

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ РЕФРАКТОМЕТРА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЕЩЕСТВА В РАСТВОРЕ

Цель работы: научиться определять показатель преломления с помощью рефрактометра и определять концентрацию веществ в растворах, используя метод градуировочных графиков.

Основные вопросы

1. Абсолютный и относительный показатели преломления света.
2. Вывод закона преломления света.
3. Закон отражения света.
4. Явление предельного преломления. Предельный угол преломления.
5. Полное внутреннее отражение. Условия наблюдения полного внутреннего отражения.
6. Оптическая схема рефрактометра, назначение его узлов.

Свет – электромагнитные волны с длинами волн в диапазоне от 380-400 до 760-780 нм. Электромагнитные волны распространяются в вакууме со скоростью $C = 3 \cdot 10^8$ м/с. При вхождении в вещество скорость света уменьшается, поэтому на границе раздела сред (вакуум-вещество) происходит преломление. Одной из важнейших характеристик вещества является абсолютный показатель преломления:

$$n = \frac{C}{v}, \quad (1)$$

где C – скорость света в вакууме; v – скорость света в веществе.

Чем выше показатель преломления, тем выше оптическая плотность вещества.

Пусть на границу раздела двух разных сред падает поток электромагнитных волн aa' (рис. 1). На поверхности раздела сред свет частично отражается cc' и частично входит, преломляясь, во вторую среду bb' :

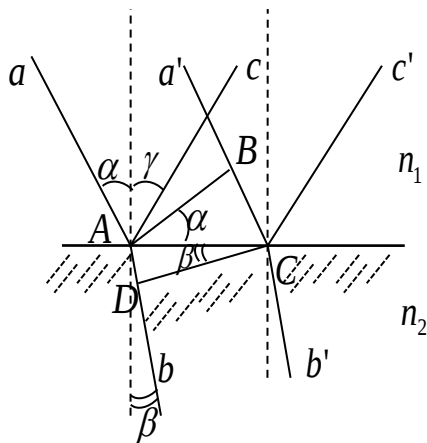


Рис. 1. Преломление света на границе раздела сред: вакуум-вещество

Скорость света в 1-й среде v_1 , абсолютный показатель преломления n_1 , а во 2-й среде – v_2 и n_2 соответственно; α – угол падения (угол между падающим лучом a и перпендикуляром к границе раздела сред, восстановленным в точке падения луча; β – угол преломления, γ – угол отражения, AB – фронт падающей волны, DC – фронт преломлённой волны.

Пусть вторая среда оптически более плотная, чем первая ($n_2 > n_1$), т.е. свет имеет скорость в первой среде большую, чем во второй ($v_1 > v_2$). Луч a достигает границы раздела сред быстрее, чем a' . Пока луч a' проходит путь $BC = v_1 t$ в первой среде до границы раздела, луч b за это же время проходит путь $AD = v_2 t$ во второй среде, причём $AD < BC$ (так как $v_1 > v_2$), поэтому лучи во 2-й среде изменяют направление распространения – преломляются. Фронт преломлённой волны поворачивается относительно фронта падающей волны. Из геометрических соображений следует:

$$BC = AC \cdot \sin \alpha = v_1 t, \quad (2)$$

$$AD = AC \cdot \sin \beta = v_2 t. \quad (3)$$

Поделив (2) на (3), получаем закон преломления:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21}, \quad (4)$$

где $n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$ – показатель преломления второй среды относительно первой (относительный показатель преломления). Учитывая (1), получаем: $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$.

Законы преломления и отражения света

- Лучи – падающий, преломлённый и отражённый – а также перпендикуляр, восстановленный к границе раздела сред в точке падения луча, лежат в одной плоскости.

- Отношение $\sin \alpha$ (угла падения) к $\sin \beta$ (угла преломления) есть величина постоянная для двух данных сред и равная отношению показателя преломления второй среды к показателю преломления 1-й среды:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21}.$$

- Угол отражения равен углу падения ($\gamma = \alpha$).

