



TECH pedia



OPTOELEKTRONIKA, FOTONIKA A SENZORY

SANTIAGO SILVESTRE

Název díla: Optoelektronika, fotonika a senzory
Autor: Santiago Silvestre
Přeložil: Michal Lucki
Vydalo: České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Kontaktní adresa: Technická 2, Praha 6
Tel.: +420 224352084
Tisk: (pouze elektronicky)
Počet stran: 45
Edice (vydání): Testovací verze

TechPedia

European Virtual Learning Platform for
Electrical and Information Engineering

<http://www.techpedia.eu>

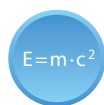


Tento projekt byl realizován za finanční podpory
Evropské unie.

Za obsah publikací odpovídá výlučně autor.

Publikace (sdělení) nerepresentují názory Evropské
komise a Evropská komise neodpovídá za použití
informací, jež jsou jejich obsahem.

VYSVĚTLIVKY



Definice



Zajímavost



Poznámka



Příklad



Shrnutí



Výhody



Nevýhody

ANOTACE

Tento kurz uvádí studenta do problematiky optoelektroniky. V úvodních kapitolách jsou představeny základní pojmy týkající se přenosu optického záření. Fyzikální mechanismy vztahující se k problematice optoelektronických součástek jsou popsány ve čtvrté kapitole. Hlavní optoelektronické prvky jsou uvedeny v páté kapitole. Kapitoly 6. a 7. popisují principy optických komunikací a hlavní aplikace optoelektroniky.

CÍLE

Po prostudování tohoto kurzu by měl být student schopen porozumět základům optoelektroniky a důležitým otázkám týkajícím se přenosu optického záření; bude schopen rozlišovat optoelektronické prvky a znát jejich aplikace.

LITERATURA

- [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. Optoelectronics 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 and Sons, 2004. ISBN 0-471-22191-0.

Obsah

1	Úvod do optoelektroniky: historie a základy	6
2	Optické spektrum. Zalomení a odraz paprsku, útlum a disperze	7
2.1	Úvod.....	8
2.2	Optické spektrum.....	10
2.3	Zalomení a odraz světelného paprsku; útlum a disperze.....	11
3	Přenos optického záření, zdroje záření a detektory světla	14
3.1	Úvod.....	15
3.2	Zdroje a detektory optického záření.....	16
4	Fyzikální mechanismy: absorpce, fotovodivost, emise fotonu	18
4.1	Absorpce světla.....	19
4.2	Fotovodivost a fotoelektrický jev.....	21
5	Optoelektronické prvky a senzory	23
5.1	Úvod.....	24
5.2	Zdroje LED.....	26
5.3	LD, laserové diody.....	28
5.4	PD, fotodiody.....	30
5.5	Solární články.....	31
5.6	Optické zesilovače.....	32
6	Vláknová optika: princip a klasifikace; vidy optického záření. Fotonické krystaly....	34
6.1	Optické vlákno.....	35
7	Aplikace: optické komunikace, biofotonika, optické senzory, osvětlení, zdroje energie	39
7.1	Aplikace optoelektroniky.....	40

1 Úvod do optoelektroniky: historie a základy

První kapitola popisuje vývoj oboru optoelektroniky a uvádí seznam aplikací spojených s tímto odvětvím fyziky.



Optoelektronika je část vědního oboru fotoniky vztahující se k studiu a aplikacím elektronických zařízení, které pracují se světlem. Týká se také systémů, ve kterých koexistují fotony a elektrony. Optoelektronické součástky pracují jako elektro-optické a opticko-elektrické převodníky.

Níže prezentujeme vybrané charakteristické vývojové rysy oboru optoelektroniky:

- Elektroluminiscence v krystalech SiC byla poprvé pozorována a oznámena v roce 1907 vědcem Captainem Henrym Josephem Roundem (Anglie).
- O dvě dekády později, v roce 1927, pozoroval Oleg Vladimirovič Losev (carské Rusko) emisi světla v oxidu zinečnatém a v krystalech SiC v usměrňovacích diodách používaných v rozhlasových přijímačích. Jev byl pozorován, pokud diodou protékal elektrický proud [1].
- V roce 1961 vynalezl Ali Javan (Bellovy Laboratoře) první plynový helium-neonový laser. O rok později objevil Robert Hall polovodičový laser.
- Nick Holonyak (USA) vynalezl první prakticky použitelnou **LED** diodu (*light-emitting diode*) pracující ve viditelném spektru, a to v roce 1962.
- První přenosový spoj využívající skleněná optická vlákna vynalezená ve společnosti Corning Glass byl uskutečněn firmou AT&T v roce 1983. Spojení vedlo z New Yorku do Washingtonu, D. C.; dosažená rychlost činila 45 megabitů za vteřinu.

Nyní je optoelektronika významným odvětvím technologie. Trh optoelektroniky prudce roste; celosvětově lze pozorovat 30% meziroční růst od roku 1992.

Optoelektronika umožňuje generování, přenos a zpracování dat při vysokých rychlostech. Hlavní aplikace optoelektroniky lze hledat v oblasti komunikací, optovláknových komunikací a laserových spojů.

Aplikace optoelektroniky zasahují do každodenního života v oblasti počítačů, komunikací, zábavy, optických informačních systémů, vzdělávání, elektronického obchodování, životního prostředí, zdravotnictví a dopravy.

Optoelektronika je klíčová pro vojenské aplikace, které zahrnují zobrazování (imaging) v infračervené oblasti, radary, senzory v letectví a opticky naváděné zbraně.

2 Optické spektrum. Zalomení a odraz paprsku, útlum a disperze

V této kapitole prezentujeme základní matematický aparát popisující úvodní a důležité pojmy spojené s optoelektronikou. Dále se v této kapitole soustředíme na mechanismy přenosu světla, problému refrakce (lomu světla) a odrazu světla; útlumu a disperze. Jako důležitá se jeví problematika takzvaného úplného vnitřního odrazu: **TIR** (*angl. total internal reflection*), kterého se využívá u optických komunikací, a kterou budeme v této kapitole popisovat.

2.1 Úvod

Světlo jako elektromagnetickou vlnu lze popsat kombinací časově proměnných vektorů \mathbf{E} (*elektrické pole*) a \mathbf{H} (*magnetické pole*), šířících se v prostoru podle Maxwellových rovnic, které prezentoval James Clerk Maxwell ve druhé polovině 19. století.

Světlo lze charakterizovat pomocí několika spektrálních veličin, jakou je např. frekvence, ν :

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi}, \text{ kde } \omega \text{ je úhlová frekvence; nebo vlnová délka } \lambda:$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu}, \text{ kde } c \text{ je rychlost světla ve vakuu.}$$

$E = m \cdot c^2$

c je univerzální fyzikální konstanta pro rychlost světla ve vakuu, její hodnota je 299 792 458 m/s.

Obvykle se používá aproximovaná hodnota $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

V každém optickém prostředí kromě vakua závisí fázová rychlost světla, ν (rychlost, při které se pohybuje hřeben vln neboli fáze), na indexu lomu, n , přenosového media [2]:

$$\nu = \frac{c}{n}, \text{ kde } n \text{ lze definovat následující rovnicí:}$$

$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$, kde ϵ_r je relativní elektrická permitivita a μ_r je magnetická permeabilita látky [3]. Index lomu je funkcí vlnové délky.

Vztah mezi elektrickými, magnetickými veličinami a rychlostí šíření světla v přenosovém mediu lze popsat následující rovnicí:

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

$E = m \cdot c^2$

Dualita částice a vlnění: každá elementární částice nebo kvantová entita vykazuje vlastnosti nejen částice, ale také vlny. Elektromagnetické záření se šíří v souladu s vlnovou rovnicí, ale může být vyzářené nebo pohlcené pouze jako diskrétní kvant: **foton**, a takto se světlo chová zároveň jako vlna a částice současně.

