



## ВОЛОКОННЫЕ СУПЕРКОНТИНУУМНЫЕ ЛАЗЕРЫ: МНОГООБЕЩАЮЩИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

*А.Девайн, Р.Ходдер, NKT Photonics,  
www.nktphotonics.com*

Всего за 10 лет уровень мощности белых лазеров (суперконтинуумов) со спектральным диапазоном от 380 до 4400 нм вырос на порядок. Более детальное понимание генерации излучения с широким спектром в оптических волокнах позволит продолжить работу по усовершенствованию конструкции суперконтинуумных источников и расширению области их использования.

**С**пектральное уширение и генерация излучения на новых частотах являются особенностями нелинейной оптики, которые применяются и изучаются в течение многих десятилетий. В 1970-х годах, генерация "белого света" за счет экстремального нелинейного спектрального уширения оптических импульсов в конечном итоге привела к термину "суперконтинуум" [1]. Но поскольку нелинейность стекла относительно низка, то требуются очень высокие пиковые мощности для создания значительного спектрального уширения в объемном материале; длина взаимодействия обратно пропорциональна размеру пятна: чем лучше фокус, тем короче эффективная длина взаимодействия (обычно

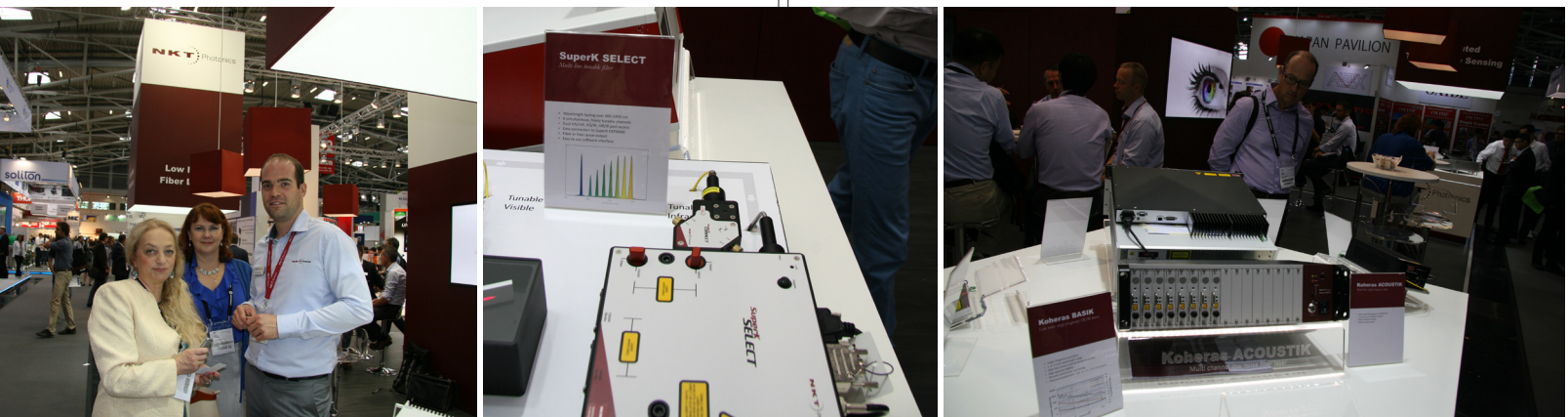
## SUPERCONTINUUM SOURCES: AN EVEN BRIGHTER FUTURE AWAITS SUPERCONTINUUM FIBER LASERS

*A.Devine, R.Hodder, NKT Photonics,  
www.nktphotonics.com*

In just over 10 years, supercontinuum power levels have grown an order of magnitude with spectral range spanning from 380 to 4400 nm. Enhanced understanding of supercontinuum generation in optical fibers will enable continued product and application evolution.

**S**pectral broadening and new frequency generation are features of nonlinear optics that have been utilized and studied for many decades. In the 1970s, the generation of an extended "white light" source through extreme nonlinear spectral broadening of optical pulses eventually led to the term "supercontinuum" [1]. However, because the nonlinearity of glass is relatively low, it requires very high peak powers to generate significant spectral broadening in bulk material; the interaction length is inversely proportional to the spot size: the tighter the focus, the shorter the effective interaction length (typically a few centimeters). The obvious solution is to confine light and use the guiding properties of optical fibers to extend the interaction length.

