

УДК 681.128.56

**А. Х. СУЛТАНОВ, И. А. ШАРИФГАЛИЕВ, В. И. КАНАКОВ,
И. Л. ВИНОГРАДОВА**

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ СТЕКЛАХ НА ПЕРЕДАВАЕМЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ СИГНАЛ

Показана значимость разработки перспективных волоконно-оптических компонентов управления оптическими потоками для полностью оптических телекоммуникационных систем. Предложено для этой цели использовать оптический мелкозернистый кварцевый материал. Изучен способ получения мелкозернистого кварца методом интенсивной пластической деформации. Исследован спектр поглощения такого материала в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, а также вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ). По отношению к аналогичному крупнозернистому материалу получено отличие в спектре поглощения и в проявлении ВРМБ. Проведена аналитическая оценка влияния нелинейного преломления на импульсный сигнал в системе передачи. Сделан вывод о возможности применения такого материала в многолучевых волоконно-оптических телекоммуникационных устройствах. *Волоконно-оптическая система передачи; мелкозернистый кварцевый материал; спектр поглощения; вынужденное рассеяние; многолучевой интерферометр*

ВВЕДЕНИЕ

Наметившаяся в последние 10 лет тенденция развития современных систем телекоммуникаций связана с широкомасштабным внедрением оптических технологий для передачи сообщений. Это, с одной стороны, является следствием стремительного развития волоконной и интегрально-оптической техники, с другой стороны, продиктовано требованиями информационных технологий, машиностроения и пр., всеми областями, где используются телекоммуникации и выставляются требования как по увеличению информационной ёмкости канала, скорости обработки сообщений, так и по надёжности системы связи. Решение задач телекоммуникаций на базе электронных компонентов не только ограничивает быстродействие системы в целом, но в ряде случаев требует дополнительной инженерной проработки для обеспечения надёжности и отказоустойчивости элементов системы. Последнее связано с внедрением систем телекоммуникаций на промышленных предприятиях с повышенным уровнем воздействующих факторов, в том числе на предприятиях топливно-энергетического комплекса (ТЭК), объектах военного и спе-

циального назначения и т. д. На таких сетях, с одной стороны, характерно значительное влияние внешних воздействий — электромагнитных помех (от работающих промышленных агрегатов, высоковольтных линий электропередач), фоновых излучений, широкополосной вибрации, температурных флуктуаций и связанных с ними возмущений и т. д., с другой стороны, к каждому элементу системы (активной преобразующей аппаратуре, узлам управления световыми потоками на базе электрических или магнитных потенциалов, их электрическим блокам питания, электрическим проводам и разъёмам) предъявляются требования по обеспечению соответствующего уровня пожаровзрывобезопасности в соответствии с действующими стандартами [1] в зависимости от требований производства.

Новые технические задачи, поставленные промышленностью перед системами телекоммуникаций по увеличению скорости, объёмов передаваемой информации, её достоверности и надёжности, расширению областей технических приложений, приводят к необходимости пересмотра фундаментальных принципов не только проектирования, управления и контроля объектов систем связи, но и физических принципов построе-

ния их компонентов. Перспективным является направление на создание полностью оптических транспортных сетей (AON-сетей, [2]), в функционировании которых главную роль при коммутации, мультиплексировании, фильтрации, перегруппировании, ретрансляции играют не электронные (оптоэлектронные), а полностью оптические технологии и компоненты. Сегодня ведущие фирмы-производители телекоммуникационного оборудования предлагают образцы оптических компонентов управления световыми потоками. Как правило, это WDM (DWDM) мультиплексоры, волоконно-оптические усилители, фильтры, коммутаторы и т. д. Здесь следует провести разграничение между полностью оптическими AON-компонентами и компонентами, в которых управление световым информационным потоком осуществляется действием электрических, магнитных потенциалов (электрооптические эффекты Керра, Поккельса, Фарадея [3] и т. д.), т. е. такими, в которых конструктивно заложено наличие электронных функциональных узлов. Например, работа WDM-мультиплексоров основана на дифракционном разделении световых волн разных длин [2, 3], следовательно, эти устройства не требуют дополнительного использования электроники в отличие от моделей переменных затенювателей, в которых затухание регулируется путём изменения величины воздушного зазора при помощи пьезоэлектрика, или оптических изоляторов, использующих эффект магнитного вращения плоскости поляризации проходящей световой волны. Другой широко распространённый, по сути ключевой элемент в технологии полностью оптических сетей — волоконно-оптический усилитель (световод, легированный эрбием — EDFA), используемый для усиления до уровня порядка 1 мВт слабого информационного сигнала в третьем окне прозрачности [2] 1530 ... 1560 нм при накачке мощным излучением (≈ 100 мВт) на более короткой длине волны. На сегодняшний день применяется в известной схеме включения, когда лазер накачки располагается в непосредственной близости от EDFA. Такой способ включения требует подведения электропитания для лазера накачки в зону усиления, что в ряде технических приложений приводит к существенному усложнению и удорожанию системы телекоммуникаций, тем самым практически сводя на нет достоинства новой технологии усиления без использования электронных усилителей-регенераторов.

