

OPTICAL FIBERS FOR
COMMUNICATION

M. P. PETROV

The basic physical properties (such as losses, mode structure, and group velocity) of optical fibers designed for communication are considered. The areas of their application are discussed.

Рассматриваются основные физические свойства: потери, модовая структура и дисперсия групповых скоростей световолокон, предназначенных для оптических линий связи. Обсуждаются области их применения.

СВЕТОВОЛОКНА ДЛЯ
ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

М. П. ПЕТРОВ

Санкт-Петербургский технический университет

ВВЕДЕНИЕ

Оптическая связь подразумевает использование света в качестве носителя информации в каком-либо канале передачи данных. В широком смысле этого понятия оптическая связь существует столько же времени, сколько и само человечество. Любой сигнал, поданный одним человеком при помощи жеста, мимики и т.п. и увиденный другим человеком, можно считать примером сигнала, переданного по оптическому каналу связи. Неважно, каков источник сигнала, важно, что носителем информации является свет. В более узком (техническом) смысле оптическая связь как средство передачи данных известна тоже довольно давно. Это и сигнальные костры у древних, и оптические семафоры, широко распространенные в Европе еще во времена Наполеона, и сигнальные семафоры на флоте, которые используются вплоть до наших дней. Однако с появлением электросвязи, то есть с изобретением телеграфа в 30-х годах прошлого века, затем телефона, а затем и изобретением в 1896 году А.С. Поповым радио, применение оптических систем непосредственно для целей связи перестало играть существенную роль.

В течение всего периода развития электросвязи прогресс в этой области был связан с освоением все более и более высоких частот электромагнитных волн, поскольку увеличение несущей частоты позволяло увеличить пропускную способность каналов. При использовании очень коротких длин волн передается также принципиальная возможность передачи сигналов на значительные расстояния не только в открытом пространстве или по кабелям, но и по волноводам, что позволяет уменьшить потери. Однако даже в миллиметровом диапазоне металлические волноводы являются слишком громоздким и дорогостоящим сооружением, хотя пропускная способность одного волноводного канала связи в миллиметровом диапазоне такова, что может обеспечить 300 тысяч телефонных разговоров одновременно [1]. Тем не менее ограничения технического характера оказались слишком серьезными, чтобы использовать волноводные системы для электросвязи на большие расстояния, даже в миллиметровом диапазоне. Дальнейшее продвижение систем электросвязи в сторону более коротких длин волн фактически остановилось несколько десятилетий назад. Но в это же самое время произошли исключительно важные события в развитии оптики. В 60-е

годы были изобретены лазеры, в 70-е разработана технология получения оптических волокон с чрезвычайно малыми потерями, что создало условия для использования этих волокон в качестве диэлектрических оптических волноводов. Наступил период бурного развития световолоконных линий связи.

ПРЕИМУЩЕСТВА ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

Чем же привлекательна оптика для систем связи? Если экстраполировать тенденции развития электросвязи, то естественным было бы в первую очередь указать на потенциальную широкополосность оптики. Поскольку несущая частота света в видимом диапазоне очень высока (например, для красного света с длиной волны $0,63 \text{ мкм} = 0,63 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ частота колебаний $f_0 = 4,7 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$), то даже если использовать диапазон частот шириной лишь в 1% от f_0 , то этого диапазона хватило бы для передачи в аналоговой форме почти миллиарда телефонных линий или свыше 100 тысяч телевизионных каналов. Однако есть весьма существенные ограничения принципиального характера (такие, как ограниченная когерентность источников света для волоконных линий или наличие дисперсии групповых скоростей, о которой мы подробно будем говорить в одном из разделов), а также ограничения технического характера, связанные с разработкой сверхбыстродействующих систем кодирования информации на входе и декодирования на выходе, которые в действительности не позволяют воспользоваться в полной мере потенциальной широкополосностью оптических систем. Поэтому реальная скорость передачи информации в оптических системах находится лишь на уровне, сравнимом с лучшими радиосистемами. Так в чем же главное преимущество оптики? Сейчас считается, что это чрезвычайно малые потери при распространении света в волокне.

