

ПРОЯВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

Беспрозванных А.В., к.т.н., доц.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электроизоляционная и кабельная техника"

Перехід з традиційних електричних кабелів зв'язку на оптичні примусив розглянути питання, пов'язані з нелінійними ефектами в волокну при розповсюдженні оптичного випромінювання.

Переход с традиционных электрических кабелей связи на оптические заставил рассмотреть вопросы, связанные с нелинейными эффектами в волокне при распространении оптического излучения.

ВВЕДЕНИЕ

Нелинейные эффекты в волокне обусловлены нелинейной зависимостью силы от расстояния между основными атомами в кварце Si-O и атомами примесей O-H (гидроксиды воды). В результате валентные колебания атомов (направленные вдоль связи) становятся несинусоидальными: в спектре поглощения наблюдаются, кроме основной частоты f_{ϕ} , также поглощения на частоте $2 \cdot f_{\phi}$ (второй обертоном), $3 \cdot f_{\phi}$ (третий обертоном) и т.д. Появляется также комбинационное поглощение на частотах $2 \cdot f_{\phi} + f_k$, $2 \cdot f_{\phi} + 2 \cdot f_k$, $3 \cdot f_{\phi} + 3 \cdot f_k$, где f_{ϕ} - фундаментальная частота поглощения основной примеси в кварцевом волокне - гидроксильной группы (OH), f_k - фундаментальная частота поглощения основы кварцевого волокна (Si-O) [1-2].

Именно понимание механизма поглощения в области длин волн $0,8 - 1,55$ мкм, обусловленное нелинейным эффектом колебаний, позволило создать оптические волокна с затуханием менее $0,2$ дБ/км путем удаления примесей гидроксидов.

Введение же примесей редкоземельных металлов, нелинейные колебания которых происходят в том же диапазоне длин волн, привело к нелинейным эффектам, на основе которых были созданы оптические усилители на волокнах [3-9].

Цель статьи - анализ нелинейных явлений в оптических волокнах, связанных как с примесями, так и с самой основой волокна при распространении оптического излучения.

1. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ, СВЯЗАННЫЕ С ПРИМЕСНЫМИ ГИДРОКСИЛЬНЫМИ ГРУППАМИ

С первыми признаками нелинейных эффектов (НЭ) в оптическом волокне (ОВ) велась решительная борьба. Они, как выяснилось, были причиной высокого (до 20 дБ/км) затухания. Хотя Као и Хокэм - сотрудники Standard Telecommunication Labs (Великобритания, 1966 г.) - считали, что даже с таким уровнем затухания ОВ будут вытеснять электрические кабели связи, поэтому содержание вредных примесей гидроксидов OH старались уменьшить. В результате фирме Corning в 1979 г. удалось получить волокна с затуханием $0,2$ дБ/км на длине волны $\lambda = 1,55$ мкм.

Фундаментальная частота f_{ϕ} колебаний межатомной связи O-H соответствует $2,73$ мкм (волновое число $\nu = 1/\lambda = 3\ 600$ 1/см). Нелинейная зависимость квазиупругой силы от расстояния приводит к ангармоничности колебаний связи OH⁻ в кварцевом волок-

не. В спектре появляются полосы поглощения, связанные с первой, второй ($2 \cdot f_{\phi}$), третьей ($3 \cdot f_{\phi}$) гармониками (обертонами). В свою очередь взаимодействие этих колебаний с колебаниями связи Si-O (которая сама по себе проявляется на длине волны $12,5$ мкм) приводит к появлению в спектре дополнительных полос поглощения, соответствующих комбинационным частотам $2 \cdot f_{\phi} + f_k$, $2 \cdot f_{\phi} + 2 \cdot f_k$ (табл.1).

Таблица 1
Полосы поглощения гидроксидов OH

Резонансная длина волны λ , мкм	1,39	1,24	1,13	0,95	0,88
Частоты	$2 \cdot f_{\phi}$	$2 \cdot f_{\phi} + f_k$	$2 \cdot f_{\phi} + 2 \cdot f_k$	$3 \cdot f_{\phi}$	$3 \cdot f_{\phi} + 3 \cdot f_k$
Поглощение за счет присутствия OH ⁻ (концентрация 10^{-6}) дБ/км	65	2,3	0,1	1,0	0,05

Поэтому для волокон, работающих в диапазоне длин волн $\lambda = 0,8 - 1,55$ мкм, концентрация водяных паров должна быть не более 10^{-9} (1 миллиграмм воды на 1 тонну кварца). Тогда можно использовать и так называемое 5-е окно прозрачности - в диапазоне от $1,325$ до $1,450$ мкм (рис.1), что принято в широкополосной системе плотного волнового мультиплексирования (DWDM).

