ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

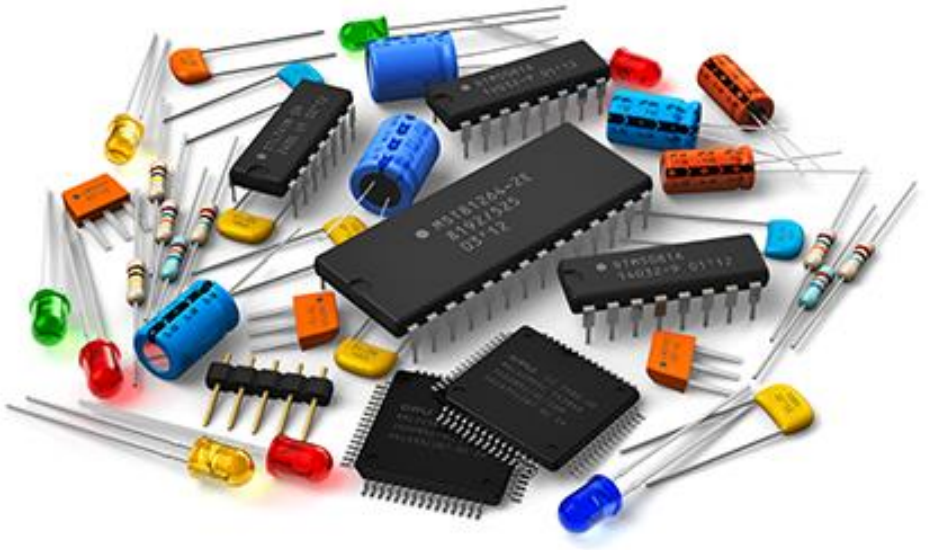
reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Fyzikální elektronika

KET/FYE



Optoelektronika – optická vlákna

Přednáška 11

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Co se v přednášce dozvíte?

- Zjistíte, co znamená optoelektronika.
- Zjistíte, co jsou optická vlákna a jak se v nich šíří světelné signály.
- Dozvíte se, jak se optická vlákna vyrábějí a jaké jsou jejich důležité parametry.
- Dozvíte se, jaký je rozdíl mezi gradientním a step-index vláknem.
- Zjistíte, co je vidová, chromatická a polarizační disperze.

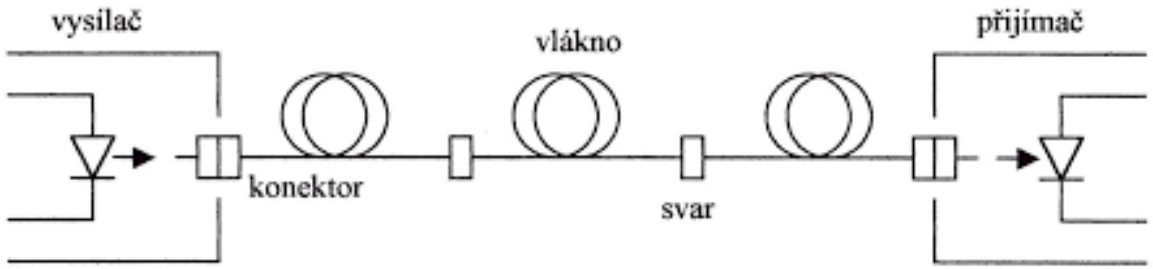
Optoelektronika

- Oblast elektroniky, která se zabývá interakcí světla s elektronickými prvky.
  - **zpracování signálů – elektronické**
  - **přenos signálu – optický**

- **klidová hmotnost nosičů informace**
  - elektron – 10^{-30} kg
  - foton – 0 (vhodnější pro přenos)
    - foton se může pohybovat rychlostí světla – lepší přenos
- **náboj nosičů informace**
  - elektron – $1{,}6 \times 10^{-19}$ C (vhodnější pro zpracování)
    - elektron může být ovládán el. mag. polem – Lorentzova síla
  - foton – 0
- **spinové číslo nosičů informace**
  - elektron – ±½
  - foton - 1

- **fotony -** lepší pro přenos
  - nepůsobí na ně elektromagnetické rušení
  - nelze odposlouchávat (nevytváří el. mag. pole)
  - větší kapacita přenosového kanálu
  - fotony si podle Pauliho principu nevadí (elektrony si vadí)

- **přenosová cesta**
  - elektrooptický převodník → fotony → optoelektronický převodník → zesilovač → elektrooptický převodník → fotony → optoelektronický převodník

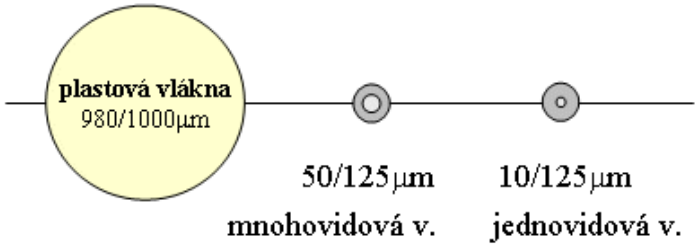


- **převodníky – nevýhoda optoelektroniky**
  - vnáší do signálu rušení a zpoždění

- **elektronika**
  - přenos – elektronický
  - zpracování – elektronické
- **optoelektronika**
  - přenos – optický
  - zpracování – elektronické
- **fotonika**
  - přenos – optický
  - zpracování – optické
- optické zesilovače přímo neexistují