Обычно потери измеряют в децибелах. Если интенсивность света на выходе волокна обозначить как $I_{\text{вых}}$, а интенсивность на входе как $I_{\text{вх}}$, то величина

$$q = 10 \lg \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}},$$

характеризующая потери, измеряется в децибелах. Здесь \lg означает десятичный логарифм. Поскольку $I_{\text{вых}}$ меньше, чем $I_{\text{вх}}$, то логарифм имеет отрицательный знак, который обычно опускают, что не приводит к недоразумениям, если предварительно упомянуто, что речь идет именно о потерях. При затухании света в два раза, то есть когда $I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}} = 0,5$, величина $q = 3 \text{ дБ}$.

Так вот в оптимальном случае потери света при распространении по оптическому волокну составляют около $0,2 \text{ дБ/км}$. Это означает, что интенсивность света уменьшается лишь вдвое на расстоянии в 15 км ! Отсюда следует, что при создании длинных линий связи ретрансляторы (то есть устройства, восстанавливающие интенсивность и другие пара-

метры сигнала) можно размещать на расстояниях в десятки километров, в то время как в электрических кабельных линиях расстояние между ретрансляторами порядка двух километров. Уменьшение числа ретрансляторов дает большую экономическую выгоду.

Это обстоятельство в сочетании с умеренной стоимостью производства световолокна и малыми габаритами волоконных кабелей делают оптические системы предпочтительными в первую очередь с экономической точки зрения. Кроме того, у оптических волоконных систем есть еще немаловажные достоинства, такие, как практически полная нечувствительность к электрическим помехам, отсутствие взаимных помех, высокая механическая и коррозионная прочность, малый вес, отсутствие искрения, что делает высокой эксплуатационную безопасность, и другие. Совокупность всех этих преимуществ увеличивает конкурентоспособность световолоконных систем. Нужно, наверное, сказать, почему акцент делается на волоконные, то есть волноводные оптические системы, а не на распространение света в свободном пространстве. Основных причин две. Первая – это проблема зависимости условий распространения света от состояния атмосферы, и вторая – это дифракционная расходимость светового луча при распространении на большие расстояния. Даже лазерный луч диаметром в 1 см и с длиной волны 1 мкм при прохождении расстояния 100 км расширится до 20 м , что потребует уже громоздких зеркал для эффективной регистрации такого луча. Для преодоления этих трудностей предпринимались попытки создать системы, где свет распространяется внутри трубы, в которой через определенные интервалы размещались линзы для периодической фокусировки света [1]. Такие системы не нашли реального широкого применения. В то же время в оптическом волноводе свет распространяется без уширения и состояние атмосферы не имеет значения. Более того, волоконный кабель может быть проложен на суше, в океане, подвешен на опорах, может проходить через экологически опасные участки.

Заметим, что не волноводные, а открытые системы тем не менее могут представлять интерес для космической связи, в том числе на большие расстояния или в очень специальных наземных устройствах на коротких дистанциях.

КОНСТРУКЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

Наиболее широко распространенные оптические волноводы изготавливаются либо в виде оптического волокна из кварцевого стекла, либо путем создания в кристалле волноводного слоя или канала (рис. 1), в котором показатель преломления n_1 выше, чем в окружающем этот канал материале n_2 . Последний вариант мы не будем рассматривать, так как кристаллические волноводы имеют относительно высокие потери и из них нельзя изготовить

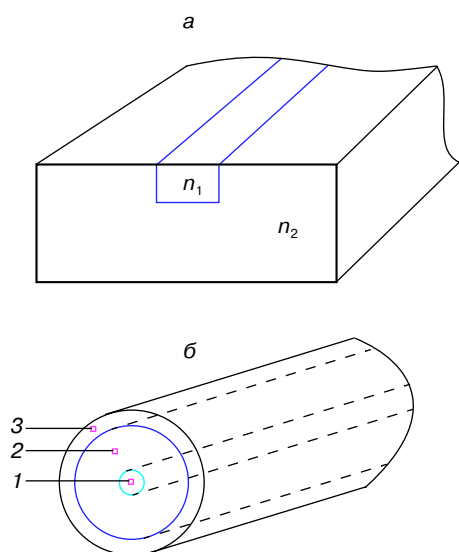


Рис. 1. Примеры канального (а) и световолоконного (б) волноводов. 1 — сердцевина, 2 — оболочка, 3 — защитное покрытие.

длинных волноводов. Обычно длина таких волноводов не превышает нескольких сантиметров, и они используются в устройствах интегральной оптики в качестве модуляторов, переключателей света и т.п.

