

# Фазовая самомодуляция фемтосекундных импульсов в полых фотонно-кристаллических волокнах

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.Жёлтиков

*Экспериментально исследовано явление фазовой самомодуляции фемтосекундных лазерных импульсов в полых фотонно-кристаллических (ФК) волокнах. Разработаны и созданы ФК волокна, позволяющие обеспечивать одномодовый волноводный режим нелинейно-оптических взаимодействий для фемтосекундных импульсов излучения с  $\lambda \sim 800$  нм в режиме максимального пропускания. Показана возможность существенного повышения эффективности фазовой самомодуляции субмикроджоулевых фемтосекундных импульсов титан-сапфирового лазера в полых ФК волокнах.*

**Ключевые слова:** микроструктурированные волокна, фотонные кристаллы, нелинейная оптика.

## 1. Введение

Полые волноводы [1] активно используются в современных лазерных системах для увеличения длины нелинейно-оптического взаимодействия лазерных импульсов и повышения эффективности нелинейно-оптических процессов [2]. Волноводы этого типа позволяют реализовать нелинейно-оптическое преобразование спектра сверхкоротких импульсов высокой интенсивности без повреждения сердцевины волновода вследствие оптического пробоя. Эффект фазовой самомодуляции (ФСМ) в газе, заполняющем сердцевину полого волновода, дает возможность получать импульсы длительностью менее 5 фс [3, 4]. ВКР лазерных импульсов в полых волноводах, заполненных комбинационно-активными газами, приводит к эффективной генерации большого числа комбинационных компонент, фазировка которых позволяет осуществить синтез импульсов длительностью менее 4 фс [5]. Полые волноводы дают возможность радикально увеличить эффективность генерации гармоник высокого порядка [6–9] и повысить чувствительность методов газового анализа, основанных на спектроскопии четырехволнового взаимодействия [10–13].

Моды стандартных полых волноводов со сплошной диэлектрической оболочкой характеризуются неустраиваемыми оптическими потерями [1], которые растут с уменьшением радиуса  $a$  полой сердцевины волокна по закону  $\lambda^2/a^3$ , где  $\lambda$  – длина волны излучения. Это накладывает ограничения на уменьшение радиуса сердцевины полых волокон. В экспериментах, как правило, используются полые волокна с диаметром сердцевины  $2a = 100 - 500$  мкм. Излучение при этом распространяется через волокно в многомодовом режиме. Влияние высших волноводных мод на процессы четырехволнового взаимодействия в полых волокнах исследовалось в работах [12, 13].

Оптические потери в полых волноводах могут быть существенно уменьшены путем использования волокон с двумерно периодической оболочкой – фотонно-кристаллических (ФК) волокон [14]. Периодическая структура оболочки подобных волноводов характеризуется наличием фотонных запрещенных зон. Излучение, частоты которого попадают в эти области, не может проникать в периодическую структуру. Коэффициент отражения периодической структуры в данных областях существенно превышает коэффициент отражения материала оболочки, что вызывает значительное уменьшение оптических потерь волноводных мод, распространяющихся вдоль полой сердцевины волокна. Таким образом, фотонные запрещенные зоны периодической оболочки полых ФК волокон, приводят к возникновению максимумов в их спектрах пропускания [14, 15]. Эксперименты по ВКР [16] и четырехволновым взаимодействиям [17] показывают, что полые ФК волокна позволяют радикально увеличить эффективность нелинейно-оптических взаимодействий в газовой фазе.

Вследствие ограниченной спектральной ширины фотонных запрещенных зон периодической оболочки ФК волокон, максимумы в спектрах их пропускания имеют конечную ширину. Данное обстоятельство накладывает ограничение на длительность импульсов, передаваемых по волокну, и приводит к экспериментальным трудностям при использовании фемтосекундных импульсов. Эксперименты [18] указывают на возможность согласования спектра сверхкоротких импульсов и максимумов в

**А.М.Жёлтиков.** Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы; Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы; e-mail: zheltikov@top.phys.msu.ru

**С.О.Коноров.** Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы

**Д.А.Сидоров-Бирюков.** Международный учебно-научный лазерный центр, МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы

**I.Bugar, D.Chorvat Jr., D.Chorvat.** International Laser Center, Ilkovičova 3, 81219 Bratislava, Slovak Republic

**В.И.Белоглазов, Н.Б.Скибина, А.В.Щербаков.** Институт технологии и обработки стеклянных структур, Россия, 410044 Саратов, просп. Строителей, 1

**Л.А.Мельников.** Саратовский государственный университет, Россия, 410026 Саратов, Астраханская ул., 83

Поступила в редакцию 29 июля 2003 г., после доработки – 10 ноября 2003 г.