Energie fotonu, E , je úměrná jeho frekvenci a lze ji vypočítat s použitím Planckova–Einsteinova vztahu, známého také jako Planckova rovnice [4]:

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

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

Konstanta: $hc = 1,24 \text{ eV}\mu\text{m}$.



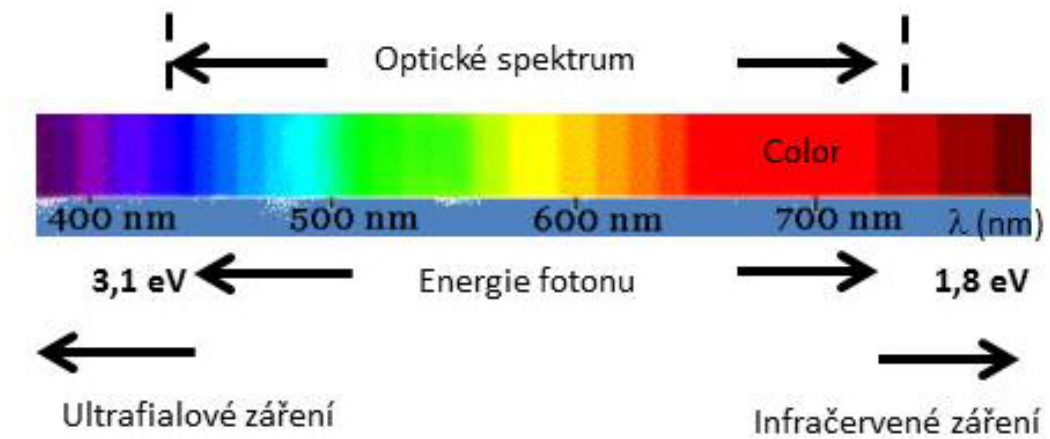
Hodnota relativní permitivity křemíku (oxidu křemičitého: SiO_2) je $\epsilon_r = 3,9$; relativní magnetická permeabilita pro SiO_2 je $\mu_r = 0,53$. Na základě těchto veličin lze vypočítat index lomu křemíkového skla.

ŘEŠENÍ

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

2.2 Optické spektrum

Optické spektrum je poměrně malou částí elektromagnetického spektra. Lidské oko je schopno detekovat záření v rozmezí vlnových délek 450 nm až 650 nm. Tuto část elektromagnetického spektra tvoří viditelné světlo. Na Obr. 1 je znázorněno elektromagnetické spektrum; jednotlivé barvy značí optické spektrum.

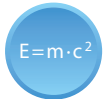


Obr. 1. Optické spektrum.

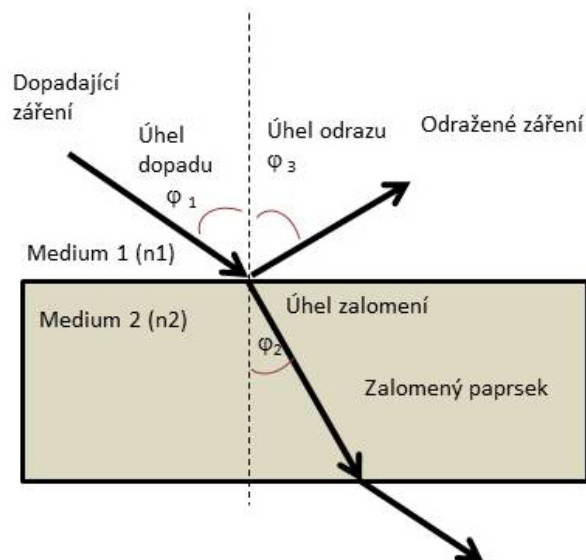
2.3 Zalomení a odraz světelného paprsku; útlum a disperze

Uvažujme, že optické záření dopadá na rozhraní dvou prostředí (světlo se šíří v prvním prostředí a odráží se na rozhraní obou prostředí). Světlo, které se naváže do druhého prostředí, se bude lámat. Velikosti úhlů vztahených ke směru šíření paprsku, jeho zalomení a odrazu, jsou znázorněny na Obr. 2.

Úhel dopadu, φ_1 , je roven úhlu odrazu φ_3 .



Refrakce (zalomení paprsku) je změna směru šíření optického paprsku po přechodu z jednoho prostředí do jiného prostředí, které se vyznačuje jinou hodnotou indexu lomu, n .



Obr. 2. Úhel zalomení a odrazu paprsku.

Snellův zákon uvádí vztah mezi sinem úhlu dopadu a sinem úhlu zalomení, se zohledněním hodnot indexu lomu obou přenosových prostředí:

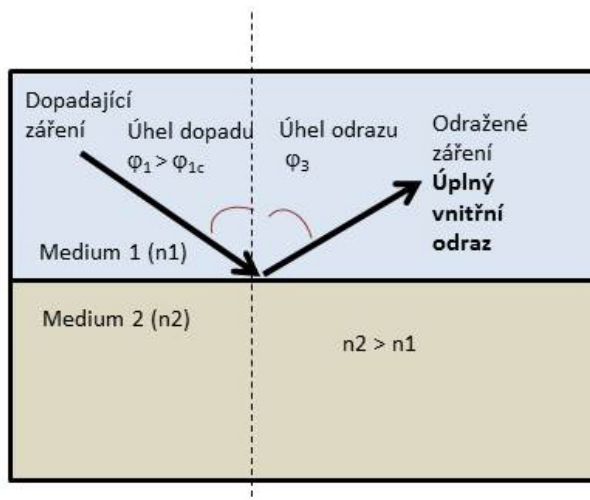
$$\frac{\sin(\varphi_1)}{\sin(\varphi_2)} = \frac{n_2}{n_1}$$

Pro úhel větší než kritický úhel lze pozorovat jev úplného vnitřního odrazu: **TIR** (*angl. total internal reflection*) [5]. Tento kritický úhel, φ_{1c} , platí pro $\varphi_2 = 90^\circ$.

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

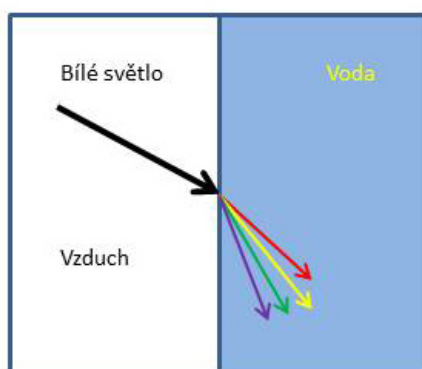
Uvažujme dopad optického paprsku na rozhraní dvou prostředí pro libovolný úhel, který je větší než uvažovaný kritický úhel. V tomto případě paprsek neprojde do druhého prostředí vůbec a bude odražen zpátky do prvního přenosového media.

Tento jev je známý jako **TIR** a uplatňuje se u klasických vlnovodů, jakým je např. optické vlákno, viz na Obr. 3.



Obr. 3. Úplný vnitřní odraz (TIR).

Světlo se šíří přenosovým médiem různou rychlostí na různých frekvencích. Index lomu je funkcí vlnové délky. Z toho důvodu vykazuje přenosové medium disperzi.



Obr. 4. Disperze optického záření.

