

Волоконная оптика: сорок лет спустя

Е.М.Дианов

Дан краткий обзор развития современной волоконной оптики, прежде всего ее основных применений: волоконно-оптической связи, волоконных лазеров и волоконных датчиков различных физических полей. Обсуждаются перспективы развития волоконной оптики и состояние дел в России в этой области.

Ключевые слова: волоконный световод, волоконно-оптическая связь, волоконные датчики, волоконная оптика.

1. Введение

Волоконная оптика возникла в 50-х годах прошлого века как раздел оптики, изучающий свойства и применения стеклянных волоконных световодов. Поглощение света в световодах было высоким (~ 1000 дБ/км и более), и поэтому свет ослаблялся практически вдвое на длине световода ~ 1 м. Применение таких волоконных световодов было очень ограниченным, волоконная оптика развивалась вяло.

Появление лазеров в начале 1960-х годов вызвало интенсивные исследования возможности передачи информации с помощью лазерного излучения через свободную атмосферу. Однако уже первые эксперименты показали, что она не является подходящей средой для передачи оптической информации на большие расстояния.

В 1966 г. Као и Хокхэм рассмотрели возможность использования стеклянных волоконных световодов в качестве передающей среды в системах оптической связи с точки зрения достижения достаточно низких оптических потерь и высокой информационной емкости [1]. Их теоретические и экспериментальные исследования показали, что высокие оптические потери в стекле обусловлены большим содержанием примесей и что при улучшении технологии можно получить в таких световодах оптические потери значительно ниже 20 дБ/км. При этом волоконные световоды имеют более высокую информационную емкость по сравнению с радиосистемами и системами, использующими коаксиальные кабели*. Результаты этой работы стимулировали интенсивные исследования по созданию стекол и стеклянных волоконных световодов с низкими оптическими потерями. В 1970 г. фирмой Корнинг Гласс была разработана технология изготовления волоконных световодов на основе кварцевого стекла с потерями 20 дБ/км на длине волны 633 нм [2], что открывало реальную возможность создания систем оптической связи.

* За эти работы Чарльзу Као в 2009 г. присуждена Нобелевская премия по физике.

Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: dianov@fo.gpi.ru

Поступила в редакцию 8 декабря 2009 г.

Благодаря этому достижению волоконная оптика превратилась в одно из наиболее быстро развивающихся направлений современной науки и техники, сильно востребованное современным обществом, и начался новый отсчет в ее развитии. С начала 1970-х годов во многих странах мира, в том числе и в СССР [3], развернулись работы по технологии изготовления волоконных световодов с низкими оптическими потерями, а также по исследованию оптических, механических, дисперсионных и других свойств световодов. Движущей силой в проведении широких исследований по волоконной оптике стала возможность создания волоконно-оптических систем связи со скоростью передачи информации на несколько порядков более высокой, чем в системах радиосвязи.

В результате было разработано семейство волоконных световодов, включая многомодовые ступенчатые и градиентные, одномодовые, световоды со смещенной нулевой дисперсией групповых скоростей в область вблизи 1.5 мкм и с изменяющейся по длине дисперсией, а также ряд других. Оптические потери в световодах были снижены до предельно возможного значения менее 1 дБ/км в спектральном диапазоне 1–1.7 мкм, а прочность волоконных световодов превысила прочность стальной проволоки того же диаметра. В 1980 г. были введены в эксплуатацию первые коммерческие волоконно-оптические системы связи, работающие в спектральном диапазоне 0.8–0.9 мкм и передающие информацию со скоростью 45 Мбит/с.

В волоконно-оптических системах связи следующего поколения использовалось лазерное излучение с длиной волны 1.31 мкм, которая попадала в область близкой к нулю дисперсии световодов на основе кварцевого стекла. Это позволяло передавать информацию со скоростью 500 Мбит/с. В современных волоконно-оптических системах связи, как правило, используется спектральная область вблизи длины волны 1.55 мкм, где оптические потери имеют абсолютный минимум (~ 0.16 дБ/км).

