

## Спектральное сверхуширение субнаноджоулевых фемтосекундных импульсов лазера на хром-форстерите в перетянтом волокне

Д. А. Акимов, М. В. Алфимов<sup>+</sup>, С. Н. Багаев\*, Т. Биркс<sup>□1)</sup>, А. А. Иванов<sup>+</sup>, А. Б. Федотов, У. Дж. Уодсуорт<sup>□1)</sup>, Ф. Ст. Дж. Расселл<sup>□1)</sup>, В. С. Пивцов\*, А. А. Подшивалов, А. М. Желтиков<sup>2)</sup>

Международный лазерный центр, физический факультет, МГУ им. М. В. Ломоносова  
119899 Москва, Россия

<sup>+</sup> Центр фотохимии РАН, 117421 Москва, Россия

\* Институт лазерной физики, Сибирского отд. РАН, 630090 Новосибирск, Россия

□ Department of Physics, University of Bath, Bath BA2 7AY, United Kingdom

Поступила в редакцию 27 сентября 2001 г.

Экспериментально продемонстрировано спектральное сверхуширение фемтосекундных импульсов лазера на хром-форстерите с энергией менее наноджоуля в перетянтом волокне. При введении импульсов лазерного излучения с длиной волны 1.25 мкм, имеющих длительность 40 фс и энергию 0.6 нДж, в перетянутое волокно с диаметром перетяжки 2 мкм и длиной перетяжки 90 мм ширина спектра импульсов на выходе волокна превышала две октавы. Полученные результаты открывают возможности создания компактных фемтосекундных систем на основе форстеритовых лазеров и перетянутых волокон для оптической метрологии и биомедицинских приложений.

PACS: 42.65.Wi, 42.81.Qb

Новые типы оптических волноводов – микроструктурированные (дырчатые) [1–6] и перетянутые [7] волокна – позволяют добиться существенного повышения эффективности спектрального уширения [4, 8] фемтосекундных импульсов и генерации суперконтинуума [7, 9], открывая уникальные возможности для использования этих явлений в оптической метрологии [10–15], лазерной биомедицине [16, 17] и спектроскопических исследованиях. Высокая степень локализации света в дырчатых и перетянутых волокнах приводит к увеличению эффективности нелинейно-оптических взаимодействий, позволяя получать на выходе волокна импульсы со спектральной шириной более октавы при введении в волновод неусиленных фемтосекундных импульсов субнаноджоулевых уровней энергии. Применение этого явления позволило достичь в последние годы существенного прогресса в области оптической метрологии и высокоточных оптических измерений [10–15] на основе использования частотных гребенок, генерируемых стабилизированными фемтосекундными лазерами. Идея применения синхронизованных мод лазерных источников для высокоточных измерений частоты была высказана более двадцати лет назад [18, 19].

Однако практическая реализация этого подхода, приводящего к радикальному идейному и техническому упрощению высокоточных оптических измерений частоты, стала возможна лишь в последние годы благодаря стремительному развитию фемтосекундных лазеров и появлению волокон нового типа.

До настоящего времени все эксперименты по генерации суперконтинуума при распространении неусиленных фемтосекундных импульсов в микроструктурированных и перетянутых волноводах выполнялись с использованием излучения лазера на сапфире с титаном. В связи с этим значительный интерес представляет исследование возможности спектрального сверхуширения неусиленных фемтосекундных импульсов излучения с большей длиной волны. В частности, перспективным для целей оптической метрологии и биомедицинских приложений представляется использование фемтосекундных импульсов излучения с длиной волны 1.2–1.3 мкм, генерируемых лазерами на кристаллах хром-форстерита. Форстеритовые лазеры не уступают лазерам на сапфире с титаном по компактности и удобству эксплуатации и представляются более удобными для осуществления привязки к стабилизированному гелий-неоновому лазеру, работающему на длине волны 3.39 мкм, а также для достижения больших длин проникновения излучения в схемах оптической когерентной томографии

<sup>1)</sup> T. A. Birks, W. J. Wadsworth, P. St. J. Russell.

