

ПРИГЛАШЕННАЯ СТАТЬЯ

Новое поколение волоконных световодов

Е.М.Дианов, С.Л.Семёнов, И.А.Буфетов

Растущая потребность современного общества в информации является движущей силой в развитии волоконной оптики в целом и волоконно-оптической связи в частности. Активно разрабатываются новые типы волоконных световодов и расширяются области их применений. В настоящей статье дан обзор результатов исследований новых типов волоконных световодов: легированных висмутом активных волоконных световодов, многосердцевидных световодов и волоконных световодов с поллой сердцевиной, которые могут служить основой систем, обеспечивающих дальнейший рост скорости передачи оптической информации.

Ключевые слова: волоконно-оптическая связь, висмутовые волоконные световоды и усилители, микроструктурированные световоды, полые волоконные световоды.

1. Введение

История развития человеческого общества – это в определённой степени и история развития средств связи и передачи информации. Чем выше уровень развития общества, тем больше потребность общества в информации, а следовательно, в появлении новых, более современных средств связи [1]. Ярче всего эта закономерность проявляется на примере волоконно-оптической связи. Создание лазеров в 1960 г. и стеклянных волоконных световодов (ВС) с низкими оптическими потерями в 1970 г. привело к разработке волоконно-оптических систем связи; первые коммерческие системы оптической связи были созданы уже в 1980 г. Растущая потребность современного общества в информации потребовала непрерывного развития волоконно-оптической связи, прежде всего за счёт увеличения скорости передачи информации по ВС на основе новых принципов передачи информации и благодаря созданию новой элементной базы систем связи. Волоконно-оптическая связь стала мощным стимулом развития волоконной оптики, в результате чего разрабатываются новые типы ВС с новыми возможностями. Среди важнейших применений ВС следует, прежде всего, отметить волоконные лазеры и усилители, которые являются одними из основных элементов волоконно-оптических систем связи, а также волоконно-оптические датчики. Эти приборы находят широкое применение в различных областях современной техники и в медицине.

Состояние дел в области волоконно-оптической связи в 2010 г. характеризовалось следующими основными показателями.

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

И.А.Буфетов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141707 Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: iabuf@fo.gpi.ru

Поступила в редакцию 2 ноября 2015 г.

– Скорость передачи информации по одному ВС в коммерческих системах связи достигла 10 Тбит/с, а в экспериментальных системах она доходит до 100 Тбит/с.

– В мире к 2010 г. в системах связи использовался 1 млрд километров ВС, к 2015 г. их число удвоилось.

– Потребность развитых стран в информации возрастает на 30%–40% в год, т.е. через 10 лет необходимо будет передавать информацию по ВС с петабитными скоростями.

Однако передавать информацию с такими скоростями по современным одномодовым ВС невозможно из-за двух главных ограничений: оптической нелинейности стеклянных ВС и узкой спектральной полосы передачи информации, определяемой шириной полосы усиления эрбиевого волоконного усилителя [2, 3].

В настоящее время максимальная скорость передачи информации по одному ВС достигнута в системах со спектральным уплотнением каналов, в которых по световоду передаются ~100 независимых каналов с различными длинами волн несущего излучения, лежащими в пределах полосы усиления оптического усилителя. Полная скорость передачи информации $B = nb$, где b – скорость передачи по одному спектральному каналу, а n – число спектральных каналов. Повышение скорости передачи информации может быть достигнуто увеличением как числа каналов, так и скорости передачи информации по каналу до 400 Гбит/с и более. Однако из-за указанных выше физических ограничений повышение полной скорости передачи информации этим путём возможно лишь до уровня ~100 Тбит/с. В связи с этим в последние годы интенсивно исследуются новые типы ВС, использование которых могло бы снять отмеченные ограничения роста скорости передачи информации по одному световоду.

В настоящей статье рассмотрены три типа ВС, исследования которых показали потенциальную возможность их использования для решения указанной проблемы.

1. Активные ВС, легированные висмутом, перспективные для созданных волоконных лазеров и оптических усилителей для спектральных областей 1200–1500 и 1600–1800 нм, в которые не попадают полосы люминесценции эффективных редкоземельных аналогов [4].

2. Многосердцевинные ВС (одномодовые и маломодовые) для волоконно-оптических систем пространственного уплотнения каналов [5].

3. Микроструктурированные полые ВС с низкой нелинейностью и с потенциально меньшими оптическими потерями, чем у световодов на основе кварцевого стекла [6].

2. Легированные висмутом ВС

В современных высокоскоростных волоконно-оптических системах связи для передачи информации используется узкая (1530–1610 нм) спектральная область, определяемая полосой усиления эрбиевого волоконного усилителя. Реально же используется значительно более узкая спектральная область усилителя, равная 36 нм. Однако, как видно из рис.1, спектральная область низких оптических потерь ВС на основе кварцевого стекла значительно шире. Так, ширина спектральной области с оптическими потерями менее 0.4 дБ/км, которая могла бы быть использована для передачи информации, составляет 400 нм (1300–1700 нм).

Однако в настоящее время для спектральных областей 1300–1520 и 1610–1700 нм отсутствуют эффективные волоконные оптические усилители – обязательные элементы высокоскоростных волоконно-оптических систем связи и передачи информации. Наиболее эффективными активными средами для ближней ИК области спектра являются световоды, легированные редкоземельными элементами. К сожалению, их полосы люминесценции не подходят для создания эффективных волоконных оптических усилителей в указанных спектральных областях. В связи с этим существует настоятельная потребность в новых активных оптических материалах, пригодных для создания эффективных волоконных лазеров и оптических усилителей, работающих на этих длинах волн. Попытки разработки таких материалов, легированных ионами переходных металлов, не были успешными.

В 2001 г. было обнаружено, что алюмосиликатное стекло, легированное висмутом, люминесцирует в широкой (1000–1600 нм) области спектра с полосами люминесценции шириной 200–300 нм [7]. Это вызвало большой интерес и привело к появлению ряда работ, посвященных исследованию люминесценции в стеклах различных составов, легированных висмутом. Первый ВС на основе алюмосиликатного стекла, легированный висмутом, был изготовлен одновременно и независимо в 2005 г. в Науч-

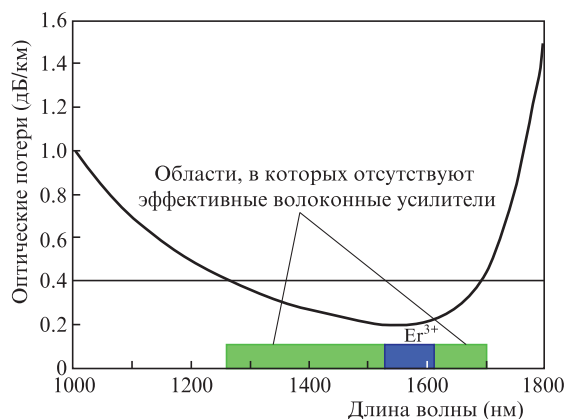


Рис.1. Спектр оптических потерь телекоммуникационных ВС и спектральная область эрбиевого волоконного усилителя.

ном центре волоконной оптики (НЦВО) РАН совместно с Институтом химии высокочистых веществ РАН [8] и в японской компании Sumitomo Electric Industries Ltd [9].

Для изготовления легированного висмутом световода использовалась технология модифицированного химического осаждения из газовой фазы (MCVD), широко применяемая для получения стандартных ВС. Сердцевина этого световода состояла из легированного висмутом и алюминием кварцевого стекла.

В том же году в НЦВО РАН была впервые продемонстрирована лазерная генерация в ВС, легированном висмутом [10]. В последующие годы легированные висмутом алюмосиликатные ВС появились во Франции и Англии; в ряде лабораторий были проведены первые достаточно детальные исследования таких световодов и волоконных лазеров на их основе [11–18].

После успешного изготовления первых легированных висмутом ВС и демонстрации лазерной генерации нашей главной задачей было показать, что эти световоды действительно являются лазерной средой, перспективной для создания волоконных лазеров и усилителей для спектральных диапазонов 1200–1500 и 1600–1800 нм, где отсутствовали эффективные лазеры и оптические усилители на основе редкоземельных элементов. Висмут относится к группе р-элементов, поэтому его оптические свойства (поглощение и люминесценция) сильно зависят от состава стекла (в отличие от редкоземельных элементов). В связи с этим для решения нашей задачи необходимо было разработать легированные висмутом ВС с разными составами стёкол сердцевины. В результате были изготовлены световоды с сердцевинами из $\text{Bi}:\text{SiO}_2$, $\text{Bi}:\text{GeO}_2$, $\text{Bi}:\text{GeO}_2-\text{SiO}_2$, $\text{Bi}:\text{P}_2\text{O}_5-\text{SiO}_2$ и $\text{Bi}:\text{P}_2\text{O}_5-\text{GeO}_2-\text{SiO}_2$, концентрация висмута в которых не превышала 0.02 ат.%. Спектры оптических потерь этих световодов, показанные на рис.2, содержат несколько широких полос поглощения в видимой и ближней ИК областях, удобных для накачки соответствующих висмутовых волоконных лазеров.

