



НОВОЕ
В ЖИЗНИ,
НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

Подписная
научно -
популярная
серия

Е.М.Дианов
В.Г.Плотниченко

ИНФРАКРАСНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ

3'91



ФИЗИКА

ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

ФИЗИКА

3/1991

Издается ежемесячно с 1967 г.

Е. М. Дианов,
В. Г. Плотниченко

ИНФРАКРАСНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ



МОСКВА ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ» 1991

Авторы: ДИАНОВ Евгений Михайлович — член-корреспондент АН СССР, доктор физико-математических наук, профессор, лауреат Государственной премии СССР и премии имени Попова А. С., заместитель директора Института общей физики АН СССР.

ПЛОТНИЧЕНКО Виктор Геннадиевич — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник того же института.

Редактор: КУТУЗОВА К. А.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Минимально возможные оптические потери в ИК-световодах	8
Материальная дисперсия	12
Методы измерения сверхнизких оптических потерь	13
Инфракрасные волоконные световоды	21
Применение инфракрасных световодов	51
Заключение	62
Литература	64

Дианов Е. М., Плотниченко В. Г.

Д 44 Инфракрасные волоконные световоды. — М.: «Знание», 1991. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Физика»; № 3).

ISBN 5-07-001751-9

40 к.

Брошюра знакомит с достижениями, проблемами и перспективой дальнейшего развития нового направления в волоконной оптике. В ней описаны основные материалы, на основе которых создаются инфракрасные световоды, методы измерения их оптических характеристик, а также области применения.

1604060000

ББК 22.34

ISBN 5-07-001751-9 © Дианов Е. М., Плотниченко В. Г., 1991 г.

ВВЕДЕНИЕ

Волоконная оптика постепенно становится неотъемлемой частью научно-технического прогресса наравне с такими направлениями, как лазерная техника и микроэлектроника.

Успехи волоконной оптики стали возможны в первую очередь благодаря разработке особо чистых технологий изготовления на основе кварцевого стекла (стеклообразной двуокиси кремния, SiO_2) волоконных световодов с малыми оптическими потерями.

Минимум собственных оптических потерь для кварцевого стекла лежит в ближней инфракрасной области спектра вблизи 1,55 мкм и составляет около 0,15 дБ/км¹. Область малых оптических потерь, а следовательно, и область наиболее эффективного использования этих световодов простирается примерно от 0,5—0,7 до 1,8—2,0 мкм. Кривая оптических потерь представлена на рис. 1. Световоды на основе кварцевого стекла с близкими к минимально возможным для них оптическими потерями стали устойчиво получать во многих фирмах и лабораториях мира в конце 70-х годов.

С этого времени начинается широкое применение волоконных световодов на основе кварцевого стекла в различных областях современной техники. Наиболее широко они используются сейчас в различных системах оптической связи — в телефонных сетях, кабельном телевидении, бортовых системах связи, для связи вычислительных комплексов и т. д.

В 1989 г. во всем мире было произведено 5,1 млн. км волоконных световодов для оптической связи, из них 2,3 млн. км — в США. Интересно проследить их распределение по разным классам систем связи в Северной Америке в 1989 г. Большая часть световодов использу-

¹ 1 дБ/км = $2,3 \times 10^{-6}$ см⁻¹.

ется для создания телефонных сетей связи (локальные — 49, магистральные — 21%), причем примерно половина всех световодов — для создания локальных телефонных линий связи (в основном городских, длиной до 10 км). Обращает на себя внимание довольно высокий процент применения волоконных световодов в кабельном телевидении (10% по сравнению с 3% в 1988 г.), что обусловлено двумя главными причинами. Во-первых, в крупных городах высотные здания препятствуют устойчивому приему телевизионных сигналов, передаваемых с помощью радиоволн через свободную атмосферу. Использование медных коаксиальных кабелей сопряжено с трудностями, связанными с необходимостью устанавливать ретрансляторы телевизионных сигналов через каждый километр. А волоконно-оптический кабель позволяет передавать такие сигналы без ретрансляции на десятки километров. Во-вторых, разработка и широкое

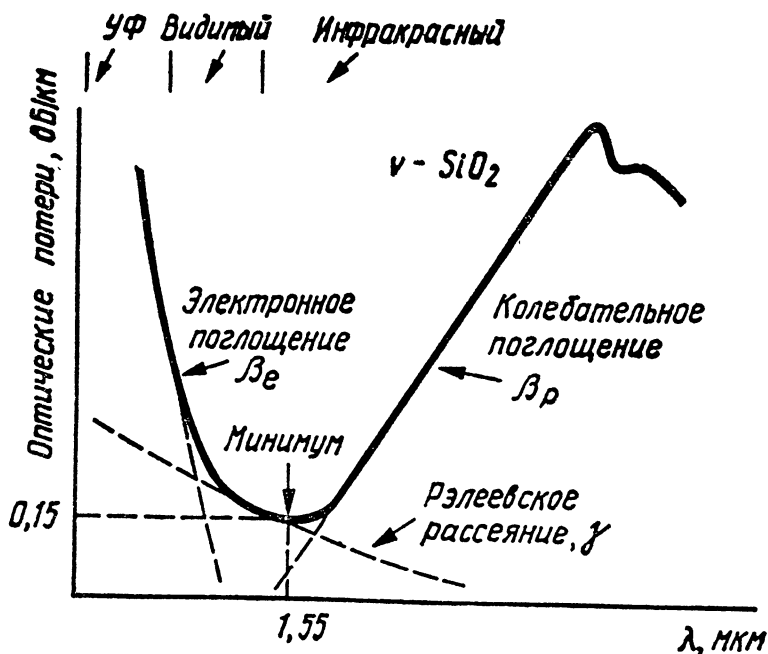


Рис. 1. Спектральная зависимость собственных оптических потерь для кварцевого стекла

внедрение телевидения высокой четкости требуют и более широкополосных линий передачи.

Значительное внимание уделяется подводным волоконно-оптическим линиям связи. Уже включены в эксплуатацию подводные цифровые линии связи «Северная Америка — Европа» и «Северная Америка — Гавайские острова — Япония». Стоит задача соединить Западную Европу с Японией через территорию Советского Союза и тем самым замкнуть мировое кольцо волоконно-оптической связи.

По оценкам экспертов, в ближайшие два года рост производства световодов для линий связи будет составлять около 10% в год.

Широкое применение волоконные световоды на основе кварцевого стекла находят в различных волоконно-оптических датчиках. В них волоконный световод используется и как чувствительный элемент внешних воздействий, и как канал для передачи оптических сигналов в систему обработки информации. К настоящему времени разработаны волоконно-оптические датчики температуры, магнитного и электрического полей, акустических волн, вращения, малых линейных перемещений, уровня жидкости, разнообразные медицинские датчики и т. д. По существу, возникла новая область оптического приборостроения. Не уступая традиционным датчикам в чувствительности, волоконно-оптические датчики дешевле, легче, компактнее, хорошо сочетаются с волоконно-оптическими системами передачи и обработки информации, обладают высокой устойчивостью к окружающим условиям. Именно эти качества делают такие датчики перспективными в качестве встроенных в композиционные материалы высокочувствительных элементов для контроля характеристик этих материалов в процессе изготовления, лабораторных испытаний и последующей эксплуатации. Они перспективны также для измерения параметров окружающей среды в жестких условиях, например в нефтяных скважинах. В таких условиях электронные приборы имеют ограниченное время жизни.

Мировой рынок продукции волоконно-оптических датчиков составил в 1990 г. 200 млн. долларов. Только в США разработкой и выпуском волоконно-оптических датчиков сейчас занимаются около 100 фирм.

Вполне естественно, что наряду со световодами на основе кварцевого стекла исследователи, работающие в

области волоконной оптики, изучали свойства и других высокопрозрачных твердотельных материалов и разрабатывали методы получения из них волоконных световодов.

При этом они хотели найти ответы на два основных вопроса.

Первый: есть ли материалы или можно ли создать такие материалы, которые пригодны для получения волоконных световодов с оптическими потерями, еще более низкими, чем в кварцевых световодах?

И второй: из каких материалов и с какими оптическими потерями можно изготавливать волоконные световоды для передачи излучения тех диапазонов спектра, где световоды на основе кварцевого стекла уже неприменимы?

Теоретически ответ на эти вопросы был получен в конце 70-х — начале 80-х годов в работах таких авторов, как Пинноу и Рич, Вэмпл и Гудмен, Нассау, и других при помощи примерно следующих рассуждений.

Область малых оптических потерь, или, как ее еще часто называют, область высокой оптической прозрачности твердотельного материала, расположена между электронными и колебательными переходами, определяющими соответственно коротковолновую и длинноволновую границы пропускания материала. При этом, как видно из рис. 1, длина волны и величина минимума суммарных оптических потерь для кварцевого стекла определяются двумя собственными механизмами: рэлеевским рассеянием и колебательным поглощением. Если длинноволновая граница пропускания какого-либо материала сдвинута по сравнению с кварцевым стеклом в сторону больших длин волн, то даже при более высоких потерях на рассеяние в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах продвижение в более длинноволновую область, т. е. в средний инфракрасный диапазон, позволяет за счет быстрого спада рассеяния, обратно пропорционального четвертой степени длины волны (λ^{-4}), получить существенно более низкий суммарный минимум оптических потерь в этом материале.

Практически этот случай может быть реализован для многих высокопрозрачных в ближнем и среднем инфракрасных диапазонах материалов, широко используемых в виде окон, линз, призм в инфракрасной науке и технике. Более длинноволновая граница пропускания у этих

материалов по сравнению с кварцевым стеклом обусловлена уменьшением частот их основных колебательных переходов за счет более тяжелых атомов, входящих в их состав, и более слабой связи между ними.

Другой путь получения более низких по сравнению с кварцевым стеклом оптических потерь — это поиск материалов с более низкими даже в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах потерями на рассеяние, что возможно при меньшем по сравнению с SiO_2 показателем преломления, входящим в потери в восьмой степени (n^8) и за счет меньшей температуры стеклования T_g для стекол или температуры плавления T_m для кристаллов, от которой уровень собственного рассеяния зависит линейно. Этот случай может быть реализован в двух(или более)-компонентных силикатных стеклах, а также для многих кристаллических материалов, рассеяние в которых на несколько порядков ниже, чем в стеклах. Так, для некоторых составов кальциевых алюмосиликатных стекол оцениваемый уровень собственного рэлеевского рассеяния в 3—4 раза ниже, чем у кварцевого стекла.

Поскольку для многих таких материалов область минимума собственных оптических потерь сдвинута в инфракрасную область, обычно за 2 мкм, эти материалы, а соответственно и световоды из них условились называть инфракрасными (ИК).

С конца 70-х годов прошло уже более 10 лет поиска и исследований различных ИК-материалов и разработки способов получения из них волоконных световодов. И в настоящее время основное внимание уделяется следующим классам материалов, которые считаются наиболее перспективными для создания ИК-световодов:

стекла на основе окислов

тяжелых элементов

— на область от 1,5 до 4 мкм,

фторидные стекла

— на область от 1,5 до 6 мкм,

халькогенидные стекла

— на область от 2 до 10—
12 мкм,

кристаллы галогенидов

галлия, серебра и щелочных металлов

— на область от 2 до 15—
20 мкм.

Именно из стекол и кристаллов, принадлежащих к этим классам материалов, надеются получить инфра-

красные световоды как с оптическими потерями, меньшими, чем в лучших кварцевых световодах, так и с потерями более высокими, но достаточными для многих направлений применения, которые приведены в табл. 1. Здесь же даны необходимые для этих применений длины световодов и оптические потери в них. Важным обстоятельством, способствующим разработке ИК-световодов, является наличие мощных газовых и твердотельных лазеров, таких, как HF (2,5—2,9 мкм), YAG:Er³⁺ (2,94 мкм), DF (3,2—3,8 мкм), CO (5,3—6,2 мкм) и CO₂ (10,6 мкм), излучающих в среднем ИК-диапазоне. Световоды позволяют значительно упростить использование этих лазеров в науке, технике и медицине.

Цель данной брошюры — познакомить с основными проблемами, достижениями и перспективой дальнейшего развития инфракрасной волоконной оптики. В ней описаны основные материалы для ИК-световодов, методы изготовления, а также свойства и области применения этих световодов.

Таблица 1

Основные направления использования ИК-световодов

	Диапазон длин волн, мкм	Необходимые длины, м	Необходимые оптические потери, дБ/км	Современное состояние дел
Связь	2—15	>5000	<0,1	Исследования
Передача мощного излучения	2—12	0,5—10	<300	Разработки
Датчики	2—25	1—100	<100	Разработки
Активные световоды	0,5—12	0,1—1	<100	Разработки

МИНИМАЛЬНО ВОЗМОЖНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В ИК-СВЕТОВОДАХ

Оценивая перспективность какого-либо материала для волоконной оптики, в первую очередь интересуются, как сильно будет ослабляться проходящее по изготовленному из него световоду излучение. При этом ищется такой интервал длин волн, где это ослабление минимально.

Подчиняясь закону Бугера—Ламберта—Бера ($I = I_0 \exp(-\beta L)$), интенсивность проходящего по световоду излучения I спадает экспоненциально по длине L световода при удалении от его входного торца. Для того чтобы выходящий из световода сигнал еще можно было зарегистрировать, он не должен быть слишком слабым. А это в первую очередь определяется оптическими потерями β в световоде, зависящими от поглощения и рассеяния излучения материалом световода.

Различают собственные и несобственные виды оптических потерь. Первые присущи самому материалу, зависят от его структуры и силы связи между образующими его элементами, вторые же определяются несовершенством структуры материала и присутствием в нем различных примесей.

Считается, что для высокопрозрачных твердотельных материалов область минимальных оптических потерь ограничивается такими механизмами собственных потерь, как электронное поглощение (край Урбаха) β_e , многофононное поглощение β_p и рассеяние: рэлеевское γ_R — для стекол и мандельштам-бриллюэновское γ_{MB} — для кристаллов. Как электронное, так и многофононное поглощение приближенно описывается экспоненциальными функциями энергии E фотона:

$$\beta_e(E) = A \exp(E/E_1), \quad \beta_p(E) = B \exp(-E/E_2),$$

в которых A , B , E_1 и E_2 — постоянные для каждого материала величины. В логарифмическом масштабе эти зависимости имеют вид прямых линий, ограничивающих с коротковолновой и длинноволновой сторон область прозрачности материала. Постоянные A , B , E_1 и E_2 обычно определяют из спектров пропускания на краях области прозрачности наиболее совершенных образцов этих материалов, а затем полученные зависимости для β_e и β_p экстраполируют в область сверхмалых оптических потерь.

Вклад рэлеевского рассеяния в собственные оптические потери в стеклах, которое является следствием замороженных флуктуаций плотности стекла, определяется выражением

$$\gamma_R = \frac{8}{3} \pi^3 p^2 \beta_i T_g n^8 \lambda^{-4},$$

где p — коэффициент фотоупругости, β_i — изотермиче-

ская сжимаемость, T_g — температура стеклования, k — постоянная Больцмана, n — показатель преломления стекла, а λ — длина волны.

Для совершенных кристаллов уже рассеяние Мандельштамма—Бриллюэна считается основным собственным механизмом рассеяния. Мы не будем приводить здесь довольно громоздкое выражение для $\Upsilon_{\text{мв}}$, зависящее от структуры кристалла, отметим только, что, как и Υ_R для стекол, мандельштам—бриллюэновское рассеяние зависит от показателя преломления n кристалла, как n^8 , и его зависимость от длины волны проходящего излучения также λ^{-4} . Уровень собственного рассеяния в кристаллах за счет их более высокой упорядоченности значительно ниже, чем в стеклах. Поэтому и оцениваемый уровень минимально возможных оптических потерь в кристаллах обычно ниже, чем в стеклах.

На рис. 2 приведены выполненные к настоящему времени оценки области минимальных собственных оптических потерь для наиболее характерных представителей различных классов высокопрозрачных ИК-материалов. Видно, что эти оценки предсказывают возможность достижения в них более низких оптических потерь, чем в кварцевом стекле.

Конечно же, эти оценки, полученные экстраполяцией многофононного поглощения с уровня в 10^4 — 10^3 дБ/км до пересечения с кривой рассеяния уже на уровне 10^{-2} — 10^{-4} дБ/км, т. е. на 8—10 порядков, носят приближенный характер (из-за ограниченной точности измерения и влияния примесных полос поглощения) и в дальнейшем по мере совершенствования технологии получения ИК-материалов будут уточняться. Кроме того, при столь низких значениях потерь в 10^{-3} — 10^{-4} дБ/км для некоторых материалов необходимо будет учитывать и другие более слабые возможные механизмы собственных оптических потерь, такие, например, как поглощение на свободных носителях или поглощение за счет электрон-фононного взаимодействия. Как было недавно показано, эти механизмы могут на 1—2 порядка увеличить минимум оптических потерь, например, в кристаллах галогенидов таллия и серебра. Точный расчет вклада этих механизмов будет возможен только при получении более совершенных образцов кристаллов с содержанием примесей на несколько порядков ниже, чем в наиболее чистых образцах, полученных до настоящего времени.