Практически не решены такие задачи, как разработка «управляемых» коэффициентов отражения и преломления, на базе которых можно было бы получить новые компоненты управления информационными оптическими потоками — многоканальные разветвители, фильтры, преобразователи физических величин, бистабильные нелинейные элементы и т. д. В последних создание нелинейного режима (значимой нелинейной поправки к показателю преломления материала) является основой их работы — обеспечения бистабильного режима прохождения для информационного оптического потока [4] без появления негативных факторов, связанных с другими нелинейными эффектами. Но при мощности излучения, обеспечивающей требуемый нелинейный режим, появляется значительное паразитное рассеяние на гиперзвуковой волне (эффект вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна [5] — ВРМБ). Следовательно, уменьшение влияния ВРМБ приведёт к заметному положительному эффекту, что, в свою очередь, возможно, позволит осуществить реализацию новых функций управления световыми потоками и упростить технологию передачи сигналов.

Следовательно, разработка принципов конструкций и проведение математического моделирования перспективных оптических компонентов, предназначенных для использования в AON-сетях (в том числе для эксплуатации в нестандартных условиях) преимущественно без использования управляющих электронных компонентов, является актуальной технической задачей. Здесь следует отметить, что естественный путь совершенствования оптических компонентов, опирающийся на достижения в области технологии изготовления, практически уже исчерпан. Например, в световодах из кварцевого стекла невозможно получить потери много меньше 0,1 дБ/км [2]. Поэтому наряду с совершенствованием применяемых технологий необходимо искать принципиально новые подходы повышения эффективности, качества и выявления ранее не известных свойств оптических компонентов, в том числе за счет принципиального изменения свойств самого вещества.

1. ПОЛУЧЕНИЕ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО КВАРЦА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

С целью возможного получения новых оптических свойств прозрачных материалов

предложено [6] изучить оптические свойства образцов кварцевого стекла, внутренняя структура которых изменена действием деформации, близкой к максимально возможной [7]. Согласно [7–9] и работам других авторов, изменение структурного состояния материала приводит к изменению таких его характеристик, как температура Дебая, Кюри, упругие модули, спектры поглощения излучения (для полупроводников Si, Ge) и т. д. в общей сложности на величину порядка 10...20%. При этом благодаря существенному увеличению площади границ зёрен такие материалы обладают повышенными прочностными и одновременно пластическими свойствами.

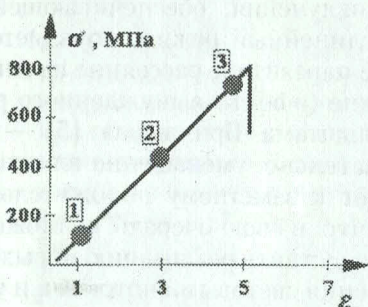


Рис. 1. Диаграмма напряжения для рассматриваемого материала

Экспериментальное исследование решено было проводить на образцах оптического стекла, применяемого для изготовления сердцевины одномодовых волоконных световодов со ступенчатым профилем изменения показателя преломления. Данное стекло в России изготавливается на заводе оптического стекла в городе Гусь-Хрустальный (ЗОС-ГХ) и применяется для выпуска световодов типа SF SMF-LS™. Тридцать образцов стекла в форме цилиндров различных длин L_i и диаметров D_i были изготовлены на ЗОС-ГХ по заказу специалистов фирмы ОАО «Энергострой-оптик» и часть из них подвергнута деформации. Ввиду значительной хрупкости обрабатываемого материала был применён метод интенсивной пластической деформации (ИПД) [7]. Каждому геометрическому размеру соответствовало три образца, деформации подвергались два образца (дублирование при дальнейшем изучении для усреднения результатов, запас на случай разрушения и пр.), третий оставался недеформированным. Так как режим деформации и контроля при деформации был подобран заранее на подобных стеклянных компонентах, ни один из исследуемых образцов не был разрушен. На рис. 1 представлена диаграмма напряжений σ све-

товодного материала в зависимости от логарифмической степени деформации ϵ , которая определялась как

$$\epsilon = \ln(\vartheta \cdot r/l), \quad (1)$$

где ϑ — угол вращения при деформации в радианах, r и l — радиус и толщина образца.

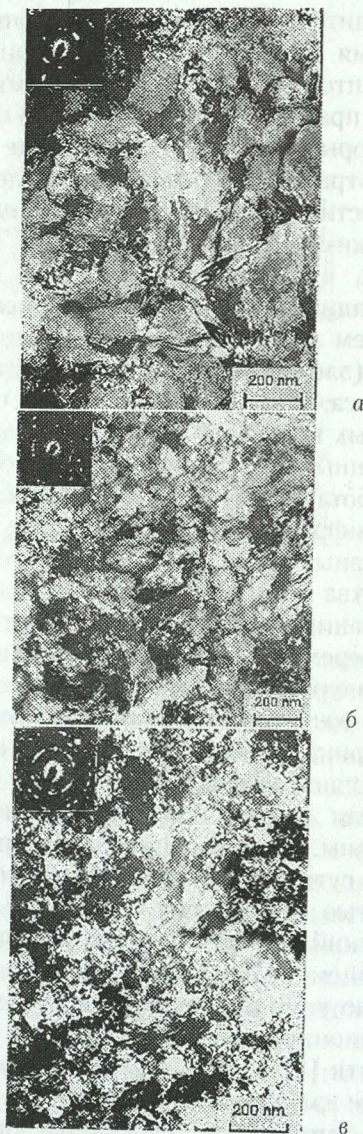


Рис. 2. Электронограммы в точках (по рис. 1): а — 1; б — 2; в — 3

На рис. 2 представлены фотографические изображения одного из обрабатываемых образцов, снятые с площади 2 мкм^2 , полученными рентгеноструктурным методом [7], соответствующие точкам 1, 2 и 3 на диаграмме рис. 1. Видно заметное измельчение характерного размера зерна. Дифракционные электронограммы соответствующих областей представлены в верхнем левом углу каждой фотографии.