But using optical fiber only partially solves the problem, as the spectral broadening due to the nonlinear properties of standard fibers (SMF-28 type) results in a spectrum extending to mainly longer wavelengths and, with the pump around 1064



несколько сантиметров). Очевидным решением является пространственное ограничение излучения и использование направляющих свойств оптических волокон для расширения длины взаимодействия.

Однако использование оптического волокна лишь частично решает проблему. При использовании нелинейных свойств стандартных волокон (к примеру, SMF-28) можно получить широкий спектр только в длинноволновой области. А при накачке около 1064 нм свет в видимой части спектра не генерируется.

Новый этап по усовершенствованию суперконтинуумных источников начался в середине 1990-х годов благодаря разработке фотонно-кристаллического оптоволокна Филиппом Расселом и Джонатаном Найтом. Данные оптические волноводы обладают свойствами, которые зависят не только от материала, как в обычных волокнах, но и от структуры массива крошечных отверстий, окружающих сердцевину оптоволокна.

Необычная структура этих оптических волокон имеет ряд преимуществ, которые включают в себя относительно низкие производственные затраты (вся конструкция основана на чистом кварцевом стекле без каких-либо легирующих примесей) и уникальные оптические свойства. Наиболее заметной особенностью является способность адаптировать дисперсионную способность таким образом, чтобы длина волны нулевой дисперсии могла быть перемещена в область 1 мкм или даже менее 1 мкм. Значение этих уникальных особенностей было впервые понято в 2000 году Беллом Лабсом. Ему удалось продемонстрировать генерацию суперконтинуума в фотонно-кристаллическом оптоволокне с использованием титан-сапфирового лазера в качестве накачки [2].

В настоящее время хорошо известно, что если длина волны накачки лежит вблизи длины волны

nm, light in the visible part of the spectrum is not generated.

The whole landscape of supercontinuum generation changed in the mid-1990s with the invention by Philip Russell and Jonathan Knight of Photonic Crystal Fibers (PCFs)—spectacular-looking optical waveguides with properties set not by the material, as in conventional fibers, but by arrays of tiny holes surrounding the core.

The unusual structures of these PCFs have a number of benefits, ranging from the relatively low manufacturing cost (the whole structure is based on pure silica glass without any dopants) to unique optical properties. The most notable one is the ability to tailor the dispersion properties such that the zero Group Velocity Dispersion (GVD) wavelength can be moved to the 1  $\mu\text{m}$  region and to even shorter ones. The significance of these unique features was first understood in 2000 by Bell Labs in its demonstration of supercontinuum generation in a PCF pumped by a Ti:sapphire laser [2].

It is now well understood that if the pump wavelength lies in the vicinity of the zero GVD wavelength, then nonlinear spectral broadening can develop almost symmetrically to both short and long wavelengths as a result of the group velocity matching for Stokes and anti-Stokes signals, and thus one can create an extremely broad spectrum covering the entire 400–2500 nm wavelength range.

In 2005, turnkey supercontinuum fiber lasers were highly novel and attracted attention from early adopters – mainly researchers and corporate research groups curious about how the technology could be incorporated into their research and product development. Today, the supercontinuum is an established illumination tool within research and is becoming a commodity illumination source within industrial and medical tools and instrumentation.





## На выставке LASER WORD of Photonics – 2017 компания NKT Photonics анонсировала покупку компании Fianium и представила свою новую продукцию, а также линейку традиционных продуктов, пользующихся высоким спросом

У компании NKT Photonics есть несколько главных производственных направлений: производство волоконной оптики, линейных оптических датчиков, широкополосных лазеров, сверхбыстрых волоконных лазеров, волоконных усилителей, распределённых датчиков температуры, акустических колебаний и механических напряжений. Стратегической задачей в работе компании является фокусировка на практических приложениях. Самой передовой областью на данный момент являются суперконтинуумные лазеры и волоконно-оптические датчики.

