

# Генерация поляризованного суперконтинуума в квазиэллиптических световодах малого диаметра

С.М.Кобцев, С.В.Кукарин, Н.В.Фатеев

*Впервые экспериментально реализована и исследована генерация суперконтинуума в сдвоенных биконических световодах с перетяжкой микронных размеров при накачке фемтосекундными импульсами. Получен суперконтинуум в области 460–1070 нм по уровню –28 дБ со степенью поляризации до 97%. Экспериментально исследованы поляризационные и когерентные свойства суперконтинуума.*

**Ключевые слова:** биконический световод, генерация суперконтинуума, фемтосекундные импульсы.

## 1. Введение

Прогресс в технологии изготовления оптических волокон со специальными свойствами (волокон с измененной дисперсией, малым диаметром сердцевины, а также дырчатых волокон и др.) стимулирует развитие исследований нелинейных эффектов, возникающих при распространении световых УКИ в этих световодах. Одним из примеров качественно новых результатов, полученных в последнее время несколькими исследовательскими группами [1–4] с использованием новых волокон, в частности световодов с малым диаметром сердцевины ( $\sim 2$  мкм), является генерация суперконтинуума в области 400–1600 нм при накачке излучением относительно маломощных (энергия импульса  $\sim 1$  нДж) фемтосекундных титан-сапфировых лазеров и лазеров на хром-форстерите [5, 6].

Ранее генерация суперконтинуума в обычных световодах и других средах достигалась при накачке значительно более мощными (на порядок и более) световыми импульсами [7]. Смягчение требований к пиковой мощности импульсов накачки, способных инициировать генерацию суперконтинуума в новых оптических волокнах, открывает перспективы создания более эффективных источников/преобразователей излучения с уникальными свойствами. В значительной степени эти ожидания связаны с оптическими волноводами малого диаметра, сердцевина которых имеет диаметр несколько микрометров и частично или полностью граничит с воздухом. Такие световоды (ниже – микросветоводы) могут быть реализованы на основе дырчатых световодов или световодов с конусными переходами и перетяжкой малого диаметра между ними (tapered fibers, или биконические микросветоводы). Микросветоводы отличаются сдвигом длины волны нулевой дисперсии групповых скоростей в видимый диапазон спектра и малой эффективной площадью моды, обуславливающий увеличение нелинейного пре-

ломления. Кроме генерации суперконтинуума с использованием подобных микросветоводов наблюдался ряд нелинейных процессов: самосдвиг несущей частоты солитона [8–11], генерация третьей гармоники излучения [11] и др.

В настоящей работе впервые получена и экспериментально исследована генерация поляризованного суперконтинуума в кварцевых световодах нового типа – сдвоенных микросветоводах с квазиэллиптическим поперечным сечением перетяжки – при накачке излучением фемтосекундного титан-сапфирового лазера.

## 2. Экспериментальная установка

Для изготовления сдвоенных микросветоводов использовались стандартные волокна SMF-28 фирмы Corning. В начальный момент вытяжки обеспечивался механический контакт световодов друг с другом на длине несколько сантиметров. Вытяжка проводилась в пламени водородной горелки в несколько этапов по технологии, описанной в [4]. На каждом этапе диаметр световодов уменьшался и при этом происходило одновременное сваривание волокон друг с другом. Готовый образец сдвоенного микросветовода имел протяженную (до 14 см) перетяжку с квазиэллиптическим поперечным сечением микронных размеров и по два входных и выходных конца, представляющих собой невытянутые отрезки волокна SMF-28 длиной 5–40 см. Малые поперечные размеры перетяжки не позволили провести ее измерения, однако был зарегистрирован профиль сечения сдвоенного микросветовода на одном из этапов вытяжки. На рис.1,а приведена фотография поперечного сечения сдвоенного световода при подсветке с одного из входных концов. Расчетные размеры поперечного сечения перетяжки сдвоенного микросветовода были в четыре раза меньше приведенных на рис.1,а. Окончательный поперечный профиль перетяжки сдвоенного микросветовода имел предполагаемый вид, показанный на рис.1,б. Размер малой оси квазиэллиптического профиля  $d = 2 - 3$  мкм, а размер большой оси  $D = 1.7d$ .