Вернемся теперь к стекловолокну. Типичный стекловолоконный волновод состоит из трех компонентов (слоев). Первый слой — это сердцевина, то есть центральная световедущая жила из кварцевого стекла. Характерный радиус сердцевины 2 – 5 мкм в так называемых одномодовых волокнах и 25 – 30 мкм в многомодовых волокнах. Затем идет оболочка. Оболочка также является стеклянной, характерное значение ее наружного радиуса 50 – 70 мкм. Затем идет защитная оболочка из полимерного материала, которая может быть многослойной. Наружный диаметр волокна с защитным покрытием составляет 0,5 – 1 мм.

Принципиально важным является то, что показатель преломления сердцевины должен быть несколько выше, чем у оболочки. Разница $n_1 - n_2$ обычно порядка одного процента. Такие волокна называют слаборасходящимися. Превышение n_1 над n_2 необходимо для того, чтобы обеспечить полное внутреннее отражение света на границе сердцевина—оболочка.

КАК ИЗГОТАВЛИВАЕТСЯ СТЕКОВОЛОКНО?

Существуют разные методы изготовления стекловолокон. Одной из наиболее эффективных и распространенных является технология изготовления волокна из кварцевого стекла по методу химического осаждения из газовой фазы. При изготовлении необходимо решить по крайней мере две централь-

ные задачи. Во-первых, обеспечить чрезвычайно высокую химическую чистоту материала, составляющего сердцевину, и, во-вторых, обеспечить высокую однородность вытягиваемого волокна. Делается это следующим образом. Сначала изготавливают заготовку — стеклянный стержень диаметром 5 – 15 мм, имеющий распределение показателя преломления в поперечном сечении такое же, как у будущего световода. Для получения заготовки берут вначале кварцевую трубку из высококачественного стекла. Через трубку продувают смесь газообразного тетраоксида кремния SiCl_4 и кислорода, а трубку прогревают газовой горелкой до высоких температур (вплоть до 1500°C). Тогда в результате химической реакции на внутренней поверхности трубки осаждается чистый кварц SiO_2 . Высокая степень химической чистоты этого кварца обеспечивается высокой чистотой газовых компонент SiCl_4 и O_2 . Полученный тонкий слой будет служить составной частью в будущей оболочке. Затем процесс нанесения слоев на внутреннюю поверхность повторяется, но в состав газовой смеси добавляется еще тетраоксид германия GeCl_4 . Тогда в осажденном слое кварца содержится некоторое количество германия, что обеспечивает более высокий показатель преломления в этом слое, который служит основой будущей сердцевины.

Затем полую стеклянную трубку с нанесенными на внутреннюю поверхность слоями кварца прогревают до размягчения, и она за счет сил поверхностного натяжения сжимается в стержень. Заготовка готова. Для того чтобы из нее получить волокно, заготовку помещают в устройство для вытяжки, где она устанавливается вертикально, и нижний конец нагревают до плавления. За этот конец производится вытяжка. Для обеспечения нужной толщины производится регулировка скорости вытяжки и температуры нагревания. Правильный подбор и поддержание нужной скорости вытяжки важны для получения волокна высокой однородности. Вытягиваемое волокно покрывают защитной оболочкой и наматывают на барабан. Если в процессе изготовления заготовки производится нагрев до более высоких температур и выбирается более высокое давление газовой фазы, так что химическая реакция происходит не только на внутренней поверхности трубки, но и в газовом потоке, то указанный метод называют модифицированным способом осаждения из газовой фазы. Если слои с примесью германия наносятся так, что показатель преломления n_1 в сердцевине постоянен по сечению сердцевины, то тогда распределение показателя преломления в волокне называется ступенчатым. Если концентрация германия изменяется так, что показатель преломления сердцевины плавно уменьшается вдоль радиуса, проведенного от центральной оси к оболочке, то такое волокно называется градиентным.

Из отдельных волокон могут быть изготовлены кабели различного профиля, содержащие до нескольких десятков отдельных волокон.

ОПТИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В СЕТЕВОЛОКНЕ

Имеется несколько источников затухания света при его распространении по волокну. Некоторые из них устранимы, а некоторые нет. Волокна низкого качества содержат примеси, которые поглощают свет, а также дефекты (мелкие пузырьки, трещины, неоднородности толщины и т.п.), которые вызывают рассеяние света. Технологии изготовления волокна, существовавшие до конца шестидесятых годов, не обеспечивали изготовление волокна высокого качества и потери составляли порядка 100 – 1000 дБ/км. В таких волокнах свет затухает в два раза на расстоянии порядка десятка метров. В шестидесятые годы ученые предсказывали, что для применения световолокон для целей связи необходимо, чтобы затухание не превосходило 20 дБ/км. В 1970 году компания “Корнинг гласс компани” сумела изготовить волокно с такими потерями, после чего интерес к оптическим волокнам резко возрос. Чтобы устранить поглощение, обусловленное примесями, необходимо иметь концентрацию примесей ионов 3d-группы (железо, хром, марганец, кобальт и др.) в количестве менее 1 атома на 10^9 атомов основного материала. Технология осаждения из газовой фазы тем и хороша, что газовая фаза может быть очищена от примесей в нужной степени. Следующая примесь, которая играет исключительно важную роль, — это пары воды, точнее, гидроксильная группа OH^- . Колебания атомов $\text{O}-\text{H}$ вызывают сильное поглощение не только на основной частоте, соответствующей длине волны 2,73 мкм, но и на комбинационных частотах вблизи 1,2 – 1,4 мкм.

Необходимо обеспечивать очень хорошее обезвоживание материала при изготовлении волокна (концентрация OH^- менее 10^{-8} [2]), чтобы обеспечить потери менее 1 дБ на длине волны 1,5 мкм. Более того, даже готовое волокно требует дополнительной защиты от проникновения молекул воды, так как за длительный период эксплуатации пары воды могут за счет диффузии проникать в оболочку и сердцевину. Несмотря на столь жесткие требования, успехи в технологии изготовления волокон таковы, что в лучших образцах потери составляют около 0,2 дБ/км.

Но можно ли создать кварцевое волокно с еще меньшими потерями? Практически нельзя, так как указанная величина потерь близка к теоретическому пределу, обусловленному уже фундаментальными, а не технологическими причинами. Наиболее важными фундаментальными причинами затухания света являются рэлеевское рассеяние и поглощение света атомами, из которых состоит волокно. Рэлеевское рассеяние представляет собой рассеяние света на микронеоднородностях стекла, размер

которых меньше длины волны света. Микронеоднородности возникают из-за того, что при температурах изготовления волокна (выше точки плавления) неизбежно существуют неоднородности плотности и химического состава вещества за счет хаотического движения молекул при высокой температуре. И эти флуктуации тем больше, чем выше температура. При охлаждении ниже точки плавления (для кварца это 1940°C) эти микронеоднородности как бы замораживаются [3]. Наличие неоднородностей плотности вещества и его состава приводит к неоднородностям показателя преломления, на которых и происходит рассеяние света. Потери за счет рэлеевского рассеяния обратно пропорциональны длине волны в четвертой степени. Поэтому они наиболее существенны для коротких длин волн (на рис. 2 это длины волн короче 1,5 мкм). Для больших длин волн более существенную роль играют потери за счет поглощения света при колебаниях атомов, из которых состоит кварц. Хотя фундаментальные частоты колебаний пар атомов $\text{Si}-\text{O}$, $\text{Ge}-\text{O}$ лежат в области 10 мкм, тем не менее края полос поглощения простираются до единиц микрон. В результате комбинации рэлеевского рассеяния и инфракрасного поглощения имеет место абсолютный минимум потерь вблизи 1,5 мкм.

Заметим, что этот минимум характерен для кварцевых волокон. Для волокон другого состава зависимость потерь от длины волны света будет иной.

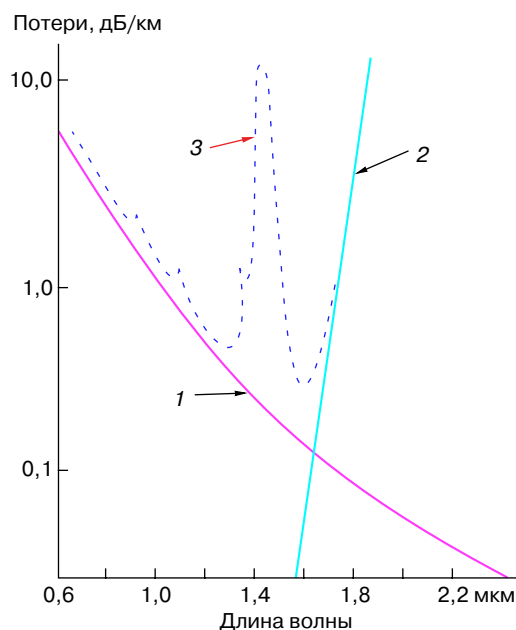


Рис. 2. Качественная схема зависимости оптических потерь от длины волны света: 1 — рэлеевское рассеяние, 2 — край фундаментального инфракрасного поглощения, 3 — пример спектра поглощения гидроксильной группы OH^- .

