

Генерация перестраиваемого излучения в области 350 – 600 нм и нелинейно-оптическая трансформация спектра фемтосекундных импульсов лазера на хром-форстерите в субмикронных кварцевых каналах микроструктурированного волокна

С.О.Коноров, А.А.Иванов, М.В.Алфимов, А.Б.Федотов, Ю.Н.Кондратьев,
В.С.Шевандин, К.В.Дукельский, А.В.Хохлов, А.А.Подшивалов, А.Н.Петров,
Д.А.Сидоров-Бирюков, А.М.Жёлтиков

Экспериментально продемонстрирована возможность высокоэффективной генерации перестраиваемого излучения в области 350–600 нм в результате нелинейно-оптического преобразования частоты фемтосекундных импульсов лазера на хром-форстерите в системе субмикронных нитевидных кварцевых каналов в микроструктурированном волокне. Нелинейно-оптическая трансформация спектра фемтосекундных импульсов при этих условиях приводит к генерации изолированных спектральных компонент с частотой, превышающей частоту третьей гармоники, которые отделены от частоты излучения накачки спектральным интервалом свыше 580 ТГц.

Ключевые слова: сверхкороткие импульсы, нелинейная оптика, микроструктурированные волокна.

Преобразование частоты излучения фемтосекундных лазеров является одной из наиболее актуальных задач лазерной физики и квантовой электроники. Стандартный способ решения этой задачи основан на использовании нелинейно-оптических кристаллов [1]. В последнее время широкое распространение получили периодические структуры на основе нелинейных кристаллов, реализующие идею фазового квазисинхронизма [2, 3], а также активно обсуждаются возможности преобразования частоты фемтосекундных импульсов с помощью фотонных кристаллов [4–6]. Основные факторы, ограничивающие эффективность преобразования частоты сверхкоротких импульсов в нелинейных кристаллах и периодических структурах, связаны с дисперсией групповой скорости и с возможностью обеспечения условий фазового согласования лишь в ограниченном спектральном диапазоне.

Микроструктурированные [7–13] и перетянутые [14, 15] волокна обладают рядом уникальных свойств, позволяющих достигать высоких эффективностей нелинейно-оптических взаимодействий сверхкоротких лазерных импульсов малой мощности. В частности, изменением структуры подобных волокон удается формировать тре-

буемый профиль дисперсии [16], а значительная разность показателей преломления сердцевинки и оболочки обуславливает высокую степень локализации электромагнитного излучения в сердцевине волокна [17, 18]. Микроструктурированные и перетянутые волокна позволяют достичь фазового согласования для процессов генерации третьей гармоники [19, 20] и четырехволновых взаимодействий [21], обеспечивая высокие эффективности преобразования частоты фемтосекундных импульсов как при формировании широкополосного излучения (суперконтинуума) [22], так и при генерации изолированных спектральных компонент [19–21].

Целью настоящей работы является исследование нелинейно-оптических взаимодействий в микроструктурированных волокнах при их возбуждении фемтосекундными импульсами лазера на хром-форстерите.

Для проведения экспериментов по преобразованию частоты импульсов лазера на хром-форстерите использовался типоряд микроструктурированных оптических волокон, оболочки которых состоят из одного, двух и более гексагональных циклов воздушных отверстий (рис. 1). Микроструктурированные волокна были изгото-

С.О.Коноров, А.Б.Федотов, 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
А.А.Подшивалов, Д.А.Сидоров-Бирюков. Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы
А.А.Иванов, М.В.Алфимов, А.Н.Петров. Центр фотохимии РАН, Россия, 117421 Москва, ул. Новаторов, 7а
Ю.Н.Кондратьев, В.С.Шевандин, К.В.Дукельский, А.В.Хохлов. Всероссийский научный центр «ГОИ им. С.И.Вавилова», Россия, 190034 С.-Петербург, Биржевая л., 16

Поступила в редакцию 18 марта 2003 г.