<sup>2)</sup> e-mail: zheltikov@top.phys.msu.su

Рис.1. Схема фемтосекундного лазера на хром-форстерите: Nd: YAG – лазер накачки (Spectra Physics Millennia),  $MP1$ ,  $MP2$  – зеркала для излучения накачки,  $L1$ ,  $L2$  – линзы,  $M3$ – $M5$  – зеркала лазерного резонатора,  $P1$ ,  $P2$  – внутрирезонаторные призмы, Cr: F – кристалл  $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ,  $M6$  – выходное зеркало,  $MBR$  – многослойный брэгговский отражатель,  $PD$  – фотодетектор. На вставке показана автокорреляционная функция лазерного импульса форстеритового лазера с длительностью около 30 фс

и построения изображений биомедицинских объектов [16, 17]. Исследование возможностей спектрального сверхширения неусиленных фемтосекундных импульсов лазера на хром-форстерите и является основной целью настоящей работы.

В наших экспериментах использовался полностью твердотельный самостартующий лазер на кристалле  $\text{Cr}^{4+}$ :форстерит ( $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ) [16, 17], позволяющий получать световые импульсы длительностью 30–100 фс с длиной волны излучения, перестраиваемой в области от 1.21–1.29 мкм и с возможностью удвоения частоты в нелинейном кристалле [17]. В задающем генераторе этой лазерной системы (рис.1) используется кристалл  $\text{Cr}^{4+}$ :форстерит с длиной активного кристалла, равной 19 мм, накачиваемый Nd: YAG-лазером. Помимо активного элемента в состав задающего лазера входят также зеркала с радиусом кривизны, равным 100 мм, и 4.5%-ное выходное зеркало. Имелась возможность использования съемного полупроводникового насыщающегося поглотителя в качестве глухого зеркала. Режим самостартующей синхронизации мод в созданном лазере реализуется как с помощью полупроводниковых насыщающихся поглотителей, так и в отсутствие данных элементов. Типичная автокорреляционная функция выходного импульса форстеритового лазера длительностью

30 фс приведена на вставке к рис.1. При мощности накачки на уровне 6–9 Вт средняя мощность импульсов форстеритового лазера составляла 450 мВт.

Излучение, генерируемое форстеритовым лазером, заводилось в перетянутый волновод, изготовленный из стандартного телекоммуникационного волокна (Corning SMF-28) с диаметром около 9 мкм, длиной волны отсечки 1250 нм и числовой апертурой 0.1. Процедура перетяжки волокна, подробно описанная в работе [7], заключалась в вытягивании нагретого волокна, приводившем к уменьшению площади поперечного сечения световода. Благодаря малому диаметру волокна в перетяжке (рис.2) и большой разнице показателей преломления кварца и воздуха

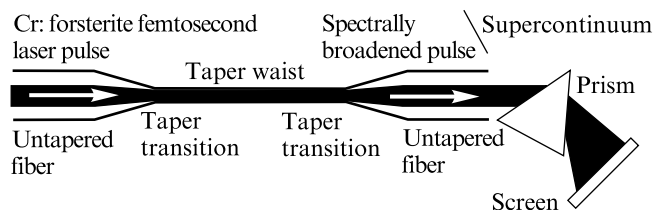


Рис.2. Диаграмма распространения импульса форстеритового лазера в перетяннутом волноводе

достигалась высокая степень локализации лазерного излучения в перетяжке волокна, приводившая к уве-

личению эффективности нелинейно-оптических процессов. Необходимо отметить, что ранее было экспериментально продемонстрировано увеличение эффективности процесса фазовой самомодуляции в подобных волокнах [20].

