

МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ВОЛОКНА ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ СУПЕРКОНТИНУУМА

Введение

Настоящим прорывом в области развития оптических волноводов стало создание фотонно-кристаллических волокон (ФКВ). Оболочка в этих волокнах изготовлена из материала с тем же показателем преломления, что и у сердцевины, но выполнена она в виде набора плотно упакованных капилляров микронного и субмикронного размера (микроструктурированные волокна).

Волноводные моды электромагнитного излучения в МС-волокнах формируются в результате интерференции волн, возникающих при отражении и рассеянии на микронеоднородностях показателя преломления.

Любая неоднородность в фотонном кристалле называется дефектом фотонного кристалла, поскольку нарушает его периодичность. Область нарушения периодичности кристалла фактически является микрорезонатором, размер которой ограничена в двух измерениях. Длина волны основной моды излучения, сосредоточенного внутри дефекта структуры, может изменяться в пределах ширины запрещенной зоны посредством изменения размера либо формы дефекта [1].

Дефект в фотонном кристалле фактически создает волновод. На данном принципе удержания электромагнитного излучения в точечном дефекте фотонного кристалла созданы проводники оптического излучения, называемые фотонно-кристаллическими волноводами. Термин «фотонно-кристаллические волноводы», введенный Ф. Расселлом в 1995 г. [2, 3], обобщает типы оптических волноводов со сложной структурной оболочкой, сечение которой представляет собой двумерный фотонный кристалл.

В общем виде принцип построения и действия микроструктурированных (МС) волокон иллюстрируется на рис. 1.

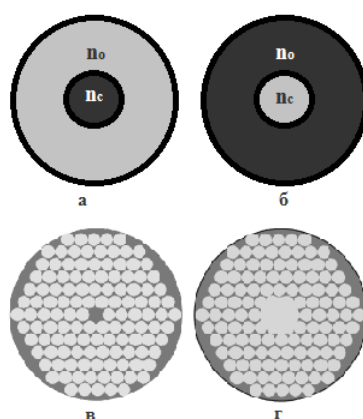


Рис. 1. Оптические волокна различной архитектуры: *a* – стандартное оптическое волокно, *б* – микроструктурированное волокно, *в* – стандартное полое волокно со сплошной оболочкой, *г* – полое волокно с фотонно-кристаллической оболочкой

В отличие от обычных оптических волокон (рис. 1, *a*), состоящих из сплошных сердцевины и оболочки с показателями преломления n_c и n_o соответственно, МС-волокна представляют собой кварцевую или стеклянную микроструктуру с периодически (период L) либо аперидически расположенными воздушными отверстиями (рис. 1, *б*). Подобная микроструктура изготавливается путем вытяжки при высокой температуре из преформы, набранной из полых капилляров, и принципиально технология производства МС схожа с процессом

приготовления стандартных волокон. Дефект микроструктуры, соответствующий отсутствию одного или нескольких воздушных отверстий (в центре структуры на рис 1, б), может выполнять функцию, аналогичную функции сердцевины стандартного волокна, и обеспечивать волноводный режим распространения электромагнитного излучения. Размер сердцевины получаемых волокон варьируется от значений одного (и даже меньше) до нескольких десятков микрон. За счет изменения диаметра и толщины стенок капилляров в оболочке можно варьировать процентное содержание воздуха в ней и изменять эффективный показатель преломления $n_{эфф}$ двухкомпонентной (воздух – стекло) среды. Волноводные моды в микроструктурированных волокнах формируются в результате интерференции отраженных и рассеянных волн, и их определение требует численного моделирования. Однако условие существования волноводных мод в сердцевине волокна, образуемой дефектом микроструктуры (рис. 1, б), можно записать в виде, аналогичном условию существования полного внутреннего отражения в обычном волокне: $n_{эфф} < n_c$.

МС-волокна обладают уникальными свойствами, позволяющими осуществлять нелинейно-оптическое преобразование лазерных импульсов [4] и формирование частотного профиля дисперсии собственных мод таких волокон путем изменения их структуры. Такие световоды позволяют реализовать сложные частотные профили дисперсии, которые не могут быть сформированы для стандартных оптических волокон. Как следствие, в МС-волокнах наблюдаются высокие коэффициенты нелинейности, которые определяют нелинейно-оптические явления и новые режимы спектрально-временного преобразования сверхкоротких лазерных импульсов. На рис. 2, а – в представлены изображения поперечного сечения МС-волокон с большой разностью показателя преломления сердцевины и эффективного показателя преломления оболочки, обеспечиваемой высоким удельным содержанием воздуха в оболочке.

