

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

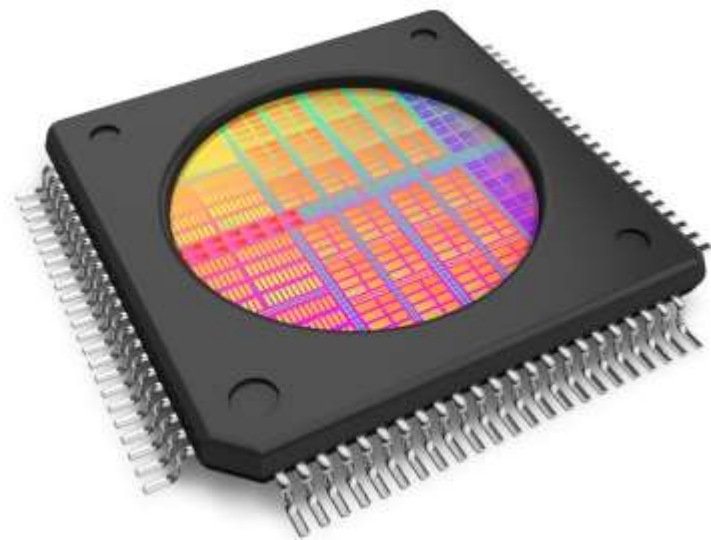
reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239



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



***Polovodičové materiály
a technologie
KET/PMAT***



Optické jevy v polovodičích

Přednáška 13



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

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Co se v přednášce dozvíte?

- DOZVÍTE SE, NA ČEM ZÁVISÍ ABSORPCE SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ U POLOVODIČOVÝCH MATERIÁLŮ.
- DOZVÍTE SE, CO SE STANE PO ABSORBOVÁNÍ SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ U POLOVODIČOVÝCH MATERIÁLŮ.
- ZJISTÍTE, NA ČEM ZÁVISÍ FOTOELEKTRICKÁ VODIVOST.
- DOZVÍTE SE, JAKÉ JSOU MECHANISMY ELEKTROLUMINISCENCE.
- ZJISTÍTE, JAKÉ JSOU POŽADAVKY NA OPTOELEKTRICKÉ SYSTÉMY.
- ZJISTÍTE, JAKÉ MATERIÁLY SE POUŽÍVAJÍ PRO LASEROVÉ A LED DIODY.
- DOZVÍTE SE, JAKÉ JSOU VÝHODY A NEVÝHODY LED DIOD.
- ZJISTÍTE JAKÉ JSOU POŽADAVKY A JAKÉ MATERIÁLY SE POUŽÍVAJÍ U DETEKTORŮ ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ.

Absorpce světelného záření

Světelné záření dopadající na povrch polovodiče se od jeho povrchu **částečně odráží a zbývající část je absorbována polovodičem**. **Pokles intenzity světelného záření v objemu** polovodičového materiálu lze popsat rovnicí:

I_0 je intenzita dopadajícího záření

R je součinitel reflexe

α_a je součinitel absorpce charakterizující zeslabení intenzity světelného záření v závislosti na hloubce vniku pro určitou vlnovou délku

x je hloubka od povrchu polovodiče

$$I_x = I_0(1 - R)e^{(-\alpha_a x)}$$

Součinitel reflexe R (kvantifikující část odraženého světelného toku) je možné stanovit ze vztahu:

$$R = \frac{(n - 1)}{(n + 1)}$$

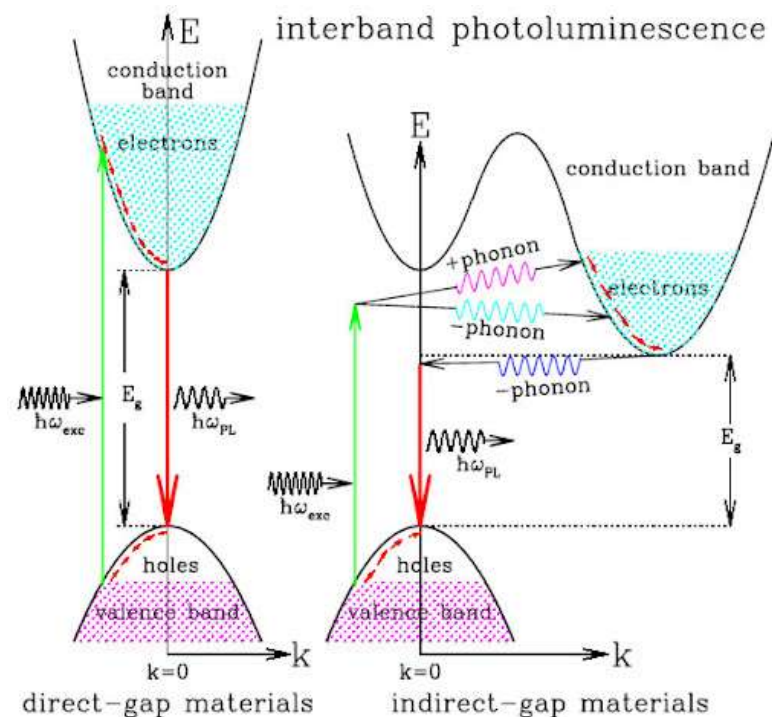
n je index lomu polovodiče, hodnota pro většinu polovodičů dosahuje hodnoty 3-4

Měřením závislosti součinitele absorpce na vlnové délce **lze získat řadu informací o pásové struktuře polovodiče**.