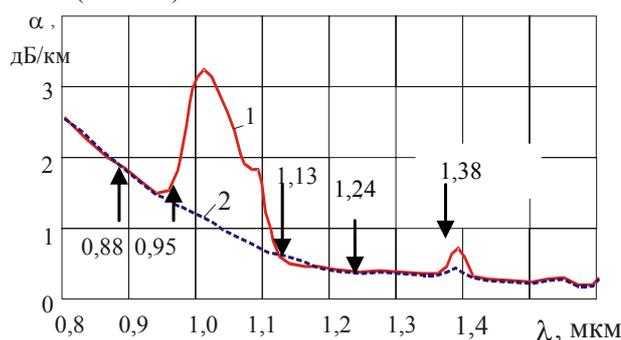


Рис.1 Спектральные зависимости коэффициента затухания кварцевых волокон: 1 - с примесями гидроксидов OH⁻; 2 - без них (содержание 10^{-9})

В оптическом кабеле волокно надежно защищают от влаги первичное и вторичное защитные покрытия, гидрофобные гели, водоблокирующие и водонабухающие пленки и нити, промежуточная и защитная оболочки.

2. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ, СВЯЗАННЫЕ С КВАРЦЕВОЙ ОСНОВОЙ ОВ

Одномодовые оптические волокна с очень низкими потерями являются основой для создания протяженных широкополосных систем связи. Диаметр ($2a$) сердцевины таких волокон на порядок меньше, чем у многомодовых ОВ и составляет 5 – 8 мкм (в зависимости от рабочей длины волны). Одномодовые ОВ работают с полупроводниковыми лазерами, мощность излучения которых ($P_{\text{ввод}}$) выше, чем у светодиодов, используемых с многомодовыми ОВ. Поэтому в одномодовом ОВ легче возникают условия для проявления эффектов нелинейной поляризации кварца.

Поляризуемость диэлектрика P пропорциональна напряженности поля E только в слабых электрических полях. В сильных полях, характерных для сердцевины ОВ при работе с лазерами, поляризуемость зависит от E нелинейно:

$$P = \chi^{(1)} \cdot E + \chi^{(2)} \cdot E + \chi^{(3)} \cdot E + \chi^{(4)} \cdot E + \dots \quad (1)$$

Первый нелинейный член $\chi^{(2)} \cdot E^2$ в изотропных материалах и кристаллах с центром симметрии равен нулю (Он связан с генерацией второй гармоники).

Все нелинейные эффекты, проявляющиеся в кварцевых оптических волокнах, связаны с нелинейностью третьего порядка $\chi^{(3)} \cdot E^3$. Эти эффекты можно разделить на два класса. Они отличаются тем, колеблется ли наведенная поляризация с частотой падающего поля ω или нет. К первому классу относятся так называемые самоиндуцированные эффекты, которые описываются с помощью нелинейного показателя преломления (оптический эффект Керра). Ко второму классу относятся вынужденное рассеяние Манделштама – Бриллюэна (ВРМБ), вынужденное комбинационное рассеяние – рассеяние Рамана (ВКР), четырехволновое смешивание.

Кварц имеет низкую нелинейную восприимчивость $\chi^{(3)}$. Но при большой протяженности одномодовых ОВ нелинейные эффекты накапливаются и становятся явно выраженными [8].

В протяженных волоконно-оптических системах связи нелинейные ВРМБ, ВКР являются ограничивающим фактором для мощности, вводимой в сердцевину одномодового волокна. В обоих случаях в результате таких нелинейных эффектов в волокне распространяются три волны: падающая (волна накачки), сигнальная (Стоксовская или Манделштам – Бриллюэновская) и волна, связанная либо с колебательным возмущением молекул среды, либо со звуковой волной. В результате взаимодействия часть энергии, которая вначале содержится в волне накачки, постепенно преобразуется в сигнальную волну, распространяющуюся в случае ВКР в прямом и обратном направлениях. В случае ВРМБ сигнальная волна распространяется только в обратном направлении.

Вынужденное комбинационное рассеяние наблюдается при использовании широкополосных лазеров. Пороговое значение мощности накачки $P_{\text{порог}}$ для ВКР составляет 1 Вт (30 дБм). При $P \geq P_{\text{порог}}$ нелинейный эффект ВКР становится доминирующим в волокне.

