

## Устройство светодиодов.

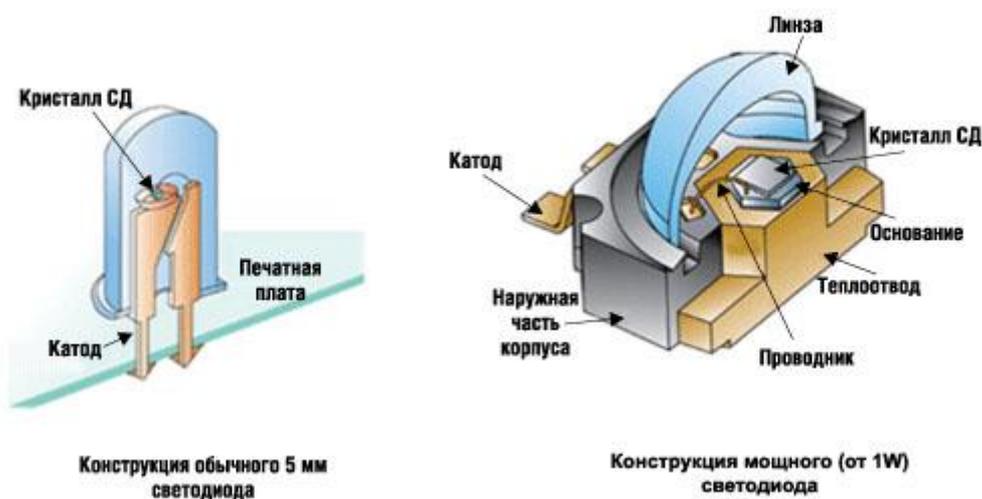
Основные современные материалы, используемые в кристаллах светодиодов:

InGaN – синие, зеленые и ультрафиолетовые светодиоды высокой яркости;

AlGaInP - желтые, оранжевые и красные светодиоды высокой яркости;

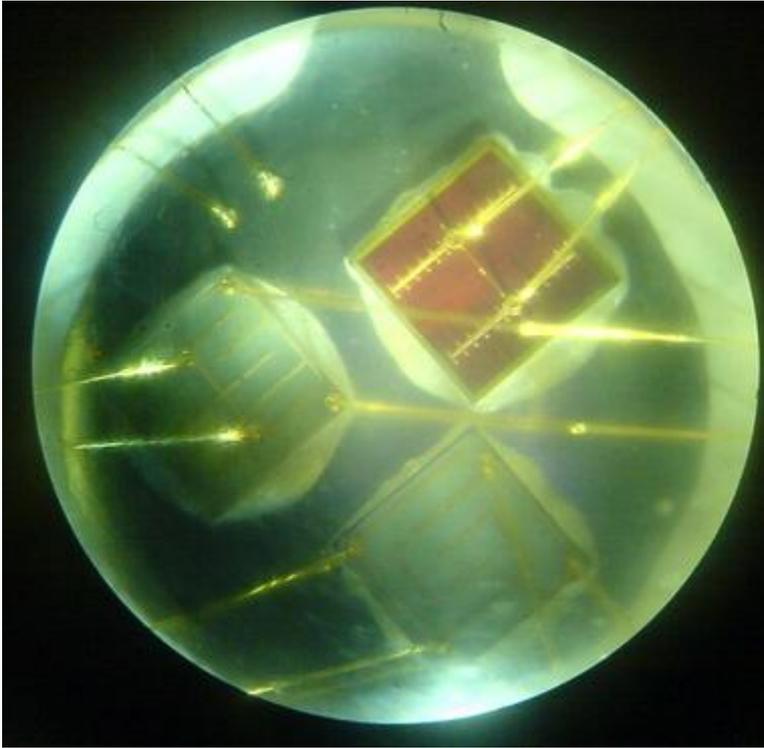
AlGaAs - красные и инфракрасные светодиоды;

GaP – желтые и зеленые светодиоды.



*устройство 5мм.- светодиодов (слева) и мощных (справа) светодиодов*

Устройство светодиодов различных типов упрощенно представлено на рисунках. Свет, излучаемый полупроводниковым кристаллом, попадает в миниатюрную оптическую систему, образованную сферическим рефлектором и самим прозрачным корпусом диода, имеющим форму линзы. Изменяя конфигурацию рефлектора и линзы, устанавливая вторичные линзы, добиваются необходимой направленности излучения.



*трехкристальный RGB светодиод под микроскопом*

Кроме светодиодов лампового типа (3,5,10мм, их форма действительно напоминает миниатюрную лампочку с двумя выводами), в последнее время все большее распространение получают SMD - светодиоды. Они совершенно иной конструкции, отвечающей требованиям технологии автоматического монтажа на поверхность печатной платы (*surface mounted devices – SMD*).

А сверхъяркие светодиоды такого типа называются *эммитерами (emitter, англ. "излучатель")*.

SMD светодиоды имеют более компактные размеры, допускают автоматическую расстановку и пайку на поверхность платы без ручной сборки. Некоторые производители светодиодов выпускают специальные SMD-диоды, содержащие в одном корпусе три кристалла, излучающие свет трех основных цветов – красный, синий и зеленый. Это позволяет получить при смешении их излучения всю цветовую гамму, включая белый цвет, при ультракомпактных размерах.

Яркость светодиода характеризуется световым потоком (Люмены) и осевой силой света (канделлы), а также диаграммой направленности. Существующие светодиоды разных конструкций излучают в телесном угле от 4 до 140 градусов.

Цвет, как обычно, определяется координатами цветности, цветовой температурой белого света (Кельвин), а также длиной волны излучения (нанометры).

Для сравнения эффективности светодиодов между собой и с другими источниками света используется светоотдача: величина светового потока на один ватт электрической мощности (характеристика "Люмен/Ватт"). Также интересной характеристикой оказывается цена одного люмена (\$/Люмен).

## Что такое квантовый выход светодиода?

Квантовый выход — это число излученных квантов света на одну рекомбинировавшую электронно-дырочную пару. Различают внутренний и внешний квантовый выход. Внутренний — в самом р-п-переходе, внешний — для прибора в целом (ведь свет может теряться «по дороге» — поглощаться, рассеиваться). Внутренний квантовый выход для хороших кристаллов с хорошим тепло-отводом достигает почти 100%, рекорд внешнего квантового выхода для красных светодиодов составляет 55%, а для синих — 35%. Внешний квантовый выход — одна из основных характеристик эффективности светодиода.

## Эффективность современных светодиодов

Светоотдача это отношение излучаемого светового потока к потребляемой мощности. Чем выше светоотдача тем экономичнее источник света.

Тип лампы	Светоотдача, Люмен/Ватт
Накаливания	8-18
Галоген	52-75
Люминесцентная (стандартная)	75-88
Люминесцентная Super 80	83-96
Люминесцентная TL5	36-59
Натриевая	86-130
1 шт. светодиод Nichia	100-140

ПИХТИН СТР 410 – СВЕТОДИОДЫ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ

401 – ИНЖЕКТОРНАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ

## ИНЖЕКЦИОННЫЙ ЛАЗЕР

полупроводниковый лазер, в к-ром для создания инверсии населённости используется инжекция избыточных эл-нов и дырок в прямом (пропускном) направлении через нелинейный ПП контакт, обычно через р — п-переход или гетеропереход. Важнейшей разновидностью И. л. явл. гетеролазер, включающий два гетероперехода, между к-рыми находится активный слой с более узкой запрещённой зоной, чем в прилегающих слоях. И. л. имеет в кач-ве оптич. резонатора плоскопараллельные зеркальные грани самого кристалла или выносные зеркала.