Mechanismus absorpce

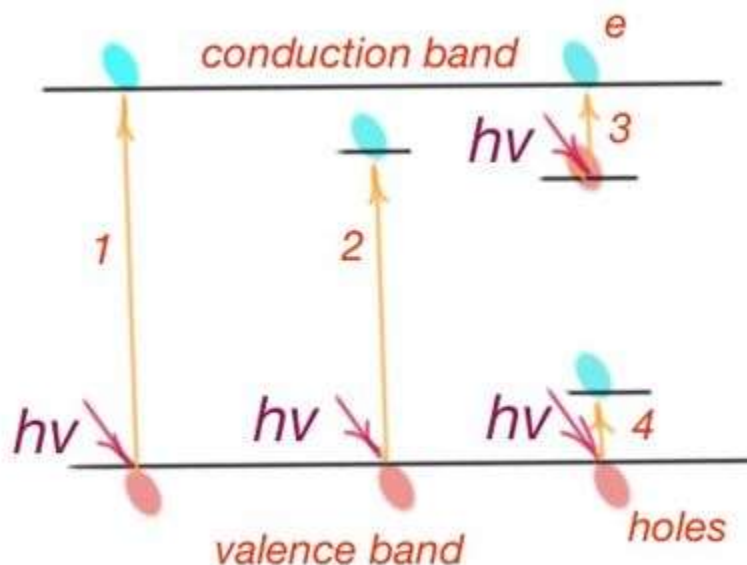
Při **absorpci světelného záření** valenčními elektrony, za předpokladu, že **energie fotonů je větší než šířka zakázaného pásu polovodiče** ($h\nu > E_g$), dojde k **přestupu elektronů z valenčního do vodivostního pásu**. Z hlediska uspořádání pásové struktury rozlišujeme **přestupy přímé a nepřímé**. Při **přímém přestupu** si **zachovává elektron vlnový vektor** (vzniklá díra ve valenčním a elektron ve vodivostním pásu mají shodný vlnový vektor), přičemž **pravděpodobnost přestupů tohoto typu je vyšší než u přestupů nepřímých**. U **nepřímého přestupu elektron změni svůj vlnový vektor v důsledku další interakce s fononem** (kvantum tepelné energie krystalové mřížky).

Při těchto procesech **dochází ke zvýšení vodivosti polovodiče** v důsledku vzrůstu koncentrace volných nosičů.



Mechanismus absorpce

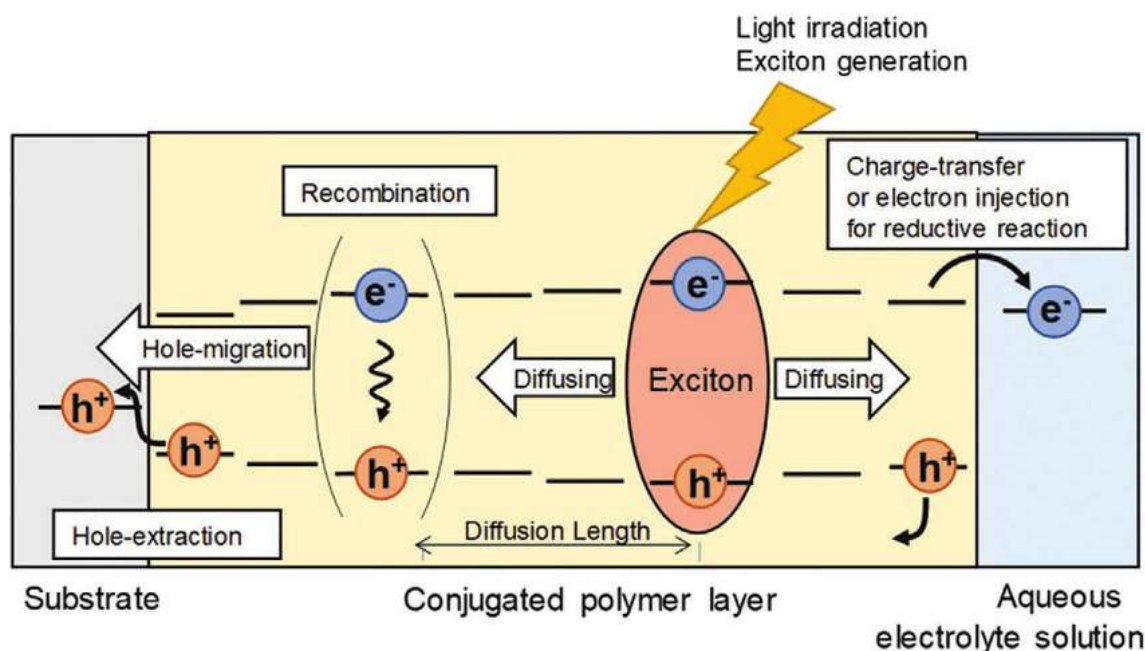
Při **absorpci světelného záření na příměsích** dochází (při splnění podmínky $h\nu > E_{A(D)}$, kde $E_{A(D)}$ je aktivační energie akceptorů, resp. donorů), k **přestupu elektronů** buď z **donorové hladiny do vodivostního pásu** nebo z **valenčního pásu na akceptorovou hladinu** za vzniku díry ve valenčním pásu. Tento mechanismus absorpce vede ke **generaci volných nosičů jednoho typu**, elektronů nebo děr. Vzhledem k poloze příměsových hladin v zakázaném pásu dochází k absorpci již dlouhovlnné oblasti spektra.



