

Передача энергии по волоконным световодам

А.С.Бирюков, Е.М.Дианов

Анализируется возможность передачи на большие расстояния энергии в виде лазерного излучения по диэлектрическим волоконным световодам. Поскольку нелинейно-оптические явления в стеклах не позволяют передавать значительные мощности по световодам со стандартной двухслойной световодящей структурой, перспектива такой передачи связывается с развитием технологии микроструктурированных волоконных световодов, имеющих полую сердцевину, и с дальнейшим прогрессом мощных волоконных лазеров.

Ключевые слова: волоконный световод, микроструктурированный световод, полное внутреннее отражение, оптические потери, резонансы Брэгга.

Общеизвестны такие традиционные способы передачи энергии на расстояние, как передача электрической энергии по металлическим проводам, передача энергии с помощью радиоволн и СВЧ излучения. Передача тепла с помощью жидких носителей (например, в централизованных системах отопления) связана с необходимостью перемещения в пространстве значительных масс веществ и поэтому представляется значительно менее эффективной.

С появлением лазеров, ростом их мощности и КПД стала возможной передача энергии на расстояние в виде лазерного излучения. Если пока отвлечься от КПД преобразования различных видов энергии в энергию лазерного излучения, то возможность передачи этой энергии на расстояние будет определяться специфическими требованиями, отличными от требований к передаче энергии по проводам.

Хорошо исследованы вопросы, относящиеся к распространению лазерного пучка в условиях земной атмосферы и в вакууме (космосе). При этом имеется ряд ограничений на мощность пучка и предельные для передачи энергии расстояния. Эти ограничения связаны, например, с самофокусировкой и оптическим пробоем в воздухе или с дифракционной расходимостью пучка в космосе (чем дальше приемник расположен от излучателя, тем больше должны быть его геометрические размеры). В обоих случаях речь идет о передаче в условиях прямой видимости источник – приемник.

В данной работе мы анализируем перспективную, на наш взгляд, возможность передачи энергии с помощью лазерного излучения – по стеклянным волоконным световодам. Вначале отметим, что хотя световая энергия, как и электрическая, относится к одному и тому же виду энергии – электромагнитной, процессы ее распространения в металлах и диэлектриках различны. В самом

деле, электрическое поле в металлах распространяется за счет токов проводимости, тогда как прохождение света через диэлектрики целиком определяется токами смещения (или поляризуемостью вещества). Различными являются и причины, определяющие предельную энергию, передаваемую по проводам и стеклянным волокнам. В первом случае предельно допустимые токи ограничиваются потерями в виде присущего металлам омического сопротивления. Превышение некоторого критического для данного провода значения тока ведет к джоулеву нагреву металла, росту его сопротивления, дальнейшему росту температуры и т. д., вплоть до расплавления провода. Представление о предельных значениях передаваемой мощности электрического тока может дать рекомендуемая, например в [1], для медного провода плотность мощности не более 220 кВт/см².

Линейные потери в волоконных световодах из кварцевого стекла к настоящему времени доведены до предельно низкого уровня, определяемого фундаментальным рэлеевским рассеянием, и для длины волны излучения неодимового лазера $\lambda = 1.063$ мкм составляют ~ 0.8 дБ/км (1.8×10^{-6} см⁻¹). Иными словами, для малых интенсивностей света мощность излучения с этой длиной волны уменьшится в e раз на расстоянии от входа в световод ~ 5.4 км. При передаче значительных мощностей света в световоде начинают проявляться нелинейные процессы, эффективность протекания которых зависит от интенсивности электромагнитного излучения.

Известно, что при больших интенсивностях света даже в таком слабонелинейном веществе, как плавный кварц, могут возникать различные нелинейные эффекты. В особенности это относится к волоконным световодам, в которых, в отличие от объемных образцов кварцевого стекла, нелинейные эффекты развиваются заметно раньше самофокусировки. К настоящему времени известно много оптических явлений, определяемых интенсивностью света. Это уже упомянутая самофокусировка, генерация гармоник, четырехволновое смешение, эффект Керра, различные виды вынужденного рассеяния – рэлеевское, Мандельштама – Бриллюэна (ВРМБ), комбинационное (ВКР) и т. д. В то же время лишь некоторые из

А.С.Бирюков, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: biriukov@fo.gpi.ru

этих явлений сопровождаются изменением состояния среды – ее нагревом. К таким неупругим процессам относятся, в частности, ВРМБ, связанное с необходимостью расходования некоторой части энергии электромагнитной волны на возбуждение звуковых колебаний в среде, и ВКР – аналогичное явление, протекающее с участием колебательных степеней свободы молекул (или групп молекул) среды, а также многофотонное поглощение.

Данных по многофотонному поглощению в кварцевом стекле пока недостаточно, чтобы дать однозначное заключение о его важности в сравнении, например, с ВРМБ или ВКР.