ВОЛНОВОДНЫЕ МОДЫ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ

Если пользоваться представлениями и терминами геометрической оптики (что в нашем случае строго справедливо, лишь если длина волны света много меньше поперечных размеров сердцевины волокна), то в основе распространения света по волокну лежит эффект полного внутреннего отражения (рис. 3). Этот эффект наблюдается тогда, когда свет падает из более плотной оптической среды (то есть среды, обладающей большим показателем преломления) на оптически менее плотную среду ($n_1 > n_2$). Тогда при углах θ , больших некоторого критического угла θ_c , который определяется из условия

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}, \tag{1}$$

свет не проникает во вторую среду, а полностью отражается от границы раздела. Заметим, что более детальное рассмотрение показывает, что в некоторой степени свет во вторую среду проникает, но так, что его амплитуда очень быстро (по экспоненциальному закону) спадает от границы раздела. К этому вопросу мы еще вернемся в дальнейшем.

Если слой с показателем преломления n_1 находится между двумя слоями с n_2 , то свет будет распространяться только внутри центрального слоя с n_1 . Это и есть пример оптического волновода. Такой волновод обладает очень интересным свойством. Оказывается, что распространяющимися в нем будут только такие лучи, которые падают под определенными (дискретными) значениями угла θ . Связано это вот с чем. Вспомним, что луч света — это световая волна. Если в волновод, изображенный на рис. 3б, вводится свет в виде плоской волны, то в результате отражений от верхней и нижней границы

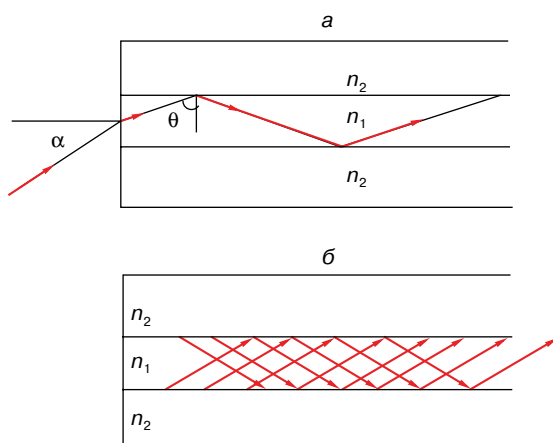


Рис. 3. Распространение света в плоском волноводе. а – Траектория луча света при полном внутреннем отражении; б – суперпозиция плоских волн в волноводе.

свет в слое l можно считать суперпозицией (наложением) двух волн: одна распространяется снизу вверх, а другая сверху вниз. Между этими волнами возникает интерференция, то есть в некоторых точках колебания электрического поля складываются, а в некоторых вычитаются. Может случиться так, что одна волна полностью погасит другую. Тогда свет вообще не будет распространяться вдоль волновода. Однако при специальных углах θ накладывающиеся волны интерферируют конструктивно, не гасят друг друга, и поэтому свет беспрепятственно распространяется по слою l . В строгой теории при решении уравнений Максвелла для диэлектрического волновода каждому такому углу соответствует собственное решение. Это решение называется собственной модой (или просто модой) данного волновода. Каждой моде соответствует свое распределение поля по сечению волновода. Иногда оно имеет простой вид, например, изменяется как функция $\sin K_m x$ или $\cos K_m x$, где K_m — соответствующий волновой вектор для моды с “номером” m , иногда весьма сложный, если в волноводе может распространяться много мод и сам волновод не плоский. Каждая мода распространяется со своей скоростью.

Если волновод идеальный, то моды не взаимодействуют между собой, то есть свет, сосредоточенный в одной моде, не переходит в другую. Но если создать какие-либо дефекты или неоднородности (например, изгибы, скрутки волокна), то моды будут взаимодействовать между собой.

Число распространяющихся мод N при данной длине волны ограничено и определяется размерами волновода (радиусом сердцевины R_c), длиной волны λ и разностью $n_1 - n_2$.