Результаты подробных исследований люминесцентных свойств этих ВС, в том числе измерений интенсивности люминесценции в зависимости от длин волн как возбуждения, так и излучения в широком спектральном диапазоне (450–1700 нм), представлены в [19]. Поэтому мы покажем только полосы люминесценции четырёх легиро-

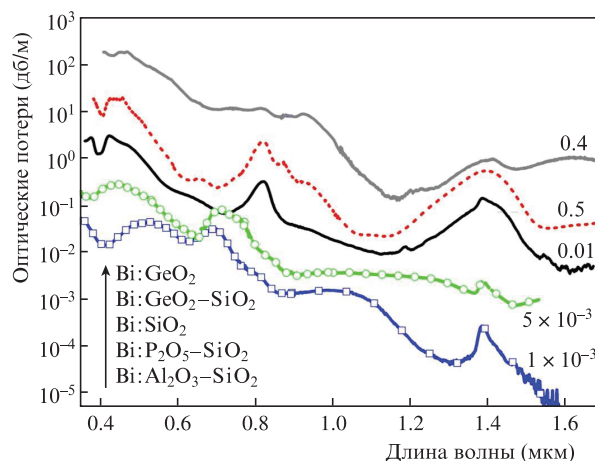


Рис.2. Спектры оптических потерь различных легированных висмутом ВС. Цифры у кривых показывают степень уменьшения поглощения соответствующего спектра (для более удобного их сравнения).

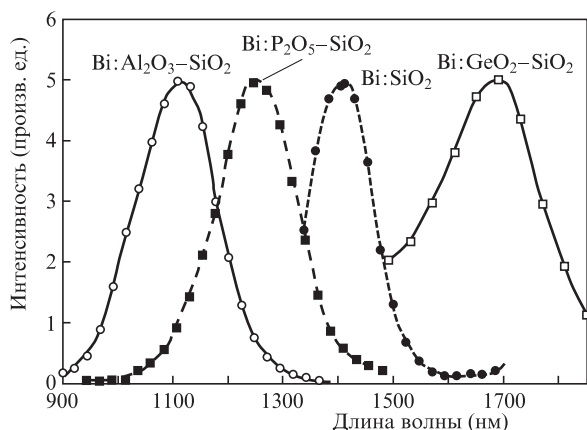


Рис.3. Спектры люминесценции различных легированных висмутом ВС.

ванных висмутом ВС из $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, $\text{P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$, SiO_2 и $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$, наиболее перспективных для изготовления волоконных лазеров (рис.3). Содержание Al_2O_3 в первом световоде и P_2O_5 во втором составляет обычно 2–5 мол.%. В состав сердцевины третьего световода иногда добавляется небольшое количество GeO_2 (2–5 мол.%) для улучшения оптического качества стекла. В четвертом ВС содержание GeO_2 составляет примерно 50 мол.%. Времена жизни люминесценции этих ВС находятся в интервале 500–900 мкс. Сильное перекрытие полос люминесценции предполагает возможность лазерной генерации во всей спектральной области 1000–1800 нм, однако это не совсем так. На рис.4 показаны полосы усиления этих световодов, которые дают более адекватную информацию о возможных областях лазерной генерации.

Спектральные области возможной эффективной генерации соответствующих волоконных лазеров на основе световодов таковы: 1140–1215 нм ($\text{Bi:Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$), 1260–1360 нм ($\text{Bi:P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$), 1390–1540 нм ($\text{Bi:GeO}_2\text{-SiO}_2$, $[\text{GeO}_2] < 5$ мол.%), 1625–1775 нм ($\text{Bi:GeO}_2\text{-SiO}_2$, $[\text{GeO}_2] \approx 50$ мол.%). Из приведенных данных следует, что висмутные волоконные лазеры могут иметь широкую спектральную область лазерной генерации: от 75 нм для алюмосиликатного лазера и до 150 нм для германосиликатных лазеров.

Создание указанных четырех типов легированных висмутом ВС и исследование их спектрально-люминесцентных свойств позволяло решать главную задачу – раз-

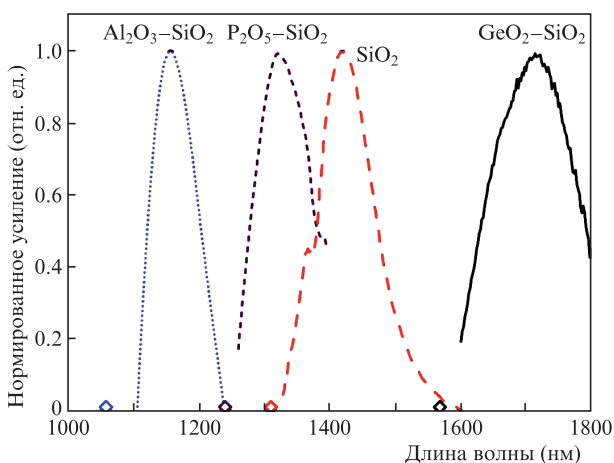


Рис.4. Спектры усиления различных легированных висмутом ВС.

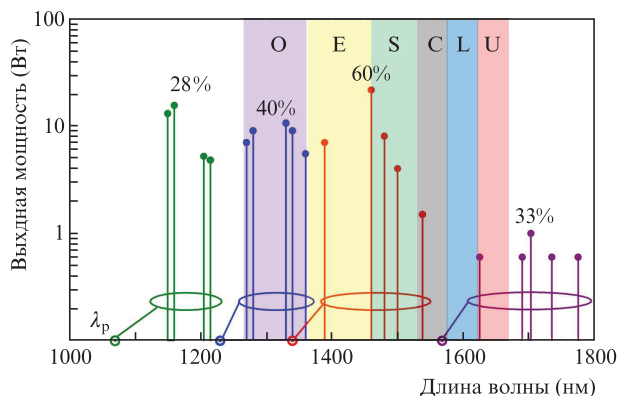


Рис.5. Выходные мощности различных непрерывных висмутовых лазеров, работающих в спектральном диапазоне 1140–1775 нм.

рабатывать соответствующие волоконные лазеры и исследовать их генерационные характеристики в широкой спектральной области (1140–1775 нм).

Детали лазерных экспериментов и полученные результаты подробно описаны в статьях [20–25] и в обзорах [26–28]. Здесь мы приведём лишь суммарные результаты этих исследований (рис.5) – длины волн генерации и максимальные выходные мощности разработанных к настоящему моменту лабораторных конструкций непрерывных висмутовых волоконных лазеров. Точками на горизонтальной оси указаны длины волн накачки λ_p и связанные с ними возбуждаемые длины волн генерации (длины волн генерации мощностью менее 0.5 Вт не показаны). Отмечены также максимальные дифференциальные эффективности лазерной генерации.

Таким образом, разработка легированных висмутом ВС на основе кварцевого стекла и их использование в качестве активной среды позволило создать семейство достаточно эффективных волоконных лазеров, работающих в спектральной области 1140–1775 нм. Важно отметить, что эта спектральная область включает участки спектра 1200–1500 и 1610–1775 нм, в которых не работают эффективные редкоземельные волоконные лазеры. Полученные результаты подтверждают ожидаемую высокую перспективность стеклянных ВС, легированных висмутом, в качестве новой лазерной среды для ближней ИК области спектра.

К сожалению, имеется ряд проблем, которые ещё не удалось решить. Отметим три из них:

- Не вполне ясна природа и структура висмутовых активных центров.

- Эффективная генерация висмутовых волоконных лазеров реализована лишь при очень низких концентрациях висмута (~ 0.01 ат.%).

- Достигнутая эффективность висмутовых волоконных лазеров пока ниже эффективности редкоземельных волоконных лазеров.

Мы полагаем, что дальнейшие фундаментальные исследования позволят решить эти проблемы.

3. Многосердцевинные волоконные световоды

Идея о том, что в ВС может быть не одна, а несколько сердцевины, возникла более 30 лет назад вскоре после появления одномодовых световодов [29, 30]. У таких световодов диаметр световедущей сердцевины оказывается менее 10 мкм, что позволяет даже в стандартной внешней

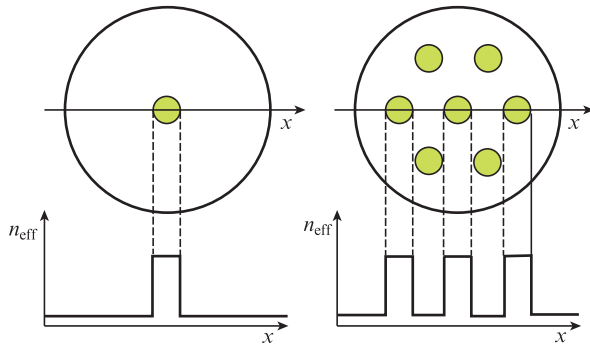


Рис.6. Поперечные сечения и распределения эффективных ПП одномодового односердцевинного (слева) и многосердцевинного (справа) ВС.

