

Волоконная оптика продолжает поражать нас разнообразием волноводных структур и новыми применениями волоконных световодов в различных областях современной техники. Уже сегодня волоконно-оптические технологии определяют уровень развития таких важных сфер государственной деятельности, как экономика, образование и оборона. Достижениям волоконной оптики посвятил своё научное сообщение на заседании Президиума РАН один из ведущих отечественных специалистов в этой области академик Е.М. Дианов.

## ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА: ОТ СИСТЕМ СВЯЗИ К "НЕРВНЫМ" СИСТЕМАМ

Е. М. Дианов

В наши дни очень динамично развивается традиционное направление волоконной оптики - волоконно-оптическая связь, оказывающая сильное влияние на экономику, основанную на знаниях, на решение социальных проблем. В этой статье я кратко остановлюсь на состоянии дел в области волоконно-оптической связи на примере трансокеанских систем, представлю прогноз её развития до 2025 г. Затем перейду ко второму крупному применению волоконной оптики - волоконным лазерам, и наконец, расскажу о новом быстроразвивающемся направлении волоконной техники - волоконно-оптических распределённых сенсорных системах, называемых иногда "нервными" системами.

### ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ

Состояние дел в области волоконно-оптической связи наиболее ярко характеризуется успехами в разработке трансокеанских волоконно-оптических систем. Все континенты связаны подводными волоконными кабелями, общая длина которых в 2005 г. составила более 600 тыс. км [1]. Такой длины кабеля достаточно, чтобы обмотать земной шар 15 раз.

Максимальная скорость передачи информации трансокеанических волоконно-оптических систем

порядка 1 Тбит/с, хотя имеются системы, скорость передачи информации в которых 50-500 Гбит/с и менее 10 Гбит/с. Ряд волоконно-оптических систем, особенно между США и Европой, замкнуты (запараллелены). Благодаря этому сильно повышается их надёжность, так как в случае обрыва или каких-либо других аварий поток информации направляется по параллельному каналу.

Ещё одной особенностью современных трансокеанских систем связи является использование ВКР, или "рамановских" волоконных усилителей. Ещё в 1994 г. сотрудники Научного центра волоконной оптики РАН и независимо от них сотрудники американской компании "Lucent Technology" показали, что можно создать эффективные волоконные ВКР усилители [2, 3]. С тех пор прошло около 10 лет, прежде чем эти усилители нашли коммерческое применение.

Как уже упоминалось, максимальная скорость передачи информации трансокеанских систем составляет около 1 Тбит/с. Системы связи, имеющие такие огромные скорости передачи информации, до недавнего времени оставались недогруженными. Складывалось впечатление, что полоса пропускания волоконных световодов бесконечна и насыщение пропускной способности наступит не скоро. Однако в 2005 г. оказалось, что глобальный поток информации (а это прежде всего интернет) вырос на 115% за один год [4].

Этот, на первый взгляд, несколько неожиданный результат объясняется, во-первых, растущим объёмом услуг, предоставляемым в настоящее время интернетом, во-вторых, низкой стоимостью производства и установки волоконно-оптического телекоммуникационного оборудования. Эти два обстоятельства привели к тому, что массовое распространение получил широкополосный (волоконный) доступ населения к информационным услугам, то есть к интернету. Медные провода позволяют передавать информацию со скоростью до 2-10 Мбит/с, волоконные световоды - 100 Мбит/с-



ДИАНОВ Евгений Михайлович – академик, директор Научного центра волоконной оптики РАН.