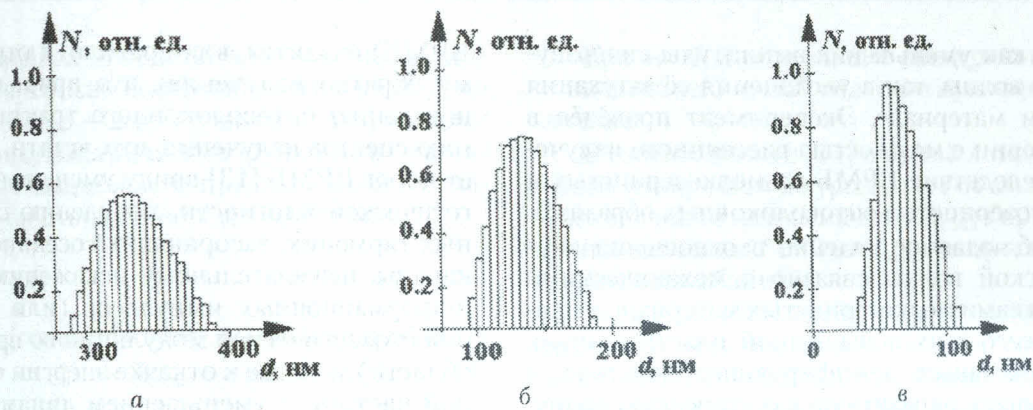


Рис. 3. Диаграммы распределения размеров зёрен образца в точках (по рис. 1): а — 1; б — 2; в — 3

На рис. 3 представлены диаграммы распределения количества зёрен N_d в зависимости от их характерного размера d для рассматриваемых точек на диаграмме напряжений. Заметно уменьшение среднестатистического значения размера зерна (от крупнозернистого 300 ... 400 нм до мелкозернистого состояния 60 ... 80 нм) на каждом этапе деформации с одновременным сужением разброса значений. Полученный результат согласуется с известным [7, 8] в отношении хрупких непрозрачных керамических материалов, для которых характерным является нормальный закон распределения размеров зёрен с характерным размером менее 50 нм (при максимальной деформации).

С целью выявления возможных новых оптических свойств мелкозернистого оптоволоконного материала были проведены следующие эксперименты:

1. Изучение спектра поглощения в диапазоне длин волн от 500 до 1800 нм [6, 10].
2. Изучение вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна [11].

Предпочтение ВРМБ было отдано в соответствии с опытом, полученным по результатам более ранних исследований, проводимых в области нелинейных оптических эффектов [12].

По п. 1 получен следующий результат: в отношении спектра поглощения наблюдалось уширение (по среднему уровню в пределах 10 ... 12%) и увеличение амплитуды (на 3 ... 4%) резонансов поглощения. На длине волны 645 нм известный резонанс поглощения (имеющий место в крупнозернистом оптоволоконном материале) не наблюдался, в то время как появился резонанс на длине волны 1480 нм. Спектр поглощения исследован с использованием некогерентных ламповых источников. Проведено сравнение со спектром поглоще-

ния таких же недеформированных образцов. В целом можно сказать об увеличении оптического затухания в мелкозернистых стёклах по отношению к крупнозернистым.

Вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна связано с возбуждением акустических волн за счёт эффекта электрострикции, распространяющихся в том же направлении, что и входное оптическое излучение [5]. Появляющиеся сгустки и разрежения плотности материала приводят к локальному изменению показателя преломления — эффекту фотоупругости, который является причиной отражения обратно (рассеяния) электромагнитных волн. Известно [5], что эффект ВРМБ носит пороговый характер, обусловленный тем, что с некоторого значения интенсивности входного излучения усиление акустической волны начинает превалировать над её затуханием в данном материале. Так, при достижении порога резко увеличивается интенсивность обратного рассеяния, что ухудшает эффективность передачи основного сигнала. При дальнейшем увеличении входной интенсивности на протяжении пройденного оптического пути амплитуда сигнала перестаёт расти и даже начинает падать. Это устанавливает верхнюю границу оптической мощности, эффективно используемой системой, в связи с чем разработчики оптоволоконных систем связи вынуждены ограничиваться мощностью группового сигнала в пределах 300 ... 400 мВт [2, 13].

В отношении ВРМБ в мелкозернистых образцах получено в общей сложности снижение его действия — уменьшение мощности отражённого излучения на 7 ... 9% (рассеянного в силу действия нелинейного эффекта) при подаваемой оптической мощности выше пороговой и увеличение порога возникновения рассеяния на 9 ... 10%. Наблюдаемый результат можно трактовать в качестве след-

ствия как уменьшения амплитуды гиперзвуковой волны, так и увеличения её затухания в этом материале. Эксперимент проведён в сравнении с мощностью рассеянного излучения вследствие ВРМБ на мелкозернистых и крупнозернистых оптоволоконных образцах.