стеклянной оболочке диаметром 125 мкм расположить несколько сердцевин (рис.6). У разработанных к тому времени многомодовых световодов диаметр сердцевины составлял 50 мкм и более, что исключало такую возможность.

Долгое время эта идея не получала развития, т.к. основное внимание было сфокусировано на усовершенствовании свойств односердцевинных ВС, на расширении спектрального диапазона и спектральном уплотнении каналов, а также на увеличении скорости передачи информации в каждом спектральном канале. О ней вспомнили применительно к оптической связи, когда в 2009–2010 гг. стали появляться публикации о приближении момента прекращения дальнейшего роста скорости объёма информации, передаваемой по одному световоду [31–33]. По аналогии со спектральным уплотнением каналов (wavelength-division-multiplexing – WDM) появился термин «пространственное уплотнение каналов» (space-division-multiplexing – SDM). Высокую активность в этих исследованиях проявляют мировые лидеры по производству телекоммуникационных световодов и созданию оборудования для линий связи на ВС (OFS, Corning, Alcatel-Lucent, NTT Corporation, NEC Corporation, Fujikura, Sumitomo и др.) и связанные с ними исследовательские лаборатории и центры. В результате за последние пять лет в научной литературе появилось, по меньшей мере, несколько сотен публикаций по теме «многосердцевинные волоконные световоды», посвященных как разнообразным вариантам конструкции таких световодов и созданию их экспериментальных образцов, так и различным аспектам их применения в волоконно-оптических линиях связи и экспериментальному исследованию их реальной работы в макетах линий связи.

В литературе можно найти описания нескольких десятков конкретных конструкций многосердцевинных световодов, отличающихся друг от друга в той или иной степени. Условно их можно разделить на три группы: многосердцевинные одномодовые световоды с несвязанными сердцевинами; многосердцевинные маломодовые световоды; многосердцевинные световоды со связанными сердцевинами. Рассмотрим их свойства более подробно.

Многосердцевинные одномодовые световоды с несвязанными сердцевинами – это именно те «классические» световоды, которые изначально предлагались для пространственного уплотнения каналов. Предполагается, что каждая сердцевина является аналогом стандартного одномодового световода, что позволяет использовать для неё все достижения по скорости передачи информации по одному волокну [34–36]. По этой причине основным требова-

нием является минимизация уровня перекачки сигнала из одной сердцевины в другую (желательно до менее –25 дБ [37]).

Чтобы выполнить это условие для световода с теми же параметрами сердцевины, что и у стандартного телекоммуникационного световода (диаметр поля моды для длины волны 1550 нм составляет ~9 мкм, длина волны отсечки ~1250 нм), нужно обеспечить расстояние между сердцевинами не менее 45 мкм [38]. В результате при самой плотной гексагональной упаковке диаметр получаемого световода должен составлять около 200 или 280 мкм для 7 и 19 сердцевины соответственно (рис.7). Однако существенное увеличение диаметра световода крайне нежелательно с точки зрения механической надёжности при эксплуатации: более толстый световод подвергается большим механическим напряжениям при тех же незначительных случайных изгибах, которые неизбежно возникают в оптических кабелях.

Существуют три способа уменьшения расстояния между сердцевинами при сохранении низкого уровня перекачки сигнала, которые можно использовать в разных комбинациях.

1. Уменьшение диаметра поля моды путём повышения показателя преломления (ПП) сердцевины и соответственного уменьшения ее диаметра [39]. Однако заметное уменьшение диаметра поля моды может приводить к проблемам при сварке таких световодов и при их стыковке с устройствами ввода-вывода, а увеличение ПП приводит к повышенным оптическим потерям. Поэтому этот способ наименее популярен.

2. Создание разности постоянных распространения мод (эффективных ПП) в соседних сердцевинах за счёт небольшого различия в ПП и/или в диаметрах сердцевины (рис.8). Такие световоды называются «гетерогенными» [40], в отличие от «гомогенных» световодов с одинаковыми сердцевинами. Существенная часть световодов из группы одномодовых многосердцевинных световодов относится к «гетерогенным». Сторонники «гомогенных» световодов критикуют их за дополнительные проблемы при сварке и стыковке, т.к. нужно дополнительно следить за положением сердцевины с разными параметрами.

3. Создание между сердцевинами дополнительных барьеров для уменьшения перекачки сигналов из слоев с пониженным (по сравнению с кварцевым стеклом оболочки) ПП (кварцевое стекло, легированное фтором) [41] либо даже из продольных воздушных отверстий [42]. Этот способ добавляет технологических трудностей при

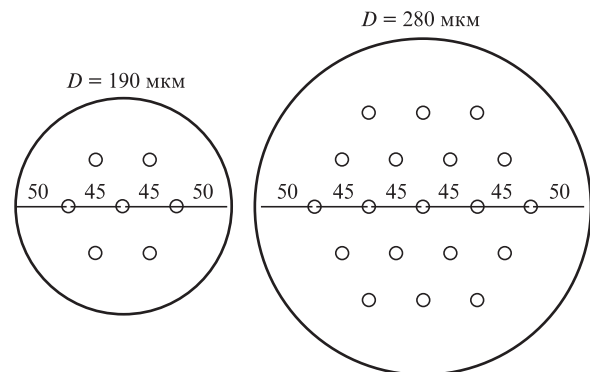


Рис.7. Поперечное сечение многосердцевинного ВС с семью (слева) и с девятнадцатью (справа) сердцевинами (цифры – расстояния между сердцевинами в мкм).

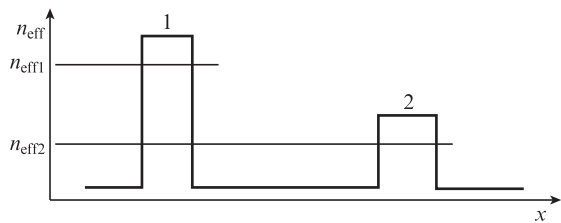


Рис.8. Профили эффективного ПП двух соседних сердцевин (1 и 2) «гетерогенного» многосердцевинного световода.

изготовлении световода, но не создаёт дополнительных проблем при его использовании, поэтому он наиболее привлекателен.

Примером весьма популярной комбинации вышеприведенных способов является 12-сердцевинный «гетерогенный» световод с дополнительными слоями из стекла с пониженным ПП, сердцевинны которого расположены по кольцу (рис.9) [43]. Такая структура минимизирует количество соседей у каждой сердцевинны. В данном случае соседних сердцевин лишь две, поэтому можно использовать сердцевинны только двух типов. На таком световоде была реализована передача со скоростью 1.01 Пбит/с на расстоянии 52 км.

Примером наиболее плотной упаковки сердцевин может служить «гетерогенный» световод, в котором 30 сердцевин четырёх типов удалось разместить в волокне диаметром 230 мкм (рис.10) [44].

При практическом использовании одномодовых многосердцевинных световодов с высокой плотностью упаковки может возникнуть проблема воздействия случайных изгибов по длине световода на величину перекачки сигнала между сердцевиннами [45]. Дело в том, что при изгибе световода его профиль ПП изменяется, что в случае «гетерогенного» световода при определенных диаметрах изгиба может привести к «выравниванию» постоянных распространения соседних сердцевин и, соответственно, к резкому росту перекачки сигнала между ними (рис.11). Наоборот, в «гомогенном» световоде изгиб всегда приводит к различию в постоянных распространения и, следовательно, к уменьшению перекачки.

Избавиться от этого нежелательного эффекта в «гетерогенном» световоде можно, по-видимому, только сле-

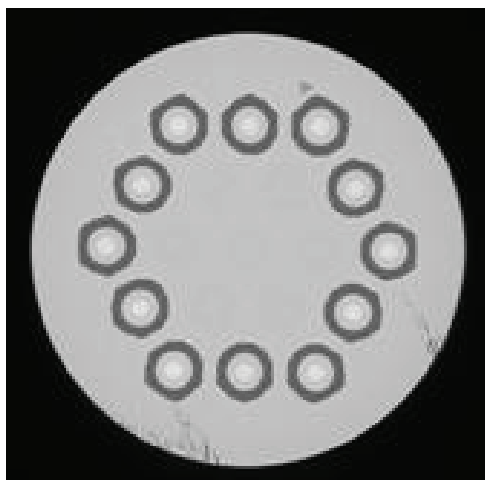


Рис.9. Изображение торца 12-сердцевинного ВС [43]. Светлые пятны – сердцевинны из кварцевого стекла, легированного оксидом германия, темные кольцевые области – кварцевое стекло, легированное фтором.