Явление предельного преломления

Условие наблюдения данного явления – переход световых лучей из менее плотной среды в более плотную $n_2 > n_1$ (рис. 2), при этом угол падения всегда больше угла преломления. Максимальный угол падения равен 90° , соответствующий угол преломления β_0 меньше 90° , то есть лучи во второй среде идут не во всём её объёме, а только в пределах некоторого угла β_0 . Этот угол называется предельным углом преломления. Для него можно записать соотношения:

$$\frac{\sin 90^\circ}{\sin \beta_0} = \frac{1}{\sin \beta_0} = n_{21};$$

$$\sin \beta_0 = \frac{1}{n_{21}} = n_{12} = \frac{n_1}{n_2}.$$

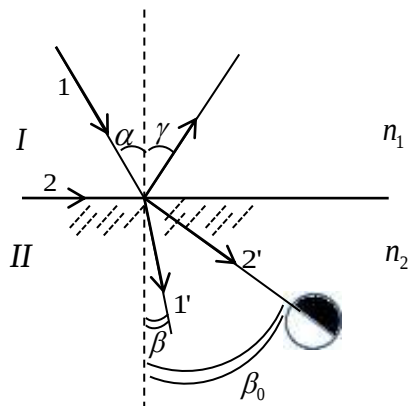


Рис. 2. Преломление света на границе с оптически более плотной средой

Явление полного внутреннего отражения

Условия наблюдения явления:

- 1) переход света из более плотной среды в менее плотную,
- 2) угол падения больше угла полного внутреннего отражения α_0 (рис. 3).

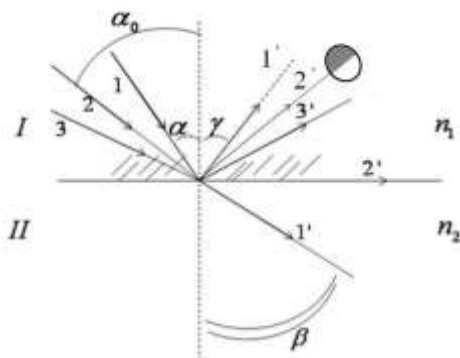


Рис. 3. Отражение и преломление света на границе с оптически менее плотной средой

Так как $n_1 > n_2$, из закона преломления света следует, что углы преломления больше углов падения. При некотором угле

падения α_0 (луч 2) преломлённый луч $2'$ будет скользить вдоль границы раздела сред ($\beta = 90^\circ$).

Тогда:

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = n_{21} ; \quad \sin \alpha_0 = n_{21} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Если лучи падают под углом больше предельного угла α_0 , то они не будут проникать во вторую среду, а будут полностью отражаться в первую среду.

Измеряя предельный угол, легко рассчитать относительный показатель преломления n_{21} . Вследствие обратимости хода лучей предельный угол преломления β_0 равен предельному углу полного внутреннего отражения α_0 .

Приборы, с помощью которых определяется показатель преломления различных веществ (твёрдых, жидких, газообразных), называются рефрактометрами (рис. 4).

Монохроматический луч, пройдя осветительную призму, рассеивается на её матовой поверхности АВ и входит в тонкий слой исследуемого вещества под различными углами (от 0 до 180°). Рассеянный свет попадает на поверхность измерительной призмы CD, но в самой призме распространяется только в пределах угла β_0 , поэтому при выходе из неё образуется чёткая граница света и тени.

В рефрактометре в качестве осветителей чаще всего используются источники, имеющие сплошной спектр излучения. Свет, проходя через призму, разлагается в спектр, и границы света и тени окрашиваются, теряя чёткость. С помощью компенсатора выделяется монохроматический луч, и чёткость границы восстанавливается. Совмещая границу света и тени с центром визирного креста, нанесённого на пластину в поле зрения окуляра, снимают отсчёт по шкале показателей преломления.