Физический энциклопедический словарь. — М.: Советская энциклопедия. Главный редактор А. М. Прохоров. 1983.

## ИНЖЕКЦИОННЫЙ ЛАЗЕР

- наиб, распространённая разновидность *полупроводникового лазера*, отличающаяся использованием *инъекции носителей заряда* через нелинейный электрич. контакт (

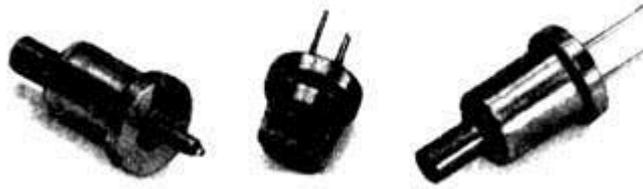


Рис. 1. Внешний вид иткционных лазеров в корпусе с волоконно-оптическим выводом.

гетеропереход ) в качестве механизма накачки. В И. л. электрич. энергия непосредственно преобразуется в энергию лазерного излучения с относительно высоким кпд (до 30-40% при 300 К). Преимущества И. л. перед полупроводниковыми лазерами др. типов - малая инерционность, компактность (рис. 1), низковольтное питание,

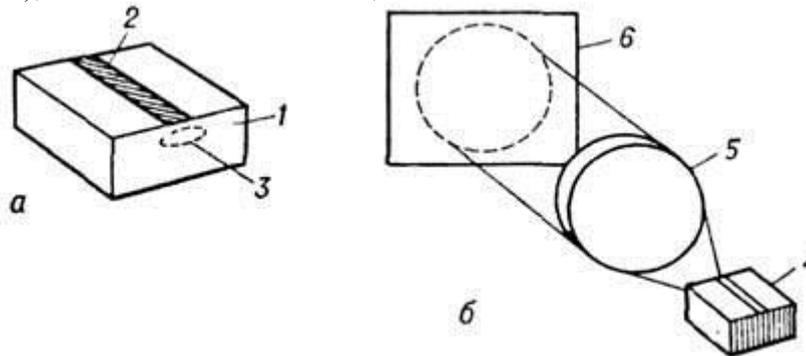


Рис. 2. Схемы инжекцион-ных лазеров: а - с полос-ковой геометрией (1 - зеркальная грань, 2 - полос-ковый контакт, 3 - излучающее пятно на зеркале); б - с внешним резонатором (4 - активный элемент, 5 - объектив-коллиматор, б - внешнее зеркало).

широкий набор длин волн  $K$ , возможность спектральной перестройки, частотной модуляции или частотной стабилизации. <И. л. представляет собой полупроводниковый диод, зеркальные боковые грани к-рого образуют оптический резонатор (рис. 2, а), типичные размеры 250x250x100 мкм. Резонатор может быть внешним (рис. 2, б). Активной средой является тонкая прослойка полупроводника, примыкающая к инжек тирующему контакту, в к-рой накапливаются избыточные носители обоих знаков. Толщина активного слоя И. л. обычно 20-200 нм.

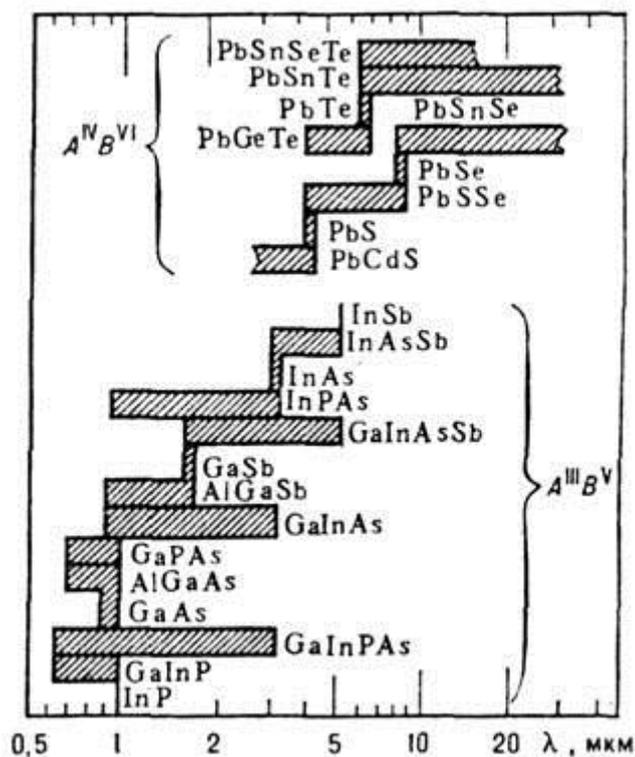


Рис. 3. Спектральные диапазоны, перекрываемые инжекционными гетеролазерами.

Лазерное излучение получают в пределах спектральной полосы люминесценции или вблизи неё, причём в излучательных процессах участвуют свободные носители. Важнейшим типом И. л. является *гетеролазер*, в структуру к-рого включены гетеропереходы между полупроводниковыми материалами с различающимися электрич. и оптич. свойствами, что позволяет снизить пороговый ток лазерной генерации и увеличить кпд. Перекрытие диапазонов  $\lambda$ , за счёт использования разных полупроводников показано на рис. 3. И. л. получили применение в оптич. связи, особенно в волоконно-оптич. системах, где существенны быстродействие, малые размеры, экономичность, долговечность. Преимущество для дальней связи ( $>100$  км без ретрансляции) имеют И. л. на длинах волн  $\lambda=1,3, 1,55$  мкм, оптимальных по прозрачности и пропускной способности волоконно-оптич. тракта. Др. области применения - лазерные системы памяти (видеодиски), спектроскопия.

### ПОЛОСКОВЫЙ ЛАЗЕР и лазер с раздельным оптическим и электронным ограничением

Полосковым лазером называют инжекционный гетеро лазер в котором активная область выполнена в виде узкой полоски. Такая конструкция обеспечивает уменьшение рабочего тока (при неизменном Лор) эффективную селекцию поперечных мод в направлении, параллельном переходу, и устойчивую работу лазера.

Верхний омический контакт напыляется на всю структуру. Такая многослойная структура создается на всей площади подложки. Затем из этой структуры параллельно полосковым контактам нарезаются полосы шириной 200...300 мкм, из которых затем методом скола по плоскостям выкалываются рабочие лазерные структуры.

Эти структуры напаяются на массивный держатель, выполняющий роль тепло отвода и служащий омическим контактом к области. Верхний контакт также . делается достаточно

массивным для улучшения тепло отвода. Иногда всю структуру помещают на термоэлектрический холодильник. Для достижения наилучших характеристик лазера необходимо обеспечить электронное и оптическое ограничения не только в направлении  $z$  но и в плоскости  $w$  перехода в направлении  $x$ , т. е. создать нитевидную структуру.

В первом случае полосковая геометрия создается путем бомбардировки протонами всей площади, за исключением контактной полости. Бомбардировка производится на ускорителе на глубину, немного не доходящую до активного слоя. Облучение протонами создает дефекты в материале, в результате чего эта область становится высокоомной и рабочий ток идет только через необлученную полоску.