Что касается ВРМБ, а тем более вынужденного рэлеевского рассеяния, то частотный сдвиг и, следовательно, доля энергии электромагнитного поля, переходящая в тепло в каждом акте этих разновидностей вынужденного рассеяния, весьма малы. Гораздо большим тепловыделением сопровождается процесс ВКР, в каждом акте которого в тепло может переходить более 5% энергии кванта вводимого в волокно излучения (ИК диапазон).

Поэтому можно считать, что когда достаточно мощное излучение распространяется по световоду, основным источником нагрева световода является распределенное по длине волокна тепловыделение, обусловленное явлением ВКР. Оценки [2] этого тепловыделения показывают, что критическая интенсивность вводимого в одномодовый световод излучения с длиной волны 1.063 мкм составляет ~ 20 ГВт/см². Это значение не противоречит приводимому в [3] оптическому порогу разрушения световодов (более 10 ГВт/см²), который в то же время заметно ниже порога электрического пробоя кварцевого стекла. Указанные выше цифры были получены для кварцевых световодов с неизменной и идеальной на всем протяжении однородностью и совершенной геометрией световедущей структуры. В реальных же световодах всегда имеются те или иные отклонения от однородности как химического состава, так и продольной геометрии, что может существенно снизить приведенные оценочные пороги. Действительно, продольные неоднородности являются источниками дополнительных оптических потерь, в которых может локализоваться избыточное тепловыделение с последующим развитием разрушения световода. При этом перегрев и выход световода из строя могут быть уже не связаны с ВКР, а определяться сильной зависимостью поглощения от температуры (см., напр., [4]).

Оценки свидетельствуют также о том, что при больших интенсивностях пропускаемого света, даже в условиях хорошего теплоотвода от световода, потери на ВКР не позволяют передать более половины мощности введенного света даже через сравнительно короткий световод. С другой стороны, понятно, что та же исходная мощность излучения может быть передана в линейном режиме (при интенсивности, меньшей порога ВКР) на значительно большие расстояния. Для этого нужно лишь использовать, например, многомодовые световоды или пропускать свет, разветвив его по нескольким одномодовым. В результате по одному одномодовому световоду можно сравнительно беспрепятственно передать мощность ~ 1 Вт (порог ВКР), а по многомодовому – раз в 100 большую. Для целого ряда практических применений таких невысоких мощностей достаточно. В частности, волоконные «энергопроводы» могут оказаться полезными или даже незаменимыми в тех случаях, когда

электрические варианты энергоподвода связаны с опасностью возникновения короткого замыкания, а также если энергоподвод осуществляется в электропроводящей среде. Одним из наглядных примеров может служить система датчиков, контролирующая количество топлива в баках пассажирских авиалайнеров. Вплоть до последнего времени эти датчики работали на электричестве, что стало причиной серьезной авиакатастрофы, произошедшей в США в 1996 году [5]. С тех пор их заменили волоконно-оптическими датчиками.

Среди прочих некомуникационных применений волоконно-оптических линий передачи небольших потоков лазерного излучения отметим аэрокосмическое, оборонное и медицинское оборудование. Во многих этих применениях на выходном конце линии осуществляется обратное преобразование световой энергии в электрическую. В описанном в [6] и основанном на использовании полупроводников способе предсказывается возможность преобразования лазерного излучения мощностью до 20 Вт в электричество с эффективностью до 60%. О практической реализации преобразования света в электричество (также с использованием полупроводников) с эффективностью более 50% сообщается в [7] (правда, для мощностей не более 5 Вт).

До сих пор мы ориентировались на излучение с $\lambda = 1.063$ мкм. В то же время минимальные линейные потери кварцевого стекла находятся вблизи длины волны 1.55 мкм и составляют примерно 0.15 дБ/км. Это означает, что в световоде с сердцевиной из высокочистого кварцевого стекла мощность излучения с указанной длиной волны уменьшится в e раз на протяжении примерно 30 км, а в десять раз – на протяжении около 70 км.

В перспективе определенные надежды связываются с новым классом особочистых материалов. Так, например, известно, что некоторые халькогенидные и фторидные стекла, в частности на основе фторидов тяжелых металлов, обладают фундаментальными потерями на рэлеевское рассеяние на уровне 10^{-3} дБ/км. Поэтому, решив проблемы очистки этих стекол от примесей и приблизив оптические потери в них к указанному значению, как это в свое время было сделано с кварцевым стеклом, можно будет существенно расширить возможности волоконной оптики как в области коммуникаций, так и в рассматриваемом нами плане передачи энергии на расстояние. В то же время вследствие того, что нелинейность этих материалов, как правило, значительно больше, чем у кварцевого стекла, обусловленные ею ограничения мощности передаваемого излучения могут оказаться намного более строгими. Возникает и другая проблема – поиск соответствующих источников излучения, поскольку области прозрачности большинства упомянутых материалов лежат в диапазоне 2–7 мкм.

