

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Из истории физики

Научная сессия Общего собрания Отделения физических наук Российской академии наук, 17 декабря 2012 г.

PACS number: 01.10.Fv

DOI: 10.3367/UFNr.0183.201305e.0511

17 декабря 2012 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (РАН) состоялась научная сессия Общего собрания Отделения физических наук Российской академии наук.

Объявленная на web-сайте ОФН РАН www.gpad.ac.ru повестка заседания содержала следующие доклады:

1. **Дианов Е.М.** (Научный центр волоконной оптики РАН, Москва). *На пороге пета-эры*.

2. **Забродский А.Г.** (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург). *Вклад учёных в Великую Победу на примере ЛФТИ*.

3. **Илькаев Р.И.** (Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров). *История отечественного Атомного проекта*.

4. **Черепашук А.М.** (Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва). *История истории Астрономии*.

Статьи, написанные на основе докладов, публикуются ниже.

ния, как правило, использовались прежде всего для создания средств связи. Приведём примеры наиболее ярких достижений в истории создания средств связи.

В 1794 г. братьями Шапп был построен оптический телеграф между Парижем и Лиллем (225 км), состоящий из цепочки башен, которые отстояли друг от друга на расстояние прямой видимости. Визуальная передача сообщений осуществлялась последовательно от башни к башне посредством семафорной азбуки. Самая длинная в мире линия оптического телеграфа действовала между Петербургом и Варшавой (1200 км), передаваемый сигнал проходил по ней за 15 мин.

В 1837 г. американский художник и предприниматель Самюэль Морзе изобрёл электромагнитный телеграфный аппарат и код (азбука Морзе). В 1844 г. была построена первая коммерческая телеграфная линия Вашингтон — Балтимор. Изобретение гуттаперчи было использовано для изоляции электрических проводов, что позволило в 1851 г. проложить через Ла-Манш подводную телеграфную линию между Англией и Францией.

В 1857 г. началась прокладка телеграфного кабеля между Европой и Америкой по дну Атлантического океана. Эта первая прокладка кабеля по дну океана встретила огромные технические трудности, которые удалось преодолеть лишь с нескольких попыток. Это событие мирового значения ярко описано Стефаном Цвейгом в новелле "Первое слово из-за океана". Самая длинная в мире телеграфная линия Москва — Владивосток, протяжённостью около 12 тыс. километров, была открыта в 1871 г.

В 1876 г. Александр Белл изобрёл телефон, и уже в 1880 г. в США использовалось 48000 телефонных аппаратов. В 1880 г. А. Белл изобрёл оптический телефон (фотофон Белла) и осуществил передачу речевого сигнала через свободную атмосферу на 200 м, используя в качестве несущего излучения солнечный свет.

Открытие Герцем в 1888 г. электромагнитных волн и создание искрового передатчика радиоволн создали основу для развития радиосвязи. В 1895 г. Попов, а в 1896 г. Маркони продемонстрировали возможность передачи сигналов с помощью радиоволн. В 1901 г. Маркони осуществил радиотелеграфную передачу через Атлантический океан. В 1909 г. Г. Маркони и Ф. Брауну была присуждена Нобелевская премия по физике за вклад в развитие беспроволочной телеграфии.

На пороге пета-эры

Е.М. Дианов

1. Введение

История развития человеческого общества — это и история развития средств связи и передачи информации. И если на ранних этапах развития общества использовались такие простые средства, как дымовые костры, гонцы, почта, то по мере его развития совершенствовались и средства связи. Наиболее эффективные средства связи стали появляться в связи с интенсивным развитием науки и техники в XIX в., но всегда потребности в обмене информацией превышали технические возможности. Поэтому научные и технические достиже-

Е.М. Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, РФ
E-mail: dianov@fo.gpi.ru

XX в. характеризуется бурным развитием радиосвязи. Возникла спутниковая радиосвязь (1965 г.). Специалистам было ясно, что при передаче информации с помощью несущего излучения скорость передачи информации пропорциональна частоте несущего излучения. Потому развитие радиосвязи шло по пути уменьшения длины волны несущего излучения (увеличения частоты), что позволяло передавать всё большие объёмы информации. Несмотря на высокий уровень развития радиосвязи в передовых странах мира, в том числе в Советском Союзе, растущая потребность развитых стран в информации привела к осознанию необходимости перехода к оптическому излучению, что обещало увеличение скорости передачи информации в $10^4 - 10^5$ раз по сравнению с таковой при радиосвязи. Сегодняшнее состояние волоконно-оптической связи полностью подтвердило эти ожидания.

В завершение этого раздела, посвящённого истории развития средств связи, хотелось бы подчеркнуть, что Россия и Советский Союз были среди лидеров в развитии упомянутых средств связи.

Далее я вначале коротко остановлюсь на важнейших этапах развития и на сегодняшнем состоянии волоконно-оптической связи, затем коснусь механизмов, ограничивающих скорость передачи информации по волоконному световоду в современных волоконно-оптических системах связи, обсуджу различные пути преодоления этих ограничений и представлю недавние результаты соответствующих исследований и прогноз развития волоконно-оптической связи на ближайшие 10 лет.

2. История развития волоконно-оптической связи

Рассмотрение истории развития волоконно-оптической связи целесообразно начать с упомянутых во введении экспериментов А. Белла по передаче речевой информации через свободную атмосферу с помощью солнечного света (фотофон Белла) (рис. 1). Результаты этих экспериментов показали и основные трудности применения оптического излучения для передачи информации, преодоление которых позволило создать эффективные волоконно-оптические системы связи. Используя схему фотофона, представленную на рис. 1, А. Беллу удалось передать речевой сигнал на 200 м. Несмотря на успешный результат этих экспериментов, Беллу не удалось разработать

этот успех — и ясно почему: Солнце не является подходящим источником оптического излучения для передачи информации, а свободная атмосфера — подходящей передающей средой. А других, более подходящих, источников света и передающих сред тогда не было. Именно поэтому никаких серьёзных попыток использовать оптическое излучение для передачи информации не предпринималось в течение последующих 80 лет, до тех пор пока не появились первые лазеры.