спектре пропускания полых ФК волокон. В настоящей работе представлены результаты первых экспериментов, посвященных исследованию нелинейно-оптических взаимодействий фемтосекундных импульсов в полых ФК волокнах. Выполненные эксперименты свидетельствуют о возможности существенного повышения эффективности фазовой самомодуляции субмикроджоулевых фемтосекундных импульсов титан-сапфирового лазера в этих волокнах.

## 2. Экспериментальная техника

Лазерная система, применявшаяся в наших экспериментах, состояла из задающего генератора на сапфире с титаном, стретчера, многопроходного усилителя и компрессора. Накачка задающего генератора обеспечивалась непрерывным излучением второй гармоники Nd:YVO<sub>4</sub>-лазера (Verdi, Coherent) с диодной накачкой мощностью 4 Вт. Задающий генератор позволял получать импульсы излучения длительностью 50–100 фс с частотой повторения 100 МГц и средней мощностью до 400 мВт. Усиленные chirпированные импульсы, следовавшие с частотой повторения 1 кГц, сжимались в решеточном компрессоре, формировавшем импульсы с длительностью 100–130 фс и энергией до 150 мкДж.

Полые ФК волокна, использовавшиеся в наших экспериментах, имели период структуры оболочки порядка 5 мкм и диаметр сердцевины около 14 мкм (см. вставку на рис. 1). Технология изготовления полых ФК волокон подробно описана в работе [19]. Спектр пропускания полых ФК волноводов характеризуется наличием ярко выраженных максимумов (рис. 1, 2). Природа этих пиков связана с тем, что периодически структурированная оболочка волокна имеет высокую отражательную способность вблизи фотонных запрещенных зон, что приводит к значительному уменьшению потерь волноводных мод в узких спектральных областях [14]. Излучение с длинами волн, лежащими вдали от запрещенных зон, может вызывать лишь возбуждение вытекающих мод полого волновода. Такие моды характеризуются значительными потерями и не дают заметного вклада в сигнал на вы-

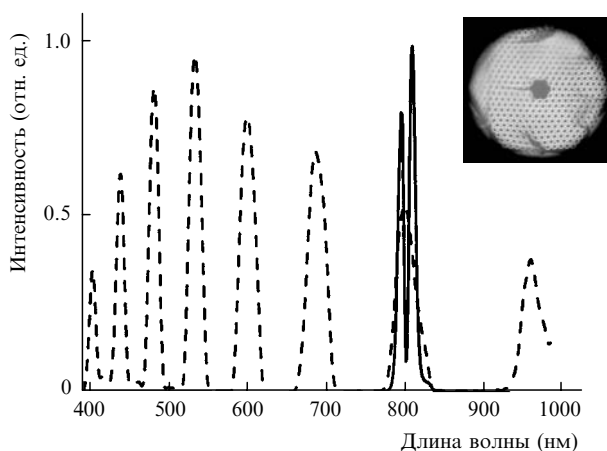


Рис. 1. Спектр импульсов на выходе полого ФК волокна длиной 6 см, соответствующий входным импульсам излучения с длиной волны 800 нм и длительностью около 110 фс (сплошная кривая), а также спектр пропускания этого волокна (штриховая кривая). Энергия излучения, вводимого в волокно, составляет 0.9 мкДж. На вставке – поперечное сечение полого ФК волокна с периодом структуры в оболочке около 5 мкм.

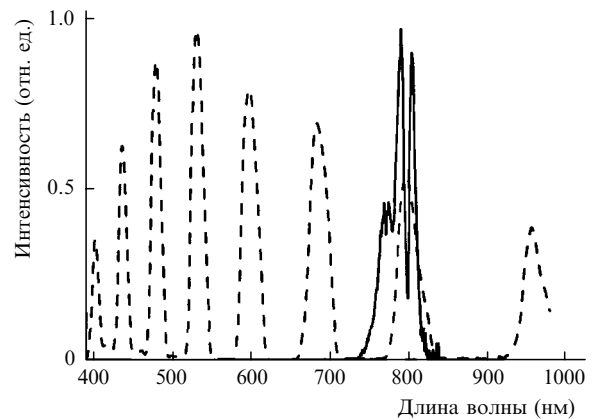


Рис. 2. Спектр импульсов на выходе полого ФК волокна (сплошная кривая) и спектр пропускания этого волокна (штриховая кривая). Параметры импульсов и волокна те же, что и на рис. 1. Энергия излучения, вводимого в волокно, составляет 1.5 мкДж.