Útlum je chápán jako ztráta optického výkonu. Hlavním zdrojem útlumu je absorpce a rozptyl, které způsobují ztrátu energie ve směru šíření. Měrný útlum: pokles výkonu v jednotkách dB vztažený k délce vlákna. Závisí na vlnové délce signálu šířícího se podél vlákna. Koeficient útlumu, α , lze popsat následující rovnicí:

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

kde $P(0)$ je počáteční výkon (nebo vstupní, dopadající výkon), $P(L)$ je výkon na vzdálenosti L od místa, pro které platí počáteční výkon.



Uvažujme světelný paprsek v přenosovém médiu, které má index lomu $n_1 = 1,44$. Paprsek dopadá na další prostředí, které se vyznačuje indexem lomu $n_2 = 1,4$. Vlnová délka světla je $1,1 \mu\text{m}$.

Vypočítejte úhel dopadu, pro který nastane jev TIR.

ŘEŠENÍ

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

Kritický úhel, φ_{1c} , lze pozorovat pro $\varphi_2 = 90^\circ$, tedy

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

3 Přenos optického záření, zdroje záření a detektory světla

V této kapitole budou popsány hlavní zdroje optického záření a detektory záření běžně používané v optických komunikacích. Optické komunikace nabízí mnohé výhody ve srovnání s konvenčními způsoby komunikace po měděných vodičích. Některé z těchto výhod budou v této kapitole uvedeny.

3.1 Úvod

Optické komunikační systémy přenášejí informace optickým zářením. Ve srovnání s měděnými vodiči v elektronických komunikacích představují optická vlákna nízké finanční náklady, nízkou hmotnost, nižší útlum a disperze, navíc nabízí větší šířku přenosového pásma. Optické vlákno může sloužit pro vysokorychlostní přenosy dat: až terabity za vteřinu. Data lze přenášet na velké vzdálenosti. Nejsou zde problémy spojené s EMC (*elektromagnetická kompatibilita*) ani nehrozí nebezpečí vznícení, jelikož přenos elektronů v komunikačním kanálu je eliminován.

Na Obr. 5 je znázorněno blokové schéma typického optického komunikačního systému. Elektrický signál (informace) je převáděn zdrojem optického záření; vyzářené světlo je třeba navázat do přenosového kanálu, kterým je optické vlákno, vlnovod nebo bezdrátový spoj. Světlo se přenáší v přenosovém kanálu až k detektoru optického záření, který vyváže záření z přenosového kanálu. Detektor záření převádí světlo na elektrický signál a takto se uskutečňuje příjem informace.



Obr. 5. Blokové schéma optického komunikačního systému.

3.2 Zdroje a detektory optického záření

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

LED : Light-emitting diode, dioda emitující záření.

Světelné zdroje se používají pro generování vstupního signálu v optických komunikačních systémech. Optické komunikační systémy často využívají polovodičové zdroje záření, jakými jsou diody, **LED** (*light-emitting diode*), a polovodičové laserové diody, **LD** (*laser diode*).

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

LASER: Light Amplification by Stimulated Emission and Radiation – angl. zesílení světla stimulovanou emisí záření.

Tyto druhy polovodičových optických součástek poskytují vysokou účinnost a spolehlivost. Kromě toho umožňují přesnou volbu rozmezí vlnových délek a emisní oblast kompatibilní s rozměrem jádra optického vlákna. Následující tabulka shrnuje hlavní charakteristiky a struktury **LED** a **LD** používané v optických komunikačních systémech s optickými vlákny.

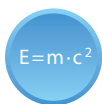
Polovodičové zdroje optického záření	Charakteristika	Struktury
LED	LED, která nachází uplatnění v optických komunikacích, musí mít vysokou radianci – zn. musí vyzařovat poměrně velké optické výkony, dále musí mít rychlou odezvu a vysokou kvantovou účinnost.	Planární, kupolové, LED vyzařující hranou nebo povrchem.
LD	LD, které se používají v optických komunikacích, by měly vyzařovat koherentní světlo o úzké šířce svazku a vysokém výstupním výkonu.	Spontánní emise. Stimulovaná emise záření.

Na konci optického komunikačního systému přijímají optické senzory (detektory světla) přenášené informace a uskutečňují rekonverze na elektrický signál prostřednictvím fotoelektrického jevu. Úlohou fotodetektoru je obnova dat přenesených optickým vláknem v komunikačním systému.

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

Fotodetektory jsou optoelektronické prvky, které převádí dopadající záření (světlo) na elektrický signál (napětí, proud).

Detektory světla, fotodetektory, jsou ve většině případů realizovány jako fotodiody, fotovodivostní detektory nebo fototranzistory. Fotovodivostní detektory mají nejjednodušší strukturu v podobě dvou kovových elektrod přivedených k polovodičové látce. Vodivost polovodiče narůstá, když jsou dopadající fotony pohlcovány v polovodiči. Výsledkem je nárůst vnějšího proudu po přivedení napětí k elektrodám. Solární články jsou specifickými fotodetektory, které se používají ve fotovoltaice (jako konvertory solární energie), nikoliv v komunikačních systémech.



Fotodioda je polovodičová součástka, která plní funkci fotodetektoru. Je tvořena p-n přechodem nebo p-i-n strukturou. Pokud foton s dostatečnou energií dopadá na povrch fotodiody, excituje elektron, který se stává pohyblivým a zároveň se generuje kladně nabitá díra.



Fototranzistory **BJT** (*bipolární tranzistory, angl. bipolar junction transistors*), které pracují jako fotodetektory, umožňují foto-proudové zesílení. Tyto součástky jsou polovodičovými světelnými senzory na bázi tranzistorů s průhledným krytem.

Polovodičové optické detektory	Charakteristika	Příklady struktur
Fotodiody	Založeny na p-n přechodu.	p-n nebo p-i-n diody. APD (<i>Avalanche photodiode – lavinová fotodioda</i>). Fotodiody s heteropřechodem.
Přechod Schottkyho	Přechod je tvořen kontaktem polovodiče typu n s kovem.	Kontakt Schottkyho.
Solární články	Solární články převádí dopadající záření na elektrickou energii.	cSi (krystalicky křemík), a-Si: H (amorfní křemík). HiT (solární článek - tenký film s intrinsickým zn. vlastním heteropřechodem). GaAs.
Fototranzistory	Transistory citlivé na světlo. Fototranzistory zesilují změny světla na něj dopadajícího.	n-p-n BJT p-n-p BJT
Fotovodivostní detektory	Změny vodivosti jsou kvůli absorpci světla.	LDR (<i>light-dependent resistor, rezistor citlivý na světlo</i>). PbS (galenit) IR (<i>infračervený detektor – angl. infrared detector</i>). IR detektory na bázi selenidu olova (PbSe).

4 Fyzikální mechanismy: absorpce, fotovodivost, emise fotonu

V této kapitole budou popsány hlavní fyzikální mechanismy vztahující se k problematice konverze energie v polovodičových látkách.

4.1 Absorpce světla

Když se světlo šíří v optické látce, část energie fotonu je přeměněna na jiné formy energie (např. teplo). Tato ztracená energie je absorbovaná látkou. Elektronů atomů mohou přejít na vyšší energetický stav a excitovat se z valenčního pásu do vodivostního pásu kvůli absorpci energie fotonů. Tento proces doprovází vznik páru e^-h^+ (elektron-díra).