Создание лазеров и их широкое развитие привело к появлению ряда новых направлений науки и техники, в том числе современной волоконной оптики и оптической связи. Решающую роль в создании лазеров сыграли американские и советские учёные. В 1964 г. Нобелевская премия по физике была присуждена Н.Г. Басову, А.М. Прохорову и Ч.Х. Таунсу за фундаментальные исследования в области квантовой электроники, которые привели к созданию генераторов и усилителей, основанных на лазерно-мазерном принципе.

Лазеры представляли собой идеальный источник света для передачи информации, обеспечивающий высокую направленность излучения большой мощности. А монохроматичность лазерного излучения позволяла использовать для передачи информации идеи и методы, используемые в радиосвязи. Поэтому одними из первых экспериментов с лазерами стали эксперименты по передаче информации через свободную атмосферу.

Эти эксперименты проводились в ряде стран (в том числе в СССР), но результат был один и тот же: свободная атмосфера, прежде всего вследствие изменчивости метеорологических условий, не является подходящей передающей средой для надёжной передачи информации на значительные расстояния. Другой передающей среды тогда не было — стеклянные волоконные световоды, которые имели высокие оптические потери, порядка 1000 dB km^{-1} (свет ослаблялся вдвое на расстоянии 1 м), не могли быть использованы для передачи информации на сколько-нибудь значительные расстояния. И казалось, что блестящая идея создания высокоскоростных систем оптической связи, сильно востребованных современным обществом, не может быть реализована. Но, как часто бывает в истории, если перед обществом стоит очень важная, но трудноразрешимая проблема, то всегда находится человек (или несколько человек), который находит решение проблемы. В данном случае таким человеком оказался Чарльз Као, китаец, работавший в Англии в Стандартной телекоммуникационной лаборатории (рис. 2). В 1966 г. он опубликовал статью [1], в которой проанализировал механизмы оптических потерь в стёклах и показал, что эти потери в основном обусловлены примесями, прежде всего, переходных металлов: Fe, Cu, Ni, и др. При очистке стекла от этих примесей можно получить потери менее 20 dB km^{-1} , причём эта величина намного превышает нижний предел оптических потерь, обусловленный фундаментальными механизмами.

На основе теоретических и экспериментальных исследований Као заключил, что волоконная структура с диаметром сердцевины порядка длины волны λ_0 и полным диаметром $\sim 100 \lambda_0$ может представлять собой оптический волновод, пригодный в качестве передающей среды для систем связи. По оценкам Као, если разница показателей преломления сердцевины и оболочки составляет примерно 1 %, то такой волновод является

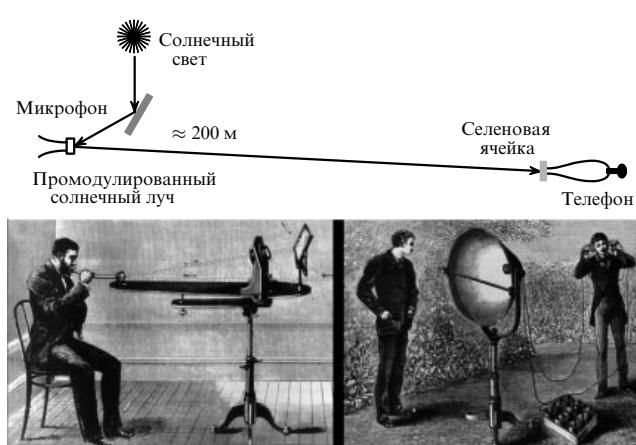


Рис. 1. Фотофон А. Белла.

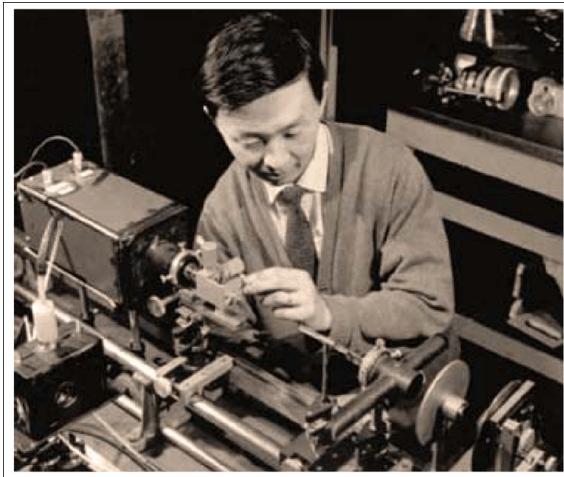


Рис. 2. Ч. Као, делающий оптические измерения.

одномодовым и может передавать информацию со скоростью более 1 Гбит с^{-1} . Далее Као подчеркнул, что успешная реализация такого оптического волновода зависит от наличия подходящего диэлектрического материала с низкими оптическими потерями, причём создание такого материала является задачей трудной, но не невозможной.

Идеи Ч. Као, высказанные в 1966 г., были реализованы в 1970 г., когда фирма "Корнинг Гласс" впервые изготовила стеклянные волоконные световоды с оптическими потерями 17 дБ км^{-1} на волне $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$.

В 2009 г. Ч. Као присуждена Нобелевская премия по физике за выдающийся вклад в исследование волоконных световодов для оптической связи.