Излучение накачки вводилось в сердцевину (диаметром 8 мкм) одного из входных концов, распространялось далее по сужающейся части и микроперетяжке, для ко-

С.М.Кобцев, С.В.Кукарин, Н.В.Фатеев. Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: kobtsev@lab.nsu.ru

Поступила в редакцию 27 мая 2003 г., после доработки – 11 июля 2003 г.

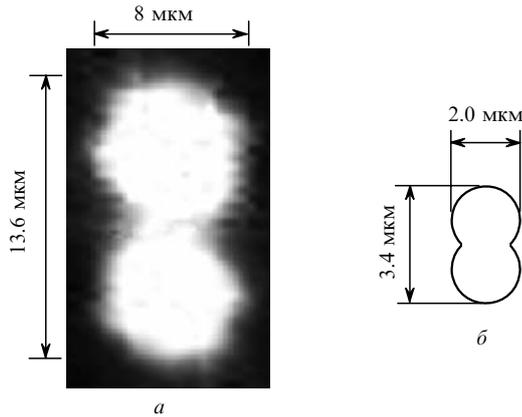


Рис.1. Профили поперечного сечения перетяжки сдвоенного биконического микросветовода: фотография поперечного среза перетяжки на промежуточном этапе вытяжки (а) и предполагаемая окончатальная форма поперечного сечения перетяжки (б).

торой оболочкой являлся окружающий воздух. После прохождения микроперетяжки и расширяющейся части излучение распространялось по сердцевинам двух выходных концов невытянутого волокна. Длины сужающейся и расширяющейся частей составляли по 2.5 см, длина микроперетяжки в разных образцах – от 6 до 14 см. Таким образом, введение излучения накачки в микроперетяжку и вывод его из нее осуществлялись через стандартные отрезки световодов SMF-28.

Схема экспериментальной установки, на которой проводились исследования изготовленных образцов, показана на рис.2. В экспериментах использовалось излучение фемтосекундного титан-сапфирового лазера, накачиваемого излучением непрерывного аргонового лазера. Длительность выходных импульсов была равна 60 фс, частота повторения – 80 МГц, средняя выходная мощность излучения титан-сапфирового лазера – 250 мВт. Ширина спектра выходного излучения составляла 20 нм с центром на длине волны 786 нм. Для управления фазовой модуляцией (чирпом) импульсов титан-сапфирового лазера применялся двухпризмный компрессор. Как правило, выходные импульсы фемтосекундного лазера имеют начальный небольшой положительный чирп, который увеличивается при их прохождении через элементы оптической развязки, микрообъектив и начальный невытянутый участок световода. Компрессор позволял компенсиро-

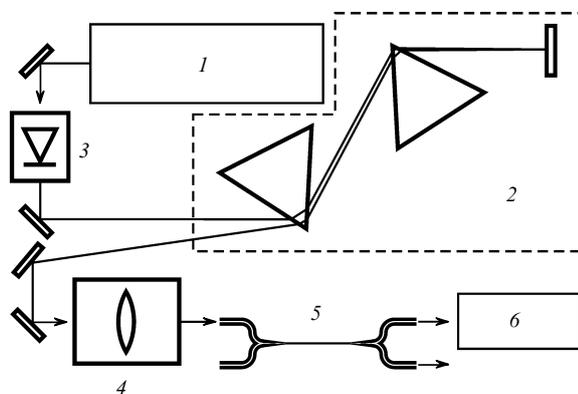


Рис.2. Схема экспериментальной установки для исследований образцов микросветоводов:

1 – фемтосекундный титан-сапфировый лазер; 2 – двухпризмный компрессор; 3 – фарадеевский изолятор; 4 – микрообъектив; 5 – образец сдвоенного микросветовода; 6 – оптический анализатор спектра.