Mechanismus absorpce

Absorpce světla volnými nosiči náboje způsobuje zvýšení jejich energie a tím i jejich **přestupy na vyšší energetické hladiny uvnitř pásů**. Tento proces může **ovlivnit vodivost polovodiče** v důsledku změny pohyblivosti nosiče.

Optická absorpce na mřížce polovodiče vede ke **zvýšení kmitavé energie atomů krystalové mřížky**. Vznik vázané dvojice elektron-díra. Tato dvojice, nazývaná **exciton**, je vázána Coulombovskými silami a volně se pohybuje krystalem polovodiče.



Fotoelektrická vodivost

Interakce světelného záření s prostředím, která vede ke vzniku volných nosičů náboje, označujeme jako **fotoelektrický jev**. V případě, že elektron opustí krystal polovodiče, mluvíme o **vnějším fotoelektrickém jevu**. V případě, kdy volně pohybující se elektron zůstane uvnitř polovodiče, jedná se o **vnitřní fotoelektrický jev**. Nutným předpokladem existence fotoelektrického jevu je absorpce záření.

Fotoelektrickou vodivost lze definovat jako **diferenci vodivosti polovodiče při osvětlení a za tmy**.

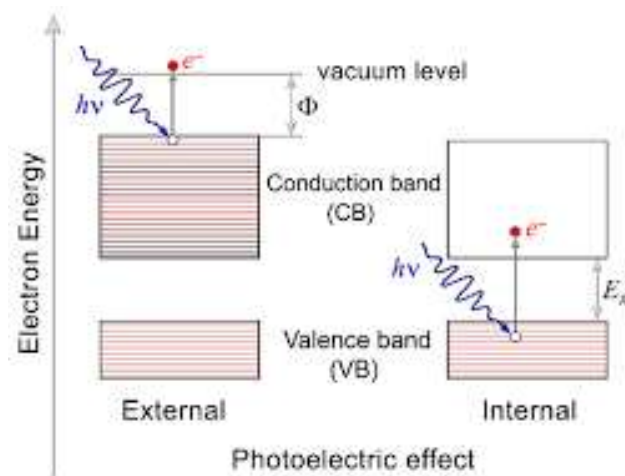
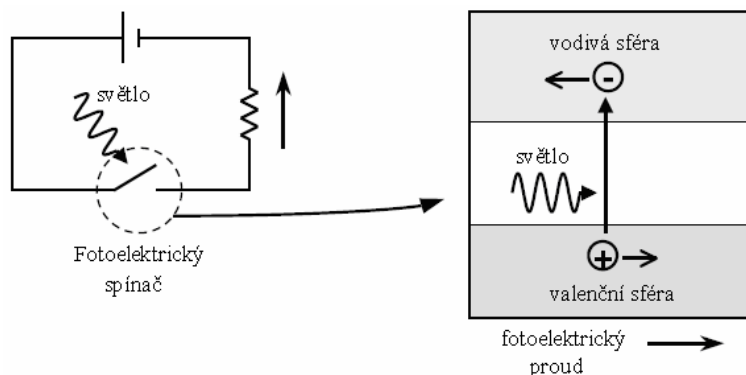
$$\Delta\sigma = \sigma_O - \sigma_T = q(\Delta n\mu_n - \Delta p\mu_p)$$

σ_O je vodivost při osvětlení

σ_T je vodivost za tmy

Δn , Δp jsou koncentrace nadbytečných nosičů generovaných v důsledku osvětlení polovodiče

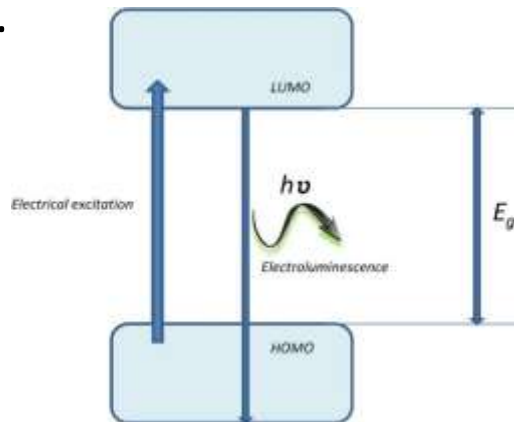
μ_n , μ_p jsou pohyblivosti elektronů a děr



