

1. Оптични кабели

-Конструкцията му включва едно или повече оптични влакна защитени с общи кабелни обвивки.

-Оптичните влакна са направени от свръх прозрачно стъкло и пренасят информационните сигнали чрез светлина.

-Светлината, във въздух/вакуум се движи със скорост 300,000 Km/s.

- Скоростта на светлината в други среди, като например стъкло, зависи от плътността на средата (по-висока плътност, по-ниска скорост).

Оптичните кабели са почти без конкуренция като преносна среда, особено по отношение на ширината на предоставената от тях честотна лента. По този показател те превъзхождат и връзките с телекомуникационни спътници

Предимства на оптичните кабели

- Изключително висок преносен капацитет и малки сигнални загуби (затихване) на дълги разстояния.
- **Малки по размер** (намаляване на размерите до 98% сравнено с медните проводници -
- **Леки по тегло** (намаляване до 90% сравнено с медните проводници).
- **Защитеност на пренасяната информация от нежелана външна намеса и подслушване.**
- Невъзприемчивост към *радиочестотна интерференция (RFI), електромагнитна интерференция (EMI) и електростатични разряди (ESD)*. Подходящи за полагане в близост до електрифициран ж.п. транспорт и силнотокowi лин
- **Пожаробезопасни**, тъй като пренасят светлина и няма опасност от къси съединения. Подходящи за рудници, химически заводи и др.
- **Суровината за направата на оптичните кабели е кварцов пясък**

Световодната оптика и конвенционалните комуникации

Оптично влакно - Сигналите се предават под формата на светлина по стъклена нишка

Меден проводник - Пренасяне на електрически сигнали по медни проводници

Безжична връзка - Предаване на радио сигнали в свободното пространство

Оптичен спектър е тази област от електромагнитния спектър където оптичните влакна и оптичните устройства работят. Тази област включва видимата светлина (400-700 nanometer) и близките части на инфрачервената и ултравиолетовата области. Оптичният спектър грубо заема 200-20,000 nm (λ).

Пречупване на светлината

- **Нормално**, светлината се разпространява по права линия между оптичните устройства.
 - **Във вакуум**, светлината се движи със скорост приблизително 300000 км/s . Обаче, тя се движи по-бавно в материали като стъкло и др.
 - Всяка прозрачна за светлината среда се характеризира с **коефициент на пречупване**. Той сравнява скоростта на светлината във вакуум със скоростта на светлината в материала.

Коефициент на пречупване = скорост на светлината в вакуум ÷ скорост на светлината в материала

Материал	Коефициент на пречупване
- въздух	1.0003
- вода	1.33
- оптична обвивка	1.46
- оптично ядро	1.48

Пречупване и отражение

- С увеличаване на ъгъла на падане нараства отразената светлина, а пречупената светлина намалява.
 - При критичния ъгъл на падане, светлината се пречупва по повърхността на материала. При ъгли по-големи от критичния ъгъл настъпва **пълно вътрешно отражение**.

Пълно вътрешно отражение не настъпва когато светлината преминава от по-рядка в по-плътна среда, като например преминаване на светлината от въздух към стъкло

Пълно вътрешно отражение в оптичното влакно



Оптично влакно Optical Fiber

Структура на влакното

Ядро (Core)

- Средата, в която се пренася светлината.
- Направено е от кварцово стъкло или пластмаса. Включени са и легиращи елементи за изменение на коефициента му на пречупване.
- Има коефициент на пречупване **по-голям от този на оптичната обвивка.**

Оптична обвивка (Cladding)

- Осигурява задържане (канализиране) на светлината в ядрото при разпространението ѝ по оптичното влакно.
- Направена е от кварцово стъкло или пластмаса.
- Включени са и легиращи елементи за изменение на коефициента ѝ на пречупване.
- Има коефициент на пречупване **по-малък от този на ядрото.**

Защитни обвивки

- Осигуряват механична и климатична защита на оптичното влакно.
- Дебелината и състава на обвивките зависи от вида на оптичното влакно и конкретното му приложение.

!!!!!! Пропускана честотна лента Bandwidth

- Пропусканата честотна лента (Bandwidth) - ширината на честотния обхват, който може да бъде предаден по оптичното влакно. **Тя се специфицира в MHz.km**
- Определя максималния преносен информационен капацитет на канала по влакното, пренасян на определено разстояние
- При многомодовото влакно, Bandwidth се ограничава главно от модовата дисперсия

При едномодовото влакно почти няма ограничения за Bandwidth

Производство на оптични влакна

- Стъклена заготовка: стъклена пръчка с проектирания профил на коефициента на пречупване на влакното
- Изтегляне на тънко стъклено влакно от заготовката
- Нанасяне на първичното защитно покритие на влакното (protective coating)
- Кабелиране: конструктивно оформяне на оптичния кабел от оптични влакна, общи защитни обвивки (buffers) и силови елементи (strength members)

- **!!!!!!! Сигнални загуби (затихване) в оптичното влакно**

-

- Пренасянето на светлината по оптичното влакно не е 100% ефективно. Част от светлинната енергия се губи (затихва) в него.
- Затихването представлява загуба на информационен сигнал и се изразява с отношението на входната към изходната оптична мощност. Обикновено се измерва в decibels (dB) и се специфицира в dB/km
 - Затихването в самото оптично влакно зависи от: чистотата и прозрачността на кварца на оптичното ядро и от дължината на светлинната вълна λ .
 - Днешните оптични комуникации използват *три оптични "прозореца"*, в които светлината се предава с малко затихване по влакното. Първият е около $\lambda = 850 \text{ nm}$, вторият прозорец е около $\lambda = 1300 \text{ nm}$, а третият - около $\lambda = 1550 \text{ nm}$
 - Минималният теоретичен предел на затихването в оптичното влакно е
 - 2.5 dB при 850 nm
 - 0.24 dB при 1300 nm
 - 0.012 dB при 1550 nm

Сигналните загуби (затихването) в оптичните линии се дължат на:

Фактори, свързани с технологията на производство на оптичните влакна :

- наличие на примеси в стъклото – легиращи елементи, йони на различни метали, хидроокисни йони водят до поглъщане на светлината
- Нееднородност на влакното и неговата геометрична структура (микродефекти) водят до разсейване на светлината
- Технологиите по пречистване на стъклото и производството на оптичните влакна имат изключителен технологичен прогрес така че силно намаляват значението на този фактор

Външни фактори

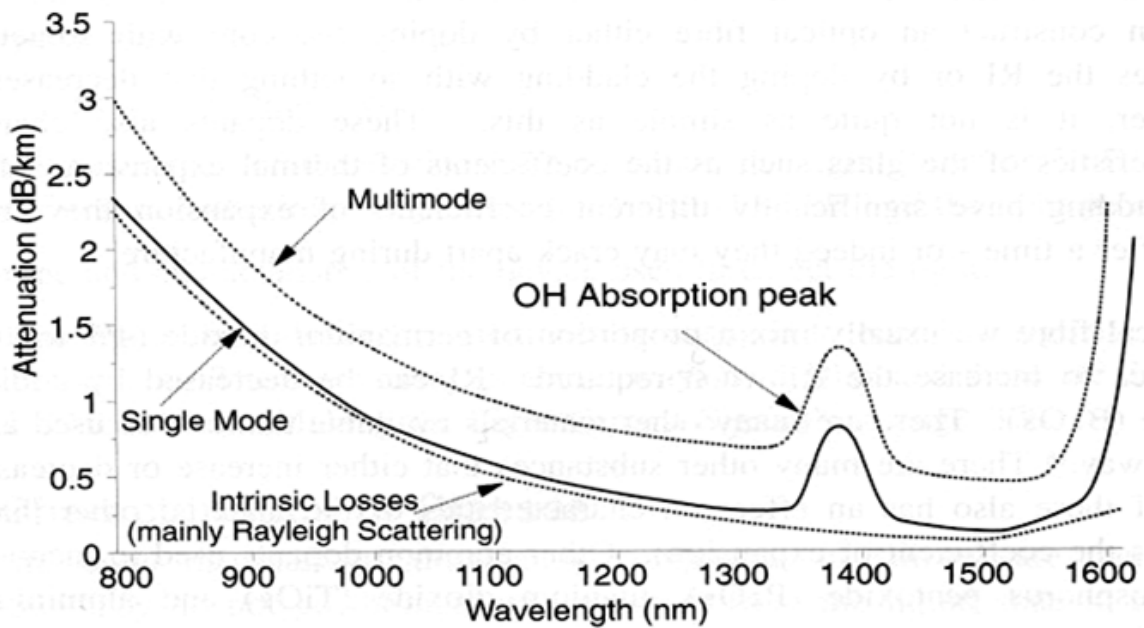
- изравняване на влакната при свързване -осово и ъглово
- вариации в параметрите на оптичните влакна при свързване
- гъвания на влакната - микро и макро
- въздушна междина при свързване
- замърсяване и нараняване на челната повърхност на влакната

Поглъщане и разсейване на светлинните лъчи - И двата ефекта са линейни и водят до затихване. Разсейване е доминиращо в сравнение с поглъщането на светлината (силно изразено е при късите дължини на вълните и отслабва при дългите вълни)

Затихване в кварцово оптично влакно



Затихване в многомодово и едномодово оптични влакна



Оптични прозорци на кварцовите влакна

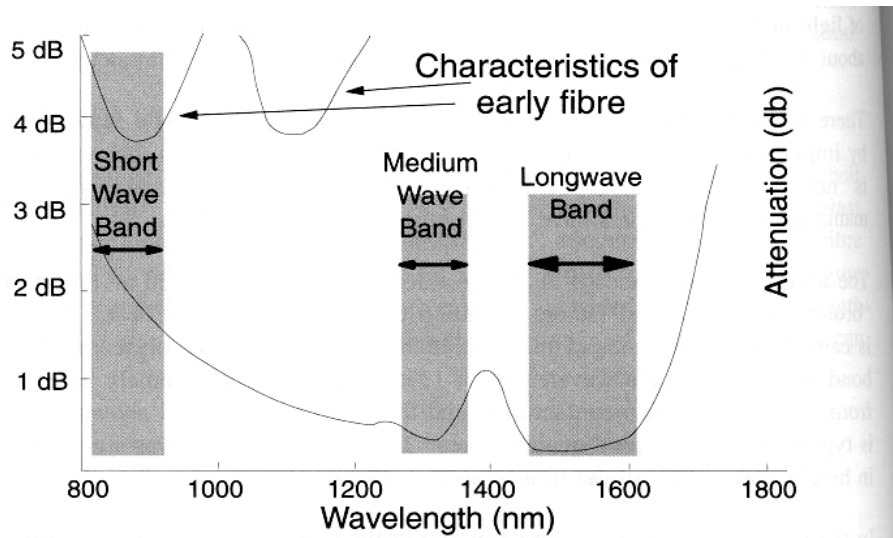
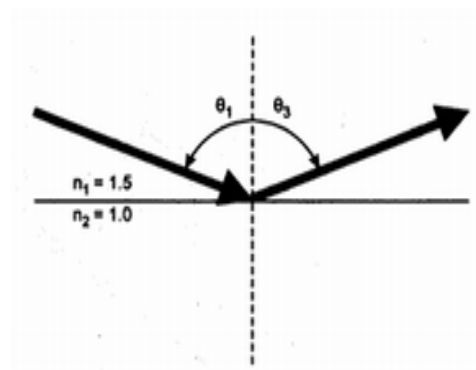


Figure 14. Transmission Windows. The upper curve shows the absorption characteristics of fibre in the 1970s. The lower one is for modern fibre.