ходе волокна. Перестройка спектра пропускания полых ФК волокон достигается путем изменения структуры оболочки [19]. Для передачи фемтосекундных импульсов титан-сапфирового лазера были спроектированы и изготовлены ФК волокна, обеспечивающие низкие потери в области длин волн около 800 нм (рис. 1). Длина ФК волокна варьировалась от 3 до 10 см.

## 3. Результаты и их обсуждение

Решение задачи уменьшения оптических потерь при распространении сверхкоротких импульсов через полые ФК волокна предполагает согласование спектра лазерных импульсов со спектром пропускания этих волокон. Явление ФСМ приводит к уширению спектра сверхкоротких лазерных импульсов. С учетом этого ширина соответствующего максимума в спектре пропускания полого ФК волокна, обеспечиваемого фотонной запрещенной зоной оболочки, должна быть достаточна для передачи спектрально уширенного короткого лазерного импульса без существенных искажений.

Для исследования ФСМ в полое ФК волокно с диаметром сердцевины около 14 мкм вводились импульсы излучения титан-сапфирового лазера с энергией 0.5–5 мкДж и начальной длительностью около 130 фс. Измерение оптических потерь используемого полого ФК волокна позволяло найти характерную длину ослабления, которая оказалась порядка 11 см. С учетом этого длина ФК волокна для ФСМ в экспериментах выбиралась равной 5–9 см.

Сплошной линией на рис. 1, 2 показаны спектры излучения на выходе ФК волокна длиной 6 см, соответствующие входным импульсам излучения с длиной волны 800 нм и длительностью около 130 фс. Ширина спектра входных импульсов была равна 6 нм. Энергия излучения, вводимого в волокно, составляла 0.9 мкДж (рис. 1) и 1.5 мкДж (рис. 2). Спектры выходных импульсов уширены по сравнению со спектром начальных импульсов вследствие ФСМ. Спектральная ширина выходных импульсов, как следует из сравнения экспериментальных результатов, представленных на рис. 1 и 2, увеличивается с ростом энергии фемтосекундных импульсов, вводимых в волокно. Оптимальные условия для передачи спектрально уширенных импульсов через ФК волокно достигаются при согласовании уширенного за счет

ФСМ спектра импульса и соответствующего максимума в спектре пропускания ФК волновода. Пример такого согласования дан на рис.1. Ширина спектра ФСМ-импульса, показанного на рис.2, превышает ширину пика пропускания ФК волокна, что приводит к дополнительным потерям излучения.

Распространение и нелинейное самовоздействие фемтосекундных импульсов в условиях наших экспериментов происходило, как следует из анализа поперечного распределения интенсивности излучения на выходе волокна, в одномодовом режиме. Подобный режим нелинейно-оптического взаимодействия позволяет свести к минимуму потери энергии, связанные с возбуждением высших волноводных мод [20], и принципиально недостижим для стандартных полых волноводов со сплошной оболочкой.

Ширина спектра выходного импульса, представленного на рис.1, составляет примерно 35 нм. Для подобного спектрального уширения импульсов за счет ФСМ в стандартных полых волноводах с внутренним диаметром порядка 100 мкм требуются интенсивности лазерного излучения, в 40 – 100 раз превышающие интенсивности фемтосекундных импульсов, использовавшихся в настоящей работе. Полученные значения нелинейного набега фазы и спектрального уширения импульса позволяют сделать следующую оценку эффективного диаметра волноводной моды в ФК волокне (нелинейный показатель преломления атмосферного воздуха  $n_2$  полагается равным  $\sim 5 \times 10^{-19}$  см<sup>2</sup>/Вт [21]):  $d_{\text{eff}} \approx 8 - 10$  мкм. Данная оценка согласуется с результатами прямых измерений, выполненных на основе исследования поперечного распределения интенсивности излучения на выходе ФК волокна. Полые ФК волокна, таким образом, обеспечивают уникальную возможность реализации высокоэффективных нелинейно-оптических взаимодействий волноводных мод электромагнитного излучения с поперечным размером порядка нескольких микрометров в газовых средах.

