

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Ф.А. Губарев

ПРОХОЖДЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ПО ОПТОВОЛОКНУ

*Методические указания к выполнению лабораторной работы
по курсу «Оптические методы в биологии и медицине» для
студентов магистратуры по направлению 12.04.04
«Биотехнические системы и технологии»*

2017

Цель работы:

Ознакомиться с принципом действия и конструкцией оптоволокна и осуществить с помощью него передачу лазерного излучения. Пронаблюдать принцип работы коаксиального многоволоконного световода.

Предварительное задание

1. Изучить принцип передачи излучения (информации) по оптоволокну, применяющиеся способы кодирования информации, виды применяющихся волокон, их параметры.
2. Определить коэффициент пропускания для оптоволокна длиной 2 м с затуханием 10 дБ/км (50 дБ/км).
3. Лазерный пучок передается по волоконной линии с затуханием $0,03 \text{ м}^{-1}$. Как изменится интенсивность света через 10 м, 100 м. Указать затухание в дБ.
4. Определить числовую апертуру, критический угол и удельную разность показателей преломления для световода с $n_1=1,47$ и $n_2=1,46$.

Теоретические сведения

Прогресс в области информационных технологий, который происходит в последние годы, связан, прежде всего, с развитием и интенсивным внедрением волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и интенсивным внедрением эндоскопических инструментов в медицинскую практику.

Появление волоконной оптики восходит к первой демонстрации передачи света путем преломления Даниэлем Колладомом и Жаком Бабине в начале 1840-х годов во Франции. Первые практические применения оптического волокна появились в начале прошлого века, когда его использовали для внутреннего освещения во время стоматологических процедур. Только в 1965 году волокно достигло своих потенциальных возможностей, когда Чарльз К. Као (лауреат Нобелевской премии по физике 2009) и Джордж А. Хокхам из компании Standard Telephones and Cables предложили использование оптического волокна для телекоммуникаций, удалив примеси в оптическом стекле, чтобы снизить затухание сигнала до уровня ниже 20 дБ/км. Первое оптическое волокно с потерями 20 дБ/км (при длине волны 0,633 мкм) было изготовлено компанией Corning Glass Works в 1970 году. В 1972 году потери в оптоволокну были снижены до 4 дБ/км, а современные волокна имеют потери меньше 0,2 дБ/км (при длине волны 1,55 мкм).

Изначально волокно было исключительно хрупким. Для его функционирования в качестве надежного высококачественного компонента системы, волокно не должно иметь изъянов и быть защищенным от механического воздействия. Современное волокно может быть завязано в узел диаметром 5 мм и при этом не разрушится. Типичные длины волн современных ВОЛС составляют 1,3 и 1,55 мкм; используются одномодовое волокно (также волокно со смещенной дисперсией), InGaAsP/InP лазерный передатчик, InGaAsP/InP детектор.

Большое распространение волоконные оптические системы получили благодаря ряду достоинств, которые отсутствуют при передаче сигналов по медным кабелям (коаксиальные, витая пара) или по радио, в качестве среды передачи:

- широкая полоса пропускания
- малое затухание сигналов
- отсутствие электромагнитных помех
- дальность передачи на десятки километров
- срок службы более 25 лет
- обеспечение гальванической развязки

На рис. 1 представлена структура оптоволокна. Обычно световод включает в себя внутреннюю область – сердцевину, с высоким показателем преломления (n_1), однородную в направлении распространения излучения, а также внешнюю оболочку с меньшим показателем преломления ($n_2 < n_1$). По сердцевине и распространяется излучение. Сечения световодов бывают различными, наиболее часто встречающийся тип сечения – круглый. Свет, распространяющийся по световоду, представляет собой электромагнитную волну, поэтому для проведения строгого анализа необходимо решать волновое уравнение, вытекающее из уравнений Максвелла. Мы же ограничимся представлениями геометрической оптики.

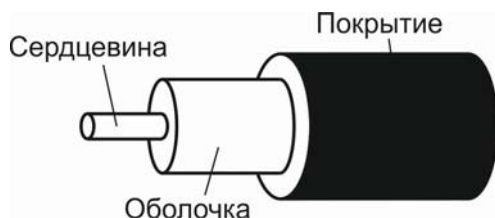


Рис.1. Структура оптоволокна

Известно, что в разных средах луч света распространяется с разной скоростью. Попадая на границу двух прозрачных сред, луч света частично отражается, частично преломляется (рис. 2). Угол отраженного луча равен углу падающего, а угол преломленного луча зависит от соотношения показателей преломления сред. Согласно закону Снеллиуса, произведение синуса угла падающего и преломленного лучей на соответствующие показатели преломления сред равны.