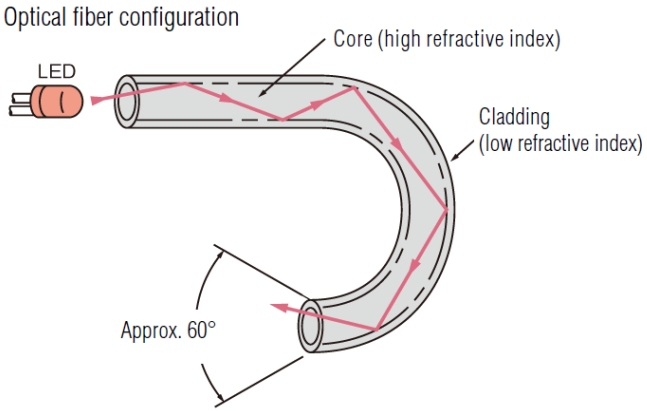
Optická vlákna

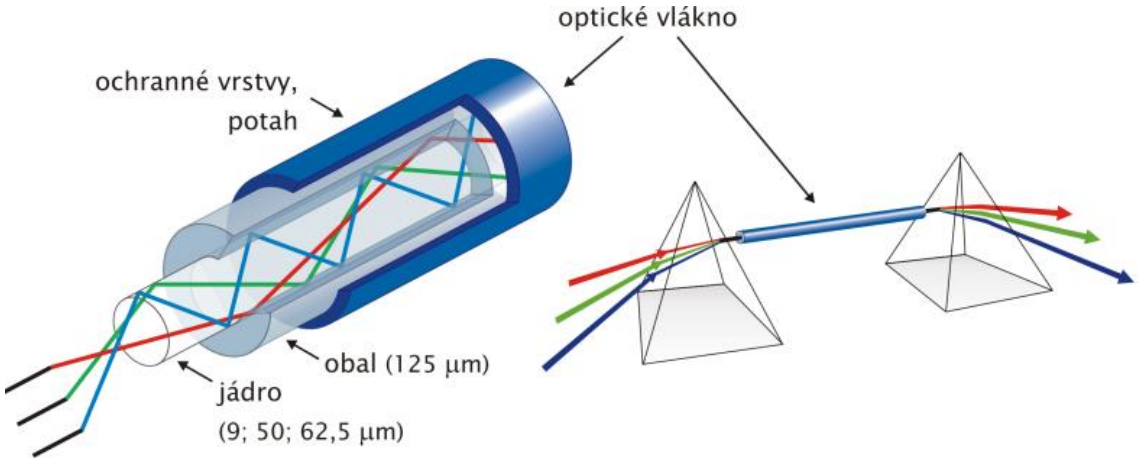
- **přenosové médium**



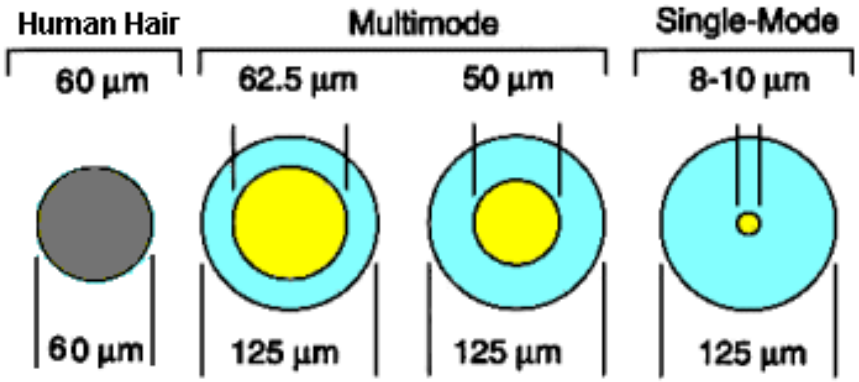
- **skleněná**
  - základem je SiO_2
  - výroba tažením – odstranění křehkosti
  - obecně neprůhledné sklo

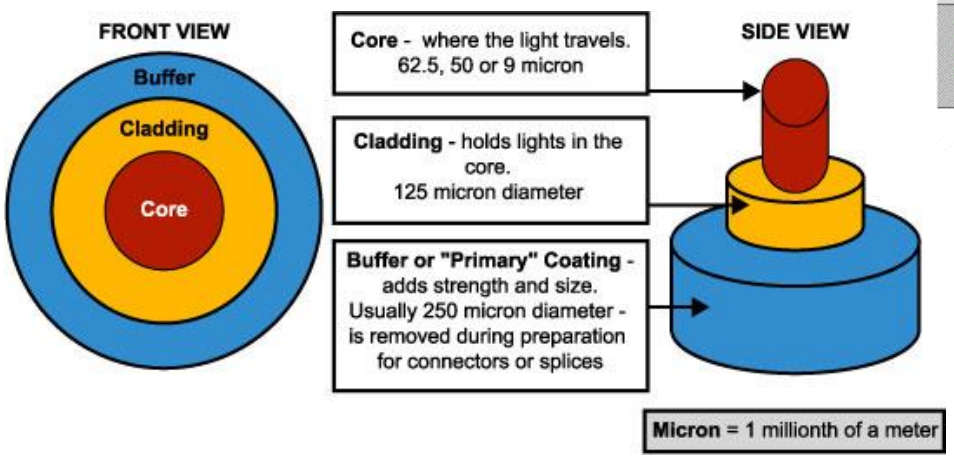
- **polymerní**

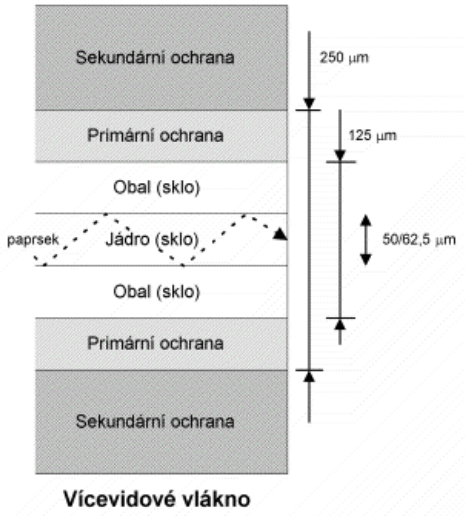


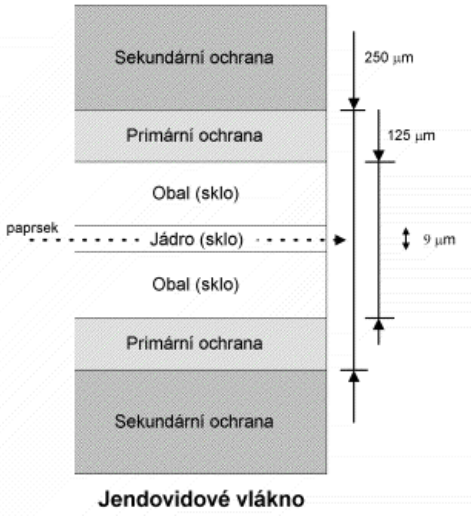


Rozměry a struktura optických vláken









Technologie výroby

- **tažení optických vláken**
  - preforma – čistá skleněná tyč
  - kapka ze začátku preformy optického vlákna roztavená v grafitové peci - teplota 1800–2100 °C, kapka za sebou táhne optické vlákno
  - tažení vlákna je v další fázi regulováno kladkami
  - povrch potažen silikonovým kaučukem