Для круглого волокна со ступенчатым распределением

$$N = \frac{2\pi^2 R_c^2}{\lambda^2} (n_1^2 - n_2^2). \tag{2}$$

Полезно упомянуть также о таком параметре волновода, как числовая апертура NA , который указывает, какой максимальный угол ввода света из воздуха в волновод возможен для возбуждения распространяющихся мод (рис. 3):

$$NA = \sin \alpha = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \tag{3}$$

Представление поля в волноводе в виде невзаимодействующих мод дает очень удобную возможность расчета поля на выходе волокна. Если есть распределение поля на входе, то его можно представить как суперпозицию мод волновода, затем учесть, какие разности фаз возникают на выходе за счет разной скорости распространения, и затем снова просуммировать распределение полей разных мод на выходе. Однако для точных расчетов удобно пользоваться понятием мод только для волноводов

с относительно небольшим числом мод. В случае большого числа мод анализ методами геометрической оптики (решение уравнения Эйконала) более удобен.

Какими свойствами обладают моды в световом волокне? Рассмотрим сначала одномодовое волокно. Стекло, как и любой другой диэлектрический волновод, обладает замечательным свойством. Формально в нем всегда, то есть при любой длине волны, может распространяться хотя бы одна мода. Эту моду называют фундаментальной. Условием, при котором в волокне распространяется только фундаментальная мода, является требование, чтобы так называемая нормализованная частота V была меньше 2,405.

Нормализованная частота

$$V = \frac{2\pi R_c}{\lambda} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}. \quad (4)$$

Профиль поля для фундаментальной моды по сечению волокна имеет максимум в центре, а затем поле экспоненциально спадает по радиусу, проникая и в оболочку.

Если обеспечить такие условия, что V становится равной или несколько большей 2,405 (например, уменьшая длину волны света, вводимого в волокно), то появляются условия для возбуждения второй моды. При дальнейшем уменьшении длины волны будут возбуждаться моды более высокого порядка.

В многомодовом волокне могут существовать моды, глубоко проникающие в оболочку, а также собственные моды оболочки. Эти моды, хотя и являются разновидностью распространяющихся мод, достаточно сильно затухают. Их называют модами утечки. При наличии макронеоднородностей в волокне (изгибы, скрутки) слабо затухающие распространяющиеся моды могут взаимодействовать с модами утечки, отдавая им часть энергии, что повышает дополнительные потери для распространяющихся мод.

Как уже упоминалось, каждая мода в волноводе имеет свою скорость распространения и соответственно свой набег, то есть приращение фазы в зависимости от длины пути распространения. Это приводит, в частности, к тому, что картина распределения поля, которая была на входе многомодового волокна, не сохраняется. Например, если на входе свет был сфокусирован в точку в центре сердцевинки, то на выходе достаточно длинного многомодового волокна мы увидим сложную пятнистую картину. Однако имеется один замечательный тип волокна, где можно обеспечить равенство (с некоторой ограниченной точностью, конечно) скоростей распространения мод. Это так называемые градиентные волокна (рис. 4). В градиентном волокне показатель преломления меняется не ступенькой при переходе от сердцевинки к оболочке, а плавно уменьшается от центра сердцевинки к границе раздела. Оказывается, что можно подобрать профиль изменения пока-

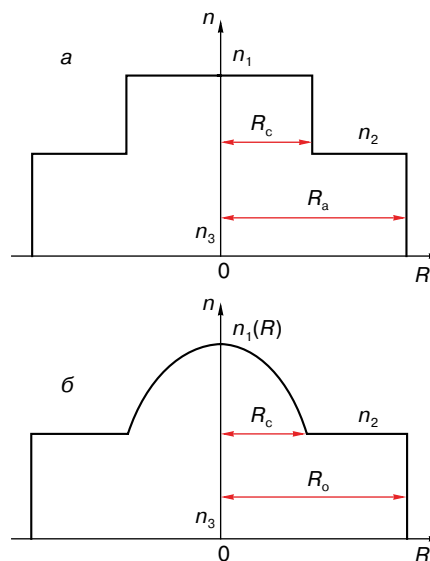


Рис. 4. Распределение показателя преломления по сечению волокна. *а* – Ступенчатое волокно (n_3 — показатель преломления защитной оболочки, R_c — радиус сердцевинки, R_o — радиус оболочки); *б* — градиентное волокно.