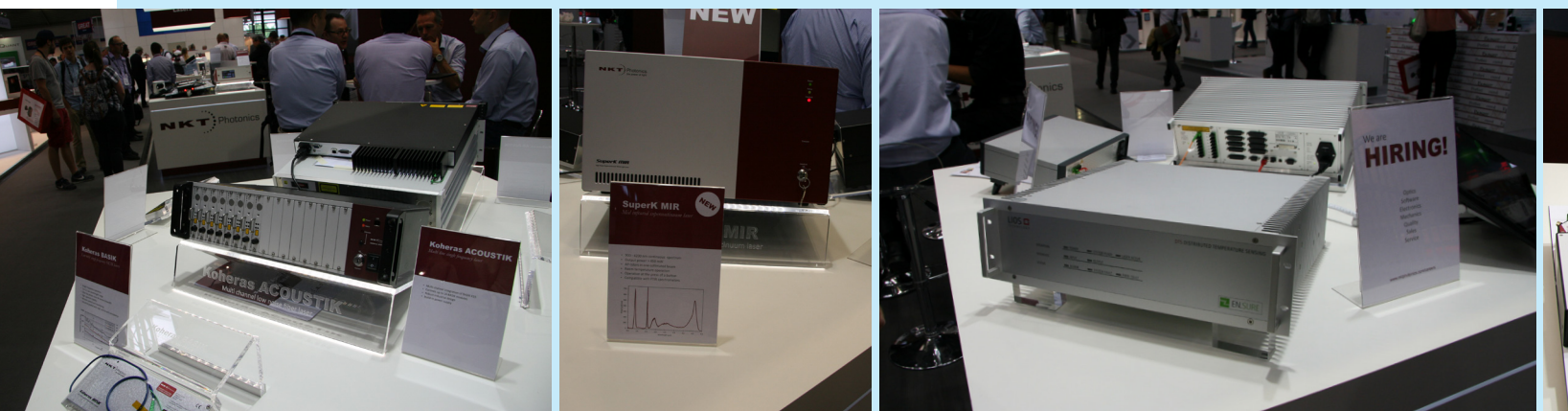
В основном волоконно-оптические датчики используются для мониторинга различных процессов в промышленности. В компании разрабатывают много проектов, связанных с газовой и нефтяной промышленностью. Датчики используются в установках извлечения нефти или газа и их дальнейшей переработки.

Распределённый датчик температуры (англ. DTS – Distributed Temperature Sensing) является инновационной разработкой NKT Photonics. Датчик имеет широкий диапазон дальности обнаружения неполадок на объекте – до 70 км – и используется для обнаружения утечек в трубопроводе. Связь может быть обеспечена с помощью кабеля или беспроводным способом. Датчик можно использовать во многих средах: нефть, природный газ, сжиженный газ, вода, бетон. Датчик может быть адаптирован под заданную физическую среду, он рассчитан на диапазон температур от –180 до 400 °С. Датчик может быть использован для добычи нефти и газа, в реак-

торах, в химической промышленности, в системах хранения нефти и газа. Среднее время безотказной работы составляет 32 года. При этом датчик не требует обслуживания. В мире не существует аналогов для данного устройства. Датчик включает в себя пассивный охладитель, не содержит вентиляторов и подвижных механических компонентов. Оптоволокно для него является собственной разработкой NKT Photonics. Для каждого приложения используется соответствующее специальное оптоволокно.

У компании есть множество проектов, связанных с обнаружением пожаров в туннелях, метро, аэропортах, небоскрёбах. NKT Photonics располагает сертификационными документами, которые разрешают ей выполнять эту деятельность.

Другое направление производства – многоканальный волоконный лазер с низким уровнем шума. Устройство имеет 16 каналов. Лазер отличается возможностью генерировать излучение с очень низким отклонением от заданных величин интенсивности и длины волны. Ширина линии генерации составляет 100 Гц. С помощью использования лазера и оптоволокна можно определить температуру в заданной области. Лазер применяется в таких сферах как: когерентная оптическая связь, лазерное охлаждение атомов, лазерный пинцет. Существует возможность измерять скорость ветра для оценки перспектив строительства электростанции. Скорость движения частиц в воздухе определяется по характеристикам отражённого излучения.



Система Koheras Acoustik пользуется спросом. Это модульная многоканальная система из волоконных лазеров с низким уровнем шума. Система может включать в себя до 16 модулей. В установку могут добавляться лазеры с требуемой длиной волны, которыми можно управлять из единого центра. Возможность собирать требуемую установку из отдельных модулей является отличительной особенностью продукции NKT Photonics. Эти лазеры были использованы в исследованиях по регистрации гравитационных волн. Конструкция лазера с низким уровнем шума и отличается от конструкции суперконтинуумных лазеров.

На сегодняшний день выпуск суперконтинуумных лазеров по-прежнему остается важным направлением в работе компании NKT Photonics. Перестраиваемый мультисканальный лазер серии Fianium генерирует излучение в диапазоне длин волн 400–2400 нм, мощность излучателя достигает до 20 Вт. Все компоненты совместимы с другим оборудованием компании NKT Photonics.

Акустооптический перестраиваемый фильтр серии SuperK имеет программное управление. Ширина полосы пропускания фильтра для лазеров серии SuperK составляет 1–2 нм. Существует возможность перестройки от 1 до 8 линий.

