



TECH pedia



OPTOELEKTRONIKA, FOTONIKA A SENZORY

SANTIAGO SILVESTRE

Názov: Optoelektronika, fotonika a senzory
Autor: Santiago Silvestre
Preložil: Ján Dúha
Vydalo: České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Kontaktná adresa: Technická 2, Praha 6, Česká republika
Tel.: +420 224352084
Tlač: (iba elektronická)
Počet strán: 41
Edícia (vydanie): 1. vydanie, 2017
ISBN 978-80-01-06265-4

TechPedia

European Virtual Learning Platform for
Electrical and Information Engineering

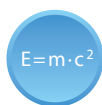
<http://www.techpedia.eu>



Tento projekt bol financovaný s podporou Európskej Komisie.

Táto publikácia (dokument) reprezentuje výlučne názor autora a Komisia nezodpovedá za akékoľvek použitie informácií obsiahnutých v tejto publikácii (dokumente).

VYSVETLIVKY



Definícia



Zaujímavosť



Poznámka



Príklad



Zhrnutie



Výhody



Nevýhody

ANOTÁCIA

Tento kurz uvádza študenta do problematiky optoelektroniky. V úvodných kapitolách sú uvedené základné pojmy týkajúce sa prenosu optického žiarenia. Fyzikálne mechanizmy súvisiace s optoelektronickým prvkami sú popísané vo štvrtej kapitole. Hlavné optoelektronické prvky sú uvedené v piatej kapitole. Kapitoly 6. a 7. popisujú princípy optických komunikácií a hlavné aplikácie optoelektroniky.

CIELE

Po preštudovaní tohoto kurzu by mal byť študent schopný porozumieť základom optoelektroniky, dôležitým otázkam týkajúcim sa prenosu optického žiarenia a bude schopný rozlišovať optoelektronické prvky a poznať ich aplikácie.

LITERATÚRA

- [1] Novikov, M. A. in Ahead of the Time Ch. 1, 7–31 (N. I. Lobachevsky State Univ. of Nizhniy Novgorod Publishing, 2006).
- [2] Hecht, Eugene (2002). Optics. Addison-Wesley. ISBN 0-321-18878-0.
- [3] Clifford R. Pollock. Fundamentals of Optoelectronics. Irwin, 1995. ISBN 0256101043, 9780256101041
- [4] French, A.P., Taylor, E.F. (1978). An Introduction to Quantum Physics, Van Nostrand Reinhold, London, ISBN 0-442-30770-5.
- [5] Kasap S.O. Optoelectronicis and Photonics, principles and practices. Pearson 2013. ISBN 978-0-273-77417-4
- [6] DeWerd, L. A.; Moran, P. R. (1978). "Solid-state electrophotography with Al₂O₃". Medical Physics 5 (1): 23–26.
- [7] Buck, John .A. Fundamentals of Optical Fibers, second edition. John Wiley sand Sons, 2004. ISBN 0-471-22191-0.

Obsah

1	Úvod do optoelektroniky: história a základy	6
2	Optické spektrum. Lom, odraz, tlmenie a disperzia	7
2.1	Úvod	8
2.2	Optické spektrum	10
2.3	Lom, odraz, tlmenie a disperzia	11
3	Prenos optického žiarenia, zdroje a detektory	14
3.1	Úvod	15
3.2	Zdroje a detektory svetla	16
4	Fyzikálne mechanizmy: Absorpcia, fotovodivosť, fotónová emisia	18
4.1	Absorpcia svetla	19
4.2	Fotovodivosť a fotoelektrický jav	21
5	Optoelektronické prvky a senzory	23
5.1	Úvod	24
5.2	Diódy LED	26
5.3	Laserové diódy LD	29
5.4	Fotodiódy - PD	31
5.5	Solárne články	32
5.6	Optické zesilňovače	33
6	Vláknová optika: princíp a klasifikácia, módy šírenia. Fotonické kryštály	35
6.1	Optické vlákno	36
7	Aplikácie: optické komunikácie, biofotonika, optické snímanie, osvetlenie a energia 40	
7.1	Aplikácie optoelektroniky	41

1 Úvod do optoelektroniky: história a základy

Táto kapitola popisuje históriu odboru optoelektroniky a uvádza zoznam aplikácií súvisiacich s týmto odvetvím fyziky.



Optoelektronika je časť vedného odboru fotoniky súvisiaca so štúdiom a aplikáciami elektronických prvkov, ktoré interagujú so svetlom a tiež systémov, v ktorých koexistujú fotóny a elektróny. Optoelektronické prvky pracujú ako elektrooptické a optickoelektrické prevodníky.

Ďalej sú uvedené niektoré najzávažnejšie udalosti v histórii optoelektroniky:

- Elektroluminiscencia v kryštáloch SiC bola prvýkrát pozorovaná a oznámená v roku 1907 vedcom Captainom Henrym Josephom Roundom (Anglicko).
- O niekoľko desaťročí neskôr, v roku 1927, Oleg Vladimirovič Losev (Rusko) pozoroval emisiu svetla v oxide zinčitom a v kryštáloch SiC v usmerňovacích diódach používaných v rozhlasových prijímačoch. Jav bol pozorovaný, ak diódou pretekal elektrický prúd [1].
- V roku 1961 Ali Javan (Bellove laboratóriá) vynášiel prvý plynový heliumneónový laser. O rok neskôr Robert Hall vynášiel polovodičový laser.
- Nick Holonyak (USA) vynášiel prvú prakticky použiteľnú **LED** diódu (*light-emitting diode*) pracujúcu vo viditeľnom spektre a to v roku 1962.
- Prvý prenosový spoj využívajúci sklenené optické vlákna, vynájdené v spoločnosti Corning Glass, bol realizovaný firmou AT&T v roku 1983 z New Yorku do Washingtonu D. C., dosiahnutá rýchlosť bola 45 megabitov za sekundu.

Teraz je optoelektronika významným odvetvím technológie. Trh optoelektroniky prudko rastie. Celosvetovo je možné pozorovať 30% rast každý rok od roku 1992.

Optoelektronika umožňuje generovanie, prenos a spracovanie dát vysokými rýchlosťami. Hlavné aplikácie optoelektroniky je možné hľadať v oblasti komunikácií, komunikácií po optických vláknach a laserových spojoch.

Aplikácie optoelektroniky zasahujú do každodenného života v oblasti počítačov, komunikácií, zábavy, optických informačných systémov, vzdelávania, elektronického obchodu, životného prostredia, zdravotníctva a dopravy.

Optoelektronika je kľúčová pre vojenské aplikácie, ktoré zahrňujú zobrazovanie v infračervenej oblasti, radary, senzory v letectve a opticky navádzané zbrane.

2 Optické spektrum. Lom, odraz, tlmenie a disperzia

V tejto kapitole prezentujeme základný matematický aparát popisujúci úvodné a dôležité pojmy súvisiace s optoelektronikou. Ďalej sa v tejto kapitole sústredíme na mechanizmy prenosu svetla, problémy lomu a odrazu svetla, tlmenia a disperzie. Definovaný je tiež dôležitý pojem úplného vnútorného odrazu **TIR** (*total internal reflection*), ktorý sa využíva v optických komunikáciách.

2.1 Úvod

Svetlo ako elektromagnetickú vlnu je možné popísať kombináciou časovo premenlivých vektorov \mathbf{E} (*elektrické pole*) a \mathbf{H} (*magnetické pole*) šíriacich sa v priestore podľa Maxwellových rovníc, ktoré prezentoval James Clerk Maxwell v druhej polovici 19. storočia.

Svetlo je možné charakterizovať pomocou niekoľkých spektrálnych veličín a to:

- frekvencia ν ,
- uhlová frekvencia ω alebo vlnová dĺžka λ ,
- rýchlosť svetla vo vákuu c .

$E = m \cdot c^2$

c je univerzálna fyzikálna konštanta, jej hodnota je 299 792 458 m/s.

Obyčajne sa používa aproximovaná hodnota $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

V každom inom optickom prostredí odlišnom od vákuu fázová rýchlosť svetla v (rýchlosť, ktorou sa vrchol alebo fáza vln pohybuje) závisí od indexu lomu n prenosového média [2]:

$v = \frac{c}{n}$, kde n je možné definovať nasledujúcou rovnicou:

$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$, kde ϵ_r je relatívna elektrická permitivita a μ_r je relatívna magnetická permeabilita látky [3]. Index lomu je funkciou vlnovej dĺžky.

Vzťah medzi elektrickými, magnetickými veličinami a rýchlosťou šírenia svetla v prenosovom médiu je možné popísať nasledujúcou rovnicou:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

$E = m \cdot c^2$

Vlnovo – časticová dualita: Každá elementárna častica alebo kvantová entita vykazuje vlastnosti nielen častice ale aj vlny. Elektromagnetické žiarenie sa šíri v súlade s vlnovými rovnicami, ale môže byť vyžiarené alebo absorbované len ako diskkrétne častice - fotóny a takto sa správa súčasne ako vlna aj častica.