2. Оптични влакна

- процеси и закони на геометричната оптика

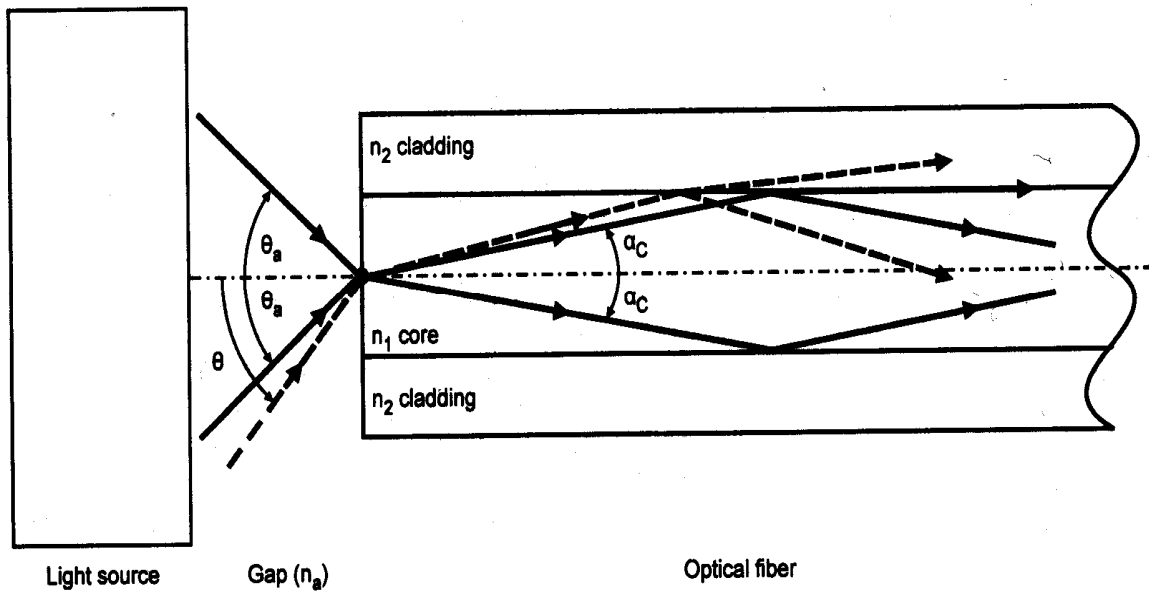
- **Пълно вътрешно отражение**- може а се прояви само на границата м/у две оптични среди, когато лъчът се разпространява от оптично по-плътната към оптично по- малко плътната среда



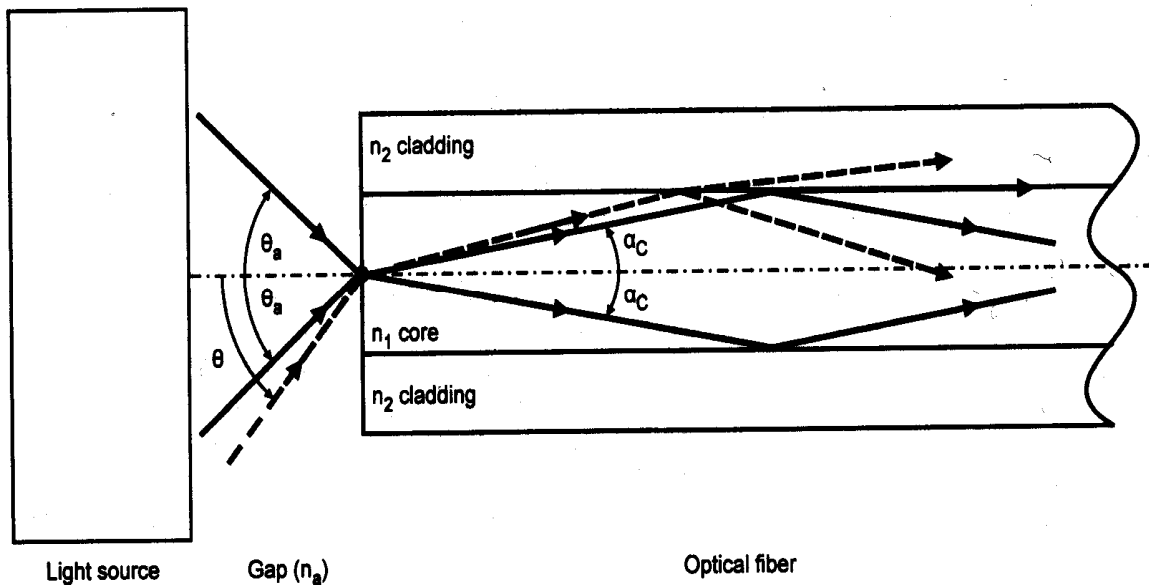
- **Пречупване** – когато един оптичен лъч попадне под ъгъл θ_1 от среда с по-малка плътност n_1 на границата със среда с по-голяма плътност n_2 , той претърпява пречупване и навлиза във втората среда под ъгъл θ_2

Закон на Снелиус $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

!!!! Въвеждане на светлината в оптичното влакно



Ъгъл на приемане на светлината Acceptance Angle



Ъгълът на приемане (α_a) е най-големия ъгъл на падане на светлинния лъч спрямо оста на влакното, който позволява задържането и разпространяването на лъча в ядрото на оптичното влакно.

Числената апертура (NA) е $\sin(\alpha_a)$ и се дефинира аналогично на тази при лещите. Тя показва възможността на оптичното влакно да приема светлина и зависи само от двата коефициента на пречупване на ядрото и оптичната обвивка.

$$NA = \sin \Theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Примерни характеристики на оптично влакно $n_1=1.4504$, $n_2=1.4447$

Числена апертура (Numerical Aperture) NA = 0.13

Ъгъл на въвеждане 7.35 градуса

3.!!!!!!! Основни видове оптични влакна

По материала на оптичното влакно:

- **Стъклени влакна (ядро и обвивка)**, направени от изключително чисто кварцово стъкло. Най-качествени оптични влакна.
- **Стъклени влакна с пластмасова обвивка и стъклено ядро**. Имат по-лоши характеристики, но са напълно приемливи за области с невисоки експлоатационни изисквания.
- **Пластмасови влакна (ядро и обвивка)**. Имат най-ниски качествени показатели и практически не се използват за телекомуникации.

По профилът на коефициента на пречупване на оптичното влакно:

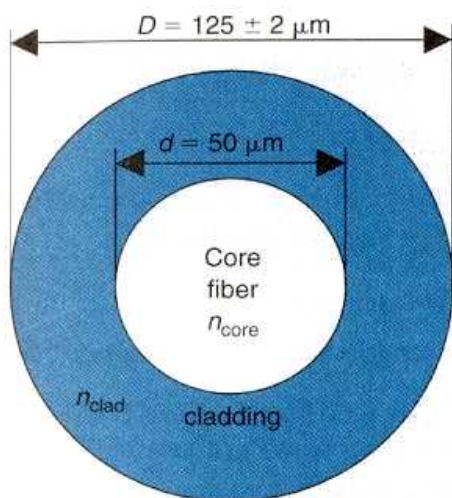
- **Влакна със стъпален профил (Step Index)**
- **Влакна с градиентен профил (Graded Index)**

* ***профилът на коефициента на пречупване на оптичното влакно отразява съотношението между коефициентите на пречупване на ядрото и оптичната обвивка***

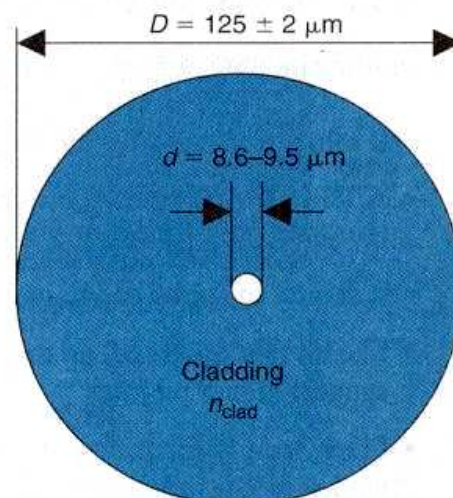
По броя на модите в оптичното влакно:

- **Многомодови влакна (Multimode fiber):** имат по-голямо ядро (в повечето случаи 62.5 и 50 μm) и поради това в тях се разпространяват много светлинни лъчи (моди)
- **Едномодови влакна (Singlemode fiber):** имат много малко ядро около 9 μm и поради това в тях лъчите имат само един път на разпространение (една мода) по оста на влакното
- В геометричната оптика, **понятието мода** определя пътя (траекторията) на разпространение на светлинните лъчи в оптичното влакно. Броят на модите във влакната се колебае от 1 до 100000

√A



Multimode fiber:
many directional rays (modes)
may propagate



Single-mode fiber:
one directional ray (mode) due
to small ratio D/d propagates.

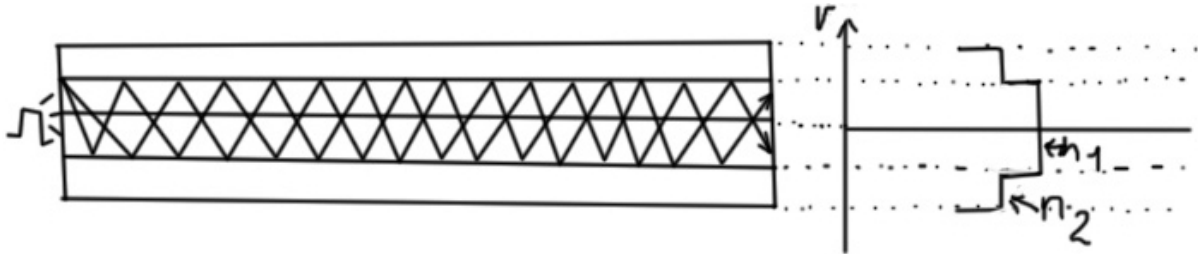
Многомодови оптични влакна със стъпален профил

Multimode fibers-step index

- **Влакна с по-големи диаметри на ядрото:** 50 ,100 , 200 μm и др
- **ядрото и оптичната обвивката са от чист кварц.**
- **Ядрото е легирано с германий** за увеличаване коефициента на пречупване
- Типична разлика в коефициентите на пречупване на ядро/обвивка 0.3-1.0%
- Рязка (стъпална) промяна в коефициента на пречупване на границата стъкло-оптична обвивка
- **Светлината се разпространява в ядрото чрез пълно вътрешно отражение**

- Големи стойности на модовата дисперсия и в резултат практически не се използват за телекомуникации

Разпространение на светлината в оптично влакно със стъпален профил



c - скорост на светлината във вакуум/въздух 300000 km/s

Ядрото е еднородно ($n = \text{const}$) и светлинните лъчи (модите) имат еднакви скорости на разпространение в него.

Светлинните лъчи обаче се движат по различни траектории и пристигат по различно време на края на влакното. В резултат, всеки импулс подаден на входа на в. $V = \frac{c}{n}$ да се разширява.

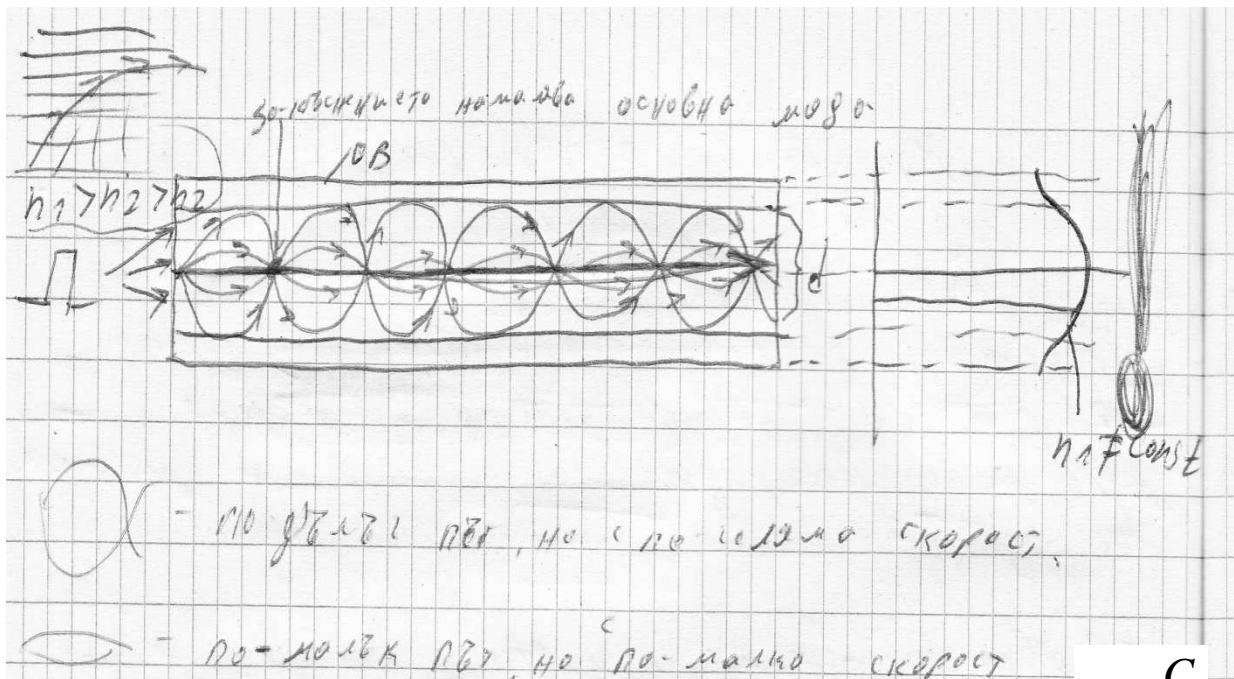
4. Модова дисперсия Mode dispersion

- Модова дисперсия се нарича разширението на светлинните импулси на изхода на оптичното влакно, което се дължи на наличието на много траектории (моди) във влакното.
- Дисперсията расте с увеличаване на дистанцията и затова се специфицира за единица разстояние. Типични стойности на дисперсията за влакна със стъпален профил е 15 до 30 ns/km.
- Модовата дисперсия е крайно нежелателна тъй като ограничава пропусканата от оптичните влакна честотна лента и информационния капацитет на кабела (битовата скорост трябва да е достатъчно ниска, за да се избегне припокриване на импулсите на изхода на линията).

