

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Волоконно-оптические элементы (ВОЭ) - устройства, выполненные на основе волоконных световодов.

Волоконно-оптические элементы применяют в оптических приборах для:

- передачи и коммутации световых сигналов;
- передачи оптического или электронно-оптического изображения;
- преобразования формы сечения светового сигнала;
- коррекции кривизны поля оптической системы.

Широкое распространение получили:

- **волоконно-оптические жгуты;**
- **волоконно-оптические кабели;**
- **фоконы;**
- **волоконно-оптические пластины.**

Остановимся подробнее на некоторых волоконно-оптических элементах.

Волоконные световоды

Рассмотрим принцип действия волоконного световода.

Волоконный световод или оптическое волокно (ОВ) - это оптический волновод, предназначенный для направленной передачи оптического излучения, выполненный в виде тонкой стеклянной или полимерной нити (рис. 1).

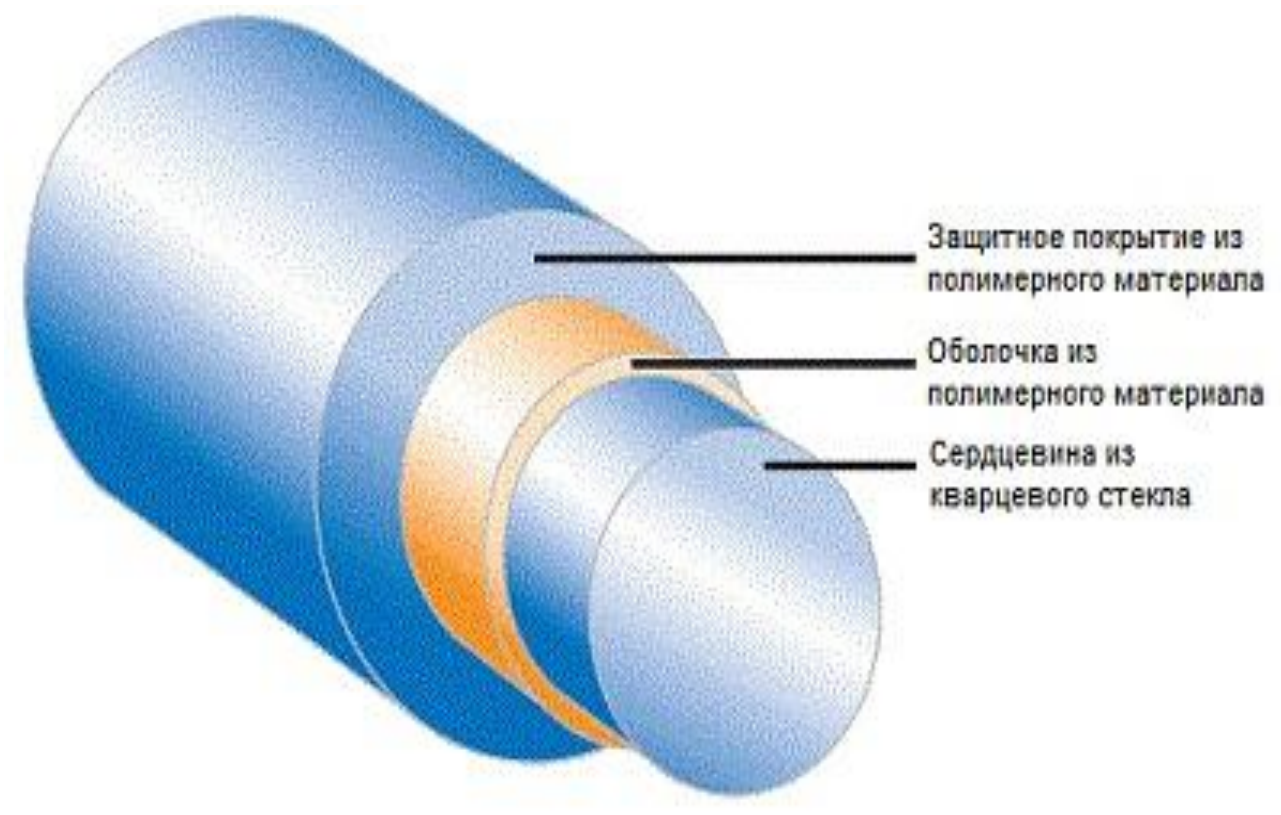
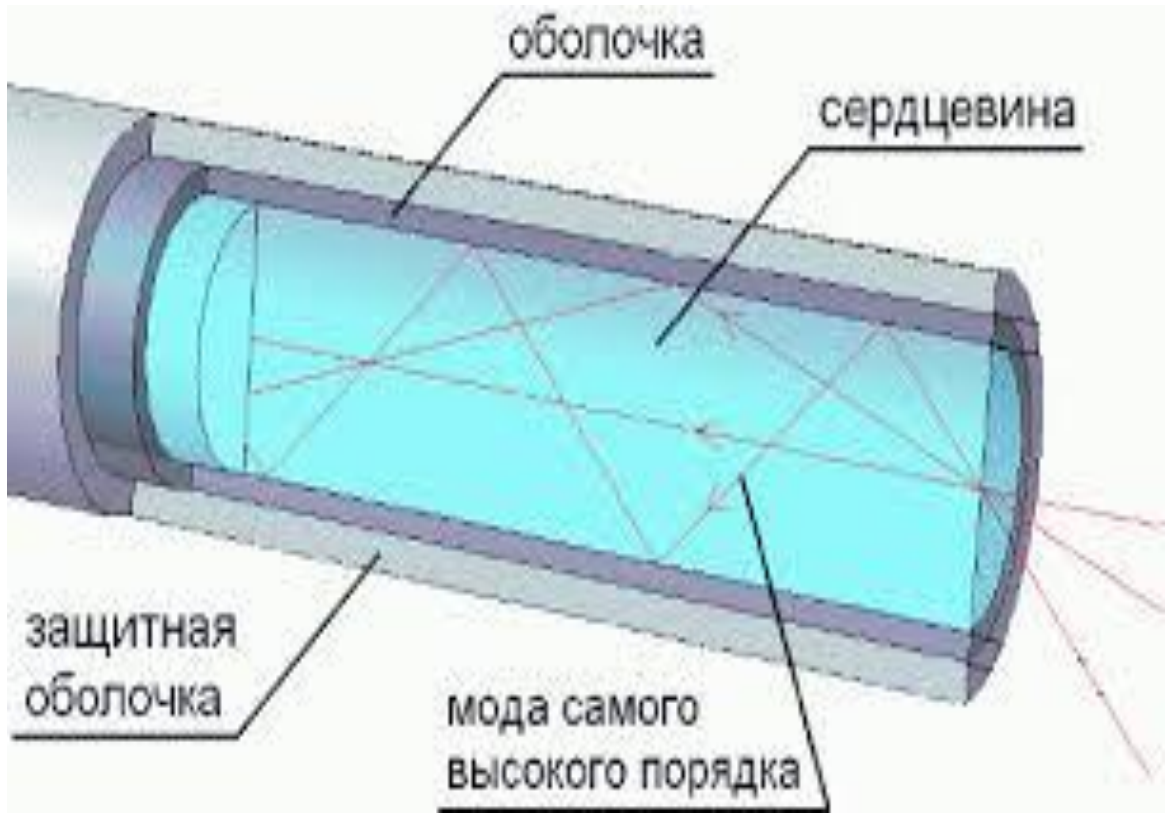