зателя преломления так, что удастся выровнять скорости мод распространения в волокне. Качественно этот эффект можно пояснить следующим образом. Если луч света падает под большим углом к оси волновода, то он отражается от слоя, который находится ближе к оболочке. Луч, падающий под меньшим углом, отражается от слоя, расположенного ближе к оси. Тогда первый луч имеет большую геометрическую длину пути распространения, но зато проводит больше времени в области, где показатель преломления меньше. В итоге этот луч имеет такую же оптическую длину распространения, как и второй луч, у которого геометрический путь короче, но зато он распространяется в области с большим показателем преломления. Хотя время распространения от входа до выхода для таких лучей не идеально точно совпадает, тем не менее это свойство выравнивания оптических путей или времени распространения в определенном виде градиентных волокон чрезвычайно полезно для оптических систем связи.

ДИСПЕРСИЯ ГРУППОВЫХ СКОРОСТЕЙ

Информация по волоконным линиям связи передается в основном в виде коротких световых импульсов (импульсно-кодовая модуляция). Очевидно, что чем короче импульс, тем больше импульсов в единицу времени можно передать, то есть тем выше будет пропускная способность линии. Но чем короче импульс, тем шире его спектр. Ширина спектра импульса $\Delta f \approx 1/t_u$, где t_u — длительность импульса.

Потенциально световой луч может иметь ширину спектра, сравнимую с его несущей частотой, то есть t_u могут быть порядка $10^{-13} - 10^{-14}$ секунд. Вопрос в том, можно ли такие короткие импульсы использовать на практике для передачи информации.

Трудности здесь возникают разного характера. Во-первых, как создать такие короткие импульсы и обеспечить их кодовую модуляцию; во-вторых, как зарегистрировать эти импульсы на выходе и, в-третьих, может ли волокно пропускать такие импульсы без искажений, то есть без потери информации? Остановимся только на последнем вопросе.

Световой импульс распространяется со скоростью, которая называется групповой скоростью V_g . Напомним, что в соответствии с теорией Фурье любой, в том числе и световой, импульс может быть представлен в виде совокупности (суперпозиции) большого числа простых волн с различными частотами. Общий спектр этих частот приблизительно Δf . В зависимости от свойств среды, в которой распространяется импульс, скорости распространения этих элементарных волн могут быть равны между собой (например, в вакууме), а могут отличаться в зависимости от частоты каждой волны. Скорость распространения импульса, то есть групповая скорость, может не совпадать со скоростью распространения элементарных волн. Более того, если скорости элементарных волн не равны между собой, то это приводит к искажению формы импульса и его уширению. Круг явлений, связанных с изменением формы импульса вследствие зависимости скорости распространения элементарных компонент от частоты, называют дисперсией групповых скоростей (ДГС). Количественно ДГС определяется производной $dV_g/d\omega$, где ω — частота света. Экспериментально ДГС можно характеризовать параметром

$$D = \frac{dt_g}{d\lambda}.$$

Здесь $t_g = 1/V_g$ — это так называемое групповое время, то есть время, за которое импульс проходит единицу длины, например один километр. Величина D тогда характеризует, как изменится t_g , если изменить длину волны на $d\lambda$.

Поскольку размерность $[D]$ есть пикосекунда/(нанометр · километр), то для наглядности этот параметр можно интерпретировать как величину уширения импульса на D пикосекунд, если импульс проходит длину пути в один километр, а спектр импульса в единицах длин волн равен одному нанометру (этому спектру соответствует длительность импульса порядка единиц пикосекунд, то есть 10^{-12} с, при длине волны в 1 мкм).

Эффект ДГС играет важную и крайне отрицательную роль в системах связи (хотя в других случаях эффект может быть полезен). Рассмотрим основные источники ДГС. Первый, наиболее важный источник — это межмодовая дисперсия. Как уже

упоминалось, в многомодовом волокне со ступенчатым показателем преломления скорости распространения мод различны. Отсюда следует, что если на входе импульс света возбуждает много мод, то сигнал разобьется на такое же число импульсов, сколько возбуждено мод, и каждый импульс будет двигаться со своей групповой скоростью, присущей данной моде. Естественно, что после прохождения некоторого расстояния одни импульсы уйдут вперед, другие отстанут, и в целом произойдет уширение исходного импульса. Межмодовая дисперсия настолько велика, что если взять ступенчатое волокно с разумным $\Delta n = n_1 - n_2 \sim 0,01$, то разброс групповых скоростей или времен для разных мод будет также порядка одного процента. Это гигантская величина, из которой следует, что импульс с длительностью в 10^{-9} с (1 наносекунда) уширится вдвое уже на расстояниях порядка 30 м. Отсюда следует, что многомодовые волокна со ступенчатым показателем преломления могут использоваться только на коротких расстояниях и для передачи достаточно длинных (по оптическим стандартам) импульсов порядка микро- или наносекунд.