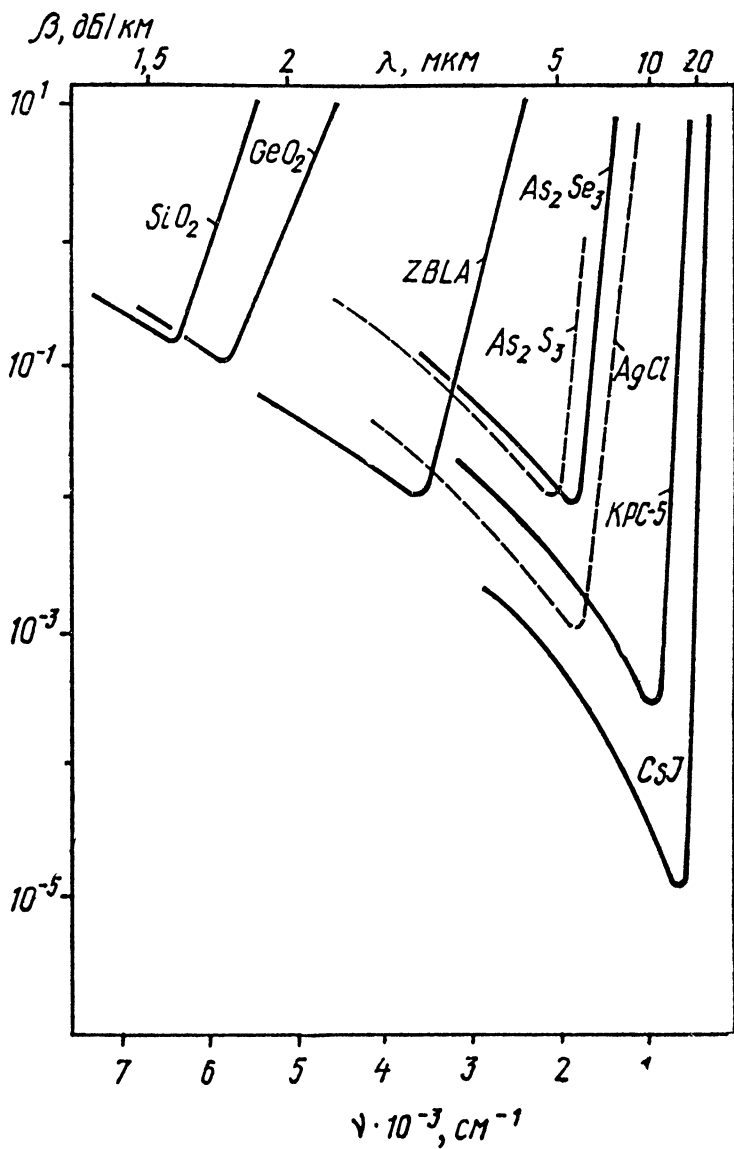


Рис. 2. Оценки минимальных оптических потерь для высокопрозрачных ИК-материалов

Однако выпускаемые промышленностью образцы различных ИК-материалов пока имеют уровень оптических потерь в тысячи и даже десятки тысяч децибелл на километр длины, и только в лучших образцах, полученных в лабораторных условиях, этот уровень снижен на два-три порядка. Столь высокие по сравнению с собственными оптические потери обуславливаются главным образом наличием в ИК-материалах различных примесей как в виде включений, приводящих к дополнительному рассеянию и поглощению проходящего излучения, так и в виде растворенных в основном материале разнообразных примесных комплексов, каждый из которых имеет присущие только ему полосы поглощения в средней ИК-области. Поэтому для реальных образцов вместо теоретической V -образной зависимости оптических потерь от длины волны (см. рис. 2) обычно во всем диапазоне прозрачности материала наблюдаются слабо зависящие от длины волны суммарные оптические потери, на фоне которых проявляются наиболее интенсивные полосы поглощения основных примесей.

Знание уровня поглощения излучения в ИК-материалах, его спектральной зависимости дает информацию о виде и концентрации поглощающих примесей и о других механизмах несобственных оптических потерь. А это позволяет совершенствовать технологические процессы получения материалов, снижая оптические потери в них до уровня минимально возможных собственных оптических потерь, как это было сделано для кварцевых стекол.

МАТЕРИАЛЬНАЯ ДИСПЕРСИЯ

Важной характеристикой материала и волоконного световода из него, определяющей ширину полосы пропускания, т. е. максимальную спектральную ширину передаваемого по световоду без искажений сигнала, считается материальная дисперсия $M(\lambda) = -(\lambda/c) d^2n/d\lambda^2$. Она является следствием зависимости показателя преломления материала световода от длины волны.

Лазерное излучение, передаваемое по световоду, хотя и считается монохроматическим, в действительности имеет некоторую конечную спектральную ширину линии $\delta\lambda$. Поэтому групповая скорость $v_{гр} = c/n(\lambda)$ рас-

пространения излучения по световоду различна для различных спектральных компонент излучения, что приводит к увеличению длительности передаваемых импульсов, их перекрытию и как следствию этого — к ограничению скорости передачи информации. Вблизи некоторой длины волны λ_0 , на которой материальная дисперсия обращается в нуль, ширина полосы пропускания световода достигает своей максимальной величины, определяемой уже производной $dM/d\lambda$, называемой наклоном S материальной дисперсии, в точке λ_0 .

Для определения этих характеристик необходимы прецизионные измерения спектральной зависимости показателя преломления, которые обычно проводятся по методу наименьшего отклонения с использованием треугольной призмы из исследуемого материала или по интерференционной методике на плоскопараллельных пластинках из этого материала. Измеренные значения показателя преломления затем аппроксимируются полиномиальным выражением или формулой Селмейера, дифференцирование которых позволяет рассчитать $M(\lambda)$, $S(\lambda)$ и λ_0 . Спектральные зависимости материальной дисперсии и ее наклона для некоторых ИК-материалов приведены на рис. 3. Сравнение с кварцевым стеклом говорит о том, что у высокопрозрачных ИК-материалов зависимость $M(\lambda)$ имеет вблизи длины волны λ_0 более пологий вид. Поэтому и по ширине полосы пропускания ИК-световоды могут превосходить кварцевые световоды.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СВЕРХНИЗКИХ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

Прежде чем изготавливать волоконные световоды из новых материалов, обычно сначала стараются получить из них как можно более чистые и совершенные объемные образцы и исследовать возможность достижения в них оптических потерь, предсказываемых теорией. Для этого необходимы высокочувствительные методы, позволяющие измерять оптические потери в твердотельных материалах на уровне 10^{-6} — 10^{-7} см $^{-1}$ (1—0,1 дБ/км).

Обычно для исследования оптического поглощения в твердотельных материалах используется прямой метод **спектроскопии пропускания**, который хотя и позволяет проводить измерения в широком спектральном диапазоне, однако чувствительность его довольно низка, она не

превышает 300—500 дБ/км, и кроме того, он не дает возможности непосредственно измерять раздельно объемное и поверхностное поглощения. А для большинства высокопрозрачных ИК-материалов характерно высокое поверхностное поглощение, зачастую превышающее объемное поглощение в 10^3 — 10^4 раз.

Значительно повысить чувствительность измерения поглощения в ИК-материалах позволяет другой спектральный метод, в котором анализируется излучательная способность E материала, равная, согласно закону Кирхгофа, его поглощательной способности. Для слабопоглощающих материалов при выполнении условия $\beta_v L \ll 1$ (где β_v — коэффициент объемного поглоще-

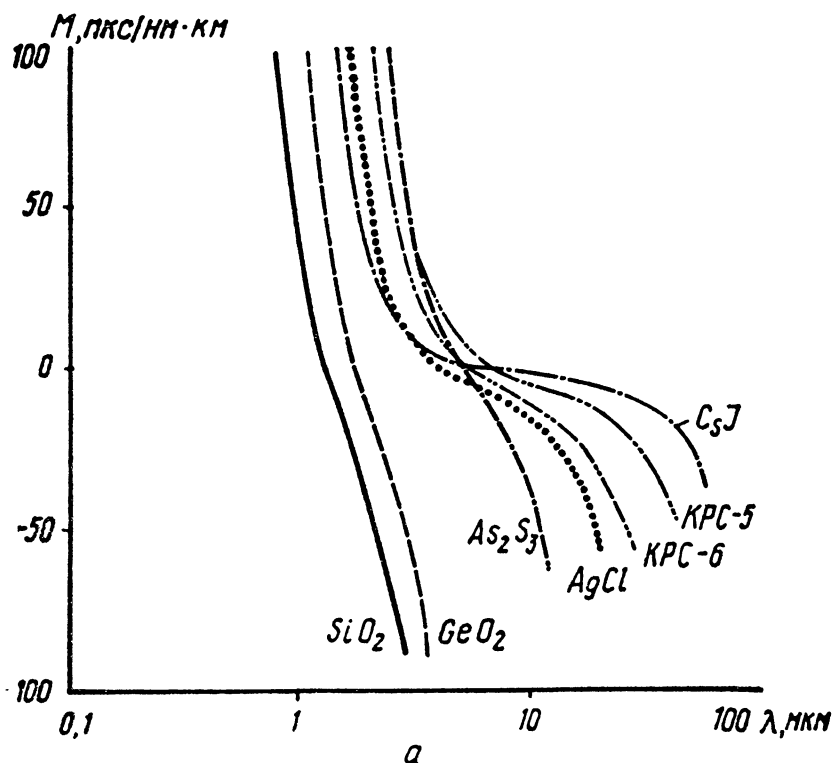
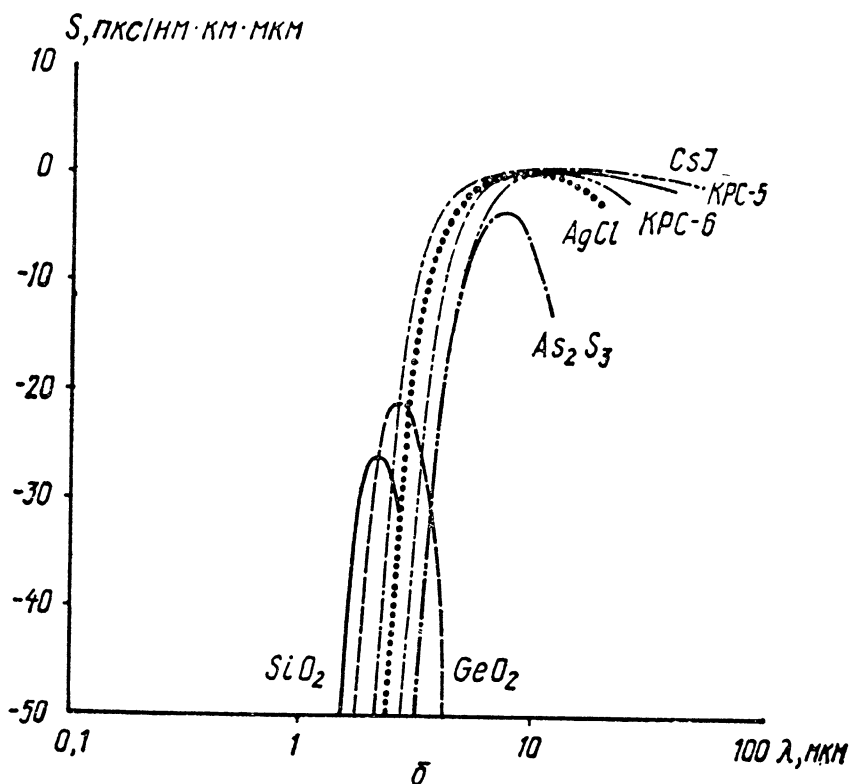


Рис. 3. Спектральная зависимость a — материальной дисперсии $M(\lambda)$ и b — ее наклона $S(\lambda)$ для высокопрозрачных ИК-материалов

ния, а L — длина образца) излучательная способность описывается выражением $E = 1 - \exp(-\beta_\nu L) \simeq \beta_\nu L$. Из него видны преимущества метода измерения излучательной способности для определения малых поглощений: простота вычислений и высокая абсолютная точность.

Так, при измерении полосы поглощения глубиной в 2% в спектре пропускания на обычном спектрометре, имеющем точность в 1%, погрешность определения коэффициента поглощения будет на уровне 50%. Если же измерять на этом же приборе излучение образца, то погрешность не превысит 1%. Существенно также и то, что поглощение менее 1% излучения таким спектраль-



ным прибором, работающим в режиме пропускания, вообще не может быть измерено. Кроме этого, при расчете поглощения из спектров излучения нет необходимости знания значений показателя преломления для различных длин волн, что обязательно для спектроскопии пропускания. Точность измерения поглощения при температурах не ниже 400 К в излучательной спектроскопии составляет $(1-3) \times 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ в среднем ИК-диапазоне, а при охлаждении всего спектрометра до температуры жидкого азота, приводящем к значительному снижению фонового излучения, она улучшается еще на 2 порядка. К недостаткам этого метода можно отнести сложность раздельного измерения объемного и поверхностного по-

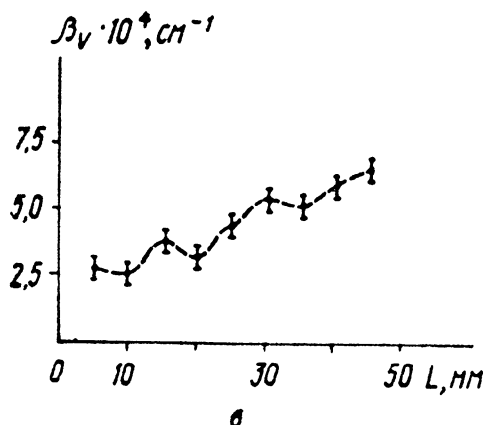
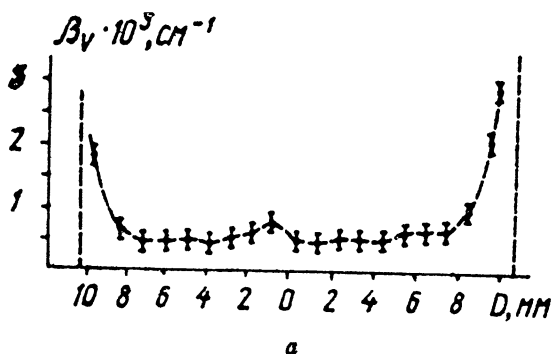


Рис. 4. Изменение объемного поглощения образца КРС-6: а — по диаметру, б — по длине

глощений, а также необходимость устранения фонового излучения.

Этих недостатков нет у метода **адиабатической лазерной калометрии**, наиболее широко применяемого в исследовании материалов для волоконной оптики, в котором измеряется и анализируется нагрев образца, вызванный поглощением проходящего через него лазерного излучения. Высокая чувствительность этого метода достигается главным образом благодаря применению источников излучения большой мощности (обычно от 1 до 100 Вт) и высокочувствительных систем измерения температуры.

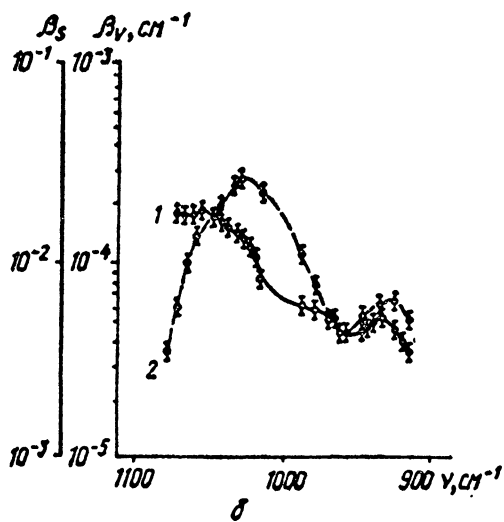
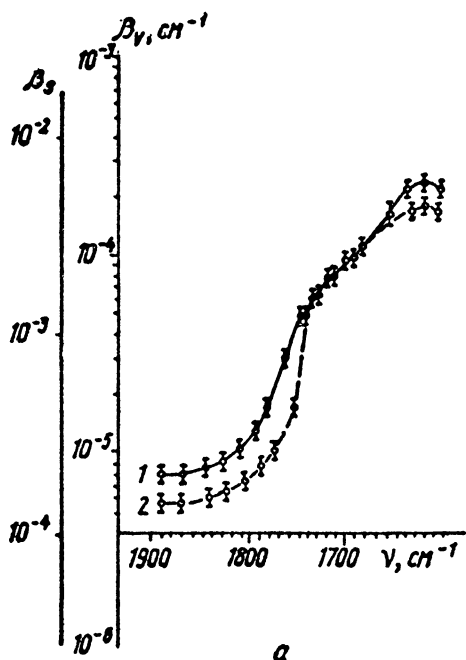
Сканируя излучение лазера по сечению образца и записывая кривые нагрева в различных точках его поверхности, можно получить семейства таких кривых, которые при заданной форме образца зависят от распределения величины объемного поглощения внутри образца и величины поверхностного поглощения на его торцах. Анализ экспериментальных кривых нагрева выполняется численным методом расчета уравнения теплопроводности, позволяющим определить температурный профиль в любой точке образца при произвольном прохождении через него излучения лазера.

