

## Современные способы генерации фотонных пар для формирования чистых однофотонных состояний на основе применения фотонно-кристаллических волокон

*А.А. Талипов*

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева,  
Казанский квантовый центр "КАИ-Квант"*

**Аннотация:** В работе рассмотрены способы генерации управляемых фотонных пар в световодах с активно формируемой дисперсией для получения однофотонного состояния света. Принцип генерации основан на процессах спонтанного параметрического рассеяния или спонтанного четырехволнового смешения. Для получения факторизованного состояния, т.е. отсутствию спектральных и пространственных корреляций между дочерними фотонами, анализируется применение фотонно-кристаллических волокон, позволяющих сформировать сложные частотные профили дисперсии путем изменения структуры волокна.

**Ключевые слова:** фотонно-кристаллические волокна, квантовые коммуникации, фемтосекундный лазер, активно формируемая дисперсия, фотонные пары, однофотонные состояния.

В квантовых оптических технологиях необходимы фотонные состояния с определенными спектральными свойствами. Одиночные фотоны являются одним из основных строительных блоков квантовых информационных технологий. Многочисленные экспериментальные реализации квантовых вычислительных схем, квантовых протоколов связи, а также квантовой метрологии основаны на одиночных фотонах как физической реализации кубита. Для того чтобы кодировать состояние таких кубитов требуется решение вопроса формирования фотонов в чистом состоянии.

Генерация пар фотонов является важным инструментом для многих из вышеупомянутых приложений, которые основаны на смешанном двухфотонном состоянии. Принцип генерации однофотонных состояний базируется на детектировании холостого фотона, предвещающего сигнальный фотон [1]. Процесс спонтанного параметрического рассеяния (СПР) или смешанного четырехволнового смешения (СЧВС) должен

сформировать факторизованное состояние, в котором двухфотонный компонент можно записать как продукт сигнального и холостого состояний. Факторизованное состояние соответствует отсутствию каких-либо корреляций между сигнальным и холостым фотоном, т.е. никакая информация о холостом фотоне, кроме его наличия, не может быть получена при детектировании сигнального фотона, и наоборот. Как правило, фотонные пары, сгенерированные в спонтанных процессах, имеют значительные спектральные и пространственные корреляции. Исследование и анализ современных подходов к решению вопросов генерации управляемых фотонных пар и устранению корреляций между фотонами является актуальной задачей.

Пространственные корреляции могут быть сведены к минимуму с помощью способов основанных на применении нелинейных оптических волноводов [2-4]. Спектральные корреляции исключить сложнее. Способы, позволяющие устранить спектральные корреляции, представлены в работах [5-8].

Условие фазового синхронизма при генерации фотонов в процессе спонтанного параметрического рассеяния описывается следующим выражением:

$$w_p = w_s + w_i, \quad k_p = k_s + k_i \quad (1)$$

где  $w$  и  $k$  – частота и волновой вектор моды в нелинейной среде;  $k = \omega n(\omega)/c$ ,  $n(\omega)$  – показатель преломления, зависящий от направления волнового вектора и поляризации моды;  $c$  – скорость света в вакууме.

Наиболее распространенными материалами волноводов для спонтанного параметрического рассеяния являются LN и KTP, получившие свою популярность благодаря низким потерям, определенным дисперсионным свойствам, а также простоте изготовления. В работах [9,10] показана генерация фотонной пары на основе СПР в нелинейном волноводе и