1 Гбит/с и выше. В научной литературе эта услуга (и соответствующие проекты) носит название "Волоконный световод в каждый дом" (FTTH - Fiber to the Home), причём её распространение в последнее время приобрело взрывной характер (рис. 1). Тому же способствует трансформация экономики развитых стран, так называемая четвёртая экономическая революция. Судя по докладам на конференциях, суть этой экономической трансформации сводится к удалению из развитых стран нетехнологичных производств в страны с низким уровнем зарплаты, и в будущем экономика развитых стран станет индустрией услуг [5]. Среди стран - потребителей услуги "Волоконный световод в каждый дом" в настоящее время всех опережает Япония благодаря сильной государственной поддержке этой индустрии. Японская фирма NTT объявила, что стоимость, сложность установки и управления не зависят от того, используются ли волоконные световоды или медные провода при подключении домов к информационным сетям. NTT планирует в 2010 г. довести число подписчиков на услугу "Волоконный световод в каждый дом" до 30 млн. (численность населения Японии 128 млн. человек). В Европе эта услуга менее распространена, чем Евросоюз сильно озабочен.

В Евросоюзе уверены, что программа "Волоконный световод в каждый дом" ускоряет развитие экономики, основанной на знаниях. Кроме того, программа имеет большое социальное значение (что для Евросоюза тоже немаловажно), поскольку обеспечивает населению медицинские услуги, помощь по уходу за престарелыми и больными людьми и т.д. В литературе анализируются причины отставания Европы в реализации этой программы. Оказывается, Европа в исследования по информатике и телекоммуникациям вкладывает лишь 18% от полных затрат на научные исследования, в то время как США и Япония - 30%. В 2004 г. Евросоюз создал Совет Европы по поддержке программы "Волоконный световод в каждый дом". Аналогичный совет стран Азии и Тихоокеанского региона был создан в 2005 г. Ещё раньше, в 2001 г., был организован совет Северной Америки. Хотя все эти советы действуют независимо, в соответствии с историческими, культурными и политическими особенностями регионов, их взаимодействие позволяет выработать унифицированный подход к решению проблемы.

Социально-экономические аспекты проблемы телекоммуникаций - это одна сторона дела, технические вопросы - другая. Один из вопросов - как повлияет рост глобального потока информации на развитие волоконно-оптической связи. Прямое отношение к этой проблеме имеет такой показатель, как рост количества проложенных волоконных световодов. Приведу суммарную длину волоконных световодов, проложенных в США, и в остальном мире в 2005 г., а также прогноз её увеличения в предпо-

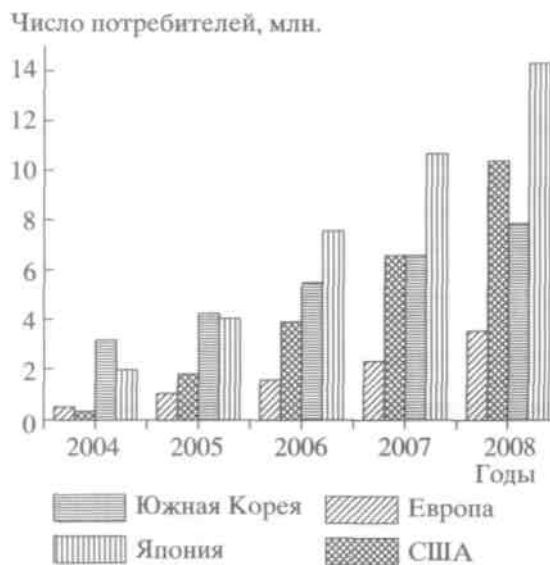


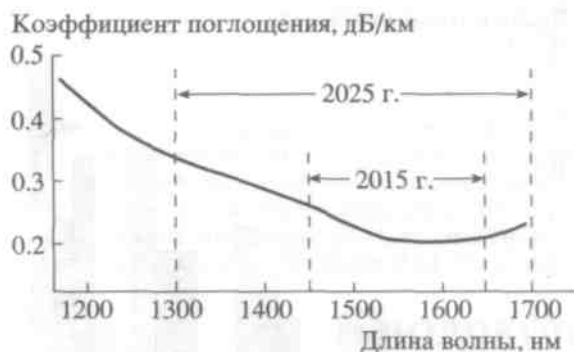
Рис. 1. Число потребителей услуги "Волоконный световод в каждый дом" в 2004–2008 гг.

