

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СПОНТАННОГО ЧЕТЫРЁХВОЛНОВОГО СМЕШЕНИЯ В НАНОВОЛОКНАХ С ПЕРЕМЕННЫМ СЕЧЕНИЕМ

А.А. Шухин¹, А.А. Калачёв^{1,2}

¹ Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского
Казанского научного центра Российской академии наук, Казань, Россия,

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

Аннотация

Исследованы особенности генерации двухфотонных состояний в процессе спонтанного четырёхволнового смешения в нановолокне с переменным сечением. Произведён расчёт функций фазового синхронизма и рассмотрены интерференционные эффекты, возникающие при генерации бифотонов в суженном оптоволокне. Исследовано влияние окружения нановолокна на спектр бифотонного поля.

Ключевые слова: спонтанное четырёхволновое смешение, нановолокно, коррелированные фотоны, ИК-спектроскопия.

Цитирование: Шухин, А.А. Спектральные особенности спонтанного четырёхволнового смешения в нерегулярных нановолокнах с переменным сечением / А.А. Шухин, А.А. Калачёв // Компьютерная оптика. – 2016. – Т.40, №2. – С. 141-146. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-141-146.

Введение

В настоящее время много внимания уделяется фундаментальным исследованиям, направленным на развитие квантовых оптических технологий [1]. Среди них можно выделить исследования разнообразных когерентных и нелинейных оптических эффектов, которые наблюдаются при взаимодействии квантовых состояний света с нелинейными материалами, т.е. материалами, обладающими значительными коэффициентами нелинейности второго/третьего порядка. В частности, спонтанное параметрическое рассеяние (СПР) и спонтанное четырёхволновое смешение (СЧВС) используются для создания источников перепутанных двухфотонных и однофотонных состояний света [2]. С этой точки зрения весьма перспективными объектами являются оптические нановолокна, имеющие диаметр меньше длины волны излучения [3–6]. В технологическом плане такие волокна позволяют создавать миниатюрные оптические схемы, для которых характерны малые потери и малое энергопотребление, а возможность эффективного связывания обычного и нановолокна позволяет делать эти схемы совместимыми с интегральной и нанофотонной оптикой. В связи с этим актуальной задачей является изучение особенностей протекания нелинейных оптических явлений в таких системах.

На данный момент исследования нелинейных оптических эффектов в нановолокнах ведутся во многих лабораториях мира. Среди результатов, полученных в последнее время и наиболее близко относящихся к настоящей работе, можно выделить следующие: осуществлена генерация второй и третьей оптических гармоник [7, 8], развита теория трёхфотонного СПР в нановолокне [9, 10], экспериментально реализована генерация коррелированных пар фотонов в режиме СЧВС [11, 12]. При теоретическом анализе СПР или СЧВС обычно рассматривается идеальный случай однородного нановолокна. Однако в действительности профили нановолокон далеки от идеальных, что

должно сказываться на свойствах генерируемого излучения. Целью настоящей работы является изучение спектральных особенностей СЧВС в нерегулярном нановолокне.

Модель нановолокна

В качестве нерегулярного нановолокна в настоящей работе рассматривается суженное волокно переменного сечения (рис. 1), полученное из стандартного оптического волокна методом нагрева и растяжения. Стандартным считается одномодовое волокно, имеющее диаметр оболочки, равный 125 мкм, а диаметр сердцевинки – 10 мкм. При нагревании и растяжении данное соотношение диаметров (125 мкм/10 мкм=12,5) сохраняется на всём протяжении оптоволокна.

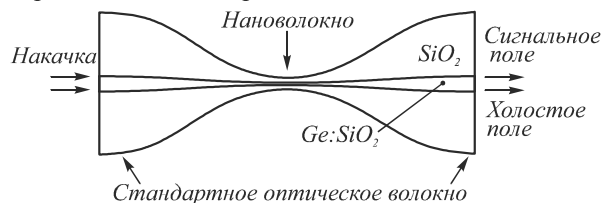


Рис. 1. Схематическое изображение суженного волокна

С помощью проведённых численных расчётов показано, что для генерации фотонов на длинах волн 1550 нм и 810 нм в процессе СЧВС от излучения накачки на длине волны 1064 нм, в соответствии с условиями фазового синхронизма

$$2\omega_p = \omega_s + \omega_i, \quad (1)$$

$$2\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i, \quad (2)$$

где $\omega_j = 2\pi c / \lambda_j$ ($j = p, s, i$), диаметры ядра и оболочки должны быть равны 74 нм и 925 нм соответственно. Именно такой диаметр задавался в области перетяжки суженного волокна. В адиабатическом приближении профиль суженного волокна, который обычно описывается экспоненциальной функцией, должен изменяться достаточно медленно. В нашем случае рассматривается суженное волокно длиной