Зная же распределение значений поглощения по объему образца, можно судить о его оптической однородности и влиянии на нее технологических параметров получения материала.

На рис. 4, а представлена зависимость коэффициента объемного поглощения на длине волны излучения CO_2 -лазера по диаметру D образца монокристалла КРС-6, а на рис 4, б — по его длине L .

Видно, что по всем выбранным направлениям сканирования лазерного луча в образце наблюдалось относительно небольшое изменение объемного поглощения внутри образца и его довольно резкий рост в прилегающем к поверхности слое, связанный, очевидно, с поступлением примесей из материала контейнера. Рост же объемного поглощения от одного торца к другому в направлении, совпавшем с направлением роста кристалла (выращенного по методу Стокбаргера в кварцевой ампуле), связан с оттеснением примесей, поглощающих излучение на длине волны 10,6 мкм, к концу кристалла.

Для получения методом лазерной калориметрии спектральных зависимостей коэффициентов объемного и



поверхностного поглощений, которые могут дать информацию о виде, количестве и форме вхождения поглощающих примесей в среднем ИК-диапазоне, могут быть использованы химические HF- и DF-лазеры, а также лазеры на окиси СО и двуокиси СО₂ углерода. Поскольку промышленностью эти лазеры с перестройкой по длине волны не выпускаются, в литературе опубликовано всего несколько работ, в которых калориметрическим методом получены спектральные зависимости коэффициента объемного и поверхностного поглощений твердотельных материалов в области перестройки этих лазеров.

Рис. 5 демонстрирует результаты таких измерений. Из него видно, что как объемное, так и поверхностное поглощение в образце кристалла КРС-5 в области перестройки СО-лазера имеет две полосы вблизи 1620 и 1740 см⁻¹, которые приписаны соответственно деформационному колебанию примесных молекул воды (Н—О—Н) и валентному колебанию примеси, имеющей связи С=О. Оба коэффициента в области измерений изменяются более чем на порядок, при этом минимальное значение объемного поглощения составило 8×10^{-6} см⁻¹ ($\simeq 4$ дБ/км).

Достигнутый уровень поглощения в ИК-материалах в области излучения мощных СО- и СО₂-лазеров все же значительно превосходит теоретические оценки минимально возможных собственных оптических потерь в этих материалах. Этот уровень обусловлен наличием примесей, концентрация которых часто значительно меньше той, которую можно определить с помощью химических и физико-химических методов анализа. Поэтому такие измерения могут оказаться исключительно важными при разработке технологических процессов получения ИК-материалов для волоконной оптики.

Чувствительность калориметрического метода можно повысить еще на 5—7 порядков за счет снижения температуры исследуемых образцов вплоть до гелиевых температур (4—1 К). При охлаждении, например, плавленого кварца от комнатной температуры до 1,3 К его теплоемкость уменьшается в 10⁵ раз, чувствительность же измерения температуры вблизи нескольких градусов

Рис. 5. Спектральные зависимости коэффициентов объемного (1) и поверхностного (2) поглощений кристаллов КРС-5(а) и CsI(б)

по Кельвину также примерно на 2 порядка выше, чем при комнатной температуре. Эти два обстоятельства позволяют существенно снизить мощность зондирующего излучения и использовать для измерений коэффициентов объемного и поверхностного поглощения уже источники малой мощности, такие, как перестраиваемые лазеры на красителях или даже глобары и штифты Нернста, совмещенные с обычными монохроматорами. Охлаждение твердотельных образцов приводит также к сужению и росту интенсивности примесных полос поглощения, поэтому измеряемые спектральные зависимости становятся более информативными. К сожалению, такие измерения инфракрасных материалов еще не проводились.

При разработке новых ИК-материалов для волоконной оптики зачастую удается получить образцы толщиной всего в несколько миллиметров. Для раздельного измерения коэффициентов объемного и поверхностного поглощений при таких толщинах метод лазерной калориметрии не подходит, поскольку требует по крайней мере нескольких сантиметров материала.

Для таких тонких образцов наиболее подходит **фотоакустический метод**, в котором регистрируется акустическая волна, возникающая в исследуемом образце и окружающем его газе при прохождении через образец оптического излучения. В этом методе разделение сигнала от объема и поверхности возможно вследствие их различной зависимости от частоты модуляции зондирующего излучения. При использовании как непрерывных, так и импульсных ИК-лазеров достигнута чувствительность измерения объемного и поверхностного поглощений этим методом соответственно в $1 \times 10^{-6} \text{ см}^{-1}$ и 1×10^{-5} .

Для измерения спектральных зависимостей оптических потерь в световодах используется главным образом инфракрасная спектроскопия пропускания, когда сравниваются сигналы, прошедшие через отрезки световода различной длины. Для устранения влияния оптических потерь на входном торце световода сначала измеряют интенсивность излучения $I_0(\lambda)$, прошедшего через световод некоторой длины L_0 , световод укорачивают, отрезая от его выходной части отрезок длины ΔL , а затем для оставшейся части L_1 световода измерения повторяют.

Оптические потери в световоде рассчитывают по формуле: $\beta(\lambda) = 10(\log I_0/I_1)/\Delta L$. Если длину световода выражать в километрах, то оптические потери будут в [дБ/км]. Измеряемые этим методом потери являются усредненной по длине ΔL характеристикой волоконного световода, причем чем ниже оптические потери в световоде, тем большие длины световода L_1 и ΔL приходится использовать для измерений, чтобы разница между сигналами I_0 и I_1 была ощутимой. Так, при оптических потерях в световоде на уровне 1 дБ/км длина отрезанного куска световода должна быть близка к 1 км.

Для локальных измерений оптических потерь в световодах разработаны модификации описанных выше калориметрического и фотоакустического методов, которые позволяют за счет использования излучения мощных ИК-лазеров измерять потери в световоде с разрешением в несколько сантиметров.

ИНФРАКРАСНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ

Опыт почти 30 предыдущих лет разработки методов получения волоконных световодов из кварцевых стекол и принципиально более высокие по сравнению с кристаллическими материалами скорости вытяжки световодов из стекол делают их более предпочтительными для производства волоконных световодов. Поэтому остановимся сначала на ИК-стеклах и световодах на их основе.

Световоды из окислов тяжелых элементов

Замещение в кварцевом стекле части двуокиси кремния на окислы более тяжелых элементов, таких, как алюминий, кальций, свинец, позволяет сдвинуть длинноволновый край пропускания примерно на 1 мкм. Однако при этом у таких стекол увеличивается склонность к расстекловыванию, ухудшается сопротивляемость к атмосферной влаге и существенно растут трудности удаления из них различных примесей, особенно ионов гидроксила OH^- .

Значительно дальше в длинноволновый диапазон вплоть до 6—7 мкм позволяет продвинуться большая группа необычных стекол на основе окислов мышьяка,

сурьмы, молибдена, вольфрама, лантана и других тяжелых элементов. Поскольку их стабильность хуже, чем у силикатных стекол, и, кроме того, многие из этих стекол удается получить только в виде тонких пластинок толщиной до нескольких миллиметров, они вряд ли смогут составить конкуренцию другим ИК-материалам.

Многие из перечисленных недостатков стекол на основе оксидов тяжелых элементов почти полностью удается преодолеть, переходя к германатным стеклам, т. е. стеклам на основе двуокиси германия (GeO_2). Среди оксидных стекол их можно считать наиболее перспективными для создания ИК-волоконных световодов с низкими оптическими потерями. При этом учитывается и то обстоятельство, что заготовки для вытяжки волоконных световодов из германатных стекол можно получить из наиболее чистых исходных компонентов, которыми являются летучие соединения, а газофазные методы хорошо изучены и отлажены в производстве кварцевых световодов.

В лучших световодах с сердцевиной из стекла системы $\text{GeO}_2\text{—Sb}_2\text{O}_3$ и оболочкой из чистой GeO_2 достигнуты оптические потери в 4 дБ/км на длине волны 2 мкм. Световоды были вытянуты из заготовки, полученной методом внешнего аксиального осаждения (VAD) из хлоридов германия и сурьмы.

Для достижения минимально возможных оптических потерь в таких световодах, оцениваемых в 0,06—0,08 дБ/км вблизи 2 мкм, необходимо снизить концентрацию ионов гидроксила в них с 0,5 ppm по крайней мере еще на 2 порядка. Сложность этой задачи, а также существенно большая стоимость исходных компонентов, содержащих германий, по сравнению с необходимыми для получения кварцевых световодов сдерживают разработку технологии и исследования германатных стекол. Все больше укрепляется мнение, что снижение оптических потерь в таких световодах даже до уровня 0,06 дБ/км, скорее всего, не сможет компенсировать все затраты на их производство и переоснащение линий оптической связи на длину волны в 2 мкм. Поэтому световоды на основе оксидов германия, как и световоды из любых других материалов, вряд ли будут конкурировать с кварцевыми световодами в линиях дальней оптической связи, если оптические потери в них не будут доведены по крайней мере до уровня 0,01—0,02 дБ/км и ниже.

Как и многие другие стекла из окислов тяжелых элементов, стекла на основе GeO_2 обладают высокими нелинейными свойствами. Сечение комбинационного рассеяния у германатных стекол примерно на порядок выше, чем у силикатных, поэтому световоды из них могут найти применение, например, в нелинейной оптике в качестве перестраиваемых по длине волны за счет комбинационного рассеяния лазеров.

Халькогенидные стекла и световоды

Халькогенидные стекла состоят из сульфидов, селенидов и теллуридов элементов главных подгрупп IV и V групп периодической системы, их комбинаций друг с другом и комбинаций с галогенами. Они отличаются высоким показателем преломления (примерно от 2,1 до 3,0) и низкой температурой стеклования (от 380 до 600 К). Вследствие относительно больших атомных масс компонентов и низких силовых постоянных связей между атомами халькогенидные стекла имеют значительно более длинноволновую границу пропускания (достигающую 12—16 мкм) по сравнению с оксидными (2—6 мкм) и фторидными (5—9 мкм) стеклами.

Наиболее характерными представителями этого класса стекол являются трисульфид As_2S_3 и триселенид As_2Se_3 мышьяка. Первый из них при толщине пластины в несколько миллиметров прозрачен примерно до 10 мкм, а второй — вплоть до 17 мкм. Прозрачность в ИК-диапазоне наряду с высокой химической стойкостью, устойчивостью к расстекловыванию и приемлемыми механическими характеристиками позволяет рассматривать халькогенидные стекла как конкурентоспособный материал для ИК-волоконных световодов.

Впервые о получении волоконных световодов из стекол системы As—S сообщил в 1965 г. Капани. Из этих световодов в США изготавливались жгуты, пластины и фоконы для передачи изображения в ИК-диапазоне спектра. Оптические потери в этих световодах были очень высокими (более 10 000 дБ/км), и они не нашли широкого применения. Постепенно интерес к халькогенидным стеклам как материалу для волоконных световодов начал спадать, поскольку тогда считалось, что в них нельзя снизить оптические потери до уровня ниже 400—500 дБ/км. И только в конце 70-х годов на волне

возрастающего интереса к ИК-материалам для волоконной оптики, когда было показано, что рэлеевское рассеяние и решеточное поглощение позволяют достичь в халькогенидных стеклах существенно более низких потерь, вплоть до 0,05 дБ/км в диапазоне длин волн от 4 до 6 мкм, началось всестороннее изучение и совершенствование методов очистки этих стекол и разработка различных способов изготовления из них волоконных световодов.

К настоящему времени уже получены волоконные световоды из халькогенидных стекол систем As—S, Ge—As—S, As—Se, Ge—As—Se, Ge—S, Ge—P—S, Ge—Se, As—Se—Te, Ge—As—Se—Te, и некоторых других. В лучших световодах оптические потери (см. рис. 6) составили 30—50 дБ/км для спектрального диапазона 2—2,5 мкм, 100—200 дБ/км для диапазона 2,7—3 мкм, 100—150 дБ/км в диапазоне 5,5—6 мкм и 3—6 дБ/м на длине волны 10,6 мкм.

Накопленный за прошедшие годы опыт позволяет поставить на первое место по трудности в длинной цепочке технологического процесса изготовления световодов из халькогенидных стекол проблему получения высокочистых исходных стекол и сохранения достигнутой степени чистоты при переработке стекла в световод.

Реальные стекла и световоды содержат пока еще значительное количество примесей, концентрация которых зависит от метода синтеза и чистоты используемых исходных веществ. По отношению к излучению, проходящему через образец стекла или световод, примеси условно разделяют на поглощающие и рассеивающие. Встроенные в сетку стекла или растворенные в нем примеси проявляются в спектрах пропускания в виде селективных полос поглощения. К таким примесям в первую очередь относятся соединения водорода, кислорода и углерода друг с другом и с элементами — компонентами стекла. Полосы поглощения этих примесей хорошо видны во всех без исключения спектрах оптических потерь халькогенидных световодов даже с рекордно низкими на настоящее время оптическими потерями.

Нерастворимые в стеклообразующем расплаве примеси создают гетерофазные включения, приводящие как к рассеянию проходящего излучения, так и к неселективному его поглощению. Эта группа примесей в халькогенидных стеклах изучена пока недостаточно. Основны-

ми примесями здесь считаются углерод и окислы кремния.

Высокочистые халькогенидные стекла для волоконной оптики получают как прямым синтезом из высокочистых простых веществ, так и глубокой очисткой соединений, смешиваемых затем в нужной пропорции для получения необходимых составов стекол.

Наибольшее распространение нашел метод прямого синтеза из простых веществ, проводимый в вакуумиро-

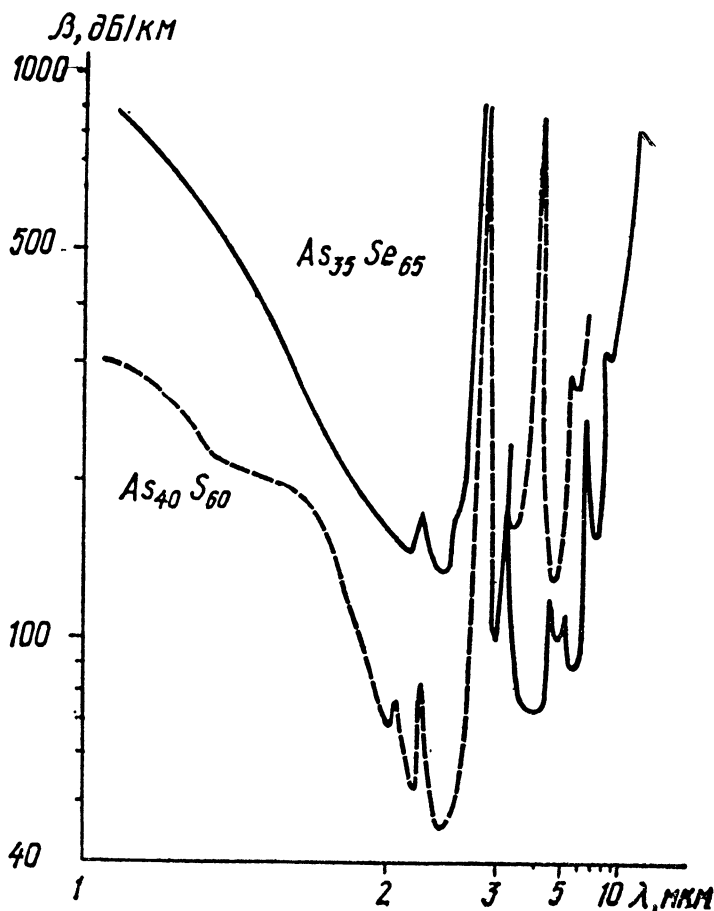


Рис. 6. Спектральная зависимость оптических потерь в однослойных халькогенидных световодах из стекол $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$ и $\text{As}_{35}\text{Se}_{65}$

ванных кварцевых ампулах при температуре от 900 до 1250 К в зависимости от состава стекла. Время синтеза, определяемое в основном массой стекла, достигает иногда нескольких десятков часов. Степень чистоты получаемых стекол зависит от чистоты используемых простых веществ, материала и чистоты контейнера, а также от температурно-временных условий синтеза. Согласно опубликованным данным наиболее чистые образцы халькогенидных стекол, полученные в Институте химии высокочистых веществ АН СССР (Нижний Новгород), характеризуются следующим содержанием примесей: металлы (Fe, Mg, Al, Mn, Cu) — 1×10^{-5} — 5×10^{-7} мас. %; кремний — $(1-5) \times 10^{-4}$ мас. %; кислород — $(1-10 \times 10^{-4})$ мас. % и водород — 1×10^{-5} ат. %. Концентрация субмикронных частиц в лучших образцах стеклообразного As_2S_3 не превышала 4×10^5 см⁻³ при их диаметре не более 0,22 мкм. Эти цифры на 2—4 порядка ниже, чем для промышленных халькогенидных стекол.