Рис. 1. Волоконный световод

С учетом того, что, например, в световоде границей раздела сердцевина-оболочка являются прозрачные стекла (или полимеры), возможно не только отражение оптического луча, но и проникновение его в оболочку. Для предотвращения перехода энергии в оболочку и излучения в окружающее пространство необходимо соблюдать условие полного внутреннего отражения.

Реализация этого условия применительно к двухслойному световоду показана на **рис. 2.**

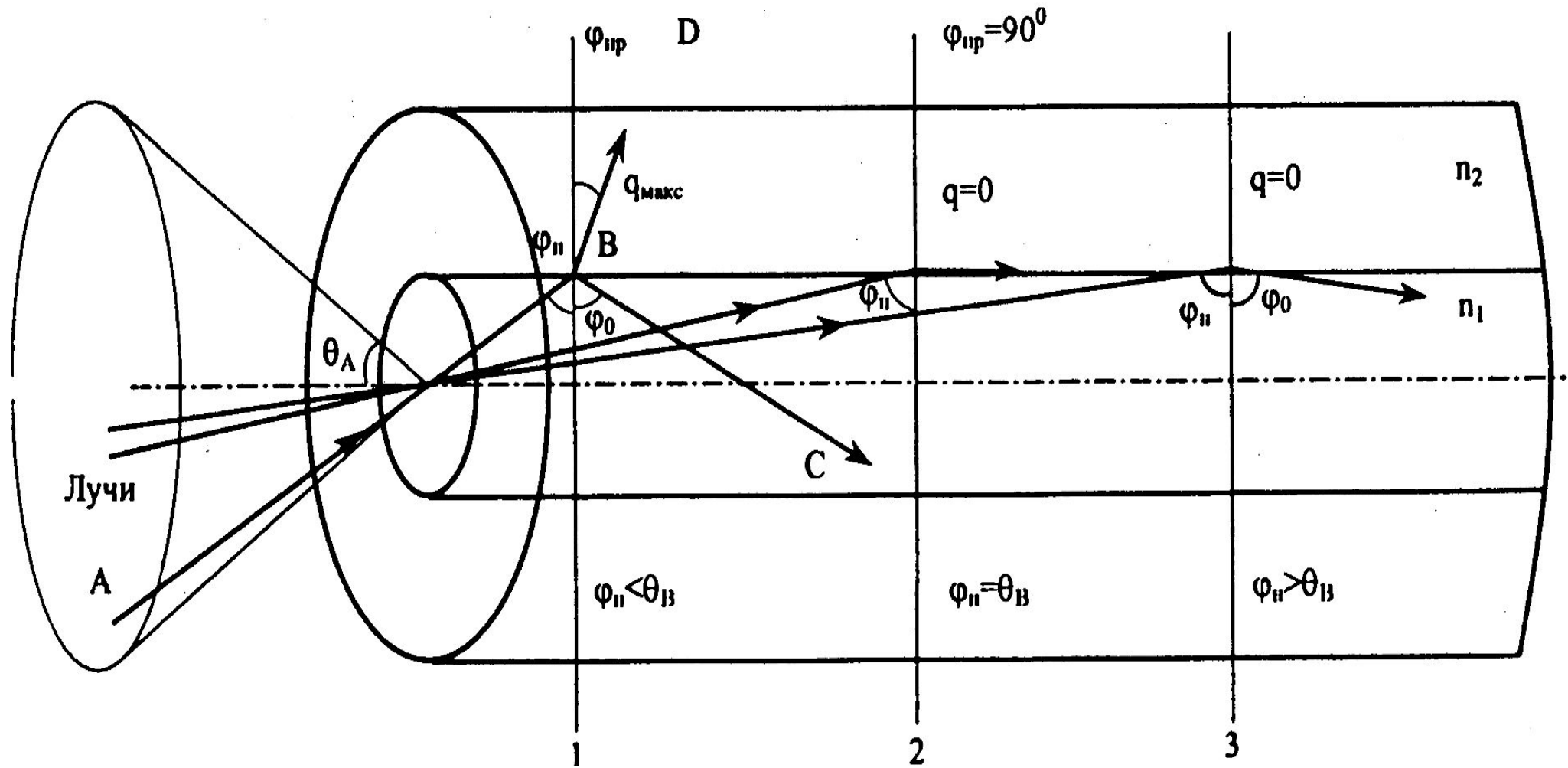


Рис. 2. Принцип действия волоконного световода: 1 - имеется преломленный луч; 2 и 3 - отсутствует преломленный луч

По законам геометрической оптики на границе сердцевина-оболочка будут находиться падающая волна АВ с углом падения φ_n , отраженная ВС с углом φ_o , и преломленная волна ВD с углом φ_{np} (рис. 2, линия 1).

Известно, что при переходе из среды с большей плотностью в среду с меньшей плотностью, т.е. при $n_1 > n_2$, волна при определенном угле падения полностью отражается и не переходит в другую среду.