ложении, что рост потока информации составит в США 20% за год и в мире в среднем -10% за год [6]:

	2005 г.	2015 г.	2025 г.	
США	14	83	513	млн. км/год
В мире	61	153	396	»

Оценки показывают, что прирост глобального потока информации на 115% за год или даже на 50% за год насытит пропускную способность трансатлантической системы уже через несколько лет [7]. Если принять более консервативную оценку прироста глобального потока информации - 20% за год, то пропускная способность трансокеанических волоконно-оптических систем связи должна обеспечивать передачу информации по паре волоконных световодов со скоростью около 50 Тбит/с к 2015 г. и около 100 Тбит/с - к 2025 г. [7]. Согласно оценкам [7, 8], для передачи информации с такой скоростью необходимо использовать спектральную область 1450-1650 нм к 2015 г. и 1300-1700 нм - к 2025 г. (рис. 2).

Достижение указанных скоростей передачи информации возможно за счёт увеличения числа спектральных каналов, передаваемых по одному волоконному световоду, и скорости передачи информации в одном спектральном канале до 40 Гбит/с или 160 Гбит/с [8]. Однако рост числа каналов и расширение спектральной области, где оптические потери световодов больше (см. рис. 2), приводят к увеличению мощности сигналов, вводимых в волоконный световод. А это с неизбежностью влечёт за собой нелинейное взаимодействие каналов. Следовательно, возникает необходимость создания волоконных световодов с низкой нелинейностью, а также других элементов волоконно-



**Рис. 2.** Спектр потерь современных волоконных световодов на основе кварцевого стекла и прогноз расширения области для передачи информации в 2015 и 2025 гг. В настоящее время для передачи информации используется сравнительно узкая спектральная область 1530–1610 нм.

оптических систем связи, в первую очередь, волоконных лазеров и сверхширокополосных усилителей для указанной спектральной области. Иными словами, разработка волоконно-оптических систем связи нового поколения со скоростью передачи информации 50-100 Тбит/с потребует проведения обширных фундаментальных исследований.

### ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ

Без преувеличения можно сказать, что появление волоконных лазеров ознаменовало прорыв в лазерной физике [9]. Иллюстрацией сказанного служат разработка и применение мощных непрерывных итербиевых волоконных лазеров с длиной волны генерации 1 мкм. Буквально за несколько лет выходная мощность этих лазеров была



**Рис. 3.** Рост максимальной выходной мощности непрерывных волоконных лазеров за последние 10 лет

увеличена с нескольких сотен ватт до нескольких десятков киловатт (рис. 3).

Киловаттные непрерывные волоконные лазеры характеризуются большой эффективностью (до 30% - от розетки и до 70-80% при оптической накачке), компактностью, надёжностью, высоким качеством пучка. Большое отношение поверхности к объёму активного волоконного световода сильно упрощает систему охлаждения мощных волоконных лазеров. Поражают воображение реализованные и потенциальные применения мощных волоконных лазеров. В настоящее время они используются для обработки материалов (резка металлических и пластиковых листов, сварка, сверление и т.д.) в автомобильной, авиакосмической и других отраслях промышленности. До недавнего времени при обработке материалов в основном применялись мощные  $\text{CO}_2$ -лазеры, однако они громоздки, не имеют волоконного выхода, не обладают высокой эффективностью и качеством пучка, то есть по этим параметрам уступают волоконным лазерам. Кроме того, на волне излучения  $\text{CO}_2$ -лазера (10.6 мкм) металлы являются хорошим зеркалом, что снижает эффективность их обработки. Коэффициент отражения от металлов падает по мере того, как укорачивается длина волны. И с этой точки зрения более предпочтительны итербиевые волоконные лазеры, генерирующие на волне длиной 1 мкм. Ожидается, что по мере дальнейшего совершенствования элементной базы и снижения стоимости лазерных диодов, используемых в качестве источников накачки, волоконные лазеры будут вытеснять  $\text{CO}_2$ -лазеры из сферы обработки материалов.