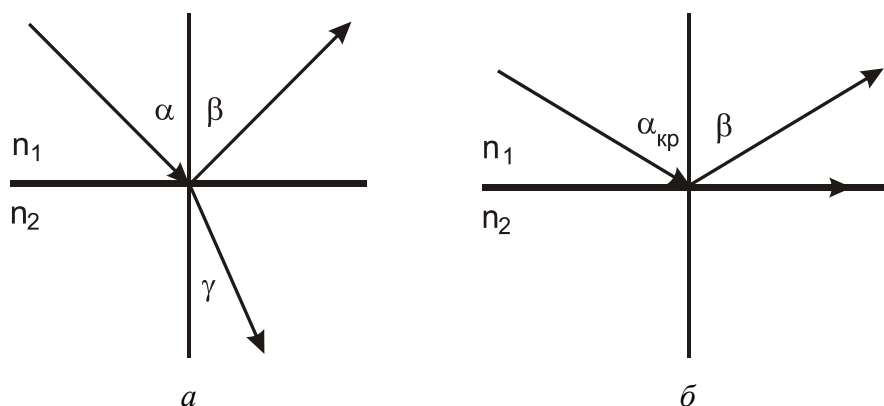


Рис. 2. Прохождение света через границу раздела двух сред

Поставим условие, чтобы преломленный луч не проникал во вторую среду (рис. 2б), а двигался вдоль границы раздела. Так как при этом $\gamma = 90^\circ$, то нетрудно вычислить так называемый критический угол:

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}$$

Свет передается через сердцевину волокна, отражаясь от стенок оболочки по принципу полного внутреннего отражения, позволяя волокну действовать в качестве световода. Поскольку оболочка не поглощает свет, выходящий из сердцевины, сигналы могут распространяться на большие расстояния с небольшими потерями, происходящими из-за примесей в стекле. В зависимости от толщины, излучение может распространяться только по одному пути (одномодовое волокно) или иметь несколько путей распространения (многомодовое волокно).

Рассмотрим прохождение излучения по плоскому световоду (рис. 3). Оптический луч, проходя по световоду испытывает полные многократные отражения от границы раздела «сердцевина – оболочка». Однако если угол падения Q становится больше критического значения, полного отражения не происходит и излучение проникает в оболочку.

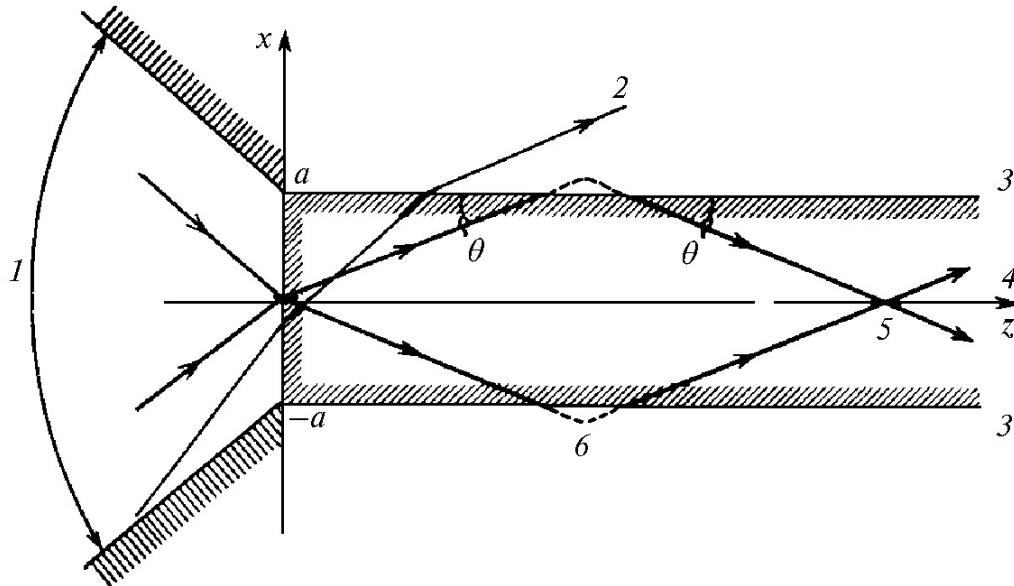


Рис. 3. Распространение света, падающего на световод, по оптоволокну: 1 – угол приема лучей $2Q_{\max}$, 2 – свет, который не передается по световоду ($Q > Q_c$), 3 – оболочка с n_2 , 4 – сердцевина с n_1 , 5 – распространяющееся излучение, 6 – фазовый сдвиг при отражении.