#### 4. Заключение

В настоящей работе экспериментально продемонстрирована возможность использования полых ФК волокон для радикального увеличения эффективности ФСМ фемтосекундных лазерных импульсов. Разработаны и созданы ФК волокна, обеспечивающие волноводный режим нелинейно-оптических взаимодействий для фемтосекундных импульсов излучения с длиной волны около 800 нм, соответствующей максимальному пропусканию. Распространение и нелинейное самовоздействие фемтосекундных импульсов в полых ФК волноводах происходило в одномодовом режиме. Подобный режим нелинейно-оптического взаимодействия позволяет свести к

минимуму потери энергии, связанные с возбуждением высших волноводных мод, и принципиально недостижим для стандартных полых волноводов со сплошной оболочкой. Полые ФК волокна обеспечивают уникальную возможность реализации высокоэффективных нелинейно-оптических взаимодействий волноводных мод с поперечным размером порядка нескольких микрометров в газовой среде. ФСМ в этих условиях позволяет достичь значительных нелинейных фазовых сдвигов для субмикроджоулевых фемтосекундных импульсов.

Настоящая работа выполнена при поддержке гранта МД-42.2003.02 Президента РФ, грантов РФФИ № 02-02-17098 и 03-02-16929, а также грантов Volkswagen Foundation I/76 869 и European Research Office of the US Army.

1. Marcatili E.A.J., Schmeltzer R.A. *Bell Syst. Tech. J.*, **43**, 1783 (1964).
2. Желтиков А.М. *УФН*, **172**, 743 (2002).
3. Nisoli M., De Silvestri S., Svelto O. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 2793 (1996).
4. Nisoli M., De Silvestri S., Svelto O., Szpöcs R., Ferencz K., Spielmann Ch., Sartania S., Krausz F. *Opt. Lett.*, **22**, 522 (1997).
5. Zhavoronkov N., Korn G. *Phys. Rev. Lett.*, **88**, 203901 (2002).
6. Durfee III C.G., Backus S., Murnane M.M., Kapteyn H.C. *Opt. Lett.*, **22**, 1565 (1997).
7. Rundquist A., Durfee III C.G., Chang Z., Herne C., Backus S., Murnane M.M., Kapteyn H.C. *Science*, **5368**, 1412 (1998).
8. Tamaki Y., Midorikawa K., Obara M. *Appl. Phys. B*, **67**, 59 (1998).
9. Constant E., Garzella D., Breger P., Mevel E., Dorrer Ch., Le Blanc C., Salin F., Agostini P. *Phys. Rev. Lett.*, **82**, 1668 (1999).
10. Miles R.B., Laufer G., Bjorklund G.C. *Appl. Phys. Lett.*, **30**, 417 (1977).
11. Fedotov A.B., Giammanco F., Naumov A.N., Marsili P., Ruffini A., Sidorov-Biryukov D.A., Zheltikov A.M. *Appl. Phys. B*, **72**, 575 (2001).
12. Наумов А.Н., Сидоров-Бирюков Д.А., Джамманко Ф., Федотов А.Б., Марсили П., Руффини А., Колеватова О.А., Желтиков А.М. *ЖЭТФ*, **120**, 280 (2001).
13. Наумов А.Н., Сидоров-Бирюков Д.А., Джамманко Ф., Федотов А.Б., Марсили П., Руффини А., Желтиков А.М. *Письма в ЖЭТФ*, **73**, 301 (2001).
14. Cregan R.F., Mangan B.J., Knight J.C., Birks T.A., Russell P.St.J., Roberts P.J., Allan D.C. *Science*, **285**, 1537 (1999).
15. Коноров С.О., Федотов А.Б., Колеватова О.А., Белоглазов В.И., Скибина Н.Б., Щербаков А.В., Желтиков А.М. *Письма в ЖЭТФ*, **76**, 401 (2002).
16. Benabid F., Knight J.C., Antonopoulos G., Russell P.St.J. *Science*, **298**, 399 (2002).
17. Konorov S.O., Fedotov A.B., Zheltikov A.M. *Opt. Lett.*, **28**, 1448 (2003).
18. Коноров С.О., Федотов А.Б., Белоглазов В.И., Скибина Н.Б., Щербаков А.В., Желтиков А.М. *Квантовая электроника*, **34**, 51 (2004).
19. Коноров С.О., Колеватова О.А., Федотов А.Б., Серебрянников Е.Е., Сидоров-Бирюков Д.А., Михайлова Ю.М., Наумов А.Н., Белоглазов В.И., Скибина Н.Б., Мельников Л.А., Щербаков А.В., Желтиков А.М. *ЖЭТФ*, **123**, 975 (2003).
20. Kolevatova O.A., Naumov A.N., Zheltikov A.M. *Opt. Commun.*, **217**, 169 (2003).
21. Marburger J.H. *Progr. Quantum Electron.*, **4**, 35 (1975).