Elektroluminiscence

Opakem fotoelektrického jevu je **luminiscence**, která je **důsledkem rekombinace** a projevuje se **emisí elektromagnetického záření**. Elektroluminiscence je tedy způsobena **přestupem nadbytečných nosičů z vyšší energetické hladiny na nižší energetickou hladinu** v procesu rekombinace. Rekombinující elektron vyzařuje **elektromagnetické záření odpovídající rozdílu zmíněných energetických hladin**. Obdobně jako v případě absorpčních procesů musí platit zákon zachování energie a hybnosti rekombinujících elektronů. Pro technické aplikace mají význam **tři typy rekombinačních procesů**.

Zářivé rekombinační procesy jsou využívány při konstrukci zdrojů **koherentního záření** pro optické komunikace (polovodičové lasery) a světloemitující diody s **nekoherentním zářením (LED)**.

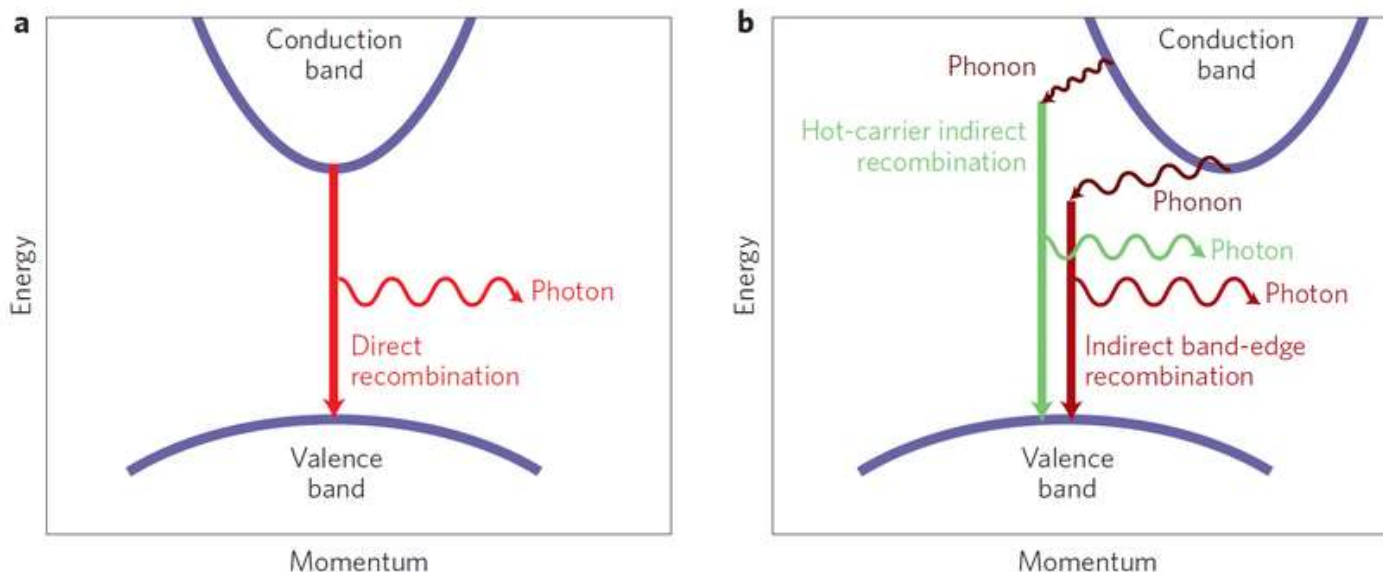


Mechanismus rekombinace

Přímá mezipásová rekombinace, při které elektron přestupuje z minima vodivostního pásu do maxima valenčního pásu. Vlnová délka emitovaného záření je dána vztahem:

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} = \frac{1,24}{E_g} \quad (\mu m, eV)$$

Rekombinační proces probíhá v tomto případě s vysokou účinností.



Mechanismus rekombinace

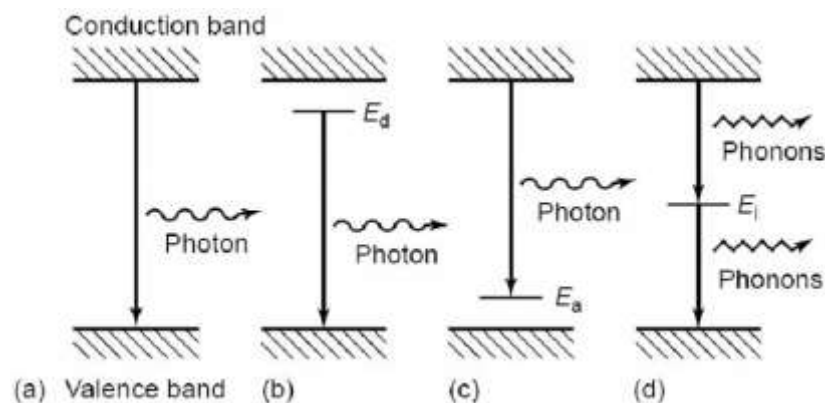
Rekombinace prostřednictvím příměsových center představuje vícestupňový proces. Vlnová délka emitovaného záření závisí na poloze příměsových hladin:

$$\lambda = \frac{hc}{(E_g - E_{A(D)} - E_f)}$$

$E_{A(D)}$ je aktivační energie donorů, resp. akceptorů.