Наблюдаемое явление в отношении акустической волны связано с механическими свойствами мелкозернистых материалов, прежде всего с их повышенной пластичностью, что оказывает демпфирующее действие и уменьшает паразитную акустическую волну. Отметим, что данный результат хорошо согласуется с известными [7, 8] в отношении изменения физических характеристик и параметров материала. Уменьшение влияния ВРМБ в обработанном деформацией материале даёт возможность увеличивать там интенсивность оптического излучения, возможно, достигая требуемого нелинейного режима, тем самым разрабатывать перспективные компоненты оптоволоконных сетей на основе применения мелкозернистых стёкол.

2. АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ НА ИМПУЛЬСНЫЙ СИГНАЛ

Проводимые ранее исследования в области нелинейных оптических эффектов [12] показали их следующее распределение по значимости влияния после ВРМБ:

- нелинейное преломление и его результат — фазовая само- и кросс-модуляция [13];
- параметрические процессы, четырёхволновое смешивание [13] в системах с уплотнением по длинам волн WDM [2];
- многофотонное поглощение, модуляционная неустойчивость [13].

Для изучения возможности увеличения рабочей оптической интенсивности в мелкозернистом прозрачном материале исследуем влияние перечисленных по пп. 1–3 нелинейных эффектов на импульсный сигнал. Исследования проведём в предположении, что рабочая интенсивность увеличена до уровня, когда амплитуда отражённой волны при ВРМБ оказывается равной своему прежнему значению — при использовании крупнозернистых стёкол (но с меньшим значением интенсивности излучения). Необходимым является требование малого влияния нелинейных эффектов — не более допустимых действующей нормативно-технической документацией, например, [14], шумов и искажений в информационном сигнале. Проявление нелинейных эффектов (в том числе и

ВРМБ) сводится, как правило, к отражённому обратно излучению, что приводит к зашумлению оптоволоконного тракта, уширению спектра излучения, что, кстати, повышает порог ВРМБ [13] ввиду уменьшения энергетической плотности, появлению спутанных гармоник, засоряющих соседние WDM-каналы, нежелательному искажению формы информационных импульсов (или паразитной стохастической модуляции во временной области), а также к откачке энергии от основной частоты с уменьшением динамического диапазона сигнала и увеличению уровня потерь в системе. Изучим действие нелинейных оптических эффектов применительно к решаемой задаче.

Нелинейное преломление — явление, при котором показатель преломления прозрачной среды n зависит от напряженности электрического поля E падающей световой волны следующим образом [15]:

$$n(\omega_R, E) = n_0(\omega_R) + n_N |E|^2. \quad (2)$$

Здесь $n_0(\omega_R)$ — линейная часть показателя преломления, описываемая уравнением Селмейера [3] в случае, когда линии поглощения примесей считаются узкими, n_N — нелинейная составляющая, имеет слабую зависимость от частоты света в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне [5] и для кварцевых стёкол в системе СИ приблизительно равна $5,656 \cdot 10^{-12}$ [15], ω_R — круговая частота подаваемого излучения.

Так, увеличение показателя преломления внутри занимаемой пучком области в случае $n_N > 0$ приводит к сжатию пучка. Но при незначительной величине поправки, равной $n_N |E|^2$ и составляющей не более нескольких процентов от n_0 , сжатие пучка незначительно и самофокусировка [15] не наступает. Более существенным эффектом здесь является модуляция фазы излучения, связанная с нелинейной поправкой к показателю преломления, а следовательно, и к набегу фазы световой волны. Если представить напряжённость электромагнитного поля в виде $E = E_{\max} \exp(j\phi)$, где ϕ — фаза колебаний, в линейном случае равная $\phi = \omega_R t - n_0 k_R z$, то с учётом нелинейной составляющей $\Delta\phi = n_N |E|^2 k_R z = \Delta n k_R z$ можно записать:

$$E = E_{\max} \exp(j\phi - j\Delta\phi). \quad (3)$$

Здесь $k_R = \omega_R/c$ — волновой вектор излучения, c — скорость света в вакууме, t — время,

z — линейная координата, j — мнимая единица. Переписав выражение (3) в виде $E = E_{\max} [\cos(\phi - \Delta\phi) + j \sin(\phi - \Delta\phi)]$ и разложив тригонометрические функции на составляющие слагаемые в предположении о малом $\Delta\phi$ по отношению к ϕ , получаем

$$E = E_{\max} [\cos(\phi) \cos(\Delta\phi) + j \sin(\phi) \cos(\Delta\phi)] = E_{\max} \cos(\Delta\phi) \exp(j\phi). \quad (4)$$

Сигнал вида (4) является модулированным колебанием с бесконечно большим коэффициентом глубины модуляции по [16]. Спектральная характеристика $S(\omega)$ (плотность мощности, интенсивности) функции вида $E = E_{\max} \cos(\Delta\phi) \cos(\phi)$ содержит две составляющие, расположенные в обе стороны от частоты входного сигнала — или сигнал с «потерянной» несущей. Если представить $W_0 = n_0\omega_R$, $\Omega = \Delta n\omega_R$ и рассмотреть колебание относительно координаты t (или то же $\tilde{W}_0 = n_0k_R$ и $\tilde{\Omega} = \Delta nk_R$ относительно координаты z), то $S(\omega)$ для разных значений напряжённости входного поля будет иметь две составляющие на частотах $W_{1,2} = W_0 \pm \Omega$, в то время как на центральной частоте W_0 составляющая сигнала будет отсутствовать (рис. 4), если не учитывать реальную ширину линии излучения $\Delta\omega_R$.