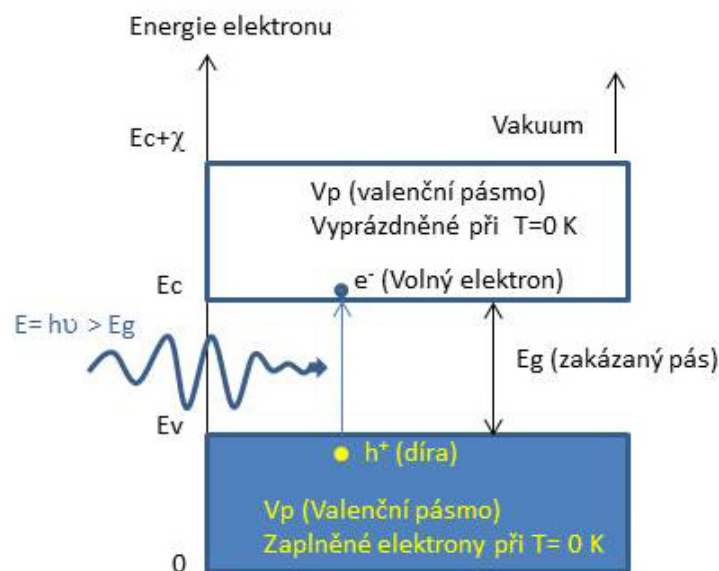
$$E = m \cdot c^2$$

Nejdůležitějším jevem v případě absorpce záření v polovodiči je vznik páru e^-h^+ . Každý pohlcený foton způsobí přechod elektronu z valenčního pásma do vodivostního pásma. Foton je pohlcen v polovodiči, pokud je energie fotonu větší než šířka pásma (energetická vzdálenost), která je spojená s přechodem, E_g .

Zakázané pásmo, E_g , je rozdíl energie vyjádřen v jednotkách eV (elektronvolty) mezi horní částí valenčního pásu a spodní částí vodivostního pásu v izolátorech a polovodičích. Elektronová afinita polovodiče, χ , je šířka vodivostního pásu vyjádřená v eV. Energie Fermiho, E_F , indikuje nejvyšší energetický stav, který lze obsadit při teplotě 0 K. Energetické stavy položené výše než E_F jsou prázdné až k úrovni vakua.

$$E_g = E_c - E_v$$

kde E_c a E_v je energie odpovídající horní části valenčního pásu a spodní části vodivostního pásu. Na Obr. 6 je znázorněn mechanismus absorpce a energetický pásmový diagram.



Obr. 6. Pásmový diagram a znázornění mechanismu absorpce fotonu.

Typické vlastnosti některých polovodičů při teplotě 300 K

Polovodič	E_g (eV)	χ (eV)
křemík: Si	1,11	4,05
arsenid galia: GaAs	1,42	4,07
germanium: Ge	0,66	4,13
fosfid india: InP	1,35	4,5
fosfid galia: GaP	2,26	3,8

Pro každou vlnovou délku, λ , dopadajícího světelného svazku, I_0 , který prochází látkou, je intenzita svazku, I , snížena rozptylem a absorpcí. Lambertův zákon určuje přenos a absorpci takto:

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

kde α je koeficient absorpce; α (m^{-1}) je funkcí λ .

4.2 Fotovodivost a fotoelektrický jev

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

Fotovodivost je optoelektronický jev, při kterém se látka stane elektricky vodivou v důsledku absorpce elektromagnetického záření, např. světla.

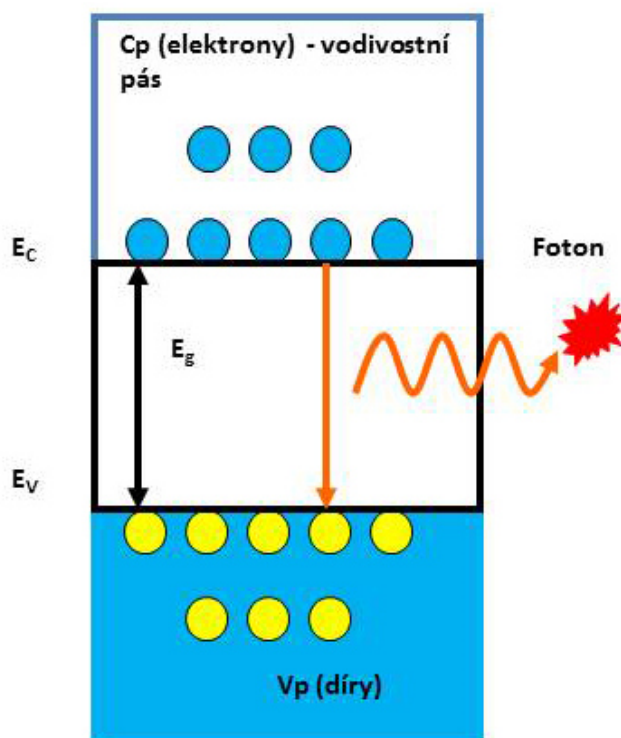
$$E = m \cdot c^2$$

Fotoelektrický jev: mnoho kovů emituje elektrony, pokud jsou ozářeny. V případě fotoemise, pokud elektron v látce pohlcuje energii fotonu a je dodána energie větší než energie nutná pro opuštění látky, je foton z látky vyražen.

V roce 1921 obdržel Albert Einstein Nobelovu cenu za výzkum fotoelektrického jevu. Energie potřebná pro odstranění elektronu z látky je známa v literatuře jako výstupní práce kovů, ϕ .

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

Emise fotonu: Pokud elektron padá na nižší energetickou hladinu, kde potká díru, uvolní kvant energie v podobě fotonu. Vlnová délka fotonu závisí na šířce pásma mezi dvěma hladinami polovodiče. Světlo se vyzařuje jako násobek jisté minimální jednotky energie. Velikost této jednotky je právě energie fotonu.



Obr. 7. Emise fotonu.

Energie fotonu je: $E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$, kde c je rychlost světla ve vakuu.

Vypočítejte rozsah vlnových délek, které nejsou absorbovány germaniem: Ge, uvažujte šířku zakázaného pásma $E_g = 0,66 \text{ eV}$.

ŘEŠENÍ

Absorpce světla v polovodiči způsobuje vznik páru e^-h^+ , pokud je energie dopadajících fotonů větší než šířka zakázaného pásu (energetická vzdálenost dvou hladin) materiálu, E_g . Pro Ge je minimální hodnota energie pohlceného fotonu:

$E = h \frac{c}{\lambda} > E_g(\text{Ge}) = 0,66 \text{ eV}$. Fotony o vlnové délce: $\lambda < h \frac{c}{E_g(\text{Ge})}$ budou pohlceny v polovodiči.

Předpokládáme, že $hc = 1,24 \text{ eV}\mu\text{m}$. Maximální hodnota vlnové délky fotonu pro uvolnění páru e^-h^+ z Ge je: $\lambda < 1878 \text{ nm}$.



Všechny fyzikální jevy popsané v této kapitole nachází specifické aplikace v optoelektronice a příbuzných fyzikálních vědách.

5 Optoelektronické prvky a senzory

Kapitola 5. popisuje hlavní optoelektronické prvky (zařízení) a senzory, které jsou spojeny s nejvýznamnějšími aplikacemi fotoniky. Vybrané základní koncepty fyziky polovodičů jsou uvedeny za účelem pochopení charakteristik a principu fungování těchto součástek; jedná se hlavně o konverzi mezi elektrony a fotony.

5.1 Úvod

Optoelektronická zařízení a světelné senzory se vyrábí s použitím polovodičových materiálů.

$E = m \cdot c^2$

Polovodičová látka má hodnotu elektrické vodivosti mezi hodnotou vodivosti kovu (např. měď) a izolátoru (např. sklo).