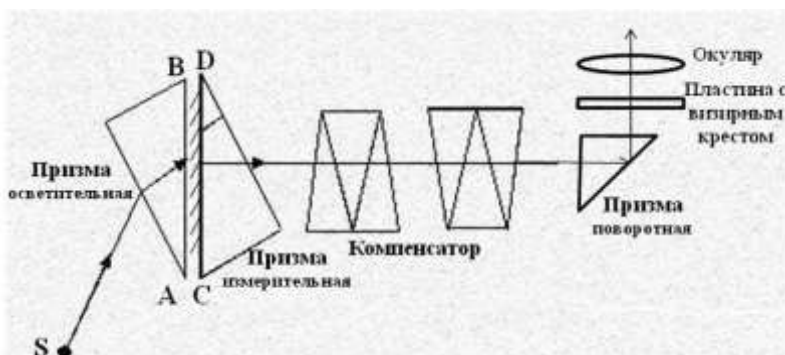


Рис. 4. Оптическая схема рефрактометра

Если жидкость малопрозрачна, то свет направляют через измерительную призму и измеряют предельный угол полного внутреннего отражения, однако граница раздела нечёткая, так как отражение происходит во всей области наблюдения.

Практическая часть

Оборудование: рефрактометр, набор жидкостей.

Подготовка прибора к работе

Промойте рабочие поверхности призм дистиллированной водой и насухо вытрите вначале ватой, а затем мягкой чистой тряпочкой. Вращая зеркало и окуляр, добейтесь резкого изображения шкалы показателей преломления.

Задание 1. Определение показателя преломления жидкого вещества

1. Откиньте осветительную призму и стеклянной палочкой нанесите на грань измерительной призмы каплю дистиллированной воды. Осторожно опустите осветительную призму.

2. Направьте поток света от источника через осветительную призму, при этом световое отверстие измерительной призмы должно быть закрыто специальной откидной пластинкой.

3. Вращая маховичок, расположенный с левой стороны рефрактометра, добейтесь, чтобы граница света и тени совпала

с центром визирного креста. Если граница нечёткая, окрашенная, то при помощи компенсатора сделайте её резкой, неокрашенной. Ещё раз проверьте совпадение центра креста и границы раздела света и тени.

4. Снимите значение показателя преломления по шкале. Показатель преломления дистиллированной воды $n_{\text{воды}} = 1,333$. Если определённый в опыте показатель преломления дистиллированной воды не соответствует эталонному, то во всех остальных измерениях, сделанных на данном рефрактометре, вносят соответствующую поправку.

Задание 2. Определение концентрации глюкозы в растворе с использованием градуировочного графика

1. У растворов глюкозы известной концентрации, начиная с малых концентраций, измерьте показатель преломления. Данные запишите в следующем виде:

Концентрация раствора C , %	
Показатель преломления n	

2. Постройте график зависимости показателя преломления от концентрации растворённой глюкозы – градуировочный график.

3. Определите показатель преломления для раствора глюкозы неизвестной концентрации.

4. По градуировочному графику найдите концентрацию раствора.

Примеры тестового контроля

1. Укажите условия наблюдения полного внутреннего отражения:

- 1) луч переходит из менее плотной среды в более плотную,
- 2) луч переходит из более плотной среды в менее плотную,
- 3) угол падения больше угла преломления,
- 4) угол падения больше предельного угла,
- 5) угол падения меньше предельного угла.

Правильные ответы: 2, 4

2. Природа света:

- 1) электромагнитные волны в диапазоне длин волн 380–760 нм,
- 2) механические волны в диапазоне частот 20 – 2000 Гц,
- 3) механические волны в диапазоне частот 2000 Гц – 10^{10} Гц,
- 4) электромагнитные волны в диапазоне 80–400 нм.

Правильный ответ: 1

2. СНЯТИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СВЕТОВОДОВ

Цель работы: изучение физических основ волоконной оптики.

Основные вопросы

1. Назначение световодов.
2. Физическое явление, лежащее в основе волоконного светопроводящего устройства. Условия его возникновения.
3. Ход световых лучей в классическом и градиентном световодах.
4. Числовая апертура световода.
5. Собственные потери энергии в световодах.
6. Несобственные потери энергии в световодах.
7. Количественная оценка светопередачи в световодах.

Световод (светопровод, волновод оптический) – закрытое устройство для направленной передачи света с минимальными потерями световой энергии по прямым и криволинейным траекториям. В открытом пространстве передача света происходит только в пределах прямой видимости и связана с потерями, обусловленными расходимостью излучения, поглощением и рассеянием. Световоды дают возможность уменьшить потери световой энергии при её передаче на большие расстояния и находят широкое применение в системах оптической связи, вычислительной технике, в медицине. В лазерной хирургии используют световод

для передачи энергии от лазеров, дающих излучение в инфракрасной области, к объекту.