Energia fotónu E je úmerná jeho frekvencii a môžeme ju vypočítať pomocou Planckovho–Einsteinovho vzťahu, známeho tiež ako Planckova rovnica [4]:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

kde h je Planckova konštanta, $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Js alebo $4,1356 \cdot 10^{-15}$ eVs.

Konštanta: $hc = 1,24$ eV μ m.



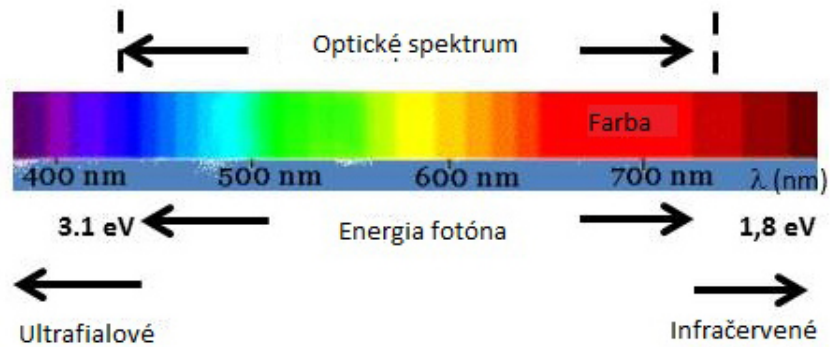
Hodnota relatívnej permitivity kremíka (oxidu kremičitého SiO_2) je $\epsilon_r = 3,9$ a relatívnej magnetickej permeability SiO_2 je $\mu_r = 0,53$. Na základe týchto veličín môžeme vypočítať index lomu kremičitého skla.

RIEŠENIE

Index lomu oxidu kremičitého SiO_2 je: $n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} = 1,4377$

2.2 Optické spektrum

Optické spektrum je pomerne malou časťou elektromagnetického spektra. Ľudské oko je schopné detekovať žiarenie v rozmedzí vlnových dĺžok od 450 nm až do 650 nm. Táto časť elektromagnetického spektra predstavuje viditeľné svetlo. Na obr. 1 je znázornené elektromagnetické spektrum. Jednotlivé farby sú priradené optickému spektru.



Obr. 1. Optické spektrum.

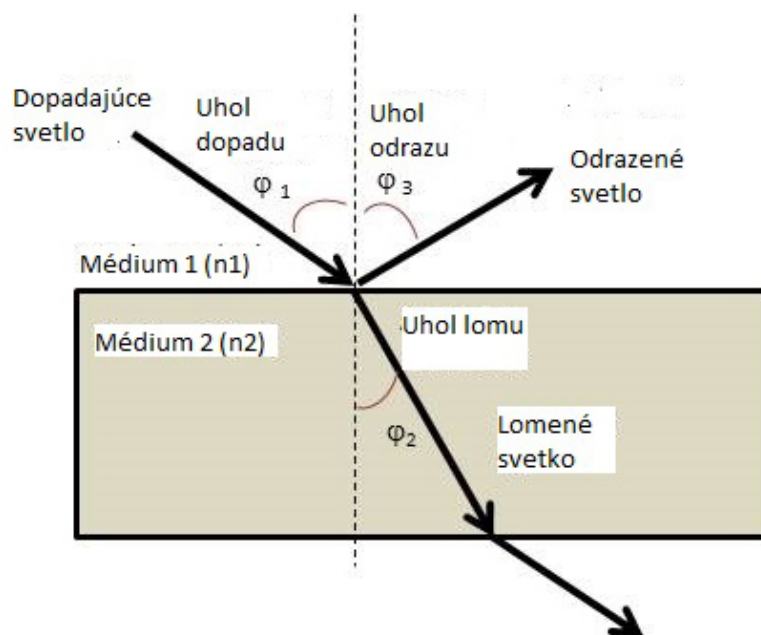
2.3 Lom, odraz, tlmenie a disperzia

Keď svetlo dopadne na rovinu rozhrania dvoch prostredí, bude v prvom prostredí prenášané svetlo a objaví sa v ňom aj odrazené svetlo. Svetlo prenášané v druhom prostredí je svetlo lomené. Veľkosti uhlov priradených prenášanému, lomenému a odrazenému svetlu sú znázornené na obr. 2.

Uhol dopadu φ_1 je rovný uhlu odrazu φ_3 .

$$E = m \cdot c^2$$

Lom je zmena smeru šírenia svetla pri prechode do materiálu s odlišnou hodnotou indexu lomu n .



Obr. 2. Uhol lomu a odrazu

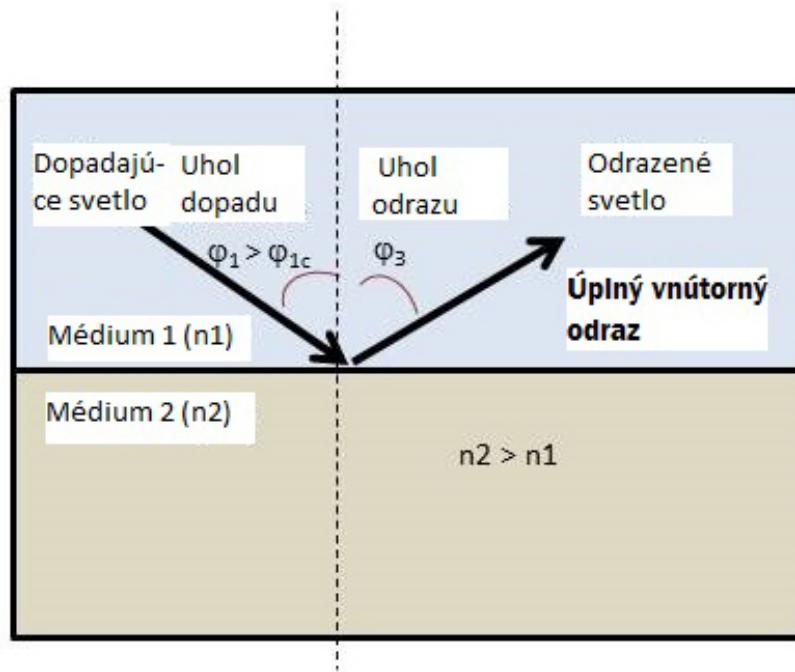
Snellov zákon uvádza vzťah medzi sínusmi uhla dopadu a uhla lomu a hodnotami indexov lomu oboch prenosových prostredí:

$$\frac{\sin(\varphi_1)}{\sin(\varphi_2)} = \frac{n_2}{n_1}$$

Pre uhol väčší ako je kritický uhol je možné pozorovať jav úplného vnútorného odrazu **TIR** (*total internal reflection*) [5]. Tento kritický uhol φ_{1c} platí pre $\varphi_2=90^\circ$.

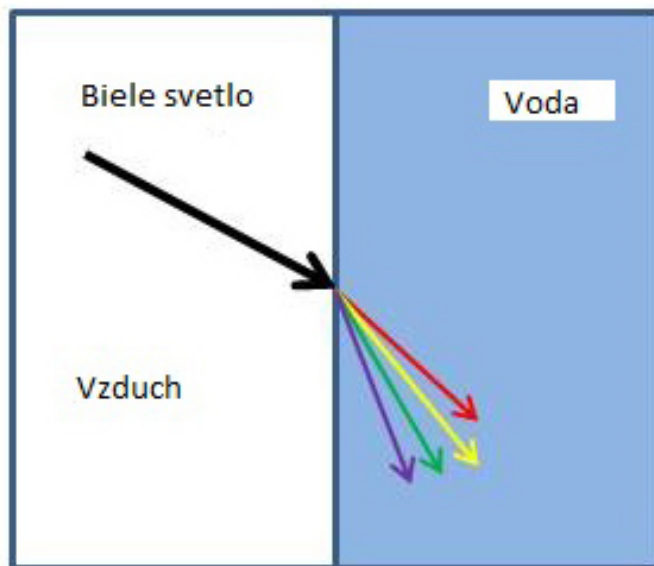
$$\varphi_{1c} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Ak svetlo dopadne na rozhranie dvoch prostredí pod akýmkoľvek uhlom, ktorý je väčší ako tento kritický uhol, nemôže vôbec preniknúť do druhého prostredia. Preto sa odrazí späť do prvého prostredia, čo je známy proces **TIR**. Uplatňuje sa v klasických vlnovodoch, akým je napríklad optické vlákno znázornené na obr. 3.



Obr. 3. Úplný vnútorný odraz (TIR)

Svetlo rôznych frekvencií sa šíri prostredím rôznymi rýchlosťami. Index lomu je navyše funkciou vlnovej dĺžky. Z tohto dôvodu dochádza v prenosovom prostredí k disperzii.