Снижение оптических потерь волоконных световодов от $\sim 1000 \text{ дБ км}^{-1}$ до $\sim 20 \text{ дБ км}^{-1}$ казалось чрезвычайно трудной задачей. Однако в фирме "Корнинг Гласс" ещё в 1930-е годы была создана технологическая база для решения этой проблемы [2]. Научный сотрудник фирмы Франк Хайд (Frank Hyde) провёл исследования по получению чистого порошка кварцевого стекла при прохождении паров тетрахлорида кремния (SiCl_4) через пламя кислородно-водородной горелки (патент США в 1934 г.). Позднее было синтезировано кварцевое стекло, легированное титаном, при использовании в качестве исходного материала тетрахлоридов кремния и титана. Это стекло имело близкий к нулю коэффициент термического расширения. Преимуществом использования тетрахлоридов кремния и титана является возможность глубокой очистки этих летучих соединений. В 1950-е годы возникла потребность в больших пластинах чистого кварцевого стекла для ряда применений, в том числе для изготовления больших зеркал (диаметром $\geq 1,5 \text{ м}$) для нового поколения высокоточных астрономических телескопов. Таким образом, к началу работ по созданию стеклянных волоконных световодов с низкими оптическими потерями в 1967 г. фирма "Корнинг Гласс" имела как технологию изготовления, так и образцы высокочистого кварцевого стекла. Однако первые попытки изготовить стеклянные волоконные световоды с низкими оптическими потерями методом штабик – трубка не дали результата из-за высоких оптических потерь, обусловленных рассеянием света на границе штабик – трубка. Только осаждение порошка кварцевого стекла, легированного титаном,

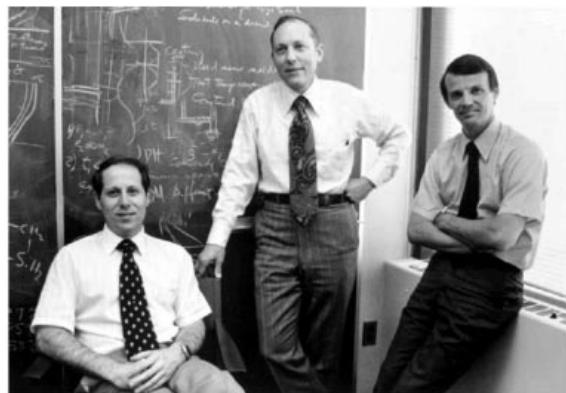


Рис. 3. Слева направо: Дональд Кек, Роберт Маурер, Питер Шульц.

на внутреннюю поверхность трубки из кварцевого стекла с последующими проплавлением пористого слоя, схлопыванием трубки в сплошной стержень (заготовку) и вытяжкой из неё волоконного световода привели к успеху — в 1970 г. были изготовлены волоконные световоды с оптическими потерями 17 дБ км^{-1} на волне $0,63 \text{ мкм}$. В 1972 г. были изготовлены волоконные световоды с сердцевиной из кварцевого стекла, легированного германием, с оптическими потерями 4 дБ км^{-1} . Героями этого выдающегося достижения в оптике были сотрудники "Корнинг Гласс" Роберт Маурер (Robert Maurer), Дональд Кек (Donald Keck) и Питер Шульц (Peter Schultz) (рис. 3).

В том же 1970 г. в СССР (лаборатория Ж.И. Алфёрова) и США была получена непрерывная генерация полупроводникового лазера на основе двойной гетероструктуры GaAlAs при комнатной температуре. В 2000 г. Ж.И. Алфёрову и Г. Крёмеру (Herbert Krömer) присуждена Нобелевская премия по физике "за разработку полупроводниковых гетероструктур, используемых в высокоскоростной электронике и оптоэлектронике". Эти два достижения создали надёжную основу для успешного развития волоконно-оптической связи и инициировали интенсивные фундаментальные исследования во многих странах, в том числе в СССР, по технологии волоконных световодов и их свойствам, совершенствованию элементной базы и созданию волоконно-оптических систем связи.

Что касается фундаментальных исследований волоконных световодов на основе кварцевого стекла, то наибольший интерес представляли характеристики волоконных световодов, важные для практического применения в системах связи: оптические потери, дисперсия, механическая прочность. Большой интерес представляло исследование нелинейных оптических явлений в волоконных световодах, которые могли возникать при передаче оптической информации по волоконному световоду и играть негативную роль. Отметим лишь наиболее важные результаты этих исследований, которые хорошо известны и опубликованы во многих обзорных статьях и книгах по волоконной оптике (см., например, подборку обзорных статей по различным применением волоконной оптики [3]).

Было обнаружено, что минимальные оптические потери волоконных световодов на основе кварцевого стекла соответствуют длинноволновой части ближней инфракрасной (ИК) области спектра (длинам волн $\lambda > 1 \text{ мкм}$). При этом

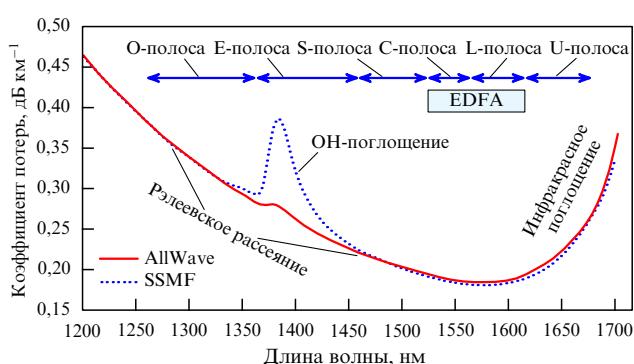


Рис. 4. Спектр оптических потерь волоконных световодов [4]. О, Е, С, С, Л, У — обозначения спектральных полос, используемые в литературе. EDFA — полоса усиления эрбийового волоконного усилителя. AllWave и SSMF (Standard Single Mode Fiber) — типы волоконных световодов.