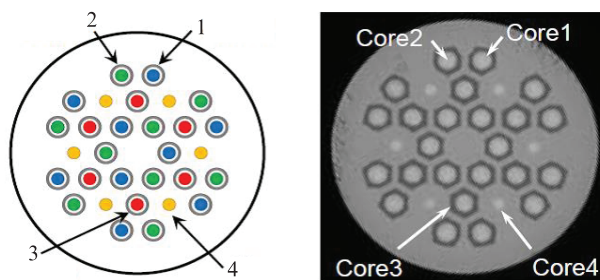


Рис.10. Схема расположения сердцевин разных типов (1–4) и изображение торца 30-сердцевинного световода [44].

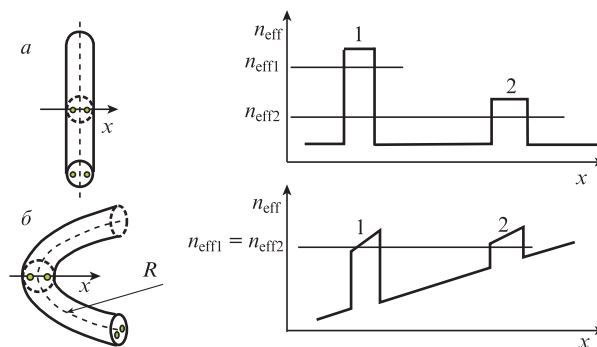


Рис.11. Эквивалентные профили эффективного ПП двухсердцевинного «гетерогенного» прямого (а) и изогнутого (б) световодов.

дует световод прямоугольным и расположив сердцевинны в линию вдоль широкой грани (рис.12) [46]. Такой световод изгибается предпочтительно вдоль оси, параллельной большой грани (рис.12,б), что не изменяет соотношения постоянных распространения сердцевин.

Многосердцевинные маломодовые световоды – это следующий шаг в развитии многосердцевинных световодов. Первоначально поиск возможностей увеличения скорости передачи информации привёл к идее использовать для передачи разные моды многомодового световода [30]. Это в определённом смысле также является вариантом пространственного уплотнения каналов.

Стандартные многомодовые световоды с диаметром сердцевинны 50 мкм и более не очень подходят для этой цели – при большом количестве мод их постоянные распространения слишком близки друг к другу, потому сигналы быстро перемешиваются. По этой причине в основ-

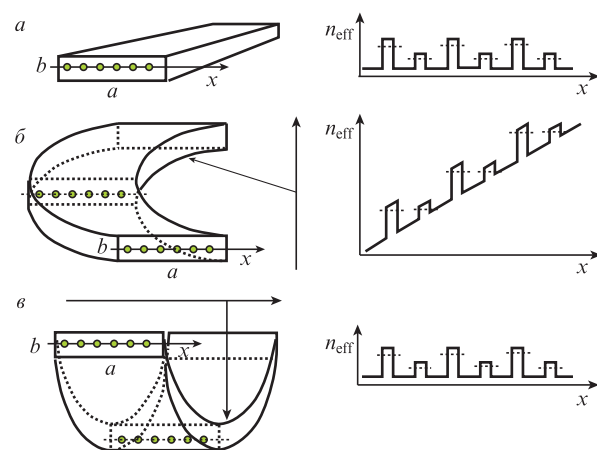


Рис.12. Воздействие изгиба на профиль ПП многосердцевинного световода прямоугольного сечения $a \times b$ [46].

ном используются так называемые маломодовые световоды [47–49], в которых возможно распространение только нескольких мод.

Несмотря на различие в постоянных распространения, из-за пространственного перекрытия сигналы, идущие в разных модах, заметно перемешиваются, однако современные методы (multiple-input multiple-output – ММО), разработанные ранее для когерентных систем передачи данных, позволяют принимать и успешно обрабатывать такую информацию [50]. Проблемой в этом случае является дифференциальная модовая задержка: сигналы, переносимые разными модами сердцевин со ступенчатым профилем ПП, расходятся во времени на одном километре пути более чем на несколько наносекунд, что делает невозможной успешную обработку сигнала на расстояниях более 10 км. Использование градиентного профиля позволяет снизить задержку до уровня ~ 50 пс/км, что позволяет осуществлять передачу на сотни километров [51, 52].

Поскольку диаметр маломодовой сердцевины немногим больше, чем у одномодового световода, становится возможным их использованию в многосердцевинных ВС, хотя и с несколько большими расстояниями между сердцевинами [53–55]. В таких световодах количество каналов передачи информации определяется произведением числа сердцевин на число мод.

Многосердцевинные световоды со связанными сердцевинами. В этом случае, в основном, одномодовые сердцевины специально сближаются для увеличения связи между ними. В результате свет распространяется сразу по всем сердцевинам в виде супермоды с максимумом интенсивности, расположенным на одной либо на нескольких сердцевинах [56–59]. Количество таких мод зависит от структуры световода. В целом картина оказывается схожей со случаем маломодового односердцевинного световода. Диаметр световода при этом можно сделать меньше, чем у других типов многосердцевинных световодов. Публикаций, посвященных этому типу световодов, пока немного.

Разработки в области многосердцевинных световодов продолжают. Последние достижения таковы: получена скорость передачи информации 2.05 Пбит/с при использовании 19-сердцевинного шестимодового световода длиной 9.8 км [60], а также 2.15 Пбит/с при использовании 22-сердцевинного одномодового гомогенного световода длиной 31 км [61].

В целом следует отметить, что многосердцевинные световоды показали свою перспективность и что приближается время их практического использования. Однако этому препятствует отсутствие надежного и дешевого устройства ввода-вывода, а также эффективных волоконных многосердцевинных усилителей.

Устройства ввода-вывода излучения. В простейшем случае одномодовых многосердцевинных световодов требуется соединение каждой сердцевины с отдельным одномодовым световодом для ввода излучения от соответствующего источника или для дальнейшей обработки прошедшего по сердцевине сигнала [62, 63]. В случае маломодовых многосердцевинных световодов задача усложняется тем, что каждую сердцевину нужно соединить с многомодовым световодом, не нарушив распределения сигналов по разным модам, а затем излучение разных мод вывести из сердцевин отдельных маломодовых световодов [64]. Простых, удобных и дешевых решений здесь пока не найдено.

Волоконные усилители. Для передачи на большие расстояния желательно иметь возможность периодического усиления сигнала без его вывода из волокна. Проблема заключается в том, что конструкция усиливающего световода должна быть сходна с конструкцией пассивного многосердцевинного световода, но при этом должна быть возможность ввода излучения накачки в каждую сердцевину или эффективной накачки через оболочку. Причём необходимо обеспечить одинаковое усиление в каждой сердцевине, а в случае маломодовой сердцевины – различные коэффициенты усиления для разных мод, компенсирующие различие в оптических потерях в разных модах. Работы на эту тему интенсивно ведутся, но хороших решений пока не найдено [65–67].

В настоящее время продолжается поиск оптимальных конструкций световодов с пространственным уплотнением каналов.

4. Волоконные световоды с полой сердцевиной

Как отмечалось выше, основными факторами, ограничивающими рост скорости передачи информации в оптоволоконных сетях, являются оптическая нелинейность стеклянных ВС и ограниченная спектральная полоса передачи информации. Создание ВС с полой сердцевиной [68, 69] открыло возможность существенного снижения влияния указанных ограничений. Во-первых, уменьшение на три порядка плотности вещества, по которому распространяется львиная доля излучения в полом световоде (обычно заполненном воздухом при атмосферном давлении), обеспечивает примерно пропорциональное снижение нелинейности световода. Во-вторых, полые световоды потенциально могут иметь оптические потери ниже 0.2 дБ/км в диапазонах длин волн, определяемых выбором типа и параметров световода. Так, оценки, полученные разными авторами в результате численного решения задачи о распространении излучения по световоду, показывают, что в световодах с полой сердцевиной, изготовленных из кварцевого стекла, возможно достижение оптических потерь $\alpha = 0.2$ дБ/км на длине волны $\lambda = 1620$ нм, $\alpha = 0.13$ дБ/км на $\lambda = 1900$ нм [6], $\alpha < 0.1$ дБ/км в диапазоне $\lambda = 1600–2400$ нм [70] и $\alpha = 0.03$ дБ/км на $\lambda = 1000$ нм [71]. Данное обстоятельство позволит в будущем использовать полые световоды (после отработки технологии их изготовления) для передачи информации в тех диапазонах длин волн, где имеются незрбиевые оптические усилители на редкоземельных ионах, висмутовых и других активных центрах. Например, для волоконных систем передачи информации можно будет использовать тулиевые и гольмиевые усилители в области длин волн около 2 мкм [72], а также иттербиевые усилители вблизи 1 мкм.