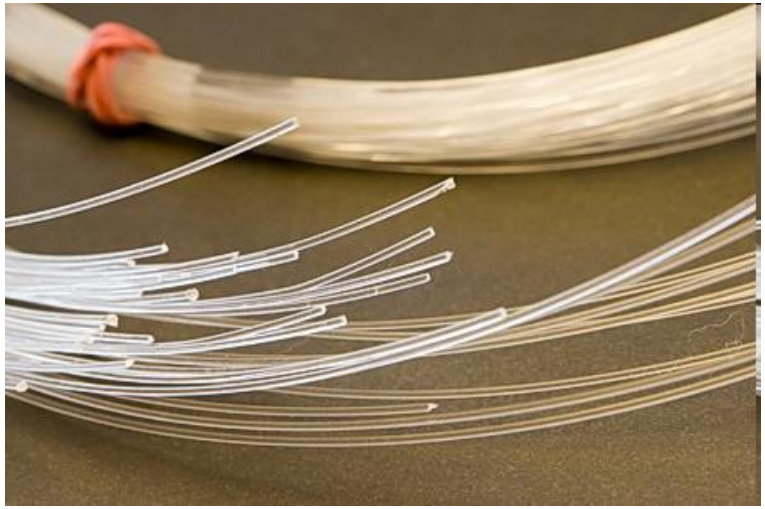


- **preforma**
  - průměr 1 palec, délka 1 m – lze vytáhnout 1 km vlákna



Princip činnosti:
https://www.youtube.com/watch?v=u1DRrAhQJtM

Optické kabely







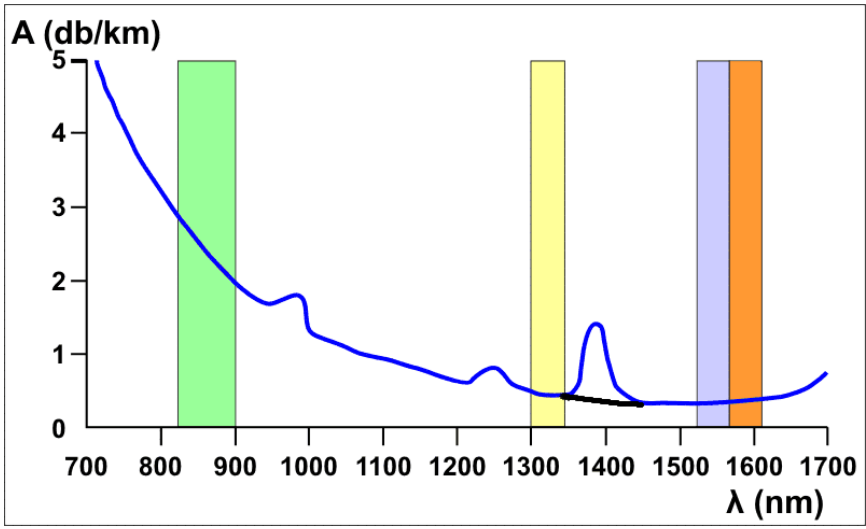


Útlum optického vlákna

- skleněné vlákno
  - **amorfní látka – útlum 1 dB/km**
- **útlum – závislý na vlnové délce**
  - „hrby“ útlumové charakteristiky způsobeny nečistotami skla – ionty Na+ a OH-
  - 3 použitelná pásma
    - **I – 0,85 mm (již se nepoužívá)**
    - **II – 1,3 mm (praktické využití – infračervené pásmo)**
    - **III – 1,55 mm (vysoké vlnové délky – neexistují optoelektronické převodníky)**

$$B = \frac{1}{L} 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad [dB/km]$$

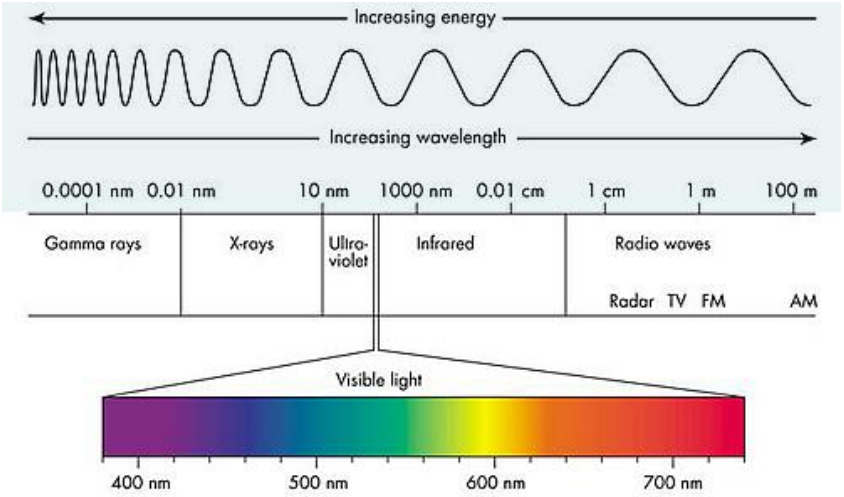
L – délka
P_1 - vstupující intenzita záření
P_2 – vystupující intenzita záření

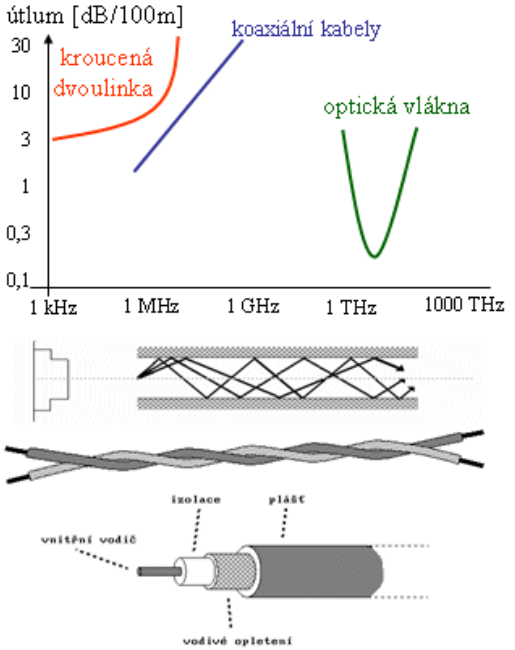


Útlum optického vlákna

- optoelektronika - **pracovní oblast v infračervené oblasti**
- zesilovače cca po 10 km
- snaha o co nejdelší vlákno bez sváru
  - **útlum na sváru cca 1 dB**