оптические потери менее $0,35 \text{ дБ км}^{-1}$ соответствуют спектральной области $\lambda = 1,3 - 1,7 \text{ мкм}$, а абсолютного минимума, менее $0,2 \text{ дБ км}^{-1}$, они достигают при длине волны около $\lambda = 1,5 \text{ мкм}$ (рис. 4). Было также обнаружено, что материальная дисперсия кварцевого стекла близка к нулю при $\lambda \approx 1,31 \text{ мкм}$. Исследование механизмов деградации механической прочности волоконных световодов и совершенствование технологии позволили получить волоконные световоды большой длины (порядка 10 км) с механической прочностью на растяжение около 5 ГПа (для световодов диаметром 125 мкм). В работе [5] впервые продемонстрировано, что герметичное металлическое покрытие волоконных световодов позволяет увеличить механическую прочность на растяжение вдвое.

Широкие фундаментальные исследования нелинейных оптических явлений в волоконных световодах показали, что в волоконных световодах, несмотря на низкую нелинейность кварцевого стекла, наблюдаются не только практически все известные нелинейные явления в твёрдом теле, но и ряд новых. Это объясняется большой длиной волоконного световода при низких оптических потерях (т.е. большой длиной взаимодействия) и малыми поперечными размерами сердцевины световода (т.е. высокой плотностью мощности излучения), что резко снижает пороги возникновения нелинейных явлений. Нелинейные явления в волоконных световодах могут играть отрицательную роль в волоконно-оптических системах связи. Так, нелинейные явления, приводящие к преобразованию излучения с основной длиной волны в излучение с другими длинами волн, могут вызывать перекрёстные помехи в случае систем со спектральным уплотнением каналов. Однако было показано, что нелинейные явления могут найти полезное применение в системах связи. Например, усиление сигнала за счёт вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) может эффективно использоваться для компенсации потерь излучения в линиях связи, при этом волоконный световод, по которому передаётся информация, одновременно служит усиливающей средой с широкой полосой усиления.

Здесь уместно отметить, что по инициативе А.М. Прокорова в 1973 г. в Советском Союзе были начаты работы по изготовлению волоконных световодов с низкими

оптическими потерями на основе кварцевого стекла. В качестве исходных соединений использовались высокочистые летучие соединения кремния, германия, бора, разработанные ранее под руководством Г.Г. Девятых.

Уже в начале 1975 г. были получены образцы волоконных световодов с низкими оптическими потерями [6] и начаты фундаментальные исследования этих световодов. Советскими учёными внесён существенный вклад в упомянутые выше результаты фундаментальных исследований. Обзор этих результатов, полученных в 1975–1985 гг., опубликован в обзорной статье [7]. Подробный обзор нелинейных явлений в волоконных световодах содержится в статьях [8, 9].

Приведённые выше результаты фундаментальных исследований волоконных световодов показали перспективность использования спектральной области $1,0 - 1,6 \text{ мкм}$ для передачи информации [10] и инициировали разработку нескольких поколений волоконно-оптических систем связи и их элементной базы.

Отметим лишь наиболее важные результаты этих разработок. В 1980 г. были введены в строй первые коммерческие волоконно-оптические системы связи со скромной скоростью передачи информации, 45 Мбит с^{-1} на длине волны $\lambda = 0,85 \text{ мкм}$. Выбор длины волны несущего излучения определялся наличием соответствующих полупроводниковых лазеров и кремниевых фотодетекторов. В качестве передающей среды в этих системах использовался многомодовый волоконный световод, межмодовая дисперсия которого ограничивала скорость передачи информации.

Для следующего поколения волоконно-оптических систем связи планировалось использовать для передачи информации спектральную область вблизи $\lambda = 1,3 \text{ мкм}$, где материальная дисперсия кварцевого стекла близка к нулю. Это обеспечивало возможность передачи больших потоков информации по одномодовому волоконному световоду, в котором отсутствует межмодовая дисперсия.

Поэтому большие усилия были направлены на разработку элементной базы (прежде всего, одномодовых волоконных световодов, полупроводниковых лазеров и фотодетекторов) и создание волоконно-оптических систем связи, работающих в этой спектральной области. Здесь следует отметить первые работы японских и советских исследователей по созданию лабораторных волоконно-оптических систем связи, работающих на длине волны $\lambda \approx 1,3 \text{ мкм}$ [11, 12]. В 1988 г. по дну Атлантического океана была проложена первая волоконно-оптическая система связи, соединившая Европу и Америку. Система позволяла передавать информацию по одномодовому волоконному световоду на длине волны $\lambda = 1,31 \text{ мкм}$ со скоростью 280 Мбит с^{-1} и использовала ОЭО-регенераторы с преобразованием оптического сигнала в электрический и снова в оптический. Использование ОЭО-регенератора ограничивало скорость передачи информации, поэтому стала задача создания волоконного оптического усилителя сигнала. Интенсивные исследования в этой области привели к разработке двух перспективных волоконных оптических усилителей: эрбийового волоконного усилителя (Erbium Doped Fiber Amplifier — EDFA) [13] и ВКР-волоконного усилителя [14, 15]. Преимущество эрбийового волоконного усилителя состояло в высокой эффективности и совпадении спектральной полосы усиления с областью низких опти-

ческих потерь волоконных световодов (см. рис. 4). Это привело к созданию нового поколения волоконно-оптических систем связи, работающих на длине волн около 1,5 мкм, с оптическим ретранслятором сигнала на основе EDFA. Недостатком эрбиевого волоконного усилителя является узкая полоса усиления, максимум 80 нм (1530–1610 нм), что ограничивает скорость передачи информации современных волоконно-оптических систем.

Преимуществом ВКР-волоконного усилителя является возможность получения значительно более широкой полосы усиления на любой длине волны. Недостаток — невысокая эффективность этого усилителя. Несмотря на это, ВКР-волоконный усилитель используется в коммерческих волоконно-оптических системах связи.

Следующим ярким результатом в разработке высокоскоростных волоконно-оптических систем явилось использование спектрального уплотнения каналов, что позволило увеличить скорость передачи информации по волоконному световоду до терабитного уровня [16]. Советскими учёными внесён существенный вклад на начальном этапе развития техники спектрального уплотнения каналов (см., например, обзорную статью [17] и ссылки в ней).

