## Фотоннокристаллические световоды

#### А.М. Желтиков, А.А. Иванов, М.В. Алфимов

## Центр фотохимии Российской академии наук, ул. Новаторов 7а, 119421 Москва, Россия

# Физический факультет, Международный лазерный центр, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119992 Москва, Россия

Дан обзор результатов исследований в области нелинейной оптики фотоннокристаллических световодов, выполненных в Центре фотохимии РАН.

Фотонно-кристаллические (называемые также микроструктурированными) световоды [1 – 12] представляют собой волноводные структуры нового типа. В отличие от обычных оптических волокон, образуемых сердцевиной с показателем преломления n<sub>core</sub> и оболочки с показателем преломления n<sub>cladding</sub>, фотоннокристаллические (ФК) волокна представляют собой кварцевую или стеклянную микроструктуру с периодической либо апериодической системой цилиндрических воздушных отверстий, ориентированных вдоль оси волокна (рис. 1). Подобная микроструктура обычно изготавливается путем вытяжки при высокой температуре из преформы, набранной из полых капилляров. Дефект микроструктуры, соответствующий отсутствию одного или нескольких воздушных отверстий (в центре структуры на рис 1а – 1д), служит сердцевиной волокна, обеспечивая волноводный режим распространения электромагнитного излучения. B стандартных волокнах полное внутреннее отражение обеспечивается при выполнении условия  $n_{\text{cladding}} < n_{\text{core}}$ . Волноводные моды электромагнитного излучения в ФК-волокнах формируются в результате интерференции волн, возникающих при отражении и рассеянии света на микронеоднородностях показателя преломления. Для широкого класса ФК-волокон условие существование волноводных мод в сердцевине волокна, образуемой дефектом микроструктуры, может быть записано в виде, аналогичном условию существования полного внутреннего отражения в стандартном волокне:  $n_{\rm clad}$  <  $n_{\rm core}$ , где  $n_{\rm clad}$  =  $\beta_f c / \omega$  определяемый через постоянную эффективный показатель преломления, распространения  $\beta_{\rm f}$  основной моды оболочки.

Развитие технологии фотоннокристаллических (ФК) световодов приводит к возникновению нового класса волоконно-оптических преобразователей частоты, генераторов широкополосного излучения и источников сверхкоротких световых импульсов. Частотный профиль дисперсии и пространственный профиль распределения электромагнитного поля в собственных модах ФК-световодов целенаправленно формируются путем микро- и наноструктурирования оболочки и сердцевины волокна. На этой основе создаются новые волоконно-оптические устройства, обеспечивающие высокоэффективное спектральное и временное преобразование лазерных импульсов с начальными длительностями от десятков наносекунд до нескольких циклов светового поля (единицы фемтосекунд) в широком диапазоне пиковых мощностей от сотен ватт до нескольких гигаватт. В волоконных лазерных системах ФК-волокна позволяют реализовать высокоточный баланс дисперсии в широком спектральном диапазоне, что открывает возможность создания компактных полностью волоконных источников мощных сверхкоротких световых импульсов. Изучение новых оптических явлений в ФК-световодах является одним из приоритетных направлений исследований Центра фотохимии РАН с 2000 г. [5, 9, 13 – 65, 92 – 99].

Наряду с обычными волноводными режимами, обеспечиваемыми явлением полного внутреннего отражения, ФК-волокна при определенных условиях поддерживают волноводные моды электромагнитного излучения, формируемые за счет высокой отражательной способности оболочки волокна в области фотонных запрещенных зон [66 – 68]. Такие режимы волноводного распространения реализуются в волокнах с оболочкой в виде двумерно периодической микроструктуры (двумерного фотонного кристалла) и полой либо твердотельной сердцевиной. Фотонная запрещенная зона, возникающая в спектре пропускания двумерной периодической оболочки волокон данного типа, обеспечивает высокий коэффициент отражения для излучения, распространяющегося вдоль полой сердцевины, позволяя существенно снизить оптические потери, присущие модам обычных полых волноводов со сплошной оболочкой и быстро растущие с уменьшением диаметра полой сердцевины.

Микро- и наноструктурированные волноводные структуры играют все более значительную роль в оптической физике и все шире используются в современных устройствах И лазерных системах. Развитие технологии оптических микроструктурированных (МС) волокон привело к возникновению нового направления волоконной оптики и позволило создать новый класс волоконнооптических лазерных систем. преобразователей частоты. генераторов широкополосного излучения и источников сверхкоротких световых импульсов.