E_f je energie fononu který se účastní rekombinačního procesu v polovodiči s nepřímou pásovou strukturou (změna hybnosti částice)

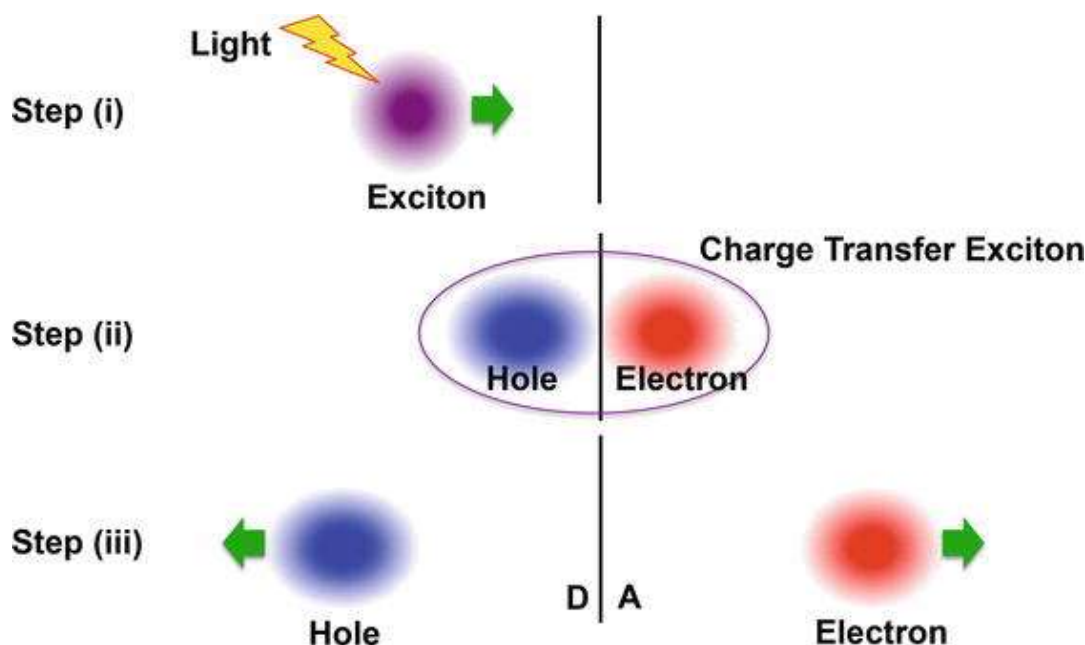
Tento typ elektroluminiscence je **v praxi využíván nejčastěji**, neboť pro generaci nerovnovážných nosičů se využívá **injekce na PN přechodu**, který je vyroben **dotací příměsí** do základního materiálu a tyto vytvářejí v zakázaném pásu polovodiče výše zmíněné **příměsové hladiny**.



Mechanismus rekombinace

Rekombinace spojená se zánikem excitonu. Zachycením elektronu na neutrální příměsi se vytvoří záporně nabitě centrum, ke kterému se může elektrostatickými silami připoutat volná díra, tato volně pohyblivá dvojice se nazývá exciton s vazební energií E_{ex} . Při jeho zániku dochází k emisi záření o vlnové délce:

$$\lambda = \frac{hc}{(E_g - E_{ex})}$$

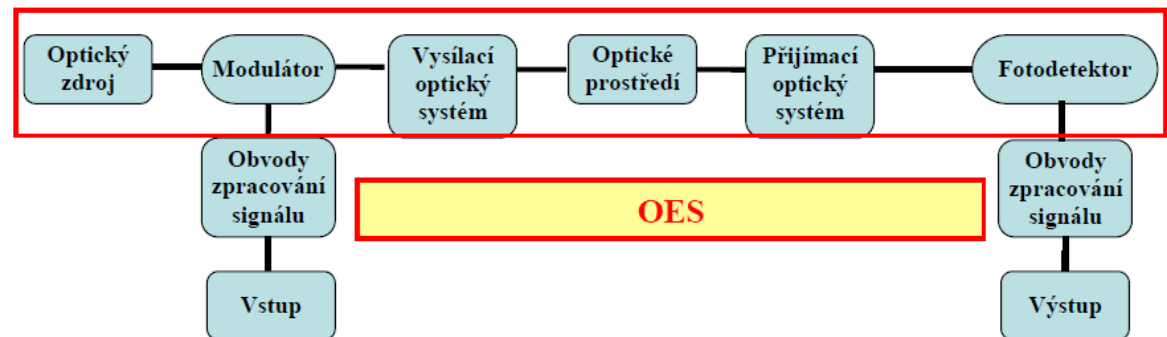


Optoelektronické systémy

Optoelektronické (OE) systémy nacházejí v současné době stále větší **uplatnění v oblasti telekomunikace, ve výpočetní technice, v silnoproudé elektronice, spotřební elektronice**. Jejich přednosti lze stručně charakterizovat následujícími parametry:

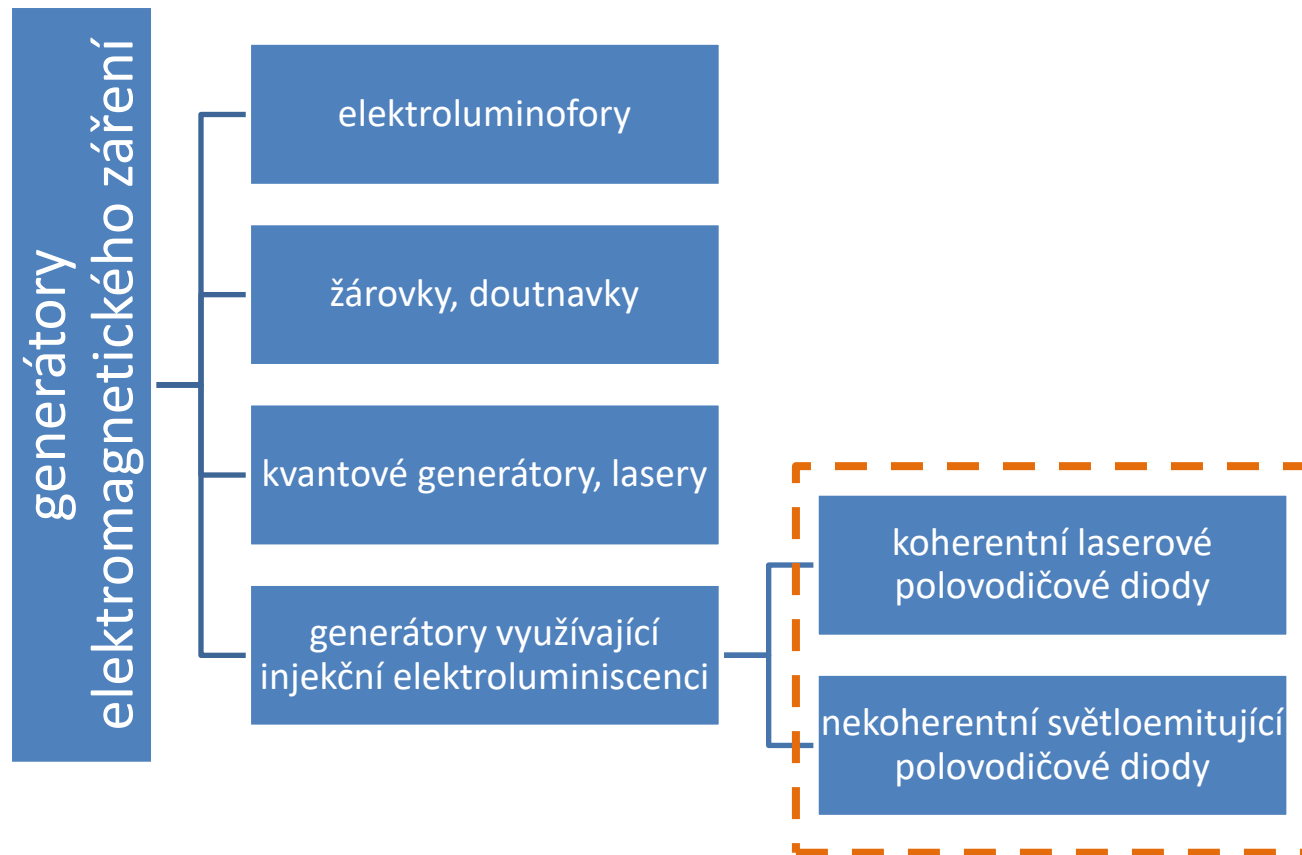
- **vysoká hustota informace v optickém přenosovém kanálu** související s frekvencí použitého záření (10^{15} Hz) a rychlostí přenosu (až 100 Gbit/s)
- **velká odolnost proti rušení** (přenos informací je zprostředkován elektricky neutrálními fotony)
- **možnost vytvoření bezkontaktního spojení** (dokonalé elektrické oddělení výstupu a vstupu přenosového zařízení, vhodné např. pro ovládání vn. obvodů),
- u zařízení pracujících ve viditelné části spektra **možnost vizuální kontroly** jeho stavu, optická indikace, displeje apod.
- malé rozměry a hmotnost