Угол падения, начиная с которого вся энергия отражается от границы раздела сред, т.е. $\varphi_n = \theta_c$, называется углом полного внутреннего отражения. Этот угол, как известно, определяется из соотношения:

$$\sin \theta_c = n_2/n_1$$

При критическом угле $\varphi_n = \theta_c$ волна движется вдоль границы раздела сред сердцевина - оболочка (рис. 2, линия 2) и нет излучения в окружающее пространство через оболочку.

При $\varphi_n > \theta_c$ волна полностью отражается и возвращается в исходную среду - сердцевину (рис. 2, линия 3). Излучения в окружающее пространство также нет.

Чем больше угол падения волны, т.е. $\varphi_n > \theta_v$, тем лучше условия распространения и быстрее волна придет к противоположному концу световода.

В этом случае вся энергия концентрируется в сердцевине световода и практически не излучается во внешнюю среду.

При угле, меньшем угла полного отражения, т.е. при $\varphi_n < \theta_v$, энергия проникает в оболочку, излучается во внешнее пространство и передача по световоду неэффективна.

Режим полного внутреннего отражения предопределяет условие ввода света во входной торец волоконного световода.

Как видно из **рис. 2** световод пропускает лишь свет, заключенный в пределах телесного угла θ_A , который обусловлен углом полного внутреннего отражения θ_v .

Этот максимальный угол θ_A между оптической осью и световым лучом, падающим на торец волоконного световода, при котором еще выполняются условия полного внутреннего отражения на границе сердцевина - оболочка, называется **апертурой**.

Световоды из оптического стекла имеют высокую оптическую однородность и механическую прочность.

Сечение световодов может быть круглым, квадратным и в форме шестиугольника и выбирается в зависимости от метода укладки световодов в жгуты и назначения волоконно-оптического элемента.

Типичный волоконный световод представляет собой длинную нить диаметром от 100 до 1000 мкм в зависимости от применений, состоящую из сердцевины, окружённой одной или несколькими **оболочками** из материалов с меньшими показателями преломления (ПП) и одного или нескольких **защитных покрытий**.

Сердцевина **световода** - это центральная область **ОВ**, через которую передается основная часть оптической мощности сигнала.

Показатель преломления оболочки постоянен, а сердцевины в общем случае является функцией поперечной координаты (например, радиуса в случае круглого световода). Эту функцию называют профилем показателя преломления (ППП). Профили показателей преломления различных **световодов** приведены на **рис. 3**.

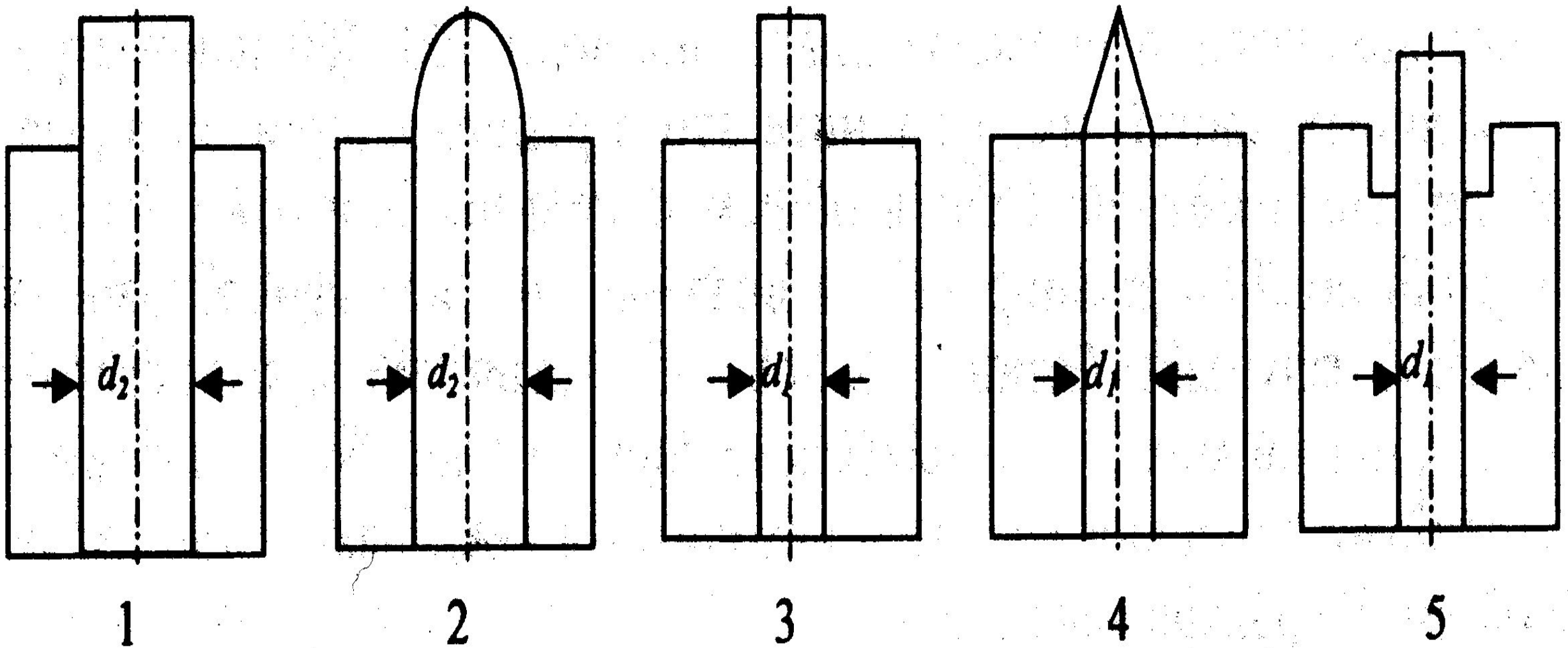


Рис.3. Профили показателей преломления различных световодов:
 многомодовых: 1 - ступенчатый, 2 - градиентный;
 одномодовых: 3 - ступенчатый, 4 - треугольный, 5 - типа W

Волоконные световоды делятся на две группы:
многомодовые и одномодовые.

В конструктивном отношении они различаются диаметром сердцевины (**рис.3**).