10 см, имеющее наименьший диаметр в центре и зеркально симметричную форму относительно центральной точки. Зависимость радиуса волокна от продольной координаты можно записать в следующем виде:

$$r(z) = (r_{\max} + r_{\min}) - r_{\max} \times \exp\left(-\frac{(z - L/2)^2 \ln(r_{\max}/r_{\min})}{(L/2)^2}\right), \quad 0 \leq z \leq L, \quad (3)$$

где $r_{\max} = 125$ мкм, $r_{\min} = 0,406$ мкм, $L = 10$ см. Данный профиль часто встречается в экспериментах.

Основные результаты

Следуя методу поперечных сечений [13], нерегулярное нановолокно с переменным сечением разбивается на короткие участки с постоянным сечением (рис. 2), так что результирующее поле СЧВС есть сумма полей, генерируемых на каждом участке вдоль всей длины нановолокна. При этом на разных участках разбиения условию фазового синхронизма удовлетворяют разные волновые векторы бифотонов, поскольку они пропорциональны эффективным показателям преломления мод, которые, в свою очередь, зависят от диаметра волокна. Таким образом, в каждом участке будут рождаться фотоны с определённой длиной волны, присущей только данному сечению. В результате, спектр поля СЧВС в нерегулярном нановолокне будет уширен по сравнению с нановолокном постоянного сечения.

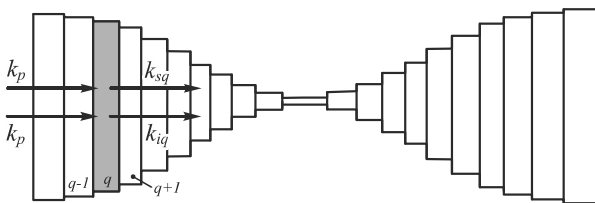


Рис. 2. Схематичное изображение нерегулярного нановолокна, рассматриваемого в рамках метода поперечных сечений; k_p – волновой вектор излучения накачки, k_{iq} и k_{sq} – волновые векторы холостого и сигнального фотонов соответственно родившихся в сечении с индексом q .

В рассматриваемом процессе СЧВС два фотона накачки (p) на длине волны 1064,4 нм уничтожаются с рождением сигнального (s) и холостого (i) фотонов посредством взаимодействия с нановолокном, имеющим $\chi^{(3)}$ нелинейность. Состояние бифотонного поля, генерируемого в процессе СЧВС, может быть рассчитано в первом порядке теории возмущения квантовой механики. Вектор состояния бифотонного поля можно записать в следующем виде:

$$|\psi\rangle = |0\rangle + A \iint d\omega_s d\omega_i F(\omega_s, \omega_i) \times a_{m,n_s}^+(\omega_s) a_{m,n_i}^+(\omega_i) |0\rangle, \quad (4)$$

где $|0\rangle$ – вакуумное состояние поля, $a_{mn}^+(\omega)$ – оператор рождения фотона на частоте ω в пространственную

моду, характеризуемую поперечными индексами m, n и модовой функцией $u_{mn}(\rho)$, $\rho = (x, y)$, $\int d^2\rho |u(\rho)|^2 = 1$,

$$F(\omega_s, \omega_i) = f(\omega_s, \omega_i) \Phi(\omega_s, \omega_i) \quad (5)$$

– совместная спектральная амплитуда, $f(\omega_s, \omega_i) = \int d\omega_p E_p(\omega_p) E_p(\omega_s + \omega_i - \omega_p)$ – свёртка двух функций $E_p(\omega)$, описывающих спектральную амплитуду импульсов накачки,

$$\Phi(\omega_s, \omega_i) = \sum_{q=1}^N \left[l_q \operatorname{sinc} \left[\frac{\Delta k_q(\omega_s, \omega_i) l_q}{2} \right] \times \exp \left[\frac{-i \Delta k_q(\omega_s, \omega_i) l_q}{2} \right] \exp \left(\sum_{i=q+1}^N -i \Delta k_i (L - l_i) \right) \right] \times \eta_{m_p n_p m_p n_p m_s n_s m_i n_i}^q \quad (6)$$