Рис. 1. Изображения поперечных сечений микроструктурированных световодов: (а. б) волокно с высокой оптической нелинейностью, обеспечиваемое малым размером сердцевины и высоким контрастом показателей преломления сердцевины и оболочки, (в) волокно с двойной микроструктурированной сердцевиной, (г) волокно с расширенной областью одномодового режима, (д) волокно с большой площадью сердцевины, (е, ж) наноструктурированные световоды, (з) полое ФК-волокно.

Уникальность ФК-световодов для оптических технологий и волоконных лазерных систем обусловлена возможностью активного формирования частотного профиля дисперсии собственных мод таких волокон путем изменения их структуры [69, 70]. Такие световоды позволяют реализовать сложные частотные профили дисперсии, которые не могут быть сформированы для стандартных оптических волокон. Как следствие, в ФК-волокнах наблюдаются новые нелинейно-оптические явления и новые режимы спектрально-временного преобразования сверхкоротких лазерных импульсов [5, 12, 71]. Высокоэффективные волоконно-оптические преобразователи частоты сверхкоротких импульсов и источники излучения с широким непрерывным спектром (суперконтинуума) [72, 73], разработанные на основе ФК-световодов с высокой оптической нелинейностью (рис. 1, 2), позволяют решать фундаментальные задачи в области оптической метрологии [74, 75] и оптики сверхкоротких лазерных импульсов [76, 77], а также активно используются для целей лазерной биомедицины [78], нелинейной спектроскопии [79, 80] и ФК-световоды планарными микроскопии [81]. наряду с микро-И наноструктурированными связанными волноводными структурами с успехом используются для создания новых сенсорных систем. Значительный интерес

вызывает использование ФК-световодов в качестве основы для создания волоконно-оптической платформы нейрофотоники [87 – 91].

Широкие возможности в области оптических информационных технологий и физики сильных полей открываются в связи с созданием ФК-световодов с полой сердцевиной [9, 41 – 44] (рис. 1б). Волноводные структуры этого класса представляют особый интерес для решения задачи передачи оптических сигналов на большие расстояния в условиях предельно низких потерь и предельно малой оптической нелинейности. Полые ФК-световоды используются ЛЛЯ транспортировки мощных лазерных лазерных импульсов В системах биомедицинского назначения [45] и системах для лазерной обработки материалов [46]. Одновременно разрабатываются полые ФК-световоды, обеспечивающие передачу мега- и гигаваттных световых импульсов в солитонном режиме [47 - 50], а также полые волноводные структуры для эффективного нелинейно-оптического спектрального и временного преобразования сверхкоротких импульсов высокой пиковой мощности [51, 52].



Рис. 2. (а) Синтезатор сверхкоротких импульсов на основе ФК-световодов. (б) Генерация суперконтинуума в ФК-световоде [72].

Собственные моды полых световодов отличаются по своей природе и свойствам от собственных мод обычных волноводов, формируемых за счет явления полного внутреннего отражения. Ввиду того, что показатель преломления сердцевины полых волноводов ниже показателя преломления оболочки, локализуемые в сердцевине полого волновода моды являются модами утечки. Они оказываются связанными с модами оболочки, а их постоянные распространения имеют ненулевые мнимые части, характеризующие потери энергии, передаваемой по сердцевине волокна. Для стандартных капиллярных полых световодов с оболочкой большой толщины величина этих потерь растет с уменьшением радиуса *а* полой сердцевины волокна по закону  $\lambda^2/a^3$ , где  $\lambda$  - длина волны излучения. С учетом этого обстоятельства пригодными для практического использования

оказываются лишь капиллярные световоды с большим диаметром сердцевины, передающие лазерное излучение в существенно многомодовом режиме.



Рис. 3. Световоды с наноструктурированной сердцевиной и стабилизация солитонного самосдвига частоты [72].

Технология ФК-световодов позволяет разрешить противоречие между потерями и качеством модового состава полых волноводов. В самом общем виде методы снижения потерь и улучшения модового состава собственных мод полых световодов основаны на использовании явления оптического антирезонансаослабления связи между модами, локализуемыми в сердцевине волновода, и модами оболочки. Как показано в работах, антирезонансные явления могут оказывать существенное влияние на свойства собственных мод ФК-световодов различного типа и могут быть использованы для снижения потерь в полых ФКволноводах. Антирезонансные режимы волноводного распространения в ФКсветоводах с полнотелой сердцевиной и заполненными аналитом (т.е., представляющим предмет анализа жидкофазным материалом) воздушными отверстиями оболочки могут быть использованы для создания новых сенсорных устройств.