В **одномодовом** световоде диаметр сердцевины d_1 соизмерим с длиной волны ($d_1 \approx \lambda$), и по нему передается лишь один тип волны (моды) и, как результат, отсутствует межмодовая дисперсия, т.е. уширение светового импульса при распространении в волокне, связанное с различием времени распространения его компонент.

У **ОДНОМОДОВЫХ** световодов диаметр сердцевины составляет 7 - 10 мкм.

(Мода - тип волны оптического излучения, распространяющегося по оптическому волноводу, характеризующийся определенным распределением поля в поперечном сечении и определенной фазовой скоростью).

В **МНОГОМОДОВЫХ** световодах диаметр сердцевины d_2 больше длины волны ($d_2 > \lambda$), и по нему распространяется большое число волн.

Диаметр сердцевины **МНОГОМОДОВЫХ** волокон составляет 50 микрон в европейском стандарте и 62,5 микрон в североамериканском и японском стандартах.

Из-за большого диаметра сердцевины по **МНОГОМОДОВОМУ** волокну распространяется несколько мод излучения - каждая под своим углом, из-за чего импульс света испытывает дисперсионные искажения и из прямоугольного превращается в колоколоподобный.

Профили показателей преломления **многомодовых** ОВ подразделяются на **ступенчатые** и **градиентные**.

В **ступенчатых** волоконных световодах показатель преломления в сердцевине постоянен и имеется резкий переход от n_1 сердцевины к n_2 оболочки.

Профиль показателя преломления **градиентного** волокна может быть параболическим, треугольным, ломаным и т. д. В градиентных волокнах показатель преломления сердцевины плавно непрерывно изменяется от края к центру.

В **одномодовых** ОВ ППП, в свою очередь, подразделяется на ступенчатый, треугольный, типа W (**рис. 3**).

В оптических волноводах применяются **однородные** или **депрессированные** оболочки.

У **однородных** оболочек ОВ значение показателя преломления постоянное, у **депрессированных** переменное. Если сердцевина служит для передачи электромагнитной энергии, то оболочка - для создания лучших условий отражения на границе раздела сердцевина-оболочка, защиты сердцевины волокна от механических повреждений, а также для защиты от излучения энергии в окружающее пространство и поглощения нежелательного излучения извне.

Траектории лучей в световодах различных групп представлены на **рис. 4.**

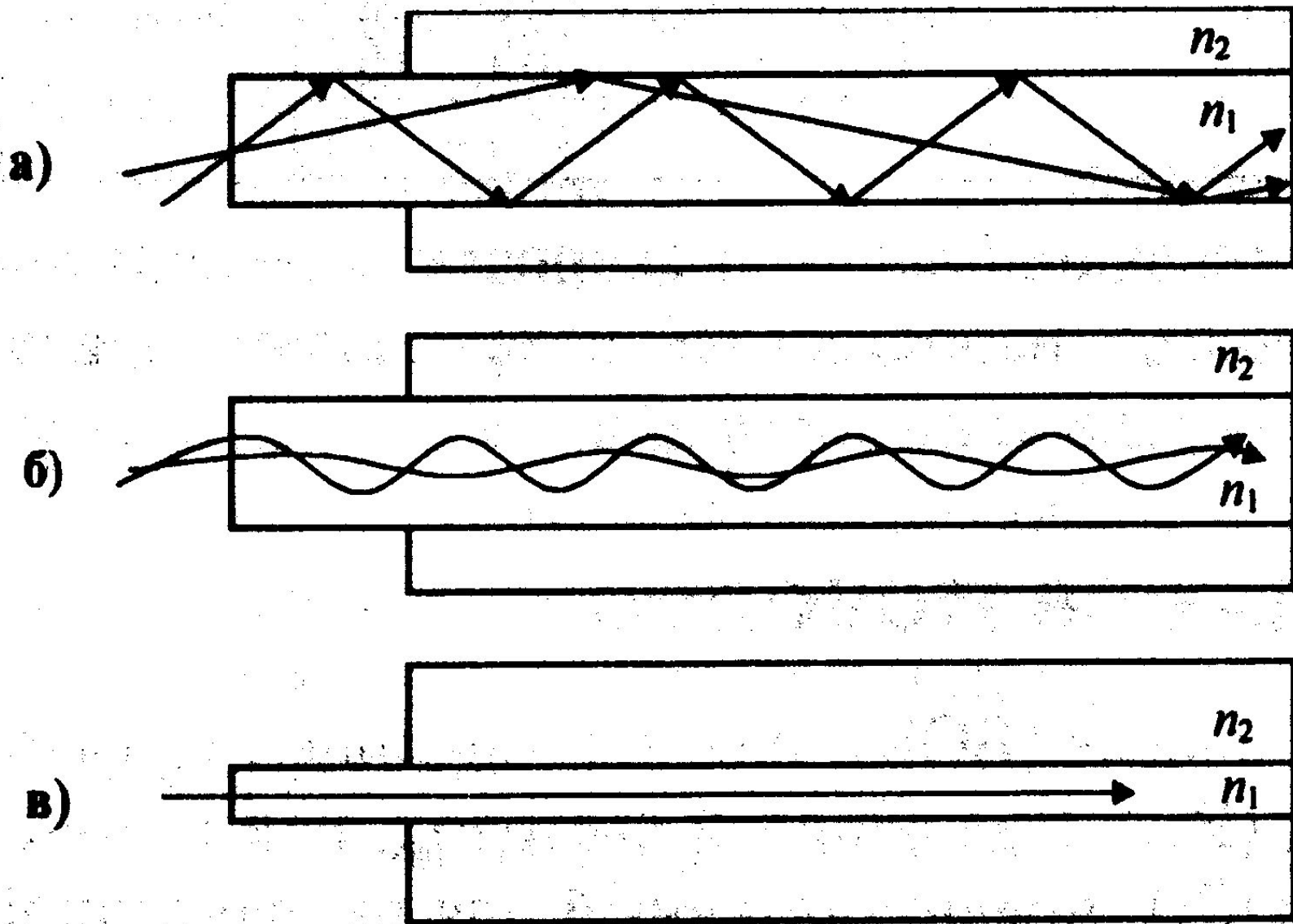


Рис. 4. Волоконные световоды: а - ступенчатые многомодовые; б - градиентные многомодовые; в - одномодовые

В **ступенчатом многомодовом** световоде (**рис. 4а**) лучи резко отражаются от границы сердцевина - оболочка. При этом пути следования различных лучей различны, и поэтому они приходят к концу линии со сдвигом во времени, что приводит к искажению передаваемого сигнала (дисперсии).