– функция фазового синхронизма, $N = L/l_q$ – число сечений волокна, l_q – длина сечения с индексом q (в нашем случае $l_q = 200$ мкм), L – общая длина волокна с переменным сечением,

$$\Delta k_q(\omega_s, \omega_i) = \frac{2\omega_p n_{m_p n_p}^{eff}(\omega_p)}{c} - \frac{\omega_s n_{m_s n_s}^{eff}(\omega_s)}{c} - \frac{\omega_i n_{m_i n_i}^{eff}(\omega_i)}{c} \quad (7)$$

– расстройка волновых векторов,

$$\eta_{m_p n_p m_p n_p m_s n_s m_i n_i}^q = \int d^2\rho u_{m_p n_p}(\rho) u_{m_p n_p}^*(\rho) u_{m_s n_s}^*(\rho) u_{m_i n_i}(\rho) \quad (8)$$

– интеграл перекрытия взаимодействующих мод в сечении с индексом q , n_{mn}^{eff} – эффективный показатель преломления моды, характеризуемой поперечными индексами m и n .

Эффективные показатели преломления n^{eff} и пространственное распределение различных мод нановолокна $u_{mn}(\rho)$ рассчитаны с использованием коммерческой среды моделирования физических процессов Comsol Multiphysics. Формулы Сельмейера для $n_{Ge:SiO_2}(\lambda)$ (сердцевины волокна) и $n_{SiO_2}(\lambda)$ (оболочки волокна) взяты из [14]. При расчётах рассмотрен наиболее эффективно протекающий процесс взаимодействия фундаментальных мод с индексами $m = n = 0$. При анализе спектральных свойств бифотонного поля предполагалось, что накачка представляет собой импульсное излучение, обладающее спектральной шириной 1 нм. Основной характеристикой при этом является двухфотонная плотность вероятности

$$N(\omega_s, \omega_i) = |F(\omega_s, \omega_i)|^2, \quad (9)$$

которая характеризует совместное распределение фотонов по частоте.

На рис. 3а изображена зависимость эффективного показателя преломления n^{eff} для фундаментальных мод от продольной координаты z . Резкое уменьшение эффективного показателя преломления в области нановолокна соответствует расширению моды в окружающее пространство, т.е. образованию эванесцентного поля. При этом вероятность

процесса СЧВС, которая определяется интегралом перекрытия взаимодействующих мод, резко возрастает (рис. 3б).

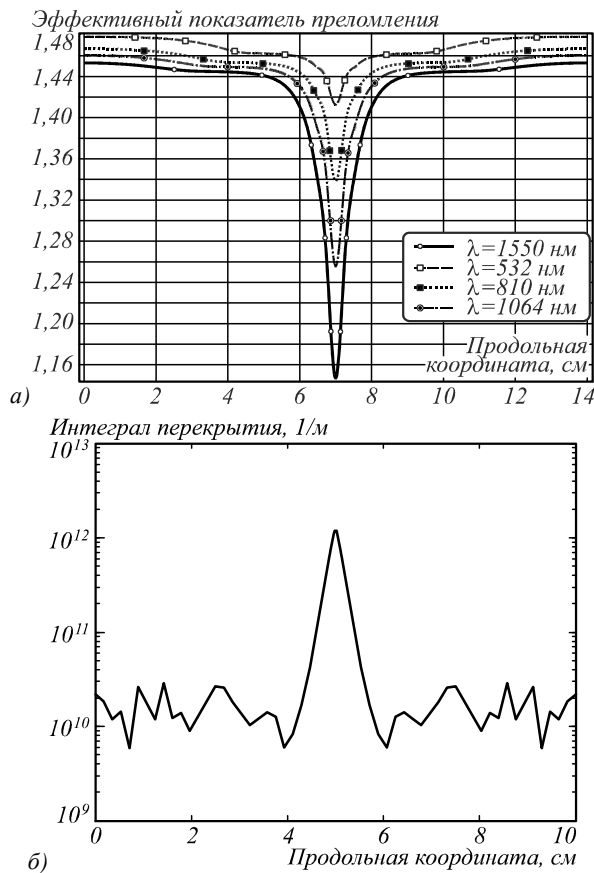


Рис. 3. Зависимость эффективного показателя преломления фундаментальных мод суженного волокна от продольной координаты (а); зависимость интеграла перекрытия между наиболее эффективно взаимодействующими TE_{00} модами от продольной координаты (б)