Другие возможные модификации фильтра:

- SuperK Extend для перестройки в диапазоне 265–480 нм, ширина линии 2–12 нм;
- SuperK Varia для перестройки в диапазоне 400–840, ширина линии 10–100 нм;
- SuperK Select для перестройки в диапазоне 400–2400 нм.

SuperK Extend UV – устройство для расширения диапазона перестройки суперконтинуумных лазеров. С помощью данного узла можно добиться генерации излучения на длинах волн от 265

до 480 нм. Область использования данного оборудования – возбуждение флуоресценции различных структур, являющихся предметом изучения в биологии и медицине.

Лазеры NKT Photonics компактны, имеют воздушное охлаждение, переходят в рабочий режим в течение 10 минут. Это оборудование с высоким уровнем качества и надёжности.

На выставке был представлен суперконтинуумный лазер SuperK EVO. NKT Photonics первая в мире начала производить лазеры подобного типа. Кроме того, NKT Photonics выпускает суперконтинуумный лазер для среднего ИК-диапазона серии SuperK MIR mid IR. Диапазон перестройки данного лазера составляет 900–4200 нм. Лазер SuperK MIR mid IR можно комбинировать с FTIR-спектрометром (фурье ИК-спектрометром).

Компания NKT Photonics обладает одной из лучших технологий по производству оптоволокна в мире и поставляет оптоволокно для многих ведущих производителей лазерной техники. Это итербиное оптоволокно с полимерным защитным покрытием (англ. PCF) из кремния. Такое оптоволокно NKT Photonics использует во всем своем оборудовании, в том числе для фемто- и пикосекундных волоконных лазеров. Данное оптоволокно широко используется в промышленности. Производитель гарантирует ресурс работы оптоволокна – два года. И уже в течение 7 лет компания непрерывно тестирует свою продукцию. Результаты экспериментов свидетельствуют о ее высокой надёжности. А по истечению срока гарантии на оборудование NKT Photonics предоставляет услуги его сервисного обслуживания. Кроме того, в компании проводятся статистические исследования в отношении надёжности различных узлов. Анализ направлен на то, чтобы улучшить качество производимой продукции.





нулевой дисперсии, то нелинейное спектральное уширение может проявляться почти симметрично как для коротковолнового, так и для длинноволнового диапазона в результате согласования групповой скорости для стоксовых и антистоксовых компонент. Следовательно, существует возможность получения чрезвычайно широкого спектра, охватывающего весь диапазон длин волн от 400 до 2500 нм.

В 2005 году появились готовые суперконтинуумные источники, которые привлекали внимание в основном отдельных научных работников или исследовательских групп, интересующихся тем, как данная технология может быть использована в рамках исследований или в разработке продукта. На сегодняшний день, суперконтинуумные источники света используются во многих сферах: от науки до промышленных установок и медицинских инструментов.

За последнее десятилетие развитие суперконтинуумных лазеров было обусловлено как технологическими достижениями, так и изменениями требований на рынке. Производители суперконтинуумных источников параллельно занимаются двумя вопросами: исследованием фундаментальных ограничений для данной технологии, а также адаптацией производительности и параметров лазеров для конкретных приложений. Хорошее понимание основ технологии позволяет создавать более экономичные и надежные лазеры. С момента своего первого появления суперконтинуумные лазеры развивались в следующих основных направлениях: повышение мощности и расширение спектрального диапазона. Кроме того, происходило наращивание объемов производства. При этом сохранение низкой стоимости и высокой степени надежности являлись первостепенными задачами.

### РЕГУЛИРОВКА МОЩНОСТИ

Почти все суперконтинуумные волоконные лазеры имеют одну и ту же базовую конфигурацию: лазер накачки с высокой пиковой мощностью для эффективного инициирования нелинейных эффектов в оптических волокнах и фотонно-кристаллическое оптоволокно. Источники накачки обычно основаны на архитектуре усилителя мощности с задающим генератором (MOPA – master oscillator power amplifier), где сверхкороткие импульсы с длиной волны порядка 1064 нм от основного генератора усиливаются в волоконном усилителе высокой мощности, легированном иттербием. При этом в качестве

Over the last decade, the development of supercontinuum lasers has been driven by both technological advances and ever-evolving market requirements. From a scientific standpoint, supercontinuum laser manufacturers have been driven to understand the boundaries and limitations of the technology, whereas the market has required us to tailor performance for specific applications. A good understanding of the underlying technology also allows lasers to be built in a cost-effective and reliable manner.