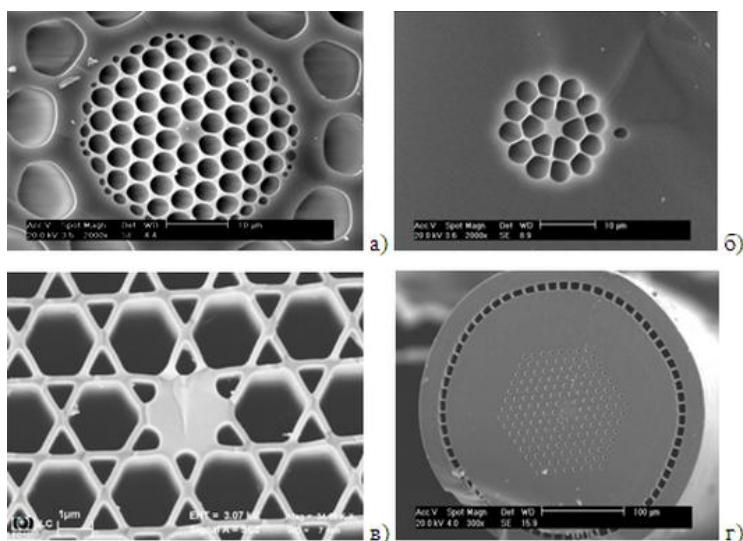


Рис. 2. Изображения поперечных сечений микроструктурированных световодов [5]:

а – в волокна с высокой оптической нелинейностью,
г – МС-световод с большой площадью сердцевины

Волокна этого типа позволяют достичь высокой степени локализации электромагнитного поля в сердцевине, что приводит к высоким значениям коэффициента нелинейности, определяющего эффективность нелинейно-оптических взаимодействий в волокне при заданной пиковой мощности лазерного импульса. Высокоэффективные волоконно-оптические преобразователи частоты сверхкоротких импульсов и источники излучения с широким непрерывным спектром (суперконтинуума), разработанные на основе МС-световодов с высокой оптической нелинейностью (рис. 2, а – в), позволяют решать фундаментальные задачи в области оптической метрологии и оптики сверхкоротких лазерных импульсов.

Воздушные отверстия достаточно малого диаметра в оболочке МС-волокна осуществляют фильтрацию собственных мод высокого порядка, позволяя реализовать одномодовый режим передачи излучения в световодах с большой площадью поперечного сечения (рис. 2, з). Для локализации излучения накачки во внутренней части МС-волокна и обеспечения наибольшего пространственного перекрытия излучения накачки и лазерного излучения в поперечном сечении волокна внутренняя микроструктурированная часть волокна изолируется от оболочки с помощью кольцевой системы воздушных отверстий большого диаметра (рис. 2, з) [5].

Цель настоящей работы – исследование условий генерации суперконтинуума в волокне с решетчатой структурой типа «кагоме».

Генерация суперконтинуума

Одним из важных приложений нелинейной оптики является генерация суперконтинуума, т. е. когерентного электромагнитного излучения со сверхшироким спектром. Генерация суперконтинуума, впервые полученная в 1970 г. на лазере с синхронизацией мод в стеклянном образце [6], была продемонстрирована также в воде [7] и газовом потоке [8]. Появление фемтосекундных лазеров, работающих на длинах волн 1,3 и 1,5 мкм, позволило получить генерацию суперконтинуума в обычных волоконных световодах. Параметры суперконтинуума имеют более широкий и четкий спектральный диапазон, если длина волны импульсов накачки располагается в области длин волн нулевой дисперсии групповых скоростей волновода. В этом случае нелинейные эффекты в волокне при распространении импульса доминируют над дисперсионными эффектами [9], что дало возможность уменьшить длины световодов с километров до нескольких десятков метров. При этом стали широко применяться световоды, в структуре которых содержится материал с большим коэффициентом нелинейности, а также световоды со специальным дисперсионным профилем, изменяющимся по длине волокна [10]. Их использование позволило осуществить генерацию суперконтинуума шириной более 300 нм.