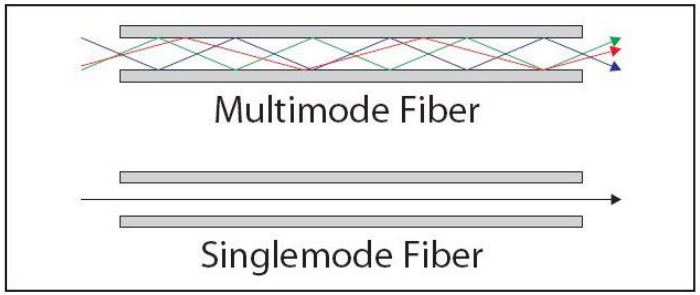
	Short Wavelength (1st Window) 0.85 μm	Long Wavelength (2nd Window) 1.3 μm	Long Wavelength (3rd Window) 1.55 μm
Laser	AlGaAs	InGaAsP	InGaAsP
Fiber	2 dB/km	0.5 dB/km	0.2 dB/km
Detector	Si	Ge or InGaAs	InGaAs





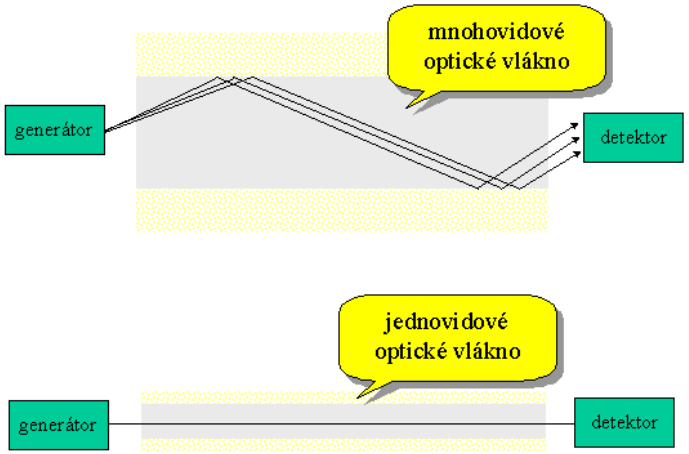
Princip přenosu informace optickým vláknem

Rozdělení vláken



- **jednovidová N=1**
  - průměr vlákna 3 µm
- **vícevidová N=500**
  - průměr vlákna 50 µm
- počet vidů (módů) – způsob šíření
- **nultý vid** – přenos vidu v ose vlákna
- každý vid má různou délku šíření → různá doba průletu – roztažení impulzu
- čas průletu vidu vláknem

$$t = \frac{L}{v}$$



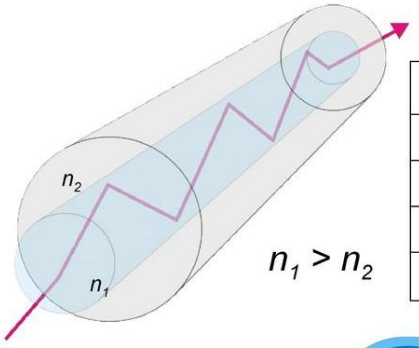
Šířka přenášeného pásma

- **nejvyšší kmitočet signálu, který může být spolehlivě přenesen na vzdálenost 1 km bez zkreslení**
  - uvádí se v MHz.km
  - **závislost na indexu lomu – n (optická hustota)**

- **Snellův zákon -** princip šíření světelného paprsku vláknem
  - světlo musí projít skrz - **úplný (totální) odraz**
- **rychlost šíření světla ve vlákně**

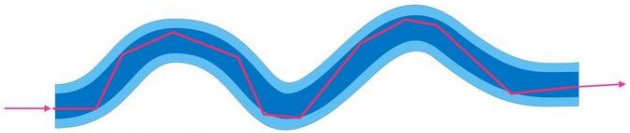
$$n = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \cong \sqrt{\varepsilon_r}$$

$$v = \frac{c}{n}$$



J. Tyndall (1853)

Index lomu (n=c/v)	
Vakuum	1
Vzduch	1,0003
Voda	1,330
Křemenné sklo	1,457

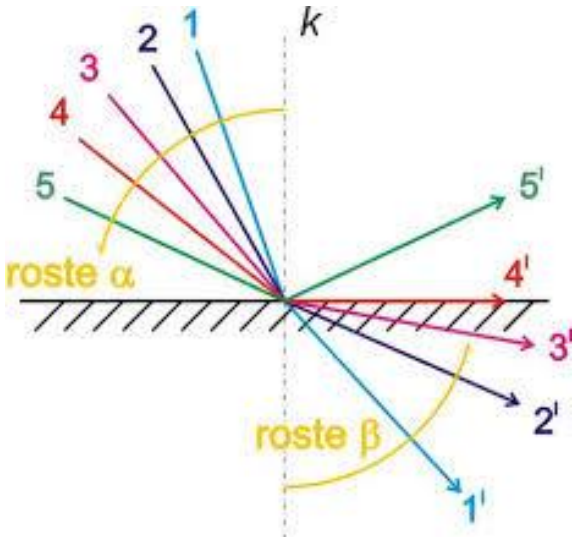


Optické vlákno :
dielektrická struktura, L>> r, $n_{jádro} > n_{obal}$

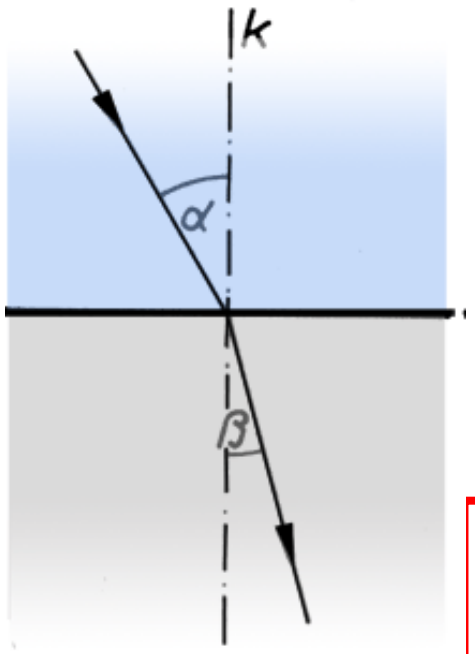
Snellův zákon

- **nutné splnit podmínku totálního odrazu**

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1}$$



- **žádný lom** – vše se odrazí (totální odraz)