Гетеролазеры с отдельным электронным и оптическим ограничением: Для уменьшения рабочего тока ДГС лазера необходимо уменьшать толщину активной области  $d$ . Однако при  $d \ll \lambda$  этому препятствует увеличение потерь вызванных просачиванием света в низкоомные области эмиттеров, и уменьшение коэффициента удержания света  $\Gamma$ .

Чтобы уменьшить оба этих эффекта, необходимо разделить области электронного и оптического ограничения, поместив сверхтонкий активный слой толщиной  $d$   $X$  внутрь более толстого слоя толщиной  $D \gg \lambda$ . Этот слой играет двойную роль. Во-первых, он является оптическим волноводом и осуществляет оптическое ограничение. Во-вторых, он служит своего рода резервуаром для неравновесных носителей, откуда они поступают в активную область толщиной  $d$ .

Учитывая, что при генерации время жизни неравновесных носителей в активной области резко уменьшается за счет вынужденных переходов, последнее обстоятельство является достаточно важным. Локализация носителей в слое  $D$  увеличивает вероятность их захвата в активную область. Расчеты проведены для  $\lambda = 1,55$  мкм. Для успешной работы РОДГС лазера уменьшение  $\Gamma$  при уменьшении  $d$  должно компенсироваться ростом показателя усиления в активном слое.

Полупроводниковые лазеры с электронной и оптической накачкой: Возбуждение люминесценции в полупроводниках при воздействии на них быстрыми электронами (катодолуминесценция) хорошо известно и широко используется в телевизионных электронно-лучевых трубках: электроны, ускоренные электрическим полем, бомбардируют экран (мишень), на который нанесен слой люминофора.

В качестве люминофора обычно применяют полупроводниковый сульфид цинка с различными добавками (активаторами), определяющими цвет свечения. При соблюдении определенных условий этот же метод возбуждения может быть использован для генерации лазерного излучения.

Накачка быстрыми электронами является наиболее универсальным способом возбуждения лазерной генерации в полупроводниках, поскольку она применима к материалам с любой шириной запрещенной зоны и типом электропроводности и требует создания специальных структур типа  $p-n$ -переходов, т. е. применима к однородным кристаллам и слоям. Благодаря этому с помощью электронной накачки получена лазерная генерация почти во всех прямозонных полупроводниках, в том числе в полупроводниках и их твердых растворах.

При попадании в полупроводник быстрые электроны тормозятся, отдавая часть своей энергии на

возбуждение неравновесных электронно-дырочных пар. Накачка должна быть настолько интенсивной, чтоб охлажденные (термализованные) носители были вырождены в каждой из зон и выполнялось условие инверсии. Теоретические расчеты, подтверждены многочисленными экспериментальными результатами, показывают, что минимальная энергия быстрого электрона, необходимая для создания одной электронно-дырочной пары, равна  $3kT$ .

Это означает, что только  $1/3$  энергии электронного пучка расходуется полезно, а  $2/3$  идет на разогрев полупроводника. Это требует специальных мер по осуществлению тепло отвода и охлаждению активного элемента. Полупроводниковые лазеры с электронной накачкой могут быть реализованы в двух геометрических разновидностях: с поперечной и с продольной накачкой.

Вследствие большого значения показателя преломления полупроводника коэффициент зеркального отражения от этих граней составляет 30...40%. При высоких значениях коэффициента усиления этого достаточно для реализации полнотельной обратной связи. В первых полупроводниковых лазерных резонаторах изготавливался путем тщательной оптической полировки торцов активного элемента. При высоком качестве монокристалла скалывание по этим плоскостям дает возможность реализовать плоский резонатор.

Длина активной области  $L$  должна быть порядка нескольких величин. Толщина активной области  $d$  определяется глубиной проникновения быстрых электронов. Поэтому для достижения требуемой  $L$  необходимы большие  $E_{\text{eff}}$  достигающие 100 кэВ и более. Верхняя граница  $E_{\text{eff}}$  определяется возникновением дефектов, ведущих к деградации лазера, а также появлением характеристического рентгеновского излучения.

Основной интерес к полупроводниковым лазерам с продольной электронной накачкой вызван простотой двумерного сканирования остро сфокусированным электронным лучом. Пятно лазерного излучения диаметром десятки микрон может перемещаться непрерывно или дискретно по пластине. В растровом режиме пятно построчно проходит весь кадр. Благодаря направленности ( $0-20^\circ$ ) и высокой плотности излучения лазерного луча яркость изображения в лазерной трубке в сотни и тысячи раз превышает яркость стандартного телевизионного изображения.

Это дает возможность путем простой оптической системы спроектировать полученное изображение на площадь в нескольких квадратных метрах, оставляя яркость приемлемую для его досадующего восприятия. К сожалению, ряд технических и технологических трудностей, а также необходимость применения больших рабочих напряжений пока что ограничивают применение таких трубок как лабораторных образцов. Полупроводниковые лазеры с поперечной схемой электронной накачки выпускаются промышленностью.

### **характеристики полупроводниковых лазеров**

Полупроводниковые инжекционные лазеры характеризуются очень высоким КПД преобразования электрической энергии в когерентное излучение (близким к 100%) и могут работать в непрерывном режиме. Другими практически важными особенностями ПЛ являются: высокая эффективность преобразования электрической энергии в энергию когерентного излучения (до 30—50%); малая инерционность, обуславливающая широкую

полосу частот прямой модуляции (более 109 ГГц); простота конструкции; возможность перестройки длины волны  $\lambda$  излучения и наличие большого числа полупроводников, непрерывно перекрывающих интервал длин волн от 0,32 до 32 мкм.

Общим недостатком всех полупроводниковых Л. является сравнительно невысокая направленность излучения, связанная с их малыми размерами, и трудность получения высокой монохроматичности. Последнее связано с большой шириной спектра спонтанного излучения на рабочих рекомбинационных переходах.

Полупроводниковые Л. используются с наибольшей эффективностью в тех случаях, когда требования к когерентности и направленности не очень велики, но необходимы малые габариты и высокий КПД.

Полупроводниковые Л. превосходят Л. всех остальных типов плотностью энергии излучения и величиной КПД. Важным качеством полупроводниковых Л. является возможность перестройки частоты излучения и управления световым пучком, т. е. модуляция интенсивности света с постоянной времени  $\sim 10$ -11 сек

## **ВАХ**

График зависимости тока через двухполюсник от напряжения на этом двухполюснике. Вольт-амперная характеристика описывает поведение двухполюсника на постоянном токе. Чаще всего рассматривают ВАХ нелинейных элементов (степень нелинейности

определяется коэффициентом нелинейности  $\beta = \frac{U}{I} \cdot \frac{dI}{dU}$ ), поскольку для линейных элементов ВАХ представляет собой прямую линию и не представляет особого интереса.

Для трехполюсных элементов часто строят семейства кривых, являющимися ВАХ для двухполюсника при так или иначе заданных параметрах на третьем выводе элемента.

Необходимо отметить, что в реальной схеме, особенно работающей с относительно высокими частотами (близкими к границам рабочего частотного диапазона) для данного устройства реальная зависимость напряжения от времени может пробегать по траекториям, весьма далеким от «идеальной» ВАХ. Чаще всего это связано с емкостью или другими инертными свойствами элемента.