В процессе синтеза из кварцевого контейнера в расплав стекла поступает водород и диоксид кремния и образуются окислы мышьяка, которые существенно затрудняют дальнейшее снижение оптических потерь в халькогенидных световодах. По этой причине предпринимались попытки получить стекла и заготовки для вытяжки световодов из летучих соединений — гидридов и хлоридов мышьяка, серы, селена и германия.

Преимуществом такого подхода считается меньшая скорость поступления примесей в стекло, синтезируемое при более низких температурах за более короткое время, а также возможность объединить в одном процессе синтез стекла и получение заготовки с наперед заданным профилем показателя преломления, отслеживающим изменение состава наносимых слоев. Разложение летучих соединений осуществлялось как термически, так и в высокочастотном разряде пониженного давления. Благодаря более высокой чистоте исходных летучих соединений получаемые при этом стекла содержали значительно меньше примесных переходных металлов, кремния и кислорода, однако значительное количество (до нескольких атомных процентов) водорода и хлора.

К сожалению, процессы осаждения халькогенидных стекол из газовой фазы еще совершенно не изучены и не ясны возможности получения этих стекол с мини-

мальным содержанием растворенных в них исходных летучих соединений и продуктов реакций между ними.

В нашей стране промышленно освоен выпуск халькогенидных стекол различных составов (марки ИСК23—ИСК33 и др.), которые, однако, не подходят для изготовления световодов, поскольку оптические потери в них обычно превышают 5000 дБ/км.

Из зарубежных халькогенидных стекол наиболее известны и широко используются стекла марок T120($\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$) и T1173($\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$), которые разработаны Хилтоном в фирме «Техас Инструментс», США. Световоды из этих стекол пропускают излучение с длиной волны от 2 до 12 мкм и имеют оптические потери около 1000 дБ/км.

Изготовление волоконных световодов из халькогенидных стекол осуществляется двумя методами: вытяжкой из заранее полученной цилиндрической заготовки (преформы) или вытяжкой из расплава стекла. Заготовка бывает либо однородной (штабиковый метод), либо сборной, состоящей из штабика, помещенного в трубку, изготовленную из материала, несколько отличного состава (метод «штабик—трубка»). Нагрев заготовок проводится с помощью узкого омического или высокочастотного нагрева. Для предотвращения окисления стекла в зону вытяжки подается очищенный инертный газ (обычно аргон или гелий). Диаметр световодов составляет от 50 до 800 мкм. При фиксированной скорости подачи заготовки в зону нагрева он определяется скоростью вращения приемного барабана. Обычно реализуемая в этом методе скорость вытяжки лежит в пределах от 1 до 20 м/мин.

Вытяжка световодов из расплава реализуется в вариантах одинарного или двойного тигля аналогично вытяжке многокомпонентных силикатных стекол. Соотношение диаметров сердцевины и оболочки в световоде зависит от соотношения диаметров каналов, по которым вытекают соответствующие расплавы стекол, и может регулироваться изменением давления газа над каждым из расплавов. Естественно, что в зоне истечения расплавов из тигля создается защитная инертная атмосфера.

Оба метода получения световодов имеют свои достоинства и недостатки. В штабиковом методе легче решается проблема управления соотношением диаметров сердцевины и оболочки, тогда как тигельный метод обес-

печивает более высокое качество боковой поверхности световодов, а следовательно, и их более высокую прочность.

Попытки вытянуть волоконный световод из трубки, полученной, как описано выше, из летучих соединений и предварительно сжатой в стержень, привели к новым проблемам. Оптические потери в световоде из стекол системы As—Se оказались слишком большими — на уровне 120 дБ/м во всем диапазоне от 2 до 12 мкм, что было связано с большим остаточным содержанием водорода в заготовке. Ясно, что этот метод получения световодов требует серьезного дополнительного изучения.

Как уже отмечалось выше, достигнутый уровень оптических потерь в лучших халькогенидных световодах составляет 30—100 дБ/км, что значительно больше теоретически предсказанного. Как показали исследования, он обусловлен не только примесным селективным поглощением, но и спадающим в сторону увеличения длины волны так называемым слабым поглощением. Слабое поглощение имеет ту же частотную зависимость, что и край Урбаха, но значительно меньший наклон. Как уровень, так и наклон слабого поглощения зависят от состава и условий получения стекла, а также от содержания примесей в нем.

На рис. 7 показано положение слабого поглощения β_w для стекла As_2S_3 с различным содержанием примесных атомов железа в нем и для лучшего световода из этого стекла. Видно, что с уменьшением концентрации примеси падает и уровень слабого поглощения. Японские исследователи Канамори и другие на основе анализа зависимости слабого поглощения от содержания примесей в исходных материалах, условий синтеза и условий процесса вытяжки световодов пришли к выводу, что этот механизм ограничивает минимально достижимый уровень оптических потерь в халькогенидных стеклах примерно 10 дБ/км.

К сожалению, к настоящему времени еще не выполнены теоретические расчеты вклада слабого поглощения в собственные потери. Не ясно, какая часть наблюдаемого экспоненциального спада является собственной, а какая имеет чисто примесное происхождение. Поэтому вопрос о природе и уровне слабого поглощения в халькогенидных стеклах имеет принципиальное значение для

инфракрасной волоконной оптики. Ведь если нельзя довести собственные оптические потери в халькогенидных стеклах до величин ниже 10 дБ/км или даже 0,1 дБ/км, они не смогут составить конкуренции в линиях оптической связи световодам на основе кварцевого стекла

Тем не менее достигнутый уровень оптических потерь в халькогенидных световодах позволяет уже использовать их в различных областях науки, техники и медицины для передачи ИК-излучения на расстояния вплоть

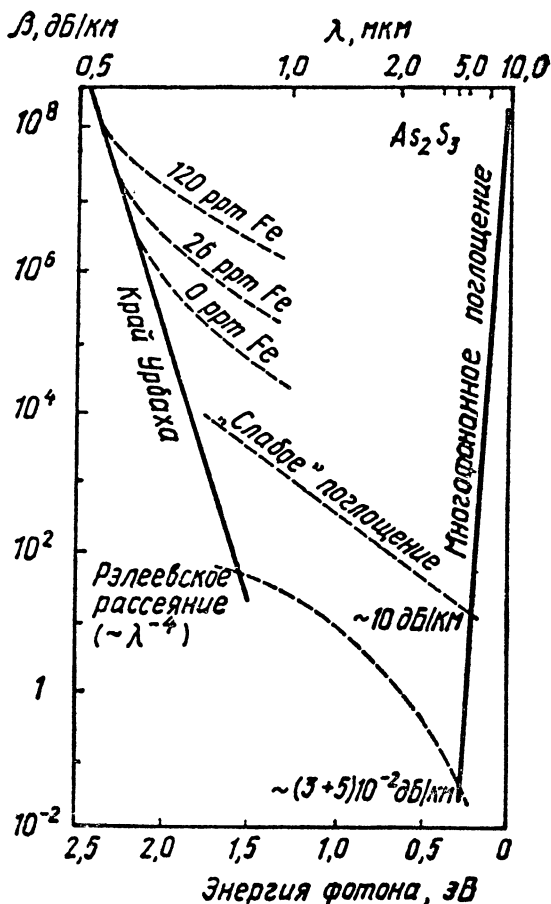


Рис. 7. Положение слабого поглощения для халькогенидного стекла As_2S_3

до 100 м. При этом в качестве основного параметра, определяющего эффективность, а зачастую и возможность использования таких световодов, выступает уже их механическая прочность. Теоретические оценки, основывающиеся на использовании понятия критического коэффициента растягивающих напряжений $K_{\text{ис}}$, предсказывают прочность световодов на основе различных составов халькогенидных стекол примерно в 2—3 раза меньшую, чем для кварцевых, т. е. около 3—5 ГПа. Реальная же прочность халькогенидных световодов пока значительно ниже из-за наличия в них большого количества дефектов как поверхностного, так и объемного происхождения. Средняя прочность при изгибе лучших халькогенидных световодов диаметром 400 мкм, полученных тигельным методом, составляет 0,6—0,8 ГПа, что позволяет им выдерживать изгибы с радиусом до 1—2 см.

Фторидные стекла и световоды на их основе

Во многих лабораториях мира ведутся исследования по созданию световодов из фторидных стекол. Эти исследования включают поиск наиболее устойчивых к кристаллизации составов стекол, разработку методов глубокой очистки исходных компонентов и методов синтеза высокочистых стекол, а также создание технологических процессов изготовления световодов большой длины.

Для фторидных световодов основной проблемой сейчас можно считать кристаллизацию стекол, поскольку образование кристаллов на любом из этапов получения световода в конечном итоге приводит к большим потерям на рассеяние и снижению его механической прочности.

Составы фторидных стекол. За время, прошедшее после синтеза в 1974 г. первых фторцирконатных стекол, обнаружено уже около 100 стеклообразующих систем на основе фторидов различных металлов. Среди этих систем наиболее устойчивыми к кристаллизации, а следовательно, и наиболее перспективными для изготовления световодов со сверхнизкими оптическими потерями считаются:

стекла на основе фторидов металлов IV группы (Zr, Hf, Th) — фторцирконатные стекла, фторгафнатные и ториевые стекла;

стекла на основе AlF_3 — фторалюминатные стекла;
стекла на основе фторидов переходных и редкоземельных элементов (таких, как Zn, Cd, Pb, Ln, Y).

Наиболее изучены фторцирконатные стекла. Для них основополагающей является двойная система ZrF_4 — BaF_2 , в которой область стеклообразования охватывает составы стекол с концентрацией ZrF_4 от 50 до 80 мол. %. Однако двухкомпонентные фторидные стекла легко кристаллизуются. Для их стабилизации, а также для регулирования вязкости и коэффициента преломления фториды циркония и бария частично замещают фторидами редкоземельных элементов, щелочных металлов, фторидами алюминия, тория, индия и некоторых других элементов. Наиболее устойчивые стекла получены в сложных фторцирконатных системах (в скобках приведены принятые сокращенные обозначения соответствующих систем), таких, как:

ZrF_4 — BaF_2 — LaF_3 — AlF_3 — NaF (ZBLAN),
 ZrF_4 — BaF_2 — LaF_3 — AlF_3 — LiF — PbF_2 (ZBLALP),
 ZrF_4 — BaF_2 — GdF_3 — AlF_3 (ZBGA) и других.

По имеющимся данным тетрафториду циркония по стеклообразующей способности не уступает тетрафторид гафния, однако он значительно дороже. Очевидно, по этой причине стекла на его основе изучены очень слабо.

Достаточно устойчивые стекла получены в системах, содержащих еще более тяжелый тетрафторид тория:

ThF_4 — BaF_2 — MF_2 (TBM, $M = \text{Ca, Zn}$),
 ThF_4 — BaF_2 — AlF_3 — LnF_3 (TBALn),
 ThF_4 — YbF_3 — ZnF_2 — BaF_2 (TYbZnB).

Стекла этих систем пропускают более длинноволновую часть инфракрасного излучения, чем стекла на основе ZrF_4 и HfF_4 , но менее устойчивы к кристаллизации. Имеются сообщения и о получении стекол на основе тетрафторида урана UF_4 .

Стекла на основе фторидов редкоземельных элементов и переходных металлов исследуются прежде всего

как материал для лазерных матриц, магнитных и электрических преобразователей и, следовательно, для активных световодов. Применение их для изготовления световодов большой длины проблематично из-за наличия собственных полос поглощения в ближнем и среднем ИК-диапазонах.

Поиски новых стеклообразующих фторидных систем и наиболее устойчивых составов стекол в этих системах продолжаются и в настоящее время. Цель этих поисков — составы стекол с максимально возможной разницей между температурой кристаллизации T_x и температурой стеклообразования T_g , которая для наиболее устойчивых к кристаллизации фторцирконатных стекол составляет около 400 К.

Оптические характеристики фторидных стекол. В отличие от халькогенидных стекол фторидные стекла, кроме ИК-диапазона, прозрачны также в ультрафиолетовом и видимом диапазонах. Коротковолновая граница пропускания лежит в зависимости от состава стекла от 0,2 до 0,3 мкм, а длинноволновая — от 6 до 9 мкм. Наименьшее поглощение в ультрафиолетовом и видимом диапазонах имеют фторалюминатные стекла, а наиболее длинноволновую границу пропускания — ториевые. Показатель преломления фторидных стекол лежит в интервале 1,4—1,6, составляя примерно 1,4 для стекол на основе AlF_3 ; 1,5 — для циркониевых и гарниевых стекол и около 1,6 — для ториевых стекол. Коэффициент отражения фторидных стекол составляет от 2,8 до 5,3% по сравнению с 3,4% для кварцевого стекла и 15—25% для халькогенидных стекол, используемых в волоконной оптике.

Как отмечено выше (см. рис. 2), оцениваемый минимум собственных оптических потерь для различных составов фторидных стекол лежит в диапазоне 2,5—3,5 мкм и составляет около 10^{-2} — 10^{-3} дБ/км.

Спектральная зависимость материальной дисперсии $M(\lambda)$ для фторидных стекол имеет более пологий вид, чем для кварцевого стекла, а нуль материальной дисперсии сдвинут в длинноволновый диапазон. Так, для фторцирконатных стекол $M(\lambda)$ обращается в нуль вблизи $\lambda_0 = 1,63$ — $1,67$ мкм, а наклон материальной дисперсии $S(\lambda)$ в этом интервале примерно в 2 раза меньше, чем у кварцевого стекла вблизи 1,3 мкм. Хотя длина волны нулевой материальной дисперсии λ_0 для фторид-

ных стекол довольно далеко от области минимума λ_m оптических потерь, уровень $M(\lambda_0)$ во всем промежуточном интервале длин волн от λ_0 до λ_m не превышает 25—40 пкс/нм·км и может быть скомпенсирован волноводной дисперсией световода. Пример такой компенсации для световодов из стекол системы HBL приведен на рис. 8. При диаметре сердцевинны 6 мкм и разнице показателя преломления сердцевинны и оболочки в $2 \cdot 10^{-2}$ суммарная дисперсия одномодового световода из таких стекол не превысит нескольких [пкс/нм·км] в широком спектральном диапазоне от 1,6 до 3,3 мкм, что позволяет использовать такие световоды в линиях связи с длиной безретрансляционных участков более 1000 км.

Вязкость и кристаллизация. Одной из важнейших для технологии изготовления световодов характеристикой фторидных стекол является температурная зависимость вязкости $\eta(T)$. В отличие от кварцевого стекла для фторидных стекол характерны нелинейная зависимость вязкости в координатах $\log \eta$ от $1/T$ и существенное увеличение энергии активации вязкости вблизи интервала температур вытяжки ($\log \eta = 5-6$) световода. По сравнению с кварцевым стеклом производная $d\eta/dT$ в этом интервале температур примерно на порядок выше и изменение температуры на 20 К приводит к уменьшению вязкости (например, стекла ZBLA) почти на два порядка. Для снижения энергии активации вязкости в

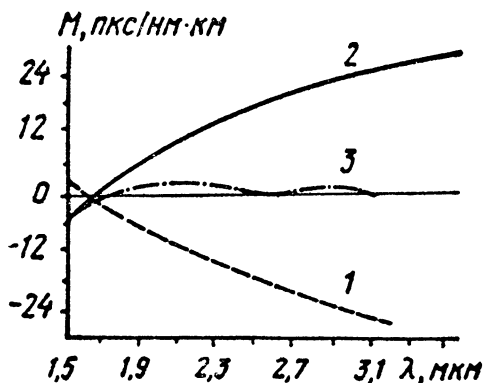


Рис. 8. Спектральные дисперсионные характеристики для световодов из стекла HBL: 1 — материальная дисперсия, 2 — волноводная дисперсия, 3 — их сумма

стекла вводят добавки фторидов щелочных металлов, обычно лития и натрия, а также фторида свинца.

Резкая зависимость вязкости от температуры является одной из причин образования центров кристаллизации в световодах из фторидных стекол, поскольку даже незначительные перегревы расплава ведут к сильному снижению вязкости и увеличению вероятности образования центров кристаллизации и повышению скорости их роста. Для многих фторидных стекол кристаллизация начинает проявляться в процессе нагрева уже при температурах, близких к температуре стеклования T_g . Так, в стекле 33 SrF_2 —16 MgF_2 —16 YF_3 —35 AlF_3 , нагретом до температуры T_g , доля закристаллизовавшегося стекла через 1 мин составляет 0,009%, а через 10 мин — 0,03%. Из таких стекол практически невозможно получить световоды без кристаллических включений, которые, как будет показано ниже, даже в небольшом количестве не позволяют достигнуть сверхнизких оптических потерь.

Основным методом изучения процессов кристаллизации фторидных стекол является дифференциальный термический анализ. Он обычно дополняется рентгеновскими зондовыми методами анализа образующихся в стеклах кристаллов, электронной и оптической микроскопией, а также измерениями уровня и индикатрис рассеяния излучения.