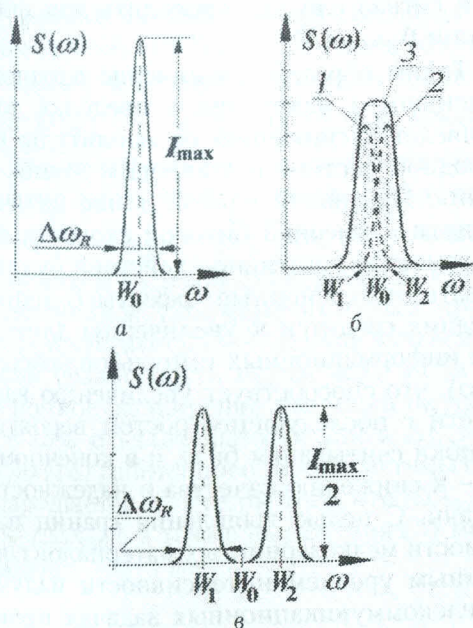


Рис. 4. Спектр функции (4) с учётом $\Delta\omega_R$ для различных значений нелинейной поправки к показателю преломления: а — линейный случай; б — малая величина нелинейной поправки; в — значительная величина нелинейной поправки

Кривые 1, 2 — реальные спектральные составляющие, 3 — наблюдаемая суммарная величина.

В соответствии с [14] ширина линии излучения измеряется по уровню 0,1 от амплитудного значения интенсивности I_{\max} (при изменении значения I от 0 до I_{\max} на протяжении периода колебаний).

Когда сигнал значительной оптической интенсивности поступает на вход световодной системы, создавая там нелинейный режим преломления, то на выходе наблюдается либо уширенный по спектру сигнал с меньшей пиковой интенсивностью, либо отдельные спектральные составляющие с пиковой интенсивностью, равной половине от входной — эффект фазовой самомодуляции. Если описанное выше преобразование спектра происходит в слабой волне, проходящей через нелинейную среду, созданную другим полем, то говорят об эффекте фазовой кросс-модуляции. В случае преобразования спектра входного сигнала до вида рис. 4, б нелинейное преломление приводит к уширению спектра излучения, что одновременно снижает его когерентность [3] и увеличивает дисперсию в импульсном сигнале [2]. Длина X , на которой происходит преобразование спектра, определяется достаточно малой величиной (порядка нескольких микрометров [17]), зависящей от интенсивности входного сигнала и плотности прозрачного вещества. Необходимо отметить, что нелинейный режим безотносительно к виду его проявления связан с поляризацией среды [3] и возникает после переизлучения фотона электроном. Расстояние X от входного торца определяется следующим условием: далее всё распространяющееся излучение получено уже от «вторичных» по Гюйгенсу [17] источников и не содержит ни одного фотона, изначально вошедшего в среду. Для кварцевых стёкол и реальных интенсивностей излучения, использующихся в телекоммуникациях и информационно-измерительных системах, величина X незначительна, и при решении технических задач следует рассматривать нелинейный режим во всей оптоволоконной системе, пренебрегая X .

Изначально величина $\Delta\omega_R$ определяется шириной лазерной линии $\delta\omega$ [3] и модуляционным уширением $\delta\omega_{\text{mod}}$, равным удвоенной частоте модуляции [16]. При наличии нелинейной само- или кросс-модуляции

$$\Delta\omega_{\text{sum}} = \delta\omega + \Delta\omega_{\text{mod}} + \Delta\omega_N = \Delta\omega_R + \Delta\omega_N, \quad (5)$$

где $\Delta\omega_N = 2\Omega = 2n_N |E|^2 \omega_R \approx 4n_N \omega_R I_{\max}$. Выражение (5) справедливо в случае уширения вида рис. 4, б для неразрешённых в смысле [3] линий. Если спектр входного сигнала преобразован в отдельно расположенные линии, рис. 4, в, каждая из которых обладает когерентностью, равной когерентности входного сигнала, то такие линии следует рассматривать независимо при оценке дисперсии в импульсном сигнале. Оценим суммарную пиковую интенсивность излучения на центральной частоте W_0 в зависимости от входной интенсивности I_{\max} с учётом $\Delta\omega_R$, если спектральная плотность интенсивности пиков $S_R(\omega)$ на частотах $W_{1,2}$ приблизительно соответствует Лоренцевой форме [17]:

$$S_R(W_0) = \frac{I_{\max} \pi \Delta\omega_R}{(\Delta\omega_R)^2 + (W_0 - W_1)^2} + \frac{I_{\max} \pi \Delta\omega_R}{(\Delta\omega_R)^2 + (W_0 - W_2)^2} = \frac{2\pi I_{\max} \Delta\omega_R}{(\Delta\omega_R)^2 + \Omega^2}, \quad (6)$$

Выражение (6) можно переписать в виде

$$S_R(W_0) = \frac{2\pi I_{\max} \Delta\omega_R}{(\Delta\omega_R)^2 + (2n_N \omega_R I_{\max})^2}. \quad (7)$$