В 1988 г. была проложена подводная трансатлантическая система волоконно-оптической связи между Европой и Америкой. Успешная прокладка и последующая работа продемонстрировали надежность всех элементов и системы в целом.

Помимо исследований, непосредственно связанных с созданием волоконно-оптических систем связи, во мно-

гих научных центрах мира проводились широкие фундаментальные исследования стеклянных волоконных световодов как очень интересного физического объекта. Действительно, изменяя состав сердцевины и профиль показателя преломления, можно менять в достаточно широких пределах спектр пропускания, нелинейность, дисперсию и другие параметры волоконных световодов. Их низкие оптические потери и малый размер сердцевины позволяют наблюдать и изучать явления, возникающие на больших длинах взаимодействия лазерного излучения высокой интенсивности с материалом сердцевины. Эти уникальные свойства стеклянных волоконных световодов привели к возникновению и быстрому развитию нового направления лазерной физики и оптики – нелинейной волоконной оптики. Формат данной статьи не позволяет подробно описать исключительно интересные как фундаментальные, так и прикладные результаты, полученные в этой области, их можно найти в ряде обзорных работ по нелинейной волоконной оптике (см. напр., [4–6]).

В данной статье я остановлюсь на главных применениях волоконной оптики и основных результатах, полученных к настоящему времени, а также на перспективах развития волоконной оптики.

2. Основные применения волоконных световодов

Основными применениями волоконных световодов являются:

- волоконно-оптическая связь;
- волоконные лазеры;
- волоконные датчики.

Кроме того, волоконные световоды широко используются для подвода лазерного излучения к различным объектам, в частности при обработке материалов, в медицине, а также в биологических, физических, химических и других экспериментах.

2.1. Волоконно-оптическая связь

Волоконно-оптическая связь была главной движущей силой при создании стеклянных волоконных световодов с низкими оптическими потерями α в ближней ИК обла-

сти спектра ($\alpha \leq 0.3$ дБ/км в диапазоне длин волн 1.35–1.75 мкм, $\alpha_{\min} \leq 0.2$ дБ/км на $\lambda = 1.55$ мкм).

С 1980 г., когда были введены в эксплуатацию коммерческие волоконно-оптические системы связи, сменилось пять поколений этих систем. В настоящее время скорость передачи информации по одному волоконному световоду в коммерческих системах связи, в том числе в транс-океанских подводных системах, составляет 1–2 Тбит/с. В экспериментальных системах достигнута скорость передачи информации 25 Тбит/с. Используется спектральное уплотнение каналов с передачей по одному волоконному световоду порядка 100 каналов с различающимися длинами волн несущего излучения, причем скорость передачи информации в одном канале равна 10 Гбит/с. Полная спектральная область для передачи информации в таких системах составляет около 80 нм (1.53–1.61 мкм), что определяется полосой усиления эрбиевого волоконного усилителя.

Все континенты связаны подводными волоконно-оптическими кабелями связи, общая длина которых составляет 600 000 км (достаточно, чтобы обмотать земной шар 15 раз) (рис.1). Суммарная длина волоконных световодов в наземных сетях волоконно-оптической связи равна 10^9 км. Ожидается, что к 2015 г. эта цифра удвоится. В настоящее время мировое производство волоконных световодов превышает ~ 100 млн. км в год.

За последние несколько лет возникло и бурно развивается новое направление волоконно-оптических систем связи – обеспечение широкополосного (до 10 Гбит/с) доступа населения к источникам информации (к Интернету). В ряде стран интенсивно выполняется программа «Волоконный световод в каждый дом» (Fiber To The Home (FTTH)).