Получение и свойства световодов из фторидных стекол

Методы получения световодов. Основным методом получения световодов из фторидных стекол является вытягивание из штабика, отлитого из расплава. Разработано несколько способов литья двухслойных штабиков. В самом старом способе в цилиндрическую форму, в которой установлен сердечник, заливают расплав стекла с меньшим показателем преломления. В сливном методе в форму, поддерживаемую при температуре около T_g , заливают расплав стекла оболочки, который быстрее остывает и отвердевает у поверхности формы. Затем сливают центральную перегретую и маловязкую часть расплава, а внутрь формы со слоем отвердевшего на стенках стекла заливают расплав сердцевины. В методе вращения во вращающейся с высокой (до 3000 об/мин) ско-

ростью горизонтальной опорной трубе формируют высококонцентричную трубку. Толщина трубки регулируется объемом используемого расплава стекла. Затем внутрь трубки вливают расплав стекла сердцевины (рис. 9).

Вытяжка световодов из полученных штабиков осуществляется в печи с узким зонным нагревателем со скоростью от 5 до 40 м/мин. В качестве защитных покрытий применяются либо полиакрилатные отверждаемые ультрафиолетовым излучением смолы, либо термопластичные фторопласты. В последнем случае на заготовку одевается полимерная трубка, которая при вытяжке растягивается вместе с заготовкой. Показана также возможность получения заготовок с переменным по сечению показателем преломления путем диффузионной термообработки трубки в газовой среде, содержащей хлор, бром или их летучие соединения.

Типичные диаметры и длины заготовок, изготавливаемых из расплава, составляют 9—15 и 90—150 мм соответственно, хотя имеется сообщение о получении заготовки длиной 500 мм. При получении заготовок больших размеров существенно усложняется процесс заливки, увеличивается вероятность образования дефектов на границе сердцевина — оболочка (микрористаллы, пузыри, микроизгибы, неоднородности по составу). В

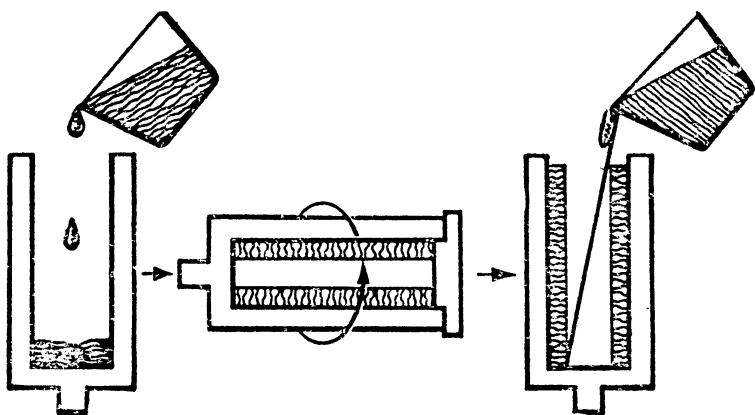


Рис. 9. Схема получения двухслойной заготовки сливным методом с вращением

наибольшей степени это проявляется в случае заготовок с малым диаметром сердцевины для вытяжки одномодовых световодов.

В связи с этим разрабатывается более сложный фильерный способ вытягивания световодов из фторидных стекол. Во избежание образования центров кристаллизации в большом объеме переохлажденного расплава, находящегося в тигле, разработаны методы вытягивания из фильеры, подпитываемой расплавом из тигля, находящегося при температуре выше температуры ликвидуса. Сама фильера при этом находится при температуре около T_g . Подпитка расплавом осуществляется двумя способами. В первом расплав подают на диск с фильерой сверху по каплям, во втором — по капилляру, подводимому к фильере из тигля. В этом варианте, изображенном на рис. 10, расплавы с составами сердцевины и оболочки поступают из герметичных тиглей под регулируемым давлением по двум капиллярам в центр и на периферию фильеры. Таким образом уже получены многомодовые световоды с диаметрами сердцевины и оболочки соответственно 115 и 180 мкм длиной до 700 м и одномодовые ступенчатые световоды того же внешнего диаметра с сердцевиной 13 мкм длиной до 500 м.

В последнее время внимание исследователей привлекают также газофазные методы получения заготовок из летучих соединений (хлоридов, металлоорганических соединений) с последующим после осаждения фторированием. Такие методы, исключающие высокотемпературный синтез стекла в контейнере и позволяющие совместить газофазную очистку с формированием заготовок, особенно перспективны. Однако подобный процесс осуществлен пока только при изготовлении заготовок из однокомпонентного стекла BeF_2 , но не для многокомпонентных фторидных стекол.

Примесное поглощение в световодах. На рис. 11 приведен типичный спектр оптических потерь световода из фторидных стекол. Потери на всех длинах волн существенно превосходят собственные и являются суперпозицией поглощения и рассеяния на примесных и структурных дефектах световода. Основными примесями, поглощающими в диапазоне от 1 до 5 мкм, во фторидных стеклах являются гидроксильные ионы OH^- , катионы переходных и редкоземельных элементов, а также неко-

торые кислород-, водород- и углеродсодержащие вещества, частоты собственных колебаний которых лежат в этом диапазоне.

В спектрах оптических потерь фторидных световодов всегда присутствует полоса поглощения валентного колебания гидроксильных ионов с максимум на длине волны около 2,9 мкм. Эта полоса поглощения является доминирующей в области от 2,6 до 3,6 мкм. Для основной полосы поглощения иона OH^- на длине волны 2,9 мкм найден коэффициент экстинкции (связывающий интенсивность поглощения с концентрацией примеси) для многих составов фторидных стекол. Он оказался близким к 12 000 дБ/км·ррт для стекол системы ZBLA и около 5200 дБ/км·ррт для стекол системы TYZB.

Согласно этим цифрам для снижения оптических потерь на длине волны 2,9 мкм до минимально возможного для фторидных стекол уровня концентрация примесных ионов OH^- должна быть ниже 10^{-6} ррт, т. е. среди 10^{12} атомов стекла не должно быть более одного иона OH^- . А это на три порядка меньше, чем для наиболее чистых кварцевых стекол.

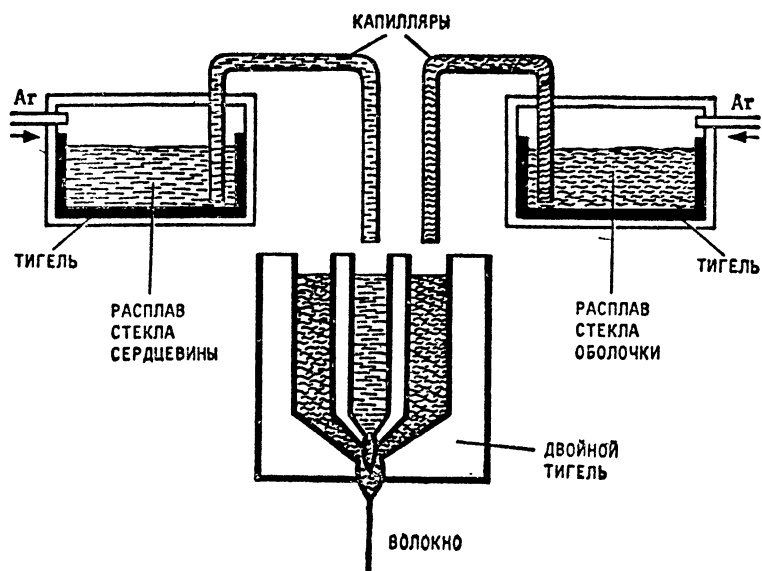


Рис. 10. Схема вытягивания двухслойных световодов тигельным методом с капиллярной подпиткой

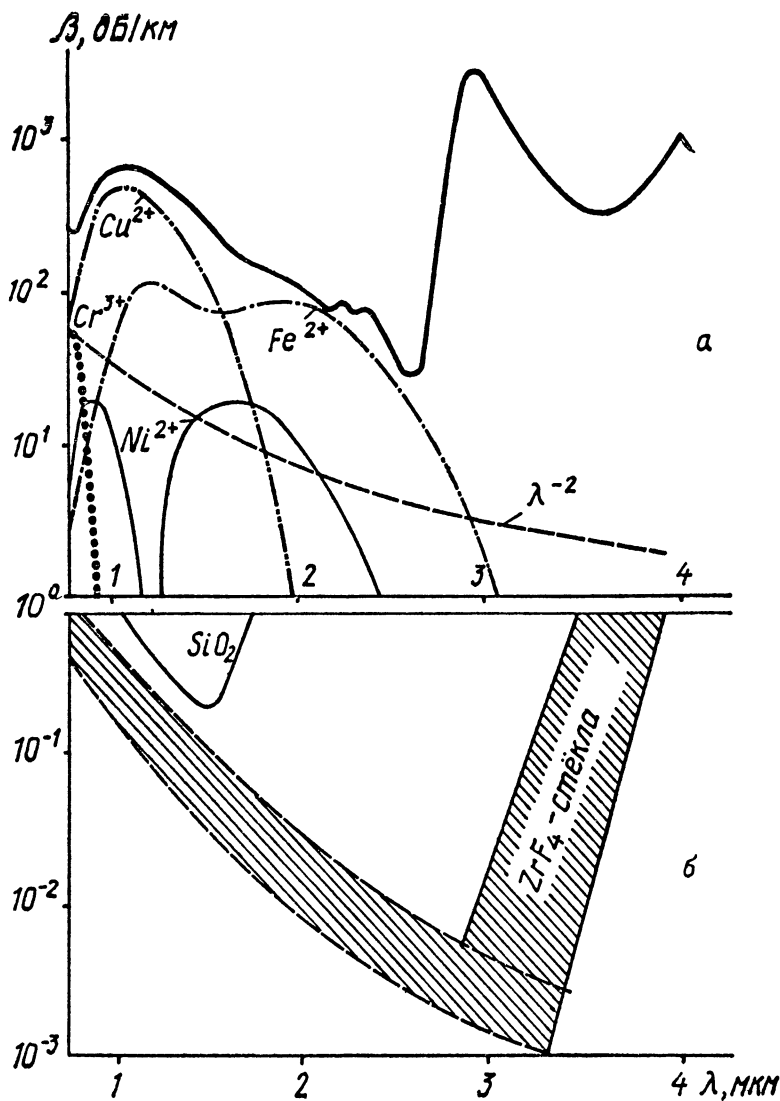


Рис. 11. Спектр полных оптических потерь в световоде из стекла ZBGA и его разложение на составляющие (а). Оценка собственных оптических потерь для фторцирконатных стекол (б)

Видимо, быстро не удастся создать технологию получения фторидных стекол и световодов из них с содержанием групп OH^- на таком низком уровне. Поэтому сейчас считается, что для всех фторидных световодов независимо от состава и положения собственного минимума оптических потерь наиболее вероятными рабочими длинами волн будут «окна прозрачности» вблизи 2,55 и 3,6 мкм слева и справа от основной полосы поглощения примесного иона OH^- (см. рис. 11), поскольку при поглощении в максимуме полосы на 2,9 мкм даже в 20 дБ/км ее вклад в поглощение на 2,55 мкм составляет уже менее 10^{-2} дБ/км. Поэтому требования к концентрации ионов OH^- во фторидных световодах для длины волны 2,55 мкм могут быть снижены более чем на три порядка по сравнению с диапазоном 2,8—2,9 мкм.

Из переходных металлов во фторидных стеклах основными лимитируемыми примесями являются соединения железа, кобальта, никеля и меди. Хотя максимумы полос поглощения ионов этих металлов лежат в диапазоне менее 2 мкм, к их содержанию во фторидных стеклах предъявляются столь же высокие требования, что и в кварцевом стекле. Экстраполируя «хвосты» полос поглощения переходных металлов в стеклах на область от 2 до 4 мкм, оценили их предельно допустимые концентрации для достижения во фторидных световодах потерь на уровне 0,01 дБ/км. Оказалось, что концентрация переходных металлов не должна превышать 0,1—0,01 ppm, при этом поглощение ионами железа и меди зависит от их валентности.

Ионы железа во фторидных стеклах имеют двух- и трехвалентные состояния, кобальт и никель — только двухвалентные, а ионы меди — одно- и двухвалентные. Было показано, что в стеклах ZBLAN, синтезированных в восстановительной атмосфере 1 ppm ионов железа в двухвалентном состоянии, вызывает поглощение в 26 дБ/км на длине волны 2,55 мкм, а такое же количество ионов железа, перешедших в трехвалентное состояние при синтезе того же стекла в окислительной атмосфере, — менее 1 дБ/км.

Коэффициент поглощения кобальта и никеля не зависит от состава газовой среды на стадии синтеза; медь же в противоположность железу при концентрации в 1 ppm вызывает оптические потери в 0,1 дБ/км в окис-

ленном состоянии (Cu^{2+}) и менее 10^{-3} дБ/км — в восстановленном (Cu^+). Поскольку соединения железа являются наиболее часто встречающейся примесью и поглощение двухвалентных ионов железа существенно выше, чем у двухвалентных ионов меди, для синтеза фторидных стекол более предпочтительна окислительная атмосфера, которая уменьшает отношение концентраций $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$. В инертной атмосфере это отношение близко к 0,1.

Для фторидных стекол, в состав которых входят LaF_3 , GdF_3 или YbF_3 , крайне нежелательными являются сопутствующие им Nd, Pr, Ce и другие редкоземельные элементы, поглощающие в диапазоне от 1 до 5 мкм. Их концентрация во фторидных стеклах для волоконных световодов также не должна превышать уровня 0,01—0,1 ppb. При этом для окна 2,55 мкм наиболее нежелательными примесями являются Fe^{2+} , Co^{2+} и Nd^{3+} , а для окна вблизи 3,6 мкм — Ce^{3+} и Eu^{3+} . Поэтому очистка исходных веществ от переходных и редкоземельных элементов является необходимым условием получения фторидных световодов со сверхнизкими оптическими потерями.

Примесные кислородсодержащие и углеродсодержащие ионы и молекулы в основном поглощаются в более длинноволновой области (>4 мкм), и поэтому их полосы поглощения в меньшей степени, чем полосы поглощения ионов OH^- , переходных и редкоземельных элементов, сказываются на затухании вблизи 2,55 мкм. Удаление примесей этого типа имеет большое значение с точки зрения расширения диапазона использования световодов, а также для устранения микронеоднородностей, приводящих к дополнительному рассеянию излучения.

Потери на рассеяние. Выполнение к настоящему времени измерения спектральных и угловых характеристик рассеяния излучения во фторидных стеклах и световодах показало, что потери на рассеяние Υ в них в диапазоне длин волн от 0,4 до 4 мкм могут быть описаны выражением

$$\Upsilon(\lambda) = A\lambda^{-4} + B\lambda^{-2} + C,$$

в котором первое слагаемое обусловлено рэлеевским рассеянием, второе — рассеяние Ми, а третье, независимое от длины волны излучения, представляет собой рассея-

ние на крупных неоднородностях, размеры которых значительно превосходят длину волны излучения λ .

В лучших синтезированных стеклах системы ZBLAL уже достигнуты близкие к теоретически предсказываемым потери за счет рассеяния, которые составляют 0,0148—0,0177 дБ/км на длине волны 2,5 мкм. Коэффициент A для них близок к 0,4—0,6 дБ/км·мкм⁻⁴, что примерно в 1,5 раза ниже, чем для световодов на основе кварцевого стекла. Рассеяние M_i для этих стекол не наблюдалось, а уровень неселективных потерь C составил 0,0013—0,0018 дБ/км, что существенно ниже рэлеевского рассеяния.

В заготовках и волоконных световодах такой уровень рассеяния еще не достигнут. Хотя для наиболее совершенных световодов значение A снижено до 0,35 дБ/км·мкм⁻⁴, величина неселективных потерь в них значительно выше, чем в стеклах. Она составляет 0,5—1,5 дБ/км и обуславливается дефектами, образующимися во время получения заготовок и вытяжки световодов, к которым в первую очередь относятся крупные кристаллические включения, пузыри и вариации диаметра. Показано, что уровень неселективных потерь в световодах из фторидных стекол системы ZBLAN коррелирует с суммарным содержанием примеси кислорода в них.

При прохождении излучения видимого диапазона через заготовки или по волоконным световодам из фторидных стекол наблюдаются два вида рассеяния: дискретное, т. е. рассеяние на отдельных крупных дефектах (кристаллах, инородных включениях, пузырях), проявляющихся в виде ярких светящихся точек, и однородное рассеяние в виде слабого свечения по пути прохождения излучения. Последнее существенно усиливается в присутствии оксидов, оксифторидов, гидрофторидов и органических веществ. Состав и структура центров рассеяния изучаются оптической, электронной, сканирующей микроскопией и различными рентгеновскими методами. Вклад в потери на рассеяние различными дефектами во фторидных световодах на основе ZBLAN на длине волны 2,55 мкм приведен в табл. 2.

Из таблицы видно, что наличия в световоде длиной в 1 км всего одного воздушного пузырька диаметром чуть больше 5 мкм или четырех кристаллических включений размерами от 2 до 4 мкм достаточно для того, чтобы оптические потери в нем превысили 0,01 дБ/км.