Since their first introduction, supercontinuum lasers have developed in three well-distinguished directions: higher power, broader spectral range, and high volume manufacture when low cost and qualified reliability are paramount.

### POWER SCALING

Almost all supercontinuum fiber lasers share the same basic configuration: a high-peak-power pump source to effectively initiate nonlinear effects in optical fibers and a length of PCF for supercontinuum generation.

The pump sources are typically based on a master oscillator power amplifier (MOPA) architecture, where ultrashort pulses at approximately 1064 nm from a master oscillator are amplified within a high-power ytterbium-doped fiber amplifier, pumped by one or more high-brightness pump laser diodes or diode modules.

Pulses produced using this MOPA architecture have high peak intensities, are injected into a highly nonlinear PCF, and undergo spectral broadening to generate a supercontinuum. To a first approximation, the extent of spectral broadening is governed by the peak power of the pulse that – for a given average power of the MOPA laser – is inversely proportional to both the pulse duration and its repetition rate.

The flexibility of the MOPA design allows the parameters of the master oscillator and fiber amplifier to be altered independently. The optical power launched into a PCF can be scaled up in a relatively efficient and effortless way by simply using a master source at a higher repetition rate and a fiber amplifier capable of maintaining higher average power. In this context, it is worth mentioning that the highest optical powers in supercontinuum generation can be achieved when the fiber pump source operates in the continuous-wave (CW) regime. At first glance, it appears that to achieve significant spectral broadening one would require average powers from a CW fiber laser in the region of a few kilowatts. However, in reality, sizeable spectral broadening can

накачки используется один или несколько лазерных диодов с высокой интенсивностью излучения, либо диодные модули.

Импульсы с высокой интенсивностью пиков, полученные с использованием этой архитектуры, вводятся в нелинейное фотонно-кристаллическое оптоволокно и подвергаются спектральному уширению для создания суперконтинуума. В первом приближении степень спектрального уширения определяется пиковой мощностью импульса, которая при заданной средней мощности лазера накачки обратно пропорциональна длительности импульса и его частоте повторения. Гибкость конструкции системы накачки позволяет независимо изменять параметры основного генератора и волоконного усилителя. Мощность излучения, которое заводится в оптоволокно, может быть увеличена относительно эффективным и легким способом. Для этого используется задающий генератор с более высокой частотой повторения импульсов и волоконный усилитель, способный поддерживать более высокую среднюю мощность.

Стоит отметить, что для достижения высокой мощности суперконтинуумного излучения необходимо, чтобы источник накачки работал в непрерывном режиме. На первый взгляд, для формирования значительного спектрального уширения требуемая средняя мощность непрерывного излучения от волоконного лазера должна быть порядка нескольких киловатт. Однако на самом деле заметное спектральное уширение наблюдается при уровнях мощности всего в десятки или сотни ватт. Для суперконтинуумных источников с системой накачки, работающей в непрерывном режиме, нелинейные эффекты в фотонно-кристаллическом оптоволокне преобразуют начальные "плоские" оптические сигналы от усилителя мощности в поток хаотически распределенных коротких импульсов с пиковыми мощностями на порядок выше в сравнении с первоначальным сигналом. Таким образом, формируется излучение с широким спектром [3].

Текущая деятельность в этой области в основном ограничивается научными исследованиями, и все коммерчески доступные суперконтинуумные лазеры используют задающий генератор оптических импульсов с четко определенными параметрами. Данный узел чрезвычайно важен для приложений. Как уже упоминалось ранее, природа генерации суперконтинуума основана на нелинейном спектральном уширении отдельных импульсов. Следовательно, изменяя как

be observed at power levels of only tens or hundreds of watts.

For CW-pumped supercontinuum sources, the nonlinear effects in PCFs convert the initial temporally "flat" optical signals from the power amplifier into a stream of chaotically distributed short pulses with peak powers that are an order of magnitude higher than the launched signal, thus creating a fairly broad supercontinuum spectrum [3].

Current activity in this area is largely confined to the research laboratory, and all commercially available supercontinuum lasers use a master oscillator producing optical pulses with well-defined parameters. Such a "well-behaved" master oscillator is extremely important for practical applications. As previously mentioned, the nature of supercontinuum generation is based on nonlinear spectral broadening of individual pulses and therefore by varying both the MOPA repetition rate and average power, the temporal distance between individual supercontinuum pulses can be controlled - an extremely important feature for applications involving time-resolved measurements.