Elektrická vodivost polovodičového materiálu roste s teplotou, tedy opačně než v případě kovů. **Si** (*křemík, angl. silicon*) je polovodič, který se používá spíše v elektronice. Vlastní (intrinsické) polovodiče nebo polovodiče typu i jsou čisté polovodiče bez příměsí (angl. undoped). Počet nositelů náboje, elektronů a děr, je proto dán vlastnostmi materiálu. Ve vlastních polovodičích je počet excitovaných elektronů a počet děr roven:

$n = p = n_i$ (množství nositelů/cm³), hodnota n_i závisí na šířce pásma polovodiče, E_g , a mění se s teplotou takto:

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

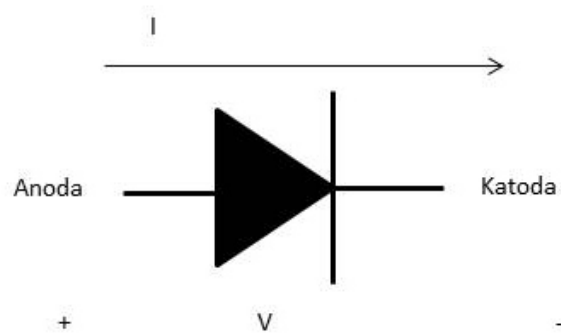
kde T je teplota v jednotkách K; k_B je Boltzmannova konstanta: $k_B = 8,62 \cdot 10^{-5}$ eV/K; A je konstanta.

Polovodičové součástky se vyznačují širokou škálou užitečných vlastností, jakými jsou snazší průtok proudu v jednom směru než ve směru opačném, proměnlivý (variabilní) odpor, citlivost na světlo nebo teplo. Přidáním příměsí do polovodičového krystalu se vlastní polovodič stává nevlastním, tedy takovým polovodičem, ve kterém je koncentrace jednoho typu nositelů náboje (elektronů nebo děr) mnohem vyšší. Pokud je koncentrace elektronů mnohem větší než koncentrace děr, je takový polovodič polovodičem typu n. Pokud je hustota děr větší než elektronů, jedná se o polovodič typu p.

Některé senzory a součástky popsané v této kapitole využívají princip p-n přechodu.

$E = m \cdot c^2$

p-n přechod tvoří rozhraní polovodičových materiálů typu p a typu n uvnitř polovodičového krystalu. Diody jsou polovodičové součástky tvořené polovodičovým materiálem s p-n přechodem, připojeným ke dvěma elektrickým přívodům.

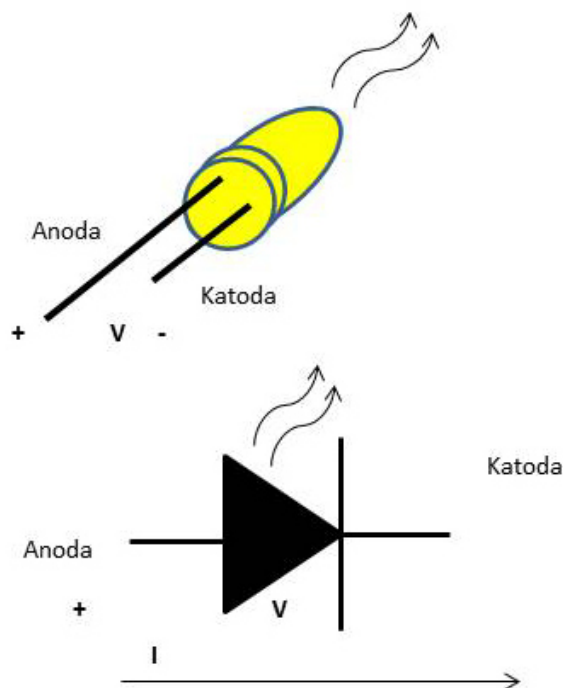


Obr. 8. Elektronický symbol diody.

5.2 Zdroje LED

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

LED (*light-emitting diode, dioda vyzářující světlo*) je polovodičová dioda, která vyzářuje nekoherentní úzkospektrální světlo, pokud na její p-n přechod přivedeme kladné napětí.



Obr. 9. LED.

V normálním stavu prázdný vodivostní pás **CB** (*angl. conduction band*) polovodiče je zaplněn elektrony, které jsou injektovány po přiložení kladného napětí nebo při průtoku proudu přechodem. Jak bylo prokázáno v kapitole 4., pokud elektron potká díru, přejde na nižší energetickou hladinu a tak uvolní kvant optického záření v podobě fotonu. Takový způsob emise fotonu využívají diody LED. Pokud elektron může přejít na nižší hladinu samovolně (spontánně), nazývá se proces emise fotonu je **spontánní emisí**.

Světlo se generuje, pokud elektron rekombinuje s dírou. Vlnová délka generovaného záření závisí na šířce zakázaného pásu polovodiče, E_g . V tabulce níže prezentujeme barvy vyzářené LED odpovídající různým polovodičovým materiálům.

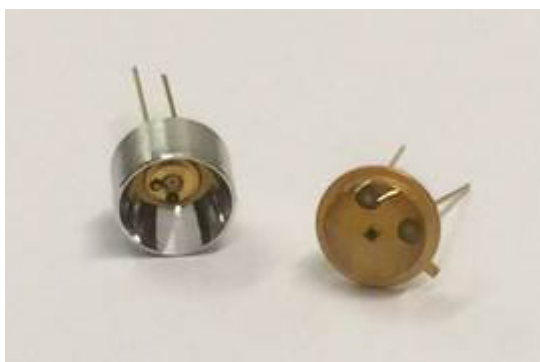
LED diody z polovodičových materiálů představující přímý zakázaný pás vyzářují více světla než diody vyrobené s použitím nepřímých zakázaných pásů v polovodiči.

Polovodičové materiály a odpovídající barvy LED

Polovodič	Barva	Jas / intenzita
GaAs; GaAlAs	Infračervené záření	Střední (průměrný)
GaAs; AlGaAs; GaP	Červená	Střední (průměrný)
GaN	Modrá	Střední (průměrný)
GaP	Zelená	Střední (průměrný)
GaAlAs; GaAsP; InGaAlP	Červená	Vysoký (super & ultra LED)
GaN	Modrá	Vysoký (super & ultra LED)
GaP; InGaN	Zelená	Vysoký (super & ultra LED)
InGaAlP; GaAsP	Žlutá	Vysoký (super & ultra LED)

LED diody nacházejí uplatnění v mnoha aplikacích optoelektroniky: displeje, pevnolátkové zdroje záření, dálkové ovládače, optické komunikace. V posledních letech se diody LED běžně používají jako světelné zdroje v integrovaných LED lampách a svítidlech. Různé LED jsou dostupné na trhu podle požadované aplikace. Některé druhy čoček jsou součástí LED pro dosažení požadovaného tvaru vyzářeného svazku. Vyzařovací úhel je jedním z charakteristik, které uvádí výrobce v katalogovém listu. Mezi další parametry zmiňované v katalogích lze zařadit svítivost (mcd), světelný tok (lm), hlavní vlnovou délku (nm) a barvu. Specifické hodnoty (typické a prahové) elektrických parametrů jsou V_f (*kladné přiložené napětí*) a I_f (*dopřední nebo kladný proud*); tyto veličiny výrobce také uvádí.

Energetická účinnost LED, η , je typicky uváděna jako podíl vstupního výkonu a světla na výstupu – technicky řečeno: vyzářený tok (Lumeny) je třeba vydělit příkonem (Watty). Komerčně dostupné LED mají účinnost v rozmezí 50–70 %.



Obr. 10. Infračervená dioda LED.

5.3 LD, laserové diody


$$E=mc^2$$

Laser: angl. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, zesílení světla stimulovanou emisí. Energie dopadajícího fotonu, $E = h\nu$, stimuluje proces emise přechodem elektronu na nižší energetickou hladinu. Tento proces umožňuje zesílení fotonů: jeden dopadající foton ve výsledku znamená dva fotony, které se šíří ve stejném směru a které mají stejnou vlnovou délku a fázi.