Многомодови оптични влакна с градиентен профил
Multimode fibers-graded index

- Градиентни влакна с диаметри на ядрото **62.5 μm** са най-популярни и широко използвани. По-рядко влакна с 50 μm размер на ядрото.
- Плавно изменение в коефициента на пречупване на влакното от центъра, където има максимална стойност, към периферията-минимална стойност.
- Светлината се разпространява в ядрото чрез пречупване.
- Минимизират модовата дисперсия (**1-5ns/km**), в сравнение с многомодовите влакна със стъпален профил, но при големи разстояния тя все пак е значителна.
- Лесни за свързване (сплайсване) и въвеждане на светлината в тях.
- Използват се главно на по-къси разстояния в локалните мрежи LAN (със светодиоди LED за по-ниски скорости или лазери LD за високи скорости Gbit/s) при дължини на вълните 850 и 1300 nm

Разпространение на светлината в оптично влакно с градиентен профил



C - скорост на светлината във вакуум/въздух 300000 km/s

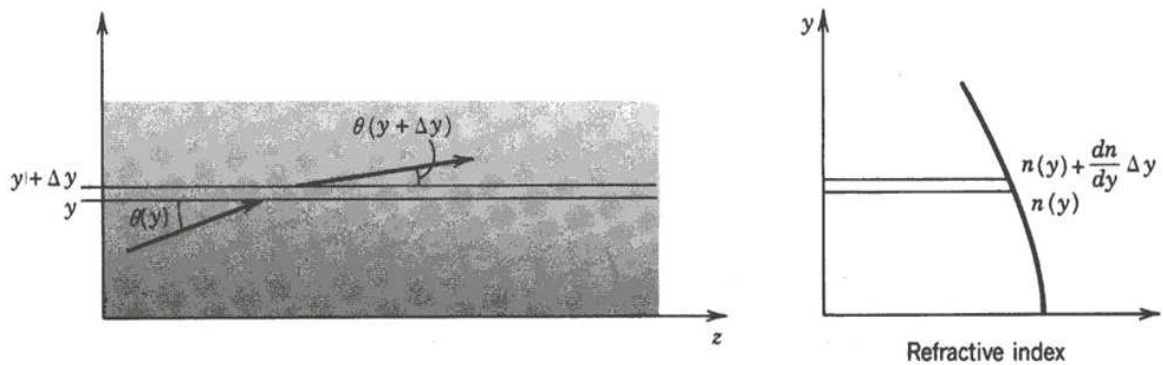
$$V = \frac{C}{n}$$

Ядрото не е еднородно ($n \neq \text{const}$). Състои се от голям брой концентрични слоеве, като с отдалечаване от централната ос на влакното коефициента на пречупване на всеки слой намалява.

Светлинните лъчи се движат по-бързо в среда с по-малък коефициент на пречупване и обратно. Колкото траекторията на лъча е по-отдалечена от центъра толкова светлината се движи с по-голяма скорост.

Настъпва изравняване във времената на разпространение на лъчите и те пристигат на изхода на влакното почти по едно и също време. В резултат модовата дисперсия е силно ограничена (1 ns/km и по-малко)

Разпространение на светлинен лъч в градиентно влакно:



Светлинния лъч се пречупва на всеки следващ слой от центъра, който има по-малък коефициент на пречупване n. Траекторията на лъча прилича на синусоида.

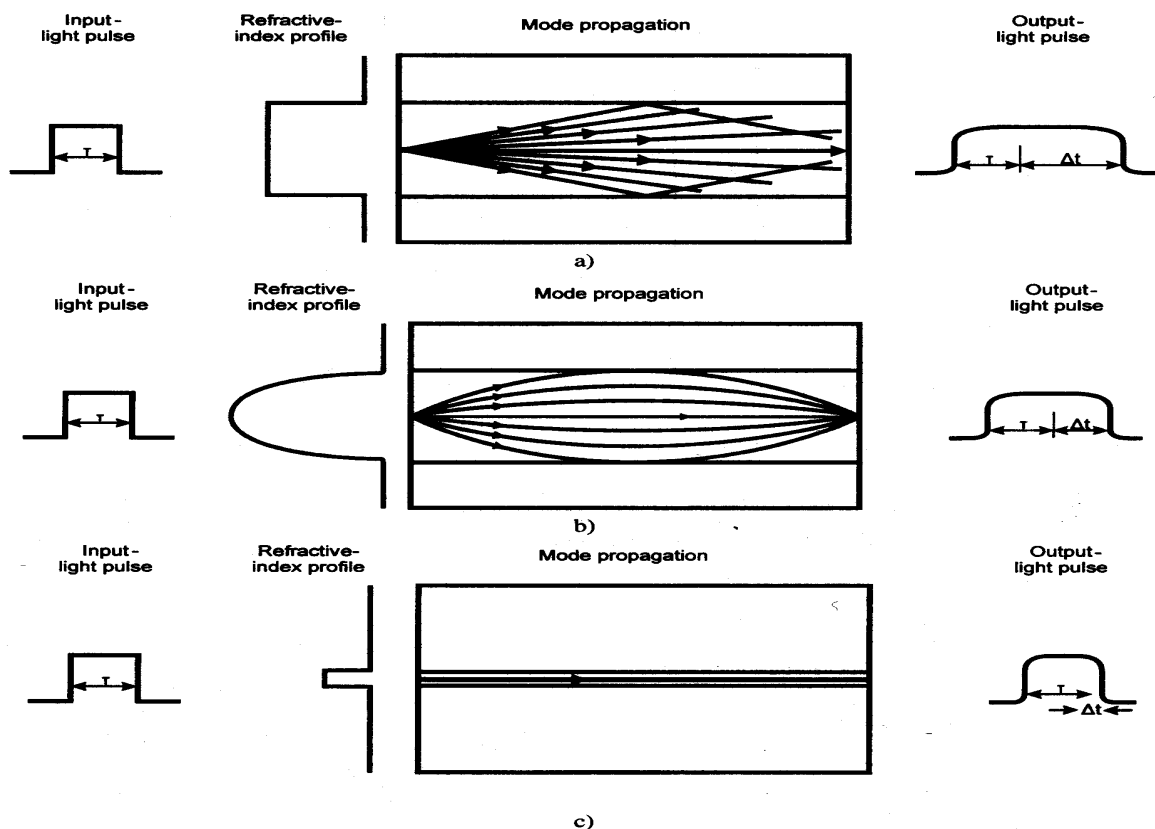
Модова дисперсия при влакна със стъпален профил на коефициента на пречупване и при влакна с градиентен профил

$$\Delta t_{SI} = \frac{L(NA)^2}{2cn_{CO}} \quad \Delta t_{GI} = \frac{L(NA)^4}{8cn_{CO}^3}$$

- *Дисперсията (Δt) се оценява с изменението на дължината на импулса и се измерва в ps/km

- **Много производители не специфицират дисперсията в ps/km а вместо това посочват произведението от честотната лента на пропускане на влакното и разстоянието MHz.km
- *** SI – step index, GI – graded index, co – core, L- distance (km)

Модова дисперсия при различни видове оптични влакна :



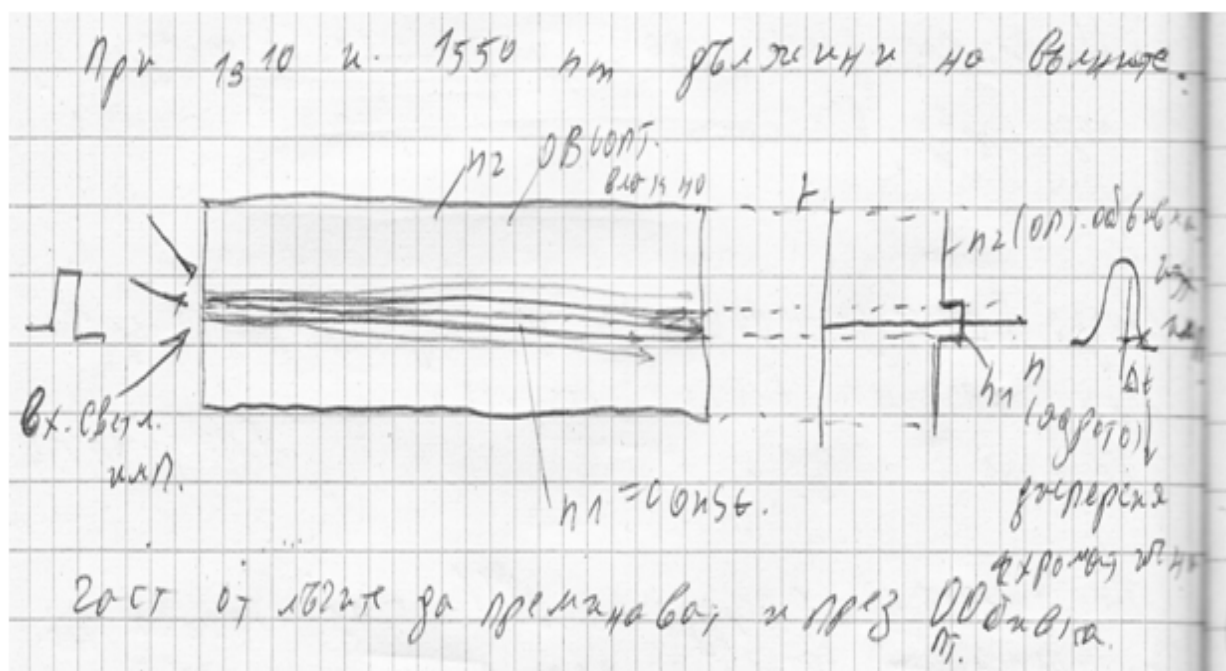
Отсъства модова дисперсия при едномодови оптични влакна . Намалява се дисперсията за да има само една мода през влакното

Едномодови оптични влакна Single mode fibers

Изключително малък размер на ядрото (8 -10 μm) с цел осигуряване на само един път на разпространение на лъчите в тях (една мода) - по оста на влакното. Така модовата дисперсия е напълно изключена.