Впервые в ФКВ генерация суперконтинуума была продемонстрирована в [11]. В экспериментах [11] использовались импульсы титан-сапфирового лазера длительностью 100 фс на длине волны 800 нм, которые вводились в ФКВ длиной 75 см; при этом выходное излучение имело непрерывный спектр в области 400 – 1600 нм. В работе [12] получена генерация суперконтинуума в ИК диапазоне 700 – 2500 нм при возбуждении ФКВ со сплошной сердцевиной, изготовленного из свинцово-висмутово-галиевого стекла. Накачка от оптического параметрического генератора (1540 нм, 120 фс) позволяла обеспечить хорошую (на уровне 5 дБ) равномерность спектра в диапазоне 1000 – 2500 нм.

Существует ряд особенностей и режимов, характерных только для нелинейно-оптических взаимодействий в МС-волокнах, не наблюдающихся ни в объеме твердого тела, ни в газовой фазе, ни в обычных оптических волокнах. Ключевые преимущества МС-волокон как генераторов белого света и преобразователей частоты связаны с возможностями активного формирования профиля дисперсии волноводных мод [13] и управления оптической нелинейностью путем изменения структуры МС-волокна [14]. Структурная модификация дисперсии МС-волокон позволяет сформировать частотные профили ДГС, которые не могут быть реализованы с помощью стандартных волоконных технологий. Уникальные дисперсионные свойства МС-волокна позволяют наблюдать новые нелинейно-оптические явления, такие как подавление солитонного сдвига частоты [5], генерация третьей гармоники на частоте, отличной от утроенной частоты накачки, скалярные и векторные [15] модуляционные неустойчивости новых типов. Определенный тип структуры МС-волокон позволяет добиться сдвига точки нулевой ДГС в область 750 – 800 нм. Волокна этого класса позволяют наблюдать интересные солитонные явления для фемтосекундных импульсов лазера на титанате сапфира и обеспечивают высокие эффективности нелинейно-оптического преобразования таких им-

пульсов, включая возможность эффективной генерации спектральных компонент в видимой части спектра.

Основные физические механизмы эффективной генерации суперконтинуума в МС-волокнах связаны с фазовой само- и кросс-модуляцией, четырехволновыми взаимодействиями и модуляционными неустойчивостями. Наибольшие эффективности спектрального преобразования сверхкоротких импульсов в МС-волокнах достигаются в режиме аномальной дисперсии. В этом режиме ключевую роль играют солитонные явления, такие как солитонный сдвиг частоты [16], приводящий к низкочастотному смещению центральной частоты солитона, и солитонные неустойчивости [17], индуцирующие излучение новых спектральных компонент, смещенных в высокочастотную область спектра. Межмодовое фазовое согласование может приводить к возникновению интенсивного сигнала вблизи частоты третьей гармоники [18], который может вносить существенный вклад в генерацию широкополосного излучения на выходе волокна.

Фотонно-кристаллическое волокно типа «Кагоме»

Первые результаты изучения и моделирования генерации суперконтинуума в ФКВ представлены в работах [19 – 21], из которых следует, что на генерацию сверхширокого спектра оказывают влияние солитонные эффекты. Подтверждение этому было получено в 2010 г. [22]. Когда сверхкороткие импульсы света посылаются по ФКВ для получения суперконтинуума, уширение спектра в пределах всего видимого и ИК диапазонов вызывает рождение солитонов – нелинейных уединенных волн, которые сохраняют форму и скорость при собственном движении и столкновении с себе подобными волнами. Единственным результатом взаимодействия солитонов может быть сдвиг фаз. Солитоны блокируют световые импульсы, следующие за ними, заставляя их сокращать длину волны и становиться более «синими», тогда как сами солитоны удлиняются, становясь более «красными». Этот двойной эффект приводит к расширению спектра одновременно в обоих направлениях, в результате чего на выходе волокна генерируется излучение с ультраширокой полосой частот, что характерно для суперконтинуума. Подобный эффект наблюдается при генерации суперконтинуума с применением микроструктурированного волокна типа «кагоме», характеристику которого рассмотрим далее. Волокно типа «кагоме», анализ которого проводился в работе, результаты которой представлены в данной статье, изготовлено на технической базе Саратовского Государственного университета им. Н.Г. Чернышевского.