LED diody popsané v předchozí kapitole využívají jevu spontánní emise, kdežto **LD** (*laserová dioda*) využívá jevu stimulované emise záření.

Za účelem dosažení zesílení světla stimulovanou emisí musí být pravděpodobnost emise fotonu větší než pravděpodobnost absorpce pro uvažované spektrum. Ve chvíli, kdy stimulovaná emise převažuje, je záření zesílené a lze pozorovat laserovou akci. Stimulovaná emise je dominantním jevem, když je pravděpodobnost nalezení elektronu ve vodivostním pásu větší než pravděpodobnost nalezení elektronu ve valenčním pásu. Tato situace nastává ve stavu populační inverze. Populační inverze je dosažena ve chvíli, kdy je rozdíl mezi Fermiho energií pro elektrony, E_{FN} , a Fermiho energií pro díry, E_{FP} , větší než zakázaný pás, E_g . Za účelem oddělení těchto energetických hladin Fermiho je zapotřebí čerpat energii v podobě elektrického proudu v polovodiči. Toto **čerpání** laseru nastává, pokud je injektován jistý proud větší než prahový proud, a polovodič se bude nacházet ve stavu populační inverze.

Optické reflektory, např. **FP** (*Fabry-Perot*) nebo dielektrická zrcátka **DBR** (*distributed Bragg reflector, distribuovaný Braggův reflektor*), obsahující laser mezi dvěma odrazujícími povrchy, se používají jako optické rezonátory. Ve stavu rovnováhy lze pozorovat stacionární elektromagnetické oscilace v optickém rezonátoru. Tyto oscilace vznikají na odrazných plochách optického rezonátoru. Optický rezonátor má osu kolmou k průtoku proudu. Při každém odrazu vlna částečně prochází stěnou reflektoru. Oscilace laseru začínají v okamžiku, kdy se míra zesílení rovná celkové míře ztrát na stranách rezonátoru sečtené s rozptylem v přenosovém médiu a absorpcí v krystalu.

Rozlišujeme dva hlavní typy LD: diody emitující hranou a povrchem. Laserové diody vyzařující hranou se vyznačují širokou a astigmatickou emisí; povrchem vyzařující laserové diody vyzařují užší svazek.

VCSEL (*vertical cavity surface emitting lasers*) jsou lasery s velmi krátkou aktivní oblastí, které mají hlavní osu optického rezonátoru podél směru protékání proudu.

V těchto laserech emise záření nastává ve směru kolmém k aktivní oblasti. VCSEL umožňuje přenos dat s rychlostí až 10 Gbs^{-1} .


$$E=mc^2$$

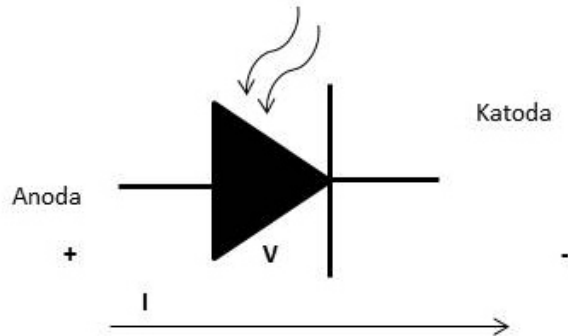
EOM (*elektro-optický modulátor*) je optoelektronické zařízení, které se používá pro ovládání výkonu, fáze a polarizace laserového paprsku pomocí elektrického řídicího signálu.

LD jsou nejběžnějšími druhy laserů, které nacházejí širokou škálu aplikací. Vyznačují se malými rozměry, nízkou cenou a dlouhou životností. LD je součástí vhodná pro mnohé aplikace, jakými jsou mimo jiné optické komunikace, čtečky čárových kódů, laserová ukazovátka, čtečky a zapisovače CD/DVD/Blu-ray, laserové skenery a tiskárny, směrové zdroje záření.

5.4 PD, fotodiody

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

Fotodioda je polovodičová součástka, která převádí optické záření na elektrický proud. Proud se generuje, když je foton absorbován fotodiódou. Konstrukce fotodiody vychází z p-n přechodu nebo struktury p-i-n. Pokud foton o dostatečné energii zasáhne diodu, excituje elektron. Tímto způsobem vzniká pohyblivý elektron a kladně nabitá elektronová díra.



Obr. 11. Fotodioda.

5.5 Solární články



Solární článek (fotovoltaický článek) je zařízení (součástka), které převádí dopadající záření na elektrickou energii.

Solární články na bázi polovodiče mohou být typu p-n, mohou tvořit samostatné přechody nebo mnohonásobné přechody.

Hlavní polovodiče používané u výroby solárních článků jsou Si a GaAs.

Účinnost solárních článků je daná vztahem mezi maximálním elektrickým výkonem a celkovým dopadajícím výkonem světla.

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

kde V_m a I_m jsou souřadnice bodu **MPP** (*maximum power point, maximální pracovní bod*) na výstupu součástky, G je ozáření (W/m^2) a A je efektivní plocha součástky.

Solární články na bázi krystalického Si dosahují účinnosti až 25 % a solární články s mnohonásobnými přechody pracující s „koncentrovaným“ světlem mohou dosahovat účinnosti až 43,5 %.

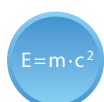
Účinnost solárních článků a hlavní parametry těchto součástek jsou dány výrobcí jako **STC** (*standard conditions of work, standardní podmínky pro práci*): AM1.5 spektrum, $G = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$ a $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Solární články propojené do série tvoří fotovoltaické moduly. Fotovoltaický modul obsahuje jeden nebo více paralelních propojení.

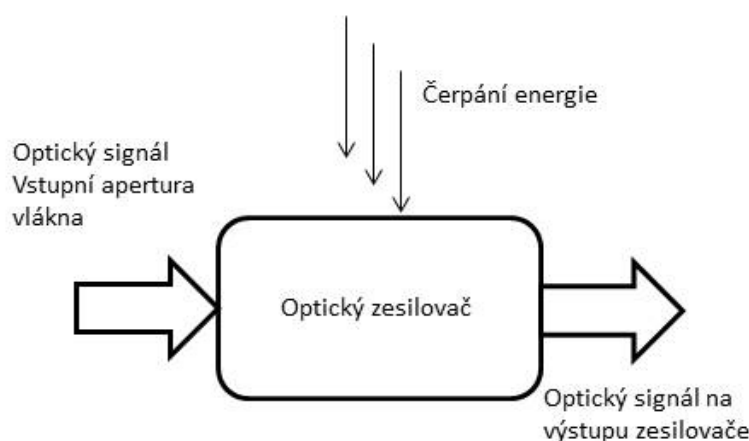
5.6 Optické zesilovače

Za účelem přenosu signálu na velké vzdálenosti (>100 km) je zapotřebí kompenzovat ztráty způsobené útlumem v optickém vlákně (optickém přenosovém kanálu). Tuto úlohu plní optické zesilovače.

Typické optické vlákno má ztrátu na vlnové délce 1,5 μm kolem 0,2 dB/km. Existuje možnost převést optický signál na elektrický a použít konvenční elektronické zesilovače pro kompenzaci ztrát přenosu a následně převést tento signál zpět na optický signál, nicméně takové konverze signálu vyžadují vysoké finanční náklady a velmi rychlou elektroniku.



Optický zesilovač zesiluje přímo optický signál, bez nutnosti převodu na elektrický signál.



Obr. 12. Schéma optického zesilovače.