ВРМБ наблюдается при использовании узкопо-

лосных лазеров. Пороговое значение мощности накачки $P_{\text{порог}}$ для ВРМБ составляет 10 мВт. При $P \geq P_{\text{порог}}$ значительная часть интенсивности волны накачки, распространяющейся вперед, преобразуется в распространяющуюся назад сигнальную волну. Мощности этой волны может быть достаточно для “встряски” электронов лазера и генерации импульса. А это приводит к появлению ошибки в системе. (Для синхронных цифровых сетей (SDH) вероятность ошибки должна быть не выше 10^{-9} .)

Таким образом, как ВКР, так и ВРМБ, являются нежелательными нелинейными эффектами в оптических волокнах протяженных волоконно-оптических систем. Для их уменьшения необходимо уменьшать мощность водимого сигнала либо увеличивать диаметр сердцевины волокна.

Одномодовые оптические волокна работают в одномодовом режиме при значении нормализованной частоты $V < 2,405$. Нормализованная частота V связана с диаметром сердцевины $2 \cdot a$, длиной волны λ и числовой апертурой волокна $NA = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}$ выражением:

$$V = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{\lambda} \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}, \quad (2)$$

где n_1, n_2 - значения показателей преломления сердцевины и светотражающей оболочки соответственно.

Поэтому увеличение диаметра сердцевины $2a$ при сохранении одномодового режима возможно только путем создания волокон с определенным профилем показателя преломления.

3. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ СИГНАЛА

Отрезки оптического волокна, в которых с помощью мощного дополнительного лазера накачки индуцируются нелинейные эффекты, могут использоваться в качестве оптических усилителей. Диаметр сердцевины волокон таких усилителей уменьшают до 2 – 4 мкм. Это приводит к росту напряженности поля и усилению доли нелинейной поляризации. Известны три разновидности усилителей на оптических волокнах.

1) Усилители с использованием бриллюэновского рассеяния.

За счет явления электрострикции наблюдается изменение геометрических размеров одномодового ОВ на основе кварца. Возникают упругие тепловые когерентные волны. Интерференция упругих волн приводит к появлению узлов (волны в противофазе) и пучностей (волны в одинаковой фазе). В результате образуются локальные неоднородности плотности, на которых и происходит рассеяние волны накачки. В спектре излучения появляется новая волна, частота которой соответствует частоте основного информационного сигнала. Коэффициент усиления таких усилителей составляет 30 дБ. Однако они не дают возможности усиливать одновременно несколько сигналов, что необходимо для технологии волнового мультиплексирования (WDM).

2) Усилители на волокне с использованием комбинационного (Рамановского) рассеяния.

За счет комбинационного рассеяния света, связанного с колебательными и вращательными перехо-

дами рассеивающих молекул, в спектре появляются волны меньшей и большей частоты, чем несущая частота лазера накачки. Волны большей частоты (меньшей длины волны) называются *антистоксовыми*. Волны меньшей частоты (большей длины волны) называются *стоксовыми*. При использовании в качестве источника света лазера с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм (Nd: YAG) в одномодовом ОВ появляются стоксовские световые волны на длинах 1,12, 1,18, 1,24 и 1,31 мкм (рис. 2). Разнос между несущими равен 60 нм. Усилитель на основе такого волокна и лазера накачки может использоваться только в технологии WDM.

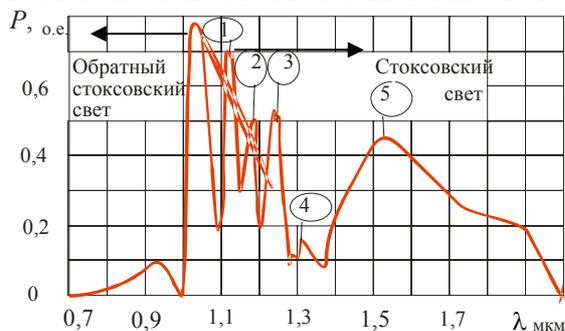


Рис.2 Спектр рамановского рассеяния в оптическом волокне: 1 – 5 – характерные максимумы стоксовского рассеяния при возбуждении волокна на длине волны 1,06 мкм

3) Усилители на примесных волокнах.

В чистом кварце ширина запрещенной зоны ΔE для электронов (разность энергий зоны проводимости и зоны валентных электронов) составляет 8,9 эВ:

$$\Delta E = h \cdot \nu \quad (3)$$

где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, ν – частота электронных переходов.

Соответствующая длина волны λ равна: $\lambda = v_{\text{ф}} \cdot t = v_{\text{ф}} / \nu = (c \cdot h) / (\Delta E \cdot n) = (3 \cdot 10^8 \cdot 6,626 \cdot 10^{-34}) / (8,9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,5) = 0,09$ мкм = 90 нм. Она лежит в ультрафиолетовом диапазоне. Ионные резонансы связи Si–O соответствуют длине волны $\lambda = 9$ мкм.