В завершение этого раздела, посвящённого краткой истории развития волоконно-оптических систем связи — от первых коммерческих систем со скоростью передачи информации 45 Мбит с^{-1} до терабитных систем, хотелось бы подчеркнуть исключительную роль параметров передающей среды (волоконного световода) в этом развитии. Каждому этапу соответствовал волоконный световод с определёнными параметрами (многомодовый, многомодовый с градиентным профилем показателя преломления, одномодовый с нулевой материальной дисперсией, одномодовый с минимальными оптическими потерями и возможностью оптического усиления сигналов и т.д.).

3. Состояние дел и перспективы дальнейшего роста скорости передачи информации по волоконному световоду

В настоящее время в коммерческих волоконно-оптических системах информация может передаваться со скоростью до 10 Тбит с^{-1} , в экспериментальных — со скоростью порядка 100 Тбит с^{-1} . В мире к 2010 г. в системах связи было проложено 1 млрд км волоконных световодов; по оценкам, это число удвоится к 2015 г.

Число пользователей Интернета в 2015 г. достигнет, согласно оценкам, 5 млрд.

Потребность развитых стран в информации возрастает на 30–40 % в год. Это означает, что через 20 лет, если сохранится такой рост потребности в информации, необходимо будет передавать информацию по волоконному световоду со скоростью порядка 100 Пбит с^{-1} . По одномодовым волоконным световодам передавать информацию с такой скоростью невозможно из-за ряда ограничений.

При передаче информации с высокой скоростью, другими словами, с широкой спектральной полосой на большие расстояния критическими являются ряд параметров передающей среды, таких как дисперсия, нелинейность, оптические потери. В экспериментах 1960-х годов по передаче информации через свободную атмосферу с помощью лазерного излучения было обнаружено, что свободная атмосфера не является подходящей передающей средой, прежде всего, из-за пространственной и временной нестабильности таких параметров, как оптические потери и плотность атмосферы. Стеклянные волоконные световоды являются идеальной передающей средой до определённых, достаточно высоких, скоростей передачи информации, порядка ста Тбит с^{-1} . Однако дальнейшее увеличение скорости передачи информации ограничиваются нелинейностью, дисперсией и оптическими потерями волоконных световодов. В то же время эти параметры воздушной атмосферы как таковой по крайней мере на порядок меньше, чем в стеклянных волоконных световодах. Но воздушная атмосфера не должна быть свободной, чтобы её параметры оставались стабильными. Поэтому возникла идея сделать волоконные световоды с воздушной сердцевиной, изолированной от внешних воздействий. Стеклянная оболочка в виде фотонного кристалла обеспечивает в этом случае механизм распространения света по воздушной сердцевине. Такие световоды были созданы и их характеристики подробно исследованы (см., например, работу [18] и приведённые там ссылки). На рисунке 5 показаны структура такого волоконного световода с воздушной сердцевиной и спектр оптических потерь. В настоящее время минимальные оптические потери составляют величину 1,2 дБ км^{-1} , которая значительно превышает минимальные оптические потери стеклянных волоконных световодов (< 0,2 дБ км^{-1} на длине волны 1,5 мкм). Достаточно высокие оптические потери волоконных

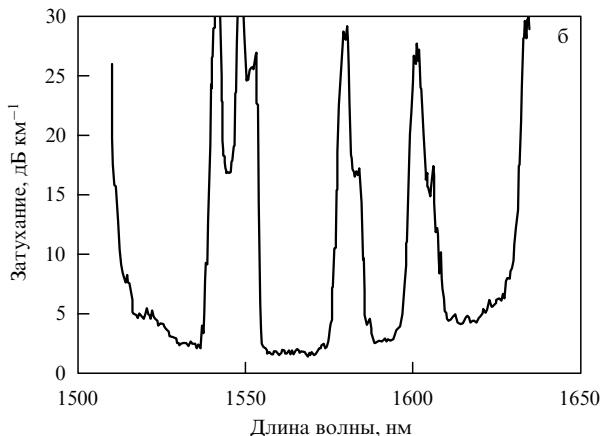
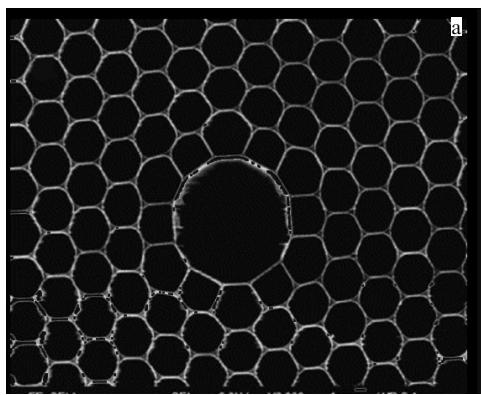


Рис. 5. (а) Поперечное сечение волоконного световода с воздушной сердцевиной. (б) Спектр оптических потерь этого световода [19].

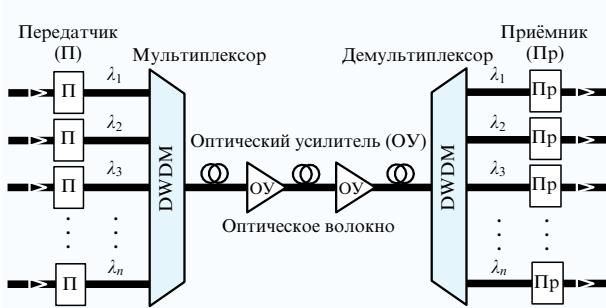


Рис. 6. Схема спектрального уплотнения каналов DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) — плотное спектральное мультиплексирование.

световодов с воздушной сердцевиной объясняются рассеянием света на шероховатостях стекла, обусловленных замороженными поверхностными капиллярными волнами [18].