В **градиентных** световодах (**рис. 4б**) лучи распространяются по волнообразным траекториям, поэтому искажений меньше.

В наилучших условиях находится **одномодовая** передача (**рис. 4в**), так как здесь распространяется лишь один луч.

Луч, введенный под углом $\theta = 0$, пройдет по центру (оси) волокна, т.е. минимальное расстояние, равное длине волокна, а луч, введенный под углом отличным от нуля пройдет большее, чем длина волокна, расстояние.

Поскольку луч, прошедший большую длину пути, приходит к выходному торцу световода с большей временной задержкой по сравнению с нормально падающим (на торец световода) лучом, то на выходе волокна они окажутся разделенными во времени на некий временной интервал.

В результате световой импульс, содержащий лучи под всеми возможными углами, окажется размытым во времени в процессе своего распространения по волокну.

Это уширение светового импульса известно как **межмодовая (многолучевая) временная дисперсия**.

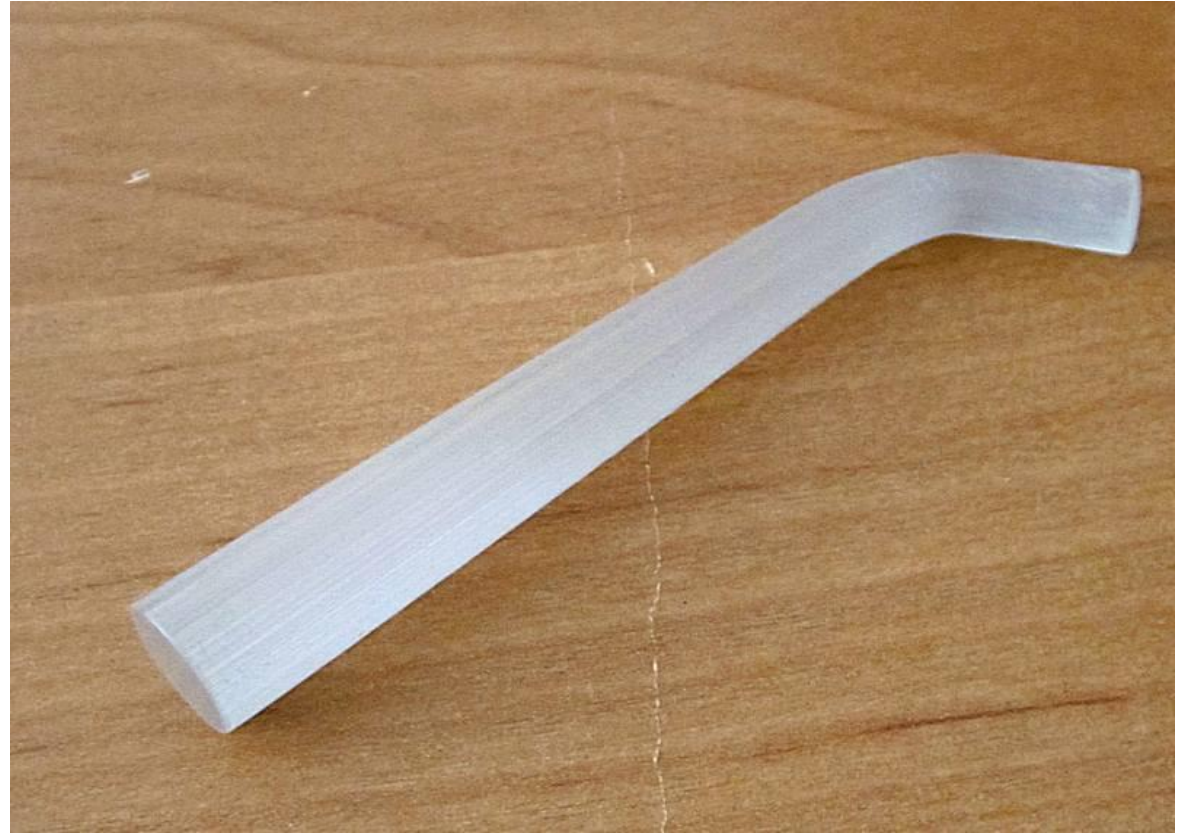
Волоконно-оптические жгуты

Волоконно-оптические жгуты предназначены для подсветки объектов в труднодоступных местах и передачи информации на расстояние. Они применяются в различных отраслях приборостроения (оптического, электронного, авиационного и др.).

Волоконно-оптические **жгуты (рис. 5)**, представляют собой пучки световодов, склеенные или спечённые у концов (**гибкие**) либо по всей длине (**жёсткие**), защищённые непрозрачной оболочкой и имеющие торцы с отполированной поверхностью.



а



б

Рис. 5. Волоконно-оптические жгуты
а – гибкие; б – жесткие

В зависимости от назначения гибкие волоконно-оптические жгуты делят на два типа:

«О» - гибкие волоконно-оптические осветительные жгуты из нерегулярно уложенного и скрепленного у торцов световолокна, предназначенные для передачи оптического излучения;

«Р» - гибкие волоконно-оптические жгуты из регулярно уложенного и скрепленного у торцов стекловолокон, предназначенные для передачи изображения.

Жгуты могут иметь проклеенные и полированные торцы на обеих сторонах либо только на одной. Вторая модификация («Э») позволяет осуществлять разводку волокон свободного конца по усмотрению разработчика прибора.

Проклеенные торцы жгутов полируют по плоскости и устанавливают в оправки, форма которых определяется формой сечения торца и характером крепления жгута в приборе.

Наряду с проклеиванием торцов иногда применяют механическую фиксацию концов волокна путем зажима в цанге или их спекания.

Длина жгута определяется назначением и характером его использования в приборе. От длины жгута зависит коэффициент пропускания τ .