Максимальный (критический) угол, при котором происходит полное отражение, определяется формулой:

$$Q_c = \arccos \frac{n_2}{n_1} = \arcsin \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}} = \arcsin \sqrt{2\Delta}$$

Параметр Δ называется удельной разностью показателей преломления и определяется через показатели преломления сердцевины и оболочки

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 \cdot n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

Луч света, который распространяется в световоде, отражаясь от границы раздела под максимальным углом Q_c , при вводе в световод, согласно законам преломления, падает на его торец под еще большим углом $Q_{\max} > Q_c$:

$$Q_{\max} = \arcsin(n_1 \cdot \sin Q_c) = \arcsin \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}$$

Этот угол является максимальным углом, при котором возможно завести и вывести излучение из световода. Величина $NA = n_1 \cdot \sqrt{2\Delta} = n_1 \cdot \sin Q_c$ называется числовой апертурой световода.

Затухание и искажение сигналов при передаче по оптоволокну

Важными параметрами оптического волокна являются затухание и дисперсия. На рис. 4.4 представлены спектральные характеристики потерь в кварцевом световоде. Наименьшие потери при распространении, связанные с поглощением излучения, находятся в области 1,3–1,6 мкм. Очевидно, что основные потери связаны с поглощением излучения примесями, избавиться от которых полностью не удастся. Минимальные

значения потерь, реализованные сегодня, составляют менее 0,2 дБ/км. То есть на стокилометровом участке оптоволоконного кабеля исходное излучение ослабнет в 100 раз.

Характерное для волокна длиной L пропускание T может быть описано на основе экспоненциальной функции:

$$T = \frac{P}{P_0} = e^{-\alpha L},$$

где P_0 – входная мощность, P – выходная мощность, α – коэффициент затухания. В волоконной технике применяют шкалу в децибелах. Поэтому потери находят по следующей формуле:

$$D = 10 \log \frac{P_0}{P} = \bar{\alpha} L$$

Тогда затухание D в волокне будет выглядеть так:

$$T = 10^{\frac{-D}{10}} = 10^{\frac{-\bar{\alpha} L}{10}}$$

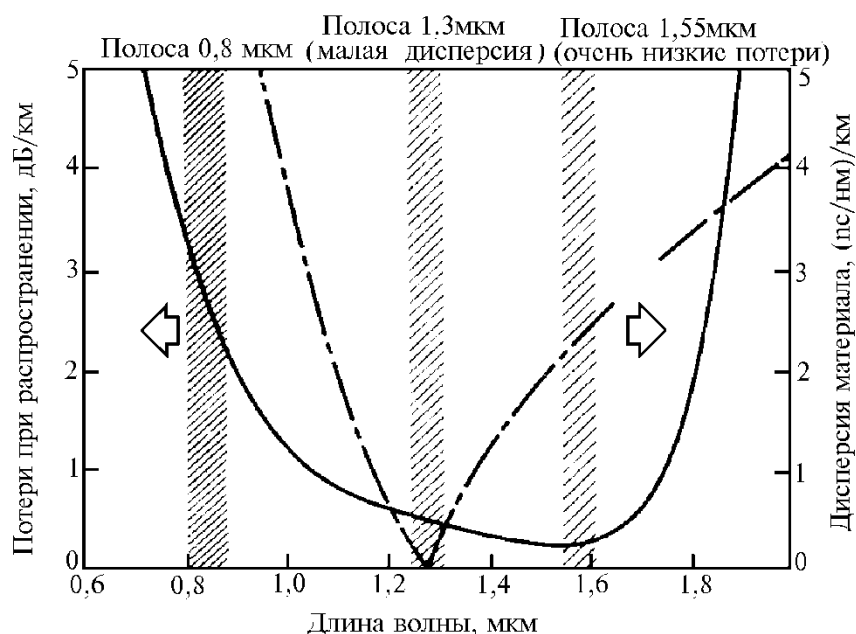


Рис. 4. Спектральная характеристика потерь и дисперсия материала в кварцевом оптоволокне.