Еще более высокие требования предъявляются к постоянству диаметра световода.

Одной из причин увеличения потерь на рассеяние при вытяжке двухслойных световодов даже при использовании наиболее устойчивых к кристаллизации составов стекол является различная температурная зависимость вязкости составов сердцевины и оболочки, что приводит к перегреву одного из составов, усилению кристаллизации в нем и как следствие этого к росту рассеяния в световоде. Исследования вязкости, кристаллизации и зависимости рассеяния от температуры и времени отжига и закалки позволили подобрать следующие составы для сердцевины и оболочки световода: 53 ZrF₄—20 BaF₂—4 LaF₃—3 AlF₃—20 NaF и 39,7 ZrF₄—18 BaF₂—4 LaF₃—

Таблица 2

Оптические потери, обусловленные рассеянием
излучения с длиной волны 2,55 мкм
на оптических неоднородностях

Рассеивающий центр	Рассеяние на один центр, дБ	Кол-во центров, дающих затухание 0,01 дБ/км
Кристаллы размером 2—4 мкм	$2,2 \times 10^{-3}$	4
Включения размерами менее 1 мкм	$6,8 \times 10^{-7}$	15 000
Пузыри сечением менее 30 мкм ²	$1,0 \times 10^{-2}$	1
Вариации диаметром в 1,5%	$6,0 \times 10^{-2}$	0,2

3 AlF₃—22 NaF—13,3 HfF₄, которые имеют наиболее близкие температурные зависимости вязкости и наименьшее увеличение рассеяния в температурном интервале вытяжки световодов. Предполагается, что эта пара потенциально обеспечит вытяжку световодов с потерями на рассеяние менее 5×10^{-3} дБ/км на 3,5 мкм. В то же время отмечается, что эти составы стекол наиболее удобны и для фильерного метода получения световодов. Так, после заливки в тигель расплава стекла при температуре ликвидуса и выдержки его при температуре, соответствующей вязкости $10^{3,3}$ Пуаз в течение 15 мин увеличения рассеяния для данных составов стекол обнаружено не было.

Прочность световодов. Световоды из фторидных стекол, как и халькогенидные световоды, имеют меньшую, чем кварцевые световоды, прочность при растяжении и изгибе. По данным различных авторов, средняя прочность лучших фторидных световодов при растяжении лежит в пределах от 0,4—0,6 ГПа, а при изгибе достигает 1,2—1,6 ГПа. Фторопластовое покрытие увеличивает прочность фторидных световодов на несколько десятков процентов. Эти значения составляют лишь несколько процентов от рассчитанной по модулю Юнга и критическому коэффициенту интенсивности напряжений K_{Ic} теоретической прочности и примерно на порядок меньше, чем у совершенных кварцевых световодов в металлическом покрытии.

Одной из причин относительно низкой прочности фторидных световодов могут быть неконтролируемые поверхностные дефекты, образующиеся во время вытяжки. Показано, что прочность фторидных световодов сильно зависит от температуры вытяжки. С увеличением температуры прочность падает, что связывается с образованием и ростом микрокристаллов на поверхности световода. Учитывая большую разницу между значениями реальной и теоретической прочности, можно предположить, что по мере совершенствования и оптимизации параметров вытяжки прочность световодов из фторидных стекол будет существенно увеличена.

Важной для применения световодов в линиях связи большой протяженности является их длительная прочность, определяющаяся медленным ростом поверхностных трещин. Временную зависимость прочности обычно представляют в виде функции $\sigma \sim t^{-1/n}$. Коэффициент n , стоящий в показателе этой функции, сильно зависит от состава стекла и состава окружающей среды, и для различных фторидных стекол его измеренные значения лежат в пределах от 16 до 80. Интересным и важным является тот факт, что в безводных средах этот показатель для фторидных стекол больше, чем для кварцевого стекла, и, несмотря на меньшую исходную прочность, через 5—10 лет эксплуатации прочность фторидных световодов сначала сравнивается, а затем и превзойдет прочность световодов из кварцевого стекла. Таким образом, фторидные световоды с точки зрения временного ресурса работы даже предпочтительней, чем световоды из кварцевого стекла, при условии что к ним пол-

ностью исключен доступ влаги. Последнее обстоятельство указывает на необходимость разработки эффективных, скорее всего, герметичных, защитных покрытий для фторидных световодов.

Наведенные потери. Исследованию радиационной стойкости фторидных стекол посвящено уже довольно много работ, в которых изучается природа возникающих при различных видах облучения дефектов и их влияние на пропускание стекол в ультрафиолетовом и видимом диапазонах спектра. Влияние облучения на оптические потери в ближнем и среднем инфракрасном диапазонах изучено пока слабо. Для световодов из стекол ZBGA и ZBGAP наведенные потери на длинах волн 2,55 и 3,6 мкм имеют тенденцию к насыщению при дозах γ -облучения около 10^6 рентген и после облучения спадают за 24 часа почти в 2 раза, что значительно быстрее, чем на длинах волн 0,63 и 0,82 мкм. Это говорит о различной природе радиационных центров, дающих основной вклад в оптические потери в видимом и среднем ИК-диапазонах. Обнаруженные во фторидных стеклах радиационные центры разделены на две группы: электронные (Zr^{3+} и Hf^{3+}) и дырочные (F^-_2 и F^0), с которыми связываются полосы поглощения вблизи 460 и 290 нм соответственно.

Пока нет окончательных выводов о собственном и примесном вкладах в наведенные потери в среднем ИК-диапазоне для фторидных световодов, но предполагается, что их уровень должен быть значительно ниже, чем для световодов на основе кварцевого стекла в области их использования от 0,8 до 1,6 мкм.

Одномодовые световоды. Первые сообщения о получении одномодовых фторидных световодов появились в 1984—1985 гг. Для их вытяжки использовался полученный сливным методом штабик, помещенный в опорную трубку из фторидного стекла. Во всех работах отмечается сложность получения штабиков с малым диаметром сердцевинки сливными методами и значительный рост оптических потерь в вытянутых из таких штабиков световодах по сравнению с исходным стеклом. Это стимулировало работу по синтезу одномодовых световодов методом двойного тигля. По схеме, приведенной на рис. 10, получены одномодовые световоды длиной до 500 м при скорости вытяжки 15 м/мин.

Все большее внимание исследователи начинают уде-

лять системному анализу, разработке и оптимизации параметров источников и приемников ИК-излучения, пригодных для использования в линиях волоконно-оптической связи ИК-диапазона. Сообщалось об экспериментах по применению фторидных световодов для передачи информации на длинах волн 2,6; 3,2 и в диапазоне 3,5—5,5 мкм. В качестве источников излучения использовались лазеры на центрах окраски или диодные лазеры на основе соединений свинца: PbCdS , PbCdTe , PbSnTe . Приемниками излучения служили охлаждаемые фотодиоды InSb и HgCdTe , а также сверхпроводящая пленка $\text{BaPd}_{0,7}\text{Ba}_{0,3}\text{O}_3$. Хотя в экспериментах использовались многомодовые световоды, удалось передать модулированное излучение с частотой более 1 ГГц.

Учет влияния различных нелинейных эффектов на скорость передачи информации в системе связи с использованием фторидных стекол показал, что в области от 2 до 5 мкм наиболее сильное ограничение на прохождение излучения по световоду накладывает фазовая самомодуляция, которая ограничивает уровень мощности передаваемого сигнала несколькими милливаттами. Несмотря на это, при оптических потерях в световодах на уровне 0,01 дБ/км длина безретрансляционного участ-

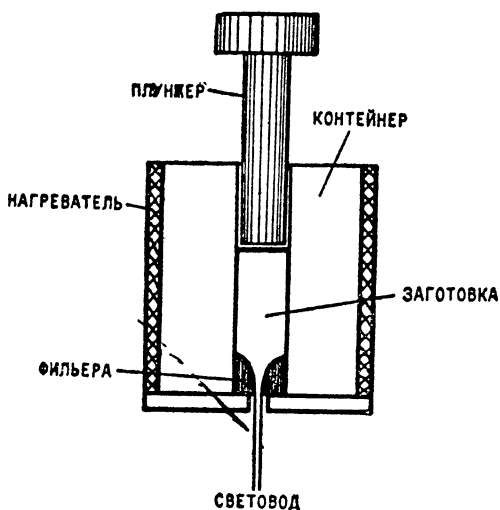


Рис. 12. Схема получения кристаллических световодов экструзионным методом

ка может достигать 4600 км при скорости передачи информации в 1 Гбит/с при работе на одной несущей длине волны. Такие линии сверхдальней оптической связи могут показаться фантастическими даже по сравнению с уже действующими системами связи на кварцевых световодах, которые, в свою очередь, около 20 лет назад многим также казались нереальными.

Кристаллические волоконные световоды

Как уже отмечалось выше, в совершенных кристаллах собственные оптические потери в области их высокой прозрачности могут быть значительно ниже, чем в стеклах. И хотя уже научились выращивать кристаллы галогенидов таллия, цезия и серебра с потерями в несколько децибелл на километр, сохранить этот уровень при их переработке в световоды пока не удастся. Это связано в первую очередь со значительно большей сложностью и слабой изученностью процессов изготовления световодов из кристаллов по сравнению со стеклами.

Для получения световодов из кристаллических материалов сейчас в основном используется два метода: пластическое деформирование через фильеру (экструзионный метод) и выращивание из расплава. При первом методе получения световоды имеют поликристаллическое, а при втором — монокристаллическое строение. Меньшими общими оптическими потерями должны в принципе обладать монокристаллические световоды из-за отсутствия в них зерен и границ раздела, приводящих к дополнительному рассеянию проходящего излучения.

Но первый, экструзионный, метод получения кристаллических световодов, схема которого приведена на рис. 12, проще, поэтому он нашел более широкое применение. Кроме того, с точки зрения механических свойств поликристаллические световоды из мягких кристаллов, к которым относятся галогениды таллия и серебра, вследствие известного эффекта деформационного упрочнения обладают в несколько раз большей прочностью по сравнению с монокристаллическими световодами из тех же материалов.

Первые поликристаллические световоды были получены экструзионным методом из кристаллов КРС-5 в 1978 г. Выбор галогенидов таллия, несмотря на их до-

вольно высокую токсичность, определялся тем обстоятельством, что в то время среди высокопрозрачных ИК-материалов эти кристаллы были самыми совершенными и обладали наименьшими оптическими потерями в среднем ИК-диапазоне. Относительно низкая температура плавления (T_m 600—700 К) галогенидов таллия и их высокая пластичность позволяли довольно просто производить их пластическую деформацию и изготавливать из них световоды с оптическими потерями, не превышающими 1 дБ/м в широком спектральном диапазоне от 6 до 20 мкм, что вполне достаточно для многих применений.

Более 10 лет галогениды таллия служили прекрасным модельным материалом для отладки технологии получения и исследования свойств не только поликристаллических, но и монокристаллических ИК-световодов. Только в последние годы внимание разработчиков все больше переключается на кристаллы галогенидов серебра, которые за прошедшие годы научились выращивать с оптическими потерями в десятки децибелл на километр. Удалось также в значительной степени подавить их высокую фоточувствительность.

Потери за счет рассеяния. В поликристаллических световодах рассеяние существенно выше, чем в монокристаллических, полученных из тех же материалов. Это обусловлено возникающими при пластической деформации дефектами структуры. Первые же измерения спектральной зависимости потерь за счет рассеяния Υ в них показали, что рассеяние убывает обратно пропорционально квадрату длины волны, т. е. $\Upsilon \sim \lambda^{-2}$.

Для объяснения такой зависимости было предложено несколько моделей. В первой модели упругонапряженных областей высокий уровень рассеяния связывался с остаточными после пластической деформации напряжениями в световодах, которые можно было наблюдать в поляризованном свете. Благодаря упругооптическому эффекту показатель преломления в таких областях отличается от напряженных участков на некоторую величину Δn . Хотя поперечные размеры этих областей достаточно велики по сравнению с длиной волны света ($d \gg \lambda$), в оптическом смысле их можно считать малыми, поскольку $\Delta n l \ll \lambda$.

Другой механизм рассматривает рассеяние на отдельных дислокациях. Дислокации образуют поля дального-

действующих напряжений, убывающих обратно пропорционально расстоянию от них, при этом оказывается, что рассеяние и в этом случае может быть пропорциональным λ^{-2} . При сечении рассеяния на дислокации в 10^{-18} см² и максимально возможной в деформированной структуре плотности дислокаций в 10^{13} см⁻³, что маловероятно, так как в результате рекристаллизации и полигонизации их плотность снижается на 3—5 порядков, потери за счет такого вида рассеяния на длине волны 5 мкм не могут превышать 5—10 дБ/км, что значительно ниже наблюдаемого в поликристаллических световодах уровня рассеяния.

Совершенствование технологии получения поликристаллических световодов и дальнейшие исследования оптических потерь в них показали, что спектральная зависимость потерь за счет рассеяния зачастую отклоняется от пропорциональной λ^{-2} и может иметь вид $\lambda^{-\eta}$, где η лежит в пределах от 0 до 4, при этом показатель η для разных длин волн может принимать различные значения (рис. 13). К существованию сложной зависи-

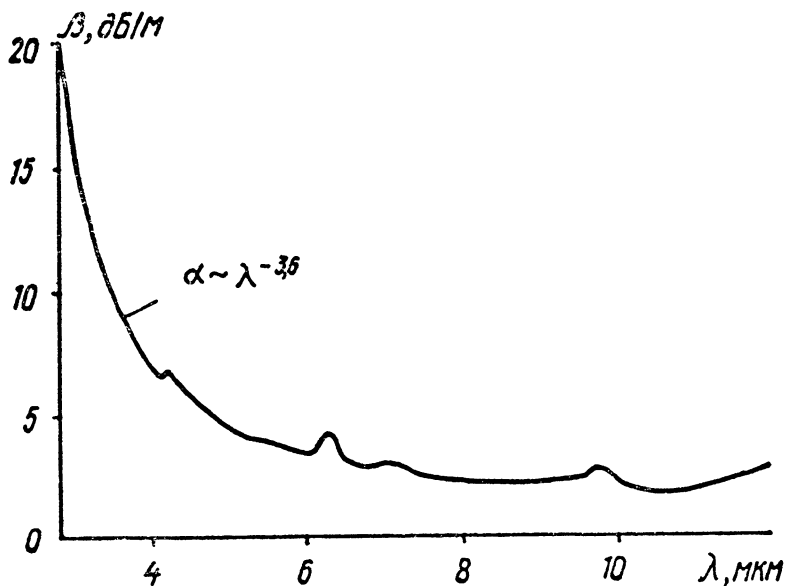


Рис. 13. Спектральная зависимость полных оптических потерь в кристаллическом световоде из галогенидов серебра

мости оптических потерь на рассеяние в поликристаллических световодах приводит, скорее всего, разнообразие дефектов в них. Эта зависимость является суперпозицией вкладов от различных видов дефектов, отличающихся по размеру и разнице Δn между коэффициентами преломления дефекта и кристалла. Так, например, группа дефектов, удовлетворяющих условию Рэлея $\Delta n l \ll \lambda$, дает зависимость рассеяния, пропорциональную λ^{-4} . Группа дефектов с $\Delta n \ll 1$ при условии $\lambda < \pi n l < \lambda/(n-1)$ дает зависимость λ^{-2} . В соответствии же с теорией Ми многие рассеивающие центры, соизмеримые с длиной волны излучения, приводят к рассеянию, как раз пропорциональному $\lambda^{-\eta}$, где $0 < \eta < 4$.

Изучение процессов пластической деформации кри-

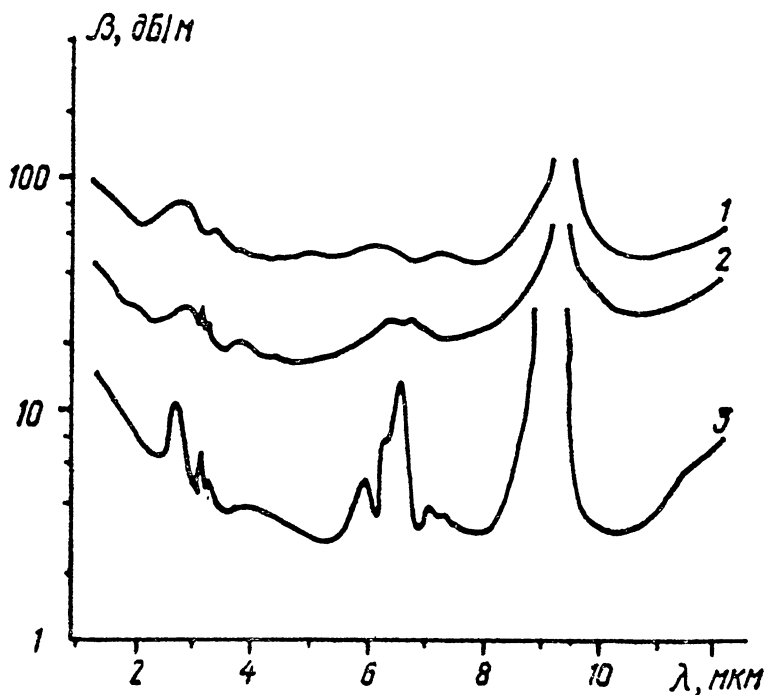


Рис. 14. Спектры полных оптических потерь монокристаллических световодов: 1 — однослойный световод из TiCl ; 2 — двухслойный световод: TiBr (сердцевина) — $\text{TiBr}_{0,8}\text{Cl}_{0,2}$ (оболочка); 3 — то же, что 2, но с покрытием из полиэтилена

сталлов показало, что наиболее вероятными дефектами, вызывающими объемное рассеяние в поликристаллических световодах, являются микропоры и микротрещины. Кроме того, в световодах излучение рассеивается при отражении от боковой поверхности. Наличие поверхностных шероховатостей, к которым неизбежно приводит экструзионный метод из-за сильного трения материала о стенки фильеры и из-за неровностей самой фильеры, поверхностное рассеяние дает значительный вклад в полные оптические потери.