Решение проблемы снижения оптических потерь таких световодов требует проведения дальнейших фундаментальных исследований, а пока специалисты и учёные ищут другие пути увеличения скорости передачи информации по волоконному световоду.

В настоящее время исследован ряд путей преодоления вышеуказанных ограничений в волоконно-оптических системах со спектральным уплотнением каналов, в которых на сегодняшний день достигнута максимальная скорость передачи информации (рис. 6). В таких системах по одномодовому волоконному световоду распространяются порядка 100 независимых каналов с различными длинами волн несущего излучения, но в пределах полосы усиления оптического усилителя.

Полная скорость передачи информации $B = nb$, где b — скорость передачи одного спектрального канала, а n — число спектральных каналов. Если скорость передачи информации одного спектрального канала равняется 10 Гбит с^{-1} , а число каналов $n = 100$, то полная скорость передачи информации по одному волоконному световоду составит 1 Тбит с^{-1} . Одним из путей повышения скорости передачи информации является увеличение числа спектральных каналов, но для этого необходимо расширить спектральную область для передачи информации. Как видно из рис. 4, спектральная область, в которой оптические потери составляют менее $0,35 \text{ дБ км}^{-1}$, имеет величину 400 нм ($1300\text{--}1700 \text{ нм}$), но для этой спектральной области отсутствуют оптические усилители. Поэтому создание волоконных оптических усилителей для этой спектральной области является приоритетной задачей.

В 2005 г. Научный центр волоконной оптики РАН совместно с Институтом химии высокочистых веществ РАН впервые в мире разработали технологию изготовления легированных висмутом волоконных световодов, спектр люминесценции которых перекрывает указанную спектральную область [20]. В том же году впервые был продемонстрирован висмутовый волоконный лазер с непрерывной генерацией в спектральной области $1150\text{--}1300 \text{ нм}$ [21], а позднее было создано семейство висмутовых волоконных лазеров, генерирующих в спектральной области $1150\text{--}1550 \text{ нм}$ [22]. Использование волоконного световода, легированного висмутом, — новой

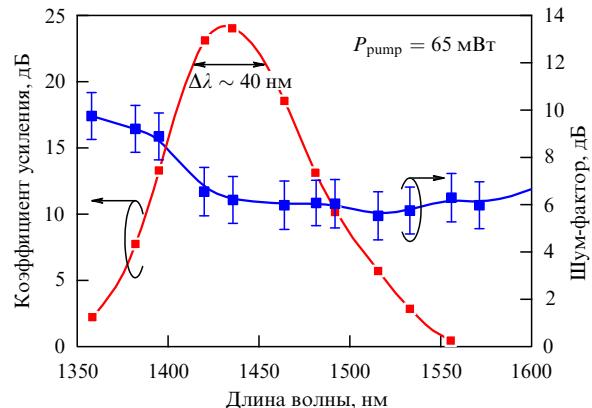


Рис. 7. Спектр усиления висмутового волоконного усилителя.

перспективной активной среды [23, 24] — позволило сделать первый шаг в создании эффективных волоконных усилителей для спектральной области $1300\text{--}1500 \text{ нм}$. Впервые для спектральной области $1425\text{--}1465 \text{ нм}$ были разработан висмутовый волоконный усилитель с максимальным коэффициентом усиления 25 дБ при накачке излучением лазерного диода мощностью 65 мВт на длине волны 1310 нм (рис. 7) [25].

Другой путь увеличения скорости передачи информации по волоконному световоду — это повышение скорости передачи информации спектрального канала b . В настоящее время в соответствии с принятыми стандартами $b = 40 \text{ Гбит с}^{-1}$, но в экспериментах уже получены значения $b = 100 \text{ Гбит с}^{-1}$ за счёт многоуровневой модуляции несущего излучения [26] и продолжаются интенсивные исследования по созданию так называемых суперканалов со значениями $b = 400 \text{ Гбит с}^{-1}$ и выше.

Ещё одним способом увеличения скорости передачи информации, привлекшим в последние годы большое внимание, является пространственное уплотнение каналов путём создания многосердцевинных волоконных световодов и маломодового волоконного световода, в котором каждая мода является носителем независимых каналов.

Ниже будут приведены доложенные на Европейской конференции по оптической связи в 2012 г. новые результаты по созданию суперканалов и разработке многосердцевинных и маломодовых волоконных световодов, соответствующих оптических волоконных усилителей, а также наиболее интересные результаты по передаче информации с пространственным уплотнением каналов.

В работах [27, 28] сообщается о генерации суперканалов со скоростью передачи информации 512 Гбит с^{-1} и $1,5 \text{ Тбит с}^{-1}$ и передача этих каналов на расстояние 2400 км и $56 \times 100 \text{ км}$ соответственно. В работе [29] осуществлена передача восьми суперканалов (со скоростью 603 Гбит с^{-1}) по каждой сердцевине семисердцевинного волоконного световода на расстояние более 845 км .

В настоящее время разработан и исследован ряд многосердцевинных волоконных световодов, включая семисердцевинные, двенадцатисердцевинные, девятнадцатисердцевинные.

Технические требования к многосердцевинным волоконным световодам включают в себя наличие низких оптических потерь всех сердцевин, низких перекрёстных

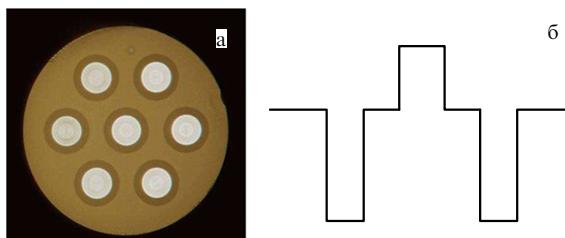


Рис. 8. (а) Типичная структура семисердцевинного волоконного световода. (б) Профиль показателя преломления сердцевин многосердцевинного световода.