Obr. 4. Jav disperzie

Tlmenie je strata optického výkonu. Tlmenie je spôsobené hlavne absorpciou a rozptylom, ktoré spôsobujú stratu energie v smere šírenia. Merné tlmenie: Pokles výkonu v jednotkách dB vzťahnutý na jednotku dĺžky. Závisí od vlnovej dĺžky

žiarenia šíriaceho sa pozdĺž prenosového prostredia. Činiteľ tlmenia α je daný nasledujúcou rovnicou:

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \left(\frac{P(L)}{P(0)} \right)$$

kde $P(0)$ je vstupný výkon, $P(L)$ je výkon vo vzdialenosti L od miesta východiskového bodu.



Uvažujme svetelný lúč v prenosovom prostredí, ktoré má index lomu $n_1 = 1,44$. Lúč dopadá na ďalšie prostredie s indexom lomu $n_2 = 1,4$. Vlnová dĺžka svetla je $1,1 \mu\text{m}$.

Vypočítajte uhol dopadu, pri ktorom nastane jav TIR.

RIEŠENIE

Snellov zákon: $\frac{\sin(\varphi_1)}{\sin(\varphi_2)} = \frac{n_2}{n_1}$

Kritický uhol φ_{1c} je možné pozorovať pri $\varphi_2=90^\circ$, teda

$$\varphi_{1c} = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right) = \arcsin \left(\frac{1,4}{1,44} \right) = 76,5^\circ$$

3 Prenos optického žiarenia, zdroje a detektory

V tejto kapitole budú popísané hlavné zdroje optického žiarenia a detektory bežne používané v optických komunikáciách. Optické komunikácie ponúkajú mnoho výhod v porovnaní s konvenčnými spôsobmi komunikácie po medených vedeniach. Niektoré z týchto výhod budú uvedené v tejto kapitole.

3.1 Úvod

Optické komunikačné systémy prenášajú informácie pomocou svetla. V porovnaní s medenými vedeniami v elektronických komunikáciách optické vlákna umožňujú znížiť náklady a hmotnosť, majú menšie tlmenie a disperziu, navyac poskytujú väčšiu šírku pásma. Optické vlákno umožňuje vysokorýchlostný prenos dát až niekoľko terabitov za sekundu. Môže prenášať svetlo a teda aj informáciu na veľké vzdialenosti. Nevznikajú problémy súvisiace s elektromagnetickou kompatibilitou **EMC** a nehrozí nebezpečenstvo vzniku požiaru, nakoľko je eliminovaný prenos elektriny telekomunikačným kanálom.

Na obr. 5 je znázornená typická bloková schéma optického komunikačného systému. Elektrický signál (informácia) riadi zdroj optického žiarenia. Vyžiarené svetlo sa privádza do prenosového kanála, ktorým je optické vlákno, vlnovod alebo voľný priestor. Svetlo je privádzané prenosovým kanálom až na detektor pripojený ku kanálu. Detektor pretransformuje svetlo na elektrický signál a informácia je prijatá.



Obr. 5. Bloková schéma optického komunikačného systému.

3.2 Zdroje a detektory svetla

$E=m \cdot c^2$

LED : Light-Emitting Diode – svetelná dióda

Zdroje svetla sa používajú na generovanie vstupného signálu v optických komunikačných systémoch. Optické komunikačné systémy často využívajú polovodičové zdroje svetla, akými sú diódy **LED** (*light emitting diode*) a polovodičové laserové diódy **LD** (*laser diode*).

$E=m \cdot c^2$

LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – zosilnenie svetla stimulovanou emisiou

Tieto druhy polovodičových optických prvkov poskytujú vysokú účinnosť a spoľahlivosť. Navyše umožňujú presnú voľbu rozsahu vlnových dĺžok a emisných oblastí kompatibilných s rozmerom jadra optického vlákna. V nasledujúcej tabuľke sú zhrnuté hlavné charakteristiky a štruktúry **LED** a **LD** používaných v optických komunikačných systémoch s optickými vláknami.

Polovodičové zdroje svetla	Charakteristika	Štruktúry
LED	LED diódy používané v optických komunikáciách musia mať vysokú radianciu (intenzitu svetla), krátky čas odozvy a vysokú kvantovú účinnosť QE.	Planárne, kupolovité, LED vyžarujúce hranou alebo povrchom.
LD	LD používané v optických komunikáciách musia vyžarovať koherentné svetlo, šírka zväzku musí byť malá a výstupný výkon vysoký.	Spontánna emisia. Stimulovaná emisia.

Na konci optického komunikačného systému sa používajú optické senzory (detektory svetla) na obnovenie prenášanej informácie a konvertujú ju na elektrický signál pomocou fotoelektrického javu. Úlohou fotodetektora je príjem dát prenesených optickým vláknom komunikačného systému.

$E=m \cdot c^2$

Fotodetektory sú optoelektronické prvky, ktoré konvertujú dopadajúce žiarenie (svetlo) na elektrický signál (napätie alebo prúd).

Detektory svetla alebo fotodetektory sú vo väčšine prípadov realizované ako fotodiódy, fotovodivostné detektory alebo fototranzistory. Fotovodivostné detektory majú najjednoduchšiu štruktúru v podobe dvoch kovových elektród pripojených k polovodičovému materiálu. Vodivosť polovodiča sa zvyšuje, keď sú dopadajúce fotóny pohlcované v polovodiči. Výsledkom je zvyšovanie vonkajšieho prúdu, keď je k elektródam privedené napätie. Solárne články sú špecifickými fotodetektormi, ktoré sa používajú vo fotovoltaike (ako konvertory solárnej energie), ale nie v komunikačných systémoch.

$$E = m \cdot c^2$$

Fotodióda je polovodičový prvok, ktorý plní funkciu fotodetektora. Je tvorená P-N prechodom alebo P-I-N štruktúrou. Keď fotón s dostatočnou energiou dopadá na povrch fotodiódy, excituje elektrón, ktorý sa stáva pohyblivým a zároveň sa generuje kladne nabitá diera.

$$E = m \cdot c^2$$

Fototranzistory **BJT** (*bipolar junction transistors - bipolárne tranzistory*), ktoré pracujú ako fotodetektory, umožňujú aj zosilnenie fotoelektrického prúdu. Tieto prvky predstavujú polovodičové svetelné senzory vytvorené zo základného tranzistora s priehľadným krytom.

Polovodičové optické detektory	Charakteristika	Príklady štruktúr
Fotodiódy	Založené na P-N priechode.	p-n alebo P-I-N diódy APD (<i>Avalanche photodiode – lavinová fotodióda</i>). Fotodiódy s heteroprechodom.
Schottkyho prechod	Prechod je tvorený kontaktom polovodiča typu N s kovom.	Schottkyho kontakt
Solárne články	Solárne články premieňajú dopadajúce žiarenie na elektrickú energiu.	cSi (kryštalický kremík), aSi (amorfný kremík). HiT (solárny článok - tenký film s intrinsickým heteroprechodom). GaAs
Fototranzistory	Tranzistory citlivé na svetlo. Fototranzistory zosilňujúce zmeny svetla, ktoré na ne dopadá.	N-P-N BJT P-N-P BJT
Fotovodivostné detektory	Zmeny vodivosti spôsobuje absorpcia svetla.	LDR (<i>light-dependent resistor-svetlocitlivý rezistor</i>). PbS (galenit) IR (<i>infrared detector - infračervený detektor</i>). IR detektory na báze selenidu olova (PbSe).

4 Fyzikálne mechanizmy: Absorpcia, fotovodivosť, fotónová emisia

V tejto kapitole budú popísané hlavné fyzikálne mechanizmy súvisiace s problematikou konverzie energie v polovodičových materiáloch.

4.1 Absorpcia svetla

Keď sa svetlo šíri materiálom, časť energie fotónov sa premení na iné formy energie (napr. teplo). Táto stratená energia je absorbovaná materiálom. Elektróny atómov môžu prejsť do vyššieho energetického stavu a excitovať sa z valenčného pásma do vodivostného pásma vďaka absorpcii energie fotónov. Tento proces je sprevádzaný vznikom párov e^-h^+ (elektrón-diera).