Создание широкополосных усилителей на основе кварца возможно только при уменьшении ширины запрещенной зоны. Это достигается введением примесей. Только редкоземельные металлы – лантаноиды дают возможность получать пики поглощения и соответственно излучения на тех же длинах волн, на которых работают оптические волокна на основе кварца. Введение примесей создает активную, по сути лазерную, структуру. Двухуровневая или трехуровневая модель взаимодействия матрицы (кварца) и примеси зависит от длины волны (рис. 3). Наиболее предпочтительным редкоземельным металлом является *эрбий*. Ионы эрбия имеют пики поглощения в диапазоне длин волн 0,532; 0,660; 0,808; 0,980 и 1,480 мкм.

Поэтому источники накачки должны работать на этих длинах волн. Межатомное взаимодействие приводит к уширению уровней основного (базового), возбужденного (верхнего) и промежуточного (нижнего) состояний. В оптических усилителях на волокнах, легированных эрбием (EDFA), наиболее широкая зона усиления от 1,530 до 1,560 мкм достигается при длине волны лазера накачки 0,980 мкм. При этом создается

трехуровневая структура. Применение лазеров на длину волны 1,480 мкм приводит к образованию двухуровневой структуры и, как следствие, менее эффективно. Введение совместно с эрбием *иттербия* позволяет расширить спектр поглощения в области 0,7 – 1,1 мкм. Для таких усилителей применяются более мощные лазеры накачки на длину волны 1,053 мкм. Основной недостаток усилителей EDFA на основе кварца – неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). В окрестности длины волны 1,540 мкм имеется "завал" (рис. 4а). Для преодоления этого недостатка при плотном волновом мультиплексировании (DWDM) могут использоваться усилители на волокнах без содержания кислорода, в частности, на фтор-цирконатной основе. Равномерность АЧХ (рис. 4б) в данном случае объясняется тем, что фтор-цирконатная основа способна поглотить больше эрбия, чем кварцевая, нелинейные эффекты в ней будут выражены сильнее.

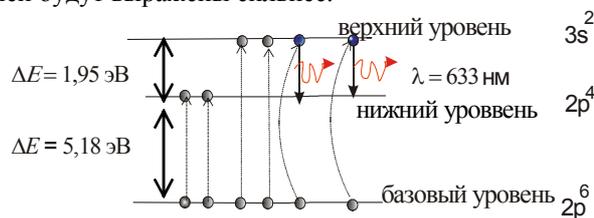


Рис.3 Трехуровневая энергетическая модель активной оптической среды (неона в гелий-неоновом лазере)

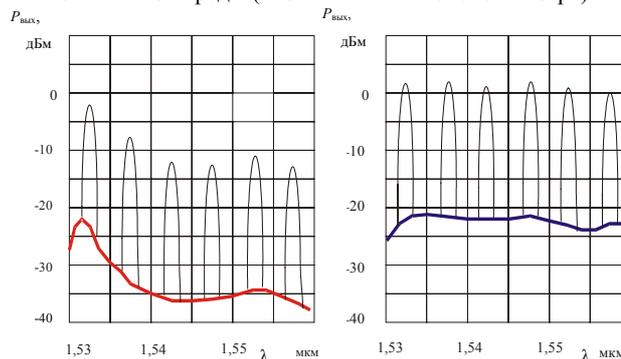


Рис.4 Типичные амплитудно-частотные характеристики усилителей на легированных эрбием волокнах: а) на кремневой основе ("завал" в области 1,54 мкм); б) на фтор-цирконатной основе

4. НЕЛИНЕЙНЫЙ ЭФФЕКТ ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОГО СМЕШИВАНИЯ

Он проявляется при использовании технологии волнового мультиплексирования (WDM) в волоконно-оптических системах связи на одномодовых волокнах. Волновое мультиплексирование означает, что волокно работает на нескольких несущих – длинах волн. В начале это были две длины волн – 1,31 (второе окно прозрачности) и 1,55 мкм (третье окно прозрачности). Разнос несущих составлял 1,55 – 1,31 = 0,24 мкм. Это дало возможность увеличить емкость системы в два раза. При использовании технологии плотного волнового мультиплексирования (DWDM) разнос несущих составляет 0,002 мкм = 2 нм. В качестве волокон использовались одномодовые волокна с *нулевой смещенной дисперсией* (DSF). Эти волокна

имеют минимальное затухание и минимальную хроматическую дисперсию на длине волны 1,55 мкм.