На рис.3 показаны спектры импульсов на выходе перетянутого волокна с диаметром перетяжки около

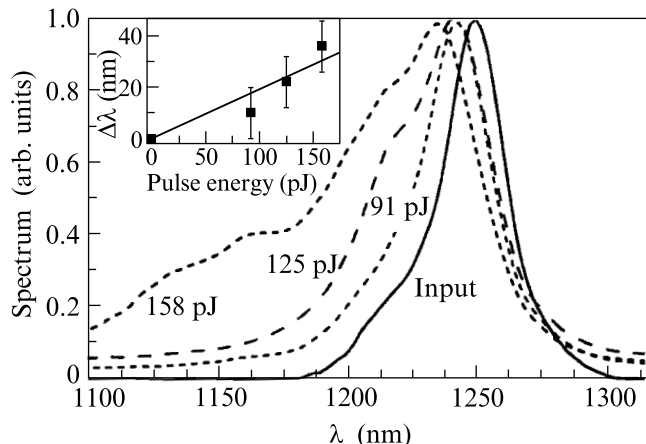


Рис.3. Спектральное уширение  $\Delta\lambda$  субнанождоулевых импульсов форстеритового лазера с длительностью 70 фс в перетянном волокне с длиной конусного перехода, равной  $\sim 35$  мм, длиной перетяжки – 90 мм и диаметром перетяжки – 2 мкм. Сплошной линией показан спектр входного импульса. Пунктиром показаны спектры импульсов на выходе волокна при энергии импульса, указанной около кривых. На вставке приводится зависимость спектрального уширения лазерного импульса от энергии излучения, вводимого в волокно

2 мкм и длиной перетяжки 90 мм. Длина областей конусного перехода (рис.2) составляла примерно 35 мм. Волокна с таким диаметром перетяжки характеризуются аномальной дисперсией на длине волны излучения форстеритового лазера. Нулевая дисперсия групповой скорости при этом достигается в области длин волн около 700 нм. При этом создаются благоприятные условия для нелинейного распространения фемтосекундных импульсов форстеритового лазера и для генерации суперконтинуума в видимой области. Существенное спектральное уширение наблюдалось в наших экспериментах даже в условиях, когда энергия излучения, заводимого в волокно, составляла 0.1 нДж. При увеличении энергии лазерных импульсов, заводимых в волокно, наблюдалось увеличение спектральной ширины импульсов на выходе волокна (рис.3). Для получения грубой оценки характерных параметров процесса фазовой самомодуляции, приводящей к спектральному уширению им-

пульса, зависимость спектрального уширения  $\Delta\omega$  от энергии лазерного излучения, заводимого в волокно, аппроксимировалась линейной функцией (см. вставку на рис.3). Данная аппроксимация основана на элементарной теории фазовой самомодуляции, которая приводит к следующему выражению для спектрального уширения:  $\Delta\omega \approx \gamma PL/\tau$ , где  $\gamma$  – нелинейный коэффициент,  $P$  – мощность лазерного импульса,  $L$  – длина рабочей области волновода,  $\tau$  – длительность лазерного импульса. Оценка для коэффициента нелинейности, получаемая на основе наших экспериментальных данных (рис.3) в рамках данного приближения,  $n_2 \approx 2.5 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>/Вт, свидетельствует о высокой эффективности нелинейно-оптических процессов в перетянном волокне.

Рассмотренный выше режим нелинейно-оптических взаимодействий в перетянном волокне характеризуется значительно меньшими спектральными ширинами импульсов на выходе волокна, чем режим генерации суперконтинуума. Однако этот режим также представляется чрезвычайно полезным для различных приложений, так как при этом имеются возможности достижения воспроизводимого и легко управляемого (путем изменения энергии излучения, вводимого в волокно) уширения спектра фемтосекундных импульсов неусиленного излучения форстеритового лазера. Фемтосекундные импульсы форстеритового лазера с управляемой спектральной шириной могут быть использованы, в частности, для реализации схем оптической когерентной томографии с перестраиваемой глубиной резкости, а также для различных спектроскопических приложений.