Качество гибких волоконно-оптических жгутов определяется также дефектами (не передающими свет участками площади торца) и чистотой рабочих поверхностей торцов.

При использовании жгутов необходимо иметь в виду, что их изгиб допускается только по радиусу, наименьшее значение которого составляет не менее двух диаметров жгута в защитной оболочке



Рис. 6. Волоконно-оптический кабель

Волоконно-оптический кабель (рис. 6) - кабель на основе волоконных световодов, предназначенный для передачи оптических сигналов в линиях связи со скоростью меньшей скорости света из-за непрямолинейности движения.

Конструкция кабеля определяется его назначением и местом прокладки: от самой простой (оболочка, пластиковые трубки с волокнами) до многослойной (например, подводный коммуникационный кабель), содержащей упрочняющие и защитные элементы.

Фоконы (рис. 7) - жесткие (фокусирующие) волоконно-оптические элементы, изготовленные из спеченных вместе волокон с изменяющимся по ходу луча диаметром.

Торцы фокона обычно плоские.

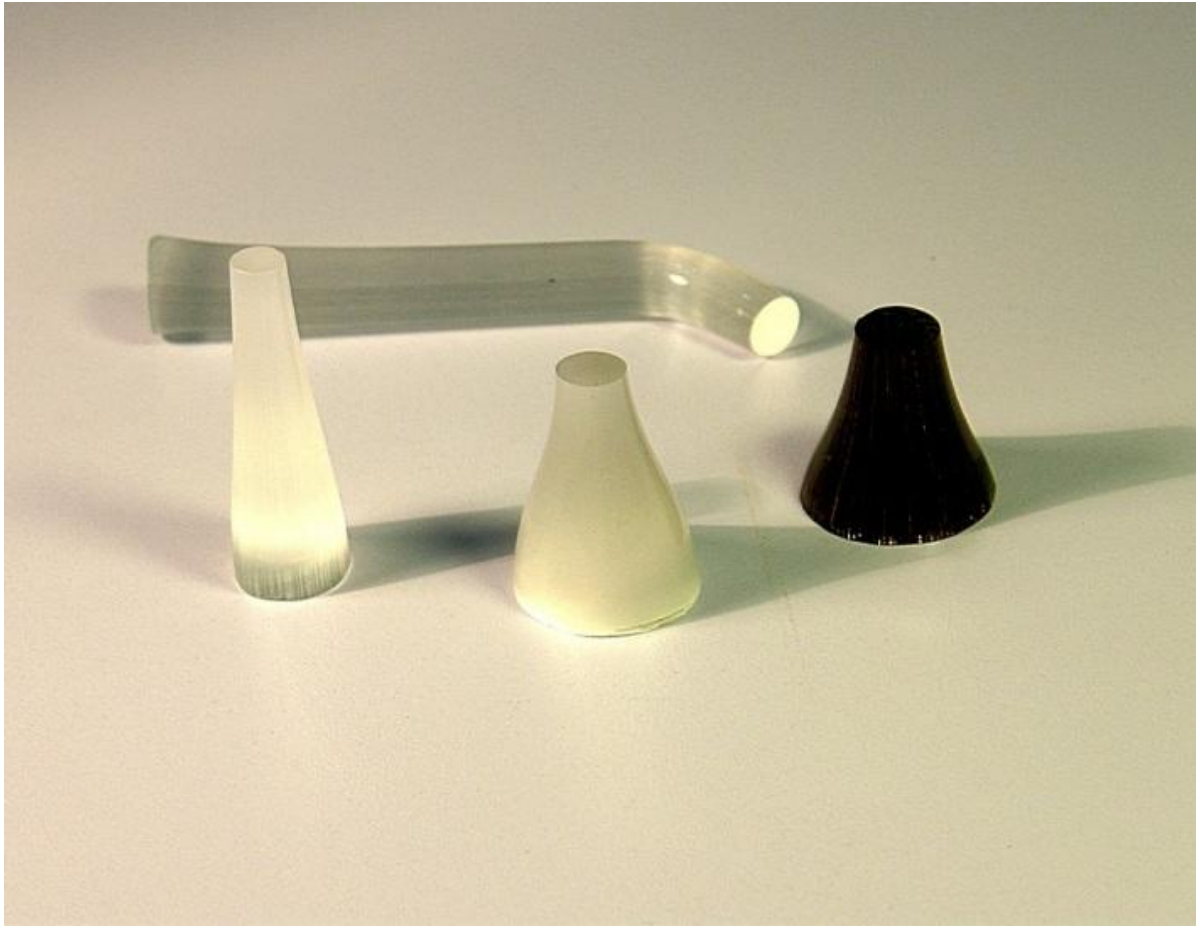


Рис. 7. Фоконны

Изображение, спроецированное на один из торцов, переносится с соответствующим изменением масштаба на другой торец, т.е. они используются для изменения масштаба передаваемого изображения. Также они используются в качестве концентратора света в оптических системах с малой угловой апертурой, для выравнивания кривизны поля оптических систем и др.

Фоконы используются во многих электронно-оптических системах, в частности в медицинской технике. В некоторых применениях фокон обеспечивает компактную, эффективную связь люминесцентного экрана и матрицы фотоприемников.

Волоконно-оптические пластины (ВОП) - поперечные срезы жесткого волоконно-оптического жгута (**рис. 8**). ВОП - плотная совокупность световодов с параллельной укладкой волокон, соединенных в единый блок.

Волоконно-оптические пластины предназначены для передачи световых сигналов, изображения с одного торца пластины на другой, выравнивания разрешающей способности прибора по всему полю в электронно-оптических приборах и применяются в качестве входных и выходных окон электронно-оптических преобразователей (**ЭОП**), в качестве экранов электронно-лучевых трубок и в других электронно-оптических системах.