Благодаря возможности активного формирования частотного профиля дисперсии ФК-световоды все шире используются в качестве элементов, осуществляющих требуемый баланс или компенсацию дисперсии в волоконнооптических лазерных генераторах, позволяющих получать сверхкороткие лазерные импульсы с высоким качеством временной огибающей. На основе ФК-световодов разработан лазерный источник импульсов длительностью около 100 фс и энергией около 1 нДж, позволяющий благодаря использованию ФК-волокна отказаться от призм и дифракционных решеток. Для достижения требуемого баланса дисперсии в лазерах на основе ФК-световодов используются полые ФК-волокна с сильным двулучепреломлением, обеспечивающие устойчивое поддержание поляризации лазерного излучения. Выполненные эксперименты показывают возможность достижения баланса дисперсии в иттербиевом фемтосекундном волоконном лазере с помощью полностью твердотельного ФК-волокна. Благодаря возможности управления профилем дисперсии И высокой оптической нелинейности, достигаемой за счет малого размера световедущей жилы, ФК-волокна позволяют реализовать эффективные схемы оптической параметрической генерации света на кубической оптической нелинейности материала волокна. Оптическая параметрическая генерация в ФК-световодах позволяет создать эффективные источники коррелированных фотонных пар.

Естественное ограничение на плотность энергии лазерного излучения в оптической системе связано с оптическим пробоем материала, из которого изготовлены оптические элементы. Для повышения энергии лазерных импульсов, формируемых волоконными лазерами, требуется увеличение площади поперечного сечения волокна. Стандартные световоды с большой площадью сердцевины, однако, как правило, характеризуются сложным модовым составом и не позволяют получить лазерное излучение с высоким качеством поперечного профиля интенсивности. Эта проблема также может быть решена путем микроструктурирования оболочки волокна. Воздушные отверстия достаточно малого диаметра в оболочке ФК-волокна осуществляют фильтрацию собственных мод высокого порядка, позволяя реализовать одномодовый режим в световодах с площадью поперечного сечения. Легированные иттербием ФК-световоды с большой площадью моды используются для создания мощных волоконнооптических лазеров. Кварцевые ФК-волокна с большой площадью моды также используются для компрессии мощных субпикосекундных лазерных импульсов и генерации суперконтинуума с энергией свыше 1 мкДж.





Рис. 4. Генерация импульсов длительностью менее одного цикла поля в полом световоде [82 – 86].

Радикальное увеличение энергии лазерных импульсов в устройствах волоконной оптики может быть достигнуто за счет использования волноводов с полой сердцевиной. Для стандартных полых волноводов капиллярного типа, однако, потери быстро (пропорционально  $a^{-3}$ ) растут с уменьшением радиуса полой сердцевины волновода а. Поэтому такие волноводы не позволяют реализовать одномодовый режим распространения и достичь высокой интенсивности для небольшой пиковой собственных импульсов мощности. Потери мод, локализованных в полой сердцевине волновода, могут быть существенно использовании двумерно периодической (фотонноуменьшены при кристаллической) оболочки. В условиях сильной связи падающей и отраженной волн, реализующейся в ограниченной полосе частот, называемой фотонной запрещенной зоной, периодическая характеризуется высоким структура коэффициентом отражения, позволяющим реализовать волноводное распространение в полой сердцевине волновода с предельно низкими потерями. В волоконных лазерных системах полые волноводы с фотонно-кристаллической оболочкой используются для компрессии мощных световых импульсов, позволяя формировать на выходе системы световые импульсы мегаваттного уровня пиковой мощности длительностью порядка 100 фс, а также синтезировать импульсы длительностью менее одного цикла светового поля (рис. 4).

Значительный интерес представляют активно развивающиеся технологии внедрения алмазных наночастиц в ФК-световоды (рис. 5). Эти технологии позволяют наблюдать новые режимы взаимодействия электромагнитного поля с дефектами типа азот-вакансия (NV) в волноводной системе. На этой основе предполагается разработать новые полностью волоконные квантовых источники света, а также создать компактные волоконно-оптические сенсоры и миниатюрные зонды для задач биофотоники.



(а) (б) (в) Рис. 5. Фотоннокристаллические световоды с наноалмзазами: (а) алмазные наночастицы введены в каналы ФК-световода; (б) алмазные наночастицы находятся в полой сердцевине ФК-световода; (в) алмазные частицы находятся на торце световода.