МС-волокно типа «кагоме» (рис. 3) изготовлено из стекла электровакуумной группы С-52-2 и имеет следующие параметры: внешний диаметр структуры 212.98 мкм, диаметр дефекта 4 мкм, внешний диаметр дефекта 12.54 мкм, диаметр малых отверстий 2.62 мкм, период отверстий в дефекте 4.23 мкм, диаметр окружающих отверстий 8.09 мкм.

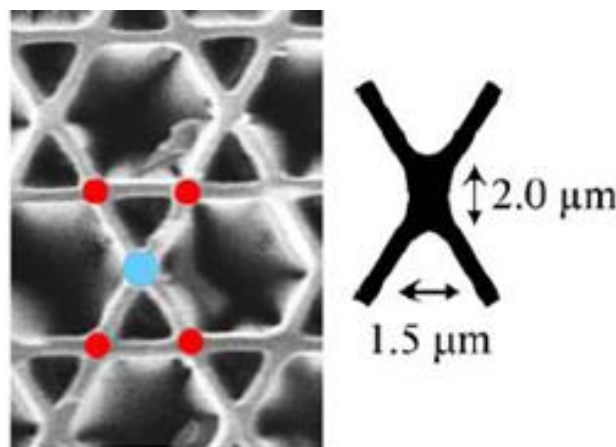


Рис. 3. МС-волокно с периодической структурной оболочкой типа «кагоме» [23]

Решетка состоит из шестиугольных ячеек шириной 7 мкм и равносторонних треугольных ячеек со сторонами 5 мкм. В решетке типа «кагоме» четыре соседних перехода расположены на расстоянии 5 мкм друг от друга и находятся в пересечении с двумя треугольниками. Пересечение двух плоскостей решетки в структуре проявляется как немного округлый узел, с гладким вогнутым переходом между двумя пересекающимися плоскостями. Свет направляется в плоскость пересечения, ориентировочно на 30 и 60 градусов относительно двух плоскостей. Ни одна из основных поляризационных осей не параллельна любым пересекающимся плоскостям решетки «кагоме». Основная структура (шириной 2 мкм вдоль быстрой (абсцисса) оси и 1.5 мкм – вдоль медленной (ординат) оси) открывает геометрический крест, разделяющий основные пересечения менее 3 мкм. Вместе с высокой нелинейностью стекла можно получить огромный нелинейный коэффициент волокна $\gamma = 0,15W^{-1}m^{-1}$ [24].

По сути, из-за полного внутреннего отражения, любой X-образный перекресток способен направлять свет на произвольные расстояния, если нет потерь на сцеплении с соседним пересечением и если X-образная структура ограничена в поперечном измерении. Впрочем, соединение с соседними пересечениями невозможно без потерь, поэтому периодические структуры не могут использоваться для передачи света на расстояние, необходимое для спектрального уширения. Тем не менее, в структуре решетки «кагоме» утечки в соседние клетки решетки заметно слабее, чем в других фотонных кристаллах. Это свойство не ограничивается самой структурой, но, как правило, проявляется на сочетании относительно небольших направляющих каналов и высоких и удлиненных суспензий. Поэтому полное внутреннее отражение позволяет малым потерям направляться в решетчатую структуру «кагоме». Во многом это фотонно-кристаллическое волокно ведет себя очень похоже на прочие микроструктурированные волокна, которые имеют очень маленькие ядра [24].

X-образная структура волокна «кагоме» позволяет узнать данные по поляризации, как на входе волокна и на его выходе. Используя поляризационную пластину, можно выборочно подавать энергию в любую из поляризационных мод. При использовании второго поляризатора на выходе в качестве анализатора появляется возможность контролировать белый свет в режимах параллельном и перпендикулярном к входному положению. Как видно из рис. 4, всегда можно обнаружить свет в обоих направлениях поляризации собственных мод, независимо от того, какой режим поляризации возбужден. Спектр континуума по медленной оси обычно смещается в сторону более длинных волн, в то время как генерация континуума по быстрой оси приводит к более сбалансированному спектру. Самый широкий спектр наблюдается по быстрой оси, при условии возбуждения той же оси. Этот спектр занимает промежуток от 600 до 950 нм. Видно, что ширина и форма экспериментальных спектров сильнее зависят направления анализатора после волокна, чем от входного импульса поляризации. Более широкий спектр генерируется с электрическим полем, поляризованным параллельно быстрой оси. Кроме того, длина волны накачки находится дальше от длины волны нулевой дисперсии, в результате чего спектр простирается дальше в сторону коротких волн.