### Преобразования ВАХ

Полезно отметить некоторые свойства вольтамперных характеристик составных элементов (схем, состоящих из нескольких двухполюсников)

Параллельное соединение — при параллельном соединении двух двухполюсников, при каждом значении напряжения складываются токи, текущие через них, а при последовательном — для каждого значения тока складываются напряжения на элементах.

## **P-I-N фотодиоды**

существуют и p-i-n фотодиоды, в которых между слоями p- и n- находится слой нелегированного полупроводника i. p-n и p-i-n фотодиоды только преобразуют свет в электрический ток, но не усиливают его, в отличие от лавинных фотодиодов и фототранзисторов.

**p-i-n-фотодиод** — разновидность фотодиода, в котором между областями электронной (n) и дырочной (p) проводимости находится собственный (нелегированный) полупроводник (i-область).

Толщина i-слоя выбирается достаточно большой (500 – 700 мкм), легированные слои сделаны очень тонкими → все оптическое излучение поглощалось в i-слое и сокращалось время переноса зарядов из i-зоны в легированные области

## Конструкция pin-фотодиода

### Принцип работы

Фотон входит в i-область, порождая образование электронно-дырочных пар. Носители заряда, попадая в электрическое поле ОПЗ, начинают двигаться к высоколегированным областям, создавая электрический ток, который может быть детектирован внешней цепью. Проводимость диода зависит от длины волны, интенсивности и частоты модуляции падающего излучения.

i-слой называется обеднённым слоем, поскольку в нём нет свободных носителей. Сильное легирование крайних слоев делает их проводящими, поэтому всё напряжение падает на i-слое и в нём создаётся максимальное значение электрического поля.

### Основные параметры

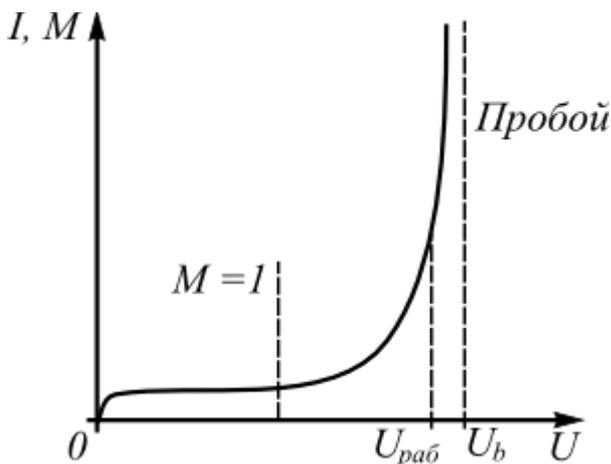
- чувствительность (в современных p-i-n-фотодиодах чувствительность составляет величину от 10 нВт до 100 пВт, что соответствует -50 дБм - -70 дБм);
- квантовая эффективность (в p-i-n-фотодиодах обычно достигает 80%, для фотодиодов, сконструированных для применения в оптоволоконных линиях, емкость перехода равна 0,2 пФ при рабочей поверхности диода 200 мкм);
- время отклика (фотогенерированные носители в i-слое будут разделяться в сильном электрическом поле, и фотоотклик таких диодов будет быстрым).

**Лавинные фотодиоды, ЛФД (avalanche photodiode (APD))** — это высокочувствительные полупроводниковые приборы, преобразующие свет в электрический сигнал за счёт фотоэффекта. Их можно рассматривать в качестве фотоприёмников, обеспечивающих внутреннее усиление посредством эффекта лавинного умножения. С функциональной точки зрения они являются твердотельными аналогами фотоумножителей. Лавинные фотодиоды обладают большей чувствительностью по сравнению с другими полупроводниковыми фотоприёмниками, что позволяет использовать их для регистрации малых световых мощностей ( $\lesssim 1$  нВт).

### **Принцип работы**

При подаче сильного обратного смещения (близкого к напряжению лавинного пробоя, обычно порядка нескольких сотен вольт для кремниевых приборов), происходит усиление фототока (примерно в 100 раз) за счёт ударной ионизации ( лавинного умножения) генерированных светом носителей заряда. Суть процесса в том, что энергия образовавшегося под действием света электрона увеличивается под действием внешнего приложенного поля и может превысить порог ионизации вещества, так что столкновение такого «горячего» электрона с электроном из

валентной зоны может привести к возникновению новой электрон-дырочной пары, носители заряда которой также будут ускоряться полем и могут стать причиной образования всё новых и новых носителей заряда.



Зависимость тока ( $I$ ) и коэффициента умножения ( $M$ ) от обратного напряжения ( $U$ ) на ЛФД.

Существует ряд формул для коэффициента лавинного умножения ( $M$ ), довольно информативной является следующая:

$$M = \frac{1}{1 - \int_0^L \alpha(x) dx}$$

где  $L$  — длина области пространственного заряда, а  $\alpha$  — коэффициент умножения для электронов (и дырок). Этот коэффициент сильно зависит от приложенного напряжения, температуры и профиля легирования. Отсюда возникает требование хорошей стабилизации питающего напряжения и температуры, либо учёт температуры задающей напряжением схемой.

Ещё одна эмпирическая формула показывает сильную зависимость коэффициента лавинного умножения ( $M$ ) от приложенного обратного напряжения:

$$M = \frac{1}{1 - (U/U_b)^n}$$

где  $U_b$  — напряжение пробоя. Показатель степени  $n$  принимает значения от 2 до 6, в зависимости от характеристик материала и структуры р — n-перехода.

Исходя из того, что в общем случае с возрастанием обратного напряжения растёт и коэффициент усиления, существует ряд технологий, позволяющих повысить напряжение пробоя до более чем 1500 вольт, и получить таким образом усиление более чем в 1000 раз. Следует иметь в виду, что простое повышение напряженности поля без предпринятия дополнительных мер может привести к увеличению шумов.

Если требуются очень высокие коэффициенты усиления ( $10^5$  —  $10^6$ ), возможна эксплуатация некоторых типов ЛФД при напряжениях выше пробойных. В этом случае требуется подавать на фотодиод ограниченные по току быстро спадающие импульсы. Для этого могут использоваться активные и пассивные стабилизаторы тока. Приборы, действующие таким образом работают в режиме Гейгера (Geiger mode). Этот режим применяется для создания однофотонных детекторов (при условии, что шумы достаточно малы)

## ШУМЫ В ФОТОДИОДАХ

Важным параметром, позволяющим сравнить физически и конструктивно разнородные фотоприемники, является обнаружительная способность — величина, обратная пороговому потоку в заданной (обычно единичной) полосе частот.

Основные виды шумов фотодиода: тепловой, дробовой и избыточный, который обратно пропорционален частоте модуляции. В зависимости от схемы включения преобладает тепловой шум или избыточный

Применение и паспортные данные фотодиодов. Фотодиоды являются наиболее массовым типом фотоприемников. В фотодиодном режиме в полной мере реализуются такие положительные свойства, как широкий спектральный диапазон, линейная энергетическая характеристика, высокое быстродействие, временная стабильность характеристик. В фотогальваническом режиме работы у фотодиодов ниже уровень шумов и темновых токов. Основным недостатком рассматриваемых устройств — температурная зависимость темнового тока, который в фотодиодном режиме может приближаться к значениям фототока. В отличие от фоторезисторов фотодиоды не обладают внутренним усилением фототока.