Генерация суперконтинуума с шириной спектра, превышающей две октавы, наблюдалась при введении в волокно импульсов форстеритового лазера длительностью 40 фс и энергией 0.6 нДж и выше. Излучение форстеритового лазера в этих экспериментах имело среднюю мощность около 250 мВт при частоте повторения лазерных импульсов, равной 120 МГц. В волокно заводилось излучение мощностью 70–75 мВт. На рис.4 показаны изображения спектра импульсов на выходе волокна, развернутые в пространстве при помощи призмы (рис.2) и снятые с помощью цифровой камеры. Верхнее изображение получено при помощи камеры, расположенной на расстоянии 40 см от экрана. Изображение при этом оказывается достаточно четким, но чувствительность камеры недостаточна для воспроизведения низкочастотной (красной) области спектра (в области 700 нм, область 1 на рис.4). Нижнее изображение получено при помощи камеры, расположенной на

## Спектральное сверхширение неусиленных фемтосекундных импульсов

	Микроструктурированное волокно				Перетянутое волокно			
	$\tau$ , фс	$W$ , нДж	$L$ , см	Лит-ра	$\tau$ , фс	$W$ , нДж	$L$ , см	Лит-ра
Лазер на сапфире с титаном	100	0.8	75	[9]	200	3.9	9	[8]
Лазер на хром-форстерите	Сверхширение не наблюдалось, эффективное уширение – см. [21]				40	0.6	9	наст. работа

Примечание:  $\tau$  – длительность импульса,  $W$  – энергия в лазерном импульсе,  $L$  – длина нелинейно-оптического взаимодействия

Рис.4. Изображения спектра импульса на выходе перетянутого волокна, развернутые в пространстве при помощи призмы. В волокно заводится импульс форстеритового лазера длительностью 40 фс и энергией 0.6 нДж. Длина волны излучения – 1.25 мкм. Изображения получены при помощи цифровой камеры, расположенной на расстоянии 40 см (верхнее изображение) и 10 см (нижнее изображение) от экрана. Область 1 соответствует диапазону видимого красного, 2 – область третьей гармоники форстеритового лазера (около 417 нм), 3 – область люминесценции экрана под воздействием излучения с длиной волны менее 400 нм

расстоянии 10 см от экрана. Низкочастотная область при этом видна гораздо лучше, однако изображение оказывается немного не в фокусе.

Изображения, представленные на рис.4, показывают, что ширина спектров импульсов на выходе волокна превышает две октавы. Как видно на приведенных изображениях, в излучении, выходящем из волокна, имеются спектральные компоненты с длинами волн менее 417 нм (область 2 на рис.4). Данная длина волны легко идентифицируется при помощи излучения третьей гармоники форстеритового лазера. Люминесценция экрана в области 3 на рис.4 наблюдается только при воздействии излучения с длинами волн короче 400 нм. В обычном волокне не удается наблюдать генерацию суперконтинуума для субнаноджоу-

левых импульсов форстеритового лазера с длительностью 30–40 фс.

Таким образом, нами наблюдалась генерация суперконтинуума при распространении фемтосекундных импульсов форстеритового лазера с энергией менее наноджоуля в перетянном волокне. При введении импульсов лазерного излучения с длиной волны 1.25 мкм, имеющих длительность 40 фс и энергию 0.6 нДж, в перетянутое волокно с диаметром перетяжки 2 мкм и длиной перетяжки 90 мм ширина спектра импульсов на выходе волокна превышает две октавы. Таблица иллюстрирует значимость полученных в настоящей работе результатов в контексте исследования путей генерации суперконтинуума неусиленных фемтосекундных импульсов. Возможность генерации суперконтинуума при распространении субнаноджоулевых фемтосекундных импульсов лазера на сапфире с титаном в микроструктурированном волокне была продемонстрирована в работе [9]. Этот результат имел важные последствия для многих областей оптики сверхкоротких импульсов и спектроскопии, а также привел к революционным изменениям в оптической метрологии. Руководствуясь идеей создания волокон с более простой структурой для генерации суперконтинуума при распространении маломощных фемтосекундных импульсов, авторы работы [7] показали возможность генерации суперконтинуума с помощью неусиленных импульсов лазера на сапфире с титаном в перетянутых волноводах. В настоящей работе нами экспериментально продемонстрирована возможность спектрального сверхширения неусиленных фемтосекундных импульсов форстеритового лазера и получения излучения с шириной спектра, превосходящей две октавы, при введении в перетянутое волокно фемтосекундных импульсов форстеритового лазера с энергией менее 1 нДж. Полученные результаты открывают возможности создания компактных фемтосекундных систем на основе форстеритовых лазеров и перетянутых волокон для оптической метрологии и биомедицинских приложений.