Разработанные в последние годы новые типы оптических волноводов, сочетающие достижения оптических технологий с методами и подходами нелинейной оптики сверхкоротких импульсов, оптики микро- и наноструктур, физики фотонных кристаллов и нелинейной волноводной оптики, играют все более важную роль в создании новых компактных и эффективных волоконно-оптических систем для генерации сверхкоротких лазерных импульсов и управления их параметрами. Активное формирование частотного профиля дисперсии И пространственного профиля поля в собственных модах ФК-световодов открывает уникальные возможности для достижения высокоточного баланса дисперсии в широком спектральном диапазоне, что используется для разработки новых классов волоконно-оптических источников сверхкоротких световых импульсов. Методы нанооптики позволяют сформировать частотные профили дисперсии собственных мод в ФК-волокнах, обеспечивающие высокоэффективное преобразование частоты фемтосекундных лазерных импульсов и приводящие к генерации перестраиваемого излучения в широком спектральном диапазоне. Целенаправленное микро- и наноструктурирование оболочки и сердцевины оптических волокон позволяет осуществить высокоэффективное спектральное и временное преобразование лазерных импульсов с начальными длительностями от десятков наносекунд до нескольких циклов светового поля в широком диапазоне пиковых мощностей от сотен ватт до нескольких гигаватт. Солитонный режим передачи импульсов мегаваттной пиковой мощности через полые фотонно-кристаллические волокна

открывает новые возможности в области лазерной биомедицины и оптических технологий.

### Список литературы

1. Knight J C, Broeng J, Birks T A, Russell P St J Science 282 1476 (1998)

2. Cregan R F, Mangan B J, Knight J C, Birks T A, Russell P St J, Allen D, Roberts P J Science **285** 1537 (1999)

3. P.St.J. Russell, Science 299, 358 (2003).

4. J.C. Knight, Nature 424, 847 (2003).

5. А.А. Иванов, М.В. Алфимов, А.М. Желтиков, Успехи физических наук **174**, 743 (2004).

6. Zheltikov A M Nature Materials 4 267 (2005)

7. F. Benabid, J. C. Knight, G. Antonopoulos, and P. St. J. Russell, Science **298**, 399 (2002).

8. F. Benabid, F. Couny, J.C. Knight, T.A. Birks, and P.St.J. Russell, Nature **434**, 488 (2005).

9. A.A. Ivanov, M.V. Alfimov, and A.M. Zheltikov, Laser Phys. Lett. 4, 775 (2007).

10. А.М. Желтиков, Успехи физических наук 170, 1203 (2000).

11. А.М. Желтиков, Оптика микроструктурированных волокон (Москва, Наука, 2004).

12. А.М. Желтиков, Микроструктурированные световоды в оптических технологиях (Москва, Наука, 2008).

13. S.O. Konorov, D. A. Akimov, E. E. Serebryannikov, A. A. Ivanov, M. V. Alfimov, and A. M. Zheltikov, Phys. Rev. E **70**, 057601 (2004)

14. S.O. Konorov, D. A. Akimov, E. E. Serebryannikov, A. A. Ivanov, M. V. Alfimov, and A. M. Zheltikov, Phys. Rev. E **70**, 066625 (2004)

15. E.E. Serebryannikov, S.O. Konorov, A.A. Ivanov, M.V. Alfimov, M. Scalora, and A.M. Zheltikov, Phys. Rev. E **72**, 027601 (2005)

16. A. Ivanov, D. Lorenc, I. Bugar, F. Uherek, E.E. Serebryannikov, S. O. Konorov, M. V. Alfimov, D. Chorvat, and A.M. Zheltikov, Phys. Rev. E **73**, 016610 (2006)

17. V.P. Mitrokhin, A.B. Fedotov, A.A. Ivanov, M.V. Alfimov, and A.M. Zheltikov, Opt. Lett. **32**, 3471 (2007).

18. S.O. Konorov, D.A. Akimov, A.A. Ivanov, M.V. Alfimov, M. Scalora, and A.M. Zheltikov, Opt. Lett. **30**, 1548 (2005).

19. A.A. Ivanov, M. V. Alfimov, A. M. Zheltikov, M. Szpulak, W. Urbanczyk, and J. Wójcik, J. Opt. Soc. Am. B 23, 986 (2006)

20. E. E. Serebryannikov, A. B. Fedotov, A. M. Zheltikov, A. A. Ivanov, M. V. Alfimov, V. I. Beloglazov, N. B. Skibina, D. V. Skryabin, A. V. Yulin, and J. C. Knight, J. Opt. Soc. Am. B **23**, 1975 (2006).