Имат ограничения от хроматична дисперсия

- По-трудни за свързване (сплайсване) поради малките размери на ядрото
- По-трудни за въвеждане на оптичната енергия в тях. Светлината се разпространява едновременно в ядрото и частично в обвивката
- Използват полупроводникови лазери за светлинни източници LD при 1300 and 1550 nm дължини на вълните
- Подходящи за пренасяне на модулирани сигнали до 40 Gb/s и до 200 km без усилване.
- Големите разстояния и високите скорости ≥ 10 Gbps водят до проблеми вследствие нелинейни ефекти във влакното
- Температурата на влакното при големи разстояния и високи скорости > 10 Gbps става значителна.
- Най-качествените влакна по отношение на затихване на сигналите и информационните скорости
 - за изграждане на дълги главни магистрални



- Диаметър на ядрото от 8 до 10 μm
- Стъпален профил на коефициента на пречупване
- Разпространение само на една мода

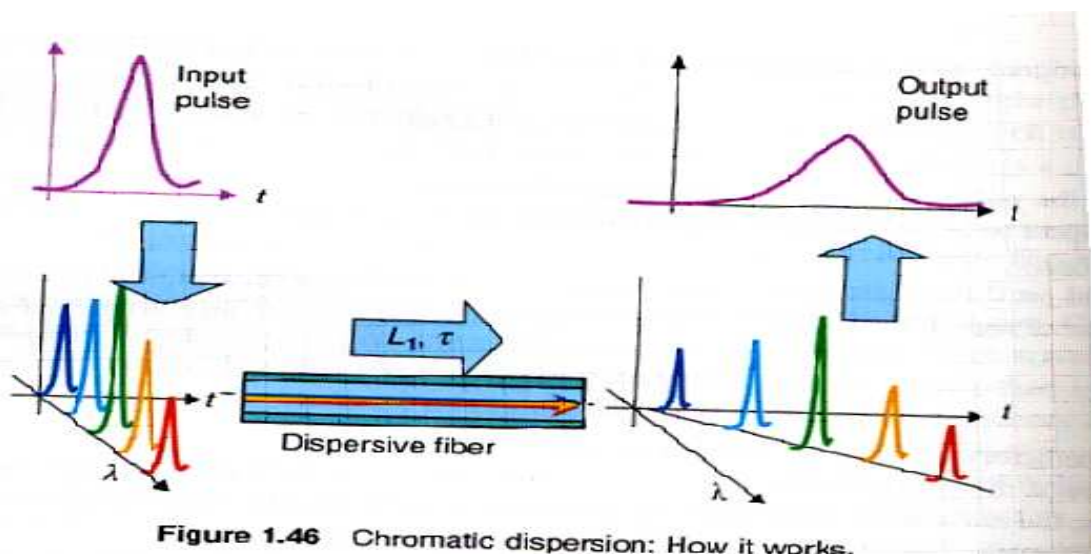
* **Едномодов режим** на работа е възможен само когато дължината на светлинната вълна е съизмерима с размера на ядрото и това става при $\lambda = 1300 \text{ nm}$ (1.3 μm)

Отсъства модова дисперсия. Има само хроматична

Ако размерът на ядрото не е съизмерим се получава модова дисперсия

Хроматична дисперсия

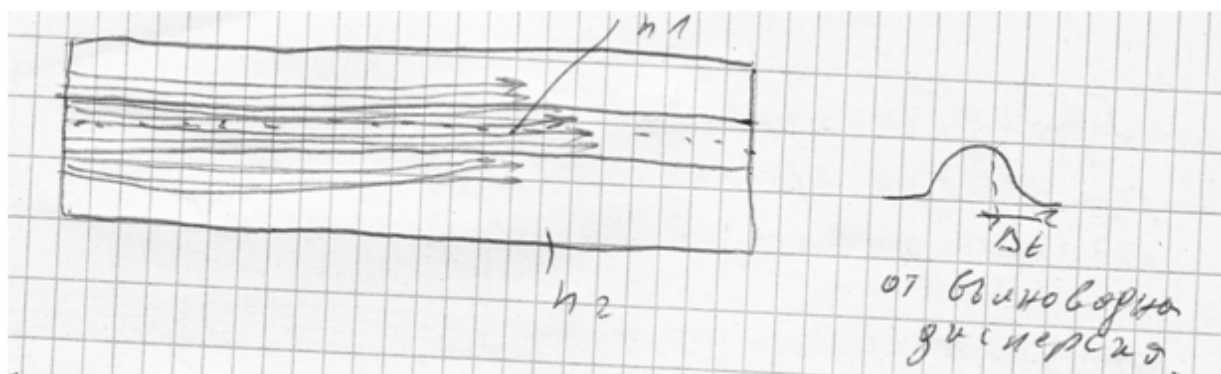
Chromatic dispersion



- **Скоростта на светлината в хомогенна среда** (например стъкло) зависи от дължината на вълната λ
- **Различните спектрални компоненти** на светлинния импулс преминават с различна скорост по оптичното влакно
- **Нарича се още дисперсия на груповата скорост** (*group-velocity-dispersion GVD*),

Състои се от:

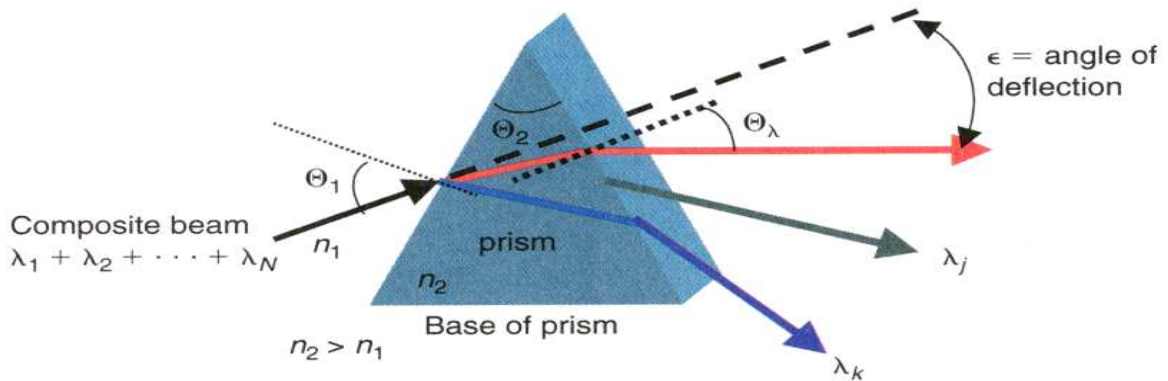
- **Материална дисперсия:** зависи от свойствата на материала т.е. от коефициента на пречупване. Спектралните компоненти (вълните с различни дължини) имат различна скорост на движение във влакното
- **Вълноводна дисперсия:** светлинната енергия се разпространява в ядрото и частично в оптичната обвивка. Разликата в коефициентите на пречупване на ядрото и обвивката води до различно разпределение на светлинната мощност в зависимост от дължината на вълната



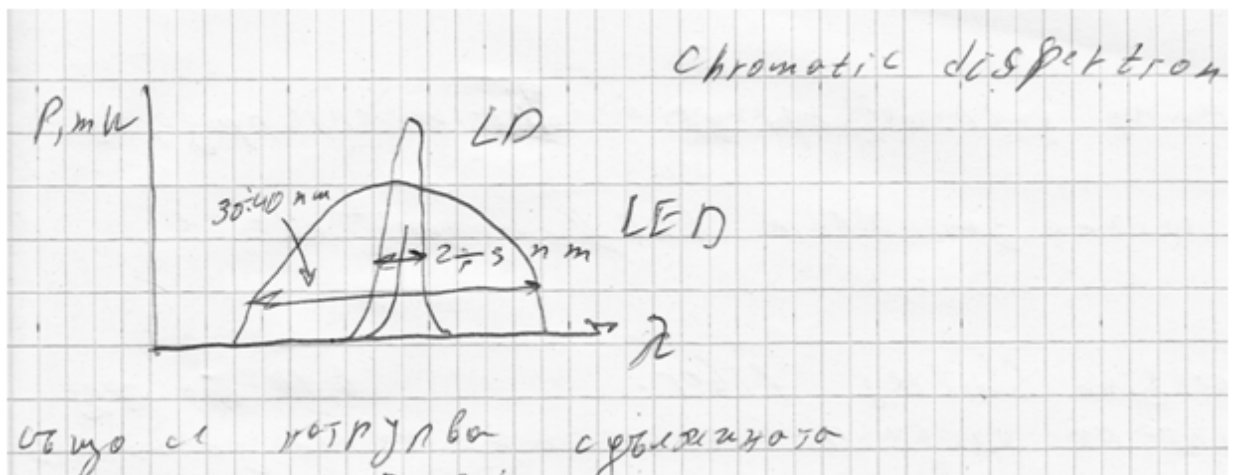
Пример за материална дисперсия

- Поява на дъга от цветове: Ъгълът на пречупване зависи от дължината на вълната;
- Използва се в оптичните мултиплексори и демултиплексори

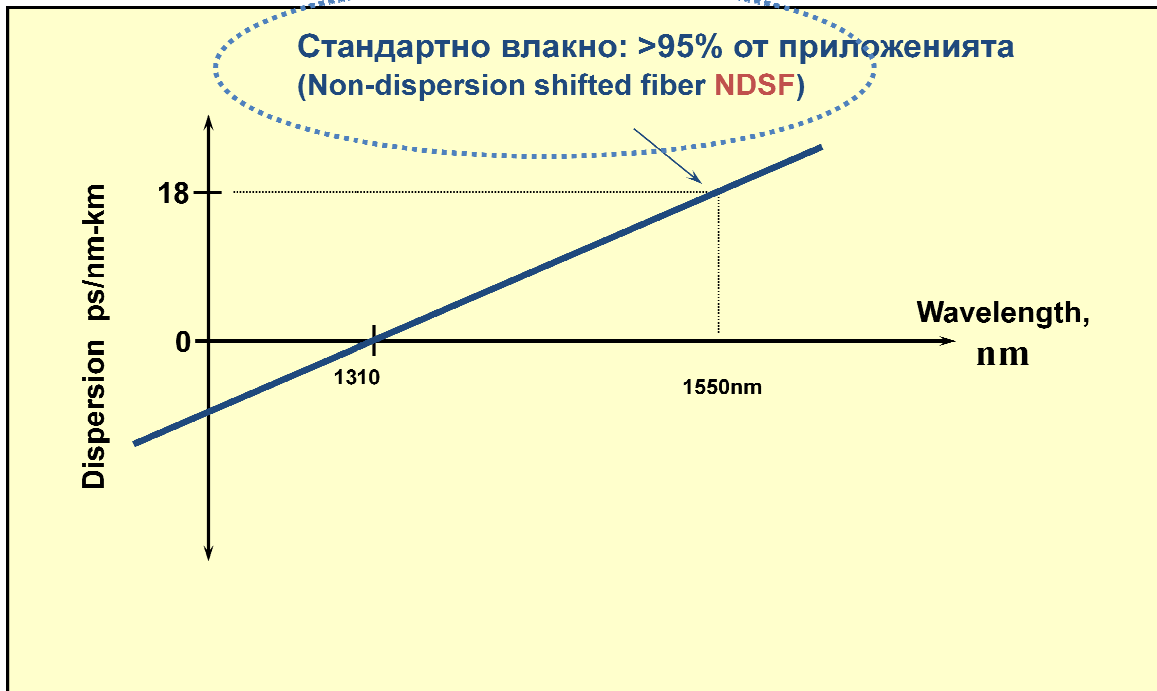
Коефициент на пречупване = скорост на светлината в вакуум / скорост на светлината в материал



- Хроматичната дисперсия е важна за едномодовите влакна
- Зависи от използвания източник на светлина (LED или LD) и централната работна дължина на вълната (850, 1300 или 1550 nm)
- Влошаването на параметрите на влакното расте с квадрата на скоростта на оптичния сигнал
- Дисперсията не е от значение за скорости < 2.5Gbps, разстояния < 500km, едномодови влакна (SMF fibers)
- Зависи от работна дължина на вълната (850, 1300 или 1550 nm)



Хроматична дисперсия (продължение)



7, 10 Светлинни източници и детектори

Light Sources and Detectors

- ▶ **Светлинните източници (Light Sources)** са устройства, които преобразуват електрическите сигнали в оптични сигнали
 - В оптичните комуникации се използват полупроводникови източници на светлина: светодиоди LED и лазери LD
- ▶ **Детекторите на светлина (Photodetectors)** са устройства, които преобразуват оптични сигнали в електрически сигнали
 - В оптичните комуникации се използват полупроводникови детектори на светлина: PIN – фотодиоди и лавинни фотодиоди