Дисперсия – это рассеяние во времени спектральных и модовых составляющих оптического сигнала. Существует три типа дисперсии:

- дисперсия мод – характерна для многомодового волокна и обусловлена наличием большого числа мод, время распространения которых различно.
- дисперсия материала – обусловлена зависимостью показателя преломления от длины волны.
- волноводная дисперсия – обусловлена процессами внутри моды и характеризуется зависимостью скорости распространения моды от длины волны.

Затухание и дисперсия у разных типов оптических волокон различны. Для передачи сигналов используются два вида волокна: одномодовое и многомодовое. Название волокна получили от способа распространения излучения в них.

Многомодовое оптическое волокно (типичные размеры сердцевина/оболочка 50/125 мкм и 62,5/125 мкм) позволяет передавать одновременно несколько сотен разрешенных световых мод, вводимых в оптоволокно под разными углами (рис. 4.5, а). Все

разрешенные мо-ды имеют разные траектории распространения и, соответственно, различное время распространения по оптическому волокну. Поэтому главный недостаток многомодового оптоволокна – большая величина модовой дисперсии, ограничивающая полосу пропускания, и соответственно, дальность передачи сигналов. Полоса пропускания у многомодовых волокон достигает 800 МГц·км, что приемлемо для локальных сетей связи. Такое оптоволокно используется в ВОЛС для передачи на расстояние 4–5 км. Многомодовые волокна удобны при монтаже, так как в них размер световодной жилы в несколько раз больше, чем в одномодовых волокнах. Волоконный кабель проще оконцевать оптическими разъемами с малыми потерями (до 0,3 дБ) в стыке. На многомодовое волокно рассчитаны излучатели на длину волны 0,85 мкм – самые доступные и дешевые излучатели, выпускаемые в очень широком ассортименте.

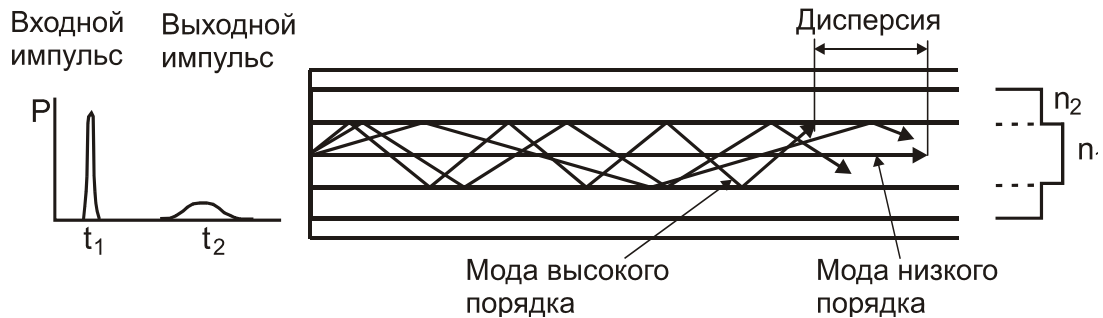


Рис. 5а. Многомодовое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления

Для уменьшения модовой дисперсии и сохранения широкой полосы пропускания, на практике применяют оптические волокна сердцевины кабеля. В отличие от стандартных многомодовых оптических волокон, имеющих постоянный профиль преломления материала ядра, такое оптоволокно имеет показатель преломления N , который плавно уменьшается от центра к оболочке (рис. 5б).