Компактность волоконных лазеров открывает возможности их применения на подвижных объектах - автомобилях, кораблях, искусственных спутниках Земли. В частности, 2-киловаттные итербиевые волоконные лазеры, перевозимые на автомобиле, использовались американцами для подрыва противотанковых и противопехотных мин в Афганистане в 2003 г. [10].

Помимо итербиевых волоконных лазеров, разработаны эффективные волоконные лазеры на основе других редкоземельных элементов - неодима, европия, гольмия и тулия, генерирующие в ближней инфракрасной области спектра. Спектральные области лазерной генерации существующих эффективных редкоземельных волоконных лазеров не перекрывают спектрального диапазона 1150-1500 нм (рис. 4), перспективного, в частности, для будущих волоконно-оптических систем связи (см. рис. 2).

В Научном центре волоконной оптики РАН впервые в мире разработаны волоконные световоды на основе стекол, легированных висмутом

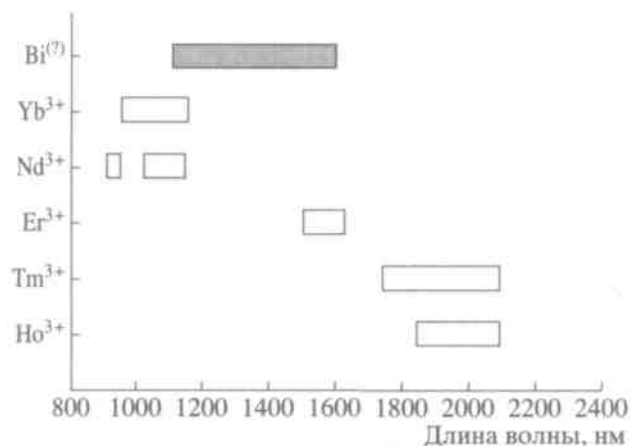


Рис. 4. Спектральные области генерации волоконных лазеров на редкоземельных элементах и потенциальная область генерации висмутового волоконного лазера

[11]. Спектральная область люминесценции висмута в стеклах различного состава имеет ширину более 400 нм (см. рис. 4). Реализованы первые висмутовые волоконные лазеры на основе алюмосиликатного стекла, генерирующие в спектральной области 1150-1215 нм [12]. В непрерывном режиме работы висмутового лазера получена выходная мощность 15 Вт на волне 1160 нм [13].

Если удастся реализовать висмутовые волоконные лазеры на основе стекол различного состава и получить генерацию в диапазоне 1150-1500 нм, то эти лазеры найдут широкое применение в волоконно-оптической связи, медицине, спектроскопии. Заманчивым является создание сверхширокополосных волоконных усилителей с полосой усиления более 100 нм. Вторая гармоника уже разработанных висмутовых лазеров с длиной волны генерации в области 1160-1180 нм перспективна в медицине - офтальмологии и дерматологии (580 нм), и в астрономии в качестве "искусственной лазерной звезды" (589 нм) [14].

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ РАСПРЕДЕЛЁННЫЕ СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ

Волоконная оптика позволяет создавать эффективные распределённые сенсорные системы для контроля за состоянием различных объектов - зданий, мостов, дамб, корпусов кораблей и самолётов, газовых и нефтяных трубопроводов и др. Подобно нервной системе человека, волоконные распределённые сенсорные системы реагируют на различные внешние воздействия и могут осуществлять контроль за температурой объекта, давлением, деформацией и т.д. Для этого они должны быть тем или иным способом вмонтированы в объект. Большая прочность волоконного световода на основе кварцевого стекла (до 5-6 ГПа), высокая температура размягчения кварцевого стекла ( $\sim 2000^\circ\text{C}$ ), возможность нанесения на волоконный световод различных покрытий, в том числе высокотемпературных (полимеры, углерод, различные металлы), позволяют вмонтировать его в объект без особых проблем.