Základní uspořádání
optoelektronického
systému



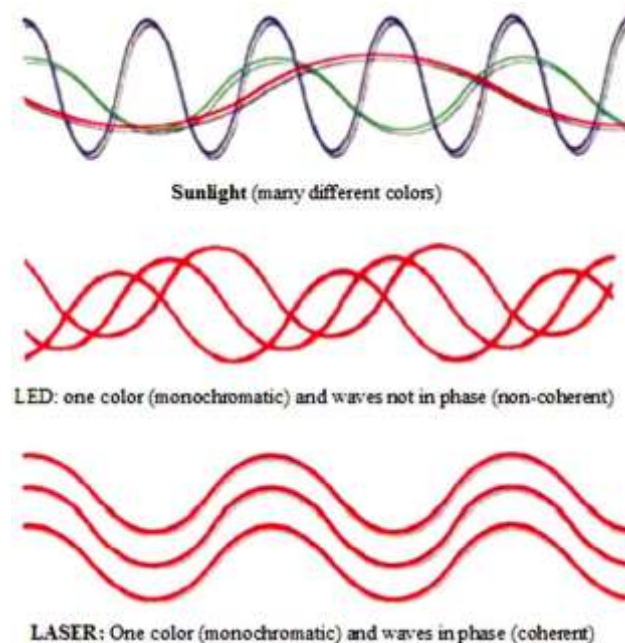
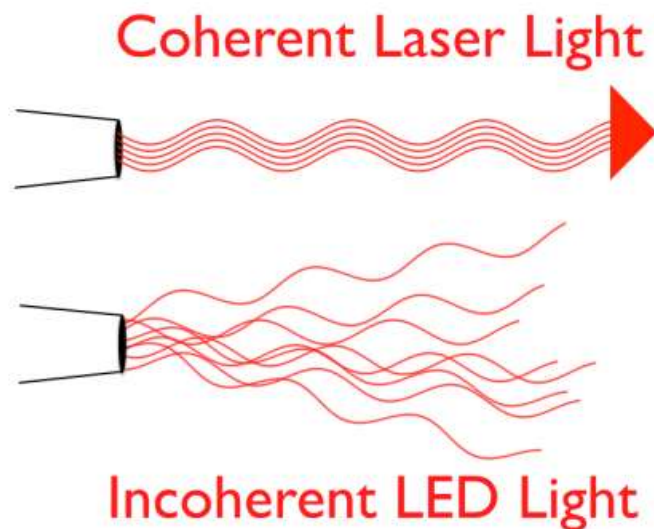
Generátory elektromagnetického záření

Základní rozdělení



Parametry optického signálu

V optoelektronických **komunikačních systémech** je **využíváno nekoherentního nebo koherentního záření**. Pojem koherence vyjadřuje jev spojený s excitací definovaných fázových stavů mezi fázemi odpovídajících složek optických vln nebo mezi fázemi dané složky jednotlivé vlny ve dvou časech nebo ve dvou bodech daného prostoru. Reálný světelný paprsek je dán superpozicí vln generovaných velkým množstvím elementárních oscilátorů (vybuzených atomů). **Pokud všechny tyto generátory mají shodnou frekvenci, fázi a orientaci, mluvíme o koherentním záření.**



Polovodičové lasery

Vlastnosti polovodičových krystalů zejména **elektroluminiscence na přechodu PN** lze využít k sestrojení **laserů**. **Polovodičové lasery** patří mezi lasery pevnolátkové, mají však své zvláštnosti a **významné použití především v optoelektronice**. První polovodičové lasery byly **injekčního typu**, využívaly vlastností PN přechodu a jako nejvhodnější materiál se ukázal **arsenid galitý (GaAs)**. K nevýhodám tohoto laseru patří **nutnost jeho chlazení na teplotu kolem 77 kelvinů tekutým dusíkem**. Laser pracuje na **vlnové délce 840 nm** a jeho výkon a účinnost silně závisí na provozní teplotě. V dalším vývoji polovodičových laserů sehrálo zásadní úlohu **vytváření struktur s heteropřechody**. Laser $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ může pracovat již při pokojové teplotě s **účinností kolem 20 % a dávat kolem 200 mW nepřetržitého výkonu**. Vedle injekčních polovodičových laserů se podařilo realizovat i elektroionizační polovodičové lasery, např. na krystalu sulfidu kademnatého. **Laser CdS** vydává při pokojové teplotě zelené světlo o vysokém impulzním výkonu.

Polovodičové lasery využívají **pozitivní (kladnou) optickou zpětnou vazbu na bázi Fabryho-Perotova rezonátoru** tvořeného štípáním planoparalelních ploch kolmých na PN přechod. Účelem rezonátoru je „**udržet**“ **fotony po určitou dobu v aktivní vrstvě** a umožnit vazbu elektromagnetické energie s okolním prostředím. Pro účinnou emisi je nutná vysoká koncentrace injektovaných nosičů cca 10^{18} cm^{-3} .