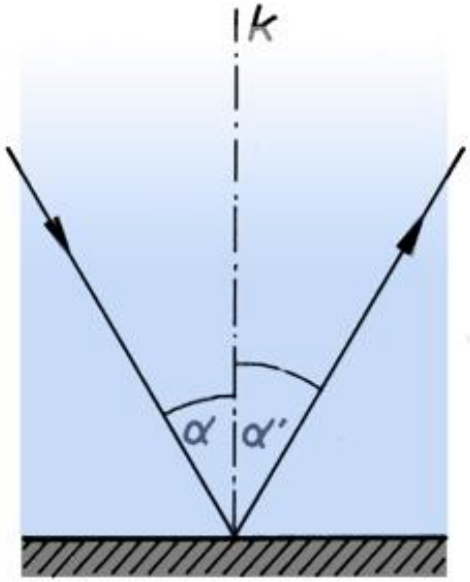
podmínka totálního odrazu

$$\sin\beta = \frac{n_1}{n_2}\sin\alpha \qquad \beta > 90^\circ$$

$$\arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\sin\alpha\right) > 90^\circ$$

$$\alpha > \alpha_{krit} = \arcsin\frac{n_2}{n_1}$$

$$n_2 < n_1$$



Snellův zákon

- další impulz může přijít až dorazí předcházející
- **doba šíření**

$$t = \frac{l}{v} = \frac{l}{c} n_1$$

- **nejkratší možná dráha** (L – délka vlákna)

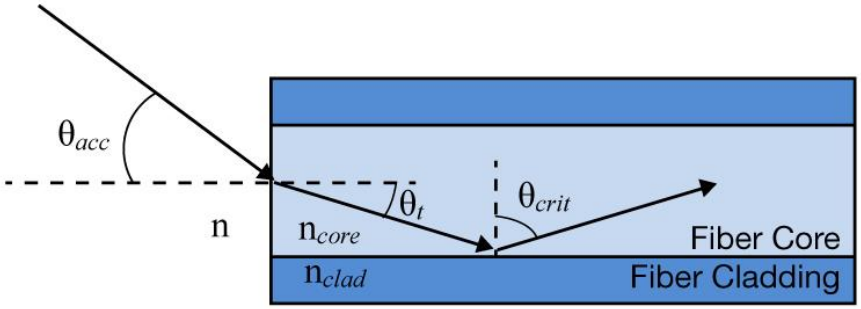
$$l = \frac{L}{\sin \alpha}$$

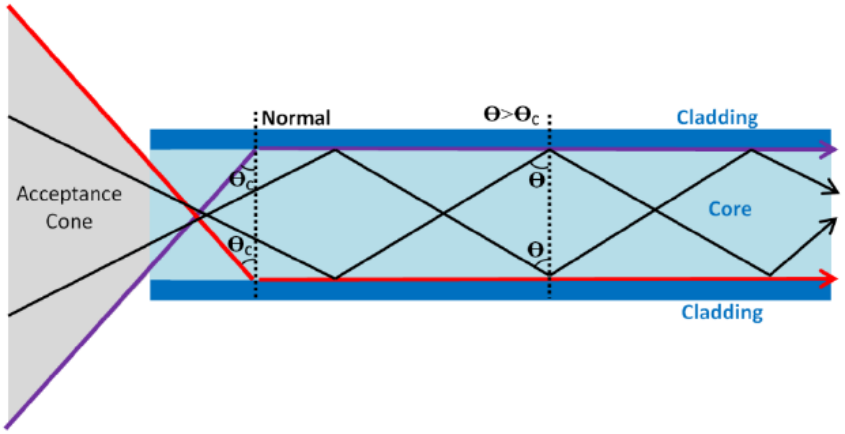
- **nejdelší možná dráha** (nejvyšší vid $\alpha = \alpha_{krit}$)
- nultý vid