Параметры:

- чувствительность

отражает изменение электрического состояния на выходе фотодиода при подаче на вход единичного оптического сигнала. Количественно чувствительность измеряется отношением изменения электрической характеристики, снимаемой на выходе фотоприемника, к световому потоку или потоку излучения, его вызвавшему.

$$S_{i, \Phi_u} = \frac{I_{\Phi}}{\Phi_u}; \quad S_{i, E_u} = \frac{I_{\Phi}}{E_u} \text{ - токовая чувствительность по световому потоку}$$

$$S_{u, \Phi_e} = \frac{U_{\Phi}}{\Phi_e}; \quad S_{u, E_e} = \frac{U_{\Phi}}{E_e} \text{ - вольт-амперная чувствительность по энергетическому потоку}$$

- шумы

помимо полезного сигнала на выходе фотодиода появляется хаотический сигнал со случайной амплитудой и [спектром](#) - шум фотодиода. Он не позволяет регистрировать сколь угодно малые полезные сигналы. Шум фотодиода складывается из шумов [полупроводникового](#) материала и фотонного шума.

Характеристики:

- [вольт-амперная характеристика \(ВАХ\)](#)

зависимость выходного напряжения от входного тока.  $U_{\Phi} = f(I_{\Phi})$

- спектральные характеристики

зависимость фототока от длины волны падающего света на фотодиод. Она определяется со стороны больших длин волн шириной запрещенной зоны, при малых длинах волн большим показателем поглощения и увеличения влияния поверхностной рекомбинации носителей заряда с уменьшением длины волны квантов света. То есть коротковолновая граница чувствительности зависит от толщины базы и от скорости поверхностной рекомбинации. Положение максимума в спектральной характеристике фотодиода сильно зависит от степени роста коэффициента поглощения.

- световые характеристики

зависимость фототока от освещенности, соответствует прямой пропорциональности фототока от освещенности. Это обусловлено тем, что толщина базы фотодиода значительно меньше диффузионной длины неосновных носителей заряда. То есть практически все неосновные носители заряда, возникшие в базе, принимают участие в образовании фототока.

- [постоянная времени](#)

это время, в течение которого фототок фотодиода изменяется после освещения или после затемнения фотодиода в  $e$  раз (63%) по отношению к установившемуся значению.

- [темновое сопротивление](#)

[сопротивление](#) фотодиода в отсутствие освещения.

- инерционность

## Классификация [Правиль](#)

- **p-i-n фотодиод**

В p-i-n структуре средняя i-область заключена между двумя областями противоположной проводимости. При достаточно большом напряжении оно пронизывает i-область и свободные носители, появившееся за счет фотонов при облучении, ускоряются электрическим полем p-n переходов. Это дает выигрыш в быстродействии и чувствительности. Повышение быстродействия в p-i-n фотодиоде обусловлено тем, что процесс диффузии заменяется дрейфом электрических зарядов в сильном электрическом поле. Уже при  $U_{обр} \approx 0.1В$  p-i-n фотодиод имеет преимущество в быстродействии.

Достоинства:

- 1) есть возможность обеспечения чувствительности в длинноволновой части спектра за счет изменения ширины i-области.
- 2) высокая чувствительность и быстродействие
- 3) малое рабочее напряжение  $U_{раб}$

Недостатки:

сложность получения высокой чистоты i-области

- [Фотодиод Шоттки](#) (фотодиод с барьером Шоттки)

Структура металл-полупроводник. При образовании структуры часть электронов перейдет из металла в полупроводник р-типа.

- [Лавинный фотодиод](#)

В структуре используется лавинный пробой. Он возникает тогда, когда энергия фотоносителей превышает энергию образования электронно-дырочных пар. Очень чувствительны. Для оценки существует коэффициент лавинного умножения:

$$M = \frac{I_{\Phi}}{I_{\Phi_0}}$$
$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_{pr}}\right)^m}$$

Для реализации лавинного умножения необходимо выполнить два условия:

1) [Электрическое поле](#) области пространственного заряда должно быть достаточно большим, чтобы на длине свободного пробега [электрон](#) набрал энергию, большую, чем ширина запрещенной зоны:

$$q\lambda = \frac{3I_g}{2}$$

2) Ширина области пространственного заряда должна быть существенно больше, чем длина свободного пробега:

$$W \gg \lambda$$

Значение коэффициентов внутреннего усиления составляет  $M=10-100$  в зависимости от типа фотодиодов.

- **Фотодиод с гетероструктурой**

Гетеропереходом называют слой, возникающий на границе двух полупроводников с разной шириной запрещенной зоны. Один слой р+ играет роль "приемного окна". Заряды генерируются в центральной области. За счет подбора полупроводников с различной шириной запрещенной зоны можно перекрыть весь диапазон длин волн. Недостаток - сложность изготовления.

## **Волоконно-Оптические Лнии Связи (ВОЛС)**

**Волоконно-Оптические Линии Связи (ВОЛС)** - это вид системы передачи информационных данных, при котором информация передается по оптическим диэлектрическим световодам, известным под названием оптическое волокно. Помимо вопросов волоконной оптики технологии ВОЛС также охватывают вопросы, касающиеся электронного передающего оборудования, его стандартизации, протоколов передачи, топологии сети и общие вопросы построения сетей. В настоящее время ВОЛС считаются самой совершенной физической средой для передачи информации, а также самой перспективной средой для передачи больших потоков информации на значительные расстояния.

### **ВОЛС. Основные понятия и области применения**

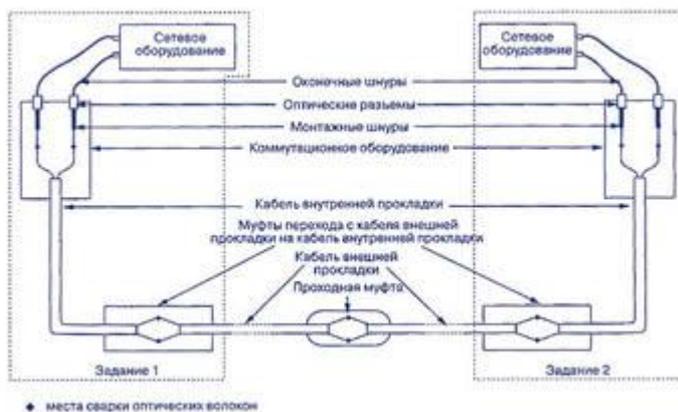
Волоконно-оптическая линия связи (Волс) - это вид системы передачи, при котором информация передается по оптическим диэлектрическим волноводам, известным под названием "оптическое волокно".

Волс - это информационная сеть, связующими элементами между узлами которой являются волоконно-оптические линии связи. Технологии Волс помимо вопросов волоконной оптики охватывают также вопросы, касающиеся электронного передающего

оборудования, его стандартизации, протоколов передачи, вопросы топологии сети и общие вопросы построения сетей.

ВОЛС в основном используются при построении объектов, в которых СКС должна объединить многоэтажное здание или здание большой протяженности, а также при объединении территориально-разрозненных зданий.

Структурная схема Волс, применяемой для создания подсистемы внешних магистралей, изображена на рисунке.