Итак, можно заключить, что лазерное излучение малой мощности (примерно до 1 Вт) может быть передано по одномодовому волоконному световоду с малыми потерями на большие расстояния. Дальняя передача более высоких мощностей излучения связана со значительными ее потерями вследствие нелинейных эффектов (либо с необходимостью использования многомодовых световодов или большого числа одномодовых).

Все сказанное выше о возможности передачи энергии по световодам относилось к стеклянным световодам, направленность излучения в которых обеспечивается явлением полного внутреннего отражения. Ясно, что огра-

ничения на предельные интенсивности света в этих световодах тесно связаны с фундаментальными свойствами материала сердцевины. В настоящее время в волоконной оптике интенсивно совершенствуется технология изготовления другого класса стеклянных световодов – с поллой сердцевиной и оболочкой, выполненной в виде двумерного фотонного кристалла (ФК). Очевидно, что в таких световодах пороговые интенсивности должны быть на несколько порядков выше, чем в световодах со стеклянной сердцевиной.

Напомним, что под ФК принято понимать диэлектрическую среду с периодически изменяющейся в пространстве диэлектрической проницаемостью ϵ . Основным свойством ФК является то, что, будучи прозрачными для широкого спектра электромагнитного излучения, они обладают брэгговскими резонансами и оказываются непрозрачными для ряда частотных диапазонов этого спектра. Иными словами, излучение с длиной волны, сравнимой с периодом структуры ФК (периодом изменения ϵ), может эффективно отражаться такой структурой. В областях резонансов излучение локализуется лишь в дефектах ФК. Таким образом, протяженные дефекты в ФК могут служить волноводами, механизм локализации света в которых существенно отличается от явления полного внутреннего отражения.

На практике оболочка в виде двумерного ФК для полого световода представляет собой стеклянную матрицу с цилиндрическими отверстиями вдоль всего световода, расположенными в той или иной симметрии относительно друг друга в поперечном сечении структуры. Дефектом этой структуры, являющимся сердцевиной световода, служит отверстие с большим, чем все прочие отверстия, сечением.

Независимо от механизма, определяющего направленность излучения, световоды нового класса с продольными отверстиями в оболочке получили название дырчатых (см., напр., [8]), или микроструктурированных (МС). С точки зрения целей настоящей работы наибольший интерес представляют МС световоды с поллой сердцевиной, поскольку МС световодам со стеклянной сердцевиной присущи те же ограничения, что и обычным световодам. По физической сути к МС световодам с поллой сердцевиной примыкают полые, аксиально-симметричные многослойные диэлектрические световоды, названные брэгговскими [9]. Из-за аксиальной симметрии брэгговские световоды являются квазиодномерными ФК, поскольку ϵ – периодическая функция лишь радиальной координаты.

Общим для обоих полых МС световодов указанных типов является то, что, в принципе, степень локализации света в их сердцевине может быть приближена к 100%. Последнее достигается увеличением числа периодов ФК в оболочке, контраста диэлектрической проницаемости в пределах периода и, конечно, совершенством геометрии фотонного кристалла, зависящим от уровня технологии. Прогнозируемая очень малая доля света, распространяющегося по оболочке, определяет и очень малые материальные потери, так что суммарные потери с учетом волноводных потерь на вытекание моды могут оказаться намного меньше материальных потерь в обычных стеклянных световодах. При этом полые световоды являются потенциально одноמודовыми. Анализ показывает, что действительно малые потери в световоде имеет лишь основная мода. Потери всех высших мод на не-

сколько порядков больше, поэтому полый световод является своего рода эффективным модовым фильтром.

Все перечисленные выше выводы анализа свойств полых МС световодов справедливы для «идеальных» структур. В то же время существуют еще не решенные как технологические, так и фундаментальные проблемы создания качественных МС световодов с поллой сердцевиной. Уже отмечалось, что высокая степень локализации света в сердцевине требует совершенства геометрии фотонного кристалла оболочки. Выполнить это требование на практике пока достаточно сложно, поскольку как размеры отверстий в оболочке, так и их относительное расположение в поперечном сечении меняются в процессе вытяжки световода из заготовки. В связи с этим необходимо выработать какие-то технологические приемы борьбы с описанным явлением. Существует и фундаментальная нерешенная проблема (на нее было обращено внимание в [10]), которая состоит в следующем: полая сердцевина на самом деле не является цилиндром с абсолютно гладкой внутренней поверхностью. Дело в том, что при вытяжке световода из заготовки на этой свободной поверхности стекло – воздух «замораживаются» пространственные неоднородности, обусловленные наличием термических флуктуаций гидродинамических параметров (плотность, давление и т. д.), наиболее интенсивных в самой горячей зоне вытяжной печи. Оптические потери в полых одноמודовых световодах, возникающие из-за рассеяния света на этих застывших на поверхности сердцевины неоднородностях, пока не могут быть снижены до значений менее 1–2 дБ/км, причем последние уже реально достигнуты [10].