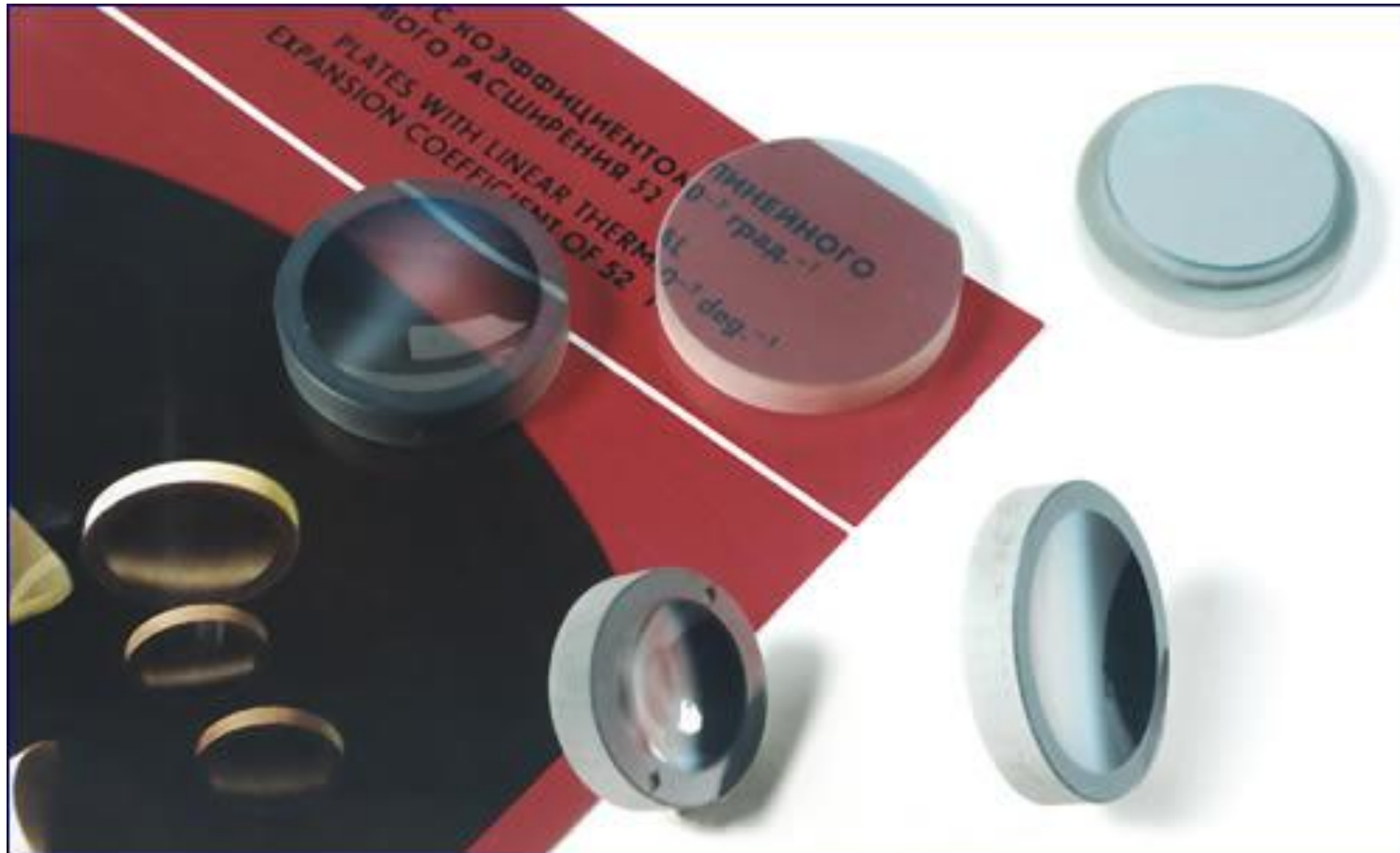


Рис. 8. Волоконно-оптические пластины

Волоконно-оптические элементы находят широкое применение в оптико-электронных приборах.

Их использование позволяет сделать приборы более компактными, повысить надежность и улучшить другие функциональные характеристики ОЭП.

Простейший пример. Передавать оптический сигнал из одной точки сложного оптико-электронного устройства (или системы) в другую, расположенную в отдаленном от исходной точки месте или другом блоке данного устройства можно двумя способами:

1 - с помощью системы зеркал (призм, линз), смонтированных в соответствующих оправках на соответствующих столиках, обеспечивающих возможность юстировки и перемещения в пространстве данных оптических элементов.

2 - с помощью волоконно-оптических жгутов и фоконов.

В первом случае зеркала (призмы, линзы) в оправках и столики обладают определенными габаритами. Они чувствительны к вибрациям и другим внешним воздействиям в процессе эксплуатации, что снижает надежность и точность передачи информации и повышает габариты устройства.

Во втором случае система передачи информационного сигнала компактнее, надежнее и точнее.

Еще один пример - применение оптического волокна в спектрометрах.

Основной функцией спектрометра является регистрация спектра излучения света, оцифровка полученного сигнала в зависимости от длины волны и его последующий анализ с помощью компьютера.

Специализированные оптоволоконные кабели используются для оптимизации передачи энергии от источника излучения к исследуемому образцу и оптического сигнала в измерительный модуль спектрометра. Оптоволоконное соединение обеспечивает гибкое наращивание модулей системы, состоящей обычно из источника света, набора измерительных датчиков и спектрометра.

Модульная комплектация оптоволоконных спектрометров позволяет (в некоторых современных спектрометрах) использовать один спектрометр для обеспечения ряда спектрометрических методов исследований (спектрометрия, фотоколориметрия, фотометрия, спектрофотометрия и др.).

Оптоволоконная спектрометрия по сравнению с традиционными технологиями обладает рядом преимуществ - многофункциональность, эффективность и высокая надёжность измерительной системы.

В реальной жизни наиболее важными являются применения волоконно-оптических технологий в области передачи информации с помощью:

- **волоконно-оптического интернета;**
- **волоконно-оптических линий связи.**

Оптоволоконный интернет. Переносчиком информации в данном случае являются фотоны света.

В упрощенном смысле двоичный код передается так: если свет горит, то это **1**, а нет - тогда **0**.

Оптоволоконный интернет-кабель передает чередование нулей и единиц. За смену импульсов отвечает передатчик, преобразующий электрические сигналы в световые. А на втором конце кабеля обычно размещается приемник, осуществляющий обратное преобразование.

Оптоволоконный интернет характеризуется огромными скоростями, в чем и заключается основное его преимущество. Еще одним плюсом (помимо высокой скорости) является способность работы на больших расстояниях. Оптоволоконный кабель для интернета может тянуться через весь материк и прокладываться по дну океана.