Суженное волокно включает в себя сечения различных диаметров. По этой причине спектр излучения будет уширен в пределах диапазона, соответствующего спектрам излучения однородного стандартного волокна и однородного нановолокна (рис. 4). Кроме того, спектр будет иметь ярко выраженную асимметрию, поскольку вероятность четырёхволнового смешения резко возрастает с уменьшением диаметра волокна.

Уширение спектра излучения в нерегулярном нановолокне относительно спектра излучения волокна постоянного диаметра может быть проанализировано с помощью ширин на полувысоте соответствующих спектров. Спектральная ширина излучения, равная ширине на полувысоте спектра мощности, в случае однородного нановолокна длиной 10 см получается равной 25 нм для холостого поля и 10 нм для сигнального поля, а в случае однородного «стандартного» волокна длиной 10 см – 13 нм для холостого поля и 1,2 нм для сигнального поля. В нерегулярном нановолокне длиной 10 см спектральная ширина воз-

растает до ~500 нм для холостого поля и ~100 нм для сигнального поля.

При сложении излучения, генерируемого в различных сечениях суженного волокна, в спектре бифотонного поля наблюдается интерференционная картина (рис. 5).

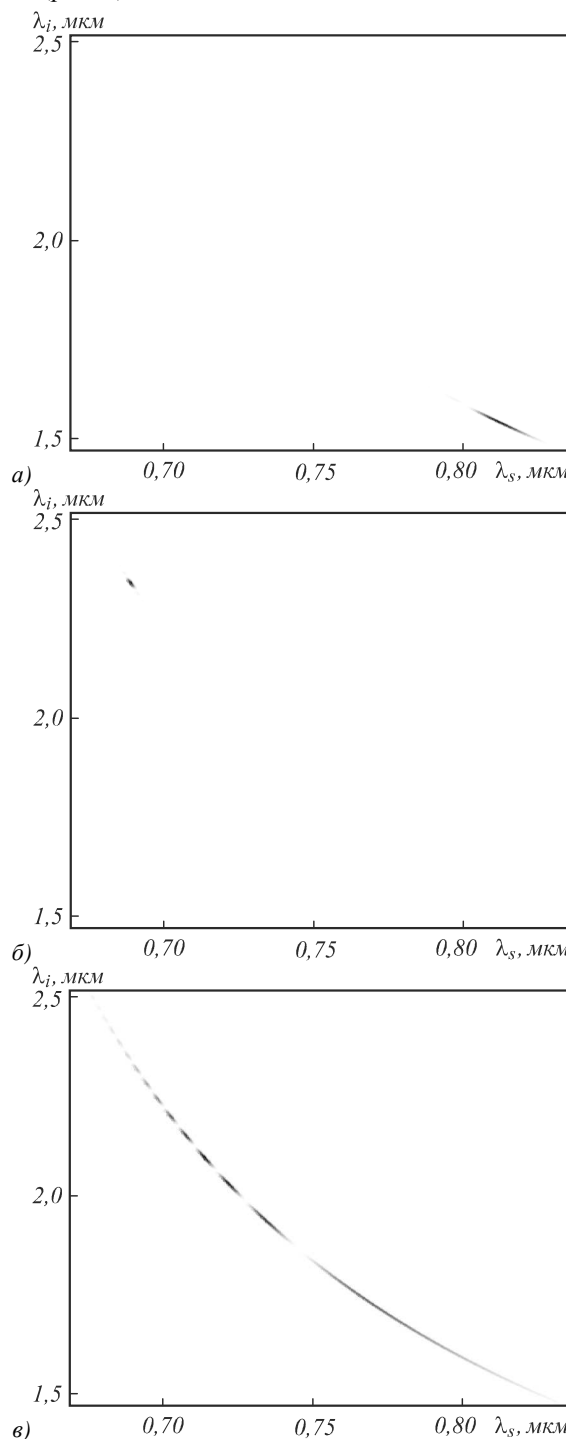


Рис. 4. Двухфотонная плотность вероятности для нановолокна диаметром 925 нм (а), «стандартного» волокна диаметром 125 мкм (б) и суженного волокна (в)