## Области применения и классификация волоконно-оптических кабелей (ВОК)

Волоконно-оптические кабели, применяемые в СКС, предназначены для передачи оптических сигналов внутри зданий и между ними. На их основе могут быть реализованы все три подсистемы СКС, хотя в горизонтальной подсистеме волоконная оптика пока находит ограниченное применение для обеспечения функционирования ЛВС. В подсистеме внутренних магистралей оптические кабели применяются одинаково часто с кабелями из витых пар, а в подсистеме внешних магистралей они играют доминирующую роль.

В зависимости от основной области применения волоконно-оптические кабели подразделяются на три основных вида:

- кабели внешней прокладки (outdoor cables);
- кабели внутренней прокладки (indoor cables);
- кабели для шнуров.

Кабели внешней прокладки используются при создании подсистемы внешних магистралей и связывают между собой отдельные здания. Основной областью использования кабелей внутренней прокладки является организация внутренней магистрали здания, тогда как кабели для шнуров предназначены в основном для изготовления соединительных и коммутационных



шнуров, а также для выполнения горизонтальной разводки при реализации проектов класса «fiber to the desk» (волокно до рабочего места) и «fiber to the room» (волокно до комнаты)

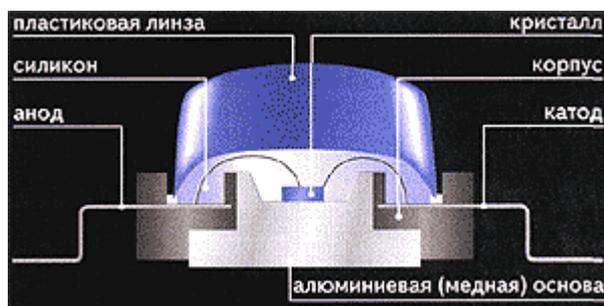
### Что такое светодиод?

Светодиод — это полупроводниковый прибор, преобразующий электрический ток непосредственно в световое излучение.

Кстати, по-английски светодиод называется light emitting diode, или LED.

### 2. Из чего состоит светодиод?

Из полупроводникового кристалла на подложке, корпуса с контактными выводами и оптической системы. Современные светодиоды мало похожи на первые корпусные светодиоды, применявшиеся для индикации. Конструкция мощного светодиода серии Luxeon, выпускаемой компанией Lumileds, схематически изображена на рисунке.



### 3. Как работает светодиод?

Свечение возникает при рекомбинации электронов и дырок в области р-п-перехода. Значит, прежде всего нужен р-п-переход, то есть контакт двух полупроводников с разными типами проводимости. Для этого приконтактные слои полупроводникового кристалла легируют разными примесями: по одну сторону акцепторными, по другую — донорскими.

Но не всякий р-п-переход излучает свет. Почему? Во-первых, ширина запрещенной зоны в активной области светодиода должна быть близка к энергии квантов света видимого диапазона. Во-вторых, вероятность излучения при рекомбинации электронно-дырочных пар должна быть высокой, для чего полупроводниковый кристалл должен содержать мало дефектов, из-за которых рекомбинация происходит без излучения. Эти условия в той или иной степени противоречат друг другу.

Реально, чтобы соблюсти оба условия, одного р-п-перехода в кристалле оказывается недостаточно, и приходится изготавливать многослойные полупроводниковые структуры, так называемые гетероструктуры, за изучение которых российский физик академик Жорес Алферов получил Нобелевскую премию 2000 года.

**Оптическое волокно** — нить из оптически прозрачного материала (стекло, пластик), используемая для переноса света внутри себя посредством полного внутреннего отражения.

Волоконная оптика — раздел прикладной науки и машиностроения, описывающий такие волокна. Кабели на базе оптических волокон используются в волоконно-оптической связи, позволяющей передавать информацию на большие расстояния с более высокой скоростью передачи данных, чем в электронных средствах связи. В ряде случаев они также используются при создании датчиков.

## Материалы

Стеклянные оптические волокна делаются из кварцевого стекла, но для дальнего инфракрасного диапазона могут использоваться другие материалы, такие как флуорид цирконат, флуорид алюминат и халькогенидные стекла. Как и другие стекла, эти имеют показатель преломления около 1,5.

В настоящее время развивается применение пластиковых оптических волокон.

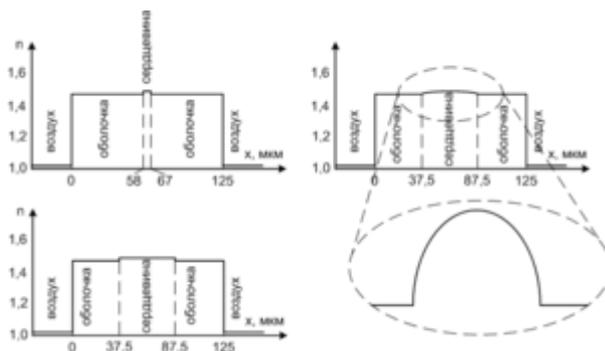
## Конструкция

Оптическое волокно имеет круглое сечение и состоит из двух частей — сердцевины и оболочки. Для обеспечения полного внутреннего отражения абсолютный показатель преломления сердцевины несколько выше показателя преломления оболочки. Например, если показатель преломления оболочки равен 1,474, то показатель преломления сердцевины — 1,479.

Луч света, направленный в сердцевину, будет распространяться по ней, испытывая многократные переотражения от границы раздела «серцевина — оболочка».

Все оптические волокна, используемые в телекоммуникациях, имеют диаметр  $125 \pm 1$  микрон. Диаметр сердцевины может отличаться в зависимости от типа волокна и национальных стандартов.

## Классификация



Профиль показателя преломления различных типов оптических волокон: слева сверху — одномодовое волокно, слева снизу — многомодовое ступенчатое волокно, справа — градиентное волокно с параболическим профилем.

Оптические волокна могут быть одномодовыми и многомодовыми. Диаметр сердцевины одномодовых волокон составляет от 7 до 9 микрон. Благодаря малому диаметру достигается передача по волокну лишь одной моды электромагнитного излучения, за счёт чего исключается влияние дисперсионных искажений. В настоящее время практически все производимые волокна являются одномодовыми.

Многомодовые волокна отличаются от одномодовых диаметром сердцевины, который 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.

Многомодовые волокна подразделяются на ступенчатые и градиентные. В ступенчатых волокнах показатель преломления от оболочки к сердцевине изменяется скачкообразно. В градиентных волокнах это изменение происходит иначе — показатель преломления сердцевины плавно возрастает от края к центру. Это приводит к явлению рефракции в сердцевине, благодаря чему снижается влияние дисперсии на искажение оптического импульса. Профиль показателя преломления градиентного волокна может быть параболическим, треугольным, ломаным и т. д.

### **затухание сигнала**

Небольшая величина затухания сигнала позволяет передавать информацию без промежуточного усиления на расстояния, большие чем по медному проводу. Максимальная, доступная в настоящее время для коммерческих систем, скорость передачи по одному волокну составляет 10 Гбит/с. За счет мультиплексирования с разделением времени (Time Division Multiplexing — TDM) эту величину можно в несколько раз увеличить.

Применение же передачи нескольких световых потоков в одном световоде за счет использования технологии WDM (Wave Division Multiplexing — мультиплексирование по длине волны) позволило добиться ошеломляющих результатов: передавать данные со скоростью свыше 1 терабит в секунду. Для того чтобы выяснить, каким образом это удастся, рассмотрим физические основы передачи данных по световодам и устройство самих оптоволоконных кабелей.