Хроматическая дисперсия связана с тем, что источник оптического излучения излучает не одну длину волны λ (частоту ω), а несколько длин волн. Это приводит к появлению дисперсии: *материальной* и *волноводной*. Материальная дисперсия обусловлена зависимостью показателя преломления от длины волны в дисперсионной среде (рис. 9). Волноводная дисперсия – зависимостью постоянной распространения β_{11} моды от длины волны. В одномодовых оптических волокнах большая часть мощности волны распространяется в сердцевине с показателем преломления n_1 , а меньшая – в светоотражающей оболочке с показателем преломления n_2 . Причем $n_1 > n_2$. Характер зависимости этих составляющих разный.

Материальная дисперсия с ростом длины волны уменьшается, меняя знак с “+” на “-” на длине волны $\lambda_{0м} \approx 1,26$ мкм – длине волны *нулевой материальной дисперсии* (для волокна на основе 100% SiO₂). Волноводная дисперсия с ростом длины волны растет, т.к. все большая доля мощности волны распространяется в светоотражающей оболочке. Чем меньше диаметр сердцевины, тем больше волноводная дисперсия.

Компенсация указанных составляющих дисперсии происходит для волокон на основе кварца на длине волны $\lambda \approx 1,31$ мкм – длине волны *нулевой хроматической дисперсии*. Длина волны $\lambda \approx 1,3$ мкм является вторым окном прозрачности для волокон на основе кварца.

Сдвинуть дисперсионный минимум в область больших длин волн возможно за счет выбора профиля показателя преломления и диаметра сердцевины. В оптическом волокне со *смещенной дисперсией* дисперсионный минимум наблюдается на длине волны $\lambda = 1,55$ мкм. На этой длине волны коэффициент затухания α также минимален. Изменение хроматической дисперсии в окне 1,55 мкм составляет 3,5 пс/нм·км. Это значит, что при использовании полупроводникового лазера с шириной спектра 1 нм увеличение длительности сигнала составит всего 3,5 пс на 1 км. На протяжении многих лет такое ОВ считалось самым перспективным. Но применение его в технологии WDM с усилителями на ОВ, легированных эрбием, привело к появлению нежелательных нелинейных эффектов - *четырёхволновому смешиванию*.

Волна распространяется с групповой скоростью. Именно с ней связан перенос максимума мощности волны. В дисперсионной среде групповая скорость не равна фазовой. Фазовая скорость связана со скоростью распространения фазы $v_\phi = \omega/k$. В среде с показателем преломления n она в n раз меньше, чем в вакууме. (В вакууме фазовая скорость равна $c = 3 \cdot 10^8$ м/с). Поэтому в кварце ($n = 1,5$) фазовая скорость в 1,5 раза меньше, чем в вакууме, и составляет $2 \cdot 10^8$ м/с.

Групповая скорость определяется как $v_{гр} = d\omega/dk$, где $k = 2 \cdot \pi \cdot n/\lambda$ – модуль волнового вектора в среде. Вблизи длины волны нулевой хроматической дисперсии фазовые показатели преломления несущих отличаются не существенно. Поэтому для сигналов с несущими частотами ω_1 и ω_2 , расположенными сим-

метрично относительно длины волны нулевой дисперсии, групповые скорости будут различаться также не существенно. В такой ситуации фазовый синхронизм будет практически выполняться. Поэтому генерируются две боковые гармоники разностных частот: *стоксова* – $(2\omega_1 - \omega_2)$ и *антистоксова* – $(2\omega_2 - \omega_1)$ (рис. 5). Соответственно мощность несущих волн перераспределяется между двумя дополнительными гармониками. В результате резко возрастает шум при распространении многоканального сигнала.

Для уменьшения эффекта четырехволнового смешивания в одномодовое оптическое волокно со смещенной дисперсией (DSF) необходимо вводить сигналы меньшей мощности, увеличивать расстояние между каналами и избегать передачи парных каналов, симметричных относительно длины волны нулевой дисперсии. Оптимальным решением является использование оптического волокна с ненулевой смещенной дисперсией (NZDF). Хроматическая дисперсия в таком волокне имеет повышенное значение в диапазоне длины волны 1,550 мкм. Длина волны нулевой хроматической дисперсии вынесена за пределы работы оптического усилителя на волокне, легированном эрбием. В таком случае условие фазового синхронизма выполняться не будет. Значит, и четырехволновое смешивание также проявляться не будет.