вать этот положительный чирп и «доводить» импульсы до сужающейся части сдвоенных световодов с минимальной фазовой модуляцией. Настройка компрессора проводилась по минимизации длительности импульсов непосредственно перед сужающейся частью образцов. Длительность импульсов контролировалась предварительно с помощью автокоррелятора после их прохождения через фарадеевский изолятор, компрессор, микрообъектив и отдельный отрезок волокна SMF-28, соответствующий начальному невытянутому участку световода.

Излучение титан-сапфирового лазера вводилось в один из входных концов сдвоенного световода через микрообъектив  $8\times/0.2$ . Средняя мощность излучения накачки на входе в волокно была равна  $\sim 100$  мВт (пиковая мощность импульсов  $\sim 20$  кВт). Пропускание исследуемых образцов составляло 25%–40% (с учетом суммарной интенсивности излучения на двух световодных выходах). Спектр выходного излучения регистрировался с помощью автоматизированного анализатора спектра «Ангстрем» в диапазоне 400–1600 нм с разрешением 3 нм.

### 3. Результаты экспериментов

#### 3.1. Спектр суперконтинуума

На рис.3 приведен один из экспериментальных спектров генерации суперконтинуума для образца с  $d = 2$  мкм и длиной перетяжки 10 см. Зарегистрированный спектр перекрывает диапазон 460–1070 нм по уровню –28 дБ и не уступает по ширине спектрам суперконтинуума, полученным ранее для одиночных биконических микросветоводов с тем же диаметром  $d$  при одинаковых условиях накачки [3, 4], хотя эффективная площадь моды в перетяжке сдвоенного микросветовода существенно больше, чем в перетяжке одиночного биконического микросветовода с тем же диаметром  $d$ . Необходимо отметить, что расчетные дисперсионные характеристики сдвоенных микросветоводов [12] близки к дисперсионным характеристикам одиночных биконических микросветоводов с тем же диаметром  $d$ .

В настоящей работе была выявлена зависимость спектров генерации суперконтинуума в сдвоенных микросветоводах от ориентации квазиэллиптического сечения перетяжки относительно плоскости поляризации входного излучения. Изменение угла между плоскостью поляризации входного излучения и большой осью квазиэл-

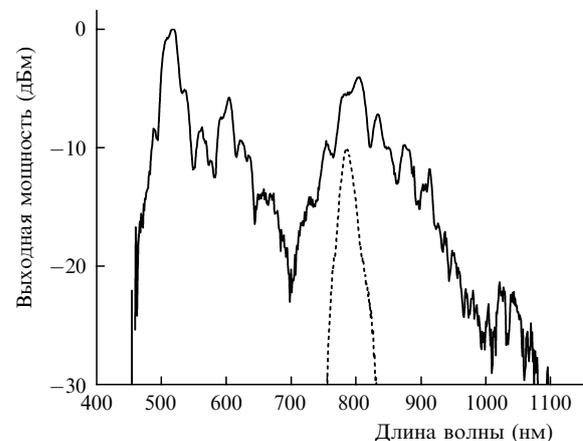


Рис.3. Спектр излучения суперконтинуума для образца с диаметром перетяжки  $d = 2$  мкм. Пунктирная кривая – спектр излучения накачки.

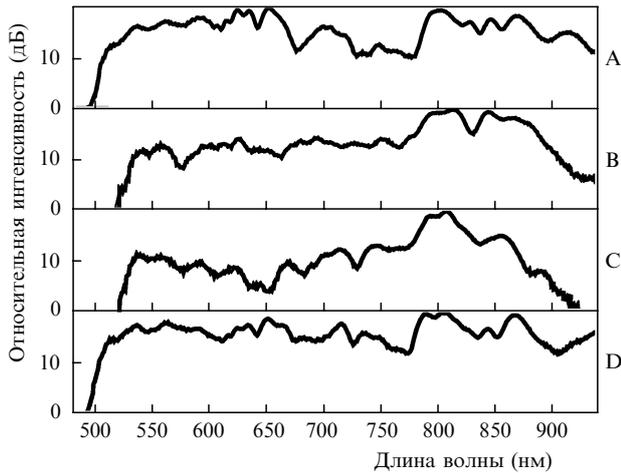


Рис.4. Спектры суперконтинуума для угла  $\alpha = 0$  (A),  $120^\circ$  (B),  $225^\circ$  (C) и  $270^\circ$  (D).