In a single supercontinuum laser, flexibility in the oscillator repetition rate can be realized using a so-called pulse picker: an acousto-optical modulator acting as a gate for the incoming stream of optical pulses (see Fig. 1). For a supercontinuum fiber laser fitted with a built-in pulse picker, spectral density decreases with repetition rate, but the pulse energy of each supercontinuum pulse remains constant, resulting in an optical spectrum shape that is independent of pulse repetition rate.

Pulse-picked supercontinuum sources operating at various repetition rates provide nominally identical pulse spectral shapes, but different pulse densities.

### **MORE BANDWIDTH: UV-ENHANCED SUPERCONTINUUM**

Early supercontinuum fiber lasers delivered high brightness in the 500-2400 nm spectral range. Since many biological molecules absorb in the blue-ultraviolet (UV) region of the electromagnetic spectrum, life-science applications such as fluorescence imaging and time-correlated single-photon counting are well suited to a broadband supercontinuum laser source that extends further into the UV.

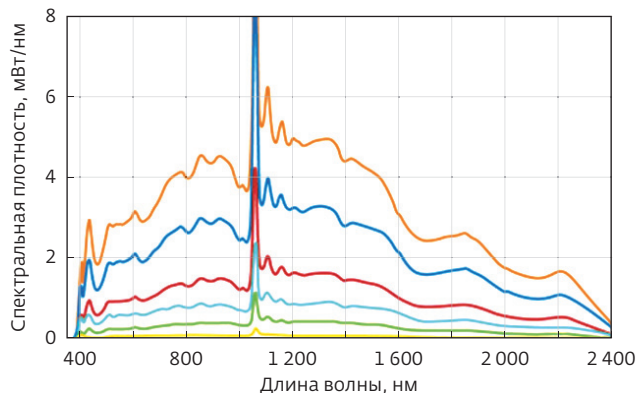
This continued requirement to push the short-wavelength edge to below 400 nm (and even further down into the UV) has required a greater technical understanding of the physics behind supercontinuum generation and was aided by research published

частоту повторения импульсов, так и среднюю мощность задающего генератора, получаем возможность варьировать время между появлением отдельных импульсов. Это очень важно для приложений, где большую роль играет временное разрешение. Для отдельного суперконтинуумного лазера вариация частоты повторения импульсов может быть реализована с использованием акустооптического модулятора, который играет роль затвора для входящего потока оптических импульсов (рис.1). Для волоконного суперконтинуумного лазера, оснащенного встроенным модулятором импульсов, спектральная плотность уменьшается с частотой повторения, но энергия импульса остается постоянной, что позволяет получить форму оптического спектра, которая не зависит от частоты повторения импульсов. Таким образом, суперконтинуумные источники с модулятором импульсов обеспечивают идентичность формы спектра при различной плотности импульсов.

### РАСШИРЕНИЕ СПЕКТРА СУПЕРКОНТИНУУМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ДО УФ-ДИАПАЗОНА

Первые суперконтинуумные волоконные лазеры обеспечивали высокую интенсивность излучения в спектральном диапазоне от 500 до 2400 нм. Поскольку многие биологические молекулы поглощают электромагнитный спектр УФ-диапазона, для научных исследований в области биологии и медицины, таких как построение флуоресцентных изображений или единичный подсчет фотонов с корреляцией по времени, можно с успехом использовать суперконтинуумные источники, в спектр которых входит УФ-область.

Потребность расширения спектра до 400 нм и менее потребовало более глубокого понимания физики генерации суперконтинуума, чему способствовало исследование, опубликованное в 2008 году [4]. В упрощенных терминах, генерация суперконтинуумного излучения является сложным процессом четырехволнового взаимодействия. Чтобы сделать этот процесс эффективным, групповые скорости стоксовой и антистоксовой компонент должны быть равны или очень близки друг к другу. Следовательно, длина волны лазера накачки должна быть в окрестности длины волны нулевой дисперсии. Фотонно-кристаллическое волокно может быть адаптировано для расширения спектра в УФ область путем модификации его конструкции. Речь идет о соотношении размеров отверстий к расстоянию между отвер-



**Рис.1.** Суперконтинуумные источники, работающие с различной частотой повторения импульсов, обеспечивают высокую повторяемость формы спектра. При этом средняя мощность излучения пропорциональна спектральной плотности

*Fig. 1. "Pulse-picked" supercontinuum sources operating at various repetition rates provide nominally identical pulse spectral shapes, but proportionally reduced average power*

in 2008 [4]. In simplified terms, supercontinuum generation is a complex four-wave mixing process. To make this process efficient, the group velocities of the Stokes and anti-Stokes components should be equal (or very close)—which is why the pump wavelength should be in the vicinity of zero GVD.