Достижению низких оптических потерь в полых ВС, на первый взгляд, непреодолимо препятствует то обстоятельство, что такие световоды не имеют нормальных мод: у них ПП сердцевины ниже, чем у оболочки, и удержание излучения в сердцевине за счёт полного внутреннего отражения невозможно. Все моды в таких световодах – вытекающие. Но оказалось, что в некоторых конструкциях световодов с полой сердцевиной можно снизить оптические потери до удовлетворительного уровня в результате отражения или рассеяния излучения на элементах оболочки световода.

В частности, ещё до создания волоконных световодов с низкими оптическими потерями на основе кварцевого

стекла рассматривалась возможность разработки световодов с полый сердцевинной и стеклянной или металлической оболочкой в виде капилляра [73] (рис.13,а,б). В таких световодах используется увеличение коэффициента отражения излучения от границы материалов с различными ПП при приближении угла падения излучения на границу к $\pi/2$, т.е. при малых углах скольжения луча. Оптические потери в плоском аналоге такого световода из кварцевого стекла при диаметре полый сердцевинной $D = 57$ мкм для одной из поляризаций показаны на рис.14, кривая 1. Отметим, что данные, полученные для простой плоской модели, очень хорошо согласуются с точным решением задачи [73]. Дальнейшее совершенствование конструкции было достигнуто путём нанесения нескольких тонких слоёв металла и диэлектрика на внутреннюю поверхность световедущей сердцевинной для роста коэффициента отражения от границы из-за интерференционных эффектов [74]. Но широкого распространения такие световоды не получили – по-видимому, из-за технологических проблем их изготовления и сравнительно высоких оптических потерь (~ 0.2 дБ/м).

Известно, что технологичная конструкция из кварцевого стекла в виде капилляра с такой толщиной стенки, которая обеспечивает увеличение коэффициента отражения распространяющегося по полый сердцевинной излучения за счёт конструктивной интерференции при отражении от внутренней и внешней границ капилляра (рис.13,в,г), имеет существенно меньшие оптические потери, чем конструкция с одной поверхностью отражения (рис.13,а,б) (см., напр., [75]). В частности, если для световода на рис.13,а,б оптические потери пропорциональны λ^2/D^3 [73], то для световода на рис.13,в,г они пропорциональны λ^3/D^4 [75]. Оптические потери для двумерной модели такого световода показаны на рис.14 (кривая 2). Видно, что отражение света ещё от одной поверхности

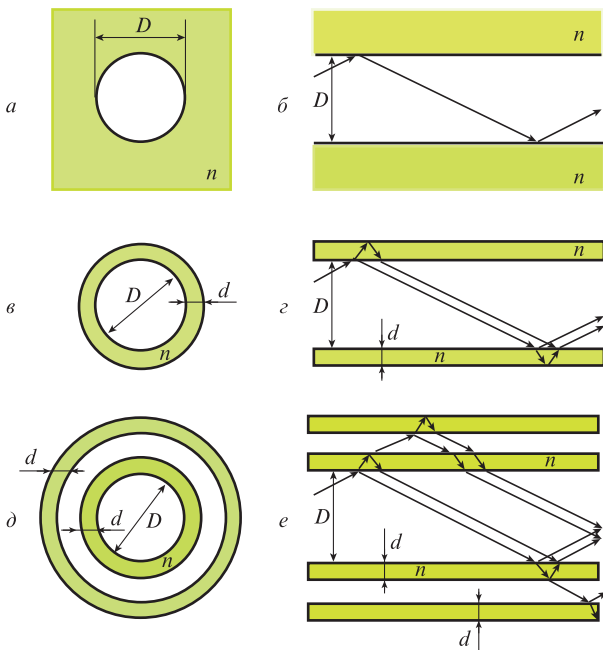


Рис.13. Три простые конструкции ВС с полый сердцевинной: полый стеклянный капилляр (а, б), полый стеклянный капилляр с толщиной стенки d , обеспечивающей резонансное отражение излучения обратно в сердцевинной (в, г), и полый световод с двумя резонансно отражающими стенками (д, е).

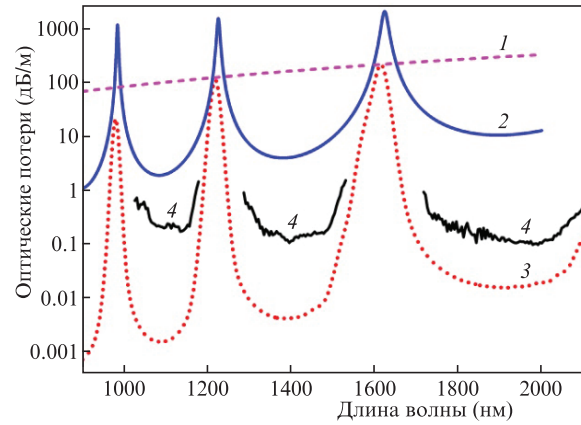


Рис.14. Спектры оптических потерь плоского световода с одной стенкой (рис.13,а,б) (1), плоского световода с интерференцией отражённых лучей на каждой поверхности стенки (рис.13,в,г) (2), расчётный спектр оптических потерь для револьверного ВС с диаметром полый сердцевинной 57 мкм и толщиной стенок капилляров в оболочке 2.8 мкм (3), а также экспериментально измеренные потери для изготовленного световода с теми же параметрами (4).

капилляра существенно (примерно на полтора порядка) снижает уровень потерь.

Если же к конструкции, представленной на рис.13,в,г, добавить еще один концентрический капилляр из кварцевого стекла, толщина которого и воздушный зазор между ним и первым капилляром соответствуют условиям максимального отражения излучения, распространяющегося по световоду под малым углом скольжения (рис.13,д,е), то в рамках простой двумерной модели [76] оптические потери такого световода будут пропорциональны λ^5/D^6 . Поэтому при $\lambda/D = 1.1$ мкм/57 мкм = 1/52 оптические потери световода на рис.13,д,е должны быть более чем на три порядка ниже, чем световода на рис.13,в,г, и достигать ~ 1 дБ/км (рис.14). Следует отметить, что в литературе условие такого отражения обычно называют антирезонансным [77, 78]. Причиной этого является то, что под условием резонанса в интерферометре Фабри–Перо обычно подразумевается условие пропускания излучения, а не его отражения. А стенки капилляров на рис.13,в–е образуют фактически резонаторы Фабри–Перо для распространяющегося по световоду излучения. Недостатком этих конструкций является трудность их практической реализации, поскольку любое соприкосновение такого капилляра-резонатора, например с поддерживающей конструкцией, немедленно ухудшает его резонансные свойства, что приводит к резкому увеличению оптических потерь.

Возможно, поэтому в последние полтора десятилетия получили развитие микроструктурированные ВС с полый сердцевинной (МВСПС), в которых световедущие свойства обеспечиваются наличием большого количества границ воздух–стекло в оболочке световода. Механизмы локализации излучения в полый сердцевинной МВСПС у разных типов микроструктурированной оболочки световода различны. Удержание излучения в сердцевинной световода со сложной структурой отражающей оболочки достигается за счёт конструктивной интерференции, возникающей при рассеянии света на одно- и двумерных фотоннокристаллических структурах оболочки. Диапазоны длин волн, в которых излучение не может распространяться по оболочке в радиальном направлении, называются, как и в кристаллах, фотонными запрещёнными зонами. Области пропускания и высоких потерь излучения определяют

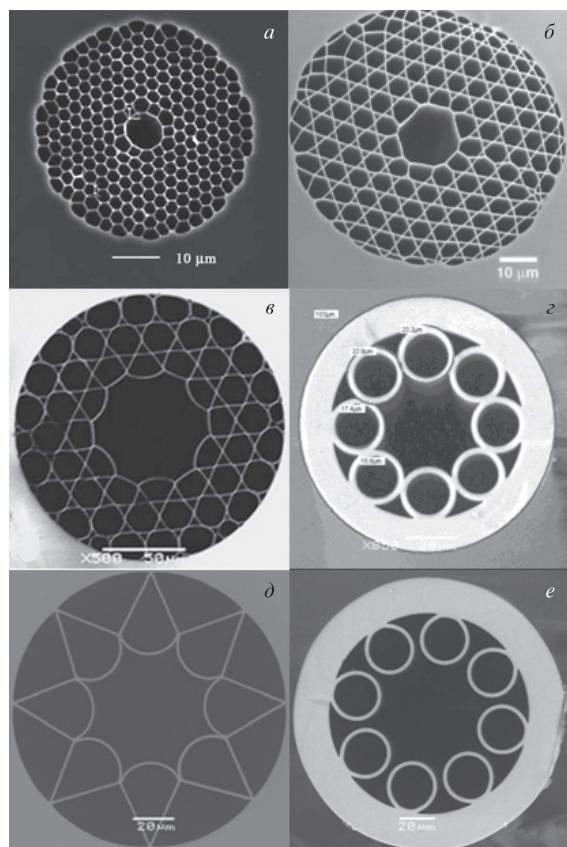


Рис.15. Изображения поперечных сечений различных типов ВС с полой сердцевиной: фотонно-кристаллического световода с гексагональной структурой оболочки [79] (а), фотонно-кристаллического световода типа Kagome [81] (б), фотонно-кристаллического световода типа Kagome с границей поллой сердцевины в форме гипоциклоиды [83] (в), револьверного ВС с поллой сердцевиной и соединенными капиллярами [84] (г), ВС с поллой сердцевиной и элементами оболочки в форме «парашютиков» [86] (д) и револьверного ВС с поллой сердцевиной с отдельными капиллярами в оболочке [88] (е).