Динамика роста числа домов (семей), охваченных этой программой, показана на рис.2. Лидирует Япония, где к 2008 г. световод пришел в 15 млн. домов. Эта программа успешно реализуется в США и Южной Корее, а в последнее время и в Китае. Европейские страны заметно отстают, что сильно беспокоит Евросоюз, поскольку эта программа имеет большое социальное значение. Массовое подключение к Интернету означает обеспечение населения дополнительными социальными услугами, вклю-

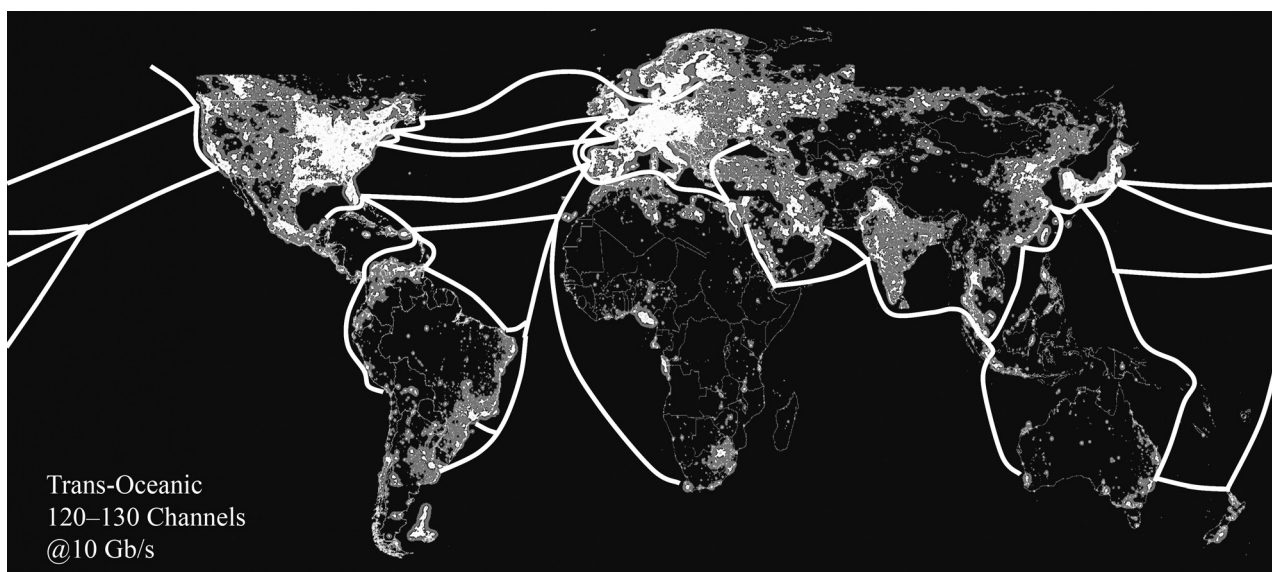


Рис.1. Трансокеанские линии волоконно-оптической связи (R.C. Alferness. «Optical Communications – A View to the Future» (Europ. Conf. Opt. Commun., Brussels, 2008)).

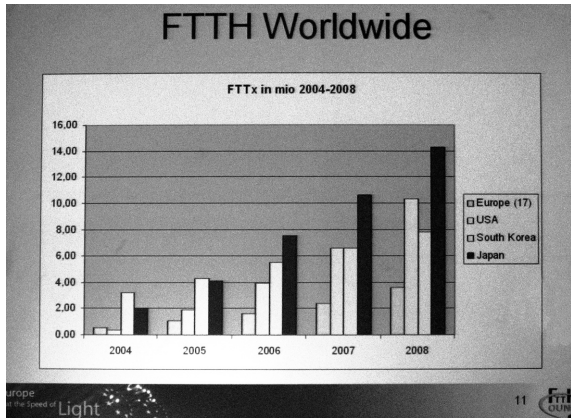


Рис.2. Динамика роста числа домов (семей) (в миллионах), охваченных волоконно-оптической связью, в 2004 – 2008 гг. (Н. Tauber. «Why a Competitive Europe needs FTTH?» (Europ. Conf. Opt. Commun., Cannes, 2006)).

чая телеобразование, телемедицину, телеработу и ряд других. В настоящее время Интернетом пользуется 1 миллиард человек, и ожидается, что к 2015 г. это число возрастет до ~5 миллиардов (при численности населения Земли около 7 миллиардов).