липтического сечения перетяжки (будем называть его ниже углом  $\alpha$ ), достигаемое за счет вращения перетяжки сдвоенного микросветовода вокруг направления распространения излучения при фиксированных входных и выходных невытянутых концах, сопровождалось вариациями ширины и формы спектра генерируемого суперконтинуума (рис.4). При этом изменялось и соотношение мощностей излучения суперконтинуума на выходных концах от 1 : 1 до 0.8 : 1.2 при сохранении суммарной мощности.

Пространственные характеристики излучения суперконтинуума на каждом из выходных концов были идентичны. На рис.5 представлены поперечное распределение интенсивности излучения суперконтинуума на выходах образцов и аппроксимация этого распределения гауссовой функцией. Хорошее совпадение экспериментального поперечного профиля интенсивности выходного излучения с гауссовым распределением оказалось несколько неожиданным, т. к. в перетяжке квазиэллиптического сечения возможно возникновение мод высших порядков [13]. Однако для множества используемых образцов сдвоенных микросветоводов поперечное распределение интенсивности суперконтинуума на выходе было близко к гауссову.

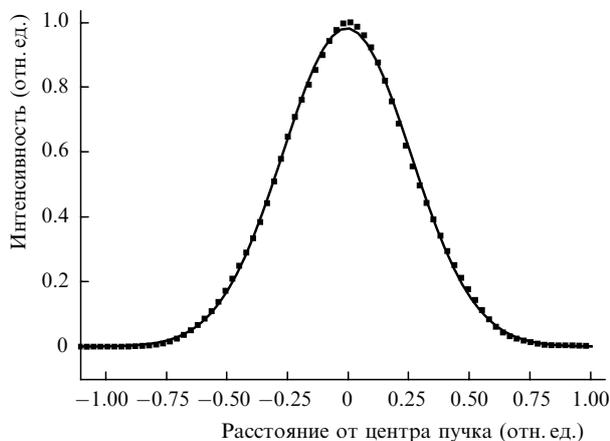


Рис.5. Профиль поперечного распределения интенсивности суперконтинуума на выходе образцов микросветоводов (экспериментальные точки) и аппроксимация его гауссовым распределением (сплошная кривая).

### 3.2. Когерентность суперконтинуума

Как известно, суперконтинуум, инициируемый излучением последовательности лазерных УКИ, содержит большое число эквидистантных спектрально узких линий излучения, разность частот которых совпадает с частотой следования импульсов накачки. Генерируемые частоты синхронизованы по фазе, однако степень их когерентности может варьироваться в зависимости от параметров среды, в данном случае оптического волокна, и параметров излучения накачки. Проведенные в [14] численные исследования степени когерентности различных спектральных компонент суперконтинуума, генерируемого в дырчатых и биконических микросветоводах, показали, что степень когерентности частот излучения суперконтинуума уменьшается при увеличении длительности импульсов накачки, длины перетяжки оптического волокна и длины волны излучения накачки.

Для выяснения когерентных свойств суперконтинуума, генерируемого в сдвоенных микросветоводах при заданных параметрах излучения накачки, мы провели следующий эксперимент. Расходящиеся пучки поляризованного излучения суперконтинуума от двух выходных концов образца совмещались на полупрозрачной пластинке и направлялись на экран, при этом один из выходных концов закреплялся на прецизионном столике с микрометрическим винтом. С помощью этого столика осуществлялось временное совмещение импульсов суперконтинуума, поступающих на полупрозрачный делитель от разных выходных концов образца. При определенной настройке столика на экране наблюдалась четкая интерференционная картина, стабильная в течение длительного времени. На рис.6 приведена фотография этой интерференционной картины. Для разных образцов цвет колец интерференционной картины был белым или имел небольшой цветовой оттенок (красно-розовый, сине-голубой), свидетельствующий о повышенной спектральной плотности мощности излучения на соответствующем участке спектра. Достаточно высокий контраст полученных интерференционных картин подтверждает высокую степень когерентности различных частот излучения суперконтинуума, генерируемого в сдвоенных микросветоводах.

