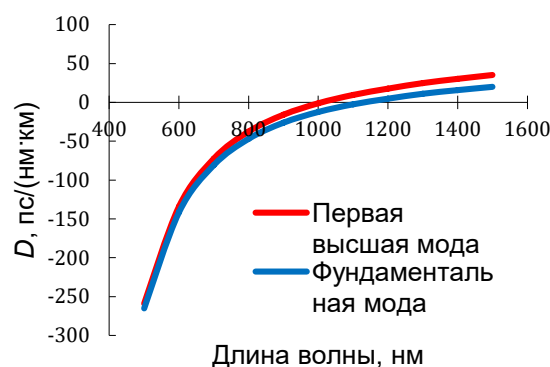


Рис. 2. Спектральная зависимость дисперсии групповой скорости распространения волны для фундаментальной и первой высшей мод микроструктурированного световода с сердцевинной диаметром 8 мкм

Из рисунка 2 становится понятно, что при использовании иттербиевого лазерного источника длина волны излучения накачки располагается в области нормальной дисперсии микроструктурированного световода. При этом спектральное положение нулевой дисперсии первой высшей моды практически совпадает с длиной волны излучения накачки, что является необходимым условием эффективного нелинейно-оптического преобразования излучения даже в условиях умеренной оптической нелинейности.

Экспериментальные исследования проводились по следующей методике. Излучение иттербиевого лазера (основные параметры лазера приведены в таблице 2) фокусировалось с помощью объектива, имеющего 50-кратное увеличение, на торец микроструктурированного световода, предварительно очищенный от полимерного защитного покрытия. Образец световода фиксировался на координатном столике с точностью позиционирования 1 мкм. Сигнал на выходе световода регистрировался двумя спектрометрами видимого и инфракрасного излучения. Добавим, что изначально лазер генерировал импульсы фемтосекундной длительности, но с помощью стретчера длительность импульсов была увеличена до нескольких пикосекунд.

ТАБЛИЦА 2. Основные параметры иттербиевого лазера, который использовался в экспериментах по генерации суперконтинуума

Параметр	Значение
Центральная длина волны, нм	1030
Длительность импульса, пс	2
Пиковая мощность в импульсе, МВт	4,5
Частота следования импульсов, кГц	200
Средняя мощность, Вт	1,8
Энергия в импульсе, мкДж	9

В результате нелинейно-оптического преобразования пикосекундных лазерных импульсов в изготовленных образцах микроструктурированных световодов были получены спектры вторичного излучения для всех оптических элементов, за исключением световода с сердцевинной диаметром 11 мкм (рисунки 3–5).