---

исследованы пространственные свойства СПР. Развитие способов генерации фотонных пар на основе СПР связано с экспериментальными исследованиями, в которых показана возможность формирования сигнального и триггерного состояний в ортогональной поляризации, и разделения этих состояний с помощью поляризационного разделителя луча [2,11]. Устранение корреляции фотонных пар, генерируемых в процессе СПР, показано в работе [12], где применялся способ согласования групповых скоростей с использованием широкополосного импульса накачки, получивший свое развитие в работе [13]. Однофотонные состояния были получены в СПР на одной длине волны с использованием конкретного кристалла, имеющего определенные дисперсионные свойства [14]. Возможность расширения длины волны исследована в работе [15]. Несколько альтернативных способов, также основанных на СПР, были разработаны с целью контроля спектрального состояния формируемых фотонных пар непосредственно в точке генерации. Однако применение определенных нелинейных материалов в данных способах позволило управлять только двумя параметрами: геометрией накачки [16] и нормальной материальной дисперсией [14]. Это ограничивает возможность адаптации спектральных состояний фотонных пар.

Оптические волоконные источники на основе применения спонтанного четырехволнового смешения в настоящее время являются одними из самых ярких источников фотонных пар, несмотря на применение фильтрации [17]. Данный вид генерации имеет значительные преимущества по сравнению с СПР. Фотоны, сгенерированные в одиночных пространственных модах, идеально подходят для согласования с волноводами в интегрально-оптических схемах, являющихся перспективной платформой для фотонных квантовых вычислений [18]. СЧВС происходит в одномодовых волокнах с оптической нелинейностью третьего порядка. В этом процессе, два фотона

---

накачки рассеиваются от одного или двух различных полей накачки в пару полей, определяемых как сигнальное и холостое, которые спектрально и/или поляризационно различны.

Генерация дочерних фотонов происходит в соответствии с законом сохранения энергии и фазовым согласованием [8]:

$$2w_p = w_s + w_i, \quad 2\frac{n_p w_p}{c} - \frac{n_s w_s}{c} - \frac{n_i w_i}{c} - 2\gamma P = 0 \quad (2)$$

где  $n_{p,s,i}$  – коэффициент преломления на сигнальной, холостой частотах, и частоте накачки  $w_{p,s,i}$  соответственно;  $\gamma$  – нелинейный коэффициент волокна;  $P$  – пиковая мощность накачки.

Геометрия одномодового световода дает возможность устранить корреляции в степени свободы поперечного импульса и смешанные спектральные корреляция. Например, определив некоторые ограничения соответствия групповых скоростей при СЧВС в одномодовом волокне, становится возможным устранить корреляции во всех степенях свободы, в результате чего двухфотонное состояние становится факторизуемым. Способ контроля спектрального состояния фотонных пар, сформированных с помощью СЧВС в оптическом волокне показан в работах [5,6]. Определяющим отличием от СПР является возможность применения фотонно-кристаллических волокон (ФКВ) для удовлетворения требований дисперсии [19]. Появляются новые параметры управления для компенсации потерь при контроле геометрии накачки. Изображение поперечного сечения ФКВ с высокой нелинейностью показано на рис. 1. Свойства ФКВ определяются диаметром отверстий и расстоянием между отверстиями.

Ширина полосы частот на полувысоте сигнального и холостого полей  $\Delta w_s$  и  $\Delta w_i$  определяется выражением [20]:

$$\Delta w_s = \frac{2\pi c}{|N_s - N_i|} + 2\frac{|N_i - N_p|}{|N_s - N_i|} \Delta w_p, \quad \Delta w_i = \frac{2\pi c}{|N_i - N_s|L} + 2\frac{|N_s - N_p|}{|N_i - N_s|} \Delta w_p \quad (3)$$

где  $\Delta\omega_p$  – ширина полосы частот на полувывсоте накачки;  $L$  – длина волокна;  $N_j$  ( $j=s,i,p$ ) – групповой показатель для сигнального, холостого полей и поля накачки.

По мере увеличения  $L$  допустимое отклонение СЧВС процесса по фазовому рассогласованию уменьшается, в результате чего сужается полоса частот, на которой генерируются сигнальный и холостой фотоны. Ожидаемое количество сгенерированных фотонов зависит от нелинейности волокна и пиковой мощности накачки. Общее количество сгенерированных фотонных пар возрастает с увеличением длины  $L$ . Однако, данная зависимость сохраняется до тех пор, пока длина  $L$  не превышает значение, при котором два начальных совместно распространяющихся импульса пространственно разделимы.