помех между соседними сердцевинами и не слишком большого диаметра таких световодов (диаметр оболочки ≤ 200 мкм). На рисунке 8а показана типичная структура семисердцевинного световода. Величина перекрёстных помех зависит от расстояния между соседними сердцевинами. Кроме того, выбором специального профиля показателя преломления (например, как на рис. 8б) можно существенно уменьшить перекрытие оптических полей в соседних сердцевинах, что естественно уменьшает перекрёстные помехи. В работе [30] описывается семисердцевинный волоконный световод с диаметром оболочки 186 мкм и расстоянием между соседними сердцевинами 55 мкм. Профиль показателя преломления сердцевины аналогичен профилю, показанному на рис. 8б. Измеренные перекрёстные помехи между соседними сердцевинами этого световода составляют -40 дБ после прохождения расстояния 100 км.

Разработка передающей среды в виде многосердцевинного волоконного световода для передачи информации на большие расстояния (≥ 100 км) требует в свою очередь разработки многосердцевинных волоконных оптических усилителей. В работе [31] представлены параметры разработанного семисердцевинного эрбиевого волоконного усилителя. Диаметр световода 180 мкм, расстояние между сердцевинами, легированными эрбием, 45 мкм, длина световода 16 м. Получены усиление более 15 дБ при накачке с мощностью 40 мВт, шум-фактор менее 7 дБ, перекрёстные помехи менее -40 дБ.

В работе [32] представлены результаты первой демонстрации передачи сигналов с пространственным уплотнением каналов (семисердцевинный волоконный световод) и с семисердцевинным эрбиевым усилителем на расстояние 6160 км со скоростью передачи информации $35,8$ Тбит s^{-1} . При этом в каждую сердцевину семисердцевинного волоконного световода вводились 40 спектральных каналов со скоростью передачи информации каждого канала 128 Гбит s^{-1} .

Большой интерес представляет создание шестимодового эрбиевого волоконного усилителя, описанного в работе [33]. Проблема создания такого усилителя заключается в обеспечении одинакового усиления сигналов, переносимых различными модами. В работе описывается усилитель шести мод: LP₀₁, LP₁₁ (две вырожденные моды), LP₂₁ (две вырожденные моды) и LP₀₂, которые имеют различное распределение мощности по сечению волоконного световода. Для получения одинакового усиления сигналов, переносимых различными модами, необходимо соответствующее распределение мощности накачки по сечению активного световода.

Авторам пока не удалось полностью решить эту проблему — разница между коэффициентами усиления сигналов для разных мод составляет до 3–4 дБ.

В работе [34] осуществлена передача информации по трёхмодовому волоконному световоду с использованием трёхмодового эрбиевого оптического усилителя на расстояние 119 км со скоростью $73,7$ Тбит s^{-1} . При этом в каждую моду вводилось 96 спектральных каналов со скоростью передачи информации каждого канала 256 Гбит s^{-1} .

И наконец, наиболее замечательным результатом, доложенным на этой конференции, является передача информации по двенадцатисердцевинному световоду со скоростью 1,01 Пбит s^{-1} на расстояние 52 км [35]. В этом эксперименте в каждую из 12 сердцевин вводились 222 спектральных канала, каждый со скоростью передачи информации 456 Гбит s^{-1} . Несущее излучение 222 спектральных каналов занимало спектральные области С и L (1526,44–1565,09 нм и 1567,95–1620,06 нм), при этом частоты несущего излучения соседних каналов отстояли на 50 ГГц.

Представленные результаты показывают перспективность использования пространственного уплотнения каналов для увеличения информационной ёмкости волоконных световодов до петабитного уровня.

К сожалению, Россия не может похвастаться подобными результатами. Несмотря на высокий уровень фундаментальных исследований в области волоконной оптики в институтах Российской академии наук, развитие современных волоконно-оптических средств связи и передачи информации не является в настоящее время в России приоритетной государственной задачей.

4. Заключение

Два выдающихся прорыва в оптике — создание лазеров и разработка стеклянных волоконных световодов с предельно низкими оптическими потерями — обеспечили колоссальный прорыв в разработках средств связи и передачи информации — создание ранее недостижимых высокоскоростных (терабитных) волоконно-оптических систем.

Уровень развития современного общества определяется возможностью использования неограниченно больших потоков информации, и это отражается в настоящее время в росте потребности развитых стран в информации на 30–40 % в год. Современные терабитные волоконно-оптические сети связи и передачи информации превратились в своеобразную нервную систему развитого общества, которая, по аналогии с нервной системой человека, регулирует работу всех органов государства.

Указанный рост потребности в информации означает, что уже в ближайшие 5–10 лет будут необходимы волоконно-оптические системы со скоростью передачи информации по одному волоконному световоду 1–10 Пбит s^{-1} .

Результаты соответствующих исследований, выполненных в последние годы, приведённые в данной статье, показывают реальность решения этой проблемы.

Разработка петабитных систем передачи информации и создание петафлопных суперкомпьютеров означает, что в сфере обработки и передачи информации человечество находится на пороге пета-эры.