По смещению интерференционной картины можно с высокой точностью определять изменение показателя преломления среды, окружающей суженное

нановолокно. Для примера, на рис. 6 показано, как при изменении показателя преломления среды в области длин волн холостого поля (1,5–2 мкм) на величину 0,005 наблюдается смещение спектральной амплитуды на длинах волн как сигнального, так и холостого поля.

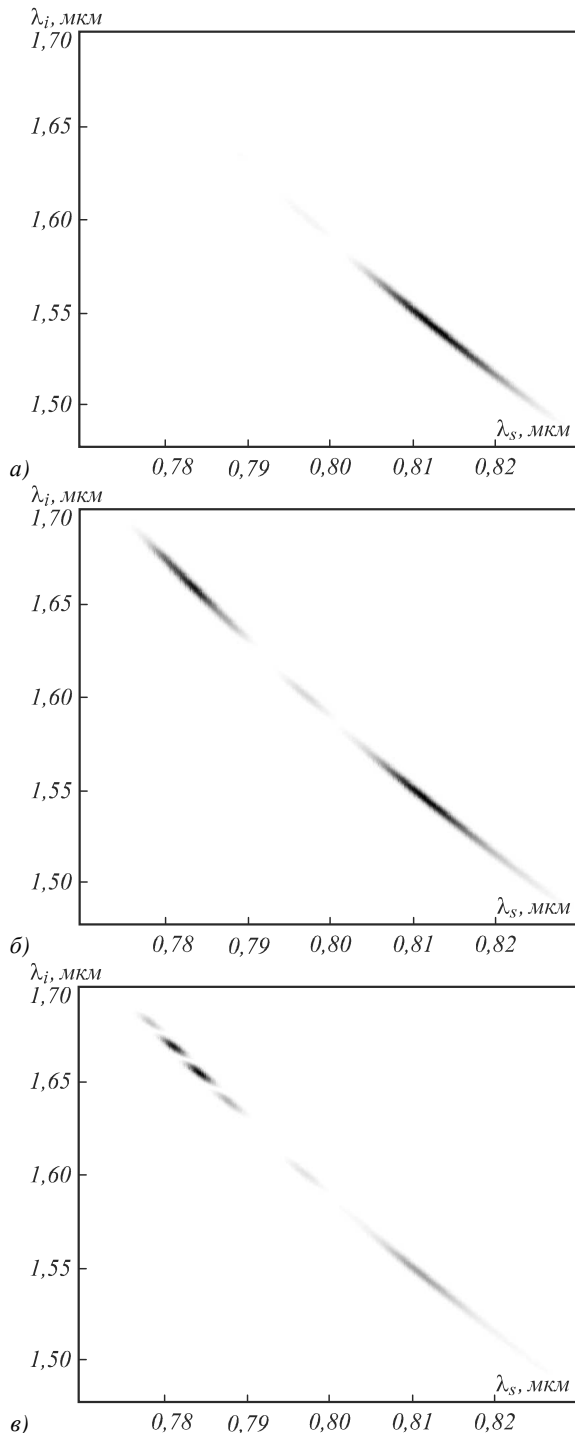


Рис. 5. Двухфотонная плотность вероятности для регулярного волокна диаметром 925 нм (а); нерегулярного волокна с двумя сечениями диаметром 925 нм, 952 нм (б); нерегулярного волокна с тремя сечениями диаметром 952 нм, 925 нм, 952 нм (в)

Наличие корреляционных свойств бифотонного поля позволяет нам осуществлять ИК-рефрактометрию, регистрируя фотоны в видимой области спектра. Данная методика рефрактометрии была недавно продемонстрирована с помощью интерференции бифотонных полей от двух нелинейных кристаллов [15]. Нерегулярное волокно можно рассматривать как непрерывный ряд нелинейных кристаллов, повернутых на разные углы, что позволяет проводить подобные измерения в более широкой области спектра.