21. A.B. Fedotov, D. A. Sidorov-Biryukov, A. A. Ivanov, M. V. Alfimov, V. I. Beloglazov, N. B. Skibina, C. -K. Sun, and A. M. Zheltikov, J. Opt. Soc. Am. B 23, 1471 (2006)

22. S. Konorov, A. Ivanov, D. Ivanov, M. Alfimov, and A. Zheltikov, Opt. Express 13, 5682 (2005)

23. A.V. Mitrofanov, Y. M. Linik, R. Buczynski, D. Pysz, D. Lorenc, I. Bugar, A. A. Ivanov, M. V. Alfimov, A. B. Fedotov, and A. M. Zheltikov, Opt. Express 14, 10645 (2006)

24. S. O. Konorov, D. A. Akimov, A. A. Ivanov, M. V. Alfimov, A. V. Yakimanskii, A. M. Zheltikov, Chem. Phys. Lett. **405**, 310 (2005).

25. A.A. Ivanov, Ya.M. Linik, D.A. Akimov, M.V. Alfimov, T. Siebert, W. Kiefer and A.M. Zheltikov, Chem. Phys. Lett. **418**, 19 (2006).

26. D.A. Akimov, A.A. Ivanov, M.V.Alfimov, and A.M. Zheltikov, Vibrational Spectrosc. 42, 33 (2006).

27. S. O. Konorov, A. A. Ivanov, M. V. Alfimov, and A. M. Zheltikov, Appl. Phys. B 81, 219 (2005).

28. D.A. Akimov, A.A. Ivanov, M.V. Alfimov, S.N. Bagayev, T.A. Birks, W.J. Wadsworth, P.J. Russell, A.B. Fedotov, V.S. Pivtsov, A.A. Podshivalov, and A.M. Zheltikov, Appl. Phys. B **74**, 307 (2002).

29. D.A. Akimov, A.A. Ivanov, A.N. Naumov, O.A. Kolevatova, M.V. Alfimov, T.A. Birks, W.J. Wadsworth, P.St.J. Russell, A.A. Podshivalov, and A.M. Zheltikov, Appl. Phys. B **76**, 515 (2003).

30. S.O. Konorov, D.A. Akimov, A.A. Ivanov, E.E. Serebryannikov, M.V. Alfimov, K.V. Dukelskii, A.V. Khokhlov, V.S. Shevandin, Yu.N. Kondratev and A.M. Zheltikov, Appl. Phys. B **79**, 289 (2004).

31. S.O. Konorov, D.A. Akimov, A.A. Ivanov, M.V. Alfimov and A.M. Zheltikov, Appl. Phys. B 78, (567) 2004.

32. S.O.Konorov, A.B.Fedotov, A.A.Ivanov, M.V.Alfimov, S.V.Zabotnov, D.A.Sidorov-Biryukov, A.A.Podshivalov, A.N.Petrov, L.Fornarini, M.Carpanese, G.Ferrante, R. Fantoni and A.M.Zheltikov, Opt. Commun. **224**, 309 (2003).

33. A.V. Mitrofanov, A.A. Ivanov, M.V. Alfimov, A.A. Podshivalov and A.M. Zheltikov, Opt. Commun. **280**, 453 (2007).

34. S.O. Konorov, A.A. Ivanov, M.V. Alfimov, and A.M. Zheltikov, J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 5, 362 (2003).

35. S.O. Konorov, A.A. Ivanov, M.V. Alfimov, L. Fornarini, M. Carpanese, M. Avella, M.E. Errico, A.N. Petrov, R. Fantoni, and A.M. Zheltikov, J. Opt. A: Pure Appl. Opt. **6**, 253 (2004).

36. S.O. Konorov, D.A. Akimov, A.A. Ivanov, M.V. Alfimov, S.V. Zabotnov, D.A. Sidorov-Biryukov, A.B. Fedotov, A.A. Podshivalov, L. Fornarini, M. Carpanese, M. Avella, M.E. Errico, R. Fantoni, and A.M. Zheltikov, J. Raman Spectrosc. **34**, 999 (2003).

37. D.A. Akimov, A.A. Ivanov, M.V. Alfimov, E.P. Grabchak, A.A. Shtykova, A.N. Petrov, A.A. Podshivalov, and A.M. Zheltikov, J. Raman Spectrosc. **34**, 1007 (2003).

38. S.O. Konorov, D.A. Akimov, A.A. Ivanov, M.V. Alfimov, S. Botti, R. Ciardi, L. De Dominicis, L.S. Asilyan, A.A. Podshivalov, D.A. Sidorov-Biryukov, R. Fantoni, A.M. Zheltikov, J. Raman Spectrosc. **34**, 1018 (2003).

39. Ya.M. Linik, A.A. Ivanov, D. A. Akimov, M. V. Alfimov, T. Siebert, W.Kiefer, and A.M. Zheltikov, J. Raman Spectrosc. **37**, 705 (2006).