Hlavní charakteristiky optických zesilovačů jsou: zisk – zn. zesílení (dB), pracovní rozsah frekvencí nebo **BW** (*pásmo, angl. bandwidth*), saturace zisku: maximální výstupní výkon, úroveň šumu na výstupu. Zisk je definován následující rovnicí:

$$G = \frac{P_o}{P_i}, \text{ kde } P_o \text{ a } P_i \text{ jsou výstupní a vstupní výkon.}$$

Existují tři hlavní druhy optických zesilovačů: **EDFA** (*erbiem dopované optické vlákno – angl. Erbium Doped Fibre Amplifier*), **SOA** (*polovodičový optický zesilovač – angl. semiconductor optical amplifiers*) a Raman zesilovač. U EDFA zesilovače je zesilujícím médiem skleněné optické vlákno dotované ionty erbia, kterými je dodána energie optickým čerpáním za účelem dosažení stavu populační inverze. SOA zesilovače jsou pumpovány elektrickým proudem a zesílení vzniká v nedotovaném polovodiči. Optické zesilovače jsou velmi užitečné pro lokální sítě z důvodu jejich poměrně nízké ceny a uspokojivé hodnoty zisku na krátkých vzdálenostech.

V případě Raman zesilovače je zisk dosažen prostřednictvím stimulovaného Ramanova rozptylu - **SRS** (*angl. stimulated Raman scattering*). Ramanův rozptyl je jev, ve kterém se světlo rozptyluje na molekulách, jeho výsledkem je konverze vlnové délky – přeladění na delší vlnovou délku.

Vybrané druhy optických zesilovačů	Charakteristika	Nevýhody
SOA (polovodičový) 400 – 2000 nm	Podobný polovodičovým laserům. Široké přenosové pásmo a velký výkonový zisk.	Vysoký šum a přeslechy.
Optovláknové zesilovače dotované ionty vzácných zemin erbium – EDFA 1500 nm Praseodymium – PDFA 1300 nm	Zesílení je dosaženo stimulovanou emisí záření. Zisk závisí na frekvenci a intenzitě záření svazku.	Poměrně velké fyzikální rozměry zařízení. Přeslechy a saturace zisku. Šum spontánní emise.
Raman a Brillouin zesilovače	Nevyžaduje dosažení populační inverze.	Čerpací zdroj a zesílený signál jsou na různých vlnových délkách. Vysoké náklady.

6 Vlákenná optika: princip a klasifikace; vidy optického záření. Fotonické krystaly

Optické vlákno se používá jako komunikační kanál v optických komunikacích. V této kapitole jsou popsány hlavní charakteristiky optického vlákna za účelem ukázání výhod optických vláken ve srovnání s konvenčním pojetím komunikačního kanálu v datových komunikacích, kde nachází uplatnění jak u páteřní infrastruktury, tak u Ethernetových systémů, širokopásmové distribuce nebo datových sítí vysoké kvality.

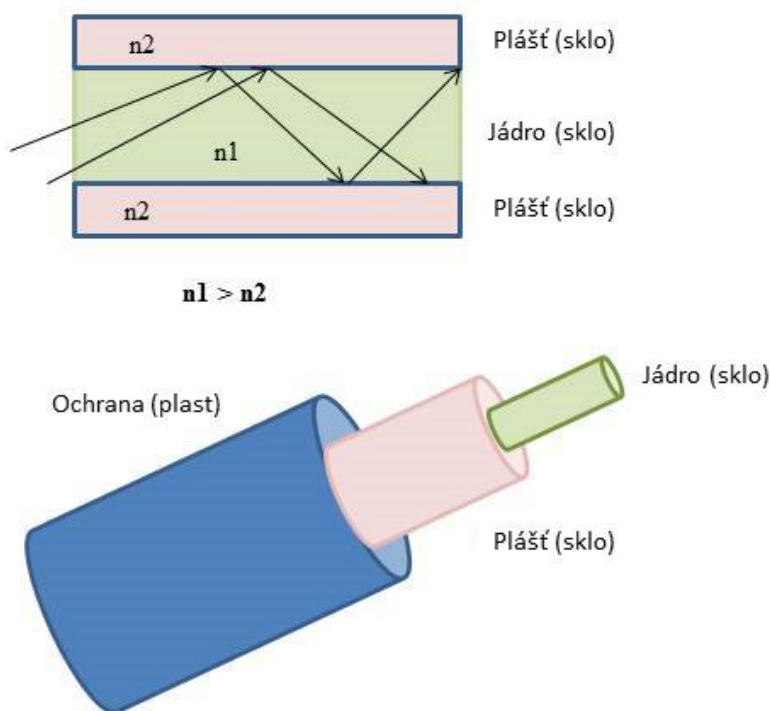
6.1 Optické vlákno

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

Optické vlákno je flexibilní, transparentní vlákno vyrobené ze skla (např. křemíkového) nebo plastu, mírně silnější než lidský vlas. Optická vlákna se používají jako přenosové medium v telekomunikacích.

Optická vlákna se používají u optických komunikací z důvodu velké šířky přenosového pásma, které umožňuje gigabitové přenosy dat a velkou přenosovou kapacitu. Tisíce informačních kanálů lze multiplexovat v jednom optickém vlákně. Navíc se optická vlákna vyznačují velmi nízkým útlumem (hodnota kolem 0,2 dB/km) a zároveň nízkými finančními náklady. Tyto charakteristiky jsou důvodem velkého zájmu v oblasti optických komunikací na velké vzdálenosti.

Na Obr. 13 je zobrazena struktura optického vlákna. Střed skleněného vlákna tvoří jádro, ve kterém se šíří optická vlna. Vnější optický materiál tvoří plášť, který odráží optickou vlnu zpátky do jádra. Vnější obal tvoří ochrannou vrstvu.



Obr. 13. Optické vlákno.

Optické vlákno má prostřední vrstvu – jádro, které má vyšší index lomu n_1 , než má vrstva kolem něj – plášť, n_2 . Pokud světlo dopadá na rozhraní pod libovolným úhlem větším než kritický úhel, φ_{1c} , viz podkapitola 2.3, neprojde světlo do pláště a bude se odražené zpět do jádra mechanismem TIR šířit dál ve struktuře jádra optického vlákna.



Optické vlákno má jádro z čistého Si, které má index lomu:

$n = 5,57$ pro vlnovou délku $0,4 \mu\text{m}$ a $n = 3,78$ pro vlnovou délku $0,7 \mu\text{m}$.

Vypočítejte čas, za který světlo na obou vlnových délkách urazí vzdálenost 2 km v tomto optickém vlákně.

ŘEŠENÍ

Rychlost světla na různých vlnových délkách v jádře vlákna je různá z důvodu odlišných hodnot indexu lomu pro tyto vlnové délky. Tato rychlost je daná jako:

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

V prvním kroku je třeba spočítat rychlosti pro každou vlnovou délku:

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

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

Dále počítáme čas potřebný pro uražení optické dráhy dvou kilometrů:

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

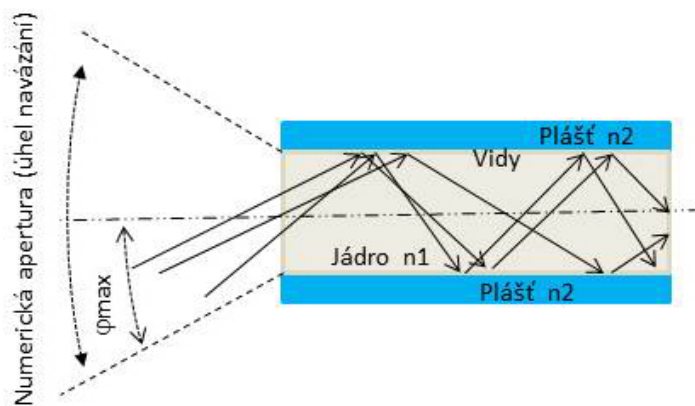
$$t_2 = \frac{x}{v} = \frac{2000}{7,94 \cdot 10^7} \text{ s} = 25,2 \mu\text{s}$$

Mnohovidová optická vlákna jsou vlákna, která mohou přenášet více než jeden vid optického záření na dané vlnové délce. Některá vlákna mají velmi malý průměr jádra a mohou přenášet jeden vid – jedná se o jednovidová vlákna, ve kterých je signál veden přímočaře ve středu jádra. Za účelem dosažení propagace vlny podél vlnovodu je zapotřebí využít konstruktivní interferenci, kdy všechny paprsky vzájemně interferují. Pouze některé hodnoty úhlu jsou přípustné. Každý povolený úhel představuje vid optického záření.