## **Волоконно-оптические передающие среды**

### **Преимущества волокна**

Волоконно-оптические коммуникации имеют ряд преимуществ по сравнению с электронными системами, использующими передающие среды на металлической основе.

В волоконно-оптических системах передаваемые сигналы не искажаются ни одной из форм внешних электронных, магнитных или радиочастотных помех. Таким образом, оптические кабели полностью невосприимчивы к помехам, вызываемым молниями или источниками высокого напряжения. Более того, оптическое волокно не испускает излучения, что делает его идеальным для соответствия требованиям современных стандартов к компьютерным приложениям. Вследствие того, что оптические сигналы не требуют наличия системы заземления, передатчик и приемник электрически изолированы

друг от друга и свободны от проблем, связанных с возникновением паразитных токовых петель.

При отсутствии сдвига потенциалов в системе заземления между двумя терминалами, исключающим искрения или электрические разряды, волоконная оптика становится все более предпочтительным выбором для реализации многих приложений, когда требованием является безопасная работа в детонирующих или воспламеняющихся средах.

Цифровые вычислительные системы, телефония и видео-вещательные системы требуют новых направлений для улучшения передающих характеристик. Большая ширина спектра оптического кабеля означает повышение емкости канала. Кроме того, более длинные отрезки кабеля требуют меньшего количества репитеров, так как волоконно-оптические кабели обладают чрезвычайно низкими уровнями затухания. Это свойство идеально подходит для широковещательных и телекоммуникационных систем. По сравнению с обычными коаксиальными кабелями с равной пропускной способностью, меньший диаметр и вес волоконно-оптических кабелей означает сравнительно более легкий монтаж, особенно в заполненных трассах. 300 метров одноволоконного кабеля весят около 2,5 кг. 300 метров аналогичного коаксиального кабеля весят 32 кг - приблизительно в 13 раз больше.

Электронные методы подслушивания основаны на электромагнитном мониторинге. Волоконно-оптические системы невосприимчивы к подобной технике. Для снятия данных к ним нужно подключиться физически, что снижает уровень сигнала и повышает уровень ошибок - оба явления легко и быстро обнаруживаются.

## **Физические характеристики волоконно-оптических передающих сред.**

### **Основные элементы оптического волокна**

**Ядро.** Ядро - светопередающая часть волокна, изготавливаемая либо из стекла, либо из пластика. Чем больше диаметр ядра, тем большее количество света может быть передано по волокну.

**Демпфер.** Назначение демпфера - обеспечение более низкого коэффициента преломления на границе с ядром для переотражения света в ядро таким образом, чтобы световые волны распространялись по волокну.

**Оболочка.** Оболочки обычно бывают многослойными, изготавливаются из пластика для обеспечения прочности волокна, поглощения ударов и обеспечения дополнительной защиты волокна от воздействия окружающей среды. Такие буферные оболочки имеют толщину от 250 до 900 мкм.

**Размер волокна** в общем случае определяется по внешним диаметрам его ядра, демпфера и оболочки. Например, 50/125/250 - характеристика волокна с диаметром ядра 50 мкм, диаметром демпфера 125 мкм и диаметром оболочки 250 мкм. Оболочка всегда удаляется при соединении или терминировании волокон.

**Тип волокна** идентифицируется по типу путей, или так называемых "мод", проходимых светом в ядре волокна. Существует два основных типа волокна - многомодовое и одномодовое. Ядра многомодовых волокон могут обладать ступенчатым или градиентным показателями преломления. Многомодовое волокно со ступенчатым показателем

преломления получило свое название от резкой, ступенчатой, разницы между показателями преломления ядра и демпфера.

В более распространенном многомодовом волокне с градиентным показателем преломления лучи света также распространяются в волокне по многочисленным путям. В отличие от волокна со ступенчатым показателем преломления, ядро с градиентным показателем содержит многочисленные слои стекла, каждый из которых обладает более низким показателем преломления по сравнению с предыдущим слоем по мере удаления от оси волокна. Результатом формирования такого градиента показателя преломления является то, что лучи света ускоряются во внешних слоях и их время распространения в волокне сравнивается с временем распространения лучей, проходящих по более коротким путям ближе к оси волокна.

Таким образом, волокно с градиентным показателем преломления выравнивает время распространения различных мод так, что данные по волокну могут быть переданы на более дальние расстояния и на более высоких скоростях до того момента, когда импульсы света начнут перекрываться и становиться неразличимыми на стороне приемника.

Волокна с градиентным показателем представлены на рынке с диаметрами ядра 50, 62,5 и 100 мкм.

Одномодовое волокно, в отличие от многомодового, позволяет распространяться только одному лучу или моде света в ядре. Это устраняет любое искажение, вызываемое перекрытием импульсов. Диаметр ядра одномодового волокна чрезвычайно мал - приблизительно 5 -10 мкм. Одномодовое волокно обладает более высокой пропускной способностью, чем любой из многомодовых типов. Например, подводные морские телекоммуникационные кабели могут нести 60000 речевых каналов по одной паре одномодовых волокон.

## **Затухание**

**Собственные потери оптического волокна.** Свет является электромагнитной волной. Скорость света уменьшается при распространении по прозрачным материалам по сравнению со скоростью распространения света в вакууме. Волны инфракрасного диапазона также распространяются различно по оптическому волокну. Поэтому затухание, или потери оптической мощности, должны измеряться на специфических длинах волн для каждого типа волокна. Длины волн измеряются в нанометрах (нм).

Потери оптической мощности на различных длинах волн происходят в оптическом волокне вследствие поглощения, отражения и рассеяния. Эти потери зависят от пройденного расстояния и конкретного вида волокна, его размера, рабочей частоты и показателя преломления.

Величина потерь оптической мощности вследствие поглощения и рассеяния света на определенной длине волны выражается в децибелах оптической мощности на километр (дБ/км).

Волокна оптимизированы для работы на определенных длинах волн. Например, можно достичь потерь в 1 дБ/км для многомодового волокна 50/125 мкм на длине волны 1300 нм, и менее 3 дБ/км (50%-е потери мощности) для того же волокна на 850 нм. Эти два волновых региона, - 850 и 1300 нм, являются областями наиболее часто определяемыми для рабочих характеристик оптических волокон и используются современными

коммерческими приемниками и передатчиками. Кроме того, одномодовые волокна оптимизированы для работы в регионе 1550 нм.

В коаксиальном кабеле чем больше частота, тем больше уменьшается амплитуда сигнала с увеличением расстояния, и это явление называется **затуханием**. Частота для оптического волокна постоянна до тех пор, пока она не достигнет предела диапазона рабочих частот. Таким образом, оптические потери пропорциональны только расстоянию. Такое затухание в волокне вызвано поглощением и рассеиванием световых волн на неоднородностях, вызванных химическими загрязнениями, и на молекулярной структуре материала волокна. Эти микрообъекты в волокне поглощают или рассеивают оптическое излучение, оно не попадает в ядро и теряется. Затухание в волокне специфицируется производителем для определенных длин волн: например, 3 дБ/км для длины волны 850 нм. Это делается потому, что потери волокна изменяются с изменением длины волны.