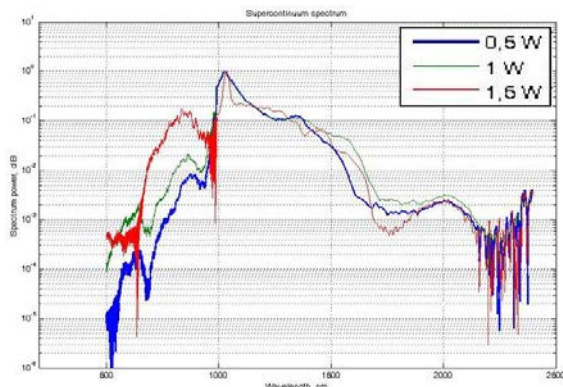


Рис. 3. Спектры вторичного излучения световода с сердцевинной диаметром 8 мкм

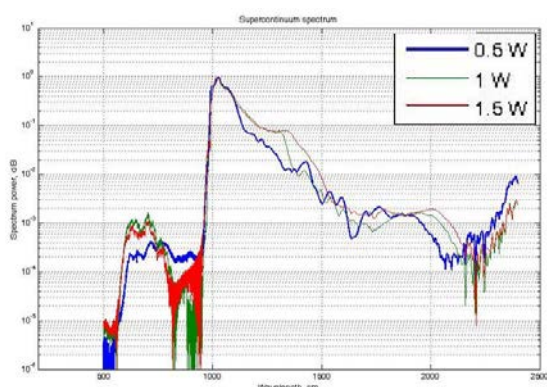


Рис. 4. Спектры вторичного излучения световода с сердцевинной диаметром 9 мкм

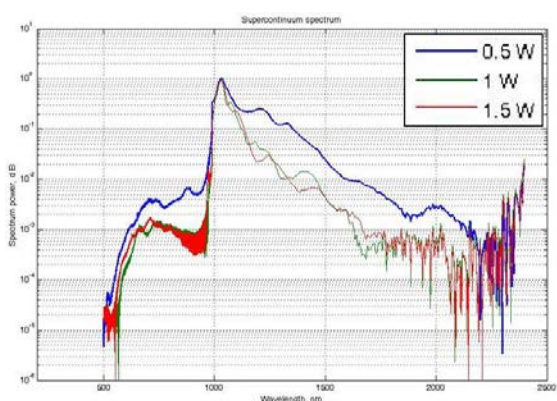


Рис. 5. Спектры вторичного излучения световода с сердцевинной диаметром 10 мкм

Из рисунков 3–5 видно, что увеличение диаметра сердцевины сокращает эффективность генерации суперконтинуума для любых значений средней мощности вводимого излучения. Это обусловлено, по-видимому, смещением спектрального положения нулевой дисперсии первой высшей моды

в длинноволновую область, снижающим эффективность преобразования излучения накачки в излучение суперконтинуума. Вместе с тем максимальное уширение спектра составило 1300 нм, при этом следует отметить достаточно эффективное преобразование излучения в коротковолновой области. Амплитуда антистоксовых компонент и равномерность спектра увеличиваются с возрастанием вводимой мощности.

Для изучения механизмов, ответственных за формирование вторичного излучения, были исследованы спектральные характеристики суперконтинуума, полученные при минимальном уровне мощности вводимого излучения (менее 0,5 Вт). На рисунке 6 представлен спектр вторичного излучения микроструктурированного световода с сердцевинной диаметром 8 мкм.

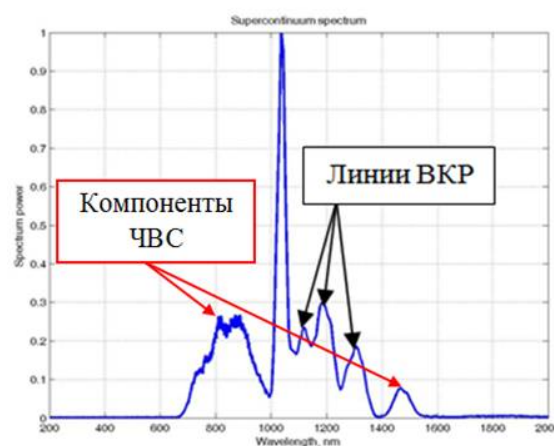


Рис. 6. Спектр вторичного излучения световода с сердцевинной диаметром 8 мкм, полученный при минимальном уровне мощности вводимого излучения (ЧВС – четырехволновое смешение, ВКР – вынужденное комбинационное рассеяние)

Обращает на себя внимание наличие двух изолированных спектральных компонент, расположенных на длинах волн 800 и 1450 нм (рисунок 6), что может являться следствием протекания процесса четырехволнового смешения. По этой причине был проведен анализ условий фазового согласования, определяющих этот механизм. Он достоверно показал, что для фундаментальной моды микроструктурированного световода условие фазового согласования не выполняется ни для одной из длин волн в рассматриваемом спектральном диапазоне.

Исходя из теоретического расчета для моды первого высшего порядка (рисунок 7), антистоксова и стоксова компоненты должны располагаться на длинах волн вблизи 800 и 1450 нм соответственно, что отвечает данным эксперимента. Увеличение мощности вводимого излучения приводит к смещению частотных полос, формируемых в результате четырехволнового смешения, относительно длины волны накачки.

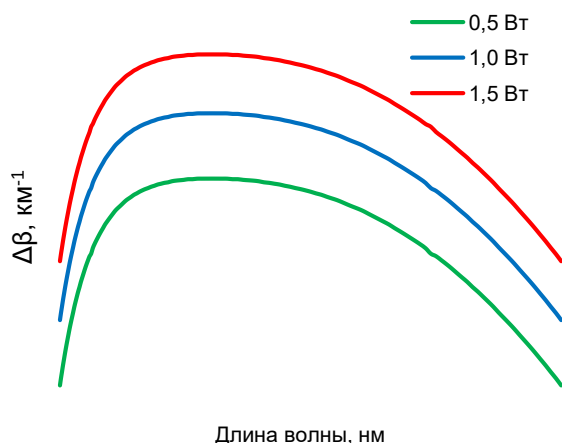


Рис. 7. Спектральная зависимость фазовой расстройки для первой высшей моды микроструктурированного световода с сердцевинной диаметром 8 мкм

За исключением частотных компонент, образованных вследствие протекания процесса параметрического четырехволнового смешения, на спектре (рисунок 6) можно отметить наличие рамановских линий в длинноволновой области. Исходя из теории, их положение определяется частотой молекулярных колебаний кварцевого стекла 440 см^{-1} [13]. Последующие пики находятся на расстоянии друг от друга 500 см^{-1} , 600 см^{-1} и так далее.