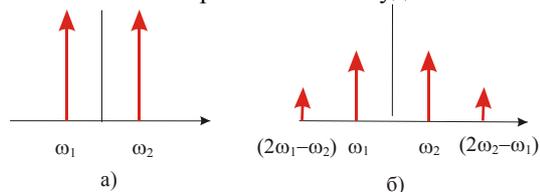


Рис.5 Эффект четырехволнового смешивания а) в линейной среде; б) в нелинейной среде

В волокне TeraLight (фирма ALCATEL) хроматическая дисперсия составляет 8,0 пс/нм·км на длине волны $\lambda = 1,550$ мкм, 8,9 пс/нм·км на $\lambda = 1,565$ мкм и 10,9 пс/нм·км на $\lambda = 1,600$ мкм. За счет увеличенного до $9,2 \pm 0,5$ мкм диаметра модового поля удалось увеличить мощность оптического сигнала в системе, улучшить соотношение сигнал – шум и увеличить расстояние между усилителями в сети со скоростью передачи 10 Гбит/с (STM- 64).

5. ГЕНЕРАЦИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ СОЛИТОНОВ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ

Одним из самых перспективных нелинейных эффектов для обеспечения передачи информационных сигналов без регенераторов в волокне является создание условий для распространения солитона. *Солитон* – нелинейный процесс распространения волн, при котором его форма не испытывает дисперсионных искажений. Для генерации и распространения солитона в сердцевине оптического волокна необходимо выполнение ряда условий.

В области слабых световых полей наблюдается линейная поляризация связанных зарядов материала сердцевины. В этом случае поведение связанного электрона описывается с помощью модели Друде – классического гармонического осциллятора. Поляри-

зуюемость α , диэлектрическая проницаемость ϵ и фазовый показатель преломления n не зависят от напряженности поля.

В области сильных световых полей связанный электрон рассматривается как ангармонический осциллятор. Поляризуемость α , диэлектрическая проницаемость ϵ и фазовый показатель преломления n зависят от напряженности внешнего поля.

Для изотропных материалов и кристаллов с центром симметрии характерен нелинейный эффект третьего порядка. Значение напряженности внешней электромагнитной волны, при которой линейный и нелинейный отклики равнозначны, обратно пропорционально кубичной диэлектрической восприимчивости $\chi^{(3)}$:

$$1/E_{\text{внешн}} \cong \chi^{(3)} \quad (4)$$

Значение $\chi^{(3)}$ для кварца очень мало и составляет $\approx 10^{-22}$. Поэтому для наблюдения заметных нелинейных эффектов в сердцевине оптического волокна необходимы сильные световые поля или специальные легирующие примеси, которые увеличивают естественную нелинейность кварца (рис. 6).

Показатель преломления в области сильных световых полей складывается из обычного линейного фазового показателя преломления и нелинейного. Последний зависит от свойств среды (рис. 6) и напряженности $E_{\text{внешн}}$ (интенсивности $I_{\text{внешн}}$) поля (рис. 7) (оптический эффект Керра):

$$n = \sqrt{\epsilon_{\text{лн}}(\lambda)} \pm \sqrt{\left(\frac{3}{4} \cdot \chi^{(3)} \cdot E_{\text{внешн}}^2\right)} = n_{\text{лн}}(\lambda) \pm \Delta n_{\text{нл}} \cdot E_{\text{внешн}}^2 = n_{\text{лн}}(\lambda) \pm n_{\text{нл}} \quad (5)$$

$\Delta n_{\text{нл}} \propto i^2 / A^2$

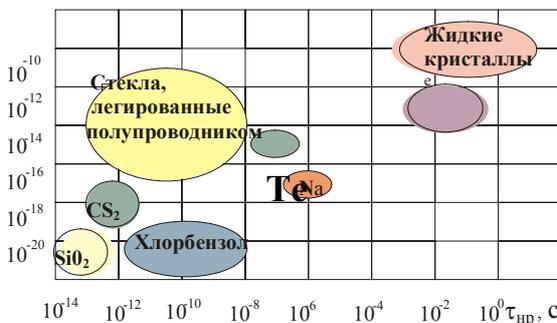


Рис. 6 Связь нелинейной составляющей показателя преломления разных материалов со временем установления нерезонансной поляризации

Для материалов на основе кварца нелинейная добавка $\Delta n_{\text{нл}}$ к показателю преломления имеет положительный знак: $n = n_{\text{лн}}(\lambda) + n_{\text{нл}}$ и составляет $\approx 10^{-22} \text{ м}^2/\text{В}^2$. При распространении сильной световой волны в однородной сердцевине одномодового оптического волокна будет наблюдаться наведенная неоднородность (аналог градиентного волокна) в силу распределения напряженности моды HE_{11} в поперечном сечении оптического волокна (рис. 7). Волокно работает как фокусирующая линза (рис. 8).