Вследствие очень малой нелинейности заполняющего сердцевину МС световода воздуха ограничения на интенсивность распространяющегося в нем света должны определяться, в основном, оптическим пробоем воздуха. В [11] приведены результаты измерений зависящих от длины волны света интенсивностей пробоя различных газов излучением рубинового и неодимового лазеров ($\lambda = 0.6943$ и 1.063 мкм соответственно). Для воздуха при атмосферном давлении оптический пробой осуществляется при интенсивностях ~ 700 ГВт/см² излучением с $\lambda = 1.06$ мкм (что примерно соответствует средней длине волны генерации наиболее мощных волоконных лазеров на кварцевом стекле, легированном Yb). Если ориентироваться на сравнительно небольшие для полых МС световодов размеры поперечного сечения поля моды ~ 60 мкм², характерные для размеров поля моды в известных на сегодня мощных волоконных Yb-лазерах (см., напр., [12]), то приведенные интенсивности пробоя соответствуют предельным мощностям в МС световоде ~ 400 кВт. Такие мощности труднодостижимы даже при условии успешного решения проблемы когерентного сложения излучения нескольких мощных волоконных лазеров. Поэтому энергетических ограничений на передаваемое по МС световодам одноמודовое излучение пока нет.

На сегодня об уровне коммерчески доступных мощных волоконных лазеров можно судить, например, по появившемуся недавно на сайте Корпорации IPG Photonics сообщению [13]. Оно информирует о продаже и установке в одном из исследовательских институтов Германии волоконной лазерной Yb-системы мощностью 20 кВт с диодной накачкой. Более того, сообщается, что IPG уже продает подобные лазерные системы мощностью до 50 кВт.

Заметим, что когда речь заходит о возможности передачи по полуму МС световоду одномодового излучения киловаттных мощностей, одновременно возникает еще не освещенная в литературе задача преобразования столь высоких световых мощностей в электричество. В то же время мощное одномодовое излучение из-за очень высокого качества энергии может быть непосредственно и весьма эффективно использовано, например, для резки, сварки, сверления, термообработки и т. д. материалов.

Некоторое представление о современном уровне возможностей передачи энергии по полуму МС световоду дает следующая оценка: половина введенной в МС световод мощности излучения может быть передана на расстояние ~ 3 км (оптические потери положены равными 1 дБ/км). Если учесть реально достижимую эффективность преобразования электрической энергии в энергию лазерного излучения, составляющую $\sim 30\%$ (что соответствует КПД накачки $\sim 50\%$ и КПД лазера $\sim 60\%$), то на выходе из МС световода получим 15% затраченной электрической энергии. Обратное преобразование этого света в электричество уменьшит данную величину примерно вдвое (или еще больше). Понятно, что если в бу-

дущем удастся снизить оптические потери в полуму МС световоде до, скажем, 0.1 дБ/км, оцененные выше эффективности окажутся достижимыми для расстояния 30 км.

1. *Правила устройства электроустановок* (М.: Энергоатомиздат, 1986).
2. Бирюков А.С., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **30**, 559 (2000).
3. Stolen R.H., in: *Optical Fibre Telecommunications* (New York: Acad. Press, 1979, p. 145).
4. Kashyap R., Blow K.J. *Electron. Lett.*, **24**, 47 (1988).
5. Basanskaya A. *IEEE Spectrum.*, **42**, 13 (2005).
6. Krokhin O.N. *IV Int. Symp. Modern Problems of Laser Phys (MPLP)* (Novosibirsk, Russia, August 22–27, 2004); Крохин О.Н. *УФН*, **176** (4), 441 (2006).
7. Cohen M. *Optics Laser Europe*, **140**, June 2006, p. 27, 29.
8. Bjarklev A., Broeng J., Bjarklev A.S. *Photonic Crystal Fibres* (Boston–Dordrecht–London: Kluwer Acad. Publ., 2003).
9. Yeh P., Yariv A., Marom E. *J. Opt. Soc. Am.*, **68**, 1196 (1978).
10. Roberts P.J., Couny F., Sabert H., et al. *Opt. Express*, **13**, 236 (2005).
11. Tomlinson R.G., Damon E.K., Busher H.T., in *Physics of Quantum Electronics* (New York: McGraw-Hill, 1966, p. 520).
12. Буфетов И.А., Бубнов М.М., Мелькумов М.А. и др. *Квантовая электроника*, **35**, 328 (2005).
13. http://www.ipgphotonics.com/pr_10312005/news_detail.htm