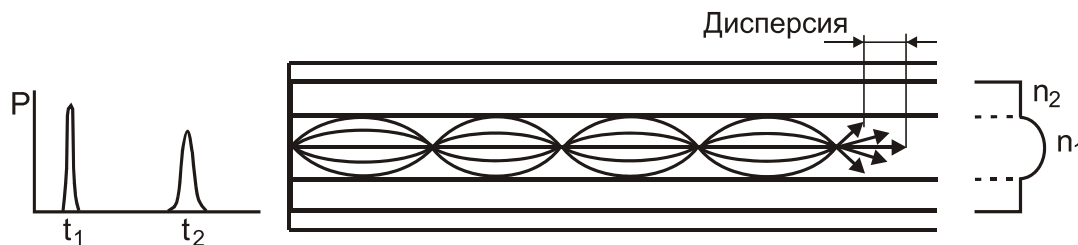


Рис. 5б. Многомодовое волокно с градиентным профилем показателя преломления

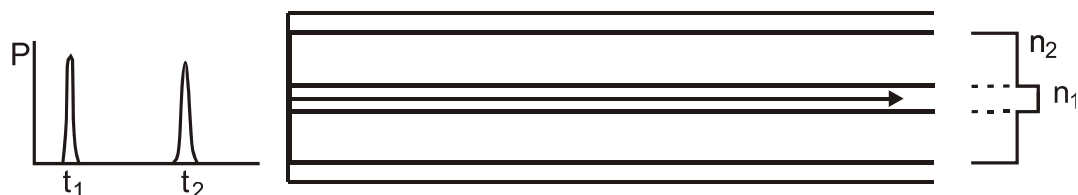


Рис. 5в. Одномодовое волокно

Одномодовое оптическое волокно (типовой размер 8/125 мкм для длин волн 1,3–1,55 мкм) сконструировано таким образом, что в ядре оптоволокна может распространяться только одна, основная мода (рис. 5в). Если при распространении света по многомодовому волокну, как правило, преобладает модовая дисперсия, то одномодовому волокну присущи только два последних типа дисперсии. Это обеспечивает наивысшую пропускную способность. Поэтому такие оптические волокна применяются при строительстве магистральных ВОЛС. Основные преимущества одномодовых оптических волокон – малое затухание 0,25 дБ/км, минимальная величина модовой

дисперсии и широкая полоса пропускания. Однако, одномодовые источники излучения в несколько раз дороже многомодовых. В одномодовое волокно труднее ввести излучение из-за малых размеров световодной жилы, по этой причине одномодовые волокна сложно сращивать с малыми потерями.

Рассмотрим основные применения оптических волокон.

Передача данных

1. Волоконная оптика используется в качестве метода передачи данных. Цифровые данные преобразуются в модулированные световые волны, которые передаются по оптоволоконному кабелю. Волоконная оптика является альтернативой традиционным медным кабелям данных и обладает рядом преимуществ, таких как значительно широкая полоса пропускания, низкие потери на больших расстояниях и защита от электромагнитных помех.

Волоконная оптика предлагает множество преимуществ по сравнению с традиционными медными передачами сигналов, что, в свою очередь, привело к ее популярности в отрасли телекоммуникаций. Одним из основных преимуществ оптического волокна является его широкая полоса пропускания. Фактически, волокно может нести столько данных, что потребовались бы тысячи металлических проводов, чтобы заменить один единственный широкополосный оптоволоконный провод.

Другим преимуществом волоконно-оптического кабеля является его очень малая потеря сигнала, что позволяет проводить большие расстояния между терминалами или встроенными повторителями сигналов. Медная кабельная сеть обычно может работать только несколько километров без усиления. Волоконно-оптическая линия позволяет передавать сигнал на сотни километров без усиления. Одна из причин низких потерь в волокне связана с отсутствием электропроводности, что также означает, что не создаются и перекрестные помехи между параллельными жилами на больших расстояниях.

Поскольку все оптоволоконные кабели являются диэлектрическими, они эффективно защищены от радиопомех и электромагнитных помех. Это означает, что оптоволоконные кабели могут быть проведены в зонах с высокими помехами, такими как линии электропередачи или передающие антенны. Кроме того, волоконные кабели идеально подходят для зон, где удары молнии являются обычным явлением. Фактически, волокно даже невосприимчиво к ядерным электромагнитным импульсам, хотя оно может быть повреждено выбросом альфа- и бета-частиц во время взрыва.

Поскольку волоконный кабель легче металлических проводов, он идеально подходит для использования на самолетах, где является критичным параметром. Безопасность также является еще одним признаком волокна благодаря искробезопасности. Наконец, волокно очень сложно «взломать», не прерывая оригинальную передачу, что делает его очень защищенным методом передачи данных.

В качестве усилителей для волоконно-оптических линий связи используются широкополосные волоконные усилители. Они имеют более высокую скорость по сравнению с электронными усилителями и практически не влияют на скорость передачи информации. Волоконный усилитель состоит из кварцевых волокон длиной несколько метров, легированных эрбием (концентрация 10^{-18} - 10^{-19} см³). Накачка осуществляется лазерными диодами с длиной волны 980 нм; длина волны генерации составляет около 1,48 мкм. Коэффициент усиления составляет 30 дБ, что соответствует коэффициенту усиления 1000, с усилителями, насыщающимися входной мощностью около 10 мВт.