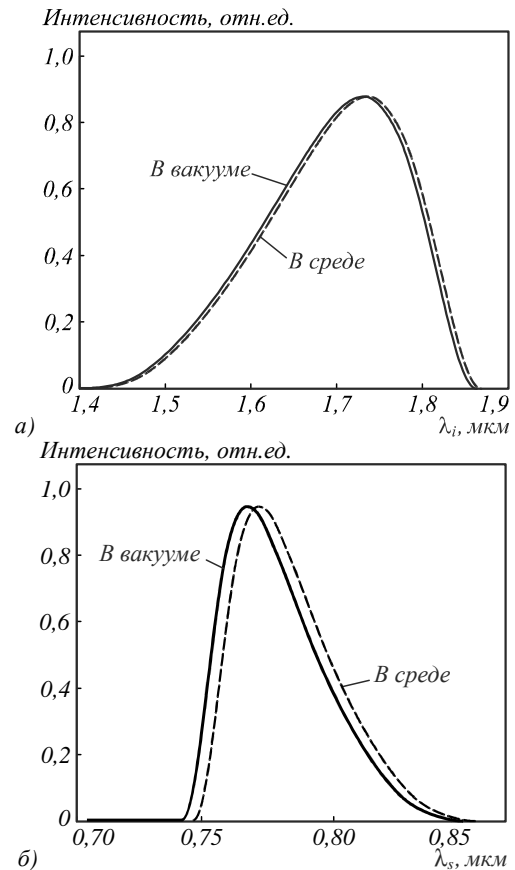


Рис. 6. Спектр холостого поля (а) и спектр сигнального поля (б) для СЧВС в нановолокне, находящемся в вакууме и в среде с показателем преломления 1,005 в области длин волн холостого поля. Пики интенсивности холостого поля соответствуют длинам волн 1740 нм и 1745 нм, а сигнального поля – 768 нм и 773 нм, соответственно

Заключение

Исследованы особенности спонтанного четырёхволнового смешения в нерегулярных нановолокнах. На основе рассчитанных эффективных показателей преломления и модовых функций суженного волокна проанализирован спектр СЧВС в нерегулярном нановолокне, а также рассмотрено явление интерференции бифотонного поля, описание которого требует учёта зависимости эффективного показателя преломления от продольной координаты. Рассмотрено влияние поглощающей среды вокруг нановолокна на спектральную амплитуду бифотонного поля.

Благодарности

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (гранты № 14-29-07192-офи-м, 15-02-05478).