40. M.V. Alfimov and A.M. Zheltikov, Laser Phys. Lett. 4, 363 (2007)..

41. A.A. Voronin, V.P. Mitrokhin, A.A. Ivanov, A.B. Fedotov, D.A. Sidorov-Biryukov, V.I. Beloglazov, M.V. Alfimov, H. Ludvigsen, and A.M. Zheltikov, Laser Phys. Lett. 7, 46 (2010).

42. S. O. Konorov, D. A. Akimov, A. A. Ivanov, M. V. Alfimov, A. B. Fedotov, D. A. Sidorov-Biryukov, L. A. Mel'nikov, A. V. Shcherbakov, I. Bugar, D. Chorvat Jr., F. Uherek, D. Chorvat, and A. M. Zheltikov Laser Phys. Lett. **1**, 402 (2004).

43. A.B. Fedotov, E. E. Serebryannikov, A. A. Ivanov, L. A. Mel'nikov, A. V. Shcherbakov, D. A. Sidorov-Biryukov, Ch.-K. Sun, M. V. Alfimov, and A. M. Zheltikov, Laser Phys. Lett. **3**, 301 (2006).

44. A.B. Fedotov, M.V. Alfimov, A.A. Ivanov, A.V. Tarasishin, V.I. Beloglazov, A.P. Tarasevitch, D. von der Linde, B.A. Kirillov, S.A. Magnitskii, D. Chorvat, D. Chorvat Jr., A.N. Naumov, E.A. Vlasova, D.A. Sidorov-Biryukov, A.A. Podshivalov, O.A. Kolevatova, L.A. Mel'nikov, D. A. Akimov, V.A. Makarov, Yu.S. Skibina, and A.M. Zheltikov, Laser Physics **11**, 138 (2001).

45. A.A. Ivanov, M.V. Alfimov, A.B. Fedotov, A.A. Podshivalov, D. Chorvat, D. Chorvat Jr., and A.M. Zheltikov, Laser Physics **11**, 158 (2001).

46. A.B. Fedotov, A.M. Zheltikov, M.V. Alfimov, A.A. Ivanov, M.S. Syrchin, A.P. Tarasevitch, and D. von der Linde, Laser Physics **11**, 1058 (2001).

47. S.O. Konorov, A.B. Fedotov, A.A. Ivanov, M.V. Alfimov, V.I. Beloglazov, N.B. Skibina, A.A. Podshivalov, A.N. Petrov, A.V. Shcherbakov, and A.M. Zheltikov, Laser Physics **13**, 1046 (2003).

48. S.O. Konorov, A.A. Ivanov, M.V. Alfimov, A.B. Fedotov, Yu.N. Kondrat'ev, V.S. Shevandin, K.V. Dukel'skii, A.V. Khokhlov, A.A. Podshivalov, A.N. Petrov, D.A. Sidorov-Biryukov, and A.M. Zheltikov, Laser Physics **13**, 1170 (2003).

49. D.A. Akimov, M.V. Alfimov, S.O. Konorov, A.A. Ivanov, S. Botti, A.A. Podshivalov, R. Ciardi, L.De Dominicis, L.S. Asilyan, R. Fantoni, and A.M. Zheltikov, Laser Physics **13**, 1279 (2003).

50. S. O. Konorov, D. A. Akimov, A. A. Ivanov, M. V. Alfimov, V. I. Beloglazov, N. B. Skibina, and A. M. Zheltikov, Laser Physics **14**, 785 (2004).

52. S. O. Konorov, A. A. Ivanov, D. A. Akimov, M. V. Alfimov, A. A. Podshivalov, Yu. N. Kondrat'ev, V. S. Shevandin, K. V. Dukel'skii, A. V. Khokhlov, and A. M. Zheltikov, Laser Physics, **14**, 791 (2004).

52. D. A. Akimov, S. O. Konorov, P. V. Mezentsev, R. V. Markov, A. I. Plekhanov, A. A. Ivanov, A. N. Petrov, M. V. Alfimov, and A. M. Zheltikov, Laser Phys. 15, 700 (2005).

53. A.A. Ivanov, D. A. Akimov, P. V. Mezentsev, A.I. Plekhanov, M. V. Alfimov, and A. M. Zheltikov, Laser Physics **16**, 965 (2006).

54. А.А. Иванов, М.В. Алфимов, А. М. Желтиков, Письма ЖЭТФ 83, 513 (2006).

55. М. В. Алфимов, А. М. Желтиков, А. А. Иванов, В. И. Белоглазов, Б. А. Кириллов, С. А. Магницкий, А. В. Тарасишин, А. Б. Федотов, Л. А. Мельников, Н. Б. Скибина, Письма ЖЭТФ **71**, 714 (2000).