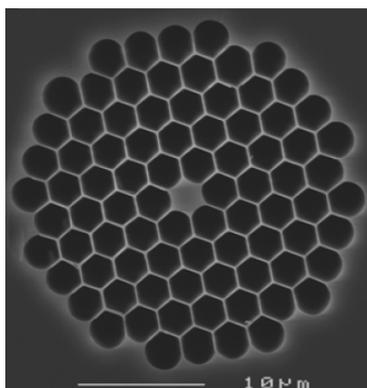


Рис. 1. – Изображение поперечного сечения ФКВ NL-2.4. –800 с высокой нелинейностью (NKT photonics, Denmark)

На рис. 2 представлена структурная схема типовой экспериментальной установки для генерации фотонных пар с помощью СЧВС в ФКВ. Излучение от фемтосекундного лазера, генерирующего сверхкороткие импульсы, подается на параметрический генератор, позволяющий увеличить спектральный диапазон перестройки лазерного излучения.

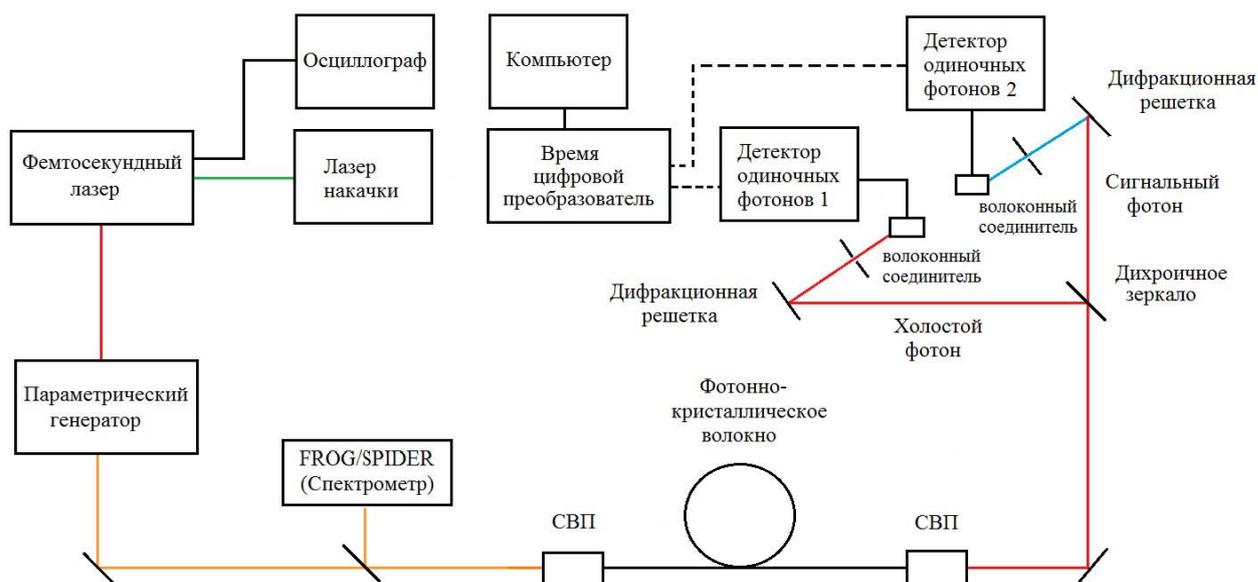


Рис. 2. – Типовая экспериментальная установка для генерации фотонных пар с помощью СЧВС в ФКВ

Накачка фемтосекундного лазера осуществляется с помощью мощного одночастотного лазера. Система регистрации FROG/SPIDER необходима для характеристики сверхкоротких импульсов. Лазерное излучение с выхода параметрического генератора заводится в фотонно-кристаллическое волокно. Фотонные пары генерируются в процессе СЧВС в фотонно-кристаллических волокнах. Для точного ввода лазерного излучения в волокно используется система высокоточного позиционирования (СВП). Далее излучение разделяется по двум путям – на холостой и сигнальный фотоны соответственно. Принцип генерации однофотонных состояний основан на детектировании холостого фотона, предвещающего сигнальный фотон. Для этого используются два детектора одиночных фотонов [21]. При точном счете одиночных фотонов применяется время-цифровой преобразователь, необходимый для передачи компьютеру временных меток регистрируемых событий.