**Потери на микроизгибах.** Без специальной защиты оптическое волокно подвержено потерям оптической мощности вследствие микроизгибов. Микроизгибы - это микроскопические искажения волокна, вызываемые внешними силами, которые приводят к потере оптической мощности из ядра. Для предотвращения возникновения микроизгибов применяются различные типы защиты волокна. Волокна со ступенчатым показателем относительно более устойчивы к потерям на микроизгибах, чем волокна с градиентным показателем.

## ДИСПЕРСИЯ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

Дисперсия- это рассеяние во времени спектральных или модовых характеристик ОВ, которое приводит к увеличению длительности импульса оптического излучения (ОИ) при распространении его по ОВ.

Дисперсия не только ограничивает частотный диапазон ОВ, но и существенно снижает дальность передачи сигналов, так как чем длиннее линия, тем больше увеличение длительности импульсов.

Д определяется 3 основными факторами: различием скоростей распространения направляемых мод, направляющими свойствами ОВ и параметрами материала, из которого оно изготовлено. В связи с этим основными причинами возникновения Д являются, с одной стороны, большое число мод в ОВ (межмодовая Д), а с другой стороны- некогерентность источников излучения, реально работающих в спектре длин волн (хроматическая дисперсия).

Межмодовая Д преобладает в многомодовых ОВ и обусловлена отличием времени прохождения мод по ОВ от его входа до выхода. Так как межмодовая Д не зависит от характеристик источника излучения, для многомодовых волокон ее оценивают по полосе пропускания ОВ (МГц\*км).

Отличие времени распространения каждой из направляемых мод, образующих сигнал, от частоты спектра источника ОИ приводит к возникновению хроматической (частотной) Д, которая складывается из внутримодовой (волноводной) Д и материальной Д.

Первый тип Д обусловлен направляющими свойствами сердцевины ОВ, а именно зависимостью групповой скорости моды от длины волны ОИ, что приводит к различию скоростей распространения частотных составляющих излучаемого спектра. Поэтому внутримодовая Д определяется профилем показателя преломления ОВ и пропорциональна ширине спектра излучения источника.

Второй тип Д вызван зависимостью показателя преломления (ПП) от длины волны, что приводит к различным скоростям распространения спектральных составляющих источника излучения.

### **длина волны нулевой дисперсии**

Длина волны, при которой это происходит, называется длиной волны нулевой дисперсии  $\lambda_0$ . Обычно указывается некоторый диапазон длин волн, в пределах которых может варьироваться  $\lambda_0$  для данного конкретного волокна.

Фирма Corning использует следующий метод определения удельной хроматической дисперсии. Измеряются задержки по времени при распространении коротких импульсов света в волокне длиной не меньше 1 км. После получения выборки данных для нескольких длин волн из диапазона интерполяции (800-1600 нм для MMF, 1200-1600 нм для SF и DSF), делается повторная выборка измерения задержек на тех же длинах волн, но только на коротком эталонном волокне (длина 2м). Времена задержек, полученных на нем, вычитаются из соответствующих времен, полученных на длинном волокне, чтобы устранить систематическую составляющую ошибки.

Для одномодового ступенчатого и многомодового градиентного волокна используется эмпирическая формула Селмейера (Sellmeier, [4]):  $\tau(\lambda) = A + B\lambda^2 + C\lambda^{-2}$ . Коэффициенты А, В, С являются подгоночными, и выбираются так, чтобы экспериментальные точки лучше ложились на кривую  $\tau(\lambda)$ , рис. 2.10. Тогда удельная хроматическая дисперсия вычисляется по формуле:

$$D(\lambda) = \partial\tau/\partial\lambda = 2(B\lambda - C\lambda^{-3}) = S_0(\lambda - \lambda_0^4/\lambda^3)/4 \quad (2-20)$$

где  $\lambda_0 = (C/B)^{1/4}$  - длина волны нулевой дисперсии (zero dispersion wavelength), новый параметр  $S_0 = 8B$  - наклон нулевой дисперсии (zero dispersion slope, его размерность пс/(нм<sup>2</sup>\*км)), а  $\lambda$  - рабочая длина волны, для которой определяется удельная хроматическая дисперсия.

### **волоконный датчик**

*Волоконные датчики являются распределенной системой сбора данных с удаленными устройствами обработки информации;*

**5.** *Волоконно-оптические датчики естественным образом сопрягаются с оптическими системами обработки информации.*

В конкретных конструкциях волоконно-оптических датчиков проявляются дополнительные преимущества данного типа сенсоров.

**Основные разработки лаборатории волоконно-оптических датчиков:**

**1. Волоконно- оптический датчик гравитации на основе эффекта фазовой модуляции когерентного оптического излучения.**

Датчик предназначен для определения направления и модуля вектора ускорения и гравитации в трехмерном пространстве. Область возможных применений - гравитационная разведка полезных ископаемых, прежде всего запасов углеводородного сырья, задачи вестибулярного управления ориентацией летательных аппаратов, системы активной виброзащиты технологических модулей на орбитальных станциях и искусственных спутниках Земли.

Динамический диапазон измерений - от  $10^{-7}$  g до 1.5 g ( где g - ускорение свободного падения). Точность измерений -  $10^{-7}$  -  $10^{-5}$  g.

**2. Волоконно-оптический датчик давления жидкости и газа на основе измерения микроперемещений упругой диафрагмы.**

Датчик предназначен для измерения высоких давлений жидкости и газа в скважинах и трубопроводах. Диапазон измеряемых давлений: от 0.01 атм до 1000 атм . Точность измерений - от  $10^{-7}$  атм до 0.01 атм.

Данный тип датчика может быть использован для измерения полей акустических колебаний в элементах трубопроводов.

**3. Волоконно - оптический датчик давления газа и жидкости на основе эффекта поворота вектора линейной поляризации световой волны в одномодовом волоконном световоде.**

Датчик предназначен для измерения давления газожидкой среды в трубопроводах и иных замкнутых объемах в условиях взрыво- и пожароопасности и действия агрессивных сред. Датчик измеряет относительные изменения давления жидкости и газа в диапазоне от 0.01 атм до 1000 атм с точностью от  $10^{-6}$  атм до 0.5 атм.

**4. Волоконно-оптический датчик вибраций на основе эффекта туннельной связи одномодовых световодов.**

Датчик предназначен для измерения уровня и параметров полей механических вибраций деталей машин, трубопроводов и скважинных конструкций . Амплитуда измеряемых вибраций -  $10^{-3}$  мкм - 10 мкм ; частота измеряемых вибраций - 0,1 Гц - 106 Гц.

**5. Волоконно-оптический акселерометр на основе двулучевого волоконного световода.**

Датчик предназначен для измерения ускорений и вибраций машин и конструкций.

Диапазон измеряемых ускорений - от  $10^{-5}$  м/с<sup>2</sup> до 10 м/с<sup>2</sup>. Точность измерений: от  $10^{-6}$  м/с<sup>2</sup> до  $10^{-4}$  м/с<sup>2</sup>.

**6. Волоконно-оптический датчик температуры на основе двулучевого световода.**

Датчик предназначен для измерения относительных изменений температуры жидкости и газа во взрыво- и пожароопасной среде. Диапазон измерений: от -50 до 500 градусов, точность измерений: от  $10^{-3}$  град до 0,1 град в зависимости от диапазона измеряемой температуры.