56. С.О. Коноров, Е.Е. Серебрянников, А.А. Иванов, Д.А. Акимов, М.В. Алфимов, М. Скалора, А.М. Желтиков, Письма ЖЭТФ **81**, 65 (2005).

57. С.О. Коноров, Е.Е. Серебрянников, А.А. Иванов, Д.А. Акимов, М.В. Алфимов, А.М. Желтиков, Письма ЖЭТФ **79**, 499 (2004).

58. А.В. Митрофанов, А.А. Иванов, А.А. Подшивалов, М.В. Алфимов, А.М. Желтиков, Письма ЖЭТФ **85**, 283 (2007).

59. С.О. Коноров, Д.А. Акимов, А.А. Иванов, М.В. Алфимов, А.М. Желтиков, Журнал экспериментальной и теоретической физики **125**, № 6 (2004).

60. Е.Е.Серебрянников, С.О.Коноров, А.А.Иванов, М.В.Федоров, М.В.Алфимов, Журнал экспериментальной и теоретической физики **129**, 808 (2006).

61. Д.А. Акимов, С.О. Коноров, М.В. Алфимов, А.А. Иванов, В.И. Белоглазов, Н.Б. Скибина, А.Б. Федотов, Д.А. Сидоров-Бирюков, А.Н. Петров, А.М. Желтиков, Квантовая электроника **34**, 473 (2004).

62. С.О. Коноров, Д.А. Сидоров-Бирюков, И. Бугар, Д. Хорват мл., В.И. Белоглазов, Н.Б. Скибина, Л.А. Мельников, А.В. Щербаков, Д. Хорват, А.М. Желтиков, Квантовая электроника **34**, 56 (2004).

63. С.О. Коноров, А.Б. Федотов, В.И. Белоглазов, Н.Б. Скибина, А.В. Щербаков, А.М. Желтиков, Квантовая электроника **34**, 51 (2004).

64. С.О. Коноров, А.А. Иванов, Д.А. Акимов, А.В. Якиманский, М.В. Алфимов, А.М. Желтиков, Письма в ЖЭТФ **80**, 190 (2004).

65. А.Б. Федотов, Е.Е. Серебрянников, А.А. Иванов, Д.А. Сидоров-Бирюков, А.В. Щербаков, Л.А. Мельников, М.В. Алфимов, А.М. Желтиков, Российские нанотехнологии **1**, 240 (2006).

66. Smith C M, Venkataraman N, Gallagher M T, Muller D, West J A, Borrelli N F, Allan D C, Koch K Nature **424** 657 (2003)

67. Желтиков А М УФН 174 1301 (2004)

68. F. Luan, A. K. George, T. D. Hedley, G. J. Pearce, D. M. Bird, J. C. Knight and P. S. J. Russell, Opt. Lett. **29**, 2369 (2004).

69. W.H. Reeves, D.V. Skryabin, F. Biancalana, J.C. Knight, P.St.J. Russell, F.G. Omenetto, A. Efimov, and A.J. Taylor, Nature **424**, 511 (2003).

70. D.V. Skryabin, F. Luan, J.C. Knight, and P.St.J. Russell, Science 301, 1705 (2003).

71. А.М. Желтиков, УФН **174,** 73 (2004)

72. А.М. Желтиков, Успехи физических наук, 176, 623 (2006).

73. J. M. Dudley, G. Genty, and S. Coen, Rev. Mod. Phys. 78, 1135 (2006)

74. D.J. Jones, S.A. Diddams, J.K. Ranka, A. Stentz, R.S. Windeler, J.L. Hall, and S.T. Cundiff, Science **288**, 635 (2000).

75. Th. Udem, R. Holzwarth, and T.W. Hänsch, Nature 416, 233 (2002).

76. E.E. Serebryannikov, A.M. Zheltikov, N. Ishii, C.Y. Teisset, S. Köhler, T. Fuji, T. Metzger, F. Krausz, and A. Baltuška, Phys. Rev. E **72** 056603 (2005).

77. C.Y. Teisset, N. Ishii, T. Fuji, T. Metzger, S. Köhler, R. Holzwarth, A. Baltuska, A.M. Zheltikov, and F. Krausz, Opt. Express **13**, 6550 (2005).

78. I. Hartl, X. D. Li, C. Chudoba, R.K. Rhanta, T.H. Ko, J.G. Fujimoto, J.K. Ranka, R.S. Windeler: Opt. Lett. **26**, 608 (2001).