The dispersion of photonic crystal fibers (PCFs) can be tailored to enhance the short-wavelength content of supercontinuum lasers. Modification of the PCF design (hole size to hole-spacing ratio) allows group-index matching of long-wavelength spectral components to shorter wavelengths.

Material loss in silica glass at wavelengths >2500 nm becomes too high for efficient generation of the Stokes components, and in conventional PCFs the group velocity of this band corresponds to that of the anti-Stokes component at approximately 450 nm (see Fig. 2). Taking 2500 nm as a fixed wavelength that cannot be moved (because of material loss), the only way to extend the spectrum into the UV is to engineer the dispersion of the PCF in such a way that the group velocity at 2500 nm matches that at the shortest wavelength as possible in the UV. By altering the design of the PCFs by changing the size and position of the holes, one can tailor this dispersion profile to optimize UV generation down to 375 nm in the resulting supercontinuum spectrum (see Fig. 3).

UV-enhanced supercontinuum spectra (SuperK EXU-6) during continuous long-term operation of

ствиями, что позволяет согласовать групповой показатель преломления длинноволновых и коротковолновых компонент спектра.

Износ кварцевого стекла на длинах волн более 2500 нм становится слишком высоким для эффективной генерации стоковых компонент и в обычном фотонно-кристаллическом оптоволокне групповая скорость этой полосы соответствует групповой скорости антистоксовой составляющей при 450 нм (рис.2). Принимая 2500 нм в качестве фиксированной длины волны, которая не может быть изменена (из-за износа материала), единственным способом расширить спектр в УФ-область может быть создание дисперсии в волокне таким образом, чтобы групповая скорость при 2500 нм соответствовала максимально короткой длине волны в УФ диапазоне. Путем изменения конструкции волокна с помощью варьирования размера и положения отверстий можно создать требуемый профиль дисперсии для расширения спектра до 375 нм (рис. 3).

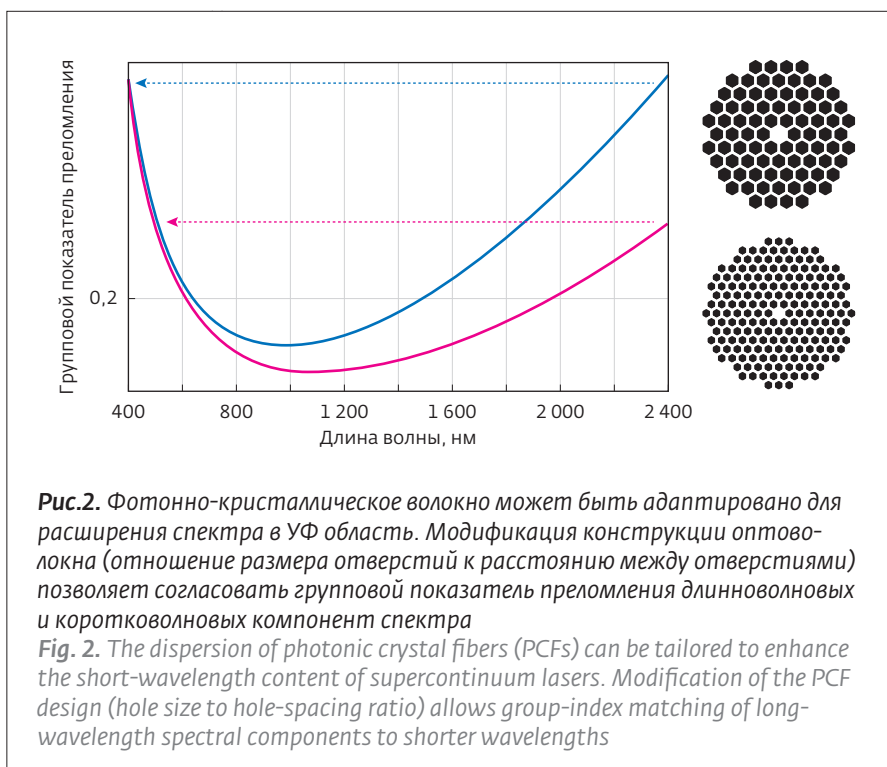
Суперконтинуумные источники с расширенным спектром до УФ-диапазона (SuperK EXU-6) при непрерывной работе более 2500 часов демонстрируют высокую стабильность и надежность (рис.3)

### НИЗКАЯ СТОИМОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ ОТКРЫВАЮТ НОВЫЕ РЫНКИ

Снижение стоимости суперконтинуумных лазеров происходит не только вследствие увеличения объема производства, но и за счет технологических достижений, таких как усовершенствование системы диодной накачки.