2.2. Волоконные лазеры

Первый волоконный лазер и его потенциальные преимущества были продемонстрированы еще в 1961 г. Снитцером [7]. Однако в то время отсутствовали лазерные диоды, высококачественные волоконные световоды, другие волоконные элементы, в частности брэгговские волоконные решетки показателя преломления, которые ныне используются для создания эффективных волоконных лазеров. Поэтому тогда блестящая идея Снитцера не получила развития. Однако бурное развитие волоконно-оптической связи с начала 1980-х годов, достигшее вершины в конце прошлого столетия, привело к разработке всей необходимой для создания эффективных волоконных лазеров элементной базы. Их развитию способствовал и заметный спад в разработке волоконно-оптических систем связи в начале этого века.

На рис.3 показана схема непрерывного волоконного лазера. До 2005 г. в качестве активной среды в таких лазерах использовались волоконные световоды, легированные только редкоземельными элементами (Nd, Yb, Er, Ho, Tm, Pr), однако в 2005 г. были созданы новые активные среды – легированные висмутом стеклянные волоконные световоды [8]. Зеркалами резонатора лазера служат волоконные брэгговские решетки (ВБР), записанные в сердцевине световода и не требующие юстировки. Источником накачки является высокояркий и долгоживущий лазерный диод (ЛД) с волоконным выходом. Таким образом, волоконный лазер представляет собой монолитную и компактную структуру, надежную и простую в эксплуатации.

Следует отметить высокий (более 30%) КПД (от розетки) волоконных Yb-лазеров, при этом их эффек-



Рис.3. Схема непрерывного волоконного лазера.



Рис.4. Волоконный лазер фирмы IPG (YLR-20000) мощностью 20 кВт.

тивность по отношению к излучению накачки достигает 70% – 80%, а использование одномодового активного световода обеспечивает высокое качество выходного пучка. Важными для ряда применений являются малые размеры и вес волоконных лазеров. Так, объем непрерывного волоконного лазера мощностью 20 кВт равен объему двух небольших холодильников (рис.4).

Указанные преимущества волоконных лазеров обеспечили их быстрое развитие в последние годы. Объем рынка волоконных лазеров составлял в 2007 г. 240 млн. долларов США, и к 2011 г. ожидается его удвоение. Особенно большие успехи достигнуты в создании мощных непрерывных волоконных Yb-лазеров, широко применяемых при обработке материалов (сварка, резка, сверление). По сравнению с мощными CO₂-лазерами, которые традиционно используются для этой цели, волоконные лазеры обеспечивают лучшее качество и большую скорость обработки материалов (при той же мощности). Лидером в разработке и создании мощных волоконных лазеров является компания IPG Photonics [9]. Динамика роста мощности непрерывных волоконных лазеров показана на рис.5.

Большой интерес проявляется в последние годы к фемтосекундным волоконным лазерам, которые, в отли-

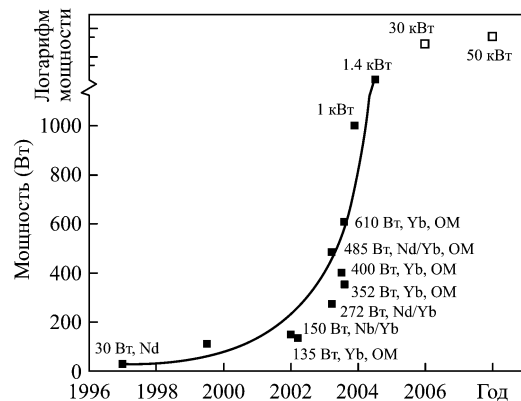


Рис.5. Рост максимальной выходной мощности непрерывных волоконных лазеров за последнее десятилетие; OM – одномодовый режим.