Если принять $\Delta\omega_R \cong 1,26 \cdot 10^{11}$ рад/с, $\omega_R \cong 1,25 \cdot 10^{15}$ рад/с, что соответствует длине волны 1,55 мкм, $n_N \cong 5,66 \cdot 10^{-12}$ м²/Вт, то наибольшие значения интенсивности \hat{I}_{\max} (по равенству нулю первой производной выражения (7) по I_{\max}) и спектральной плотности интенсивности $\hat{S}_R(W_0, \hat{I}_{\max})$ оказываются равными

$$\hat{I}_{\max} = \frac{\Delta\omega_R}{4\pi n_N \omega_R}, \quad (8)$$

$$\hat{S}_R(W_0, \hat{I}_{\max}) = \frac{1}{4n_N \omega_R},$$

и далее $\hat{I}_{\max} \cong 1,76 \cdot 10^7$ Вт/м², $\hat{S}_R(W_0, \hat{I}_{\max}) \cong 4,8 \cdot 10^{-5}$ Вт·с/м². Численная оценка проведена для значения n_N , соответствующего крупнозернистым кварцевым стёклам. Изучение правомерности последнего проведено в [11] путём измерения разностных значений показателя преломления мелкозернистого материала рефрактометром Аббе [17].

Отметим, что при площади модового пятна порядка $5 \cdot 10^{-11}$ м², мощность излучения

\hat{P}_{\max} , соответствующая значению \hat{I}_{\max} , составляет $\hat{P}_{\max} \cong 0,9$ мВт. Этим значением, по видимому, определяется установленная нормативно-технической документацией, в частности [14], величина оптической мощности в канале, хотя выражение (7) характеризует действие только одного нелинейного эффекта — нелинейного преломления. Но как в связи с возрастающими требованиями к информационной ёмкости канала, так и по причине наличия помехоустойчивых методов кодирования, обработки сигналов и т. д. [16] разработчики телекоммуникационного оборудования используют значительно более высокие мощности — до 300 ... 400 мВт, «примиряясь» с влиянием нелинейных эффектов. Согласно проведённым ранее исследованиям [12], полное прекращение передачи импульсного сигнала по волоконно-оптическому тракту из-за нелинейных эффектов наступает при мощности порядка 10 ... 15 Вт в зависимости от типа световода.

Если в рассматриваемой задаче положить верхнюю границу мощности излучения порядка $P_{\text{real}} \cong 440$ мВт (при увеличении порога ВРМБ в мелкозернистых материалах на 10% [11]), то $S_R(W_0, I_{\text{real}}) \cong 4,4 \cdot 10^{-5}$ Вт·с/м², что соответствует виду рис. 4, б. Спектральные составляющие остаются неразрешёнными в смысле [3] для подавляющего большинства фотоприёмных устройств, и оценку влияния дисперсионных эффектов на импульсный сигнал следует проводить для ширины линии $\Delta\omega_{\text{sum}}$ (5).

Таким образом, увеличение входной интенсивности излучения в пределах до 10% приведёт к снижению её амплитуды в световодной системе и уширению линии излучения. При значительной длине оптического пути и высокой битовой скорости сигнала заметное негативное действие будут оказывать дисперсионные эффекты. Влияние последних сводится к увеличению длительности информационных импульсов (расплыванию), что способствует увеличению вандера в сети с последующим ростом вероятности ошибки считывания бита, и в конечном итоге — к снижению качества и надёжности передачи. С целью выявления границ применимости мелкозернистых материалов с повышенным уровнем интенсивности излучения в телекоммуникационных задачах проведём количественную оценку представленного явления. Технический интерес к исследованию сигнала, прошедшего значительную оптическую длину, обусловлен тем, что на длин-

ном расстоянии ВРМБ сказывается сильнее, чем на коротком [18], и выигрыш при применении мелкозернистого материала со сниженным действием ВРМБ в устройствах с большой длиной оптического пути окажется больше. Это либо протяжённые волоконные структуры — световоды, либо дискретные интерференционные и дифракционные компоненты, где имеют место переотражения. На базе последних строятся такие устройства управления световыми потоками, как многоканальные разветвители, фильтры, преобразователи физических величин, бистабильные нелинейные элементы, организованные на базе многолучевых интерферометров Фабри-Перо [4] (ИФП), и т. д.

Эффективная длина оптического пути в ИФП определяется как [3] $l_{opt} = h \frac{\sqrt{\rho}}{2(1-\rho)}$, где h — расстояние между зеркалами, ρ — коэффициент отражения зеркал. На расстоянии l_{opt} дисперсионное увеличение длительности импульса [2] можно представить: $\tau(\lambda_R) = l_{opt} \Delta\lambda_{sum} D(\lambda_R)$. Здесь $\Delta\lambda_{sum}$ — суммарное уширение длины волны излучения, $D(\lambda_R)$ — дисперсионная характеристика рассматриваемой оптической структуры (зависит от количества устойчивых мод, геометрии, изменения показателя преломления для разных длин волн, видов примесей и пр.), представляет собой изменение длительности импульса на единицу оптической длины на каждый нанометр излучения. Для ИФП, организованного на базе отрезка световода (или одномодового ИФП), будет иметь место материальная и волноводная виды дисперсии [2] и $D(\lambda) = \lambda_0 D_0 \ln\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)$, для градиентных многомодовых и объёмных волноводных структур добавляется межмодовая дисперсия и $D(\lambda) = D_0 \left(\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3}\right)$. Под λ_0 понимается длина волны нулевой дисперсии (на которой дисперсионное уширение импульса практически отсутствует), D_0 — наклон нулевой дисперсии (размерность пс/нм²·км). Если дисперсионное расширение импульса не превышает 15% от длительности такта Δt , то согласно [14] работоспособность системы связи не нарушается. С учётом того, что $|\Delta\lambda_{sum}| = \frac{2\pi c}{\omega_R^2} |\Delta\omega_{sum}|$, а также выражения (5) можно записать:

$$\frac{\tau(\lambda_R)}{\Delta t} = \frac{\sqrt{\rho}}{2(1-\rho)} \frac{\pi h c}{\omega_R^2} \times D(\lambda_R) [\Delta\omega_R + 4n_N \omega_R I_{max}] B. \quad (9)$$

Здесь B — значение битовой скорости в канале. В предположении о приблизительном соответствии параметров D_0 и λ_0 для мелкозернистого и крупнозернистого материала на рис. 5 представлены зависимости относительного изменения длительности импульса от коэффициента отражения ρ устройства для различных значений битовой скорости. Согласно представленным зависимостям, рост ρ в ИФП и B в системе передачи приводит к увеличению относительного изменения длительности импульса.

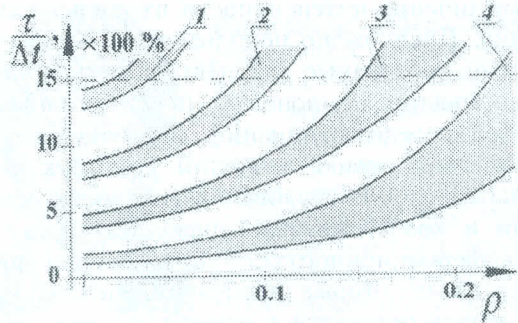


Рис. 5. Зависимость относительного изменения длительности оптического импульса от коэффициента отражения многолучевого интерферометра

Кривые 1 соответствуют уровню STM-64 ($B \cong 9,9$ Гбит/с), 2 — STM-16 ($B \cong 2,5$ Гбит/с), 3 — STM-16 ($B \cong 2,5$ Гбит/с), 4 — STM-1 ($B \cong 0,15$ Гбит/с). Верхняя кривая в каждом случае соответствует многомодовому ИФП, нижняя — одномодовому. Расчёт проведён для входной мощности излучения 440 мВт.

Видно, что, например, в случае STM-64, использование многомодового интерференционного устройства возможно только при значении коэффициента отражения в ИФП, не превосходящего 0,015. В то же время ограничением по ρ для телекоммуникационной системы уровня STM-1 с одномодовым интерферометром, по-видимому, будут являться интерференционные искажения импульсного сигнала, связанные с изменением длины волны излучения полупроводникового лазера при модуляции оптического сигнала [19]. Дисперсионные искажения не окажут заметного влияния в таком случае. Влияние других нелинейных эффектов — параметрической генерации гармоник, многофотонного поглощения, нелинейного затухания и модуляционной неустойчивости, — как показали предыдущие исследования [12], практически не оказывает негативного воздействия на импульсный сигнал в диапазоне длин волн 1

... 2 мкм при уровне входной мощности до нескольких ватт. Последнее связано прежде всего с недостижением порога генерации и отсутствием волнового синхронизма [15].

ВЫВОДЫ

Таким образом, в результате исследования влияния нелинейных оптических эффектов на информационный импульсный сигнал, в частности ВРМБ и нелинейного преломления, установлено, что в мелкозернистых образцах допустимо в пределах до 10% увеличение интенсивности входного излучения. Предложено использовать мелкозернистые прозрачные кварцевые материалы для построения компонентов перспективных систем телекоммуникаций. Выполнена теоретическая оценка значений конструктивных параметров оборудования (скорости передачи и коэффициента отражения зеркал интерференционного устройства управления), в пределах которых дисперсионные искажения сигнала останутся в рамках установленных нормативно-технической документацией.