### 3.3. Поляризация суперконтинуума

Наличие асимметрии в поперечном профиле перетяжки сдвоенных микросветоводов приводит к генерации поляризованного суперконтинуума. Это демонстрирует

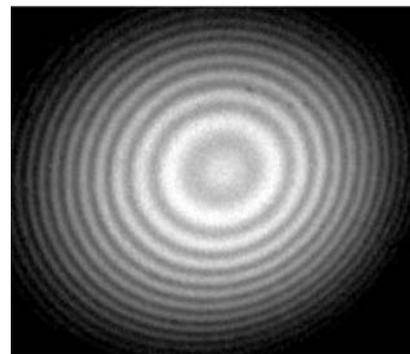


Рис.6. Фотография интерференционных колец, возникающих при пространственном совмещении волновых фронтов пучков и временном совпадении импульсов суперконтинуума, вышедших из выходных концов сдвоенного микросветовода.

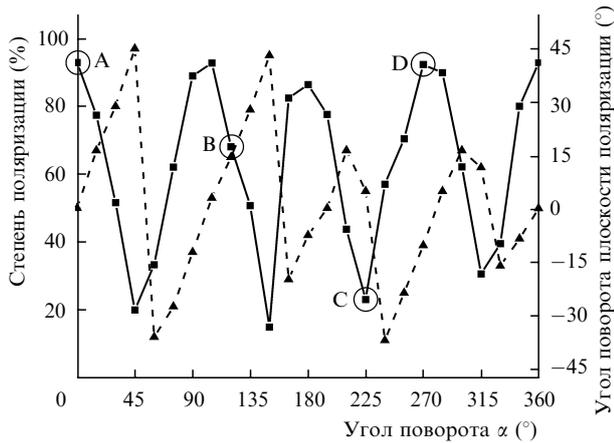


Рис. 7. Зависимости степени поляризации суперконтинуума  $\delta$  (сплошная кривая) и угла поворота плоскости поляризации его поляризации (штриховая кривая) от угла поворота  $\alpha$ . Точки A, B, C и D соответствуют спектрам на рис. 4.

рис. 7, на котором представлены экспериментальные результаты измерений степени поляризации суперконтинуума  $\delta$  для образца с диаметром перетяжки  $d = 2.2$  мкм и длиной 9 см. Измерения проводились при разных углах  $\alpha$ . Вариации этого угла достигались за счет вращения перетяжки сдвоенного микросветовода вокруг направления распространения излучения при фиксированных входных и выходных невытянутых концах образцов. Степень поляризации  $\delta$  (в %) определялась из результатов измерений максимальной ( $I_{\max}$ ) и минимальной ( $I_{\min}$ ) интенсивностей суперконтинуума, прошедшего через вращающийся поляризатор (призму Глана), по формуле

$$\delta = 100(I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}).$$

Из результатов измерений видно, что максимумы зависимости  $\delta(\alpha)$  достигаются при углах  $\alpha$ , близких к  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  и  $270^\circ$ , т. е. тогда, когда направление поляризации входного излучения близко к направлению одной из двух осей симметрии квазиэллиптического сечения перетяжки. При увеличении угла  $\alpha$  от значений  $(1 + 2n) \times 45^\circ$ , где  $n$  – целое число, наблюдалось резкое изменение направления поляризации излучения суперконтинуума. Максимальная степень поляризации суперконтинуума для этого образца составила 93%. Для образца, спектр которого показан на рис. 3, она оказалась равной 97%. Сравнивая результаты, приведенные на рис. 7, с формами спектра суперконтинуума на рис. 4, следует сделать вывод о том, что максимальная ширина спектра выходного излучения достигается при наибольшей степени поляризации излучения  $\delta$ . Для спектров на рис. 4 имеем:  $\delta = 93\%$ ,  $\alpha = 0^\circ$  (A),  $\delta = 68\%$ ,  $\alpha = 120^\circ$  (B),  $\delta = 23\%$ ,  $\alpha = 225^\circ$  (C) и  $\delta = 93\%$ ,  $\alpha = 270^\circ$  (D).