Дальнейшее уширение отдельных спектральных компонент и формирование равномерного спектра происходит в результате явления фазовой самоиндуцированной модуляции [13]. Это явление менее эффективно по сравнению с описанными ранее, однако свой вклад в уширение спектра также вносит.

Список используемых источников

1. Butcher P.N., Cotter D. The elements of nonlinear optics (Cambridge studies in modern optics). Cambridge University Press (UK), 1991. 344 p.
2. Bloembergen N. Nonlinear optics. World Scientific Publishing Company (SP), 1996. 188 p.
3. Shen Y.R. The principles of nonlinear optics. Wiley-Interscience (USA), 2002. 576 p.
4. Sutherland R.L. Handbook of nonlinear optics. Marcel Dekker (USA), 2003. 976 p.
5. Boyd R.W. Nonlinear optics. Burlington & San Diego (USA): Elsevier, 2008. 640 p.
6. New G. Introduction to nonlinear optics. Cambridge University Press (USA), 2011. 274 p.
7. He G.S. Nonlinear optics and photonics. Oxford University Press (UK), 2014. 688 p.
8. Rottwitt K., Tidemand-Lichtenberg P. Nonlinear optics: principles and applications (Optical sciences and applications of light). CRC Press (USA), 2014. 349 p.
9. Li C. Nonlinear optics: principles and applications. Springer (DE), 2016. 386 p.
10. Powers P.E., Haus J.W. Fundamentals of nonlinear optics. CRC Press (USA), 2017. 500 p.
11. He G.S., Liu S.H. Advanced nonlinear optics. World Scientific Publishing Company (SP), 2018. 600 p.
12. Agrawal G.P. Nonlinear fiber optics: its history and recent progress // J. Opt. Soc. Am. B. 2011. Vol. 28. No. 12. PP. A1-A10.
13. Agrawal G.P. Nonlinear fiber optics. Academic Press (UK): Elsevier, 2012. 648 p.
14. Alfano R.R. The supercontinuum laser source. Springer (USA), 2006. 538 p.
15. Dudley J.M. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber // Rev. Mod. Phys. 2006. Vol. 78. No. 4. PP. 1135-1184.
16. Ranka J.K., Windeler R.S., Stentz A.J. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm // Opt. Lett. 2000. Vol. 25. No. 1. PP. 25-27.
17. Knight J.C. Photonic crystal fibres // Nature. 2003. Vol. 424. No. 6950. PP. 847-851.
18. Russell P.St.J. Photonic crystal fibers // Science. 2003. Vol. 299. No. 5605. PP. 358-362.
19. Hansen K.P. Introduction to nonlinear photonic crystal fibers // J. Opt. Fiber Commun. Rep. 2005. Vol. 2. No. 3. PP. 226-254.
20. Zheltikov A.M. Nonlinear optics of microstructure fibers // Phys. Usp. 2004. Vol. 47. No. 1. PP. 69-98.
21. Song R., Hou J., Chen S., Yang W., Lu Q. High power supercontinuum generation in a nonlinear ytterbium-doped fiber amplifier // Opt. Lett. 2012. Vol. 37. No. 9. PP. 1529-1531.
22. Genty G., Ritari T., Ludvigsen H. Supercontinuum generation in large mode-area microstructured fibers // Opt. Express. 2005. Vol. 13. No. 21. PP. 8625-8633.

Отметим, что преобразование лазерных импульсов пикосекундной длительности в широкий спектр происходило в микроструктурированных световодах с сердцевинной диаметром 9 и 10 мкм, однако с меньшей эффективностью. Более того, в этих образцах практически отсутствовали новые частотные компоненты в коротковолновой области даже при увеличении средней мощности излучения накачки. Вероятно, это связано с тем обстоятельством, что длина волны нулевой дисперсии как для фундаментальной, так и для первой высшей мод располагалась далеко по отношению к длине волны излучения накачки, вследствие чего становилось невозможным выполнение условий фазового согласования, ответственного за наиболее эффективный механизм генерации вторичного излучения – четырехволновое смешение.