При критической (пороговой) мощности $P_{\text{пор}}$ све-

товой волны будет наблюдаться баланс между дифракционной расходимостью и рефракцией поля моды HE_{11}

$$P_{\text{пор}} = \epsilon_0 \cdot c \cdot \pi \cdot \frac{(1,22 \cdot \lambda)^2}{64 \cdot \Delta n_{\text{нл}}} \quad (6)$$

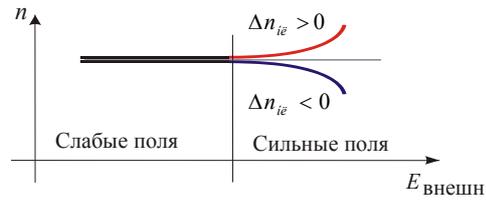


Рис. 7. Качественные зависимости показателя преломления n от напряженности поля ($E_{\text{внешн}}$) с разным характером нелинейности

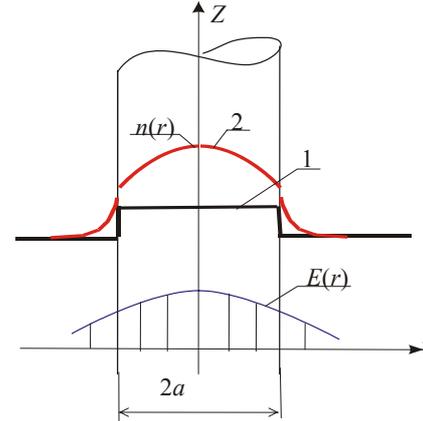


Рис. 8. Распределение показателя преломления $n(r)$ в сердцевине волокна в области слабых (1) и сильных (2) полей; $E(r)$ – характер распределения напряженности

В этом случае форма импульса остается неизменной. Отсутствует дисперсионное увеличение длительности световых импульсов. Пороговая мощность зависит от длины волны и свойств среды распространения. Чем больше длина волны, тем меньшее значение пороговой мощности требуется для достижения солитонного режима. Чем больше естественная нелинейность среды $\Delta n_{\text{нл}}$, тем меньшее значение пороговой мощности необходимо для генерации солитона.

При мощности световой волны $P < P_{\text{пор}}$ дифракционная расходимость доминирует над рефракцией. Световой пучок расширяется.

При $P > P_{\text{пор}}$ рефракция доминирует над дифракционной расходимостью. Световой пучок сжимается [Это явление используется для создания компрессоров на основе одномодовых оптических волокон (сжатия световых пучков)]. При увеличении мощности волны процесс может завершиться световым пробоем.

В процессе распространения световой волны с пороговым значением мощности $P_{\text{пор}}$ в сердцевине одномодового оптического волокна наблюдается эффект фазовой самомодуляции. Фаза волны равна:

$$\varphi = (2\pi/\lambda) \cdot n_{\text{лн}} \cdot z - (2\pi/\lambda) \cdot n_{\text{нл}} \cdot z \cdot I_{\text{внешн}} \quad (7)$$

Интенсивность волны изменяется во времени как за счет нестабильности излучения лазера, так и за счет изменения диаметра сердцевины волокна. Это приведет к изменению фазы во времени:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta n_{\text{нл}} \cdot z \cdot \frac{\partial I_{\text{внешн}}}{\partial t} \quad (8)$$

При $\frac{\partial I_{\text{внешн}}}{\partial t} > 0$ лазерный пучок расширяется. Это возможно в реальном оптическом волокне, диаметр сердцевины которого имеет флуктуации по длине волокна. (Допуски на диаметр модового поля сердцевины одномодового волокна составляют в соответствии с рекомендациями G.652 $(9,0 - 10,0) \pm 10\%$ на длине волны $\lambda = 1,3$ мкм).

Для компенсации расширения светового луча необходимо, чтобы $\frac{\partial^2 n}{\partial \omega^2} < 0$ ($\frac{\partial^2 n}{\partial \lambda^2} > 0$) (рис.9).

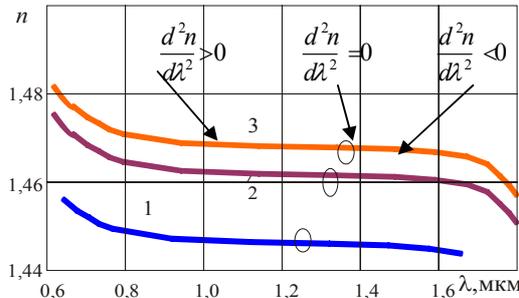


Рис.9 Зависимости фазового показателя преломления от длины волны: 1 – кварц (100% SiO₂), 2 – кварц, легированный P₂O₅ (9,1%), 3 – кварц, легированный GeO₂ (13,5%)