Несколько физических механизмов способствуют созданию волоконных датчиков, в том числе и распределённых. Простейшим из них является использование волоконной брэгговской решётки, представляющей собой отрезок волоконного световода с периодическим изменением показателя преломления его сердцевины. Период решётки примерно равен длине волны излучения ( $\sim 1$  мкм для большинства используемых в настоящее время брэгговских решёток).

Технология изготовления волоконных брэгговских решёток в настоящее время хорошо отработана, изменение показателя преломления в сердцевине волоконного световода осуществляется, как правило, в специальных (фоточувствительных) волоконных световодах при облучении ультрафиолетовым излучением с длиной волн 244 или 193 нм [15]. Рассмотрим принцип работы датчика температуры и (или) деформаций на основе брэгговской решётки (рис. 5). В волоконный световод с записанной в нём брэгговской решёткой вводится излучение, имеющее достаточно широкую спектральную полосу, и измеряется длина

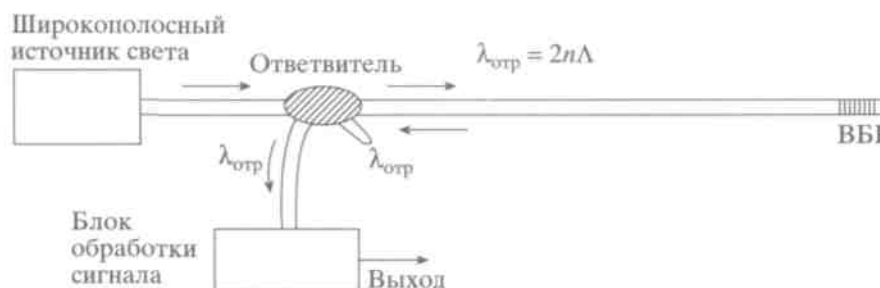


Рис. 5. Принцип работы датчика деформаций и (или) температуры на основе волоконных брэгговских решёток (ВБР)  
Чувствительность: 0.1–1000 микрострейн

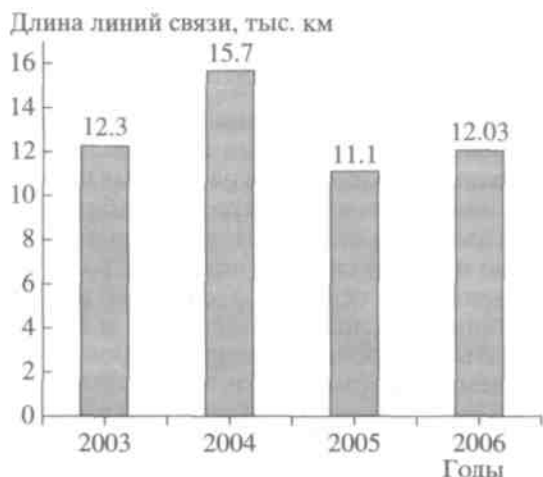


Рис. 6. Ввод магистральных и внутризоновых волоконных линий связи в России компанией ОАО "Связь-инвест" в 2003–2006 гг.

волны отражённого от брэгговской решётки излучения  $\lambda_{отр} = 2n\Lambda$ , где  $n$  - показатель преломления сердцевины,  $\Lambda$  - период брэгговской решётки. Если температура световода изменяется, то изменяются период брэгговской решётки за счёт температурного расширения материала и длина волны отражённого света. Измеряя изменение  $\lambda_{отр}$ , можно вычислить изменение температуры. Таким же путём определяется деформация волоконного световода, изменяющая период брэгговской решётки. Точность измерения температуры и деформаций с помощью датчика на основе волоконных брэгговских решёток составляет 0.1–1.0°C и 0.1–1000 микрострейн соответственно (1 микрострейн соответствует сдвигу длины волны излучения  $10^{-12}$  м).

Если теперь в качестве датчика используется смонтированный в объект волоконный световод с распределёнными по его длине брэгговскими решётками, то можно измерить распределение по объекту температуры (деформации). Однако волоконный световод с записанными в нём дискретными брэгговскими решётками не позволяет измерять непрерывное изменение параметров объекта. В этом случае на помощь приходит другой физический механизм - бриллюэновское рассеяние света в волоконном световоде. Подробный обзор распределённых волоконных датчиков можно найти в научной литературе (см., например, [16]).