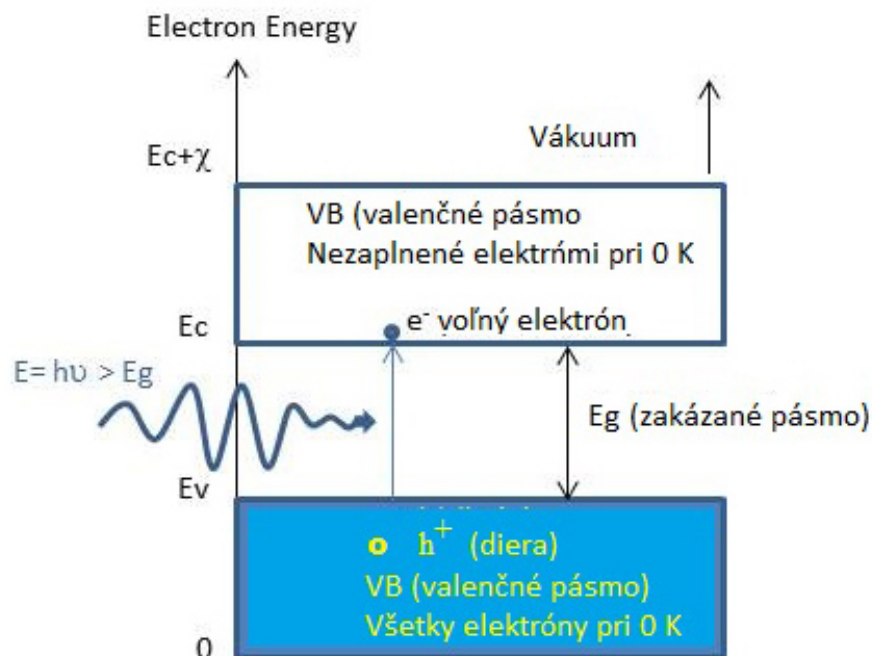
$$E = m \cdot c^2$$

Najdôležitejším javom v prípade absorpcie žiarenia v polovodiči je vznik párov e^-h^+ . Každý pohltitý fotón spôsobí prechod elektrónu z valenčného pásma do vodivostného pásma. Fotón je pohltitý v polovodiči, ak je energia fotónu väčšia ako šírka zakázaného pásma E_g materiálu.

Zakázané pásmo E_g je rozdiel energie vyjadrený v jednotkách eV (elektrónvolty) medzi hornou časťou valenčného pásma a spodnou časťou vodivostného pásma v izolantoch a polovodičoch. Elektrónová afinita polovodiča χ je šírka vodivostného pásma vyjadrená v eV. Fermiho energia E_F indikuje najvyšší energetický stav, ktorý je možné obsadiť pri teplote 0 K. Energetické stavy položené vyššie než E_F sú prázdne až po úroveň vákuua.

$$E_g = E_c - E_v$$

kde E_c a E_v sú energie zodpovedajúce hornej časti valenčného pásma a spodnej časti vodivostného pásma. Na obr. 6 je znázornený mechanizmus absorpcie a energetický pásmový diagram.



Obr. 6. Pásmový diagram a znázornenie mechanizmu absorpcie fotónu.

Typické vlastnosti niektorých polovodičov pri teplote 300 K

Polovodič	E_g (eV)	χ (eV)
kremík: Si	1,11	4,05
arzenid gália: GaAs	1,42	4,07
germánium: Ge	0,66	4,13
fosfid india: InP	1,35	4,5
fosfid gália: GaP	2,26	3,8

Pre každú vlnovú dĺžku λ dopadajúceho svetelného zväzku I_0 , ktorý prechádza materiálom sa intenzita zväzku I zníži rozptylom a absorpciou. Lambertov zákon určuje prenos a absorpciu:

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha L}$$

kde α je koeficient absorpcie; α (m^{-1}) je funkciou λ .

4.2 Fotovodivosť a fotoelektrický jav

$$E = m \cdot c^2$$

Fotovodivosť je optoelektrický jav, keď sa materiál stáva elektricky vodivým v dôsledku absorpcie elektromagnetického žiarenia, napr. svetla.

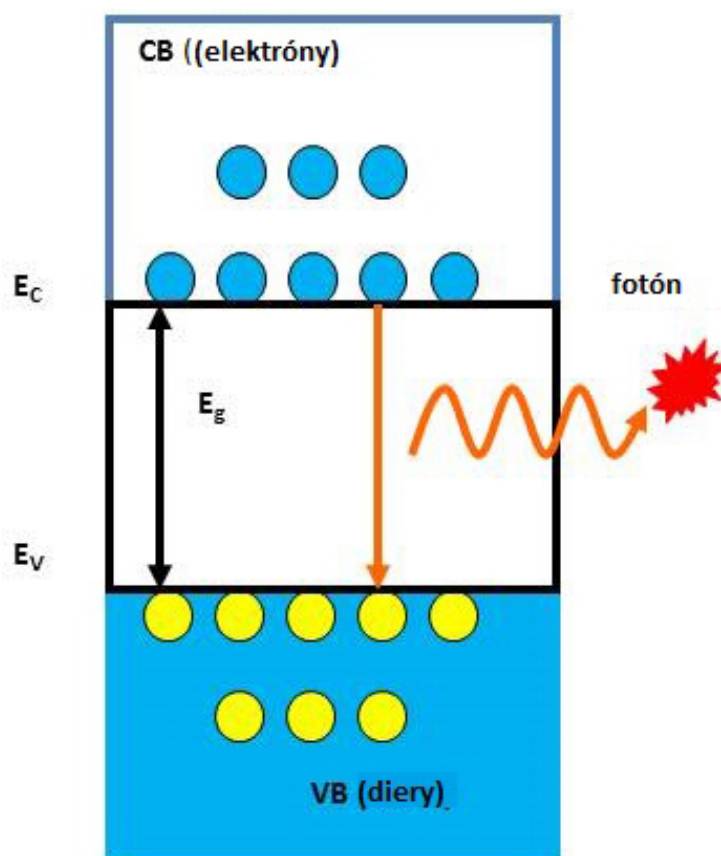
$$E = m \cdot c^2$$

Fotoelektrický jav: Mnoho kovov emituje elektróny, keď sú ožiarené. V prípade fotoemisie, keď elektrón v materiáli pohltí energiu fotónu a dodaná energia je väčšia ako energia potrebná na opustenie materiálu, bude emitovaný.

Albert Einstein dostal Nobelovou cenou v roku 1921 za výskum fotoelektrického javu. Energia potrebná na emitovanie elektrónu je v literatúre známa ako výstupná práca kovu ϕ .

$$E = m \cdot c^2$$

Emisia fotónu: Ak elektrón padne na nižšiu energetickú hladinu, kde sa stretne s dierou, uvoľní kvant energie v podobe fotónu. Vlnová dĺžka fotónu závisí od šírky pásma medzi dvomi hladinami polovodiča. Svetlo sa vyžaruje ako násobok istej minimálnej jednotky energie. Veľkosť tejto jednotky je práve energia fotónu.



Obr. 7. Emisia fotónu.



Energia fotónu je: $E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$, kde c je rýchlosť svetla vo vákuu.

Vypočítajte rozsah vlnových dĺžok, ktoré nie sú absorbované germániom Ge, uvažujte šírku zakázaného pásma $E_g = 0,66 \text{ eV}$.

RIEŠENIE

Absorpcia svetla v polovodiči spôsobuje vznik páru e^-h^+ , keď je energia dopadajúcich fotónov väčšia ako šírka zakázaného pásma (energetická vzdialenosť dvoch hladín) materiálu E_g . Pre Ge je minimálna hodnota energie pohlteneho fotónu:

$E = h\frac{c}{\lambda} > E_g(\text{Ge}) = 0.66 \text{ eV}$. Fotóny o vlnovej dĺžke: $\lambda < h\frac{c}{E_g(\text{Ge})}$ budú pohltené v polovodiči.

Predpokladáme, že $hc = 1,24 \text{ eV}\mu\text{m}$. Maximálna hodnota vlnovej dĺžky fotónu pre uvoľnenie páru e^-h^+ z Ge je: $\lambda < 1878 \text{ nm}$.



Všetky fyzikálne javy popísané v tejto kapitole majú špecifické aplikácie v optoelektronike a príbuzných fyzikálnych vedách.

5 Optoelektronické prvky a senzory

V tejto kapitole sú popísané hlavné optoelektronické prvky a senzory, ktoré súvisia s najvýznamnejšími aplikáciami fotoniky. Niektoré základné koncepty fyziky polovodičov sú uvedené za účelom pochopenia vnútorných charakteristík a vlastností týchto prvkov, jedná sa hlavne o priamu konverziu medzi elektrónmi a fotónmi.

5.1 Úvod

Optoelektronické prvky a svetelné senzory sa vyrábajú s použitím polovodičových materiálov.

$E = m \cdot c^2$

Polovodičový materiál má hodnotu elektrickej vodivosti medzi hodnotou vodivosti kovu (napr. meď) a izolantu (napr. sklo).