ся также условиями резонанса или антирезонанса отдельных элементов отражающей оболочки световода. Поперечные сечения реализованных к настоящему времени МВСПС достаточно разнообразны (рис.15).

Первый ВС с фотонно-кристаллической оболочкой имел гексагональную структуру оболочки (световод такого типа представлен на рис.15,а [79]). Оптические потери в таких световодах составили 13 дБ/км в 2002 г. [80] и 1.2 дБ/км в 2005 г. [6]. В более современных работах сообщается о потерях на уровне около 2.8 дБ/км [72]. О ВС с другой фотонно-кристаллической оболочкой – типа Kagome, которые характеризуются большей величиной зон пропускания по длинам волн, сообщалось в [81]. В ходе поиска структуры оболочки световодов с поллой сердцевиной, обладающих наименьшими оптическими потерями, были предложены световоды с фотонно-кристаллической оболочкой типа Kagome, у которых граница сердцевины–оболочка изогнута в сторону центра световода в форме гипоциклоиды (рис.15,в) [82,83]. Оказалось, что наличие такого изгиба уменьшает оптические потери световода.

В 2011 г. в НЦВО РАН были предложены микроструктурированные световоды с очень простой структурой, оболочка которых состоит из одного слоя капилляров [84], – так называемые револьверные световоды (рис.15,г) (см. также [85]). В отличие от световодов на

рис.13,в них граница сердцевины–оболочка имеет кривизну другого знака, поэтому подобные световоды стали называться световодами с отрицательной кривизной границы сердцевины–оболочка. Позже появились световоды, оболочка которых состоит из элементов, похожих на стилизованное изображение парашюта [86] (рис.15,д). Но световоды [84], типа показанных на рис.15,г, существенно выделяются среди других световодов с отрицательной кривизной границы сердцевины–оболочка тем, что, во-первых, элементы оболочки обладают цилиндрической симметрией (точнее, форма поперечного сечения элементов близка к круговой или эллиптической [87]) и, во-вторых, их можно размещать вокруг сердцевины без соприкосновения друг с другом, что позволяет улучшить характеристики световода [88,89] (рис.15,е). Именно учитывая вышесказанное, а также внешний вид световодов, представленных на рис.15,г,е, они в [85] получили название револьверных световодов с поллой сердцевиной (РСПС). Разумеется, механизм локализации излучения в области сердцевины в РСПС отличается от такового в световодах с фотонно-кристаллической оболочкой. По-видимому, в начальном приближении потери в таких световодах можно описывать с помощью модельного световода, представленного на рис.13,г. Оптические потери в РСПС с диаметром сердцевины 57 мкм и толщиной стенок капилляров, формирующих отражающую оболочку, 2.35 мкм (размеры взяты из [85]) (рис.15,е), представлены на рис.14. Кривая 3 описывает расчётный спектр оптических потерь такого световода (без учёта возможных технологических отклонений формы сечения световода от идеальной), а кривая 4 – экспериментально измеренный спектр реального световода. Видно, что замена конструкции, показанной на рис.13,в,г, где в роли границы поллой сердцевины выступала кварцевая стенка толщиной 2.35 мкм, слоем из восьми не соприкасающихся капилляров с той же толщиной стенки при неизменном диаметре сердцевины приводит к снижению расчётного уровня потерь примерно на три порядка, до ~ 1 дБ/км (рис.14). Причём положения запрещённых зон (где излучение имеет максимальные потери при распространении) в этих световодах совпадают. Потери в реальном РСПС оказываются выше расчётных для идеальной конструкции и составляют при современном уровне технологии ~ 100 дБ/км. Вероятно, существенный вклад в повышение потерь вносят небольшие вариации формы поперечного сечения световода в реальном световоде по сравнению с идеальной конструкцией.

В настоящее время экспериментально продемонстрировано, что световоды с поллой сердцевиной достигли такого уровня развития, когда они уже могут применяться в различных областях науки и техники. Недавно показана возможность передачи больших потоков информации (30 Тбит/с) по полым световодам с гексагональной фотонно-кристаллической оболочкой в области длин волн 1.5 мкм [90] и 100 Гбит/с на расстояние около 1 км в области длин волн ~ 2 мкм, в которой есть тулиевые волоконные усилители и предполагается возможность снижения оптических потерь в фотонно-кристаллических световодах с поллой сердцевиной до 0.1 дБ/км [91]. Следует особо подчеркнуть, что потенциально световоды с поллой сердцевиной могут иметь значительно меньшие оптические потери, чем существующие кварцевые коммуникационные световоды, причем в существенно более широкой полосе длин волн [6,70,71].

Уникальные свойства ВС с полой сердцевиной открывают широкие возможности их применения и в других областях. Например, полые световоды, обеспечивая большие длины взаимодействия излучения с газами и жидкостями (при заполнении последними полой сердцевины), позволяют создавать новые волоконные датчики. В частности, использование высокой прозрачности кварцевых ВС с полой сердцевиной в среднем ИК диапазоне позволило создать датчики обнаружения метана и этана с порогом чувствительности 0.9 ppm [92].

Световоды с полой сердцевиной фактически открывают новую область нелинейной оптики газов. В настоящее время уже продемонстрированы газовые лазеры на таких световодах: лазеры на ацетилене (C_2H_2), работающие в области около 3 мкм [93, 94], лазеры на парах иода (I_2) [95] с оптической накачкой. Продемонстрировано оптическое усиление в полом световоде, заполненном газовой смесью He–Xe при накачке электрическим разрядом [96]. Созданы рамановские лазеры на водороде, позволяющие с высокой эффективностью осуществлять сдвиг частоты лазерного излучения на 4155 см^{-1} , – величину, недоступную для твёрдого тела [85, 97–99]. Причем эффективные рамановские лазеры реализованы на различных типах ВС с полой сердцевиной: на световодах с фотонно-кристаллической оболочкой типа Kagome [97, 98], на световодах с оболочкой из «парашютиков» [99] (рис. 15.д) и в РСПС [85].

В световодах с полой сердцевиной можно генерировать широкополосное излучение за счёт ряда связанных нелинейных взаимодействий в сердцевине, заполненной газом, который обладает необходимыми нелинейными свойствами (благородные газы или водород). Например, при накачке фемтосекундными импульсами полого световода, заполненного водородом, получено излучение суперконтинуума от вакуумного ультрафиолета (124 нм) до инфракрасного излучения (1200 нм) [100].

Таким образом, световоды с полой сердцевиной открывают новые уникальные возможности как в сфере волоконных коммуникаций, так и в других областях волоконной оптики.

5. Заключение

Анализ результатов исследований ВС нового поколения, приведённых в данной статье, позволяет сделать следующие выводы.

– Разработка легированных висмутом ВС на основе кварцевого стекла и их использование в качестве активной среды позволило создать семейство достаточно эффективных волоконных лазеров, работающих в спектральном диапазоне 1140–1775 нм. Полученные результаты показывают также возможность создания эффективных оптических усилителей в диапазонах 1200–1500 и 1610–1775 нм, в которых отсутствуют эффективные редкоземельные волоконные лазеры и оптические усилители. Таким образом, создание новой активной среды – легированных висмутом ВС – даёт реальную возможность использования всего спектрального диапазона 1300–1700 нм для передачи информации.

– Многосердцевинные ВС являются перспективной средой для передачи информации с петабитными скоростями. Продемонстрирована передача информации со скоростями 1–2 Пбит/с на расстояния в десятки километров. Однако имеется ряд технологических проблем, которые должны быть решены для реализации передачи

информации с такими скоростями на большие расстояния.