Светодиоди LED Light Emitting Diodes

Светоизлъчващи полупроводници Light-Emitting Semiconductors

- ▶ Полупроводниковите прибори (LED, LD) са дву-, три- и четириелементни. Работната дължина на вълната се получава чрез изменение на пропорциите на атомите в кристалната решетка
- ▶ Повечето LED, използвани за дисплеи са направени от Gallium Arsenide Phosphide (GaAsP) и Gallium Phosphide (GaP)
 - ▶ GaP излъчва зелена светлина и може да емитира червена светлина
 - ▶ GaAsP емитира от червена светлина до кехлибар в зависимост от концентрацията на фосфора

LED за оптични влакна, използват полупроводници , които излъчват инфрачервена

LED – оптичен спектър

- P — Изходна оптична мощност (Output Optical Power)
- λ — дължина на вълната (wavelength)
- I — Ел. Ток на входа (Input Electrical Current)
-

$$P = \frac{1.24}{\lambda} I$$

Лазерни диоди Laser Diodes

- ▶ Лазерните диоди LD са LED със специална оптична система за създаване на положителна обратна връзка и предизвикване на стимулирана емисия в дадена посока
- ▶ Лазерът работи с по-висока първоначална енергия за атомите, в сравнение с LED.
- ▶ Светлината от лазера е :
 - ▶ **монохроматична**: около една дължина на вълната (честота)
 - ▶ **кохерентна**: всички фотони са синхронизирани помежду си
- ▶ нормалната светлина от LED или електрическа крушка е:
 - ▶ **полихроматична**: спектър от дължини на вълните и честоти
 - ▶ **некохерентна**: вълните не са синхронизирани помежду си
- ▶ Лазерните диоди LD са полупроводникови устройства , които емитират добре насочена, монохроматична, кохерентна светлина

9. Фотодетектори Photodetectors

- ▶ В основата на фотодетектора е полупроводник **p-n** тип, който преобразува светлина в ток чрез прилагане на напрежение в обратна посока
 - Електроните се насочват от **n**-зоната към положителния полюс на източника
 - Дупките, обратно се насочват към отрицателния полюс на източника
 - **p-n** прехода се разширява, няма свободни токоносители и съпротивителния му потенциал расте
- ▶ Не протича ток през **p-n** прехода на полупроводника

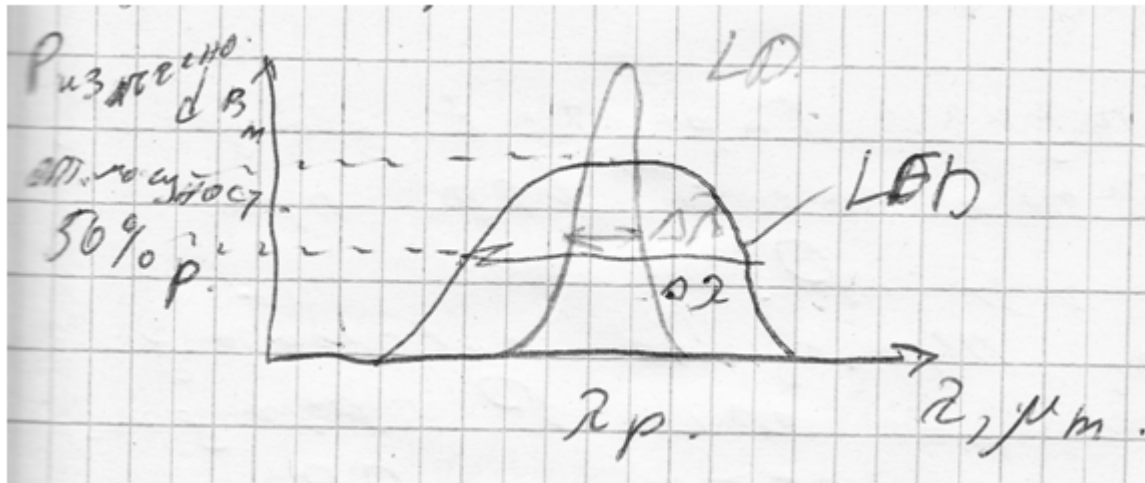
Как работи фотодиода ?

How does a Photodiode work?

- ▶ Поглъщането на падащи фотони светлина върху **p-n** прехода води до създаване на възбудени електрони, преминаващи от валентната зона в зоната на проводимостта.
- ▶ Протича ток във външната верига на диода
- ▶ При спиране на светлинния поток, бедният на токоносителни р-n преход се възстановява и съпротивлението на прехода става отново голямо.
- ▶ Прекратява се протичането на ток във външната верига на диода

8. !!!!!!!!!!!!! Светодиоди LED и лазери LD за оптични комуникации

- ▶ **Най-важните характеристики на електро-оптичните преобразуватели LED и LD за оптичните комуникации са:**
 - **Дължината на вълната на излъчената светлина λ и диаграмата на излъчване, свързана с числената апертура NA**
 - ▶ Източниците на светлина, използвани за оптични комуникации, трябва да излъчват в един от оптичните прозорци на влакното и да имат по-тясна диаграма на излъчване, за да се осигури добро въвеждане на светлината в оптичното влакно
 - **Ширина на спектъра на излъчване $\Delta \lambda$. Определя се при 50% ниво на мощността относно максимума λ при централната работна λ**
- Спектралната ширина е критичен параметър при високоскоростните, дълги едномодови оптични системи. Наличието на хроматична дисперсия ограничава скоростта на предаване при тях
- Спектралната ширина на LED е десетки nm, докато при LD е от 2-5 nm



- **!!!!!!! Коефициент на преобразуване на електро-оптичния преобразувател показва квантовата му ефективност при работа.** Определя се като отношение на излъчената оптична мощност към електрическия ток на входа (ват-амперна характеристика):

$$k = \frac{P}{I}, w/A$$

- **Бързодействие.** Скоростта на включване и изключване на източника трябва да бъде достатъчно висока, за да удовлетворява работната честотна лента BW (Band Width) на предаване на оптичните комуникационни системи. Определя се с времето за нарастване и спадане на сигнала (импулса) t

$$BW = \frac{0.35}{t}, ns$$

- **Продължителност на експлоатация.** Гарантираното време на работа се измерва в милиони часове. Определя при ниво 50% намаляване на изходната мощност
 - ▶ . След известен период на експлоатация се наблюдава спадане на оптичната мощност поради дефекти в кристалната структура на полупроводника. Например, LED с първоначална изходна мощност 1mW, приключва службата си при ниво на мощността 500μW
- **Надеждност, простота на конструкцията, размери, цена**

Светодиод с един p-n преход

p-n Junction LED

- ▶ Имат широка диаграма на излъчване и малка интензивност на светлинния поток
 - Токоносителите съществуват и рекомбинират в сравнително голяма област и създадените фотони имат разнообразни посоки
- ▶ Не са подходящи за използване с оптични влакна поради големи загуби при въвеждане на светлината във влакното
- ▶

Светодиоди с хетеропреходи

Heterojunction LED

- ▶ Те са с по-тясна диаграма на излъчване и с по-добро въвеждане на светлинната мощност във оптичните влакна
 - Рекомбинацията на токоносителите и излъчването на светлината става в един добре дефиниран активен слой Структурират се от много p-тип или n-тип слоеве от полупроводници
- ▶ Хетеропреход (Heterojunction): преход между два полупроводника с различни забранени енергийни зони (bandgap)
 - Токоносителите се насочват към по-тясната енергийна зона (ограничава се областта на рекомбинацията им)

Лазерни диоди LD

- ▶ Лазерът (laser) е устройство, което генерира много силен, концентриран, кохерентен сноп светлина
- ▶ Състои се от енергиен източник, приложен към материал, който емитира светлина и който може да бъде газ, твърд или полупроводников материал.
- ▶ Светлината, получена от емитирация материал се усилва като се използва специална структура (кухина) наречена резонатор на Фабри - Перо (Fabry-Perot resonator cavity).

- ▶ Резонаторът се състои от две паралелни отразяващи плоски огледала, известни като фасети (шлифовани стени на кристал).
- ▶ Огледалата се използват да създадат оптична обратна връзка (optical feedback), която кара кухината да осцилира и да компенсира всякакви оптични загуби.
- ▶ Част от светлината, попаднала на дясната фасета, напуска кухината а част се отразява от нея.
- ▶ Част от отразената светлина се отразява от лявата фасета и се връща обратно към дясната и така се наблюдават многократни отражения на светлината вътре в резонатора
- ▶ При дължина на вълната (wavelength), за която размерът на кухината (разстоянието между двете огледала) е интеграл кратен на половината ѝ дължина
 - всички светлинни вълни, преминали през дясната фасета (facet) са във фаза. Тази дължина на вълната се нарича резонансна вълна на кухината (*resonant wavelength of the cavity*).
 - Тъй като има много резонансни вълни, резултата е много вълни на изхода на лазера
- ▶ Желателно е лазерът да генерира само една дължина на вълната. За целта се използват:
 - Филтриращ механизъм за селекция на желаната дължина на вълната
 - Втори резонатор (кухина) след първия, където настъпва усилване на определена вълна (лазерът осцилира само при тези вълни, които са резонансни и за двата резонатора (кухини).
- ▶ **Регулируеми лазери (Tunable lasers)**
 - Много по-удобно отколкото да се произвеждат различни лазери за специфични дължини на вълните.
 - Съществуват различни видове tunable lasers в зависимост от настройката им: с бавна настройка (slow tunability) и бърза настройка (fast tunability)
- ▶ **Лазерните диоди** имат конструкция подобна на светодиодите. Те са странично излъчващи (Edge LED) или повърхностно излъчващи (Surface LED)
- ▶ **Лазерите със странично излъчване, тип-Фабри-Перо**, имат област на усилване на светлината, затворена в оптичния вълновод образуван от двете полирани успоредни стени на кристала. Коефициентът на отражение на предната и задната повърхност на диода и геометрията на оптичния вълновод определят основните свойства на тези лазери
 - При широк вълновод, в сравнение с дължината на вълната, в лазера се формират много надлъжни моди MLM (Multi longitudinal mode) и изходния светлинен поток

няма тясна диаграма на излъчване. Типична дължина на оптичния резонатор е около 100 μm и височина около-2 μm

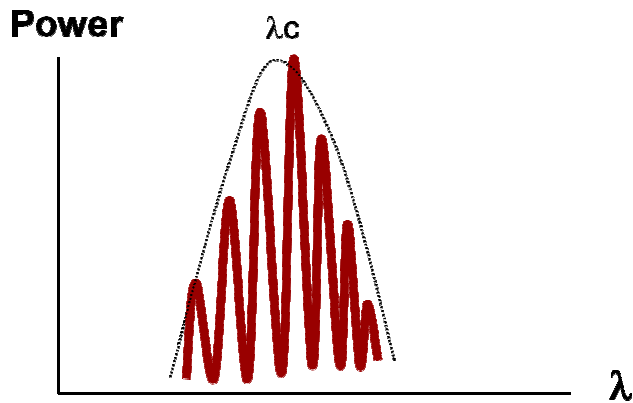
- В допълнение, светлината се отразява и от хетеропреходите чрез по-високия коефициент на пречупване на активния слой
- ▶ Лазерите с повърхностно излъчване VCSEL (Vertical cavity surface emitting lasers) имат оптически резонатор във вертикална посока (по посоката на електрическия ток)
- ▶ Дължината на активната област е твърде къса в сравнение с конвенционалните лазери със странично излъчване
- ▶ Отражателите в краищата на оптичния резонатор са диелектрични огледала, направени от слоеве с изменящи се коефициенти на пречупване
- ▶ Осигуряват висока избирателност по отношение на изискваната работна дължина на вълната на лазера – едномодово излъчване SLM (Single longitudinal mode) с тясна диаграма
- ▶ Практическо приложение при Sonet/ SDH технологията и мултиплексиране на оптичното влакно по дължина на светлинната вълна -DWDM технология
- ▶ Висока изходна мощност (1-10 mW при стандартни оптични връзки)