Фотонная корреляция между сигнальным и холостым полями была впервые исследована путем накачки в область аномальной дисперсии [22], с учетом значительного фоновых шума, генерируемого Рамановским рассеянием [23]. ФКВ позволяют разделить по частоте сигнальное и холостое поля от накачки, например, путем накачки в нормальную область дисперсии [24], вследствие чего Рамановский шум на определенных длинах волн фотона значительно снижается [3,4]. Однако, часто для генерации фотонов необходима сложная спектральная фильтрация для устранения корреляций между сигнальной и холостой частотами до предвещающего фотона. Использование такой сложной фильтрации обеспечивает высокую видимость интерференции Хонга-У-Манделя между фотонами из разных источников, но значительно снижает скорость счета.

В работе [7] для проведения исследований на основе данных моделирования выбрано 40 см. фотонно-кристаллическое волокно NL-1.8-750, имеющее нулевую дисперсию групповой скорости на 750 нм. и 1110 нм. Значение чистоты однофотонного состояния в проведенных экспериментах достигает  $85,9 \pm 1,6$  %. Измеренное значение чистоты однофотонных состояний ограничено длиной используемого ФКВ. Данные моделирования дают основание полагать, что при длине ФКВ 100 м. значение чистоты однофотонного состояния может достигать 98.5%. В работе [8] впервые показана интерференция Хонга-У-Манделя с фотонами без фильтрации от отдельных волоконных источников. Видимость для неклассической интерференции составила  $76,2 \pm 2,1$ %. Данное значение обусловлено следующими ограничивающими факторами: неидеальность отношения разделения лучей (1%), шум вследствие генерации множества пар ( $<1\%$ ), Рамановское рассеяние ( $<1\%$ ), разница в спектрах двух сигнальных фотонов. Общая эффективность сбора сигнального и холостого фотонов составила 0,21 и 0,18 соответственно.

---

Таблица № 1

Результаты сравнительного анализа способов генерации фотонных пар  
на основе СЧВС

№ п/п	Способ генерации фотонных пар	Точность	Чистота однофотонного состояния/эффективность	Длина волны фотонной пары, нм.	Потери	Универсальность	Простота реализации	Литература
1	Генерация с помощью микроструктурированного волокна с сохранением поляризации	±	C/A >100 (при 1 кГц. и полосе 0.4 ТГц.)	684/807 (704/780)	-	±	+	[3]
2	Использование лазерного источника в режимах модуляции добротности и непрерывной волны	±	0.0084 эффективность детектирования	839/1392	-	+	+	[4]
3	Математическое моделирование факторизованных состояний	+	0.901	464/1551 (736/960)	+	-	±	[5]
4	Применение волокна со смещенной дисперсией и спектрального фильтра с решеткой	+	макс. частота совпадений $2.4 \cdot 10^{-5}$ на импульс	1530-3/1551-48	-	+	+	[6]
5	Регистрация вероятности двукратных, четырехкратных совпадений детектирования фотонов	+	$85,9 \pm 1,6 \%$	720/860	±	+	±	[7]
6	Генерация от отдельных волоконных источников без использования фильтрации	+	$76,2 \pm 2,1\%$ видимость интерференции	597/860	+	+	±	[8]
7	Применение волоконного интерферометра Саньяка	±	-	1547.1/1525.1	±	+	-	[17]
8	Накачка в область аномальной дисперсии	-	$10^3$ /с. частота совпадений; 33/35 % эффективность сбора фотонов	$\sim$ 1528/1546	±	±	+	[22]
9	Способ генерации значительно разделенных по длине волны фотонов	+	$\sim 18,3$ CAR	810/1548	±	±	+	[26]