Волокно должно работать в области *аномальной дисперсии*. Для оптических волокон на основе кварца это соответствует длине волны нулевой материальной дисперсии $\lambda_{\text{ом}}$ (вблизи 1,3 мкм). При $\lambda < \lambda_{\text{ом}}$ длинноволновые составляющие (красные) движутся быстрее коротковолновых (синих). При $\lambda > \lambda_{\text{ом}}$ ситуация меняется на противоположную: длинноволновые составляющие движутся медленнее коротковолновых (рис.10). При длине волны $\lambda = \lambda_{\text{ом}}$ длинноволновые (красные) и коротковолновые (синие) будут двигаться с одинаковой скоростью. Поэтому в диапазоне длины волны 1,3 мкм расширение светового пучка за счет увеличения интенсивности волны в месте уменьшения диаметра сердцевины волокна будет компенсироваться аномальной дисперсией.

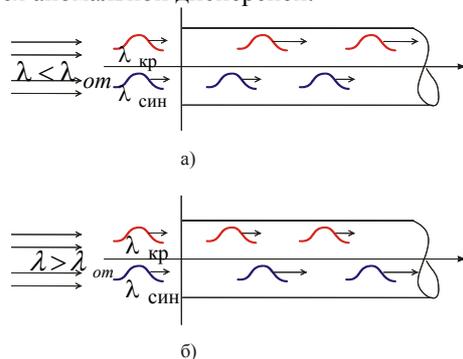


Рис.10 Схематическое изображение явления аномальной дисперсии: а) в области длин волн, меньших нулевой материальной дисперсии; б) в области длин волн, больших нулевой материальной дисперсии

Здесь $\lambda_{\text{кр}}$, $\lambda_{\text{син}}$ – длинноволновая и коротковолновая составляющие импульса, вводимого в волокно
Использование солитонного режима работы оп-

тического волокна обеспечивает передачу сигналов на значительные расстояния без использования регенераторов. Для компенсации потерь при распространении в диссипативной среде – кварце – используются оптические усилители EDFA.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нелинейные эффекты в оптических волокнах могут быть как вредными, так и полезными. Вред приносят ангармоничные колебания гидроксила воды (самой опасной из примесей в кварцевом волокне), вынужденное рассеяние Манделъштама – Бриллюэна, вынужденное комбинационное рассеяние (рассеяние Рамана), четырехволновое смешивание (в протяженных высокоскоростных волоконно-оптических системах связи).

Введение примесей редкоземельных металлов в кварцевое волокно способствует появлению нелинейных эффектов, позволяющих усиливать сигнал. Использование солитонов позволяет увеличивать скорость передачи информации по оптическому волокну.

Разнообразные проявления нелинейных эффектов, наблюдаемые в оптических волокнах, уникальны в своей совокупности и не имеют аналогов в других отраслях техники.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Справочник по волоконно-оптическим линиям связи. Андрушко Л.М., Вознесенский В.Б., Каток В.Б. и др. – Под редакцией акад. С.В. Свечникова и Л.М. Андрушко. – К.:Тэхника, 1988.- 239 с.
- [2] Гроднев И.И., Ларин Ю.Т., Теумин И.И. Оптические кабели. – М.: Энергоатомиздат, 1990. -173 с.
- [3] Бломберген Н. Нелинейная оптика.- Перевод под редакцией Ахманова С.А., Хохлова Р.В. М.:Мир, 1966.- 424с.
- [4] Ф.Цернике, Дж. Мидвинтер Прикладная нелинейная оптика. – М.: Мир, 1976. – 261 с.
- [5] С.Солимено, Б.Крозиньяни, П. Ди Порто Дифракция и волноводное распространение оптического излучения. –М.: Мир, 1989.- 662 с.
- [6] Крауфорд Ф. Волны: Учебное руководство: Пер. с англ./ Под ред. А.И. Шальникова и А.О. Вайсенберга.- 3-е изд., испр.- М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984.- Берклевский курс физики. – 512 с.
- [7] Бутиков Е.И. Оптика. Учебное пособие для студентов физических специальностей вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Невский Диалект; БХВ – Петербург, 2003.- 480с.
- [8] Т. Окуси, К. Окамото, М.Оцу, Х. Нисихара и др. Волоконно-оптические датчики. - Под ред. Т.Окуси: Пер. с япон. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1990. – 256 с.
- [9] Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. – М.:Эко-Трендз, 1998.-267 с.
- [10] Беспрозванных А.В. Нелинейные явления в оптических кабелях. - Информационные технологии: наука, технология, образование. Здоровье.: - Сборник научных трудов ХГПУ. Вып. 6. В четырех частях. Ч.1. – Харьков: Харьк. Гос. Политехн. Ун-т, 1998. – с.465 - 469 567с.

Надійшла 01.06.2004