Elektrická vodivosť polovodičového materiálu rastie s teplotou, teda opačne ako v prípade kovov. **Si** (*silicon - kremík*) je polovodič, ktorý sa v súčasnosti používa v elektronických aplikáciách. Vlastné polovodiče alebo polovodiče typu I sú čisté polovodiče, v materiáli nie sú žiadne dotovacie látky (nedotované). Počet nosičov náboja, elektrónov a dier je preto daný vlastnosťami materiálu. Vo vlastných polovodičoch je počet excitovaných elektrónov a počet dier rovnaký:

$n = p = n_i$ (nosiče cm^{-3}), hodnota n_i závisí od šírky zakázaného pásma E_g polovodiča a mení sa s teplotou:

$$n_i = AT^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$$

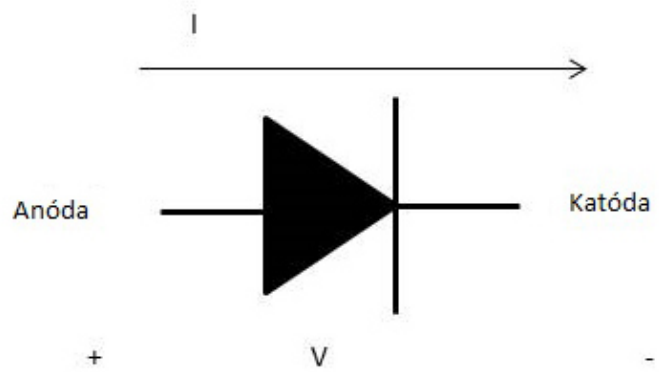
kde T je teplota v jednotkách K, k_B je Boltzmannova konštanta: $k_B = 8,62 \cdot 10^{-5}$ eV/K a A je konštanta.

Polovodičové prvky sa vyznačujú širokou škálou užitočných vlastností, akými sú lepšie vedenie prúdu v jednom smere ako v opačnom smere, vykazujú premenlivý odpor, citlivosť na svetlo alebo teplo. Pridaním prímiesí do polovodičového kryštálu sa vlastný polovodič stáva nevlastným, teda takým polovodičom, v ktorom koncentrácia jedného typu nosičov náboja (elektrónov alebo dier) je omnoho vyššia. Keď je koncentrácia elektrónov omnoho väčšia ako koncentrácia dier, takýto polovodič je polovodičom typu N. Keď je hustota dier väčšia ako elektrónov, jedná sa o polovodič typu P.

Niektoré senzory a prvky popísané v tejto kapitole využívajú princíp P-N priechodu.

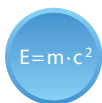
$E = m \cdot c^2$

Prechod P-N predstavuje hranicu alebo rozhranie dvoch typov polovodičových materiálov, typu P a typu N vo vnútri polovodičového kryštálu. Diódy sú polovodičové prvky tvorené polovodičovým materiálom s P-N prechodom, pripojeným k dvom elektrickým prívodom.

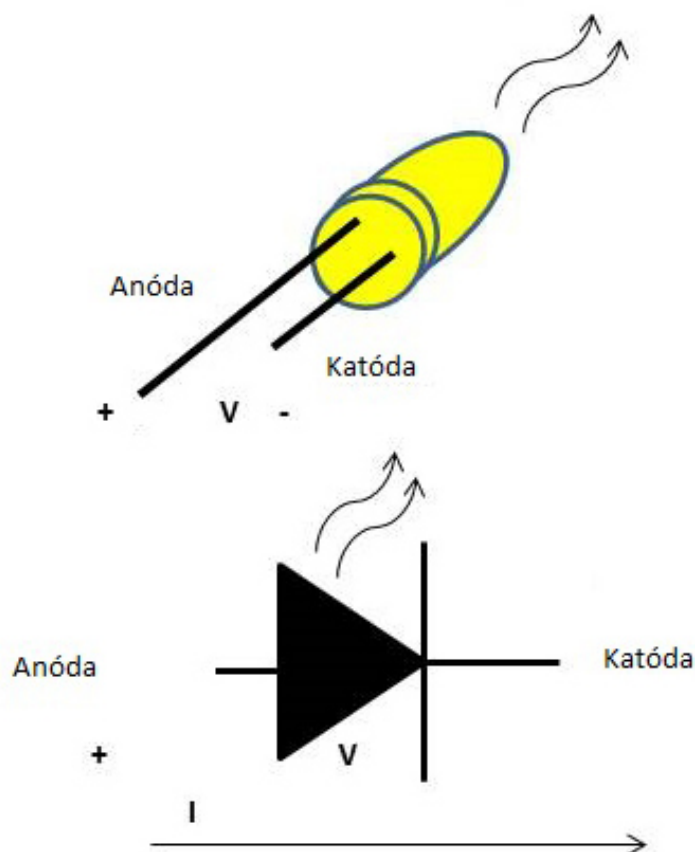


Obr. 8. Elektronický symbol diódy.

5.2 Diódy LED



LED (*Light-emitting diode*) je polovodičová dióda, ktorá vyžaruje nekoherentné úzkospektrálne svetlo, keď je na jej P-N prechod privedené kladné napätie.



Obr. 9. LED.

V normálnom stave je prázdne vodivostné pásmo **CB** (*conduction band*) polovodiča zaplnené elektrónmi, ktoré sú injektované po priložení kladného napätia alebo pri pretekaní prúdu prechodom. Ako bolo uvedené v kapitole 4, keď sa elektrón stretne s dierou, prejde na nižšiu energetickú hladinu a tak uvoľní kvant optického žiarenia v podobe fotónu. Takýto spôsob emisie fotónov využívajú diódy LED. Keď elektrón môže prejsť na nižšiu hladinu samovoľne, proces emisie fotónu sa nazýva **spontánnou emisiou**.

Svetlo sa generuje, ak elektrón rekombinuje s dierou. Vlnová dĺžka generovaného žiarenia závisí od šírky zakázaného pásma E_g polovodiča. V nasledujúcej tabuľke prezentujeme farby priradené vlnovým dĺžkam svetla vyžiareného diódami LED, vyrobenými z rôznych polovodičových materiálov.

LED diódy vyrobené z polovodičov vykazujúcich priame zakázané pásmo vyžarujú viac svetla ako diódy vyrobené z polovodičov s nepriamym zakázaným pásmom.

Polovodičové materiály a farby LED

Polovodič	Farba	Jas
GaAs; GaAlAs	Infračervená	Stredný (priemerný)
GaAs; AlGaAs; GaP	Červená	Stredný (priemerný)
GaN	Modrá	Stredný (priemerný)
GaP	Zelená	Stredný (priemerný)
GaAlAs; GaAsP; InGaAlP;	Červená	Vysoký (výborný a extrémny)
GaN	Modrá	Vysoký (výborný a extrémny)
GaP ; InGaN	Zelená	Vysoký (výborný a extrémny)
InGaAlP; GaAsP	Žltá	Vysoký (výborný a extrémny)

LED diódy sa uplatňujú v mnohých aplikáciách optoelektroniky ako sú displeje, zdroje osvetlenia v pevnej fáze, diaľkové ovládače, optické komunikácie. V posledných rokoch sa diódy LED bežne používajú ako svetelné zdroje v integrovaných LED žiarovkách a svetidlách. Na trhu sú dostupné rôzne LED diódy podľa požadovanej aplikácie. Na regulovanie požadovaného uhla vyžarovaného zväzku sú súčasťou puzdra LED niektoré druhy šošoviek. Tento uhol je jednou z charakteristík, ktoré uvádza výrobca v katalógovom liste. Medzi ďalšie parametre uvádzané v katalógoch je možné zaradiť intenzitu svietivosti (mcd), svetelný tok (lm), hlavnú vlnovú dĺžku (nm) a farbu. Špecifické hodnoty (typické a prahové) elektrických parametrov sú V_f (napätie v priepustnom smere), I_f (prúd v priepustnom smere) a tieto veličiny výrobca tiež uvádza.

Energetická účinnosť LED diód η sa typicky uvádza ako podiel vstupného výkonu a svetla na výstupe – alebo viac technicky: Vyžiarený tok (Lumeny) treba vydeliť príkonom (Watty). Komerčne dostupné LED diódy majú účinnosť v rozsahu 50–70 %.



Obr. 10. Infračervená dióda LED.

5.3 Laserové diódy LD


$$E = m \cdot c^2$$

Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) - Energia dopadajúceho fotónu, $E = h\nu$, stimuluje proces emisie prechodom elektrónu na nižšiu energetickú hladinu. Tento proces umožňuje zosilnenie fotónov. Jeden dopadajúci fotón má za následok dva fotóny, ktoré sa šíria rovnakým smerom a majú rovnakú vlnovú dĺžku a fázu.

LED diódy popísané v predchádzajúcej kapitole využívajú jav spontánnej emisie, kým **LD** využívajú jav stimulovanej emisie žiarenia.

Aby sa dosiahlo zosilnenie svetla stimulovanou emisiou, musí byť pravdepodobnosť emisie fotónu väčšia ako pravdepodobnosť absorpcie pre príslušný rozsah spektra. Keď je stimulovaná emisia dominantná, svetlo je zosilňované a laser pracuje. Stimulovaná emisia je dominantným mechanizmom keď pravdepodobnosť, že sa elektrón nachádza vo vodivostnom pásme je väčšia ako pravdepodobnosť, že elektrón je vo valenčnom pásme. Táto situácia nastáva v stave populačnej inverzie. Populačná inverzia sa dosiahne vtedy, keď rozdiel medzi Fermiho energiou elektrónov E_{FN} a Fermiho energiou dier E_{FN} je väčší ako je zakázané pásmo E_g . Na oddelenie týchto Fermiho energetických hladín je potrebné čerpať energiu v podobe elektrického prúdu v polovodiči. Toto **čerpanie** lasera nastane, keď je injektovaný prahový prúd, polovodič prejde do stavu populačnej inverzie.