C/A, CAR – отношение совпадений (coincidence-to-accidental ratio)

Перспективными для приложений квантовых коммуникаций [25] являются способы генерации фотонных пар со значительно разделенными по длине волны сигнальным и холостым фотонами - 800 нм. и 1550 нм. соответственно [26]. Структура ФКВ для данного типа фотонного источника характеризуется большим диаметром сердцевины и низкой долей заполнения воздуха по сравнению с аналогичными образцами для источника фотонов с титан-сапфировой накачкой и СЧВС. Также ФКВ с большим диаметром сердцевины легче интегрируются со стандартными одномодовыми волокнами, вследствие схожести профиля модового поля. Потери при соединении таких ФКВ с одномодовыми волокнами составили менее 1 дБ [27].

Таким образом, наиболее прогрессивными можно считать способы генерации управляемых фотонных пар на основе применения СЧВС в ФКВ. Дальнейшее развитие данных способов связано с возможностью применения различных микроструктур ФКВ с формируемыми частотными профилями дисперсии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-60054 мол\_а\_дк.

### Литература

1. Soujaeff A., Takeuchi S., Sasaki K., Hasegawa T., Matsui M. Heralded single photon source at 1550nm from pulsed parametric down conversion // J. Mod. Opt. 2007. V. 54. Nos. 2-3. pp. 467-471.
2. U'Ren A.B., Silberhorn C., Banaszek K., Walmsley I.A. Efficient conditional preparation of high-fidelity single photon states for fiber-optic quantum networks // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. № 9. pp. 093601 (4).
3. Fan J., Migdall A. A broadband high spectral brightness fiber-based two-photon source // Opt. Express. 2007. V. 15. № 6. pp. 2915-2920.

4. Rarity J. et al. Photonic crystal fiber source of correlated photon pairs // Opt. Express. 2005. V. 13. № 2. pp. 534-544.
  5. Garay-Palmett K. et al. Photon pair-state preparation with tailored spectral properties by spontaneous four-wave mixing in photonic-crystal fiber // Optics Express. 2007. V. 15. № 22. pp. 14870-14886.
  6. Li X., Ma X., Zhe Yu Ou, Lei Yang, Cui L., Yu. D. Spectral study of photon pairs generated in dispersion shifted fiber with a pulsed pump // Opt. Express. 2008. V. 16. № 1. pp. 32-44.
  7. Cohen O., Erdmann R., De la Cruz M., Walmsley I.A. Tailored photon-pair generation in optical fibers // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102. № 12. pp. 123603 (4).
  8. Halder M., Fulconis J., Cerny B., Clark A., Xiong C., Wadsworth W.J., Rarity J.G. Nonclassical 2-photon interference with separate intrinsically narrowband fibre sources // Opt. Express. 2009. V. 17. № 6. pp. 4670-4676.
  9. Tanzilli S. et al. Highly Efficient Photon-Pair Source Using Periodically Poled Lithium Niobate Waveguide // Electron. Lett. 2001. V. 37. № 1. pp. 26-28.
  10. Banaszek K., U'Ren A.B., Walmsley I.A. Generation of Correlated Photons in Controlled Spatial Modes by Downconversion in Nonlinear Waveguides // Opt. Lett. 2001. V. 26. № 17. pp. 1367-1369.
  11. Krapick S., Herrmann H., Quiring V., Brecht B., Suche H., Silberhorn S. An Efficient Integrated Two-Color Source for Heralded Single Photons // New J. Phys. 2013. № 15. pp. 033010 (19).
  12. Grice W.P., U'Ren A.B., Walmsley I.A. Eliminating frequency and space-time correlations in multiphoton states // Phys. Rev. A. 2001. V. 64. № 6. pp. 063815 (7).
  13. Eckstein A., Christ A., Mosley P.J., Silberhorn C. Highly Efficient Single-Pass Source of Pulsed Single-Mode Twin Beams of Light // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 106. № 1. pp. 013603 (4).
-