Литература

1. **O'Brien, J.L.** Photonic quantum technologies / J.L. O'Brien, A. Furusawa, J. Vuckovic // *Nature Photonics*. – 2009. – Vol. 3. – P. 687-695.
2. **Eisaman, M.D.** Invited Review Article: Single-photon sources and detectors / M.D. Eisaman, J. Fan, A. Migdall, S.V. Polyakov // *Review of Scientific Instruments*. – 2011. – Vol. 82(7). – 071101. – DOI: 10.1063/1.3610677.
3. **Brambilla, G.** Optical fibre nanowires and microwires: a review / G. Brambilla // *Journal of Optics*. – 2010. – Vol. 12(4). – 043001. – DOI: 10.1088/2040-8978/12/4/043001.
4. **Tong, L.** Optical microfibers and nanofibers: A tutorial / L. Tong, F. Zi, X. Guo, J. Lou // *Optics Communications*. – 2012. – Vol. 285. – P. 4641-4647. – DOI: 10.1016/j.optcom.2012.07.068.
5. **Morrissey, M.J.** Spectroscopy, manipulation and trapping of neutral atoms, molecules, and other particles using optical nanofibers: A review / M.J. Morrissey, K. Deasy, M. Frawley, R. Kumar, E. Prel, L. Russell, N. Chormaic // *Sensors*. – 2013. – Vol. 13(8). – P. 10449-10481. – DOI: 10.3390/s130810449.
6. **Балыкин, В.И.** Квантовое управление атомами и фотонами с помощью оптических нановолокнообразов / В.И. Балыкин // *Успехи физических наук*. – 2014. – Т. 184. – С. 656-665. – DOI: 10.3367/UFNr.0184.201406h.0656.
7. **Richard, S.** Second-harmonic generation in tapered optical fibers / S. Richard // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2010. – Vol. 27, Issue 8. – P. 1504-1512. – DOI: 10.1364/JOSAB.27.001504.
8. **Coillet, A.** Third-harmonic generation in optical microfibers: from silica experiments to highly nonlinear glass prospects / A. Coillet, P. Grelu // *Optics Communications*. – 2012. – Vol. 285. – P. 3493-3497. – DOI: 10.1016/j.optcom.2012.04.020.
9. **Corona, M.** Third-order spontaneous parametric down-conversion in thin optical fibers as a photon-triplet source / M. Corona, K. Garay-Palmett, A.B. U'Ren // *Physical Review A*. – 2011. – Vol. 84. – 033823. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.84.033823>.
10. **Corona, M.** Experimental proposal for the generation of entangled photon triplets by third-order spontaneous parametric down-conversion in optical fibers / M. Corona, K. Garay-Palmett, A.B. U'Ren // *Optics Letters*. – 2011. – Vol. 36, Issue 2. – P. 190-192. – DOI: 10.1364/OL.36.000190.
11. **Cui, L.** Generation of correlated photon pairs in micro/nanofibers / L. Cui, X. Li, C. Guo, Y.H. Li, Z.Y. Xu, L.J. Wang, W. Fang // *Optics Letters*. – 2013. – Vol. 38. – P. 5063-5066. – DOI: 10.1364/OL.38.005063.
12. **Meyer-Scott, E.** Power-efficient production of photon pairs in a tapered chalcogenide microwire / E. Meyer-Scott, A. Dot, R. Ahmad, L. Li, M. Rochette, T. Jennewein // *Applied Physics Letters*. – 2015. – Vol. 106. – 081111. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4913743>.
13. Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами / Б.З. Каценеленбаум. – Изд. Академии наук СССР, 1961. – С. 31-39.
14. **Gisin, N.** Quantum communication / N. Gisin, R. Thew // *Nature photonics*. – 2007. – Vol. 1. – P. 165. – DOI: 10.1038/nphoton.2007.22.
15. **Kalashnikov, D.A.** Infrared spectroscopy with visible light / D.A. Kalashnikov, A.V. Paterova, S.P. Kulik, L.A. Krivitsky // *Nature Photonics*. – 2016. – Vol. 10. – P. 98-101. – DOI: 10.1038/nphoton.2015.252.

Сведения об авторах

Шухин Анатолий Александрович, 1992 года рождения, в 2014 году окончил Казанский федеральный университет по специальности 010701.65 «Физика», с 2014 года обучается в аспирантуре Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского Казанского научного центра Российской академии наук. Область научных интересов: квантовая и нелинейная оптика, источники квантовых состояний света, спонтанное параметрическое рассеяние, спонтанное четырёхволновое смешение, компьютерное моделирование.

E-mail: anatoly.shukhin@mail.ru.

Калачёв Алексей Алексеевич, 1969 года рождения, д.ф.-м.н., врио. директора Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН. Область научных интересов: квантовая и нелинейная оптика, взаимодействие излучения с веществом, квантовая информатика. E-mail: a.a.kalachev@mail.ru.

*Поступила в редакцию 14 декабря 2015 г.
Окончательный вариант – 12 апреля 2016 г.*

SPECTRAL FEATURES OF SPONTANEOUS FOUR-WAVE MIXING IN TAPERED NANOFIBERS

A.A. Shukhin¹, A.A. Kalachev^{1,2}

¹ E. K. Zavoisky Kazan Physical-Technical Institute (KPhTI)
of Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia,
² Kazan Federal University, Kazan, Russia

Abstract

Features of biphoton states generated via spontaneous four-wave mixing in tapered nanofibers are studied. The spectral amplitude of a biphoton field is calculated and the effect of interference of the biphoton field in such structures is discussed. The effect of nanofiber environment on the spectral amplitude of the biphoton field is investigated.

Keywords: spontaneous four-wave mixing, correlated photons, IR spectroscopy.

Citation: Shukhin A.A., Kalachev A.A. Spectral features of spontaneous four-wave mixing in tapered nanofibers. *Computer Optics* 2016; 40(2): 141-6. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-141-146.