– Создание и широкие исследования ВС различных типов с полой сердцевиной открыли новые возможности их применения, в частности для передачи информации и в области нелинейной оптики газов. Однако пока не решена проблема создания полых волоконных световодов с более низкими оптическими потерями, чем у ВС на основе кварцевого стекла.

1. Дианов Е.М. *УФН*, **183**, 511 (2013).
2. Morioka T. *Proc. OECC* (Hong Kong, 2009, FT4).
3. Won Rachel. *Nature Photon.*, **9**, 424 (2015).
4. Dianov E.M. *J. Lightwave Technol.*, **31**, 681 (2013).
5. Marioka T., Awaji Y., Ryf R., Winzer P.J., Richardson D., Poletti F. *IEEE Commun. Mag.*, **50**, s 31-s 42 (2012).
6. Roberts P.J., Couny F., Sabert H., Mangan B.J., Williams D.P., Farr L., Mason M.W., Tomlinson A., Birks T. A., Knight J. C., Russell P. St.J. *Opt. Express*, **13**, 236 (2005).
7. Fujimoto Y., Nakatsuka M. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40**, L279 (2001).
8. Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Dianov E.M., Umnikov A.A., Yashkov M.V., Guryanov A.N. *Proc. ECOC* (Glasgow, 2005, paper Th. 3.3.5).
9. Haruna T., Kakui M., Taru T., Ishikawa Sh., Onishi M. *Proc. Opt. Appl. Topical Meeting* (Budapest, 2005, paper MC3).
10. Дианов Е.М., Двойрин В.В., Машинский В.М., Умников А.А., Яшков М.В., Гурьянов А.Н. *Квантовая электроника*, **35**, 1083 (2005).
11. Dianov E.M., Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Medvedkov O.I. *Proc. ECOC* (Cannes, 2006, paper Th.2.3.1).
12. Dianov E.M., Shubin A.V., Melkumov M.A., Medvedkov O.I., Bufetov I.A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **24**, 1749 (2007).
13. Razdobreev I., Bigot L., Pureur V., Favre A., Bouwmans G., Douay M. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 031103-1 (2007).
14. Dianov E.M., Krylov A.A., Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Kryukov P.G., et al. *J. Opt. Soc. Am. B*, **27**, 1807 (2007).
15. Rulkov A.B., Ferin A.A., Popov S.V., Taylor J.R., Razdobreev I., Bigot L., Bouwmans G. *Opt. Express*, **15**, 5473 (2007).
16. Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Dianov E.M. *IEEE J. Quantum Electron.*, **44**, 834 (2008).
17. Kivistö S., Puustinen J., Guina M., Okhotnikov O.G., Dianov E.M. *Electron. Lett.*, **44**, 1456 (2008).
18. Kalita M.P., Yoo S., Sahu J. *Opt. Express*, **16**, 21032 (2008).
19. Firstov S.V., Khopin V.F., Bufetov I.A., Firstova E.G., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Opt. Express*, **19**, 19551 (2011).
20. Dvoyrin V.V., Kir'yanov A.V., Mashinsky V.M., Medvedkov O.I., Umnikov A.A., Guryanov A.N., Dianov E.M. *IEEE J. Quantum Electron.*, **46**, 182 (2010).
21. Bufetov I.A., Firstov S.V., Khopin V.F., Medvedkov O.I., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **33**, 2227 (2008).
22. Bufetov I.A., Melkumov M.A., Khopin V.F., Firstov S.V., Shubin A.V., Medvedkov O.I., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7580**, 758014-1 (2010).
23. Shubin A.V., Bufetov I.A., Melkumov M.A., Firstov S.V., Medvedkov O.I., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **37**, 2589 (2012).
24. Firstov S.V., Alyshev S.V., Melkumov M.A., Riumkin K.E., Shubin A.V., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **39**, 6927 (2014).
25. Firstov S.V., Alyshev S.V., Riumkin K.E., Melkumov M.A., Medvedkov O.I., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **40**, 4360 (2015).
26. Bufetov I.A., Melkumov M.A., Firstov S.V., Riumkin K.E., Shubin A.V., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **20**, 0903815 (2014).
27. Dianov E.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **8601**, 8601OH-1 (2013).
28. Dianov E.M. *Laser Focus World*, **51**, 49 (2015).
29. Inao S., Sato T., Sensui S., Kuroha T., Nishimura Y. *Proc. OFC'79* (Washington, D.C., USA, 1979, paper WB1).
30. Berdagué S., Facq P. *Appl. Opt.*, **21**, 1950 (1982).
31. Chraplyvy A. *Proc. ECOC'2009* (Vienna, Austria, 2009, plenary talk).
32. Essiambre R., Kramer G., Winzer P.J., Foschini G.J., Goebel B. *J. Lightwave Technol.*, **28**, 662 (2010).
33. Ellis A.D., Zhao J., Cotter D. *J. Lightwave Technol.*, **28**, 423 (2010).
34. Zhu B., Taunay T.F., Fishteyn M., Liu X., Chandrasekhar S., Yan M.F., Fini J.M., et al. *Opt. Express*, **19**, 16665 (2011).