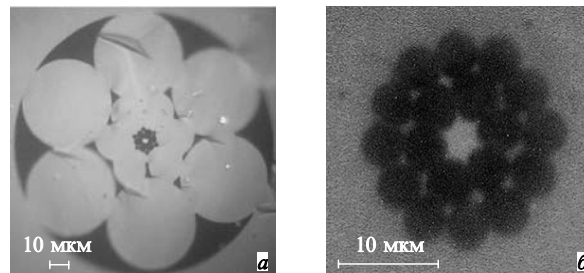


Рис. 1. Поперечные сечения микроструктурированных волокон с одним (а) и двумя (б) гексагональными циклами воздушных отверстий вокруг центральной жилы.

влены из плавленного кварца с использованием методики, подробно описанной в работах [23, 24]. Минимальный диаметр сердцевины волокон составлял 1 мкм. Воздушные отверстия, как видно из рис.1, обеспечивают значительный скачок показателя преломления при переходе от сердцевины к оболочке, обуславливая высокую степень локализации светового поля в сердцевине волокна. Кроме центрального волноведущего канала созданные волокна имеют периферийные каналы в форме кварцевых нитей с характерными размерами порядка микрона и менее (рис.1).

Подобные субмикронные кварцевые нити не только обеспечивают высокую степень локализации электромагнитного излучения за счет значительного контраста их показателя преломления относительно воздуха, но и открывают путь к достижению физического предела увеличения эффективности нелинейно-оптических процессов в волноводном режиме [25]. Существование этого предела связано с конкуренцией процессов дифракции и удержания излучения в волноводе за счет градиента профиля показателя преломления.

В наших экспериментах использовались микроструктурированные волокна трех типов – с одним, двумя и тремя рядами воздушных отверстий. Для каждого типа испытывались волокна с диаметром сердцевины 1, 2, 3 и 5 мкм. Измерения производились с волокнами длиной 5, 7, 10, 20, 30 и 50 см.

С физической точки зрения увеличение эффективности нелинейно-оптических процессов в системе подобных субмикронных кварцевых нитей обусловлено теми же причинами, что и в перетянутых волокнах. Архитектура микроструктурированных волокон позволяет интегрировать тонкие кварцевые каналы в единый пучок. Длина подобного волокна может составлять сотни метров, что позволяет устранить одно из основных ограничений, связанных с техническими сложностями, возникающими при изготовлении и использовании перетянутых волокон больших длин. Наличие в микроструктурно интегрированном пучке субмикронных кварцевых нитей разных размеров позволяет преобразовывать частоту излучения накачки (в наших экспериментах – фемтосекундных импульсов хром-форстеритового лазера) в различные области спектра.

Лазерная система, использовавшаяся в наших экспериментах (рис.2), состояла из задающего лазера на кристалле Cr^{4+} :форстерит, стретчера, узла оптической развязки, регенеративного усилителя и компрессора. Для

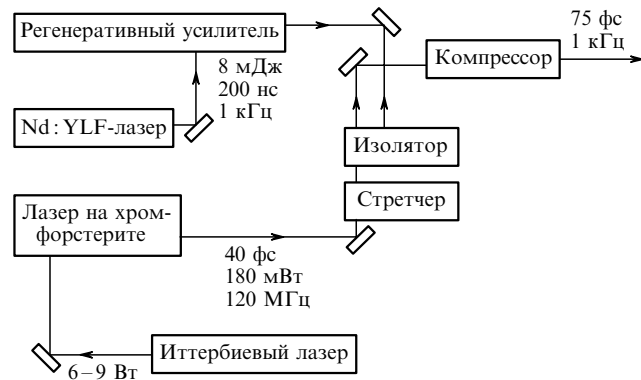


Рис.2. Фемтосекундная лазерная система на хром-форстерите с регенеративным усилителем.

накачки задающего лазера использовался волоконный иттербиевый лазер. Задающий лазер генерировал импульсы с характерной длительностью 30–50 фс и частотой повторения 120 МГц. Центральная длина волны этих импульсов составляла 1270 нм при спектральной ширине 26 нм. Средняя мощность излучения лазера составляла около 180 мВт.