Лазери с разпределена обратна връзка DFBL

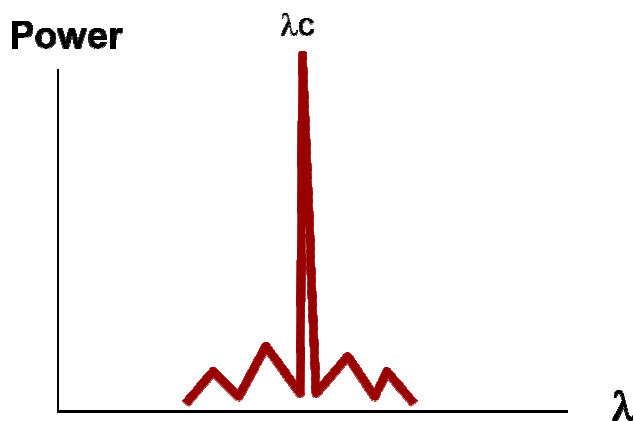
Distributed Feedback Lasers

- ▶ DFML са лазери за постигане на едномодово излъчване SLM (Single longitudinal mode) и изключително тясна диаграма на излъчване
- ▶ Активната зона е с периодично изменящ се коефициент на пречупване по дължина на резонансната област (решетка)
 - Образуват се многократни отражения, които подтискат модите несъвпадащи с периодичността на решетката и се достига до едномодов режим

Характеристики на LD Laser Characteristics



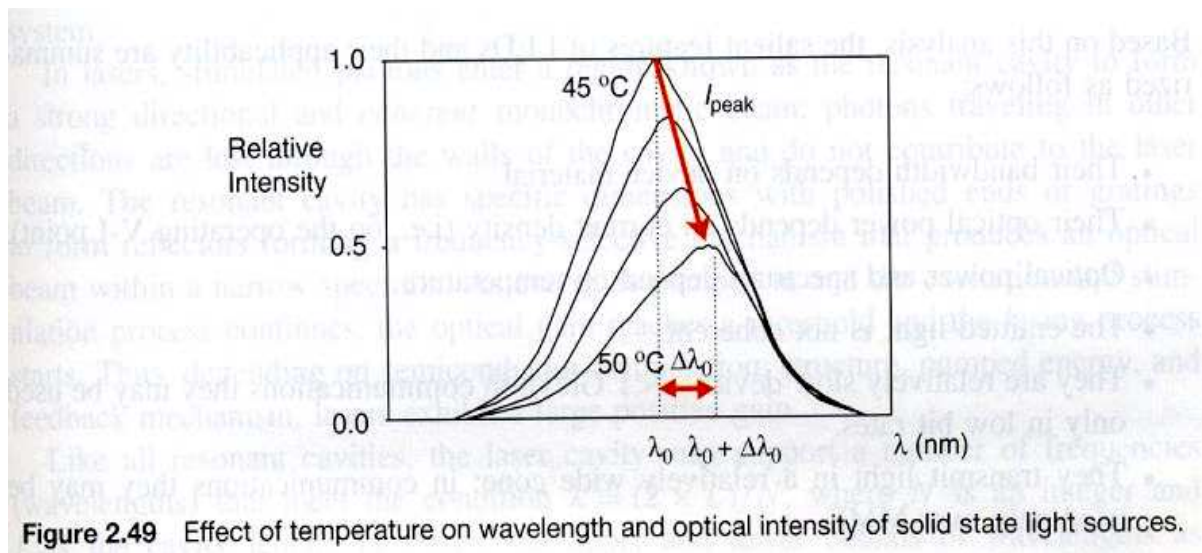
- Широко спектър на излъчване (5-8 nm)
- Нестабилна централна дължина на вълната
- По-евтин



- Доминираща линия на излъчване
- Стабилен контрол върху дължината на излъчваната вълна

Влияние на температурата върху λ и оптичката интензивност I

- Увеличаване на температурата води до понижаване на излъчената оптична мощност от лазера
- Дължината на вълната λ също се изменя с изменение на температурата
- LD изискват стабилно поддържане на изходната мощност в даден температурен диапазон чрез специална обратна връзка за регулиране силата на управляващия ток



10. Фотодетектори

PIN и APD фотодиоди за оптични комуникации

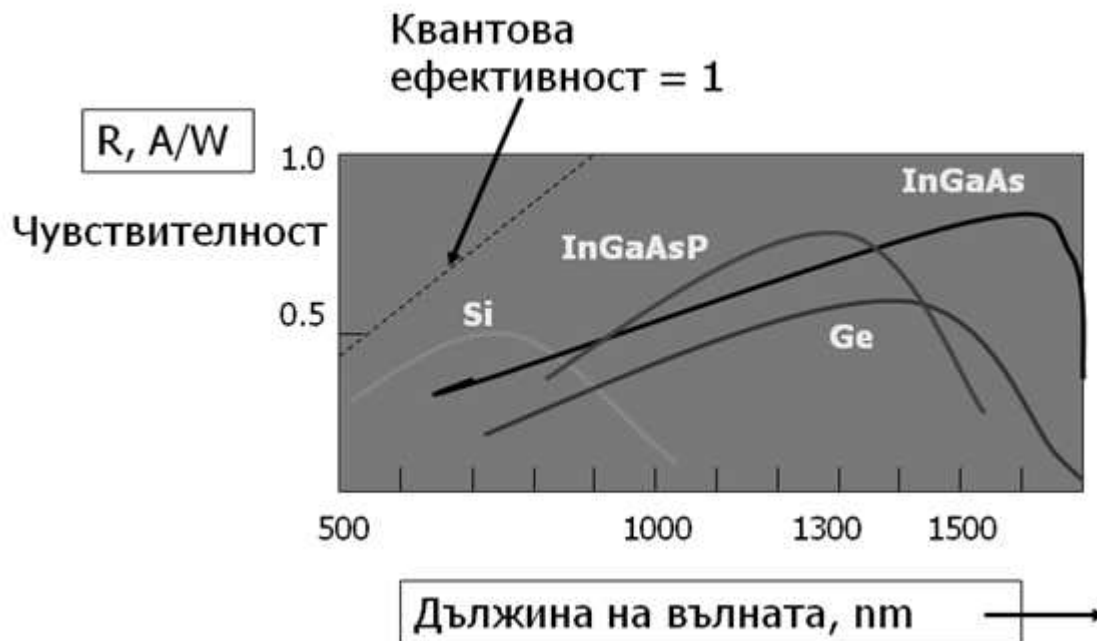
- ▶ Най-важните характеристики на опто-електронните преобразуватели PIN и APD фотодиоди за оптичните комуникации са:
 - Чувствителност на фотодетектора (Responsivity): нивото на минималния сигнал, който приемната страна е в състояние да приеме и обработи с определена достоверност. Определя се от отношението на тока на изхода към падащия върху диода светлинен поток:

$$R = \frac{I}{P}, A/W$$

Чувствителността е различна при различните полупроводникови материали и се изменя в зависимост от дължината на вълната λ . Специфицира се или за λ , за която е максимална или за λ представляваща интерес (оптичен прозорец)

- ▶ Фотодиод тип PIN на основата на InGaAs има широка област на висока чувствителност
- ▶ В диапазона от 900 до 1650 nm чувствителността на InGaAs не пада под 0.5 A/W и се използва за

$\lambda=1300\text{ nm}$ и $\lambda=1550\text{ nm}$



- !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! Квантова ефективност: отношението на броя на първичните електрон – дупка към броя на падащите върху диода фотони

- Квантовата ефективност е свързана с основните свойства на полупроводниковия материал и способността му да трансформира погълнатите фотони в двойки заряди електрон-дупка
- Квантова ефективност 1 или 100% означава, че всеки погълнат фотон води до образуване на електрон-дупка. Типични стойности са 70% (7 двойки електрон-дупка при поглъщане на 10 фотона)
- Квантовата ефективност се отнася само до първичните електрони, а не до вторичните електрони, получени от ударната йонизация при фотодиоди тип APD
 - Ток на тъмно (Dark Current): ток, който възниква в резултат на топлинни ефекти (фотодетекторите не са идеални прибори)
- Минималната детектирана мощност от фотодиода зависи от нивото на мощността на тока на тъмно
- Токът на тъмно расте с увеличаване на приложеното напрежение
- Токът на тъмно е силно температурно зависим

- **Бързодействие:** времето за преобразуване на оптичния сигнал на входа на фотодиода в електричен ток на изхода му.
- **Бързодействието, по аналогия със светлинните източници,** се оценява с времето за нарастване или спадане на сигнала между точки отговарящи на 10% и 90% от максималната му амплитуда
- **Зависи от приложеното обратно напрежение върху диода:** по-високи нива на напрежение отговарят на по-малко време на нарастване на импулса
- **Времето за нарастване или спадане на сигнала определя честотната лента на пропускане на диода:**

$$BW = \frac{0.35}{t_{нар}}$$

- **Приложено напрежение:** от 5 V при PIN фотодиодите до няколко стотин волта при лавинните APD диоди
 - ▶ Високите напрежения при APD диоди, отговарящи на прага на лавинния процес, осигуряват голямото им бързодействие в сравнение с PIN фотодиодите

PIN фотодиод

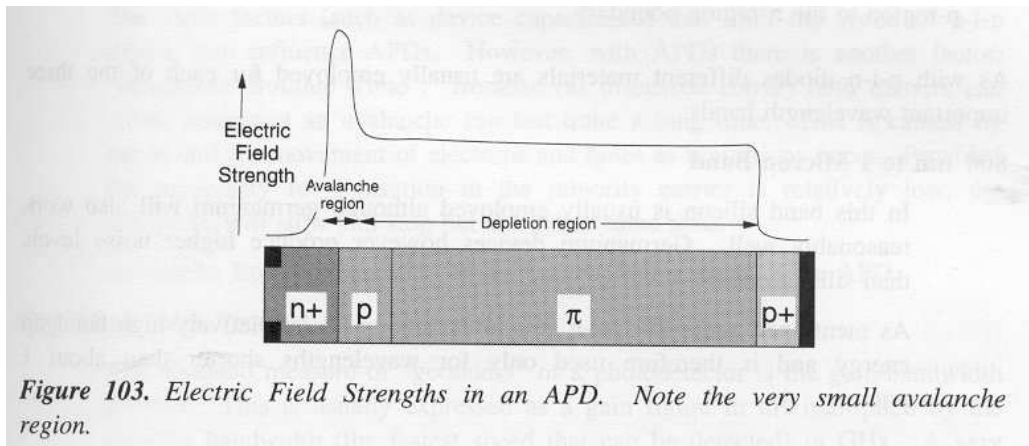
PIN Photodiode

- ▶ **PN - фотодиодът** е прост тип устройство, с ограничено приложение, резултат от ниската му квантова ефективност. Обеднената на токоносителите зона е малка част от общия обем на диода и голям брой от погълнатите фотони не водят до генерация на ток във външната верига. Диода е непригоден за средни и високи скорости
- ▶ **PIN - фотодиодът** подобрява квантовата ефективност, като използва широка, бедна на токоносителите I област. Между полупроводници тип **p** и **n** се включва слабо легиран **I (intrinsic)** полупроводник
 - **p** и **n** областите са прозрачни (transparent) към желаната λ (те са чувствителни в друг вълнов обхват)
 - Например, за InP горната граница на чувствителността е 0.92 nm (прозрачен в обхвата 1.3-1.6 nm), за InGaAs горната граница на чувствителността е 1.65nm
- ▶ При фотодетекторите, в оптичните комуникационни системи, се прави баланс между два фактора: квантова ефективност и бързодействие. По-широка чувствителна област I на диода осигурява по-добра квантова ефективност, но по-ниска скорост на предаване на данните и обратно

Лавинен фотодиод APD Avalanche Photodiode

- ▶ APD по конструкция приличат на обикновените диоди, но работят с високи обратни напрежения, близки до напреженията на пробив, които предизвикват ударна йонизация. Процесът е лавинен “avalanche multiplication”
- **Интензивното електрическо поле** ускорява в значителна степен генерираните от фотоните токоносители, наричани *първоначални токоносители*.
- **Придобилите висока кинетична енергия електрони**, при сблъсък с неутралните атоми отдават енергия достатъчна да прехвърли електрони от валентната зона в зоната на проводимостта, наричани *вторични токоносители*
- **Лавинен процес**, при който един фотон създава много електрони и резултата е усилване на тока във външната верига