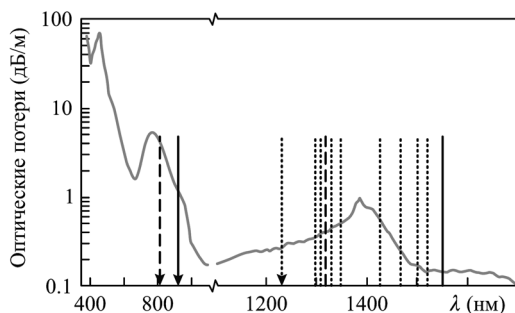


Рис.6. Длины волн генерации, полученные на легированных висмутом фосфоргерманосиликатных волоконных световодах, при различных длинах волн накачки, а также спектр оптических потерь в таких световодах (сплошная серая кривая). Стрелками обозначены длины волн накачки, вертикальными линиями — длины волн генерации. Соответствующие друг другу длины волн накачки и генерации обозначены линиями одного типа (сплошными, штриховыми и пунктирными).

чие от объемных аналогов (например, Ti-сапфирового лазера), более компактны и дешевле. Это позволяет широко использовать их в медицине, для проведения биологических и физических исследований, для создания высокоточных лазерных часов. Волоконный лазер, генерирующий импульсы длительностью около 50 фс, помещается на ладони. Для микрообработки прозрачных и непрозрачных материалов (металлы и полупроводники) требуются фемтосекундные импульсы с энергией до 1 мкДж и частотой следования около 1 МГц. В настоящее время созданы фемтосекундные волоконные лазеры, генерирующие импульсы длительностью ~ 500 фс с энергией в импульсе ~ 0.1 мДж [10].

Широкое использование лазеров в медицине, в различных областях современной техники, для проведения разнообразных исследований требует генерации лазерного излучения с новыми длинами волн, которые могут быть получены либо за счет преобразования частоты излучения существующих лазеров, либо путем создания новых активных сред. Волоконные световоды с низкими потерями и различными составами сердцевин позволяют эффективно преобразовывать частоту лазерного излучения с помощью ВКР. Так, высоконелинейные волоконные световоды из фосфоросиликатных и германосиликатных стекол с низкими оптическими потерями стали основой семейства эффективных ВКР (рамановских) волоконных лазеров, генерирующих в области 1.1–2.2 мкм при их накачке волоконным Yb-лазером ($\lambda_p = 1.06$ мкм) [11, 12].

Легированные висмутом стекла люминесцируют в широкой спектральной области (1.1–1.6 мкм), что открывает возможность создания эффективных волоконных лазеров на эту область. В 2005 г. был впервые представлен висмутовый лазер в области длин волн 1.15–1.215 мкм [8], а затем продемонстрирована лазерная генерация во всем спектральном диапазоне 1.15–1.55 мкм (см., напр., [13–15]) (рис.6). Данные лазеры могут найти широкое применение при создании нового поколения волоконно-оптических систем связи, а излучение второй гармоники этих лазеров может быть использовано в медицине [16, 17], астрофизике [18].

2.3. Волоконные датчики

В настоящее время разработаны и широко используются волоконные датчики температуры, давления, деформаций, химических веществ, волоконные гироскопы



Рис.7. Волоконно-оптические «нервные» системы (К. Notate. *Laser & Electrooptics Society Newsletter*, 20, 5 (2006)).

и ряд других. Основными преимуществами волоконных датчиков являются невосприимчивость к электромагнитным помехам, сочетаемость с волоконно-оптическими системами передачи и обработки информации, компактность, хорошо разработанная элементная база [19].

В последние годы большое внимание уделяется разработке распределенных волоконных датчиков, прежде всего датчиков температуры, давления и деформаций, которые позволяют контролировать состояние таких объектов, как здания, мосты, плотины, корпуса кораблей и самолетов и др. (рис.7).

Такие распределенные волоконные датчики часто называют в литературе волоконно-оптическими «нервными» системами (по аналогии с нервной системой человека).

3. Перспективы развития волоконной оптики

Рамки настоящей статьи не позволяют представить подробный анализ перспектив развития этого быстро развивающегося и востребованного современным обществом научно-технического направления. Поэтому я ограничусь перспективами создания нового поколения волоконных световодов и важнейших волоконно-оптических систем (прежде всего систем связи и передачи информации и волоконных лазеров), которые широко обсуждаются в литературе. Необходимость создания нового поколения волоконных световодов диктуется, в первую очередь, потребностью современного общества в более совершенных волоконно-оптических системах, которые могут быть разработаны только с использованием новой элементной базы.