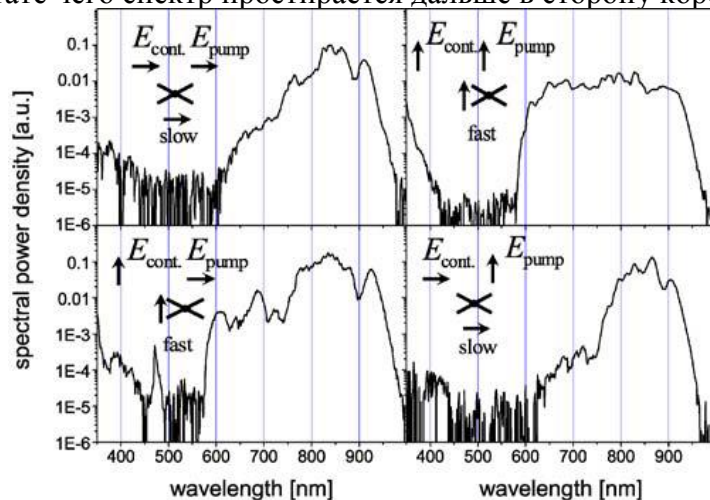


Рис. 4. Зависимость спектра от накачки и поляризации [25]

Исследования проводились на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 5. Ti-Sa лазер, работающий в режиме синхронизации мод, генерировал периодическую последовательность импульсов на частоте 88 МГц, длительностью 20 фс, с центральной длиной волны 807 нм и возможностью перестройки мощности в пределах от 140 до 315 мВт. Излучение подавалось на линзу Л с фокусным расстоянием 2 мм, в фокальной плоскости линзы размещался торец фотонно-кристаллического волокна, установленного на юстировочный узел, дающий возможность точной юстировки во всех плоскостях. Длина ФКВ составляла 15 см. На выходе фотонно-кристаллического волокна размещался спектрометр со спектральной чувствительностью 300 – 1000 нм.

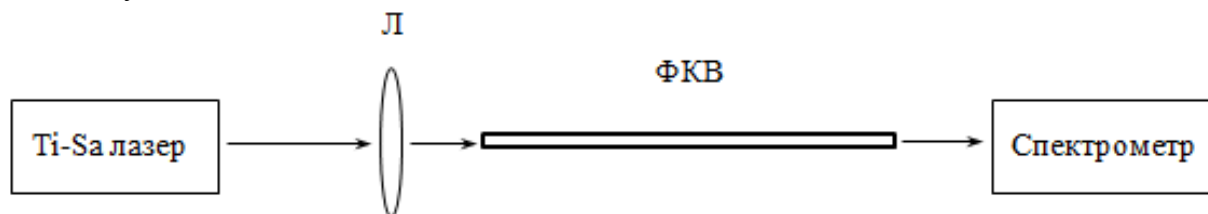


Рис. 5. Блок-схема экспериментальной установки

Спектр лазерного излучения вводимого в ФКВ представлен на рис. 6.

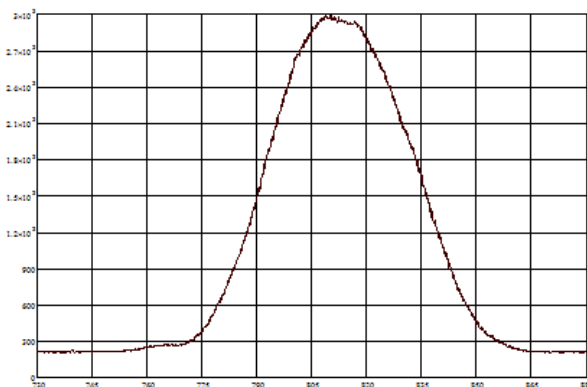


Рис. 6. Спектр излучения Ti-Sa лазера на входе в ФКВ

В ходе эксперимента проводились изменения мощностных параметров вводимого излучения, небольшая перестройка центральной длины волны, уменьшения ширины спектра и изменения углов введения излучения в ФКВ. Но спектр на выходе ФКВ отличался незначительно от вводимого в него спектра, он включал в себя несколько частотных провалов, связанных с проводимостью материалов, из которых было изготовлено ФКВ.