Фемтосекундные импульсы длительностью 30–50 фс с горизонтальной поляризацией поступали на вход решеточного стретчера (рис.2), увеличивавшего их длительность до 700 пс. Изолятор Фарадея и пластинка $\lambda/4$ изменяли поляризацию излучения на вертикальную. Импульсы с вертикальной поляризацией подавались на вход регенеративного усилителя через широкополосный поляризатор таким образом, что момент инжекции совпадал по времени с максимумом инверсии населенности, частота появления которого определялась частотой следования импульсов накачки, равной 1 кГц. С помощью затвора устанавливалась горизонтальная поляризация импульсов, инжектируемых в резонатор усилителя. Через промежуток времени, соответствующий оптимальному усилению, затвор срабатывал, обеспечивая вывод усиленного импульса с энергией 100 мкДж из усилителя и изменение поляризации этого импульса на вертикальную. Усиленный импульс возвращался в изолятор по тому же пути. Обратный проход импульсов по изолятору не вызывал изменения поляризации благодаря тому, что повороты поляризации, вносимые пластинкой $\lambda/4$ и изолятором Фарадея, компенсировали друг друга. Затем импульсы выводились из изолятора с помощью широкополосного поляризатора, поступали на решеточный компрессор, перед которым была установлена пластинка $\lambda/2$, и сжимались до 75–200 фс с потерей примерно половины энергии.

Излучение, генерируемое форстеритовой лазерной системой, заводилось в центральную жилу либо в один из периферийных нитевидных кварцевых каналов (см. рис.1,б) микроструктурированного волокна. Для возбуждения волноводных мод в центральной жиле микроструктурированных волокон излучение накачки фокусировалось (рис.3) с помощью стандартного объектива «Ломо-20». Длина перетяжки сфокусированного пучка накачки при этом составляла 6–8 мкм. Для заведения излучения в боковые кварцевые каналы использовался объектив «Ломо-40», обеспечивавший фокусировку пучка накачки с перетяжкой длиной 3–4 мкм. Длительность импульсов на входе в волокно в выполненной серии экспериментов составляла 150 фс. Спектральные измерения проводились с использованием спектрометра Ocean Optics.

В процессе распространения через волокно импульс накачки испытывал спектральное уширение вследствие

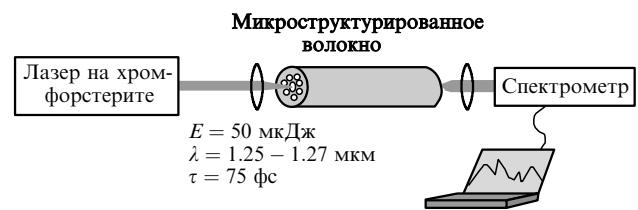


Рис.3. Схема нелинейно-оптической трансформации спектра и измерения спектров фемтосекундных импульсов, прошедших через микроструктурированное волокно.

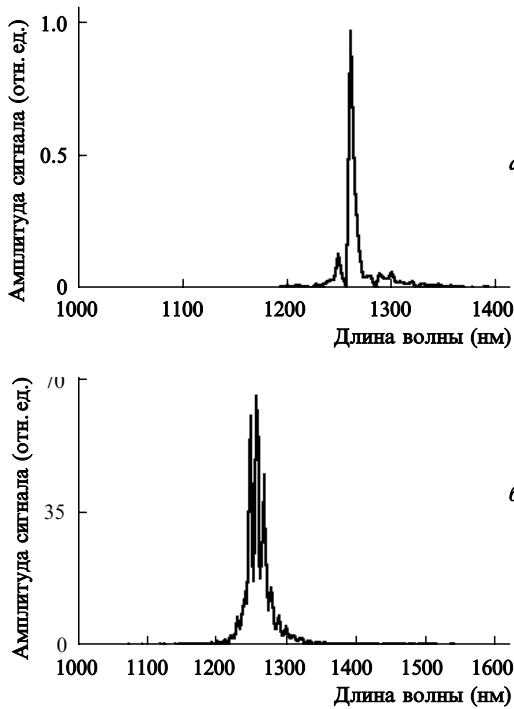


Рис.4. Спектральное уширение импульсов хром-форстеритового лазера в центральной жиле диаметром 3 мкм микроструктурированного волокна длиной 7 см (а) и в субмикронном нитевидном канале (б); энергия импульса, вводимого в волокно, около 50 нДж.