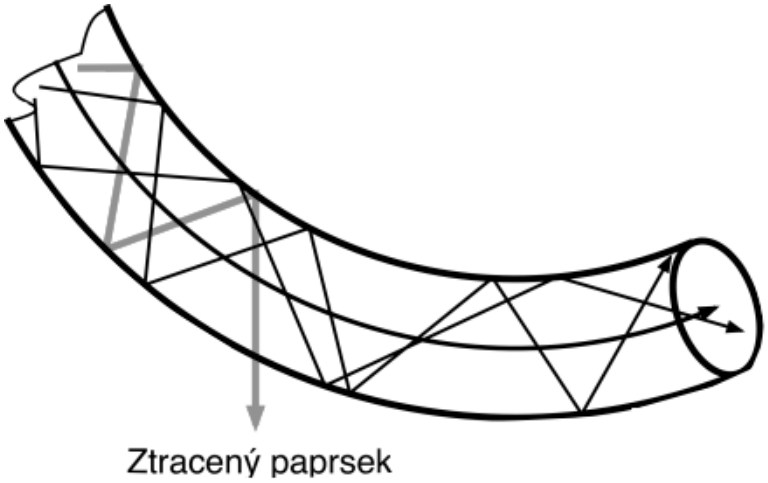
$$\alpha = 90° \Rightarrow l = L$$

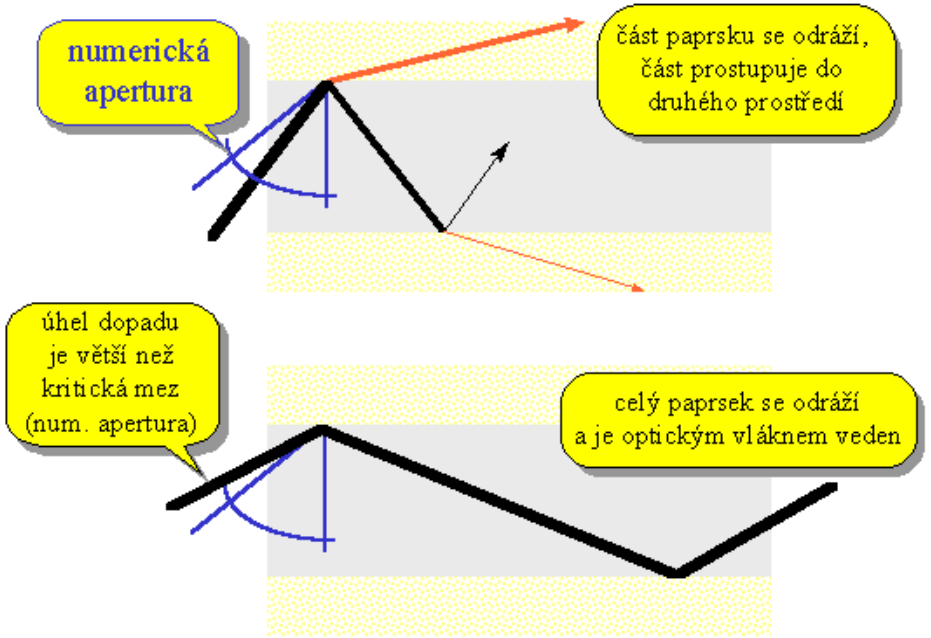
$$l_{krit} = \frac{L}{\sin \alpha_{krit}} = \frac{L}{\sin\left(\arcsin \frac{n_2}{n_1}\right)} = L \frac{n_1}{n_2}$$

Snellův zákon









Princip činnosti:
https://www.youtube.com/watch?v=N_kA8EpCUQo

Typy optických vláken

Step index vlákna

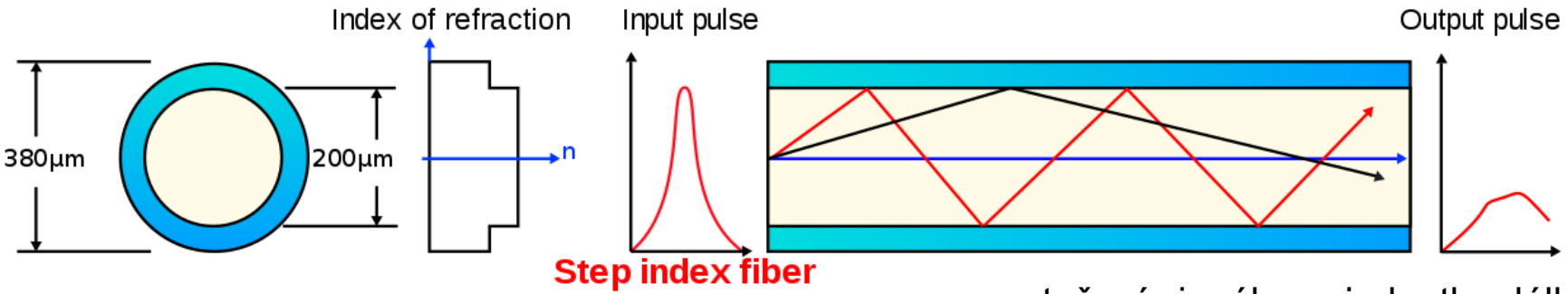
- **skoková změna n**
  - jádro vlákna $n_1 = 1{,}53$
  - povlak $n_2 = 1{,}5$
- **šířka pásma 10 MHz.km**
  - špatná hodnota – vlákna jen na krátké vzdálenosti

$$\frac{\Delta t}{L} = \frac{1}{v}\left(\frac{l_{krit}}{L} - \frac{l_o}{L}\right) = \frac{1}{v}\left(\frac{n_1}{n_2} - 1\right)$$

$$\frac{\Delta t}{L} = \frac{1}{c} n_1 \left(\frac{n_1}{n_2} - 1\right)$$

$$\frac{\Delta t}{L} \approx \frac{1}{3.10^8} 1{,}53 \cdot 0{,}02 \cong 10^{-10}\ s/m$$

$$\frac{L}{\Delta t} = 10^{10}\ m/s = 10^{10}\ Hz.m = 10\ MHz.km$$

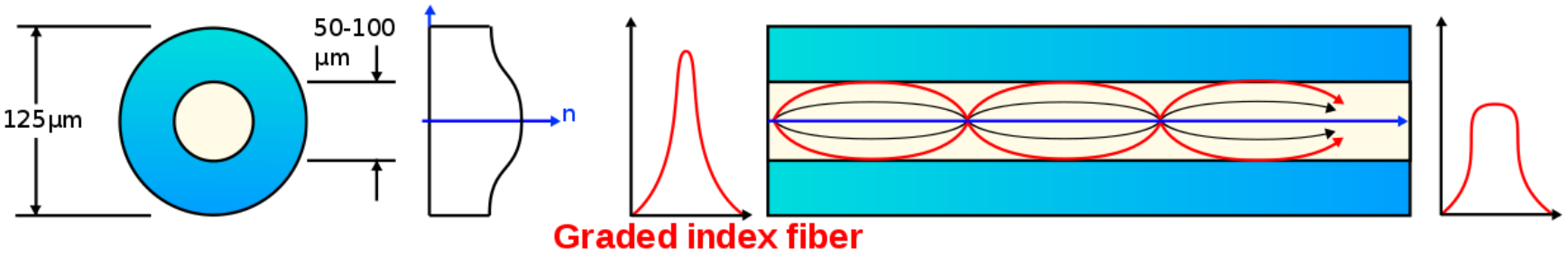


roztažení signálu na jednotku délky

Gradientní vlákna

- **dochází ke změně indexu lomu v průřezu vlákna**
  - uprostřed – nejpomalejší vid
  - okraj – vyšší vid – rychlejší šíření signálu
- **doba přenosu t bude pro všechny vidy stejná**
- změna šířky pásma o 2 řády - 1 GHz.km