Как следует из докладов и обсуждений на Европейской конференции по оптической связи (ЕСОС'08, Брюссель, сентябрь 2008), экономика, инфраструктура государственного управления, образование, безопасность требуют создания нового поколения волоконно-оптических систем связи со скоростью передачи информации по одному волоконному световоду 50–100 Тбит/с. Другое требование к системам — меньшее потребление энергии и более низкая стоимость.

В системах связи и передачи информации со спектральным уплотнением каналов полная скорость передачи информации по одному волоконному световоду

$$B \text{ (бит/с)} = n b \text{ (бит/с)},$$

где n – число спектральных каналов, вводимых в один волоконный световод; b – скорость передачи информации в одном канале.

Первая задача – передача информации со скоростью 50–100 Тбит/с по одному волоконному световоду – может быть решена одновременным увеличением n и b . В настоящее время чаще всего $b = 10$ Гбит/с, но еще в 2008 г. продемонстрированы коммерческие системы с $b = 40$ Гбит/с и начаты работы по созданию систем с $b = 100$ Гбит/с. По оценкам, предельная скорость передачи информации по одному волоконному световоду на расстояние 2000 км составляет ~ 500 Тбит/с [20].

Увеличение числа спектральных каналов в одном волоконном световоде неизбежно приведет к расширению спектральной области передачи информации. В настоящее время, в основном, используется спектральная область 1530–1610 нм, определяемая полосой усиления волоконного Er-усилителя. По мнению специалистов, будущие волоконно-оптические системы связи будут использовать всю спектральную область 1300–1610 нм. Это, в свою очередь, потребует разработки эффективных волоконных лазеров и широкополосных волоконных усилителей, которые для спектральной области 1300–1500 нм пока отсутствуют. Недавно разработанные висмутовые волоконные лазеры и усилители [21] могут заполнить эту нишу, однако необходимы дальнейшие исследования с целью повышения эффективности висмутовых волоконных лазеров и создания широкополосных волоконных усилителей для этой спектральной области.

Другим следствием увеличения числа каналов в одном волоконном световоде является существенный рост мощности сигналов в сердцевине одномодового световода, что может привести к перекрестным помехам из-за нелинейного взаимодействия оптических сигналов. В связи с этим потребуются создание нового поколения передающих волоконных световодов либо с большим диаметром сердцевины (поля моды) одномодового световода (что не просто), либо с материалом сердцевины с меньшей нелинейностью (воздух?).

Обсудим теперь другое требование к волоконно-оптическим системам связи и передачи информации – меньшее потребление энергии и более низкая стоимость.

Известно, что в настоящее время Интернет потребляет больше энергии, чем вся авиация в мире. Эта энергия идет на преобразования в волоконно-оптических сетях связи оптических сигналов в электронные и обратно в оптические [22]. Решение здесь очевидно, но не простое – полностью оптическая обработка сигналов. Еще одним решением проблемы снижения потребления энергии и стоимости является интеграция оптических и электронных схем на одной кремниевой подложке. Оба подхода подразумевают разработку новой элементной базы, в том числе высоконелинейных волоконных световодов и планарных волноводов, оптических элементов на подложке кремния (лазеров, оптических усилителей, ответвителей, волноводов и др.).

Что касается разработки более мощных волоконных лазеров (непрерывных, фемтосекундных), сохраняющих высокое качество выходного пучка, то здесь тоже требуются активные и пассивные волоконные световоды с большим диаметром сердцевины для снижения влияния нелинейных оптических явлений.