Помимо скорости и большой дальности передачи информации, имеется у подобной технологии и еще один плюс - информацию при ее использовании перехватить практически невозможно.

Минимальная скорость передачи информации оптоволоконного интернета для домашнего пользования составляет 10 Мб/с. Физически никакой домашний кабель не способен поддерживать подобную скорость.

На данный момент оптоволоконный интернет представляет собой передовое решение проблемы передачи данных.

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС).

В самом простом случае волоконная оптика является коммуникационной средой, соединяющей два электронных устройства.

Волоконно-оптическая связь может быть организована между компьютером и его периферийными устройствами или между двумя объектами, находящимися на значительном расстоянии.

Основные преимущества волоконной оптики, которые используются в волоконно-оптических линиях связи:

- широкая полоса пропускания;
- низкие потери;
- нечувствительность к электромагнитным помехам;
- малый вес;
- малый размер;
- безопасность;
- секретность.

Важность каждого из этих преимуществ зависит от конкретного применения.

В некоторых случаях **широкая полоса пропускания и низкие потери** являются определяющими факторами.

В других случаях важнее **безопасность и секретность**, достигаемые при использовании волоконной оптики.

Обсудим кратко каждое из перечисленных преимуществ.

Широкая полоса пропускания.

Потенциальные возможности передачи информации возрастают с увеличением полосы пропускания передающей среды и несущей частоты.

Частоты светового сигнала на несколько порядков превосходят максимальные частоты радиоволн.

К достоинствам волоконной оптики относится широкая полоса пропускания, что обеспечивает передачу телевизионного сигнала.

Волоконная оптика теоретически может работать в диапазоне до 1 ТГц.

Полоса пропускания волоконной оптики допускает мультиплексирование различных сигналов, например звуковых, видео или передачу данных.

Поэтому волоконно-оптические линии связи начинают применяться не только для передачи на большие расстояния, но и в коммерческих и бытовых системах.

Низкие потери.

Потери (затухание) определяют расстояние, на которое может передаваться сигнал.

При перемещении сигнала по передающей линии, будь это медный кабель или оптическое волокно, его амплитуда уменьшается. Это и есть затухание.

В медном кабеле затухание увеличивается с ростом частоты модуляции. Чем больше частота сигнала, тем больше потери.

Напротив, в оптическом кабеле затухание не зависит от частоты и остается постоянным в определенном диапазоне частот, вплоть до очень высоких.

Таким образом, проблема затухания более характерна для медного кабеля, особенно при увеличении объема передаваемой информации.

Нечувствительность к электромагнитным полям.

Оптоволокно не излучает и не воспринимает электромагнитные волны.

Любой проводник действует подобно антенне, излучающей и принимающей электромагнитную энергию.

Каждая часть электронного устройства может создавать электромагнитные наводки (ЭМН), влияющие на работу других частей устройства.

Электромагнитные наводки могут быть как незначительными, так и смертельно опасными.

По мере возрастания плотности электронных устройств влияние электромагнитных наводок становится все более существенным.

Поскольку оптические волокна не излучают и не воспринимают электромагнитные волны, они являются идеальной средой с точки зрения электромагнитных наводок.

Высоковольтные линии также излучают электромагнитную энергию. Медные сигнальные кабели нельзя прокладывать вблизи от этих линий без специальной защиты, поскольку наводки от высоковольтной линии будут искажать передачу сигнала.

Волоконно-оптические линии могут быть проложены совместно с высоковольтными без каких-либо негативных эффектов, поскольку наводки от высоковольтных линий на них не влияют.

Важнейший результат нечувствительности оптического волокна к наводкам от электромагнитного излучения заключается в том, что световые сигналы не искажаются под влиянием электромагнитных наводок.

Цифровая передача предполагает пересылку сигнала без ошибок. Электромагнитные наводки могут быть причиной ошибок в электронных системах передач. Таким образом, оптические волокна открывают новые возможности для передачи сигнала без искажений.

Малый вес. Оптическое волокно весит значительно меньше медного проводника. Волоконно-оптический кабель той же информационной емкости, что и медный, весит меньше медного, поскольку последний требует большего количества линий.

Например, обычный одножильный волоконно-оптический кабель имеет вес около 12 кг/1000 м. Для сравнения, коаксиальный кабель весит в 9 раз больше - около 110 кг/1000 м.

Оптимальный вес крайне важен в самолетостроении и автомобилестроении.

Малый размер. Оптический кабель меньше по размеру, чем его медный аналог. Кроме того, часто одно оптическое волокно может заменить несколько медных проводников.

Безопасность. Волокно является диэлектриком и не проводит ток. Его использование безопасно с точки зрения искро- и пожаробезопасности. Более того, волокно не притягивает молнии. Волоконно-оптический кабель может также использоваться в опасных местах, в которых из соображений безопасности вообще не применялись кабели. Например, волокно можно проложить прямо через топливный бак.

Секретность. Один из путей подслушивания заключается в подсоединении к проводу. Другой путь - перехват радиоволн, излучаемых работающим оборудованием или кабелем.

Чувствительная антенна, спрятанная рядом, может улавливать радиоволны, излучаемые работающим электронным оборудованием. Данная антенна воспринимает электромагнитные наводки как радиосигнал, который может содержать сверхсекретные данные.

Оптическое волокно является сверхбезопасной средой для передачи информации. Оно не излучает волны, которые могут быть получены близкорасположенной антенной. Кроме того, подсоединиться к оптоволокну крайне тяжело.

Широкая полоса пропускания, низкие потери и невосприимчивость к электромагнитным полям характерны для волоконной оптики.

Эти особенности органично согласовываются, позволяя передавать данные с высокой скоростью на большие дистанции и с небольшим числом ошибок.

В тех случаях, когда потери и высокие скорости не являются критическими, например, в автомобилестроении, достаточно хорошо работают более дешевые оптические линии.

Другие уникальные характеристики оптоволоконна делают его наиболее подходящей передающей средой во множестве различных областей техники.

Вопросы к экзаменам

1. Принцип действия волоконного световода. Волоконно-оптические элементы. Применение в оптико-электронных приборах.