Кроме использования в системах связи, оптическое волокно имеет ряд других применений:

1. Доставка излучения рабочему инструменту в технологических и медицинских системах, а также для освещения.

2. Наблюдение и измерение оптическими средствами в труднодоступных зонах или в неблагоприятных условиях.

Здесь мы можем выделить две области приложений, основанные на разных эффектах. В первом случае оптическое волокно используется непосредственно для доставки отраженного (или испускаемого) объекта света в фотодетектор. В простейшем случае - окуляр или объектив камеры. Типичным примером является эндоскоп. Другая область применения - волоконно-оптические датчики - основана на изменении характеристик излучения (фазы, поляризации, затухания и т. Д.) При прохождении через оптические волокна под воздействием внешних факторов. По этому принципу, например, создаются датчики температуры, давления, вибрации, магнитных и электрических полей. Волоконно-оптические датчики хорошо подходят для сред с слишком высокой температурой для полупроводниковых датчиков.

3. Генерация излучения самим волокном - волоконные лазеры.

В волоконном лазере активная среда представляет собой сердцевину оптоволоконного световода, активированного ионами редкоземельных элементов. Как правило, это одномодовое кварцевое волокно. Насосный насос передается продольно вдоль длины волокна и направляется либо непосредственно к самому сердечнику, где излучение распространяется так же, как излучение лазерной моды, либо через внутреннюю оболочку, окружающую это ядро (двухслойный волоконный лазер). Отличительными особенностями одномодовых лазеров являются очень низкий порог накачки и очень большой коэффициент усиления, который может быть получен даже при умеренной мощности накачки от диодных лазеров. В последнее время наблюдается интерес к волоконно-оптическим лазерам как к лазерам, которые способны работать с высокой мощностью. Это связано с тем, что геометрия волокна позволяет значительно уменьшить роль тепловых эффектов (в частности, тепловых линз), характерных для таких объемных элементов, как лазерные стержни. Сегодня в одномодовом режиме непрерывная мощность генерации превышает 1 кВт, а в многомодовом режиме достигает десятков киловатт.

Программа работы

1. Измерьте мощность излучения источника света (He-Ne-лазер, твердотельный лазер).
2. Ввести лазерный луч в оптическое волокно.
3. Измерьте выходную мощность оптического волокна.
4. Вычислите коэффициент затухания и ослабления.
5. Повторите пункты 2-4 для оптических волокон разной длины.
6. Ввести некогерентный белый свет во внешнюю ветвь коаксиального световода.
7. Используя цель, получите изображение внутренней поверхности образца, заданное учителем.

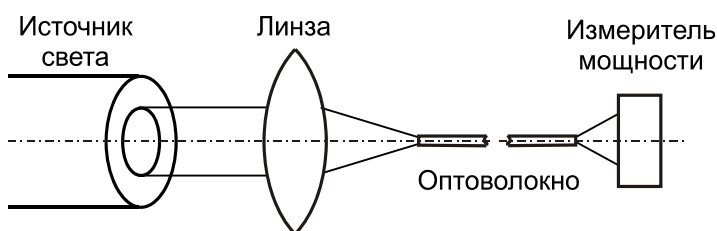


Схема эксперимента по измерению потерь излучения при передаче по оптоволокну.

Контрольные вопросы

1. Современное оптоволокно состоит как минимум из двух компонентов: сердцевины и оболочки. Какая из этих частей имеет больший показатель преломления и почему?
2. Как и почему изменяется длительность импульса при прохождении через оптоволокно? а) – увеличивается, б) уменьшается, в) не изменяется. Из-за чего это происходит?
3. Как сделать оптоволокно одномодовым?
4. Назовите основные причины затухания сигнала при передаче по оптоволокну?
5. Можно ли и почему передавать по одному оптоволокну одновременно несколько сигналов?
6. Предложите способ соединения двух оптических волокон.
7. Для увеличения пропускной способности оптического канала связи применяется мультиплексирование каналов передачи данных. Каким образом это реализуется?
8. В каких задачах применяется оптоволокно?
9. Дайте определение трем основным типам оптоволокну.
10. Какую полосу частот имеет каждое из этих типов волокон и где может применяться?
11. Поясните достоинства и недостатки одномодового оптоволокну.