Многие из отмеченных проблем, возникающих при разработке нового поколения различных волоконно-опти-

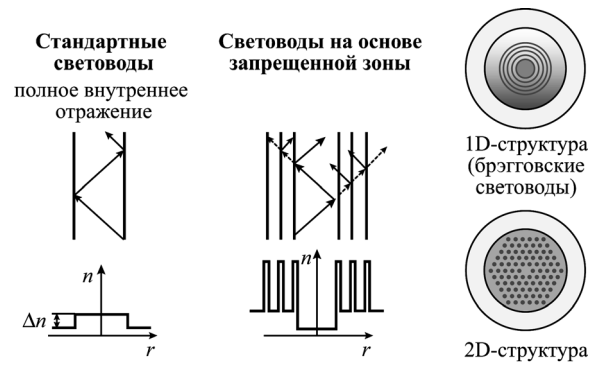


Рис.8. Механизмы распространения света в стандартных волоконных световодах и в световодах на основе фотонных кристаллов.

ческих систем, могут быть решены благодаря использованию волоконных световодов на основе фотонных кристаллов. В световодах этого типа оболочка является фотонным кристаллом, т. е. структурой с поперечным периодическим изменением показателя преломления, приводящим к образованию фотонных запрещенных зон. В спектральных областях, соответствующих таким зонам, свет не может распространяться в оболочке, а распространяется только в сердцевине волоконного световода. На рис.8 представлены механизмы распространения света в обычных световодах (полное внутреннее отражение) и в световодах на основе фотонных кристаллов с одномерной (так называемые брэгговские световоды) и двумерной структурами оболочки. В волоконных световодах на основе фотонных кристаллов показатель преломления сердцевины может быть меньше среднего показателя преломления оболочки, т. е. свет может распространяться по воздушной сердцевине. Волоконные световоды с воздушной сердцевиной представляют большой интерес благодаря возможности достижения более низких оптических потерь и меньшей нелинейности, чем у существующих телекоммуникационных световодов [23]. В настоящее время изготовлены волоконные световоды с воздушной сердцевиной с минимальными оптическими потерями 1.7 дБ/км [24]. Спектр оптических потерь такого световода показан на рис.9. Спектральные области низких оптических потерь соответствуют фотонным запрещенным зонам оболочки. Для выяснения механизмов оптических потерь в таких световодах и их снижения необходимы дальнейшие фундаментальные исследования.

Среди других преимуществ волоконных световодов на основе фотонных кристаллов следует отметить возможность изменения в значительно более широких пределах, чем в обычных световодах, таких важных параметров световода, как дисперсия, нелинейность, размер поля моды.

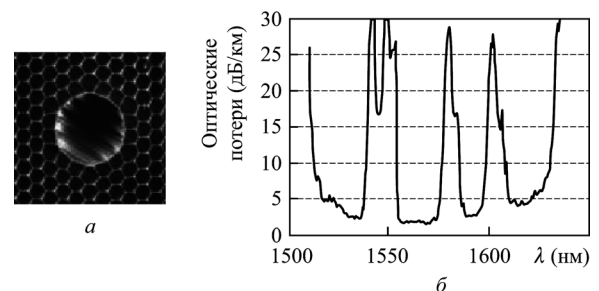


Рис.9. Структура полого волоконного световода (а) и спектр оптических потерь в волоконных световодах с воздушной сердцевиной (б).

Так, например, созданы одномодовые волоконные световоды с площадью сечения сердцевинны 700–1200 мкм² (в обычных световодах она составляет ~100 мкм²).

В настоящее время во многих научных центрах мира проводятся интенсивные исследования по созданию волоконных световодов на основе фотонных кристаллов. Нет сомнения, что уже в недалеком будущем они найдут широкое коммерческое применение.

4. Заключение

Волоконная оптика продолжает быстро развиваться, и главной движущей силой этого развития по-прежнему является потребность в создании еще более высокоскоростных волоконно-оптических систем связи и передачи информации. Человечество уверенно идет к информационному обществу, в котором любой его член может получить любую информацию в любое время и в любом месте.

К сожалению, несмотря на высокий уровень академической науки, Россия пока остается на обочине этого инновационного процесса. Другими словами, ни государство, ни бизнес не проявляют большого интереса к развитию в нашей стране волоконно-оптической техники.