Работа выполнена при поддержке гранта # 00-15-99304 Президента Российской Федерации, гранта Российского фонда фундаментальных исследований # 00-02-17567, гранта Volkswagen Foundation # I/76 869, грантов CRDF # RP2-2266 и # RP2-2275, а также грантов Государственной научно-технической программы Российской Федерации “Фундаментальная метрология”.

1. J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell, and D. M. Atkin, *Opt. Lett.* **21**, 1547 (1996).
2. J. C. Knight, J. Broeng, T. A. Birks, and P. St. J. Russell, *Science* **282**, 1476 (1998).
3. R. F. Cregan, B. J. Mangan, J. C. Knight et al., *Science* **285**, 1537 (1999).
4. А. Б. Федотов, А. М. Желтиков, Л. А. Мельников и др., *Письма в ЖЭТФ* **71**, 407 (2000).
5. T. M. Monro, P. J. Bennett, N. G. R. Broderick, and D. J. Richardson, *Opt. Lett.* **25**, 206 (2000).
6. А. М. Желтиков, *УФН* **170**, 1203 (2000).
7. T. A. Birks, W. J. Wadsworth, and P. St. J. Russell, *Opt. Lett.* **25**, 1415 (2000).
8. A. B. Fedotov, A. M. Zheltikov, A. P. Tarasevitch, and D. von der Linde, *Appl Phys* **B73**, 181 (2001).
9. J. K. Ranka, R. S. Windeler, and A. J. Stentz, *Opt. Lett.* **25**, 25 (2000).
10. Th. Udem, J. Reichert, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 3568 (1999).
11. S. A. Diddams, D. J. Jones, Jun Ye et al., *Phys. Rev. Lett.* **84**, 5102 (2000).
12. D. J. Jones, S. A. Diddams, J. K. Ranka et al., *Science* **288**, 635 (2000).
13. R. Holzwarth, T. Udem, T. W. Hänsch et al., *Phys. Rev. Lett.* **85**, 2264 (2000).
14. S. N. Bagayev, S. V. Chepurov, V. M. Klementyev et al., *Appl. Phys.* **B70**, 375 (2000).
15. S. N. Bagayev, A. K. Dmitriyev, S. V. Chepurov et al., *Laser Phys.* **11**, no.12 (2001).
16. A. A. Ivanov, M. V. Alfimov, and A. M. Zheltikov, *Laser Physics* **10**, 796 (2000).
17. A. A. Ivanov, M. V. Alfimov, A. B. Fedotov et al., *Laser Physics* **11**, 158 (2001).
18. Ye. V. Baklanov and V. P. Chebotayev, *Appl. Phys.* **12**, 97 (1977); S. N. Bagayev, V. P. Chebotayev, V. M. Klementyev, and O. I. Pyltzin, *Proc. 10<sup>th</sup> Int. Conf. On Laser Spectroscopy*, Font-Romeau, France, June 17–21, 1991.
19. J. N. Eckstein, A. I. Ferguson, and T. W. Hänsch, *Phys. Rev. Lett.* **40**, 847 (1978).
20. P. Dumais, F. Gonthier, S. Lacroix et al., *Opt. Lett.* **18**, 1996 (1993).
21. A. B. Fedotov, V. V. Yakovlev, and A. M. Zheltikov, *11<sup>th</sup> International Laser Physics Workshop (LPHYS'2002) Technical Digest*, in press.