Список литературы

1. Kao K C, Hockham G A *Proc. IEE* **133** 1151 (1966); republished, *IEE Proc. J. Optoelectron.* **133** (3) 191 (1986)
2. Schultz P C *Opt. Photon. News* **21** (10) 30 (2010)
3. Alferness R et al. *J. Lightwave Technol.* **26** 990 (2008)
4. Essiambre R-J et al. *J. Lightwave Technol.* **28** 662 (2010)
5. Богатырев В А и др. *Письма в ЖТФ* **14** 769 (1988) [Bogatyrev V A et al. *Sov. Tech. Phys. Lett.* **14** 343 (1988)]
6. Белов А В и др. *Письма в ЖТФ* **1** 689 (1975) [Belov A V et al. *Sov. Tech. Phys. Lett.* **1** 303 (1975)]
7. Дианов Е М, Прохоров А М УФН **148** 289 (1986) [Dianov E M, Prokhorov A M *Sov. Phys. Usp.* **29** 166 (1986)]
8. Дианов Е М, Мамышев П В, Прохоров А М *Квантовая электроника* **15** 5 (1988) [Dianov E M, Mamyshev P V, Prokhorov E M *Sov. J. Quantum Electron.* **18** 1 (1988)]
9. Stolen R H J. *Lightwave Technol.* **26** 1021 (2008)
10. Дианов Е М *Квантовая электроника* **7** 453 (1980) [Dianov E M *Sov. J. Quantum Electron.* **10** 259 (1980)]
11. Ito T et al. *Electron. Lett.* **14** 520 (1978)
12. Алферов Ж И и др. *Квантовая электроника* **5** 2486 (1978) [Alferov Zh I et al. *Sov. J. Quantum Electron.* **8** 1403 (1978)]
13. Mears R J et al. *Electron. Lett.* **23** 1026 (1987)
14. Dianov E M et al., in *Proc. of the 20th European Conf. Optical Communications, Firenze, Italy, September 25–29, 1994*, Vol. 1, p. 427
15. Grubb S et al., in *Proc. Topics Meeting Optical Amplifiers and Their Applications, Breckenridge, CO, USA, 1994*, PD3-1, p. 187
16. Gnauck A H et al. *J. Lightwave Technol.* **26** 1032 (2008)
17. Дианов Е М, Кузнецов А А *Квантовая электроника* **10** 245 (1983) [Dianov E M, Kuznetsov A A *Sov. J. Quantum Electron.* **13** 125 (1983)]
18. Roberts P et al. *Opt. Express* **13** 236 (2005)
19. Mangan B J et al., in *Opt. Fiber Communications Conf., 2004*, PDP
20. Dvoyrin V V et al., in *Technical Digest European Conf. on Optical Communication, Glasgow, UK, 2005*, paper Th.3.3.5
21. Дианов Е М и др. *Квантовая электроника* **35** 1083 (2005) [Dianov E M et al. *Quantum Electron.* **35** 1083 (2005)]
22. Bufetov I A, Dianov E M *Laser Phys. Lett.* **6** 487 (2009)
23. Dianov E M *Light Sci. Appl.* **1** e12 (2012)
24. Дианов Е М *Квантовая электроника* **42** 754 (2012) [Dianov E M *Quantum Electron.* **42** 754 (2012)]
25. Melkumov M A et al. *Opt. Lett.* **36** 2408 (2011)
26. Gringeri S, Basch E B, Xia T J *IEEE Commun. Mag.* **50** (2) S21 (2012)
27. Chien H-C et al., in *Technical Digest 38th European Conf. and Exhibition on Optical Communication, 16–20 September 2012, Amsterdam, Netherlands*, paper Th.2.C.4
28. Liu X et al., in *Technical Digest 38th European Conf. and Exhibition on Optical Communication, 16–20 September 2012, Amsterdam, Netherlands*, paper Th.3.C.5
29. Gnauck A H et al., in *Technical Digest 38th European Conf. and Exhibition on Optical Communication, 16–20 September 2012, Amsterdam, Netherlands*, paper Th.2.C.2
30. Imamura K et al., in *Technical Digest 38th European Conf. and Exhibition on Optical Communication, 16–20 September 2012, Amsterdam, Netherlands*, paper Mo.1.F.2
31. Tsuchida Y et al., in *Technical Digest 38th European Conf. and Exhibition on Optical Communication, 16–20 September 2012, Amsterdam, Netherlands*, paper Tu.4.F.2
32. Takahashi H et al., in *Technical Digest 38th European Conf. and Exhibition on Optical Communication, 16–20 September 2012, Amsterdam, Netherlands*, paper Th.3.C.3
33. Salsi M et al., in *Technical Digest 38th European Conf. and Exhibition on Optical Communication, 16–20 September 2012, Amsterdam, Netherlands*, paper Tu.3.A.6
34. Sleiffer V et al., in *Technical Digest 38th European Conf. and Exhibition on Optical Communication, 16–20 September 2012, Amsterdam, Netherlands*, paper Th.3.C.4
35. Takara H et al., in *Technical Digest 38th European Conf. and Exhibition on Optical Communication, 16–20 September 2012, Amsterdam, Netherlands*, paper Th.3.C.1

PACS numbers: **01.65.+g, 28.70.+y, 89.20.Dd**
DOI: 10.3367/UFNr.0183.201305g.0518

Вклад учёных в Великую Победу на примере ЛФТИ

А.Г. Забродский

1. Введение

Великая Отечественная война — это героические страницы истории СССР и Академии наук СССР, истории Ленинградского физико-технического института (ЛФТИ), судьб его учёных, инженерно-технических работников и рабочих. Статья включает в себя описание событий, определявших деятельность ЛФТИ в этот период, а также важных для понимания происходившего документов. Центральное место отводится анализу разработок учёных Ленинградского физтеха, их значимости для фронта, для обороны Ленинграда, для Победы.

2. ЛФТИ накануне войны

Созданный 23 сентября 1918 г. ЛФТИ быстро выдвинулся в число ведущих научно-исследовательских центров мира. Главная заслуга в этом принадлежит одному из его основателей — Абраму Фёдоровичу Иоффе, руководившему институтом до 1951 г. (рис. 1).

В состав Академии наук (АН) СССР ЛФТИ, принадлежавший ранее Народному комиссариату тяжёлой промышленности (впоследствии — Министерство среднего машиностроения), был введён в 1939 г.



Рис. 1. Академик А.Ф. Иоффе.

А.Г. Забродский. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, РФ
E-mail: Andrei.Zabrodskii@mail.ioffe.ru