Исходя из данных, полученных при проведении эксперимента, и сопоставления их с данными, полученными при анализе литературы [26, 27], сделан вывод, что генерация суперконтинуума в нелинейных средах осуществляется при смещении центральной длины волны в более длинноволновую часть спектра (рис. 7).

Исходя из данных результатов и того, что в экспериментах используются отличающиеся по строению и составу волокна, можно сделать вывод, что данный нелинейный эффект может проявляться при накачке импульсами с большей длиной волны. Ti-Sa лазер имеет возможность перестройки в длинноволновую область, однако это влечет за собой техническое вмешательство и модернизацию экспериментальной установки, что будет в дальнейшем осуществляться в работе.

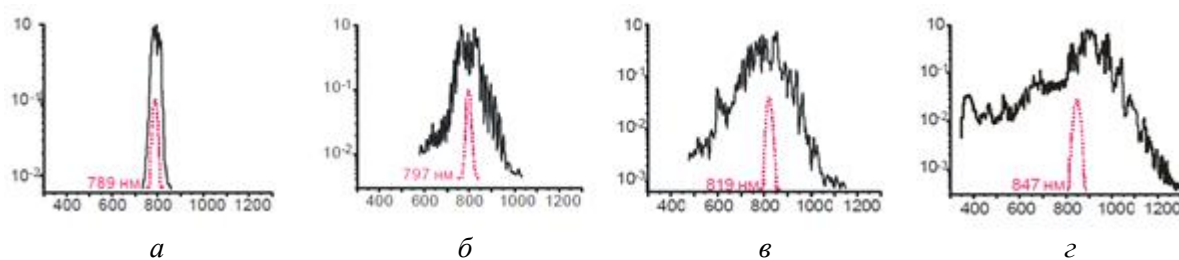


Рис. 7. Спектры излучения на выходе вытянутого световода при изменении длины волны фемтосекундных импульсов накачки. Штриховая линия – спектр излучения импульсов накачки [26]; а – 789 нм, б – 797 нм, в – 819 нм, з – 847 нм

Заклучение

Рассмотрено отличие микроструктурированных волноводов в сравнении со стандартными оптическими волокнами. В частности, это касается структуры оболочки самих микроструктурированных волокон, а также высокой степени локализации. Микроструктурированные волокна являются перспективным средством для генерации суперконтинуума.

Также рассмотрены вопросы, касающиеся генерации суперконтинуума в волокнах, изучена возможность применения микроструктурированных волокон, их физический механизм для получения когерентного электромагнитного излучения со сверхшироким спектром.

В результате эксперимента установлены основные условия, необходимые для генерации суперконтинуума в волокне с решетчатой структурой типа «кагоме», с применением фемтосекундного Ti-Sa лазера в режиме синхронизации мод. В ходе эксперимента получены незначительные изменения в спектре излучения. Исключения составляют несколько частотных провалов, связанных с проводимостью материалов, из которых было изготовлено ФКВ. Дальнейшая работа направлена на модернизацию установки, в частности на перестройку Ti-Sa лазера в длинноволновую область.