Новое свойство расширения энергетического диапазона материала представляет интерес при построении таких компонентов оптоволоконных сетей, в которых в соответствии с функциональным назначением производится сложение пучков оптического излучения. Таким образом, прозрачное вещество с измельченной структурой кристаллита найдёт широкое применение для полностью оптических систем телекоммуникаций. Широкий спектр возможностей систем передачи делает их разработку перспективным научным направлением, а последующее использование — лучшим решением проблемы организации канала связи для новых информационных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Правила** устройства электроустановок. 6-е изд. СПб.: Деан, 2000. 926 с.
2. **Убайдуллаев Р. Р.** Волоконно-оптические сети. М.: Эко-Трендз, 2000. 267 с.
3. **Матвеев А. Н.** Оптика: Учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1985. 351 с.
4. **Гиббс Х.** Оптическая бистабильность. Управление светом с помощью света. М.: Мир, 1988. 520 с.
5. **Ярив А. В.** Квантовая электроника и нелинейная оптика. М.: Сов. радио, 1973. 456 с.
6. **Султанов А. Х., Канаков В. И., Виноградова И. Л.** Методика экспериментального изучения возможности построения компонентов волоконно-оптических систем передач на основе деформированных стекол // Радиолокация, навигация, связь: Сб. докл. Междунауч. науч.-техн. конф. RLNC'2003. Воронеж: НПФ «Саквояж», 2003. С. 1159–1167.
7. **Валиев Р. З., Александров И. В.** Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 346 с.
8. **Van Swygenhoven H., Weertman J. R.** Preface to the viewpoint set on: mechanical properties of fully dense nanocrystalline metals // Science and Direct. 2003. No 49. P. 625–627.
9. **Derlet P. M., Hasnaoui A., Van Swygenhoven H.** Atomistic simulations as guidance to experiments // Science and Direct. 2003. No 16. P. 629–635.
10. **Султанов А. Х., Канаков В. И., Виноградова И. Л.** О результатах исследования спектра поглощения деформированных стекол с целью использования их в перспективных информационных технологиях // Вычислительная техника и новые информационные технологии: Межвуз. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 2003. С. 35–42.
11. **Султанов А. Х., Канаков В. И., Виноградова И. Л.** Нелинейные оптические эффекты в волоконно-оптических компонентах, построенных на основе деформированных стекол // Инфокоммуникационные технологии. 2003. № 2. С. 46–54.
12. **Султанов А. Х., Усманов Р. Г., Виноградова И. Л.** Сегмент системы передачи с усилителем EDFA // Датчики и системы. 2002. № 11. С. 18–22.
13. **Волоконно-оптическая техника: история, достижения, перспективы / Сб. статей под ред. С. А. Дмитриева, Н. Н. Слепова** М.: Connect, 2000. 376 с.
14. **ОСТ 45.104-97.** Стыки оптические систем передачи синхронной цифровой иерархии. Стандарт отрасли. М.: ЦНТИ «Информсвязь», 1997. 27 с.
15. **Квантовая электроника. Маленькая энциклопедия / Отв. ред. М. Е. Жаботинский.** М.: Сов. Энциклопедия, 1969. 432 с.
16. **Теория электрической связи / Под ред. Д. Д. Кловского.** М.: Радио и связь, 1998. 432 с.
17. **Сивухин Д. В.** Общий курс физики: Оптика. М.: Наука, 1980. 752 с.
18. **Agrawal G. P.** Nonlinear Fiber Optics. Boston: Academic Press, 2001. 466 p.
19. **Виноградова И. Л., Султанов А. Х.** Статистический подход к описанию интерферометров Фабри-Перо как элементов многолучевой интерференции в линиях связи // Радиотехника. 2000. № 1. С. 45–49.

ОБ АВТОРАХ



Султанов Альберт Ханович, профессор, зав. каф. телекоммуникац. систем УГАТУ. Дипл. инж. по многоканальн. электросвязи (Новосиб. электротехн. ин-т связи, 1973). Д-р техн. наук по управлению в техн. системах (УГАТУ, 1996). Исследования в области телекоммуникационных оптоэлектронных аэрокосмических систем.



Канаков Владимир Иванович, нач. службы связи ОАО «Энергостройоптик». Дипл. инж. по многоканальн. системам электрич. связи (Ташкентск. электротехнич. ин-т связи, 1994). Исследования и разработки в обл. оптики, волоконно-оптической связи.

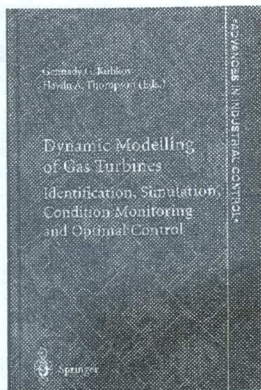


Шарифгалиев Ирек Адхамович, нач. службы связи ЗАО «Энергоспецналадка». Дипл. инж. в обл. оптических и оптоэлектронных систем (МВТУ им. Баумана, 1990). Канд. техн. наук по телекоммуникац. системам и компьютерным сетям (УГАТУ, 2003). исследования в обл. волоконно-оптической связи.



Виноградова Ирина Леонидовна, преп. каф. телекоммуникац. систем. Дипл. инж. по информационно-измерительным системам. Канд. техн. наук по применению вычисл. техники в науч. исследованиях (УГАТУ, 1999). Исследования в обл. оптики, волоконно-оптической связи, теории обработки сигналов.

Сигнальная информация



**G. G. Kulikov and H. A. Thompson (Eds.)
Dynamic Modelling of Gas Turbines**

**Identification, Simulation, Condition Monitoring
and Optimal Control**

**G. Kulikov, V. Arkov, O. Lyantsev,
H. Thompson, P. Fleming, T. Breikin,
D. Rees, N. Chiras, K. Rodriguez-Vazquez**

Springer-Verlag London Ltd., 2004

335 P. 184 Figs. ISBN 1-85233-784-2

www.springeronline.com

Обобщен опыт авторов в области проектирования и доводки цифровых систем управления газотурбинными двигателями в авиационной промышленности. Приведены примеры практического применения теории управления и идентификации. Книга является результатом многолетнего сотрудничества ученых УГАТУ с британскими коллегами из университетов Шеффилда и Гламоргана. Монография представляет интерес для специалистов по газотурбинным двигателям и системам автоматического управления