14. Mosley P.J., Lundeen B.J., Smith B.J., Wasylczyk P., U'Ren A.B., Silberhorn C., Walmsley I.A. Heralded generation of ultrafast single photons in pure quantum states // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 100. № 13. pp. 133601 (4).

15. Erdmann R., U'Ren A.B., De la Cruz M., Walmsley I.A. Generation of two-photon states with an arbitrary degree of entanglement via nonlinear crystal superlattices // *Phys. Rev. Lett.* 2006. V. 9. № 22. pp. 223602 (4).

16. Valencia A., Cere A., Shi X., Molina-Terriza G., Torres J.P. Shaping the waveform of entangled photons // *Phys. Rev. Lett.* 2007. V. 99. № 24. pp. 243601 (4).

17. Li, X., Voss P.L., Sharping J.E., Kumar P. Optical fiber-source of polarization-entangled photons in the 1550 nm telecom band // *Phys. Rev. Lett.* 2005. V. 94. № 5. pp. 053601 (4).

18. Walmsley I.A., Raymer M.G. Applied physics. Toward quantum-information processing with photons // *Science*. 2005. V. 307. pp. 1733.

19. Poletti F., Finazzi V., Monro T.M., Broderick N.G.R., Tse V., Richardson D.J. Inverse design and fabrication tolerances of ultra-flattened dispersion holey fibers // *Opt. Express*. 2005. V. 13. № 10. pp. 3728-3736.

20. Alibart O., Fulconis J., Wong G.K.L., Murdoch S.G., Wadsworth W.J., Rarity J.G. Photon Pair Generation Using Four-WaveMixing in a Microstructured Fibre: Theory Versus Experiment // *New J. Phys.* 2006. № 8. pp. 67 (20).

21. Адамов Ю.Ф., Верховцева А.В., Шурчков И.О., Балака Е.С. Анализ конструктивно-технологических ограничений при проектировании лавинных фотодиодов, работающих в режиме счета фотонов // *Инженерный вестник Дона*, 2012, № 2 URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/788](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/788).

22. Fiorentino M., Voss P.L., Sharping J.E., Kumar P. All-fiber photon-pair source for quantum communications // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2002. V. 14. № 7. pp. 983-985.

---

23. Stolen R.H. Fundamentals of Raman amplification in fibers // Raman Amplifiers for Telecommunications 1, Springer 2003. pp. 35-59.

24. Jiang R. et al. Parametric wavelength conversion from conventional near-infrared to visible band // IEEE Photon. Technol. Lett. 2006. V.18. № 23. pp. 2445-2447.

25. Горбунов А.В., Даюнов Р.С. Использование псевдослучайных последовательностей в системах квантовой связи // Инженерный вестник Дона, 2014, № 2 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2364.

26. Slater J.A. et al. Microstructured Fiber Source of Photon Pairs at Widely Separated Wavelengths // Opt. Lett. 2010. V. 35. № 4. pp. 499-501.

27. Xiao L., Demokan M.S. Jin. W., Wang Y., Zhao C.-L. Fusion Splicing Photonic Crystal Fibers and Conventional Single-Mode Fibers: Microhole Collapse Effect // J. Lightwave Technol. 2007. V. 25. № 11. pp. 3563-3574.

### References

1. Soujaeff A., Takeuchi S., Sasaki K., Hasegawa T., Matsui M. J. Mod. Opt. 2007. V. 54. Nos. 2-3. pp. 467-471.

2. U'Ren A.B., Silberhorn C, Banaszek K., Walmsley I.A. Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. № 9. pp. 093601 (4).