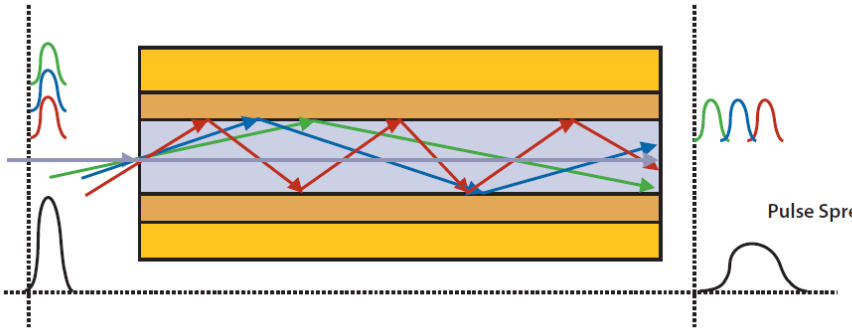
$$t = \frac{l}{v} = \frac{l}{c} n_1 \qquad v = \frac{c}{n}$$



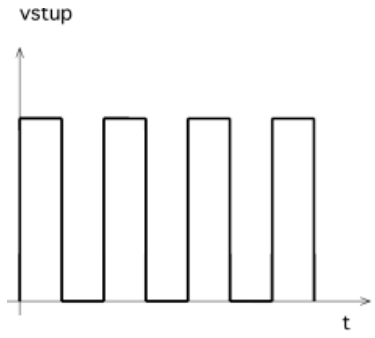
Disperze optických vláken

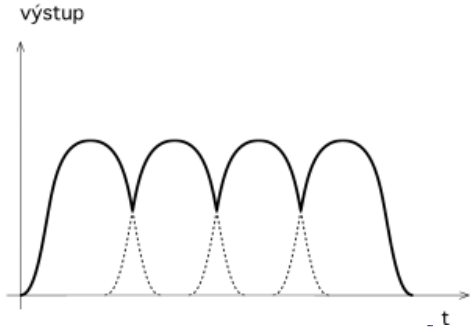
Vidová disperze

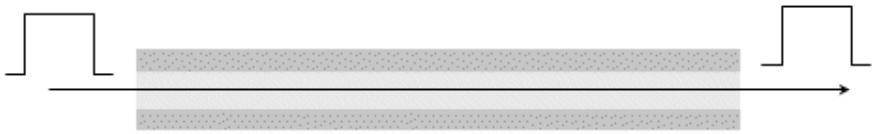
- **roztažení přenášeného impulzu na výstupu**
  - souvisí s různou rychlostí šíření vidů ve vlákně
- **jednovidové vlákno – vidová disperze neexistuje**
- vícevidové vlákno
  - **step index –** výrazná vidová disperze
  - **gradientní vlákno –** omezení vidové disperze



Modal dispersion in step-index multimode fiber





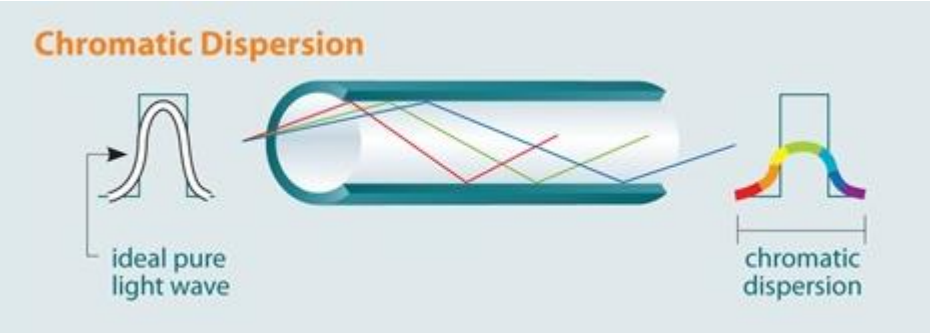


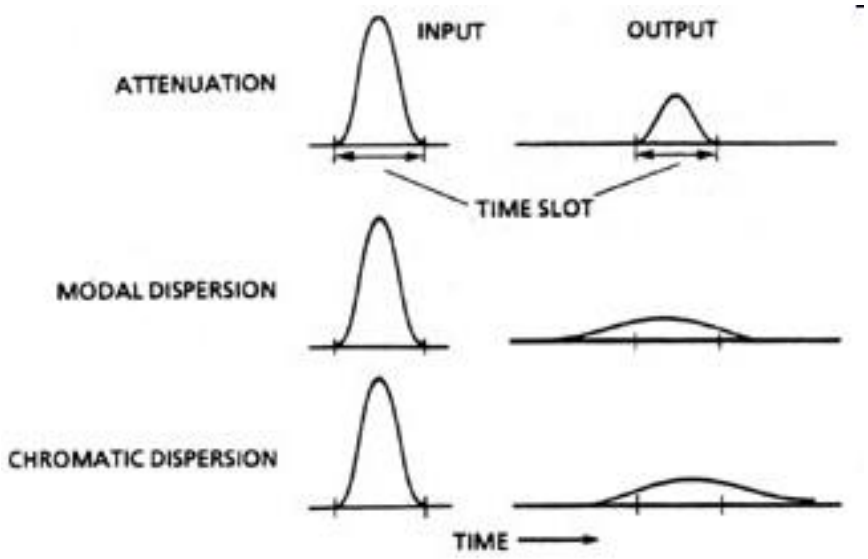
Chromatická disperze

- **barevná disperze**
- **jednovidová vlákna**
  - nemají vidovou disperzi, ale chromatickou disperzi
- **vícevidová vlákna – zanedbatelná chromatická disperze**
- index lomu závisí na vlnové délce
- jakost záření

$$n = f(\lambda)$$

$$\frac{\lambda_0}{\Delta\lambda}$$

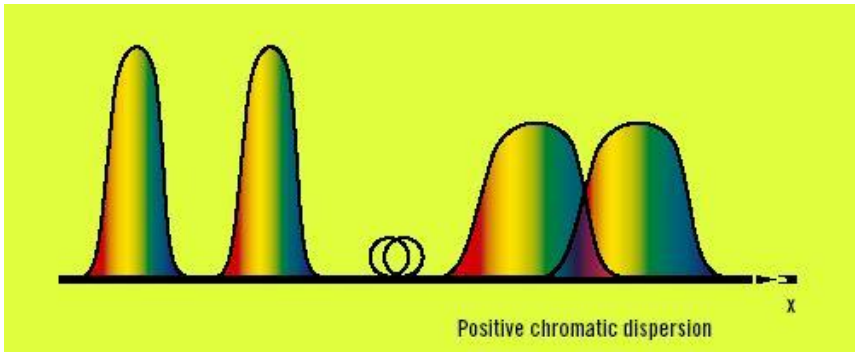




Chromatická disperze

- požadavek – energie vyzářená a přijatá na jedné vlnové délce
- různé vlnové délky a různé n → různé rychlosti šíření – na výstupu Gaussův klobouk vlnových délek