Optické dutinové rezonátory, ako napríklad **FP** (*Fabry-Perot*) alebo dielektrické zrkadlá **DBR** (*distributed Bragg reflector*) obsahujúce laser medzi dvomi odrazajúcimi povrchmi, sa používajú ako optické rezonátory. V stave rovnováhy je možné v optickej dutine pozorovať stacionárne **elektromagnetické** oscilácie. Tieto oscilácie vznikajú na odrazových plochách optickej dutiny. Optická dutina má osi kolmé na smer pretekania prúdu. Pri každom odraze vlna čiastočne prechádza odrazajúcimi povrchmi. Oscilácie lasera začínajú vtedy, keď sa veľkosť zosilnenia rovná celkovej veľkosti strát spôsobených stenami rezonátora, rozptylom v prenosovom médiu a absorpciou v kryštáli.

Rozlišujeme dva hlavné typy LD: diódy emitujúce hranou alebo povrchom. Laserové diódy emitujúce hranou sa vyznačujú širokou a astigmatickou emisiou. Povrchom emitujúce laserové diódy vyžarujú užší zväzok.

VCSEL (*vertical cavity surface emitting lasers*) sú lasery s veľmi krátkou aktívnou oblasťou, ktoré majú hlavnú os optického rezonátora pozdĺž smeru pretekania prúdu.

V týchto laseroch emisia žiarenia nastáva v smere kolmom na aktívnu oblasť. VCSEL umožňuje prenos dát s rýchlosťou až 10 Gbs⁻¹.


$$E = m \cdot c^2$$

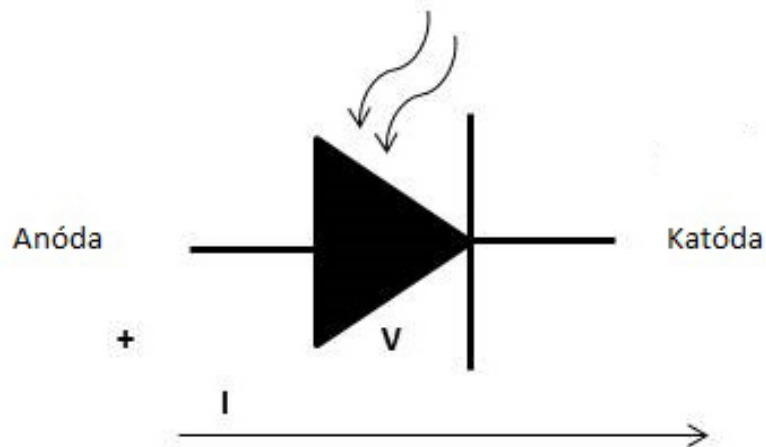
EOM (*elektrooptický modulátor*) je optoelektronický prvok, ktorý sa používa na riadenie výkonu, fázy a polarizácie laserového zväzku pomocou elektrického riadiaceho signálu.

LD sú najbežnejšími druhmi laserov, ktoré sa používajú v širokom rozsahu aplikácií. Vyznačujú sa malými rozmermi, nízkou cenou a dlhou životnosťou. LD je prvok vhodný pre viaceré aplikácie, akými sú okrem iného optické komunikácie, čítačky čiarových kódov, laserové ukazovadlá, čítačky a zapisovače CD/DVD/Blu-ray, laserové skenery a tlačiarne, smerové zdroje osvetlenia.

5.4 Fotodiódy - PD

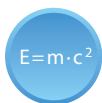
$$E = m \cdot c^2$$

Fotodióda je polovodičový prvok, ktorý konvertuje svetlo na elektrický prúd. Prúd sa generuje, keď je fotón absorbovaný fotodiódou. Konštrukcia fotodiódy vychádza z P-N prechodu alebo štruktúry P-I-N. Keď fotón s dostatočnou energiou zasiahne diódu, tá excituje elektrón. Týmto spôsobom vzniká pohyblivý elektrón a kladne nabitá elektrónová diera.



Obr. 11. Fotodióda.

5.5 Solárne články



Solárny článok (fotočlánok) je prvok, ktorý konvertuje dopadajúce svetlo na elektrickú energiu.

Polovodičové solárne články môžu byť s jednoduchými P-N prechodmi, heteroprechodmi alebo viacprechodové.

Hlavné polovodiče používané na výrobu solárnych článkov sú Si a GaAs.

Účinnosť solárnych článkov je daná pomerom maximálneho elektrického výkonu a celkového výkonu dopadajúceho svetla.

$$\eta = \frac{V_m I_m}{G A}$$

kde V_m a I_m sú súradnice bodu **MPP** (*maximum power point – bod maximálneho výkonu*) na výstupe prvku, G je ožiarenie (W/m^2) a A je efektívna plocha prvku.

Solárne články na báze kryštalického Si dosahujú účinnosť do 25 % a viacprechodové solárne články pracujúce so sústredeným svetlom vykazujú účinnosť do 43,5 %.

Účinnosť solárnych článkov a hlavné parametre týchto prvkov sú udávané výrobcami ako **STC** (*standard conditions of work – normálne podmienky činnosti*): AM1.5 spektrum, $G = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$ a $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Solárne články prepojené do série tvoria fotovoltické moduly. Fotovoltický modul sa skladá z jedného alebo niekoľkých paralelných prepojení.

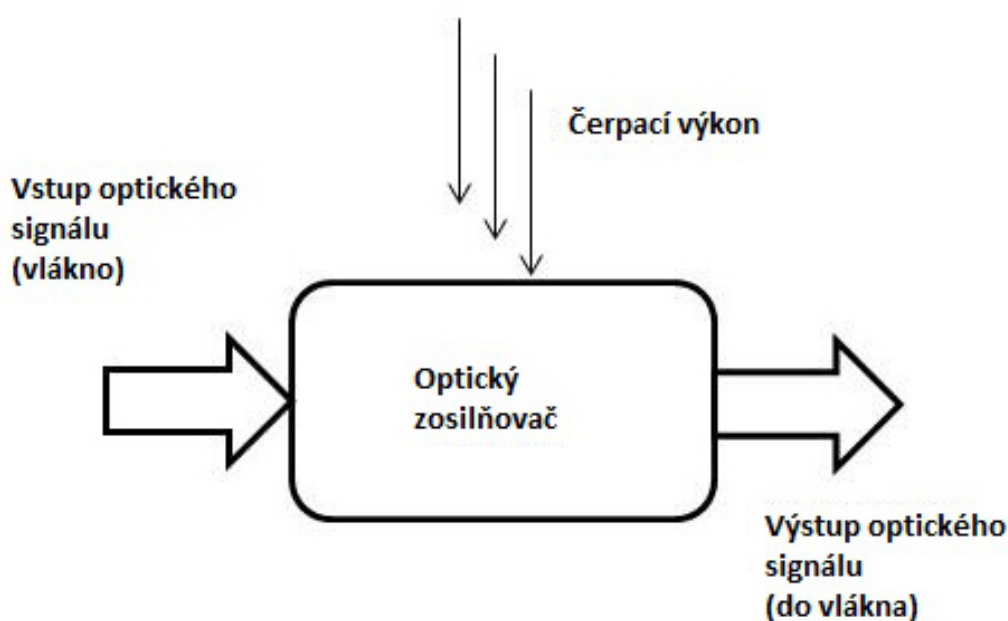
5.6 Optické zosilňovače

Aby bolo možné prenášať signál na veľké vzdialenosti (>100 km), je potrebné kompenzovať straty spôsobené tlmením v optickom vlákne (optickom prenosovom kanáli). Toto je úlohou optického zosilňovača.

Typické optické vlákno má na vlnovej dĺžke 1,5 μm stratu približne 0,2 dB/km. Existuje možnosť konvertovať optický signál na elektrický a použiť konvenčné elektronické zosilňovače na kompenzovanie prenosových strát a následne konvertovať tento signál späť na optický signál. Takéto konverzie signálu sú nákladné a vyžadujú veľmi rýchle elektronické prvky.

$E = m \cdot c^2$

Optický zosilňovač zosilňuje priamo optický signál bez nutnosti jeho konverzie na elektrický signál.