Значительно лучше обстоит дело у градиентных волокон, поскольку в них скорости распространения разных мод приблизительно равны. Межмодовая дисперсия в градиентных волокнах может быть в десять — сто раз меньше. Соответственно, длины линий связи могут достигать километров при длительностях импульса порядка наносекунд.

Радикальным решением проблемы межмодовой дисперсии является переход к одномодовому волокну. Поскольку здесь отсутствует межмодовая дисперсия, то наиболее существенными оказываются два других типа дисперсии: материальная и внутримодовая. Материальная дисперсия определяется зависимостью показателя преломления от частоты света и прямо связана с химическим составом материала (в данном случае кварцевого стекла). Величина $|D| = 0 - 15$ пс/(км · нм) в интервале длин волн между 1,2 и 1,5 мкм.

Внутримодовая дисперсия возникает из-за того, что одна и та же мода, но возбужденная на разных частотах света, будет иметь несколько разную скорость распространения. Обычно материальная дисперсия больше внутримодовой, но в кварцевом волокне вблизи длины волны в 1,3 мкм материальная дисперсия также мала и даже меняет знак, проходя через нулевое значение. Вблизи этой длины волны возможна взаимная компенсация обоих видов дисперсии. Наличие области длин волн, где дисперсия близка к нулю, делает очень привлекательной длину волны в 1,3 мкм для длинных линий связи, где расстояние между ретрансляторами составляет десятки, а в будущем, возможно, и более сотни километров.

Заметим, что существует и другое решение проблемы преодоления уширения импульсов в

результате ДГС. Это использование оптических со- литонов. Но об этом пойдет речь в другой статье.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выше мы рассмотрели некоторые важнейшие физические свойства оптических волокон, пред- назначенных для оптических линий связи. Из этого анализа теперь ясно, что для различных областей применения оптимальными могут быть разные ти- пы волокон. Для коротких и средних дистанций это многомодовые, в том числе градиентные, волокна; для длинных линий — одномодовые волокна. Хотя одномодовые волокна имеют несомненные пре- имущества с точки зрения пропускной способнос- ти, они более сложны в изготовлении, более дороги и, что очень существенно, с ними труднее работать. Дело в том, что из-за малого размера сердцевин (2 — 5 мкм) их весьма сложно состыковывать между собой. Кроме того, одномодовое волокно требует и одномодового источника света, причем с профилем излучения, согласованным с профилем моды в во- локне. Тем не менее для мощных систем связи с вы- сокой пропускной способностью и для связи на дальние расстояния эти волокна вне конкуренции.

Какая длина волны лучше? Основными “сопер- ницами” являются длина волны 1,5 мкм, где мини- мальные потери, и 1,3 мкм, где минимальна диспер-

сия. В разных странах и в разных условиях использования применяются и та, и другая длины волн. Существенную роль в этой конкуренции мо- гут сыграть также другие факторы, а именно нали- чие подходящих источников и усилителей света, в том числе и световолоконных. Об этом мы будем го- ворить в следующих статьях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Оокоси Т.* Оптоэлектроника и оптическая связь. М.: Мир, 1978.
2. *Гауэр Дж.* Оптические системы связи. М.: Радио и связь, 1989.
3. *Унгер Х.-Г.* Планарные и волоконные оптические волноводы. М.: Мир, 1980.

* * *

Михаил Петрович Петров, профессор, доктор физико-математических наук, заведующий лабо- раторией квантовой электроники Физико-техниче- ского института им. А.Ф. Иоффе РАН. Читает курс лекций по физическим основам оптики в Санкт-Пе- тербургском техническом университете. Удостоен Государственной премии СССР. В настоящее время активно работает в области нелинейных явле- ний в оптических волокнах. Совместно с соавтора- ми им опубликованы 3 монографии и более двухсот статей.