- šířka pásma jednovidového vlákna – 100 GHz.km



dáno materiálem, nelze měnit

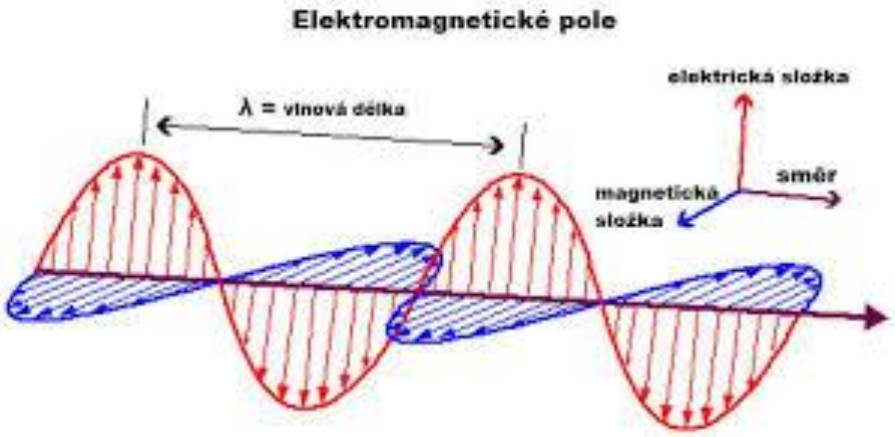
$$\frac{\Delta t}{L} \approx \frac{\partial^2 n}{\partial \lambda^2} \cdot \Delta\lambda$$

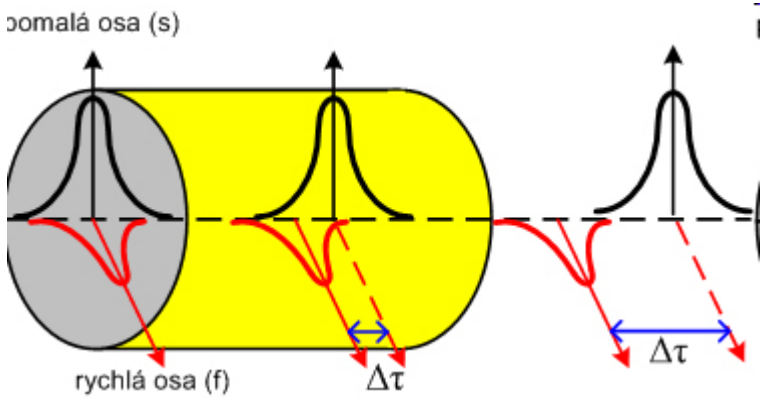
lze ovlivnit monotónností barvy

Princip činnosti: https://www.youtube.com/watch?v=YrSx0U4pvvA

Polarizační disperze

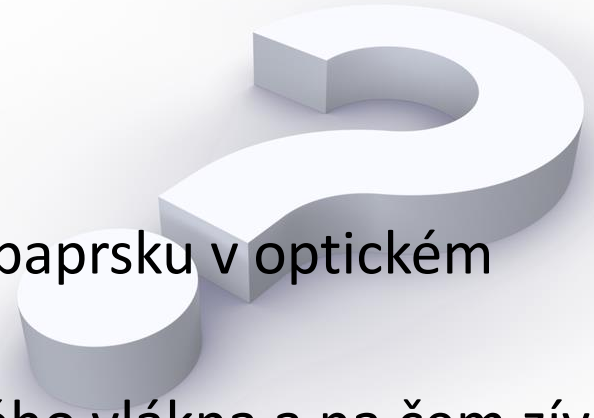
- **světlo – elektromagnetická vlna**
  - Poyntingův vektor – elektrická a magnetická složka jsou na sebe kolmé a zároveň jsou kolmé na směr šíření
- **polarizace elektromagnetické vlny** – závisí na směru elektrické složky
- **polarizační disperze - závisí na polarizaci světla**
  - **dochází ke změně indexu lomu v různých polarizačních rovinách**





Kontrolní otázky

- Jaké existují typy optických vláken?
- Jakým způsobem se šíří světelný signál v optickém vlákně?
- Proč a jaké vlnové délky signálu se používají v optickém vlákně?
- Vysvětlete princip Snellova zákona.
- Co je numerická apertura optického vlákna?
- Jaký je rozdíl mezi step index a gradientním vláknem?
- Vysvětlete princip vidové disperze.
- Vysvětlete princip chromatické disperze.
- Vysvětlete princip polarizační disperze.
- Na čem závisí rychlost šíření světelného paprsku v optickém vlákně?
- Co je šířka přenášeného pásma u optického vlákna a na čem závisí?



Použitá literatura

- Musil, V.: **Elektronické součástky.** VUT Brno, 2005, ISBN 80-214-2627-6
- Vaníček, F.: **Elektronické součástky: principy, vlastnosti, modely.** ČVUT Praha, 2004, ISBN 80-01-03112-8
- Jerhot, J.: **Elektronické součástky a zesilovače.** VŠSE Plzeň, 1979
- FOIT, J.; HUDEC, L.: **Základy elektroniky.** ČVUT v Praze, 2009, ISBN 978-80-01-04236-6
- Vobecký, J.; Záhlava, V.: **Elektronika : součástky a obvody, principy a příklady.** Grada Publishing, 2005, ISBN 80-247-1241-5
- Sze, S.M.; Kwok, K.Ng.: **Physics of semiconductor devices.** Wiley-Interscience, 2007, ISBN 978-0-471-14323-9
- Kasap, S.O.: **Principles of electronic materials and devices.** McGraw-Hill, 2006, ISBN 0-07-124458-1
- Schroder, D.K.: **Semiconductor material and device characterization.** John Wiley & Sons, 2006, ISBN 0-471-73906-5