Осмотр доступных полостей организма проводится с помощью оптических приборов – эндоскопов. Приборы для эндоскопии в основе своей имеют тонкие трубки, содержащие оптические системы, которые вводятся в полость. Жёсткие трубки имеют ряд недостатков, поскольку больного приходится держать в неудобном положении, и некоторые части стенок полости трудно поддаются осмотру. Эндоскопы с волоконной оптикой имеют гибкие трубки (световоды) с хорошей видеопередачей, что даёт возможность при удобном положении больного тщательно изучить состояние объекта.

Передача света и изображения по волоконно-оптическим световодам основана на явлении полного внутреннего отражения. *Классический световод* (рис. 1) – цилиндрическое двухслойное волокно. Внутренняя оболочка (с показателем преломления n_1) оптически более плотная, чем внешняя (n_2): $n_2 > n_1$.

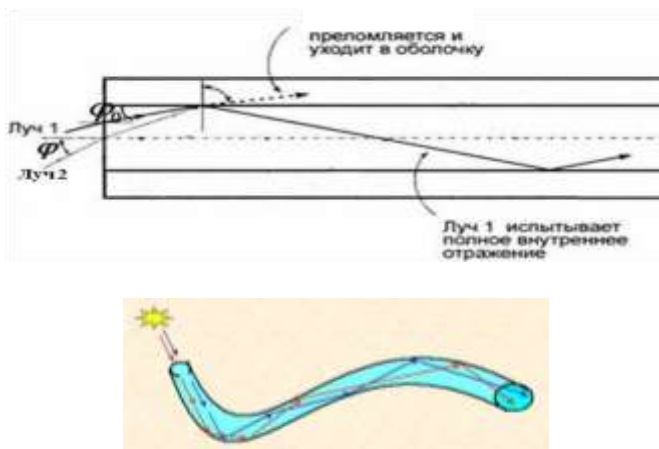


Рис. 1. Полное внутреннее отражение света в классическом световоде

Для лучей, входящих в световод под малыми углами по отношению к оси цилиндра ($\varphi < \varphi_0$), выполняется условие полного внутреннего отражения. При падении световой волны на границу с оболочкой вся её энергия отражается внутрь сердцевины. То же

самое происходит и при всех последующих отражениях. Таким образом, свет распространяется вдоль оси световода, не выходя за оболочку. Максимальный угол отклонения от оси (φ_0), при котором ещё имеет место полное внутреннее отражение, определяется соотношением:

$$\sin \varphi_0 \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = A.$$

Величина A называется числовой апертурой световода и представляет важную его характеристику. Лучи, падающие на торец волокна под углом φ , большим φ_0 , лишь частично отражаются, а частично преломляются, выходят за оболочку – часть энергии уходит из волокна. При многих преломлениях эти лучи почти полностью рассеиваются из световода.

Лучи распространяются вдоль волокна и тогда, когда уменьшение показателя преломления от центра к периферии происходит не ступенчато, а постепенно. В таких волокнах лучи, входящие в торец, фокусируются вблизи осевой линии. Эти световоды называют *селфонами* или *градиентными световодами* (рис. 2).

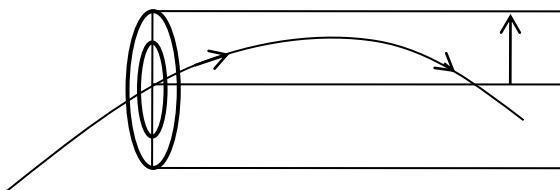


Рис. 2. Распространение света в градиентном световоде

Изгибы, которым может подвергаться световод, не нарушают светопропускание. Материалом для световода служит кварцевое стекло. Различие показателей преломления сердцевины и оболочки достигается легированием стекла бором, германием, кремнием.

Потери пропускания – важнейшая характеристика световодов, определяющая возможность их практического применения. Количественная оценка – *затухание светового сигнала* (дБ/км) – определяется формулой:

$$B = \frac{1}{l} 10 \cdot \lg \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых}}},$$

где $P_{\text{вх}}$ и $P_{\text{вых}}$ – мощность сигнала в световоде длиной l (км) у входного и выходного торца соответственно.