Таким образом, в статье теоретически и экспериментально исследованы нелинейно-оптические преобразования лазерных импульсов пикосекундной длительности в многомодовых микроструктурированных световодах, выполненных из кварцевого стекла, с относительно большой сердцевинной и умеренной оптической нелинейностью. Показано, что при накачке световодов в режиме нормальной дисперсии преобладающую роль в генерации спектра вторичного излучения играет процесс четырехволнового смешения, протекающий в первой высшей моде.

23. Savitski V.G., Yumashev K.V., Kalashnikov V.L., Shevandin V.S., Dukel'skii K.V. Infrared supercontinuum from a large mode area PCF under extreme picosecond excitation // Opt. Quant. Electron. 2007. Vol. 39. No. 15. PP. 1297–1309.
24. Leonov S.O., Lazarev V.A., Tarabrin M.K., Dvoret'skiy D.A., Pasishnik A.S., Pryamikov D.A. Visible supercontinuum generation in large-core photonic crystal fiber with high air-filling fraction // J. Phys. Conf. Ser. 2015. Vol. 584. No. 1. PP. 012015-1-012015-4.
25. Демидов В.В., Дукельский К.В., Шевандин В.С. Модовый состав излучения в микроструктурированных световодах со смещенной сердцевинной // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 6. С. 55–60.
26. Гатчин Ю.А., Демидов В.В., Дукельский К.В., Злобин П.А., Матросова А.С. Технологические основы получения механически стабильных одномодовых микроструктурированных световодов с предельно низким затуханием сигнала // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 4. С. 29–35.
27. Nielsen M.D., Folkenberg J.R., Mortensen N.A. Single-Mode Photonic Crystal Fiber with an Effective Area of $600 \mu\text{m}^2$ and low bending loss // Electron. Lett. 2003. Vol. 39. No. 25. PP. 1802–1803.
28. Minkovich V.P., Kir'yanov A.V., Sotsky A.B., Sotskaya L.I. Large-mode-area holey fibers with a few air channels in cladding: modeling and experimental investigation of the modal properties // J. Opt. Soc. Am. B. 2004. Vol. 21. No. 6. PP. 1161–1169.
29. Демидов В.В., Дукельский К.В., Тер-Нерсисянц Е.В., Шевандин В.С. Исследование одномодового режима работы микроструктурированных световодов с каналами вытекания излучения // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 5. С. 65–70.
30. www.comsol.com
31. Saitoh K., Koshiba M. Full-Vectorial Imaginary-Distance Beam Propagation Method Based on a Finite Element Scheme: Application to Photonic Crystal Fibers // IEEE J. Quant. Electron. 2002. Vol. 38. No. 7. PP. 927–933.
32. Olszewski J., Szpulak M., Urbanczyk W. Effect of Coupling Between Fundamental and Cladding Modes on Bending Losses in Photonic Crystal Fibers // Opt. Express. 2005. Vol. 13. No. 16. PP. 6015–6022.
33. Guobin R., Zhi W., Shuqin L., Shuisheng J. Mode Classification and Degeneracy in Photonic Crystal Fibers // Opt. Express. 2003. Vol. 11. No. 11. PP. 1310–1321.

* * *

NONLINEAR OPTICAL TRANSFORMATION OF PICOSECOND LASER PULSES IN MULTIMODE MICROSTRUCTURED FIBERS WITH LIMITED NONLINEARITY

V. Demidov¹, K. Dukelskii^{2,3}, S. Leonov⁴, A. Matrosova¹

¹Research and production association S.I. Vavilov State Optical Institute,
St. Petersburg, 192171, Russian Federation

²The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

³Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics,
St. Petersburg, 197101, Russian Federation

⁴Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, 105005, Russian Federation

Article info

Article in Russian

For citation: Demidov V., Dukelskii K., Leonov S., Matrosova A. Nonlinear Optical Transformation of Picosecond Laser Pulses in Multimode Microstructured Fibers with Limited Nonlinearity // Proceedings of Telecommunication Universities. 2018. Vol. 4. Iss. 1. PP. 61–66.

Abstract: The results of theoretical and experimental studies of the transformation of picosecond pulses of an ytterbium laser ($\lambda = 1030 \text{ nm}$) in silica-based microstructured fibers with an extremely high air-filling fraction and a core of diameters from 8 to 11 μm having a limited optical nonlinearity ($\gamma = 2\text{--}3 \text{ 1/(W}\cdot\text{km)}$) are presented. The prevailing role of the four-wave mixing process in the nonlinear transformation of radiation in the anti-Stokes part of the spectrum has been discovered when pumping optical fibers in the normal dispersion regime.

Keywords: microstructured fiber, multimode regime, optical nonlinearity, transformation of radiation, supercontinuum, four-wave mixing.