79. S. O. Konorov, D. A. Akimov, E. E. Serebryannikov, A. A. Ivanov, M. V. Alfimov, and A. M. Zheltikov, Phys. Rev. E **70**, 057601 (2004)

80. D. A. Sidorov-Biryukov, E. E. Serebryannikov, and A. M. Zheltikov, Opt. Lett. **31**, 2323 (2006).

81. H.N. Paulsen, K.M. Hilligsøe, J. Thøgersen, S.R. Keiding, and J.J. Larsen, Opt. Lett. 28, 1123 (2003).

82. A.M. Zheltikov, A.A. Voronin, M. Kitzler, A. Baltuška, and M. Ivanov, Phys. Rev. Lett. **103**, 033901 (2009)

83. A.M. Zheltikov, A.A. Voronin, R. Kienberger, F. Krausz, and G. Korn, Phys. Rev. Lett., **105**, 103901 (2010).

84. A.J. Verhoef, A.V. Mitrofanov, E.E. Serebryannikov, D.V. Kartashov, A.M. Zheltikov, and A. Baltuska, Phys. Rev. Lett., **104**, 163904 (2010).

85. F. Reiter, U. Graf, E.E. Serebryannikov, W. Schweinberger, M. Fiess, M Schultze, A.M. Azzeer, R. Kienberger, F. Krausz, A.M. Zheltikov, and E. Goulielmakis, Phys. Rev. Lett., **105**, 243902 (2010)

86. A.J. Traverso, R. Sanchez-Gonzalez, L. Yuan, K. Wang, D.V. Voronine, A.M. Zheltikov, Y. Rostovtsev, V.A. Sautenkov, A.V. Sokolov, S.W. North, and M.O. Scully, Proc. Natl. Acad. Sci. **109**, 15185 (2012).

87. L.V. Doronina, I.V. Fedotov, A.A. Voronin, O.I. Ivashkina, M.A. Zots, K.V. Anokhin, E.V. Rostova, A.B. Fedotov, and A.M. Zheltikov, Optics Letters **34**, 3373 (2009)

88. L.V. Doronina-Amitonova, I.V. Fedotov, O.I. Ivashkina, M.A. Zots, A.B. Fedotov, K.V. Anokhin, and A.M. Zheltikov, J. Biophotonics **3**, 660 (2010)

89. L.V. Doronina-Amitonova, I.V. Fedotov, O.I. Ivashkina, M.A. Zots, A. B. Fedotov, K.V. Anokhin, A.M. Zheltikov, Appl. Phys. Lett. **98**, 253706 (2011)

90. A.M. Zheltikov, K.V. Anokhin, Phys. Rev. E. 6, 061902 (2011)

91. L.V. Doronina-Amitonova, I.V. Fedotov, O.I. Ivashkina, M.A. Zots, A. B. Fedotov, K.V. Anokhin, A.M. Zheltikov, Scientific Reports, http://www.nature.com/srep, in press

92. A.B. Fedotov, A.A. Voronin, I.V. Fedotov, A.A. Ivanov, A.M. Zheltikov, Opt. Lett. **34**, 851 (2009)

93. A. B. Fedotov, A. A Voronin, I. V. Fedotov, A. A. Ivanov, A. M. Zheltikov, Optics Letters **34**, 662 (2009)

94. V. P. Mitrokhin, A. B. Fedotov, A. A. Ivanov, A. A. Podshivalov, P. K. Kashkarov, M. V. Alfimov, K. Sakoda, and A. M. Zheltikov, Laser Physics **18**, 1411 (2008).

95. M.L. Hu, Y.F. Li, L. Chai, X. Qirong; L.V. Doronina, A.A. Ivanov, C.Y. Wang, and A.M. Zheltikov, Opt. Express 16, 11176 (2008).

96. A.B. Fedotov, A.A. Voronin, E.E. Serebryannikov, I.V. Fedotov, A.V. Mitrofanov, A.A. Ivanov, D.A. Sidorov-Biryukov, and A.M. Zheltikov, Phys. Rev. E **75**, 016614 (2007).

97. И.В. Федотов, А.Ю. Тащилина, Л.В. Доронина, А.Б. Федотов, П.А. Жохов, Д.А, Сидоров-Бирюков, М.В. Алфимов, А.М. Желтиков, Российские нанотехнологии **5**, 98 (2010).

98. В.П. Митрохин, А.А. Иванов, А.Ю. Меньшикова, А.В. Якиманский, М.В. Алфимов, А,М, Желтиков, Российские нанотехнологии **5**, 113 (2010).

99. А.Б. Федотов, Д.А. Сидоров-Бирюков, А.А. Иванов, М.В. Алфимов, А.М. Желтиков, Российские нанотехнологии **2**, 134 (2007).