Дальнейшее снижение оптических потерь в кристаллических световодах связывается с разработкой двухслойных световодов, наружная поверхность которых не участвует в распространении излучения по световоду. Преимущества таких световодов видны из рис. 14, на котором снижение оптических потерь в монокристаллическом световоде происходит за счет перехода к двухслойному световоду и последующего нанесения на него защитного полимерного покрытия, устраняющего адсорбцию из окружающей атмосферы молекул воды, углекислого газа и других молекул. Раздельное измерение оптических потерь на поглощение и рассеяние методом лазерной микрокалориметрии на длине волны 10,6 мкм показало, что потери на рассеяние в волокнах без оболочки превышают потери на поглощение в них в 2—3 раза. В световодах же с оболочкой потери на рассеяние и поглощение примерно равны между собой.

Одной из нерешенных проблем для поликристаллических световодов является увеличение со временем оптических потерь в них за счет роста размеров зерна в световодах. Разрабатываемые методы подавления такого роста используют введение различных стабилизирующих добавок в кристаллы и оптимизацию режимов дополнительных термообработок световодов.

Уже получены как поли-, так и монокристаллические галогенидные световоды с оптическими потерями около 100 дБ/км на длине волны CO_2 -лазера. Снизить этот уровень потерь до 0,1 дБ/км и ниже вряд ли удастся в поликристаллических световодах в основном из-за рассеяния на внутренних структурных неоднородностях, таких, как границы зерен и поры, а в монокристаллических световодах — из-за рассеяния на флуктуациях диаметра. Поэтому кристаллические световоды из галогенидов таллия, серебра и щелочных металлов сейчас

разрабатываются в основном для передачи излучения лазеров большой мощности для медицинских и технологических целей. Конечно, они найдут применение и в других областях науки и техники.

ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ СВЕТОВОДОВ

Сверхдальняя оптическая связь

Самой важной областью использования ИК-световодов может стать сверхдальняя оптическая связь. В современных линиях оптической связи, в которых используются кварцевые световоды, проходящий по ним сигнал приходится усиливать через каждые 50—100 км. Если удастся разработать технологию получения ИК-световодов с оптическими потерями на уровне 0,01 дБ/км, то расстояние между усилителями-ретрансляторами можно будет увеличить вплоть до 4—5 тыс. км. К примеру, в электрических системах связи передаваемые сигналы усиливаются через каждые 4—6 км.

Поэтому, кроме увеличения количества каналов связи и скорости передачи информации, линии оптической связи на ИК-световодах позволят существенно сократить количество усилителей, производство, эксплуатация и ремонт которых требуют больших затрат, чем производство самих световодов. Основные характеристики линий связи на фторидных световодах сведены в табл. 3.

Таблица 3

Сверхдальняя оптическая связь

Длина волны	2,4—2,65 мкм, 3,2—4,5 мкм
Оптические потери	< 0,1 дБ/км
Источники	Узкопол. п/п; PbSnSe, GaInAs...
	P = 1—100 мВт
Приемники	Фотодиоды: HgCdTe, InSb
	S = 10 ⁻⁹ Вт
Энергетический потенциал линий связи	60—80 дБ
Частота	> 1 ГГц
Длина безретрансляционного участка	> 4000 км

В табл. 4 приведен уровень достигнутых к настоящему времени оптических потерь в ИК-световодах. Он еще довольно высок по сравнению с теоретически предсказываемым, но уже достаточен для некоторых применений, в которых длины используемых световодов не превышают десятков метров.

Таблица 4

Уровень оптических потерь в ИК-световодах

Материал	Рекордный уровень потерь, дБ/км	Обычный уровень потерь, дБ/км	Длина волны, мкм
$\text{GeO}_2\text{—Sb}_2\text{O}_3$	4	—	2
Халькогенидные	30—50	200	2—2,5
	80—100	500	5—6
Фторидные	0,7—0,9	100	2,5
Кристаллические	80—100	300	10,6
Полюс металлические	50	100	10,6

Активные ИК-световоды

Исключительно быстрыми темпами в последние годы исследуются активные ИК-световоды. В основном это световоды из фторидных стекол, в которые дополнительно введены различные редкоземельные элементы. Цель таких исследований — создание волоконных лазеров, усилителей и преобразователей на ближний и средний ИК-диапазоны спектра.

Уже разработаны активные волоконные лазеры, излучающие на следующих длинах волн:

Nd^{3+} — 1,05 и 1,35 мкм,
 Ho^{3+} — 1,38 и 2,08 мкм,
 Er^{3+} — 0,85; 0,98; 1,56 и 2,7 мкм,
 Tm^{3+} — 0,82; 1,48; 1,88 и 2,35 мкм.

Наиболее важным достижением здесь считается получение генерации на длине волны 1,35 мкм, поскольку в кварцевых световодах, активированных ионами Nd^{3+} на этой важной для линий оптической связи длине вол-

ны (минимум материальной дисперсии для кварцевого стекла), такой генерации получить не удастся. Для длины волны 2,55 мкм — предполагаемой рабочей длины волны для линий сверхдальней оптической связи на фторидных световодах сейчас изучаются свойства стекол, активированных ионами урана.

Пирометрия

Довольно давно вошло в практику и широко применяется бесконтактное измерение температуры нагрева тел по величине их теплового излучения. При таких пирометрических измерениях регистрируется разность излучений тела и окружающего его фона. В тех случаях, когда объект, температуру которого необходимо измерить, находится в труднодоступном месте или когда между объектом и пирометром имеется промежуточная среда, значительно влияющая на показания пирометра, а также в условиях сильных электромагнитных помех часто оказывается наиболее удобным применение волоконных световодов.

Применение для этих целей кварцевых волоконных световодов ограничивается областью достаточно высоких температур, превышающих 500 К, поскольку длинноволновая граница диапазона пропускания таких световодов лежит вблизи 2 мкм.

Особый же интерес представляет термоконтроль биологических объектов, частей работающих электрических машин, элементов микроэлектроники и других устройств, температура которых ниже 500 К или даже близка к температуре окружающей нас среды. В этом случае за счет использования ИК-световодов, пропускающих излучения до 8—25 мкм, можно снизить температуру объектов вплоть до комнатных. В литературе уже описано несколько конструкций волоконных ИК-пирометров, позволяющих измерять температуру нагретых тел от 30°С и выше. В них опробированы световоды из халькогенидных и фторидных стекол, а также кристаллические световоды. Наиболее ярким применением таких пирометров может стать диагностика раковых клеток, температура которых всего на один градус выше, чем у здоровых. А необходимая для этого чувствительность в 0,1 градуса в интервале температур от 36 до 42 градусов в экспериментах уже достигнута.

Силовая волоконная оптика

Использование гибких волоконных световодов, позволяющих передавать по ним мощное лазерное излучение для медицинских, технологических и военных целей, заменит в будущем довольно громоздкие и недостаточно удобные зеркальные манипуляторы. Излучение лазера видимого и ближнего ИК-диапазонов в настоящее время успешно передается по кварцевым волоконным световодам. В медицине лазерные скальпели с такими световодами уже применяются. Они особенно эффективны для коагуляции крови, которая сильно поглощает излучение этих диапазонов. Ткани же тела человека и вообще биоткани на 70—90% состоят из воды.

Удаления в процессе операций определенных участков биоткани путем ее испарения лазерным лучом с наи-

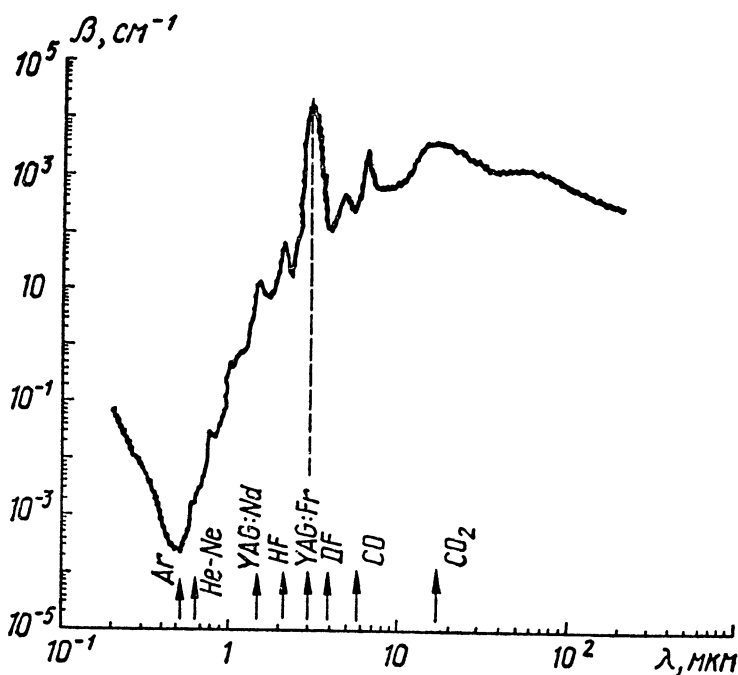


Рис. 15. Спектральная зависимость поглощения воды и положение основных полос излучения мощных лазеров

большей эффективностью и с минимальным воздействием на ближайшие участки удается достичь лишь при сильном поглощении излучения биотканью. А для этого необходимо совпадение длины волны излучения лазера с максимумами полос поглощения биоткани. Поэтому наиболее перспективным в лазерной хирургии сейчас считается YAG:Er^{3+} лазер, или проще — эрбиевый лазер, длина волны излучения которого равна 2,94 мкм и как раз попадает в наиболее интенсивную полосу поглощения нормальных колебаний воды.

На рис. 15 представлена спектральная зависимость коэффициента поглощения воды в ультрафиолетовом видимом и ИК-диапазонах. Стрелками указано положение

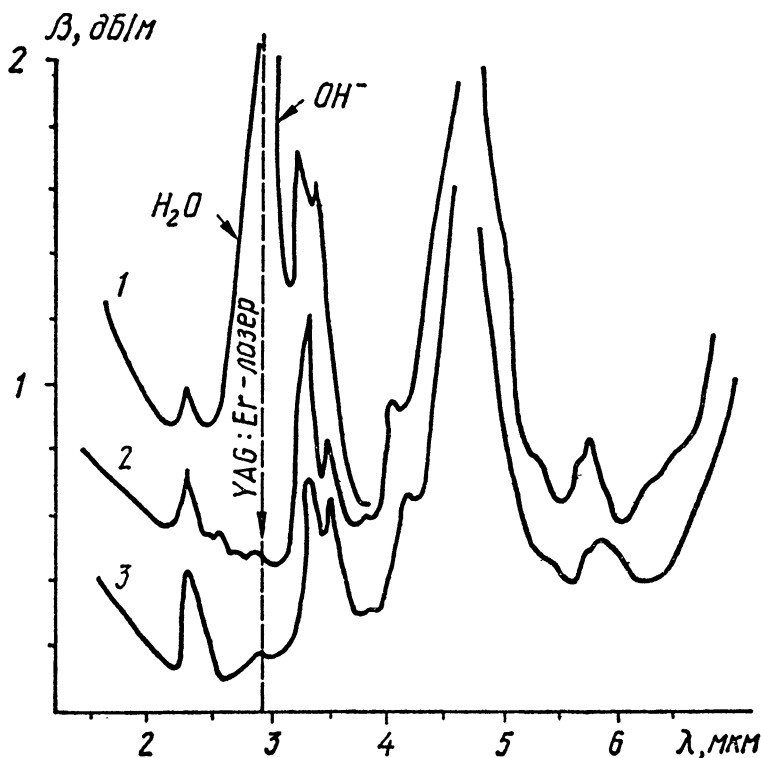


Рис. 16. Спектры полных оптических потерь в световодах из халькогенидного стекла $\text{Ge}_3\text{As}_{38}\text{Se}_{57}$ с различным содержанием ионов OH^-

основных полос излучения мощных лазеров. Видно, что максимальное поглощение излучения водой происходит вблизи 2,95 мкм. Оно составляет около $1,27 \times 10^4 \text{ см}^{-1}$. Практически все биоткани имеют близкие к этому значению коэффициенты поглощения излучения эрбиевого лазера. Благодаря столь высокому поглощению использование этого лазера позволяет по сравнению с другими лазерами существенно снизить пороговую (минимальную) плотность энергии, необходимую для испарения биоткани. Кроме того, значительно уменьшается глубина остающихся после операции рубцов.

При длительности импульса излучения Ег-лазера в несколько сот микросекунд пороговая энергия испарения биоткани составляет около 1 Дж/см² для мягких тканей и около 10 Дж/см² — для твердой ткани зуба (дентина). Эти значения определяют те минимальные уровни энергии лазерных импульсов, которые необходимо передавать по световоду для испарения биоткани с помощью лазерных скальпелей. При этом считается, что волоконный световод не будет перегреваться и разрушаться в процессе пропускания необходимых для медицинских целей уровней энергий, если оптические потери в нем на длине волны излучения используемого лазера не превышают 200—300 дБ/км.

К сожалению, во всех ИК-материалах, а следовательно, и световодах на их основе одни из основных поглощающих примесей — это те же молекулы воды H_2O и ионы гидроксидов OH^- , полосы поглощения которых лежат вблизи 2,9 мкм. Поскольку концентрация в 1 ppm этих примесей приводит к дополнительному поглощению в световоде в 8—10 дБ/м, разрабатываемые для медицины световоды не должны содержать более 0,05 ppm воды и гидроксидов. Очистка же ИК-материалов от этих примесей до такого уровня представляет собой довольно сложную задачу.

Несмотря на это, уже получены как халькогенидные, так и фторидные световоды, вполне пригодные для передачи излучения эрбиевого лазера. На рис. 16 приведены спектральные зависимости оптических потерь, в световодах из халькогенидного стекла $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{Se}_{58}$ различной степени чистоты.

Снижение оптических потерь в световоде N3 до уровня 170 дБ/км явилось результатом совершенствования химической стадии процесса очистки, обеспечивающей

перевод кислорода и водорода примесных ОН-групп в отделяемые соединения, оптимизации режима дистилляционной очистки расплава стекла от дисперсных включений и улучшения подготовки внутренней поверхности контейнера, в котором осуществлялась гомогенизация расплава после дистилляции.

Из рис. 15 видно, что для лазерного скальпеля благодаря сильному поглощению биотканью излучения перспективны и мощные СО- и СО₂-лазеры. Этому способствует также высокая надежность конструкции и стабильность параметров излучения этих лазеров. Во многих клиниках мира ведутся пробные испытания силовых инфракрасных волоконных световодов, а их разработчикам уже удалось пропустить излучение СО-лазера мощностью в 40 Вт по стеклянному халькогенидному световоду, 47 Вт излучения СО₂-лазера по монокристаллическому световоду из CsBr и 130 Вт излучения СО₂-лазера по поликристаллическому световоду из КРС-5.

Еще большие мощности удается передавать по так называемым полым световодам, наиболее быстрыми темпами разрабатываемым сейчас в Японии. Эти световоды представляют собой полую трубку, их сердцевиной является воздух, а оболочкой — диэлектрик или металл. Сечение полости бывает круглым или прямоугольным. Диаметр пустотелой круглой полости обычно составляет от 0,5 до 1,5 мм, а стороны прямоугольной близки одна к 0,4—0,5 мм, а вторая — к 10—12 мм.

Для круглых полых металлических световодов характерна высокая эффективность ввода излучения в них СО₂-лазера, поскольку удается хорошо согласовать гауссово распределение по углу интенсивности излучения этого лазера с основной НЕ₁₁-модой таких световодов.

После того как научились покрывать внутреннюю поверхность световода диэлектриком, позволяющим снизить потери в НЕ₁₁-моды в десятки раз, удалось передать по такому световоду диаметром 1,5 мм излучение непрерывного СО₂-лазера мощностью в 1000 Вт. Такой мощности достаточно для разрезания стального листа толщиной 1,6 мм со скоростью 5 см/с.