фазовой самомодуляции (рис.4). При одинаковой мощности импульсов накачки на входе в волокно интенсивность излучения, передаваемого по субмикронным кварцевым нитям, существенно (в 2.9 раза) превышала интенсивность излучения в центральной жиле. Эффект фазовой самомодуляции при этих условиях приводил к гораздо более заметному спектральному уширению импульсов, передаваемых через субмикронные каналы (ср. рис.4,а и б).

Распространение импульсов накачки через микроструктурированное волокно сопровождалось нелинейно-оптическими взаимодействиями, которые приводили к возникновению новых частотных компонент, регистрировавшихся в спектре излучения на выходе волокна. Параметрические процессы четырехволнового взаимодействия вида $2\omega_p = \omega_s + \omega_a$ (ω_p – частота излучения накачки, ω_s и ω_a – частоты стоксова и антистоксова сигналов соответственно) в центральной волноводной жиле приводили к генерации интенсивного антистоксова излучения в области 530 нм со спектральной шириной около 35 нм (рис.5). Анализ фазового согласования для подобных процессов в микроструктурированных волокнах выполнен в работах [21, 26]. Наблюдалась также эффективная генерация третьей гармоники излучения накачки с амплитудой сигнала, сравнимой с амплитудой антистоксовой компоненты (рис.5).

Нелинейно-оптическая трансформация спектра импульсов хром-форстеритного лазера, передаваемых вдоль субмикронных кварцевых каналов различных диаметров, приводила к генерации новых частотных компонент в широкой спектральной области (рис.6, 7). Область наиболее эффективного нелинейно-оптического преобразования частоты в данных условиях определяется дисперсионными свойствами волноводного канала. Размер канала, таким образом, является ключевым параметром,

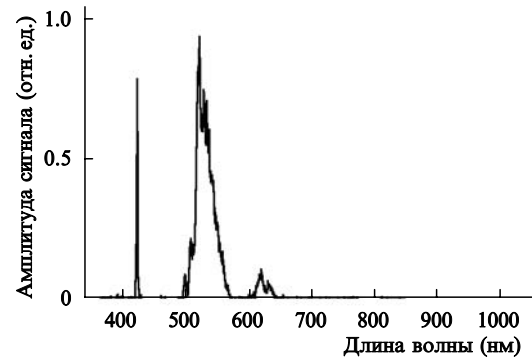


Рис.5. Спектр антистоксова излучения и третьей гармоники в центральной жиле диаметром 3 мкм микроструктурированного волокна.

управляющим процессом нелинейно-оптического преобразования частоты. Возможности перестройки частоты новых спектральных компонент, генерируемых при распространении фемтосекундных импульсов хром-форстеритового лазера через субмикронные кварцевые каналы разного диаметра, иллюстрируются на рис.6, 7. В спектре излучения, представленном на рис.6,а, содержатся интенсивные компоненты с длинами волн 460–490 нм. Генерация излучения в этом диапазоне длин волн, как показывает анализ дисперсии волокна, может быть связана с процессами параметрического четырехволнового взаимодействия. Появление спектральной компоненты с длиной волны около 420 нм в спектре выходного сигнала на рис.6,б свидетельствует об эффективной генерации излучения в области третьей гармоники излучения накачки.

Система микроструктурно интегрированных субмикронных кварцевых каналов, реализованная в созданных микроструктурированных волокнах, открывает уникальную возможность преобразования частоты фемтосе-