Это подтверждают и скромные затраты на исследования и разработку (R&D) в процентах от внутреннего валового продукта в России по сравнению с некоторыми другими странами [25]:

| | |
|-----------------------|---------------------------|
| 1. Израиль – 4.71 | 9. Тайвань – 2.42 |
| 2. Швеция – 3.86 | 10. Франция – 2.13 |
| 3. Финляндия – 3.51 | 11. Австралия – 1.77 |
| 4. Япония – 3.18 | 12. Великобритания – 1.73 |
| 5. Южная Корея – 2.99 | 13. Китай – 1.34 |
| 6. Швейцария – 2.93 | 14. Россия – 1.07 |
| 7. США – 2.57 | 15. Южная Африка – 0.87 |
| 8. Германия – 2.51 | 16. Аргентина – 0.46 |

В то же время потребность страны в больших потоках информации для экономики, государственного управления, образования, безопасности огромна. И это с неиз-

бежностью приведет к изменению отношения государства и бизнеса к развитию в нашей стране волоконной оптики.

1. Kao K.C., Hockham G.A. *Proc. IEE*, **113**, 1151 (1966).
2. Kapron F.P., Keck D.B., Maurer R.D. *Appl. Phys. Lett.*, **17**, 423 (1970).
3. Dianov E.M. *Intern. Conf. Integr. Optics Optical Fiber Commun.* (Tokyo, 1977).
4. Дианов Е.М., Мамышев П.В., Прохоров А.М. *Квантовая электроника*, **15**, 5 (1988).
5. Stolen R.H. *J. Lightwave Technol.*, **26**, 1021 (2008).
6. Dudley J.M., Taylor J.R. *Nature Photonics*, **3**, 85 (2009).
7. Snitzer E. *Phys. Rev. Lett.*, **7**, 444 (1961).
8. Дианов Е.М., Двойрин В.В., Машинский В.М., Умников А.А., Яшков М.В., Гурьянов А.Н. *Квантовая электроника*, **35**, 1083 (2005).
9. Gapontsev V.P. *SPIE Photonics West Conf.* (San Jose, 2009).
10. Röser F., Schimpf D., Schmidt O., Ortac B., Rademaker K., Limpert J., Tunnermann A. *Opt. Lett.*, **32**, 2230 (2007).
11. Dianov E.M., Prokhorov A.M. *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, **6**, 1022 (2000).
12. Dianov E.M. *Proc. Europ. Conf. Opt. Commun. (ECOC'04)* (Stockholm, 2004, Vol. 3, p. 292).
13. Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Dianov E.M. *IEEE J. Quantum Electron.*, **44**, 834 (2008).
14. Bufetov I.A., Firstov S.V., Khopin V.F., Medvedkov O.I., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **33**, 2227 (2008).
15. Дианов Е.М., Фирстов С.В., Хопин В.Ф., Медведков О.И., Гурьянов А.Н., Буфетов И.А. *Квантовая электроника*, **39**, 299 (2009).
16. Blodi C.F., Russell S.R., Padilo J. S., Folk J.C. *Ophthalmology*, **6**, 791 (1990).
17. Sadick N.S., Weiss R. *J. Dermatol. Surg.*, **28**, 21 (2002).
18. Max C.E. et al. *Science*, **277**, 1649 (1997).
19. Culshaw B. *J. Lightwave Technol.*, **26**, 1064 (2008).
20. Alferness R.C. *Europ. Conf. Opt. Commun.* (Brussels, 2008).
21. Дианов Е.М., Мелькумов М.А., Шубин А.В., Фирстов С.В., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Буфетов И.А. *Квантовая электроника*, **39**, 1099 (2009).
22. Grallert H.-J. *Europ. Conf. Opt. Commun.* (Brussels, 2008).
23. Murao T., Saitoh K., Koshiha M. *J. Lightwave Technol.*, **26**, 1602 (2008).
24. Mangan B.J., Farr L., Langford A., Roberts P.J., Williams D.P., Couny F., Lawman M., Mason M., Coupland S., Flea R., Sabert H., Birks T.A., Knight J.C., Russell P.St.J. *Opt. Fib. Commun. Conf.* (Los Angeles, 2004).
25. Courtland R. *Nature*, **451**, 378 (2008).