Потери пропускания в оптической среде (рис. 3) обусловлены поглощением и рассеянием.

Поглощение становится особенно интенсивным, если в материал световода входят металлы группы медь–хром, а также ионы гидроксильной группы OH^- . Собственные затухания в световоде определяются потерями вследствие процессов электронного и колебательного поглощения, а также рэлеевского рассеяния.

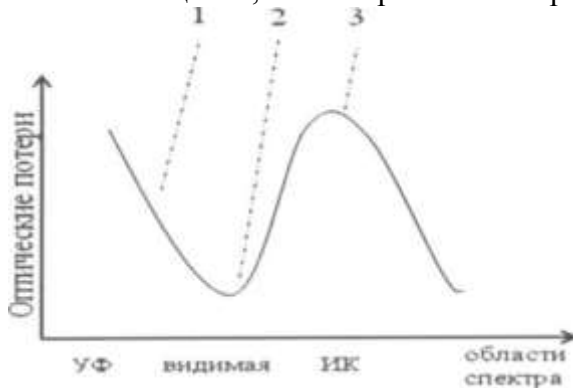


Рис. 3. Оптические потери в световоде:
1 – электронное поглощение; 2 – рэлеевское рассеяние;
3 – колебательное поглощение

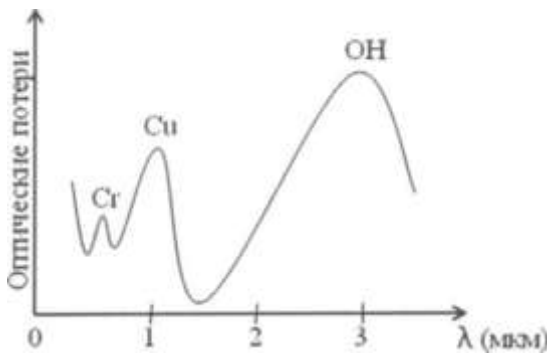


Рис. 4. Спектр оптических потерь

Несобственное рассеяние зависит от наличия в стекле пузырьков и кристаллических включений. Ещё одной важной характеристикой световодов является *информационная полоса пропускания*, определяемая спектром оптических потерь (рис. 4).

Наиболее широкая полоса пропускания при наименьших потерях у современных световодов приходится на область длин волн от 1,26 до 2,00 мкм, где дисперсия стекла близка к 0. У световодов, работающих на длине волны 0,8-0,9 мкм, потери пропускания составляют 2–4 **дБ/км**.

Обычное оконное стекло имеет затухание порядка 10^3 дБ/км. Для целей лазерной хирургии для передачи мощного лазерного излучения необходимы световоды, прозрачные в инфракрасной области (1,0-10,6 мкм). Световоды на основе смешанных соединений бромида и йодида таллия, серебра, хлора и брома, трисульфида мышьяка, фторидов тяжёлых металлов, у которых границы колебательного поглощения сдвинуты в далёкую инфракрасную область, дают сравнительно небольшой уровень затухания (от 150 до 400 дБ/км), сохраняющийся в диапазоне длин волн от 6 до 15 мкм.

Из световодов изготавливаются волоконно-оптические кабели (рис. 5). Волоконные световоды покрываются защитной плёнкой, исключающей взаимонаводки между волокнами. Жгут световодов окружают общей оболочкой.

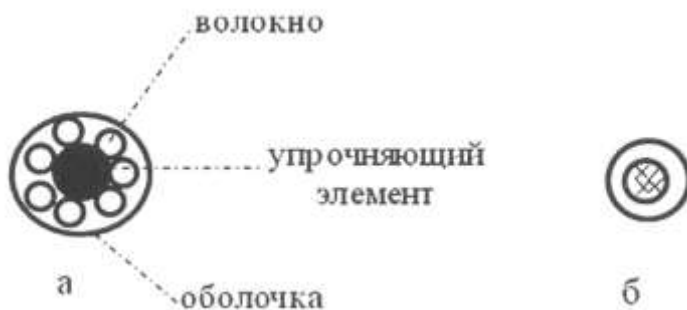


Рис. 5. Оптический кабель:
а – многожильный кабель; б – одножильный кабель

Диаметры оптических кабелей от 2 до 20 мм. Допустимый радиус изгибов – от 5 до 80 см.