Соотношение затраты/мощность для волоконно-оптического лазера с высокой интенсивностью излучения продолжает снижаться с уровня 200 долл./Вт, что соответствует рубежу 2003/04 годов до текущего уровня ниже 10 долл./Вт. Повышение надежности суперконтинуумных лазеров является результатом накопленного опыта и успехов в проектировании их конструкции.

Возможность взаимодействия с крупными партнерами из области промышленности позво-

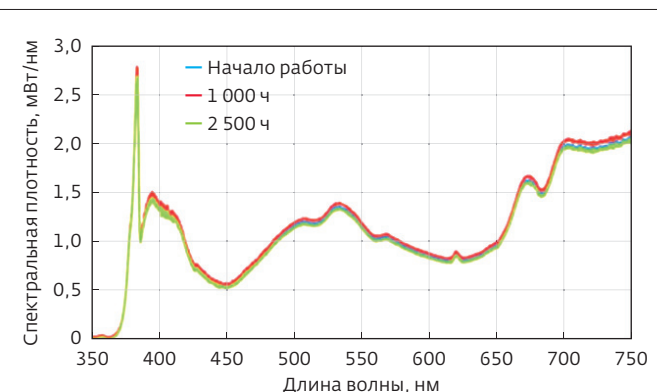


**Рис.2.** Фотонно-кристаллическое волокно может быть адаптировано для расширения спектра в УФ область. Модификация конструкции оптоволокна (отношение размера отверстий к расстоянию между отверстиями) позволяет согласовать групповой показатель преломления длинноволновых и коротковолновых компонент спектра  
*Fig. 2.* The dispersion of photonic crystal fibers (PCFs) can be tailored to enhance the short-wavelength content of supercontinuum lasers. Modification of the PCF design (hole size to hole-spacing ratio) allows group-index matching of long-wavelength spectral components to shorter wavelengths

>2500 hr show the maturity and reliability of today's supercontinuum technology.

### LOW COST AND RELIABILITY OPEN NEW MARKETS

Supercontinuum cost reduction comes not only from production volume increases, but also through



**Рис.3.** Спектр суперконтинуумного лазера серии SuperK EXU-6 при непрерывной длительной работе более 2500 часов. Отсутствие изменений на графике в сравнении с периодом начала эксплуатации говорит о высокой стабильности и надежности системы  
*Fig. 3.* UV-enhanced supercontinuum spectra (NKT Photonics SuperK EXU-6) during continuous long-term operation of >2500 hr show the maturity and reliability of today's supercontinuum technology





лила нам накопить десятилетний опыт работы с данной технологией. Высокая степень эффективности технологии подтверждается непрерывной стабильной работой лазеров порядка 10 000 часов в условиях повышенных нагрузок.

Высокая надежность в сочетании с низкой стоимостью и продвинутой оптико-волоконной технологией, несомненно, приведет к внедрению суперконтинуумных источников в различные области науки и промышленности, включая нанотехнологии, биомедицину и бытовую электронику.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Alfano R. R. and Shapiro S. L.** – Phys. Rev. Lett., 1970, v.24, № 11, p.584–587.
2. **Ranka J. K., Windeler R. S., Stentz A. J.** – Opt. Lett., 2000, v.25, p.25–27.
3. **Cumberland B. A. et al.** – Opt. Exp., 2008, v.16, № 8, p.5954–5962.
4. **Stone J. M. Knight J. C.** – Opt. Exp., 2008, v.16, № 4, p.2670–2675.

technological advances such as pump diode evolution. The cost/watt ratio for high-brightness fiber laser pump power continues to fall from a 2003/04 value of approximately \$200/W to below \$10/W today. Reliability enhancement comes as a direct result of experience and design engineering. With 10 years of experience and maturity coupled with significant investment in highly accelerated life testing from industrial partners, high-power supercontinuum laser technology is now proven with greater than 10,000 hours of continuous use in challenging environments.

High reliability coupled with low cost, all underpinned by mature optical fiber technology, will undoubtedly result in a broad spectrum of new applications in nanotechnology, biomedicine, and consumer electronics for even-brighter supercontinuum fiber lasers.