3. Fan J., Migdall A. Opt. Express. 2007. V. 15. № 6. pp. 2915-2920.

4. Rarity J. et al. Opt. Express. 2005. V. 13. № 2. pp. 534-544.

5. Garay-Palmett K. et al. Optics Express. 2007. V. 15. № 22. pp. 14870-14886.

6. Li X., Ma X., Zhe Yu Ou, Lei Yang, Cui L., Yu. D. Opt. Express. 2008. V. 16. № 1. pp. 32-44.

7. Cohen O., Erdmann R., De la Cruz M., Walmsley I.A. Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102. № 12. pp. 123603 (4).

8. Halder M., Fulconis J., Cemlyn B., Clark A., Xiong C., Wadsworth W.J., Rarity J.G. Opt. Express. 2009. V. 17. № 6. pp. 4670-4676.



9. Tanzilli S. et al. *Electron. Lett.* 2001. V. 37. № 1. pp. 26-28.
  10. Banaszek K., U'Ren A.B., Walmsley I.A. *Opt. Lett.* 2001. V. 26. № 17. pp. 1367-1369.
  11. Krapick S., Herrmann H., Quiring V., Brecht B., Suche H., Silberhorn S. *New J. Phys.* 2013. № 15. pp. 033010 (19).
  12. Grice W.P., U'Ren A.B., Walmsley I.A. *Phys. Rev. A.* 2001. V. 64. № 6. pp. 063815 (7).
  13. Eckstein A., Christ A., Mosley P.J., Silberhorn C. *Phys. Rev. Lett.* 2011. V. 106. № 1. pp. 013603 (4).
  14. Mosley P.J., Lundeen B.J., Smith B.J., Wasylczyk P., U'Ren A.B., Silberhorn C., Walmsley I.A. *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 100. № 13. pp. 133601 (4).
  15. Erdmann R., U'Ren A.B., De la Cruz M., Walmsley I.A. *Phys. Rev. Lett.* 2006. V. 9. № 22. pp. 223602 (4).
  16. Valencia A., Cere A., Shi X., Molina-Terriza G., Torres J.P. *Phys. Rev. Lett.* 2007. V. 99. № 24. pp. 243601 (4).
  17. Li, X., Voss P.L., Sharping J.E., Kumar P. *Phys. Rev. Lett.* 2005. V. 94. № 5. pp. 053601 (4).
  18. Walmsley I.A., Raymer M.G. *Science.* 2005. V. 307. pp. 1733.
  19. Poletti F., Finazzi V., Monro T.M., Broderick N.G.R., Tse V., Richardson D.J. *Opt. Express.* 2005. V. 13. № 10. pp. 3728-3736.
  20. Alibart O., Fulconis J., Wong G.K.L., Murdoch S.G., Wadsworth W.J., Rarity J.G. *New J. Phys.* 2006. № 8. pp. 67 (20).
  21. Adamov Yu.F., Verhovceva A.V., Shurchkov I.O., Balaka E.S. *Inzhenernyj vestnik Dona (Rus)*, 2012, № 2 URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/788](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/788).
  22. Fiorentino M., Voss P.L., Sharping J.E., Kumar P. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2002. V. 14. № 7. pp. 983-985.
  23. Stolen R.H. *Raman Amplifiers for Telecommunications 1*, Springer 2003. pp. 35-59.
-



24. Jiang R. et al. IEEE Photon. Technol. Lett. 2006. V.18. № 23. pp. 2445-2447.

25. Gorbunov A.V., Dayunov R.S. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, № 2  
URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2364](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2364).

26. Slater J.A. et al. Opt. Lett. 2010. V. 35. № 4. pp. 499-501.

27. Xiao L., Demokan M.S. Jin. W., Wang Y., Zhao C.-L. J. Lightwave Technol. 2007. V. 25. № 11. pp. 3563-3574.