Ввод излучения в световод – достаточно сложная задача для достижения высокой эффективности использования вводимой энергии. Эффективность ввода повышается при использовании фокусирующих систем – линз (рис. 6). Один из удобных вариантов реализации линзового входного устройства заключается в оплавлении концов световодов для придания им полусферической формы.

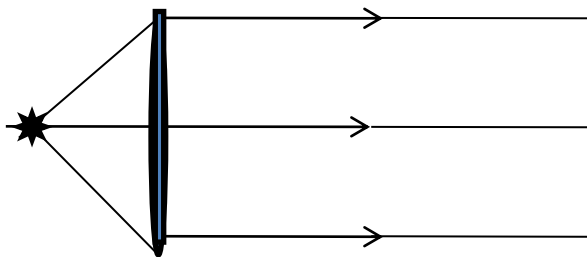


Рис. 6. Фокусирующая линза

Для передачи изображения применяются специальные *ориентированные световоды*, у которых волокна на входе и выходе имеют совершенно одинаковое расположение.

Практическая часть

Оборудование: установка для снятия характеристик световода.

Описание установки

Излучение от лампы накаливания $Л$ (рис. 7), пройдя через светофильтр $СФ$ параллельным пучком, падает на торец световода $СВ$ и фотодиод $ФД_1$.

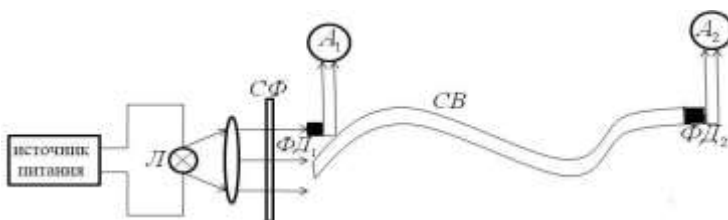


Рис. 7. Схема установки для изучения спектральной характеристики световода:

$Л$ – лампа накаливания; $СФ$ – светофильтр; $ФД_1$, $ФД_2$ – фотодиоды; $А_1$, $А_2$ – микроамперметры; $СВ$ – световод

Сила света лампы регулируется. Фотодиоды $ФД_1$ и $ФД_2$ с одинаковыми характеристиками служат для измерения освещенности.

щённости торцов световода, т.е. показания микроамперметра A_1 пропорциональны освещённости на входе, а микроамперметра A_2 – на выходе световода. При помощи набора светофильтров $СФ$ (№ 1–7) можно менять длину волны излучения λ .

№	0	1	2	3	4	5	6	7
λ , нм	Без свето- фильтра	665	607	582	540	490	445	400

Задание 1. Определение затухания светового сигнала

1. Поставьте светофильтр в положение O .
2. Запишите показания микроамперметров A_1 и A_2 (значения тока I_1 и I_2 соответственно).
3. Определите затухание в световоде длиной 1м для белого света по формуле:

$$B = \frac{1}{l} 10 \cdot \lg \frac{I_1}{I_2}.$$

Задание 2. Изучение спектральной зависимости затухания светового сигнала в световоде

1. Переключая светофильтр последовательно в положения от 1 до 7, запишите показания микроамперметров, соответствующие длины волн и рассчитанное затухание. Полученные результаты запишите в следующем виде:

2.

λ , нм						
I_1 , мкА						
I_2 , мкА						
B , дБ/км						

3. Постройте график зависимости затухания светового потока в световоде от длины волны. Сделайте вывод.

Образец тестового контроля

I. Какое физическое явление лежит в основе волоконной оптики?

- 1) предельное преломление света,
- 2) полное внутреннее отражение света,
- 3) поляризация света,
- 4) интерференция световых волн,
- 5) дифракция световых волн.

Правильный ответ: 2

II. От каких факторов зависит собственное затухание сигнала в световоде?

- 1) от наличия пузырьков газа в материале световода,
- 2) электронного поглощения,
- 3) колебательного поглощения,
- 4) рэлеевского рассеяния,
- 5) наличия кристаллических включений.

Правильные ответы: 2, 3, 4