Интензивност на електрическото поле в APD Electric Field Strengths in APD

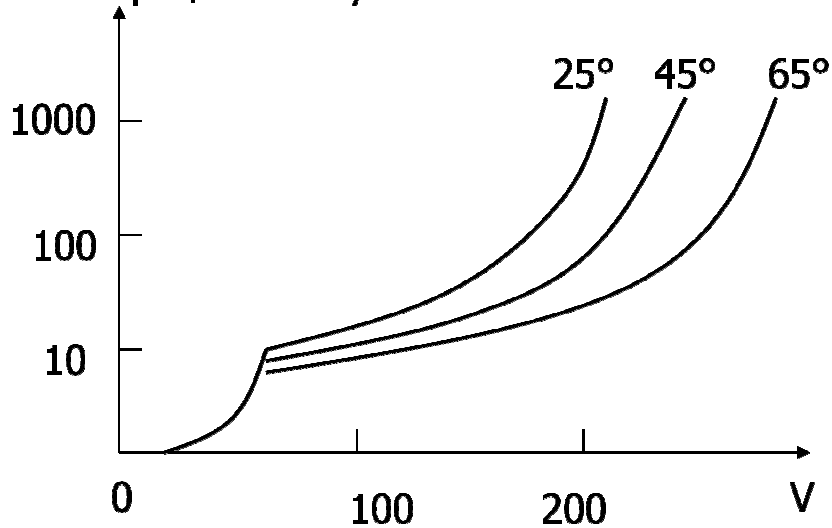


Лавинен процес Avalanche Process

- Коефициентът на вътрешно усилване е важен параметър на APD, зависещ от приложеното обратно напрежение и температурата

Зависимост на коефициента на усилване от преднапрежението

М Коефициент на усилване



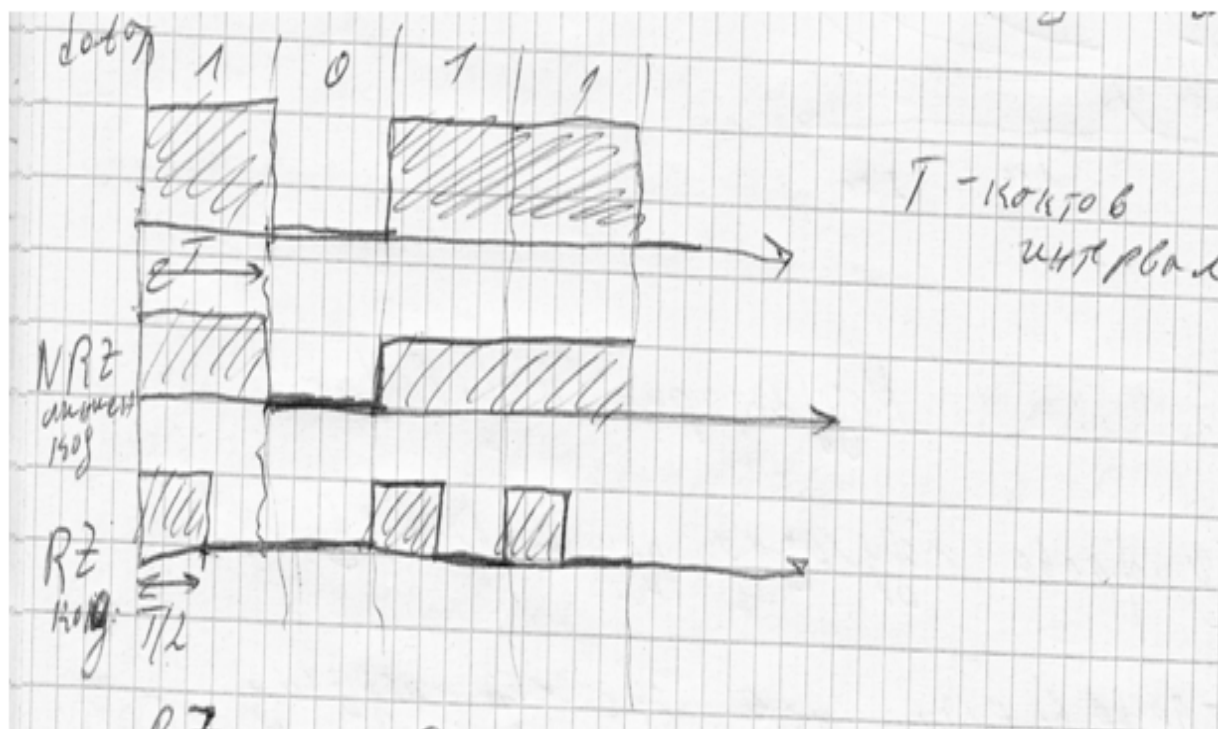
Модулатори Modulators

Цифрова модулация при LED и LD

- ▶ **Предавателят** изпълнява високоскоростна модулация на оптичния източник от електрическия сигнал на входа му
- ▶ **Методи на цифрова оптична модулация :**
 - модулация по интензивност - включен/изключен светлинен източник за логически "1" и "0"
 - фазово импулсна модулация (модулираните импулси имат една фаза за "1" и друга за "0")
 - честотно импулсна модулация (импулсите са с еднаква ширина но с различна честота в зависимост от двоичния сигнал на входа - "1" или "0")
- ▶ Най-често се използва модулация по интензивност - включен/изключен светлинен източник

Методи за оптична модулация

Optical Modulation Methods



RZ кодът се използва по-често, а линиините кодове се използват за всички видове цифрови кодови модулации

Линиините кодове се използват за всички видове цифрови информационни кодове

Външна модулация

External Modulation

- ▶ Светлинният източник (Light source) излъчва непрекъснат светлинен поток т.е. не модулиран
- ▶ Външна модулация по интензивност "включен/изключен" превръща непрекъснатия светлинен поток, излъчван от източника, в дискретен модулиран сигнал, носител на цифровата информация предназначена за пренос по оптична среда
- ▶ Модулаторът и светлинният източник могат да бъдат отделни елементи или интегрирани заедно в общ корпус

Оптични модулатори

Optical Modulators

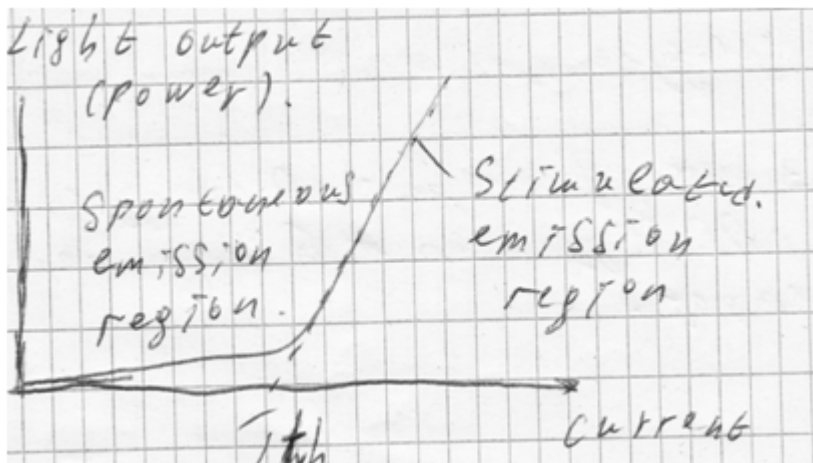
три вида модулатори: модулатор на Mach-Zehnder; полупроводников модулатор MQW; електро-пречупващ модулатор.

Оптични предаватели и приемници

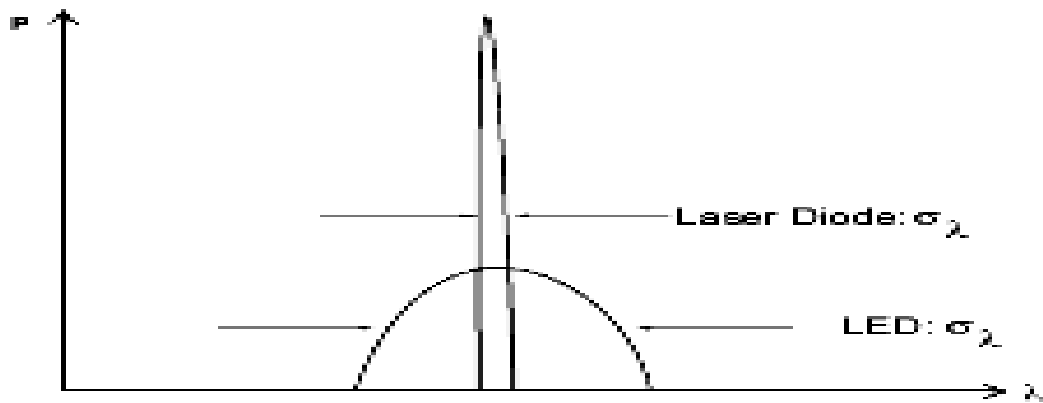
Оптична преносна система

- **Оптичен предавател:** Преобразува електрическия аналогов или цифров сигнал в оптичен сигнал.
 - За източник на светлина се използват полупроводникови светодиоди LED или лазери LD.
- **Оптичен приемник:** Преобразува оптичния сигнал обратно в първоначалния електричен сигнал
 - За фото детектори се използват полупроводникови **PIN (Positive Intrinsic Negative)** фото диоди и лавинни фото диоди **APD (Avalanche Photo Diode)**.
- Най-използваните дължини на вълните на които работят и източниците на светлина и приемниците са : 850 nm , 1300 nm , 1550 nm.

Оптична мощност на светодиоди LED (Light Emitting Diode) и лазери LD (Laser Diode)



Диаграми на излъчване на светодиод и лазер



!!!!!!!!!!!!

Светлинни източници-сравнение

■ Светодиоди LED:

- Не са толкова добри светлинни източници колкото лазерите LD
 - Сравнително широка област на излъчване и по-малка част от светлината попада в оптичното влакно
 - По-ниски стойности на излъчената оптична мощност
- Много по-икономични (по-евтини), стабилни по отношение на измененията на изходния сигнал от електрическия сигнал на входа и температурните вариации
- Светодиодите са по-надеждни и с по-дълъг срок на експлоатация от лазерите.

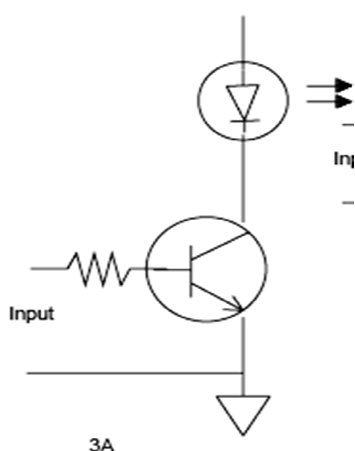
Широко се използват за къси до средни дистанции

■ Лазери LD:

- Въвеждат много пъти по-голяма оптична мощност във влакното от LED
 - Лазерите имат много малка излъчваща повърхност и за разлика от светодиодите усилват светлината над определен праг на тока на входа им
 - Много по-тясна диаграма на излъчване, източници на монохроматично излъчване
- Чувствителни към температурни изменения и изискват допълнителна обратна връзка за стабилизация на излъчения светлинен поток
- По-малка надеждност и експлоатационен период
- Спектралните им характеристики и по-високата цена ги правят подходящи за високоскоростно пренасяне на информация на големи разстояния

Оптични предаватели

- Съвременните оптични предаватели използват най-простата форма на цифрова модулация – модулация по интензивност “включен/изключен” светлинен източник.
- Транзисторът на входа на предавателя превключва LED или LD в зависимост от входния цифров сигнал. С подходящо схемно решение може да бъде преобразуван почти всеки цифров формат.
- Предаватели с LED достигат скорости от няколко стотици MHz, а с LD хиляди MHz.



Оптични приемници

- Оптичните приемници използват вътрешни усилватели за усилване на слабия сигнал след фото детектора.
- Първото стъпало е операционен усилвател, който преобразува слабия ток от фото диода в напрежение.
- Второто стъпало е компаратор, който възстановява формата и временните характеристики на цифровия сигнал. Тригер определя точката на превключване на компаратора.
- Допълнителни изходни вериги осигуряват съвместимост с външните електрически вериги, контрол на усилването за компенсиране на температурни изменения и други.