Maximální úhel navázání do vlákna vymezuje kužel světla, který určuje světlo vstupující do vlákna, které se šíří ve vlákně v podobě několika vidů. Polovina úhlu kuželu tvoří úhel navázání, ϕ_{max} , který je odvozen pouze od hodnot indexu lomu. Parametr **NA** (*numerická apertura*) vlákna je dán následující rovnicí:

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

kde n je index lomu, ve kterém se světlo šíří dříve, než se naváže do optického vlákna.



Obr. 14. Šíření optických vidů a úhel navázání vidu optického záření do vlákna.

$E = m \cdot c^2$

Množství vidů optického záření, M , závisí na parametrech optického vlákna:

$M = \frac{V^2}{2}$, kde V je normalizovaná frekvence, definovaná následující rovnicí:

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

Pokud $V < 2,495$, šíří se v optickém vlákne pouze jeden optický vid – základní vid; vlákno je jednovidové, **SMF** (*angl. single mode fibre*). Pro hodnoty $V > 2,495$ je optické vlákno mnohovidové.

Hlavním zdrojem ztrát ve vlákne je absorpce a rozptyl. Rayleighův rozptyl je z důvodu mikroskopických nehomogenit vlákna intrinsickým zdrojem ztrát. Absorpce je způsobena přítomností nečistot v látce, ze které je vlákno vyrobeno. V optickém vlákne vyrobeném z oxidu křemičitého (SiO_2) lze pozorovat tři hlavní útlumová maxima z důvodu absorpce způsobené ionty OH^- na vlnové délce 1050 nm, 1250 nm a 1380 nm.

Dalším zdrojem ztrát ve vlákne jsou ohyby. Část záření se ztrácí na místech ohybu vlákna. Míra ztrát závisí na poloměru ohybu. Pokud je poloměr ohybu srovnatelný s průměrem vlákna (včetně rozměru pláště), D , hovoříme o mikroohybech; pokud je poloměr ohybu větší než D , jedná se o makroohyby. Makroohyby vznikají, pokud je vlákno ohnuté během procesu instalace přípojky – jedná se např. o ohnutí vlákna na rozích stěn. Mikroohyby naopak vznikají kvůli chybám při výrobě a mohou mít za důsledek změny geometrie vlákna na poměrně malé vzdálenosti.

Druhy optických vláken	Charakteristika
Plastová	Útlum $\sim 10^2$ dB/km Velmi flexibilní, levná, lehká (nízká hmotnost)
Ostatní skleněná vlákna	Látky: chalkogenidová skla, fluorohlinitany Použitelné na delších telekomunikačních vlnových délkách
Křemíková (SiO ₂)	Umožňují dosažení extrémní čistoty skla a mohou být dotována za účelem dosažení požadovaných nosných vlastností. Nízký útlum (ztráty) a disperze na vlnové délce $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$

Záření lze navázat z jednoho vlákna do druhého, pokud jsou kompatibilní. Vlákna by měla být přesně sladěna (souosá), obě vlákna by měla mít přizpůsobenou numerickou aperturu a konce vláken by měly být v těsné blízkosti.

Porovnání optických vláken, koaxiálních kabelů a křížených párů.

Výhody	Nevýhody
Absence elektromagnetické interference.	Vysoké pořizovací náklady, drahá instalace.
Nižší útlum než u koaxiálních kabelů nebo křížených párů. Lze kombinovat s nízkovýkonovými vysílači.	Komunikační systémy bod-bod.
Nevyžaduje se ochrana pro zemní instalace ani ochrana proti napětí.	Spojování a svařování vláken není jednoduché. Přidání dalších bodů trasy je problematické.
Vysoká bezpečnost signálu, jelikož vlákno nevyzařuje energie jako anténa a detektory nedetekují pole kolem něj.	Křehčí než koaxiální kabely.
Velká šířka pásma.	Dražší opravy a údržba.



Fotonický krystal je umělá mnohorozměrná periodická struktura, která se vyznačuje periodou v řádu vlnové délky. Tyto látky jsou specifické periodickými změnami indexu lomu.

Lze vyrábět optická vlákna na bázi fotonických krystalů. V těchto vláknech je jádro a plášť tvořeno stejným materiálem, obvykle křemíkem. Jeden z regionů (jádro nebo plášť) obsahuje vzduchové kanálky (díry v průřezu vláknem), druhý region je pevnolátkový. Přítomnost vzduchových otvorů v plášti způsobí snížení efektivního indexu lomu vůči jádru, které tyto kanálky neobsahuje.

Fotonickým krystalem je také možno potlačit spontánní emisi.

7 Aplikace: optické komunikace, biofotonika, optické senzory, osvětlení, zdroje energie

V této kapitole jsou popsány hlavní aplikace optoelektroniky. Za zmínku stojí skutečnost, že na optoelektronickém trhu se každý rok objevují nové aplikace. Trh optoelektroniky roste 30 % ročně od 1992.

7.1 Aplikace optoelektroniky

Hlavní aplikace optoelektroniky jsou shrnuty v následující tabulce.

Aplikace optoelektroniky.

Aplikace	Popis
Optovláknová komunikace <ul style="list-style-type: none"> • Telekomunikace • Počítačové sítě • Kabelová TV 	Vlákenná optika se používá jako přenosový informační kanál z důvodu příznivých charakteristik: nízké finanční náklady, nízká hmotnost, útlum a disperze; dostupná šířka pásma. Další optoelektronická zařízení, jako např. LD, fotodetektory, senzory, optické zesilovače, optické modulátory a demodulátory, multiplexory a demultiplexory, tvoří podstatnou část optického komunikačního systému. Optický přenos dat se také využívá v kontrolních zařízeních a v průmyslové automatizaci.
Spotřebitelská elektronika	Široké spektrum spotřebitelské elektroniky obsahuje fotodetektory, LED, CCD senzory, fotodiody, fototranzistory, atd. <ul style="list-style-type: none"> • Počítače, tiskárny • Čtečky CD • Termovize • Kamery a displeje • Chytré telefony • Masivní paměťové čipy
LD, laserové diody	Hlavní aplikací LD jsou telekomunikace a optická vlákna jako vysílače záření. Další aplikace LD jsou následující: <ul style="list-style-type: none"> • Řezání, chirurgie. • Zápis a čtení CD. • Optické paměti. • Obrana: radary, opticky naváděné zbraně
Osvětlení, LED.	LED diody lze použít pro osvětlení v mnoha aplikačních odvětvích: <ul style="list-style-type: none"> • Obytné oblasti. Budovy. • Dopravní signalizace, uliční světla. • Venkovní aplikace: přístávací dráhy na letištích. • Digitální hodiny, elektronické ukazatele.
Solární články	Fotovoltaické systémy <ul style="list-style-type: none"> • Nízkovýkonové aplikace: kapesní kalkulačky, hodiny, vnitřní a venkovní osvětlení. • Samostatné fotovoltaické systémy • Síťové fotovoltaické systémy. • Letecké aplikace.