35. Chandrasekhar S., Gnauck A.H., Liu Xiang, Winzer P.J., Pan Y., Burrows E.C., Taunay T.F., Fishteyn M., Yan M.F., Fini J.M., Monberg E.M., Dimarcello F. *Opt. Express*, **20**, 706 (2012).
36. Liu Xiang, Chandrasekhar S., Chen X., Winzer P.J., Pan Y., Taunay T.F., Zhu B., Fishteyn M., Yan M.F., Fini J.M., Monberg E.M., Dimarcello F.V. *Opt. Express*, **19**, B958 (2011).
37. Winzer P.J., Gnauck A.H., Konczykowska A., Jorge F., Dupuy J.Y. *Proc. ECOC'2011* (Geneva, Switzerland, 2011, paper Tu.5.B.7).
38. Fini J.M., Zhu B., Taunay T.F., Yan M.F., Abedin K.S. *Opt. Express*, **20**, 949 (2012).
39. Takenaga K., Tanigawa S., Guan N., Matsuo S., Saitoh K., Koshiba M. *Proc. OFC'2010* (San Diego, Calif., USA, 2010, OWK7).
40. Koshiba M., Saitoh K., Kokubun Y. *IEICE Electron. Express*, **6**, 98 (2009).
41. Hayashi T., Taru T., Shimakawa O., Sasaki T., Sasaoka E. *Opt. Express*, **19**, 16576 (2011).
42. Saitoh K., Matsui T., Sakamoto T., Koshiba M., Tomita S. *Proc. OECC'2010* (Sapporo, Japan, 2010, pp.164–165).
43. Takara H., Sano A., Kobayashi T., Kubota H., Kawakami H., Matsuura A., Miyamoto Y., Abe Y., Ono H., Shikama K., Goto Y., Tsujikawa K., Sasaki Y., Ishida I., Takenaga K., Matsuo S., Saitoh K., Koshiba M., Morioka T. *Proc. ECOC'2012* (Amsterdam, Netherlands, 2012, paper Th.3.C.1).
44. Shoichiro Matsuo, Katsuhiro Takenaga, Kunimasa Saitoh, Kazuhide Nakajima, Yutaka Miyamoto, Toshio Morioka. *Proc. ECOC'2015* (Valencia, Spain, 2015, paper Th-1-2-1).
45. Fini J.M., Zhu B., Taunay T.F., Yan M.F. *Opt. Express*, **18**, 15122 (2010).
46. Egorova O.N., Semjonov S.L., Senatorov A.K., Salganskii M.Y., Koklyushkin A.V., Nazarov V.N., Korolev A.E., Kuksenkov D.V., Li M.-J., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **39**, 2168 (2014).
47. Li A., Al Amin A., Chen X., Shieh W. *Proc. OFC'2011* (Los Angeles, Calif., USA, p. PDPB8).
48. Koebele C., Salsi M., Sperti D., Tran P., Brindel P., Mardoyan H., Bigo S., Boutin A., Verluise F., Sillard P., Astruc M., Provost L., Cerou F., Charlet G. *Opt. Express*, **19**, 16593 (2011).
49. Hanzawa N., Saitoh K., Sakamoto T., Matsui T., Tomita S., Koshiba M. *Proc. OFC'2011* (Los Angeles, Calif., USA, 2011, p. OWA4).
50. Savory S.J. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, **16**, 1164 (2010).
51. Grüner-Nielsen L., Sun Yi., Nicholson J.W., Jakobsen D., Jespersen K.G., Lingle R.Jr., Pálsdóttir B. *J. Lightwave Technol.*, **30**, 3693 (2012).
52. Bai N., Ip E., Huang Y.-K., Mateo E., Yaman F., Li M.-J., Bickham S., Ten S., Liñares J., Montero C., Moreno V., Prieto X., Tse V., Chung K.M., Pak Tao Lau, Hwa-Yaw Tam, Lu Chao, Yanhua Luo, Gang-Ding Peng, Guifang Li, Ting Wang. *Opt. Express*, **20**, 2668 (2012).
53. Sasaki Y., Takenaga K., Guan N., Matsuo S., Saitoh K., Koshiba M. *Proc. ECOC'2012* (Amsterdam, Netherlands, 2012, paper Tu.1.F.3).
54. Takenaga K., Sasaki Y., Guan N., Matsuo S., Kasahara M., Saitoh K. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **24**, 1941 (2012).
55. Sasaki Y., Amma Y., Takenaga K., Matsuo S., Saitoh K., Koshiba M. *Proc. ECOC'2013* (London, UK, 2013, paper Mo.3.A.5).
56. Xia C., Bai N., Ozdur I., Zhou X., Li G. *Opt. Express*, **19**, 16653 (2011).
57. Ryf R., Essiambre R.-J., Randel S., Gnauck A.H., Winzer P.J., Hayashi T., Taru T., Sasaki T. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **23**, 1469 (2011).
58. Arik S.O., Khan J.M. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **25**, 2054 (2013).
59. Ryf R., Fontaine N.K., Guan B., Essiambre R.-J., Randel S., Gnauck A.H., Chandrasekhar S., Adamiecki A., Raybon G., Ercan B., Scott R.P., Ben Yoo S.J., Hayashi T., Nagashima T., Sasaki T. *Proc. ECOC'2014* (Cannes, France, 2014, paper PD.3.2).
60. Soma D., Igarashi K., Wakayama Y., Takeshima K., Kawaguchi Y., Yoshikane N., Tsuritani T., Morita I., Suzuki M. *Proc. ECOC'2015* (Valencia, Spain, 2015, paper PDP.3.2).
61. Puttnam B.J., Luis R.S., Klaus W., Sakaguchi J., Delgado Mendinueta J.-M., Awaji Y., Wada N., Tamura Y., Hayashi T., Hirano M., Marcianti J. *ibid*, paper PDP.3.1
62. Zhu B., Taunay T.F., Yan M.F., Fini J.M., Fishteyn M., Monberg E.M., Dimarcello F.V. *Opt. Express*, **18**, 11117 (2010).
63. Tatsuhiko Watanabe, Makoto Hikita, Yasuo Kokubun. *Opt. Express*, **20**, 26317 (2012).
64. Leon-Saval S.G. *Proc. ECOC'2015* (Valencia, Spain, 2015, paper Tu-3-3-1).
65. Jung Y., Lim E.L., Kang Q., May-Smith T.C., Wong N.H.L., Standish R., Poletti F., et al. *Opt. Express*, **22**, 29008 (2014).
66. Abedin K.S., Taunay T.F., Fishteyn M., DiGiovanni D.J., Supradeepa V.R., Fini J.M., Yan M.F., Zhu B., Monberg E.M., Dimarcello F.V. *Opt. Express*, **20**, 20191 (2012).
67. Antonelli C., Mecozzi A., Shtaiif M. *Proc. OFC'2014* (San Francisco, Calif., USA, 2014, W3E.1).
68. Cregan R.F., Mangan B.J., Knight J.C., Birks T.A., Russell P.St.J., Roberts P.J., Allan D.C. *Science*, **285**, 1537 (1999).
69. Russell P.St.J. *Science*, **299**, 358 (2003).
70. Belardi W. *J. Lightwave Technol.*, **33**, 4497 (2015).
71. Poletti F. *Opt. Express*, **22**, 23807 (2014).
72. Payne D. *Proc. ECOC-2015* (Valencia, Spain, 2015, plenary talk).
73. Marcatili E.A.J., Schmeltzer R.A. *Bell Syst. Tech. J.*, **43**, 1783 (1964).
74. Harrington J.A. *Infrared Fibers and Their Applications* (Washington: SPIE Press, 2000, p. 39).
75. Желтиков А.М. *УФН*, **178**, 619 (2008).
76. Буфетов И.А., Бирюков А.С. *Матер. 14-й Международной научной конференции-школы «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение»* (Саранск: Мордовский государственный университет, 2015, с. 9).
77. White T.P., McPhedran R.C., de Sterke C.M., Litchinitser N.M., Eggleton B.J. *Opt. Lett.*, **27**, 1977 (2002).
78. Litchinitser N.M., Abeeluck A.K., Headley C., Eggleton B.J. *Opt. Lett.*, **27**, 1592 (2002).
79. Benabid F., Bouwmans G., Knight J.C., Russell P.St.J., Couny F. *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 123903 (2004).
80. Smith C.M., Venkataraman N., Gallagher M.T., Muller D., West J.A., Borrelli N.F., Allan D.C., Koch K.W. *Nature*, **424**, 657 (2003).
81. Benabid F., Knight J.C., Antonopoulos G., Russell P.St.J. *Science*, **298**, 399 (2002).
82. Wang Y.Y., Couny F., Roberts P.J., Benabid F. *Proc. CLEO and QELS* (San Jose, Calif., USA, 2010, paper CPDB4).
83. Wang Y.Y., Wheeler N.V., Couny F., Roberts P.J., Benabid F. *Opt. Lett.*, **36**, 669 (2011).
84. Pryamikov A.D., Biriukov A.S., Kosolapov A.F., Plotnichenko V.G., Semjonov S.L., Dianov E.M. *Opt. Express*, **19**, 1441 (2011).
85. Гладышев А.В., Колядин А.Н., Косолапов А.Ф., Яценко Ю.П., Прямиков А.Д., Бирюков А.С., Буфетов И.А., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **45**, 807 (2015).
86. Yu F., Wadsworth W.J., Knight J.C. *Opt. Express*, **20**, 11153 (2012).
87. Прямиков А.Д., Бирюков А.С. *УФН*, **183**, 863 (2013).
88. Kolyadin A.N., Kosolapov A.F., Pryamikov A.D., Biriukov A.S., Plotnichenko V.G., Dianov E.M. *Opt. Express*, **21**, 9514 (2013).
89. Alagashv G.K., Pryamikov A.D., Kosolapov A.F., Kolyadin A.N., Lukovkin A.Yu., Biriukov A.S. *Laser Phys.*, **25**, 055101 (2015).
90. Sleiffer V.A.J.M., Jung Y., Leoni P., Kuschnerov M., Wheeler N.V., Baddela N., van Uden R.G.H., Okonkwo C.M., Hayes J.R., Wooler J., Numkam E., Slavik R., Poletti F., Petrovich M.N., Veljanovski V., Alam S.U., Richardson D.J., de Waardt H. *Proc. OFC/NFOEC* (Anaheim, USA, 2013, paper OW11.5).
91. Zhang H., Kavanagh N., Li Z., Zhao J., Ye N., Chen Y., Wheeler N.V., Wooler J.P., Hayes J.R., Sandoghchi S.R., Poletti F., Petrovich M.N., Alam S.U., Phelan R., O'Carroll J., Kelly B., Grüner-Nielsen L., Richardson D.J., Corbett B., Garcia Gunning F.C. *Opt. Express*, **23**, 4946 (2015).
92. Petrovich M.N., Heidt A.M., Wheeler N.V., Baddela N.K., Richardson D.J. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **9157**, 91573P (2014).
93. Jones A.M., Nampoothiri A.V.V., Ratanavis A., Fiedler T., Wheeler N.V., Couny F., Kadel R., Benabid F., Washburn B.R., Corwin K.L., Rudolph W. *Opt. Express*, **19**, 2309 (2011).
94. Wang Z., Belardi W., Yu F., Wadsworth W.J., Knight J.C. *Opt. Express*, **22**, 21872 (2014).
95. Nampoothiri A.V.V., Debord B., Alharbi M., G r me F., Benabid F., Rudolph W. *Opt. Lett.*, **40**, 605 (2015).
96. Bateman S.A., Belardi W., Yu F., Webb C.E., Wadsworth W.J. *Proc. CLEO/QELS Conf.* (San Jose, Calif., USA, 2014, paper STh5C.10).
97. Benabid F., Knight J.C., Antonopoulos G., Russell P.St.J. *Science*, **298**, 399 (2002).
98. Couny F., Benabid F., Light P.S. *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 143903 (2007).
99. Wang Z., Yu F., Wadsworth W.J., Knight J.C. *Laser Phys. Lett.*, **11**, 105807 (2014).
100. Belli F., Abdolvand A., Chang W., Travers J.C., Russell P.St.J. *Optica*, **2**, 292 (2015).