Список литературы: 1. Birks, T.A., Roberts, P.J., Russell, P.St.J. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding // *Electron. Lett.*, 31, 1995. 2. Knight, J.C., Birks, T.A., Russell, P.St.J. Photonic crystal fibres // *Opt.Lett.*, 21, 1996. 3. Тучин, В.В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. – М. : Физматлит, 2010. – 500 с. 4. Желтиков, А. М. Оптика микроструктурированных волокон. – М. : Наука, 2004. 5. Желтиков, А.М. Нелинейная оптика микроструктурированных волокон // *Успехи физических наук.* – 2004. – Т.174. – С.73-96. 6. Alfano, R.R., Shapiro, S.L. Observation of Self-Phase Modulation and Small-Scale Filaments in Crystals and Glasses // *Phys. Rev. Lett.*, 24 (11), 1970. 7. Lee Smith W. Liu P. Bloembergen N. Superbroadening in H_2O and D_2O by self-focused picosecond pulses from a YAlG: Nd laser // *Phys. Rev. A*, 15 (6), 1977. P. 23-96. 8. Fork, R.L., Shank, C.V., Hirlimann, C. Femtosecond white-light continuum pulses // *Opt. Lett.*, 8 (1), 1983. 9. Nowak, G.A., Kim, J., Islam, M.N. Stable supercontinuum generation in short lengths of conventional dispersion-shifted fiber // *Appl. Opt.*, 38 (36), 1999. 10. Mori, K., Takara, H., Kawanishi, S. J. Analysis and design of supercontinuum pulse generation in a single-mode optical fiber // *Opt. Soc. Am. B*, 18 (12), 2001. 11. Ranka, J.K., Windeler, R.S., Stentz, A.J. Optical properties of high-delta air silica microstructure optical fibers // *Opt. Lett.*, 25, 2000. 12. Buczynski, R., Bookey, H.T., Pysz, D. Laser Supercontinuum generation up to 2.5 μm in photonic crystal fiber made of lead-bismuth-galate glass // *Phys. Lett.*, 7 (9). P. 666, 2010. 13. Reeves, W H, Skryabin, D V, Biancalana, F. Transformation and control of ultra-short pulses in dispersion-engineered photonic crystal fibres // *Nature*, P. 424-511, 2003. 14. Russell, P St J. Photonic crystal fibers // *Science*, vol. 299. P. 358-362, 2003. 15. Hu Minglie, Wang C-y, Li Y, Wang Z Enhanced nonlinear effects in photonic crystal fibers // *Appl. Phys. B*, 79 P. 805, 2004. 16. Dianov, E M, Karasik, A Y, Mamyshev, P.V. Stimulated-raman conversion of multi soliton pulses in quartz optical fibers // *JETP Lett.* 41. P. 294, 1985. 17. Chien, F.C., Lin, C.Y., Yih. J.N. Molecular fluorescence, phosphorescence, and chemiluminescence spectrometry // *Bioelectron.*, 22, 2737, 2007. 18. Efimov, A, Taylor, A.J, Omenetto, F.G. Phase-matched third harmonic generation in microstructured fibers // *Opt. Express* 11, 2567, 2003. 19. Husakov, V.A., Herrmann, J. Supercontinuum Generation of Higher-Order Solitons by Fission in Photonic Crystal Fibers // *Phys. Rev. Lett.*, 87, 203901,

2001. 20. *Herrmann, J., Grabner, U., Zhavoronkov, N., Husakou, A.* Experimental Evidence for Supercontinuum Generation by Fission of Higher-Order Solitons in Photonic Fibers // *Phys. Rev. Lett.*, 88, 173901, 2002. 21. *Gaeta, L.A.* The Supercontinuum Laser Source: Fundamentals with Updated References // *Opt.Lett.*, 27, 924, 2002. 22. *Skryabin, D.V., Gorbach, A.V.* Looking at a soliton through the prism of optical supercontinuum // *Rev. Mod. Phys.*, 82, 1287, 2010. 23. *Скибина, Ю.С., Тучин, В.В., Белоглазов, В.И.* Фотонно-кристаллические волноводы в биомедицинских исследованиях // *Квантовая электроника*. – 2011. – Т. 41, №4. 24. *Magi, E.C., Steinvurzel, P., Eggleton, B.J.* Tapered photonic crystal fibers // *Opt. Express* 12, 776, 2004. 25. *Glas, P., Fischer, D., Steinmeyer, G.* Supercontinuum generation in a two-dimensional photonic kagome crystal // *Appl. Phys. B*, 00, P. 1-9, 2005. 26. *J. K. Ranka* Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion 800 nm // *Optics Letters*, 25(1), P.25-27, 2000. 27. *Кобцев, С.М.* Волоконные генераторы управляемого суперконтинуума : дис. ... д-ра физ-мат. наук / Новосибир. гос. ун-т. – Новосибирск, 2010.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 28.07.2015