Теперь несколько слов о волоконной оптике в России. В нашей стране отсутствует промышленное производство двух важнейших элементов, которые используются практически во всех волоконно-оптических системах, - волоконных световодов и лазерных диодов. Данное обстоятельство сильно ограничивает разработку волоконно-оптических систем различного назначения и внедрение этой современной и стратегически важной техники в различные отрасли промышленности, в том числе в оборонную. По темпам ввода маги-

стральных и внутризоновых волоконно-оптических систем связи в 2003–2006 гг. (рис. 6) Россия существенно отстает от США.

В то время как в развитых странах при государственной поддержке создаются разветвленная и широкополосная волоконная информационная инфраструктура, волоконные распределённые сенсорные системы, обеспечивающие контроль за состоянием важнейших объектов, разрабатывается новое поколение лазерных систем - эффективные волоконные лазеры, высокопоставленные чиновники в российском правительстве продолжают размышлять, нужно ли развивать в нашей стране волоконную оптику. У меня нет сомнений, что сегодняшний недопустимо низкий для России уровень волоконно-оптической техники угрожает её национальной безопасности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Keck D.B. Through a Glass Brightly (plenary presentation) // Optical Fiber Commun. Conference, 2005.
2. Дианов ЕМ., Фурса Д.Г., Абрамов А.А. и др. Волоконно-оптический ВКР усилитель сигналов на волне 1.3 мкм // Квантовая электроника. 1994. Т. 21. С. 807. *Idem.* Low-loss high germania-doped fiber: a promising gain medium for 1.3 um Raman amplifier // Europ. Conference on Optical Commun., Proc. 1994. V. 1. P. 427.
3. Grubb S., Erdogan T., Mizrahi V. et al. 1.3 um cascaded Raman amplifier in germanosilicate fibers // Proc. Top. Meet. Opt. Amplifiers. Appl, Breckenridge. 1994. PD3-1. P. 187.
4. [WWW.telegeography.com](http://WWW.telegeography.com)
5. Tauber H. Why a competitive Europe needs FTTH? (plenary presentation) // Europ. Conference on Optical Commun., 2006.
6. KMI Research (1997–2007). 2002.
7. Desurville E. Optical Communication in 2025 // Europ. Conference on Optical Commun., Proc. 2005. V. 1. P. 5.
8. Дианов ЕМ. На пороге Тера-эры // Квантовая электроника. 2000. Т. 30. С. 659.
9. Дианов ЕМ. Волоконные лазеры // Успехи физических наук. 2004. Т. 174. С. 1139.
10. Directed Energy Weapons Conference, London, Jan., 17–18, 2005.
11. Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Dianov E.M. et al. Absorption, Fluorescence and Optical Amplification in MCVD Bismuth-Doped Silica Glass Optical Fibres // Europ. Conference on Optical Commun., Proc. 2005. V. 4. P. 949.
12. Дианов ЕМ., Двойрин В.В., Машинский В.М. и др. Непрерывный висмутовый волоконный лазер // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. С. 1083.
13. Dianov E.M., Shubin A.V., Melkumov M.A. et al. High-power cw bismuth fiber laser: first results and prospects // Optical Fiber Commun. Conference, paper OMF3, 2007.
14. Max C.E., Oliver S.S., Friedman H.W. et al. Image improvement from a sodium-layer laser guide star adaptive optics system // Science. 1977. V. 277. P. 1649.
15. Васильев С.А., Медведков О.И., Королёв И.Г. и др. Волоконные решётки показателя преломления и их применения // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. С. 1085.
16. Thevenaz L., Nikles M., Fellay A. et al. Truly distributed strain and temperature sensing using embedded optical fibers. Proc. SPIE, 1998. V. 3330. P. 301.