Следующим шагом намечено заменить германиевое внутреннее диэлектрическое покрытие в этом световоде на другое диэлектрическое покрытие с меньшим показателем преломления, такое, например, как селенид цинка. Это должно еще больше снизить потери в световоде

и позволить передавать по нему уже излучение мощностью в несколько тысяч ватт. К сожалению, худшая гибкость и большие внешние размеры не позволяют полым световодам конкурировать во многих других областях применений с кристаллическими и стеклянными световодами.

Аналитическая ИК-спектроскопия

Использование световодов в аналитических целях существенно расширяет возможности инфракрасной спектроскопии, поскольку они позволяют исследовать газообразные, жидкие и твердотельные образцы, которые по тем или иным причинам нельзя поместить в измеритель-

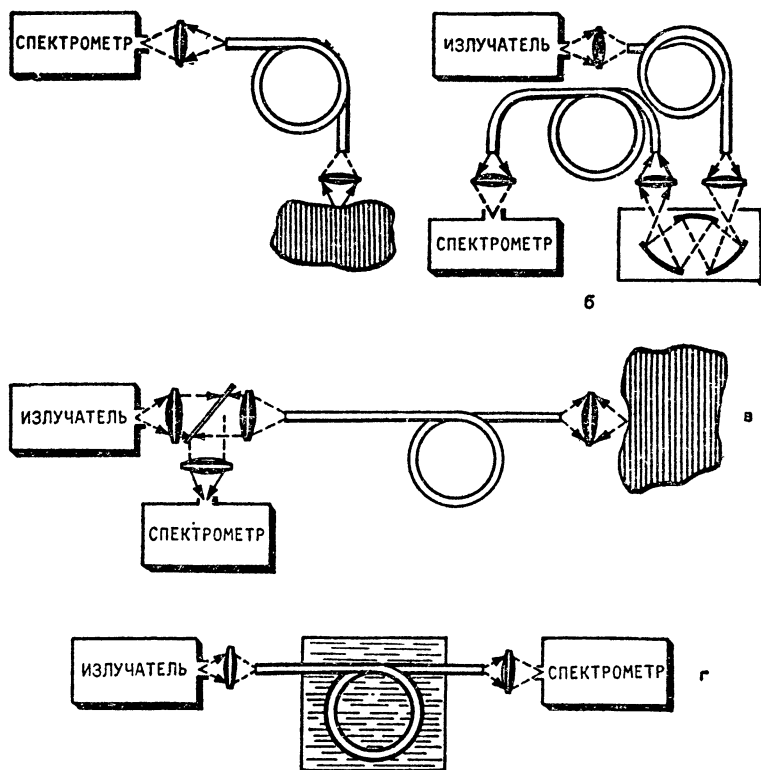


Рис. 17. Измерение спектров излучения (а), пропускания (б), отражения (в) и многократного неполного внутреннего отражения (г) с использованием ИК-световодов

ную камеру спектрального прибора. Световоды позволяют снять многие ограничения на размеры образцов и их форму. Появляется возможность проводить исследования в условиях сильных электромагнитных полей или жесткого радиационного облучения.

В зависимости от характера регистрируемого сигнала системы измерения с использованием ИК-световодов можно разделить на четыре основных вида. Это системы для измерения спектров излучения, пропускания, отражения и многократного неполного внутреннего отражения. Схемы таких систем показаны на рис. 17. На их основе будут созданы разнообразные анализаторы, контролирующие уровень загрязнений в сточных водах или газообразных выбросах различных технологических процессов в целях экологии, а также состав вдыхаемого или выдыхаемого анестезирующего газа при проведении сложных операций в медицине.

Кроме того, ИК-световоды сами по себе представляют прекрасный объект для исследования оптических свойств материала, из которого они состоят. Чувствительность измерения как собственного, так и примесного поглощения в световоде возрастает на много порядков. Появляется возможность проведения исследования тонких механизмов взаимодействия излучения с материалом световода, которые невозможны для обычных образцов небольшой длины.

Так, например, известно, что в халькогенидных стеклах под действием различных видов излучений (гамма, рентгеновского, ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного диапазона) появляется дополнительное поглощение, которое хорошо изучено вблизи коротковолнового края пропускания стекол, где оно наиболее сильно выражено. Измерение такого дополнительного поглощения в более длинноволновом диапазоне, т. е. в области высокой прозрачности стекол, значительно сложнее из-за слабости его проявления в этом диапазоне и ограниченной чувствительности метода абсорбционной спектроскопии. Использование для измерений вместо пластин стекла волоконных световодов позволяет в сотни и даже тысячи раз увеличить область воздействия излучений с материалом световода путем их взаимодействия, например, на боковую поверхность световода и соответствующего накопления эффекта взаимодействия по его длине.

На рис. 18 показана спектральная зависимость фотоиндуцированных обратимых оптических потерь $\Delta\beta(\lambda)$ для халькогенидных световодов разного состава. Этот вид потерь возникает при боковом освещении световодов как солнечным светом, так и различными искусственными источниками излучения, такими, как лампы накаливания, люминесцентные или галогенные лампы. Наводимые такой засветкой оптические потери пропорциональны квадрату освещенности I световодов, а спектральная зависимость потерь имеет необычный экспоненциальный вид

$$\Delta\beta(\lambda) = AI^2 \exp(-B\lambda) \equiv AI^2 \exp(-E^*/E).$$

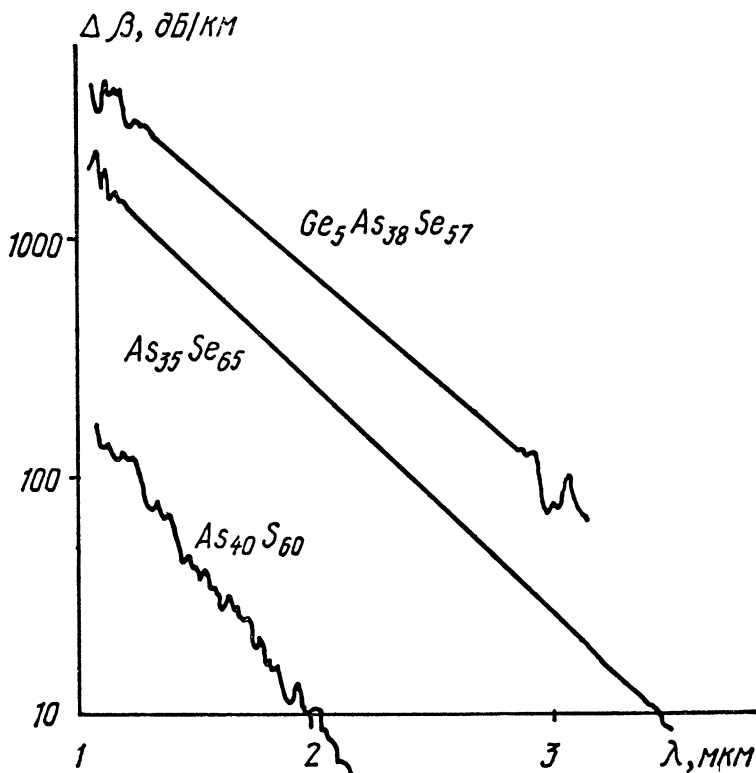


Рис. 18. Спектральная зависимость обратимых фотоиндуцированных оптических потерь для халькогенидных световодов различного состава

В этом выражении энергия фотона E стоит в знаменателе, а не как обычно в числителе показателя экспоненты. Константы A и B или A и E^* зависят от состава и температуры световода. Только измерения наведенных потерь в световодах длиной до 10 м позволили продвинуться в длинноволновую область вплоть до 5—6 мкм и аппроксимировать потери приведенным выражением. А это, в свою очередь, не только послужило исходными данными для теоретического объяснения такой зависимости, но и позволило оценить влияние засветки световодов за счет их естественного или искусственного освещения (например, на точность измерения полных потерь в них) и выработать рекомендации относительно светопроницаемости полимерных покрытий, наносимых на халькогенидные световоды. С другой стороны, возможность накопления по длине световодов наводимых внешним источником излучения оптических потерь может обеспечить им применение в качестве датчиков излучения, но для этого необходимы как дальнейшее снижение оптических потерь в световодах, так и широкие исследования температурной и временной зависимости наводимых потерь.

Волоконно-оптические датчики

Еще одним перспективным направлением использования ИК-световодов могут стать датчики различных физических полей, таких, как электрическое и магнитное поля, механические смещения, давление, температура и др. Большое разнообразие ИК-материалов позволяет в широких пределах менять физические параметры световодов и таким образом добиваться необходимых характеристик волоконных датчиков, чувствительность которых может значительно превосходить чувствительность датчиков на основе кварцевых световодов.

Так, на рис. 19, *а* и *б* приведены рассчитанные чувствительности фазовых волоконно-оптических датчиков давления и температуры на основе различных видов ИК-световодов. Видно, что датчики давления с ИК-световодами могут обладать чувствительностью на 1—2 порядка большей, чем датчики с кварцевыми световодами. Чувствительность же датчиков температуры $\Phi(\lambda)$ на основе ИК-световодов может как превосходить, так и быть

существенно ниже, чем на основе кварцевых световодов. В выражение для $\Phi(\lambda)$ входят коэффициент теплового расширения α материала световода, его показатель преломления и производная показателя преломления по температуре:

$$\Phi(\lambda) = (2\pi/\lambda) \{ \alpha n(\lambda) + dn(\lambda)/dT \}$$

И величина $\Phi(\lambda)$ в зависимости от величины и знака слагаемых в этом выражении может быть как очень большой, так и исчезающе малой. Так, для хлорида серебра чувствительность к колебаниям температуры очень низка для широкого спектрального диапазона и обращается в нуль на длине волны вблизи 3 мкм. Для йодида цезия эта длина волны близка 8 мкм. Такая низкая термочувствительность ИК-световодов может быть исключительно полезной для многих применений, например, для тех же датчиков давления, когда необходима высокая устойчивость их параметров к колебаниям температуры окружающей среды.

На базе ИК-световодов из различных диэлектрических материалов, постоянная Верде которых во много раз больше, чем у кварцевого стекла, могут быть созданы высокочувствительные датчики магнитного поля и быстродействующие оптические затворы, в которых используется магнитооптический эффект. Он заключается в изменении под действием магнитного поля поляризации проходящего по световоду излучения. Помещая световод в магнитное поле напряженностью H и пропуская по нему линейно поляризованный свет, можно по углу поворота Θ направления поляризации света определить напряженность поля, связанную с углом соотношением Верде: $\Theta = V \times H \times L$, где L — длина световода. Однако прежде чем такие волоконно-оптические датчики будут созданы, необходимо решить задачу получения одномодовых ИК-световодов достаточной длины и прочности, к которой разработчики еще только приступают.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из приведенных выше примеров видны широкие возможности использования ИК-световодов в науке, технике и медицине. Трудно, конечно, ожидать в ближайшие

годы быстрого внедрения ИК-световодов в линии сверхдальней оптической связи, поскольку еще не решены проблемы получения световодов большой длины со сверхнизкими потерями и достаточно высокой прочностью.

Однако для таких применений, как дистанционное измерение температуры нагретых тел, передача изображения в ИК-диапазоне, дистанционный контроль состава и уровня загрязнений окружающей среды, передача мощного лазерного излучения для технологических и медицинских целей, в которых требуемая длина световодов составляет обычно от полуметра до нескольких десятков метров, полученные к настоящему времени ИК-световоды уже вполне пригодны. Теперь главное слово за разработчиками надежных и недорогих приборов на базе таких световодов.

Научные же исследования, направленные на дальнейшее улучшение параметров ИК-световодов, продолжаются. Постепенно волоконная оптика среднего ИК-диапазона начинает выделяться в самостоятельную область науки и техники. Это обуславливается как спецификой получения инфракрасных материалов и световодов на их основе, так и направлениями их возможного применения.

Развитие инфракрасной волоконной оптики иницииро-

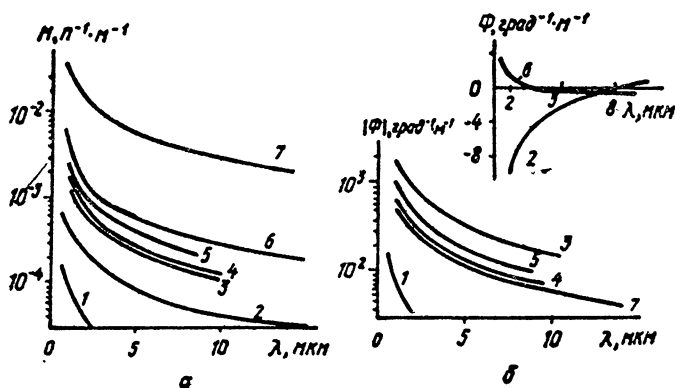


Рис. 19. Зависимость чувствительности волоконно-оптических датчиков давления (а) и температуры (б) от длины волны для различных ИК-световодов: 1 — SiO_2 ; 2 — CsJ ; 3 — As_2Se_3 ; 4 — ИКС-28; 5 — As_2S_3 ; 6 — AgCl ; 7 — КРС-5

вало расширение работ в таких областях, как получение и очистка многих ИК-материалов, разработка источников и приемников излучения в ИК-диапазоне и многих направлений, связанных с применением световодов.

С 1981 г. проводятся специальные международные конференции, посвященные ИК-световодам, которые теперь стали ежегодными. Дополнительно раз в полтора года собирается симпозиум по галлидным стеклам, на котором основное внимание уделяется главному претенденту на лидерство в соревновании за достижение сверхнизких оптических потерь — фторидным стеклам.

ЛИТЕРАТУРА

Девятых Г. Г., Дианов Е. М. Волоконно-оптическая связь: 20 лет спустя // Вестник АН СССР. — 1990. — № 6. — С. 143.

Дианов Е. М., Дмитрук Л. Н., Плотниченко В. Г., Чурбанов М. Ф. Волоконные световоды на основе высокочистых фторидных стекол // Высокочистые вещества. — 1987. — № 3. — С. 10—34.

Проблемы волоконной оптики. — М.: Наука, 1988. Труды ИОФАН. — Т. 15. — 183 с.

Дрекстейдж М. Г., Мойнихэн К. Г. Инфракрасные волоконные световоды // В мире наук. — 1989. — № 1. — С. 56—62.

Научно-популярное издание

Дианов Евгений Михайлович

Плотниченко Виктор Геннадиевич

ИНФРАКРАСНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ

Гл. отраслевой редактор Г. Г. Карвовский

Редактор К. А. Кутузова

Мл. редактор Н. А. Сергеева

Обложка художника А. Г. Смирнова

Худож. редактор И. А. Емельянова

Техн. редактор О. А. Найденова

Корректор Л. В. Иванова

ИБ № 11328

Сдано в набор 10.12.90. Подписано к печати 15.03.91. Формат бумаги 84×108¹/₂. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,57. Уч.-изд. л. 3,39. Тираж 11 740 экз. Заказ 1972. Цена 40 коп. Издательство «Знание» 101635, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 914003. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

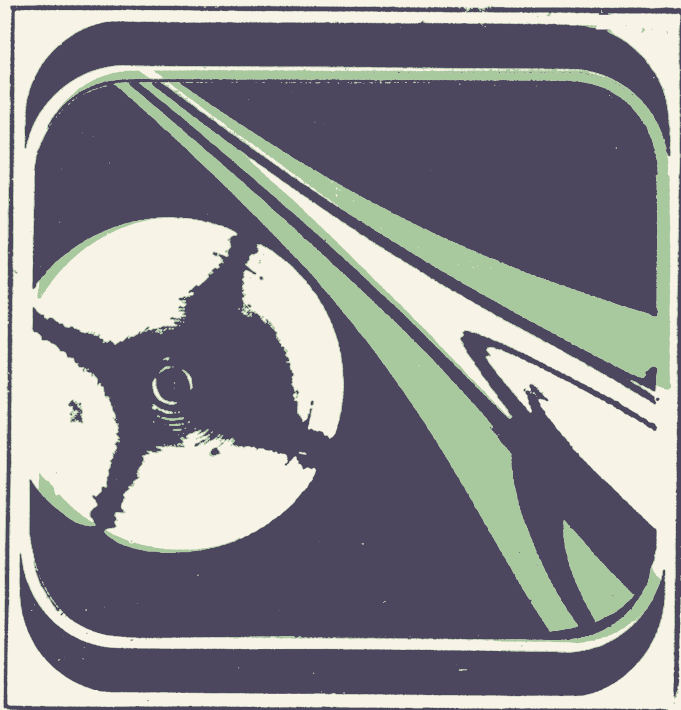
Дорогой читатель!

Брошюры этой серии в розничную продажу не поступают, поэтому своевременно оформляйте подписку.

Подписка на брошюры издательства «Знание» ежеквартальная, принимается в любом отделении «Союзпечати».

Напоминаем Вам, что сведения о подписке Вы можете найти в каталоге «Всесоюзные газеты и журналы» в разделе «Подписные серии издательства «Знание».

Цена подписки на год 4 руб. 80 коп.



*Наш адрес:
101835,
Москва, Центр,
проезд Серова, 4.*