Подобные зависимости степени поляризации и угла поворота плоскости поляризации от  $\alpha$  наблюдались так-

же для излучения непрерывного гелий-неонового лазера (длина волны 0.63 мкм), которое вводилось в образцы сдвоенных биконических световодов. Это указывает на то, что полученные для суперконтинуума зависимости  $\delta(\alpha)$  не являются характерными именно для него, а присущи сдвоенным биконическим световодам вне зависимости от характера входного излучения (импульсное или непрерывное).

#### 4. Заключение

Сдвоенные биконические кварцевые световоды с квазиэллиптическим поперечным сечением перетяжки микронных размеров позволяют реализовать генерацию поляризованного суперконтинуума в области 460–1070 нм при накачке излучением фемтосекундного титан-сапфирового лазера с энергией импульсов  $\sim 1$  нДж. Максимальная ширина спектра суперконтинуума и наиболее гладкая его форма достигаются при совпадении плоскости поляризации излучения накачки с большой осью квазиэллиптического профиля поперечного сечения перетяжки сдвоенного биконического микросветовода. При этом достигается также наибольшая степень поляризации (до 97%) суперконтинуума. Полученный суперконтинуум характеризуется высокой степенью когерентности генерируемых частот и гауссовым поперечным распределением интенсивности излучения на выходе образцов световодов.

1. Ranka J.K., Windeler R.S., Stentz A.J. *Opt. Lett.*, **25**, 25 (2000).
2. Wadsworth W.J., Knight J.C., Ortigosa-Blanch A., Arriaga J., Silvestre E., Mangan B.J., Russell P.St.J. *Proc. of LEOS XVI Ann. Meet.* (New York, IEEE, 1999, PD1.5).
3. Birks T.A., Wadsworth W.J., Russell P.St.J. *Opt. Lett.*, **25**, 1415 (2000).
4. Кобцев С.М., Кукарин С.В., Фатеев Н.В. *Квантовая электроника*, **32**, 11 (2002).
5. Акимов Д.А., Алфимов М.В., Багаев С.Н., Биркс Т., Иванов А.А., Федотов А.Б., Уодсуорт У.Дж., Расселл Ф.Ст.Дж., Пивцов В.С., Подшивалов А.А., Желтиков А.М. *Письма в ЖЭТФ*, **74**, 515 (2001).
6. 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).
7. Alfano R.R. *The Supercontinuum Laser Source* (New York: Springer-Verlag, 1989).
8. Cormack I.G., Reid D.T., Wadsworth W.J., Knight J.C., Russell P.St.J. *Electron. Lett.*, **38**, 167 (2002).
9. Washburn B.R., Ralph S.E., Lacourt P.A., Dudley J.M., Rhodes W.M., Windeler R.S., Coen S. *Electron. Lett.*, **37**, 1510 (2001).
10. Liu X., Xu C., Knox W.H., Chandalia J.K., Eggleton B.J., Kosinski S.G., Windeler R.S. *Opt. Lett.*, **26**, 358 (2001).
11. Omenetto F.G., Taylor A.J., Moores M.D., Arriaga J., Knight J.C., Wadsworth W.J., Russell P.St.J. *Opt. Lett.*, **26**, 1158 (2001).
12. Kobtsev S., Kukarin S., Fateev N., Turitsyn S., Mezentsev V. *Tech. Dig. of Conf. OFC-2003* (Atlanta, Georgia, USA, 2003, FH4).
13. Mezentsev V., Turitsyn S., Yakovenko S., Kobtsev S., Kukarin S., Fateev N. *Tech. Dig. of XI Intern. Workshop on Optical Waveguide Theory and Numerical Modelling* (Prague, Czech Republic, 2003).
14. Dudley J.M., Coen S. *Opt. Lett.*, **27**, 1180 (2002).