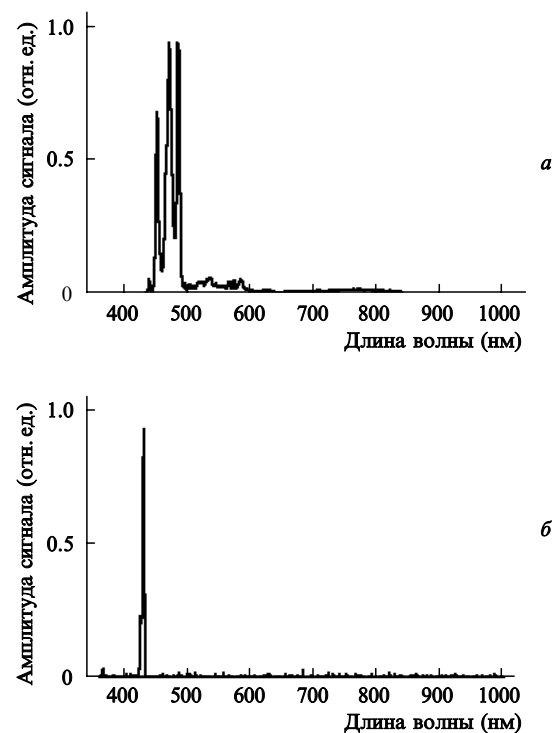


Рис.6. Спектры антистоксова излучения (а) и третьей гармоники излучения накачки (б) в субмикронных каналах микроструктурированного волокна с различными диаметрами.

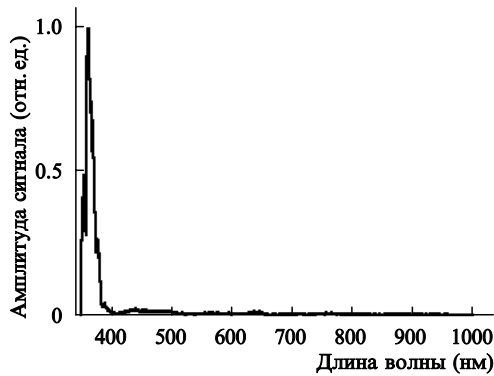


Рис. 7. Спектр генерации высокочастотной компоненты с $\lambda \approx 370$ нм в субмикронном канале микроструктурированного волокна длиной 7 см; энергия импульса, вводимого в волокно, около 50 нДж.

кундных импульсов хром-форстеритового лазера в область длин волн короче длины волны излучения третьей гармоники. Эффективное каскадирование нелинейно-оптических процессов в условиях предельно высокой локализации мощности электромагнитного излучения в субмикронных волноведущих каналах приводит, как видно из рис. 7, к генерации сигнала с длиной волны около 370 нм и спектральной шириной около 30 нм (при длине волны излучения третьей гармоники 420 нм). Спектральный интервал между частотой нелинейного сигнала и частотой излучения накачки при этом превышает 580 ТГц. Эффективность преобразования частоты для такого процесса достигает нескольких процентов.

Генерируемое при этих условиях излучение с длиной волны 370 нм наблюдается невооруженным глазом на белом экране. Разработанная и реализованная архитектура микроструктурированных волокон обеспечивает, таким образом, возможность преобразования несущей частоты фемтосекундных импульсов хром-форстеритового лазера в спектральную область, наиболее интересную для фотохимических и фотобиологических исследований, открывая новые области приложений методов фемтосекундной спектроскопии и управления сверхбыстрыми процессами в физике, химии и биологии.

Представленные в настоящей работе результаты экспериментальных исследований показывают возможность высокоэффективного нелинейно-оптического преобразования частоты фемтосекундных импульсов в системе субмикронных нитевидных кварцевых каналов в микроструктурированном волокне. Размер канала является ключевым параметром, определяющим дисперсионные свойства волноводных мод и, следовательно, область спектра, в которую с максимальной эффективностью преобразуется частота излучения накачки. Экспериментально продемонстрированы возможности перестройки частоты новых спектральных компонент, генерируемых при распространении фемтосекундных импульсов хром-форстеритового лазера через субмикронные кварцевые каналы разного диаметра. Показано, что реализованная архитектура структурно интегрированных субмикронных кварцевых каналов в микроструктурированных волокнах открывает уникальную возможность преобразо-

вания частоты фемтосекундных импульсов хром-форстеритового лазера в область длин волн короче длины волны излучения третьей гармоники.