Obr. 12. Schéma optického zosilňovača

Hlavné charakteristiky optických zosilňovačov sú: zisk (dB), rozsah prevádzkových frekvencií alebo **BW** (*bandwidth – šírka pásma*), saturácia zisku, maximálny výstupný výkon, úroveň šumu na výstupe. Zisk je definovaný nasledujúcou rovnicou:

$$G = \frac{P_o}{P_i}, \text{ kde } P_o \text{ a } P_i \text{ sú výstupný a vstupný výkon.}$$

Existujú tri hlavné druhy optických zosilňovačov: **EDFA** (*Erbium Doped Fibre Amplifier - erbiom dopované optické vlákno*), **SOA** (*semiconductor optical amplifier - polovodičový optický zosilňovač*) a Ramanov zosilňovač. V zosilňovači EDFA je zosilňujúcim médiom sklenené optické vlákno dotované iontami erbia,

ktorým je dodávaná energia optickým čerpaním, aby sa dosiahol stav populačnej inverzie. Zosilňovače SOA sú napájané elektrickým prúdom a zosilnenie vzniká v nedotovanom polovodiči. Optické zosilňovače sú veľmi užitočné v lokálnych sieťach pre ich pomerne nízke ceny a dostatočný zisk pre krátke vzdialenosti.

V prípade Ramanovho zosilňovača je zisk dosiahnutý pomocou stimulovaného Ramanovho rozptylu - **SRS** (*stimulated Raman scattering*). Ramanov rozptyl je jav, pri ktorom sa svetlo rozptyľuje na molekulách z menšej vlnovej dĺžky na väčšiu vlnovú dĺžku.

Vybrané druhy optických zosilňovačov	Charakteristika	Nevýhody
SOA (polovodičový) 400 – 2000 nm	Podobný polovodičovým laserom. Široké prenosové pásmo a veľký výkonový zisk.	Vysoký šum a presluchy.
Optovláknové zosilňovače dotované iontami vzácnych zemín erbium – EDFA 1500 nm Praseodymium – PDFA 1300 nm	Zosilnenie je dosiahnuté procesom stimulovanej emisie Zisk závisí od frekvencie a intenzite lokálneho zväzku.	Pomerne veľké fyzické rozmery zariadenia. Presluchy a saturácia zisku. Šum spontánnej emisie.
Ramanove a Brillouinove zosilňovače	Nevyžaduje dosiahnutie populačnej inverzie.	Čerpací zdroj a zosilnený signál majú rôzne vlnové dĺžky. Vysoké náklady.

6 Vlákňová optika: princíp a klasifikácia, módy šírenia. Fotonické kryštály

Optické vlákno sa používa ako komunikačný kanál v optických komunikáciách. V tejto kapitole sú popísané hlavné charakteristiky optického vlákna za účelom pochopenia výhod optických vláken v porovnaní s konvenčným chápaním komunikačného kanála v dátových komunikáciách, kde nachádza uplatnenie jednak v chrbticovej infraštruktúre a tiež v ethernetových systémoch, širokopásmovej distribúcii alebo dátových sieťach vysokej kvality.

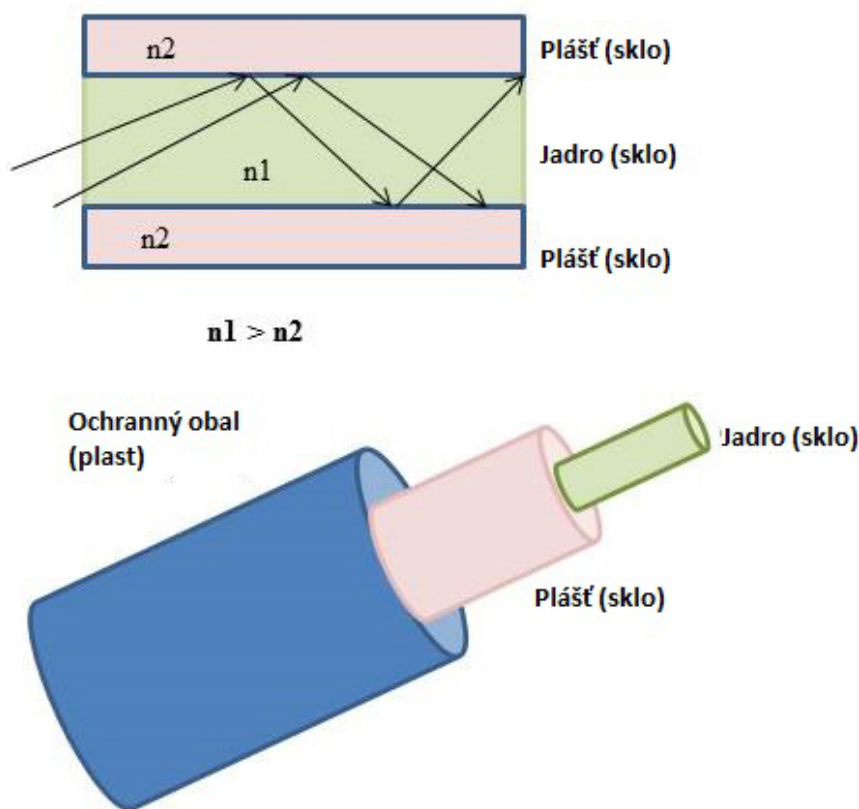
6.1 Optické vlákno

$$E = m \cdot c^2$$

Optické vlákno je flexibilné, transparentné vlákno vyrobené zo skla (napr. kremičitého) alebo plastu trochu hrubšieho ako ľudský vlas. Optické vlákna sa používajú ako prenosové médium v telekomunikáciách.

Optické vlákna sa používajú ako optické komunikačné kanály pre veľkú šírku prenosového pásma, rýchlosti prenosu dát rádovo Gb/s a veľkú prenosovú kapacitu. Tisíciky kanálov je možné spolu zmultiplexovať do jedného optického vlákna. Navyše sa optické vlákna vyznačujú veľmi malým tlmením, približne 0,2 dB/km a relatívne nízkymi nákladmi. Všetky tieto charakteristiky sú dôvodom veľkého záujmu ich použitia v oblasti optických komunikácií na veľké vzdialenosti.

Na obr. 13 je zobrazená štruktúra optického vlákna. Tenký stred skleneného vlákna, ktorým prechádza svetlo sa nazýva jadro. Vonkajší optický materiál okolo jadra tvorí plášť, ktorý odráža svetlo späť do jadra. Vonkajší obal tvorí ochrannú vrstvu.



Obr. 13. Optické vlákno.

Optické vlákno má strednú oblasť – jadro, ktoré má vyšší index lomu n_1 ako má vrstva okolo neho – plášť n_2 . Keď svetlo dopadá na rozhranie pod ľubovoľným uhlom väčším ako kritický uhol φ_{lc} (pozri podkapitolu 2.3), v tom prípade svetlo neprejde do plášťa a je odrazené späť do jadra, mechanizmom TIR sa bude šíriť ďalej v štruktúre jadra optického vlákna.



Optické vlákno má jadro z čistého Si, ktorý má index lomu:

$n = 5,57$ pre vlnovú dĺžku $0,4 \mu\text{m}$ a $n = 3,78$ pre vlnovú dĺžku $0,7 \mu\text{m}$.

Vypočítajte čas potrebný pre svetlo oboch vlnových dĺžok, ktoré prejde vzdialenosť 2 km v optickom vlákne.

RIEŠENIE

Rýchlosť svetla rôznych vlnových dĺžok v jadre vlákna je rozdielna z dôvodu odlišných hodnôt indexu lomu pre tieto vlnové dĺžky. Táto rýchlosť je daná ako:

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

V prvom kroku vypočítame rýchlosť pre každú vlnovú dĺžku:

$$v_1(\lambda = 0,4 \mu\text{m}) = \frac{c}{n(0,4 \mu\text{m})} = \frac{3,10^8 \text{ ms}^{-1}}{5,57} = 5,39 \cdot 10^7 \text{ ms}^{-1}$$

$$v_2(\lambda = 0,7 \mu\text{m}) = \frac{c}{n(0,7 \mu\text{m})} = \frac{3,10^8}{3,78} \text{ ms}^{-1} = 7,94 \cdot 10^7 \text{ ms}^{-1}$$

Ďalej vypočítame čas potrebný na prejdienie 2 km nasledovne:

$$t_1 = \frac{x}{v} = \frac{2000}{5,39 \cdot 10^7} \text{ s} = 37,1 \mu\text{s}$$

$$t_2 = \frac{x}{v} = \frac{2000}{7,94 \cdot 10^7} \text{ s} = 25,2 \mu\text{s}$$