Acknowledgements: The work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) grants ## 14-29-07192-ofi-m and 15-02-05478).

References

- [1] O'Brien JL, Furusawa A, Vuckovic J. Photonic quantum technologies. *Nature Photonics* 2009; 3: 687-695.
- [2] Eisaman MD, Fan J, Migdall A, Polyakov SV. Invited Review Article: Single-photon sources and detectors. *Rev Sci Instrum* 2011; 82(7): 071101. DOI: 10.1063/1.3610677.
- [3] Brambilla G. Optical fibre nanowires and microwires: a review. *J Opt* 2010; 12(4): 043001. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/2040-8978/12/4/043001>.
- [4] Tong L, Zi F, Guo X, Lou J. Optical microfibers and nanofibers: A tutorial. *Optics Communications* 2012; 285: 4641-4647. DOI: 10.1016/j.optcom.2012.07.068.
- [5] Morrissey MJ, Deasy K, Frawley M, Kumar R, Prel E, Russell L, Chormaic N. Spectroscopy, manipulation and trapping of neutral atoms, molecules, and other particles using optical nanofibers: A review. *Sensors* 2013; 13(8): 10449-10481. DOI: 10.3390/s130810449.
- [6] Balikin VI. Quantum control of atoms and photons by optical nanofibers. *Physics-Uspekhi* 2014; 57: 607-615. DOI: 10.3367/UFNr.0184.201406h.0656.
- [7] Richard S. Second-harmonic generation in tapered optical fibers. *JOSA B* 2010; 27(8): 1504-1512. DOI: 10.1364/JOSAB.27.001504.
- [8] Coillet A, Grelu P. Third-harmonic generation in optical microfibers: from silica experiments to highly nonlinear glass prospects. *Optics Communications* 2012; 285: 3493-3497. DOI: 10.1016/j.optcom.2012.04.020.
- [9] Corona M, Garay-Palmett K, U'Ren AB. Third-order spontaneous parametric down-conversion in thin optical fibers as a photon-triplet source. *Physical Review A* 2011; 84: 033823. DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.84.033823>.
- [10] Corona M, Garay-Palmett K, U'Ren AB. Experimental proposal for the generation of entangled photon triplets by third-order spontaneous parametric down-conversion in optical fibers. *Opt Lett* 2011; 36(2): 190-192. DOI: 10.1364/OL.36.000190.
- [11] Cui L, Li X, Guo C, Li YH, Xu ZY, Wang LJ, Fang W. Generation of correlated photon pairs in micro/nanofibers. *Optics letters* 2013; 38: 5063-5066. DOI: 10.1364/OL.38.005063.
- [12] Meyer-Scott E, Dot A, Ahmad R, Li L, Rochette M, Jennewein T. Power-efficient production of photon pairs in a tapered chalcogenide microwire. *Applied Physics Letters* 2015; 106: 081111. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4913743>.
- [13] Katsenelenbaum BZ. The theory of irregular waveguides with slowly varying parameters [In Russian]. Moscow: USSR Academy of Sciences Publisher; 1961.
- [14] Gisin N, Thew R. Quantum communication. *Nature photonics* 2007; 1: 165. DOI: 10.1038/nphoton.2007.22.
- [15] Kalashnikov D, Paterova AV, Kulik SP, Krivitsky LA. A. Infrared spectroscopy with visible light. *Nature Photonics* 2016; 10: 98-101. DOI: 10.1038/nphoton.2015.252.

Authors' information

Anatoly Alexandrovich Shukhin (b. 1992) graduated from Kazan Federal University in 2014, majoring in physics, optics and nanophotonics. Currently he works as the ph.d. student in the Kazan E.K. Zavoisky Physical-Technical Institute of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Research interests are quantum and nonlinear optics, sources of quantum states of light, spontaneous parametric down-conversion, spontaneous four-wave mixing, computer simulating. E-mail: anatoly.shukhin@mail.ru.

Kalachev Alexey Alexeevich (b. 1969), Doctor of sciences, director of E.K.Zavoisky Kazan Physical-Technical Institute of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Research interests: quantum and nonlinear optics, light-matter interaction, quantum information. E-mail: a.a.kalachev@mail.ru.

Received December 14, 2015. The final version – April 12, 2016.

Россия, 420029, Казань, Сибирский тракт, 10/7