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

1. Shen Y.R. *The Principles of Nonlinear Optics* (New York: Wiley, 1984).
2. Fejer M.M., Magel G.A., Jundt D.H., Byer R.L. *IEEE J. Quantum Electron.* **28**, 2631 (1992).
3. Byer R.L. *J. Nonlinear Optical Physics and Materials*, **6**, 549 (1997).
4. Scalora M., Bloemer M.J., Manka A.S., Dowling J.P., Bowden C.M., Viswanathan R., Haus J.W. *Phys. Rev. A*, **56**, 3166 (1997).
5. Zheltikov A.M., Tarasishin A.V., Magnitskii S.A. *JETP*, **91**, 298 (2000).
6. Dumeige Y., Vidakovic P., Sauvage S., Sagnes I., Levenson J.A., Sibilia C., Centini M., D'Aguanno G., Scalora M. *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 3021 (2001).
7. Knight J.C., Birks T.A., Russell P.St.J., Atkin D.M. *Opt. Lett.*, **21**, 1547 (1996).
8. Knight J.C., Broeng J., Birks T.A., Russell P.St.J. *Science*, **282**, 1476 (1998).
9. Monro T.M., Bennett P.J., Broderick N.G.R., Richardson D.J. *Opt. Lett.*, **25**, 206 (2000).
10. Федотов А.Б., Желтиков А.М., Мельников Л.А., Тарасевич А.П., фон дер Линде Д. *Письма в ЖЭТФ*, **71**, 407 (2000).
11. Алфимов М.В., Желтиков А.М., Иванов А.А., Белоглазов В.И., Кириллов Б.А., Магницкий С.А., Тарасишин А.В., Федотов А.Б., Мельников Л.А., Скибина Н.Б. *Письма в ЖЭТФ*, **71**, 714 (2000).
12. Желтиков А.М. *УФН*, **170**, 1203 (2000).
13. Eggleton B.J., Kerbage C., Westbrook P.S., Windeler R.S., Hale A. *Opt. Express*, **9**, 698 (2001).
14. Birks T.A., Wadsworth W.J., Russell P.St.J. *Opt. Lett.*, **25**, 1415 (2000).
15. Akimov D.A., Ivanov A.A., Alfimov M.V., Bagayev S.N., Birks T.A., Wadsworth W.J., Russell P.St.J., Fedotov A.B., Pivtsov V.S., Podshivalov A.A., Zheltikov A.M. *Appl. Phys. B*, **74**, 307 (2002).
16. Reeves W.H., Knight J.C., Russell P.St.J., Roberts P.J. *Opt. Express*, **10**, 609 (2002).
17. Broderick N.G.R., Monro T.M., Bennett P.J., Richardson D.J. *Opt. Lett.*, **24**, 1395 (1999).
18. Fedotov A.B., Zheltikov A.M., Tarasevitch A.P., von der Linde D. *Appl. Phys. B*, **73**, 181 (2001).
19. Naumov A.N., Fedotov A.B., Zheltikov A.M., Yakovlev V.V., Mel'nikov L.A., Beloglazov V.I., Skibina N.B., Shcherbakov A.V. *J. Opt. Soc. Am. B*, **19**, 2183 (2002).
20. Akimov D.A., Ivanov A.A., Naumov A.N., Kolevatova O.A., Alfimov M.V., Birks T.A., Wadsworth W.J., Russell P.St.J., Podshivalov A.A., Zheltikov A.M. *Appl. Phys. B* (в печати).
21. Fedotov A.B., Bugar I., Sidorov-Biryukov D.A., Serebryannikov E.E., Chorvat D. Jr., Scalora M., Chorvat D., Zheltikov A.M. *Appl. Phys. B* (в печати).
22. Special issue of the *J. of Optical Society of America B*, **19** (9) (2002), ed. by Bowden C.M. and Zheltikov A.M.
23. Желтиков А.М., Пинг Жу, Темнов В.В., Кондратьев Ю.Н., Багаев С.Н., Шевандин В.С., Дукельский К.В., Хохлов А.В., Смирнов В.Б., Тарасевич А.П., фон дер Линде Д. *Квантовая электроника*, **32**, 542 (2002).
24. Fedotov A.B., Ping Zhou, Tarasevitch A.P., Dukel'skii K.V., Kondrat'ev Yu.N., Shevandin V.S., Smirnov V.B., von der Linde D., Zheltikov A.M. *J. Raman Spectrosc.*, **33**, 888 (2002).
25. Желтиков А.М. *Оптика и спектроскопия* (в печати).
26. Coen S., Hing Lun Chau A., Leonhardt R., Harvey J.D., Knight J.C., Wadsworth W.J., Russell P.St.J. *J. Opt. Soc. Am. B*, **19**, 753 (2002).