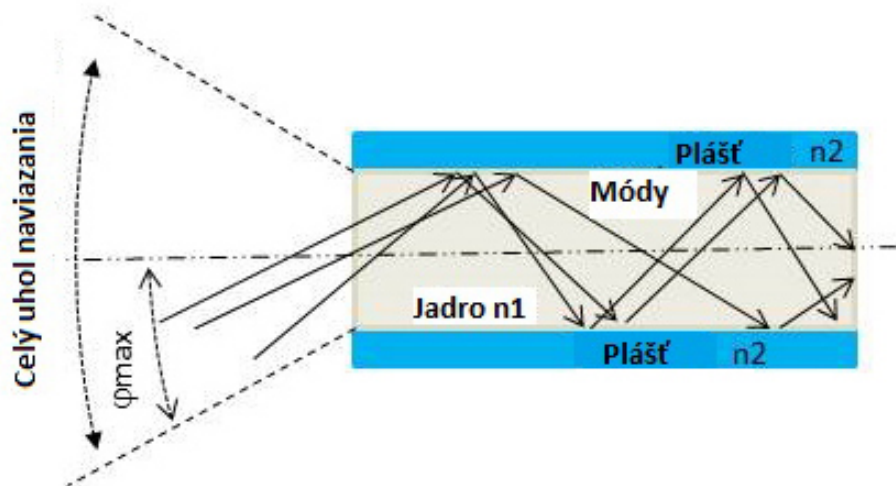
Mnohomódové vlákna sú vlákna, ktoré môžu prenášať viac ako jeden mód svetla špecifickej vlnovej dĺžky. Niektoré vlákna majú veľmi malý priemer jadra a môžu prenášať len jeden mód – jedná sa o jednomódové vlákna, v ktorých je signál vedený priamočiaro v strede jadra. Aby sa dosiahlo šírenie vlny pozdĺž vlnovodu, je potrebné využiť konštruktívnu interferenciu, keď všetky lúče navzájom interferujú. Prípustné sú len určité hodnoty uhlov. Každý povolený uhol predstavuje mód šírenia.

Maximálny uhol naviazania do vlákna určuje kužeľ svetla, ktorý určuje svetlo vstupujúce do vlákna, ktoré sa šíri vo vlákne rôznymi módmi šírenia. Polovica tohto uhla kužeľa predstavuje uhol naviazania ϑ

max, ktorý je odvodený výlučne z hodnôt indexu lomu. Parameter **NA (numerická apertúra)** vlákna je daný nasledujúcou rovnicou:

$$NA = n \cdot \sin(\varphi_{\text{max}}) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

kde n je index lomu média, v ktorom sa svetlo šíri pred naviazaním do optického vlákna.



Obr. 14. Módy šírenia a uhol naviazania

$E = m \cdot c^2$

Počet módov šírenia M závisí od parametrov vlákna nasledovne:

$M = \frac{V^2}{2}$, kde V je číslo alebo normalizovaná frekvencia, definovaná nasledujúcou rovnicou:

$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$, kde $2a$ je hrúbka jadra vlákna.

Ak je $V < 2,495$, vo vlákne sa šíri len jeden mód šírenia, základný mód, vlákno je jednomódové **SMF** (*single mode fibre*). Pre hodnoty $V > 2,495$ vlákno je viacmódové.

Hlavným zdrojom strát vo vlákne je absorpcia a rozptyl. Rayleighov rozptyl z dôvodu mikroskopických nehomogenít vlákna je zdrojom vnútorných strát. Absorpcia je spôsobená prítomnosťou nečistôt v materiáli vlákna. V optických vláknoch vyrobených z oxidu kremičitého (SiO_2) je možné pozorovať tri hlavné maximá tlmenia spôsobené absorpciou iontami OH^- na vlnovej dĺžke 1050 nm, 1250 nm a 1380 nm.

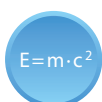
Ďalším zdrojom strát vo vlákne sú ohyby. Časť žiarenia sa stráca v miestach ohybu vlákna. Miera strát závisí od polomeru ohybu. Ak je polomer ohybu porovnateľný s priemerom vlákna vrátane rozmeru plášťa D , hovoríme o mikroohyboch, keď je polomer ohybu väčší ako D , jedná sa o makroohyby. Makroohyby vznikajú, keď je vlákno ohnuté v procese inštalácie prípojky, napríklad ohnutím vlákna na rohoch stien. Mikroohyby naopak vznikajú pri procese výroby vlákna ako dôsledok zmien geometrie vlákna na pomerne malých dĺžkach.

Druhy optických vláken	Charakteristika
Plastové	Tlmenie $\sim 10^2$ dB/km Veľmi flexibilné, lacné, ľahké
Ostatné sklenené	Látky: chalkogenidové sklá, fluorohlinitany Používajú sa pre komunikáciu na väčších vlnových dĺžkach
Kremíkové (SiO ₂)	Umožňujú dosiahnutie extrémnej čistoty skla a môžu byť dotované za účelom dosiahnutia požadovanej hustoty. Nízke tlmenie a disperzia na vlnovej dĺžke $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$

Dve vlákna je možné navzájom spojiť len ak sú kompatibilné. Vlákná by mali byť presne navzájom vyrovnané, musia mať prispôbenú numerickú apertúru NA a konce vlákien by mali byť v tesnej blízkosti.

Porovnanie optických vlákien, koaxiálnych káblov a krútených párov:

Výhody	Nevýhody
Absencia elektromagnetickej interferencie.	Vysoké počiatkové náklady pri inštalácii.
Nižšie tlmenie ako u koaxiálnych káblov alebo krútených párov. Je možné kombinovať s nízkovýkonovými vysielačmi.	Komunikačné systémy bod-bod.
Nevyžaduje sa ochrana zemnením a nie sú problémy s napätím.	Spájanie a zváranie vlákien nie je jednoduché. Pridanie ďalších bodov trasy je problematické.
Vysoká bezpečnosť signálu, nakoľko vlákno nevyžaruje energiu ako anténa a detektory nedetekujú okolo neho pole.	Flexibilnejšie ako koaxiálne káble.
Veľká šírka pásma.	Drahšie opravy a údržba.



Fotonický kryštál je umelá viacrozmerná periodická štruktúra, ktorá sa vyznačuje periódou rádovo vlnových dĺžok svetla. Tieto materiály sú štruktúrované tak, aby mohli periodicky modulovať index lomu.

Na základe fotonických kryštálov je možné vyrábať optické vlákna. V týchto vláknach je jadro a plášť tvorené rovnakým materiálom, obvyčajne kremíkom. Jedna z vrstiev, jadro alebo plášť, obsahujú vzduchové dutiny. Druhá vrstva je dokonale tuhá. Prítomnosť vzduchových dutín v plášti spôsobí zníženie efektívneho indexu lomu voči jadru, ktoré tieto dutiny neobsahuje.

Fotonickým kryštálom je tiež možné potlačiť spontánnu emisiu.

7 Aplikácie: optické komunikácie, biofotonika, optické snímanie, osvetlenie a energia

V tejto kapitole sú popísané hlavné aplikácie optoelektroniky. Za zmienku stojí skutočnosť, že na optoelektronickom trhu sa každý rok objavujú nové aplikácie. Trh optoelektroniky rastie o 30% ročne od roku 1992.

7.1 Aplikácie optoelektroniky

Hlavné aplikácie optoelektroniky sú zhrnuté v nasledujúcej tabuľke.

Aplikácie optoelektroniky.

Aplikácia	Popis
Komunikácie po optických vláknach <ul style="list-style-type: none"> • Telekomunikácie • Počítačové siete • Káblová TV 	Vlákňová optika sa používa ako prenosový informačný kanál pre priaznivé charakteristiky: nízke finančné náklady, hmotnosť, tlmenie a disperzia a poskytujú veľkú šírku pásma. Ďalšie optoelektronické prvky, ako sú napríklad LD, fotodetektory, senzory, optické zsilňovače, optické modulátory a demodulátory, multiplexory a demultiplexory, tvoria podstatnú časť optického komunikačného systému. Optický prenos dát sa tiež využíva v riadiacich zariadeniach a v priemyselnej automatizácii.
Spotrebná elektronika	Široké spektrum spotrebnej elektroniky obsahuje fotodetektory, LED, CCD senzory, fotodiódy, fototranzistory, atď. <ul style="list-style-type: none"> • Počítače, tlačiarne • Čítačky CD • Termovízia • Kamery a displeje • Smartfóny • Obrovské pamäťové čipy
LD, laserové diódy	Hlavnými aplikáciami LD sú telekomunikácie po optických vláknach, kde slúžia ako žiariče svetla. Ďalšie aplikácie LD sú nasledujúce: <ul style="list-style-type: none"> • Rezanie, chirurgia • Záznam a čítanie CD • Optické pamäte • Obrana: radary, opticky navádzané zbrane
Osvetľovanie, LED.	Diódy LED je možné použiť na osvetľovanie v mnohých oblastiach aplikácií. <ul style="list-style-type: none"> • Obytné oblasti, budovy • Dopravná signalizácia, pouličné svetlá • Vonkajšie aplikácie: pristávacie dráhy na letiskách • Digitálne hodiny, elektronické ukazovatele
Solárne články	Fotovoltické systémy <ul style="list-style-type: none"> • Nízkovýkonové aplikácie: vreckové kalkulačky, hodiny, vnútorné a vonkajšie osvetlenie • Samostatné fotovoltické systémy • Sieťové fotovoltické systémy • Letecké aplikácie