За всяко конкретно приложение се използва влакно с размер специфициран за него. В противен случай оптичният приемник може да се претовари.

Фотодетектори (PIN и APD)-сравнение

- ***PIN фотодиодите:***
 - Работят при стандартно захранване между 5 и 15 V
 - По-икономични, по-надеждни, по-дълготрайни
 - Предпочитани устройства в приемниците за къси до средни оптични връзки.
- ***APD фотодиодите:***
 - Много по-чувствителни от PIN диодите
 - Пропускат почти два пъти по-широка честотна лента (по-високи скорости на предаване) от PIN диодите
 - Недостатък: работят при много високи обратни напрежения и изискват стабилна изходна мощност при температурни изменения
 - По-скъпи, използват се главно в дългите оптични линии.

15. Couplers, Splitters, Switches

Оптични разклонители

Optical Couplers

- Обединяват и разделят сигналите (Combines & splits signals)
- Независещи или селективни по отношение на λ
- За производството им се използват оптични влакна и вълноводи (waveguides) от интегралната оптика (integrated optics)
- $\alpha =$ отношение на обединяване, разделяне (coupling ratio)
- Мощност (изход 1) = α Мощност (вход 1)
- Мощност (изход 2) = (1- α) Мощност (вход 1)
 - Сплитер по мощност (Power splitter) при $\alpha=1/2$: 3-dB затихване на изходен порт
 - Разклонител по мощност (Power coupler) при $\alpha \neq 1/2$

λ -селективен coupler , ако α зависи от λ . Използват се при оптичните усилватели EDFA

Сплитер по Мощност

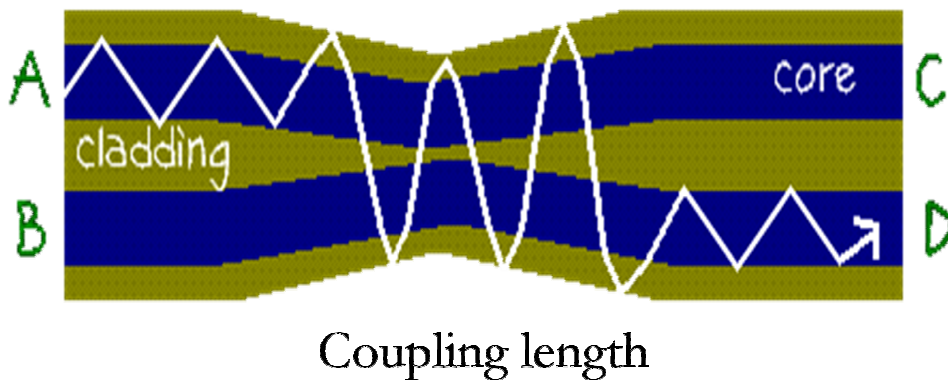
$$10 \lg \frac{P}{P/2} = 3 \text{ dB}$$

Разклонител 2 x 2

2 x 2 Coupler 1

- Четири портовия 2 x 2 разклонител (2 x 2 coupler), наричан още насочващ каплар (directional coupler), е най-простия и широко използван компонент в оптичните мрежи
- Светлината пристига, например на port A, и се разделя (split) между port C и port D 50% от светлинната мощност отива към C и 50% към D

Има различни опции за преминаване на светлината през разклонителя



- *Разклонители от заварени влакна (Fused-fiber couplers)*
 - Произвеждат се чрез усукване и заваряване на две оптични влакна.
 - Оптична мощност на изходните портове зависи от
 - дължината на областта на свързване на влакната (заварената област)
 - Размера на диаметрите на ядрата на влакната в областта на свързване
 - Разликата в диаметрите на двете влакна в областта на свързване
 - За всеки coupler се специфицира внесеното затихването (Insertion Loss), за всеки от изходните портове, като логаритмично отношение на изходната мощност на съответния порт към мощността подадена на входния порт
 - Винаги има малка загуба на мощност (Excess loss), при преминаване на светлината през разклонителя, в резултат на разсейване, поглъщане и други фактори

Разклонители с многомодови влакна

Couplers with Multimode Fibres

- ❑ Действието им се основава на разпространението на светлинните лъчи (моди) в областта на свързване на двете оптични влакна
 - Модите остават в първоначалното влакно докато ъглите на падане са по-големи от критичния ъгъл
 - Модите преминават в оптичната обвивка (cladding) при ъгли на падане по-малки от критичния ъгъл и на изхода се връщат обратно в сърцевината на влакното
- ❑ Разклонителите с многомодови влакна не зависят от дължината на вълната λ
- ❑ Разделителното отношение (coupling ration) се определя от дължината на областта на свързване и дебелината на оптичната обвивка (cladding)

Разклонители с едномодови влакна

Couplers with Singlemode Fibres

- Зависят от дължината на светлинната вълна λ
- Разделителното отношение (coupling ration) по мощност, за дадена λ , се определя от дължината на областта на свързване на влакната
- Светлината от влакно А изцяло ще премине във влакно D (100% куплиране) при определена по-дълга област на свързване на влакната
- Селективни към дължината на светлинната вълна λ
- Например, по влакно А се предават две вълни с дължини 1.3 μm и 1.55 μm :
 - дължината на областта на свързване на двете влакна е достатъчна за 100% куплиране на $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ във влакно В към порт D
 - дължината на областта на свързване на двете влакна е недостатъчна за $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ и тя отново се връща във влакно А, 100 % куплирайки се към порт С

Внимателното оразмеряване на дължината на куплиране на двете влакна позволява разделяне (separate) или обединяване (combine) на две различни дължини на вълните (wavelength)

Разклонител 1 × 2 Y-junctions or 1 x 2 Couplers

- Y- съединенията (junctions) са 1 x 2 разклонители (couplers) и са ключов елемент в оптичните мрежи
- Входната светлина се разделя по равно между двете рамена на разклонителя
- Трудно се правят от три влакна. Предпочита се създаване на вълноводи в среда от стъкло
- Приложения: оптични кабелни разпределителни мрежи – локални мрежи, кабелна телевизия, абонатна мрежа

Предимства на Y- разклонителите Advantages of Y-junctions

- Чрез каскади от Y-разклонители могат да се получат 1 x 4 или 1 x 8 разклонители

8x8 Star Coupler

Разклонители – звезда Star Couplers

- Разклонителите тип звезда (Star couplers) са разклонители с повече от четири порта
- Два вида разклонителите звезда:
 - предаваща звезда (transmission star)
 - отразяваща звезда (reflection star)

Разклонител - отразяваща звезда Reflection star

- Насочващи разклонители (Directional couplers) разделят предаваните и приеманите сигнали

Оптична комутация Optical switching technology

- ❑ Оптичният комутатор има поне два изхода и е един от най-важните елементи на напълно оптичните мрежи
- ❑ Оптичната комутация се базира главно на интерференцията на светлинните вълни при използване на следните технологии:
 - Механична комутация с огледала и разклонители-комутатори (MEM mirrors, Directional couplers)
 - Електро-оптична комутация с изменение на коефициента на пречупване на материала пропорционално на напрегнатостта на приложеното електрическо поле.
 - Чрез изменение на напрежението на електродите, обхващащи единия от вълноводите, може да се регулира фазовата разлика между предаваните по тях оптични сигнали и по такъв начин да се влияе на характера на интерференцията на изхода на комутатора
 - Термо-оптична комутация с изменение на коефициента на пречупване на материала пропорционално на приложената температура

Оптични комутатори Switches

- Пренасочват оптичния сигнал в определена посока
- Светлината, идваща от порт А може да се комутира към порт В или към порт С
- В идеалния случай 100% от светлината преминава към съответния порт
- Има два основни типа комутатори (switches):
 - Двупозиционен комутатор (Two-Position Switch)
 - Байпас комутатор (Bypass Switch)
 -

Двупозиционен комутатор Two-Position Switch

- Изисква три влакна с лещи и призма
- Нека светлината пристига на порт А и трябва да се превключи към порт С:

- призмата се премества така че да приеме светлината от порт А
- светлината се отразява от лявата страна на призмата чрез пълно вътрешно отражение
- светлината се отразява втори път от дясната страна на призмата
- светлината от призмата постъпва във влакно С

Байпас комутатор

Bypass Switch

- Байпас комутаторът (Bypass Switch) има две състояния:
 - Порт А и порт D са свързани директно, а порт В и порт С са изолирани
 - Порт А и порт В са свързани, и порт D и порт С са свързани
- Изисква четири влакна, лещи и електромагнит. В двата края на електромагнита има огледала за отразяване на светлината
- При изключен електромагнит, комутаторът е в състояние байпас
- При включен електромагнит, светлината се отразява от огледалата и се комутира към другите влакна

Оптична комутация с MEM

компоненти

Micro-electromechanical system (MEM)

- MEMS са нов клас компоненти, на полупроводникова основа, с изключително малки размери, използвани в различни области включително и интегралната оптика
- В оптичните комуникации, MEMS се използват за създаване на миниатюрни огледала за отразяване и комутация на светлината

MEM технология

Оптичен комутатор 2x2

- Работата на оптичния разклонител-комутатор 2x2, конструиран на основата на два еднакви, симетрично разположени, оптични вълновода (waveguides), се базира на линейния електрооптичен ефект на Покелс (Pockels), който се състои в изменение на

коефициента на пречупване на материала от напрегнатостта на приложеното електрическо поле..

- Светлинното излъчване, въведено в единия вълновод преминава в другия вълновод в резултат на препокриване на реактивните полета на двата вълновода и се описва с диференциалните уравнения на взаимосвързаните моди. Коефициентът на предаване K зависи от параметрите на вълновода, дължината на вълната λ и дължината на участъка на взаимодействие между вълноводите L .
- С прилагането на електрическо напрежение към електродите, разположени странично или отгоре и отдолу на вълноводите, и образуващи така наречената кутия на Покелс, може да се регулира фазовата разлика при разпространение на вълните по двата вълновода, въз основа на възникващия електрооптичен ефект:

$$\Delta\beta = 2\pi(N_1 - N_2) / \lambda$$

- където N_1 и N_2 са коефициентите на пречупване на двата вълновода.
- При отсъствие на напрежение V , ефективността на връзката между двата вълновода на комутатора е 100% и двата оптични сигнала, влизащи поотделно във всеки от вълноводите, взаимно се пресичат (кросират , крос-комутация) т.е. влизат в единия вълновод и излизат през другия.
- С подаване на напрежение V и въвеждане на фазова разлика , ефективността на връзката между двата вълновода спада до 0 и настъпва паралелно преминаване на оптичните сигнали по вълноводите. По такъв начин разклонителят-комутатор 2x2 осъществява комутация без блокировка.
- Следователно чрез изменение на напрежението на електродите, обхващащи единия от вълноводите, може да се регулира фазовата разлика между предаваните по тях оптични сигнали и по такъв начин да се влияе на характера на интерференцията на изхода на комутатора.
- Наред с електрооптичния ефект, за осъществяване на оптична комутация, широко се използва и акустичнооптичния ефект, термо оптичния ефект. Има и други технически реализации за пространствени комутатори 2x2 на базата на полупроводникови оптични усилватели .

Оптични затихватели (атенюатори)

- Оптичните атенюатори са неутрални филтри по пътя на сигнала. Те отслабват сигналната мощност без да нарушават спектралната характеристика на сигнала

- Изпълняват се като:
 - Затихватели с постоянна стойност на внесеното затихване, реализирани като оптични заварки със съответно затихване
 - Затихватели с регулируема стойност на внесеното затихване, реализирани като интегрирана част на оптичния приемник
- Оптичните атенюатори намират приложение при по-къси оптични линии, които внасят малко затихване за предавания оптичен сигнал. Включват се на входа на оптичния приемник и фактически представляват заместител на оптична линия с определена дължина
 - Причината за използване на оптични затихватели е високата чувствителност на приемника, която стеснява динамичния му диапазон по отношение на по-силни сигнали

Изолатори и циркулатори Isolators and Circulators

- Използват концепцията на разклонителите (couplers)
- Не работят ако се сменят местата на входовете и изходите
- Изолатор (Isolator): разрешава предаване в една посока и блокира всички предавания в друга посока, например отражения (reflection)
- Циркулатор (Circulator): подобен на изолатора но с повече портове