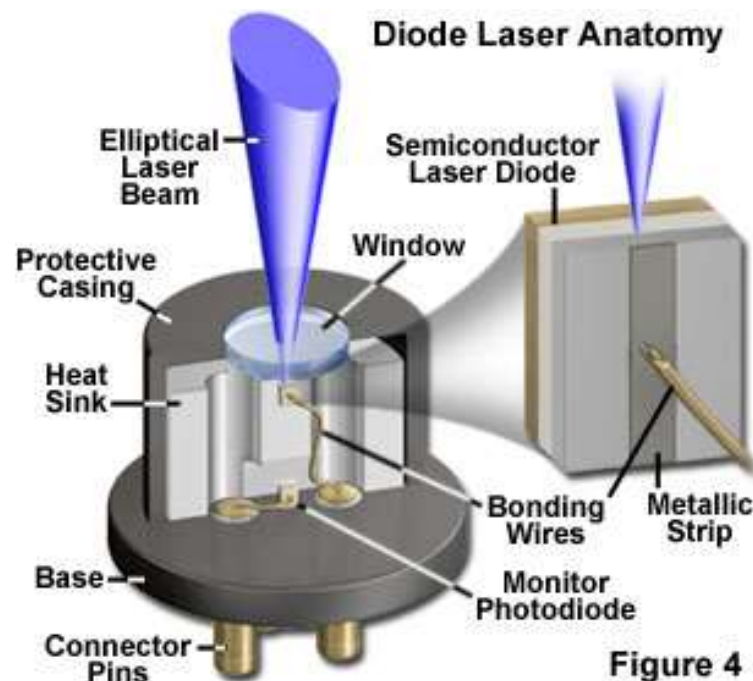
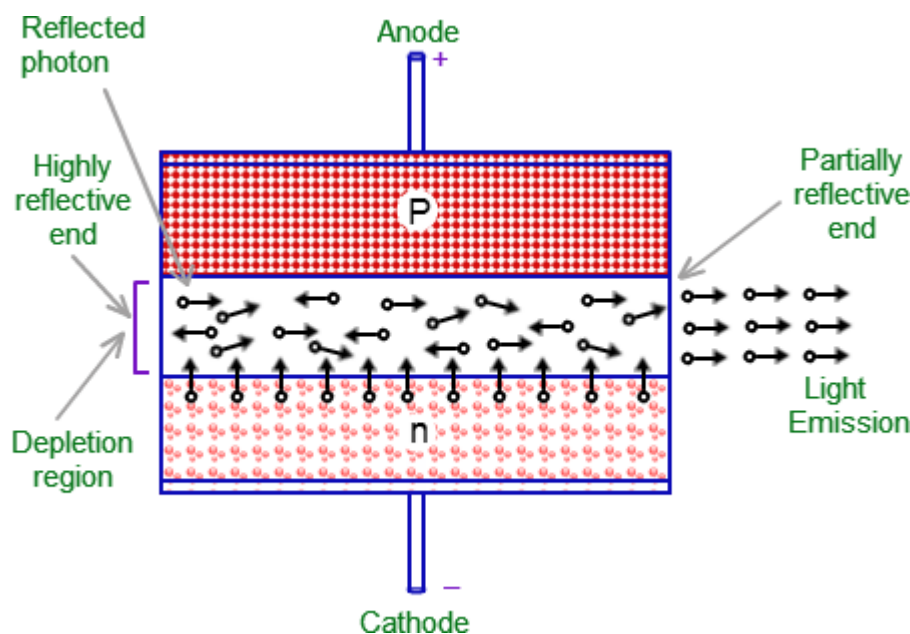
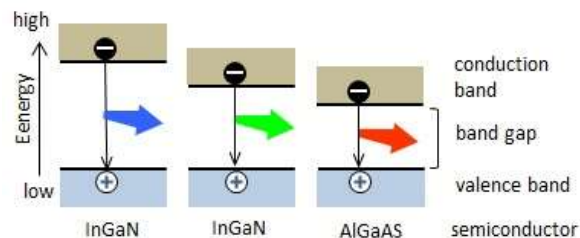


Figure 4

Luminiscenční diody (LED)

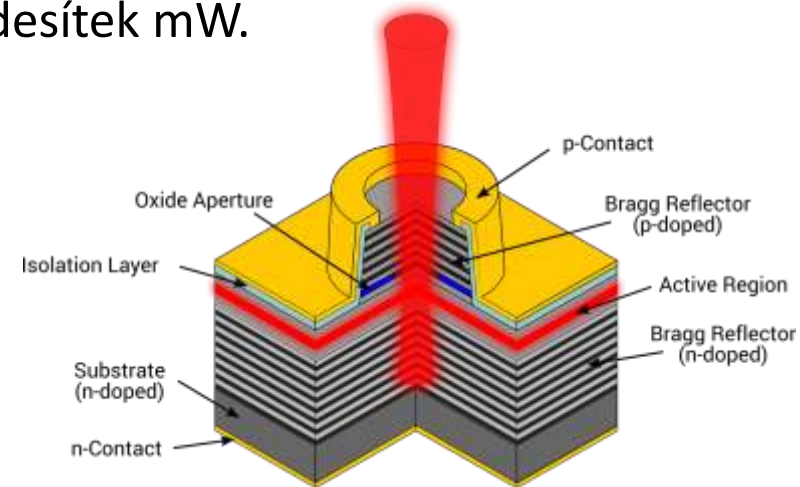
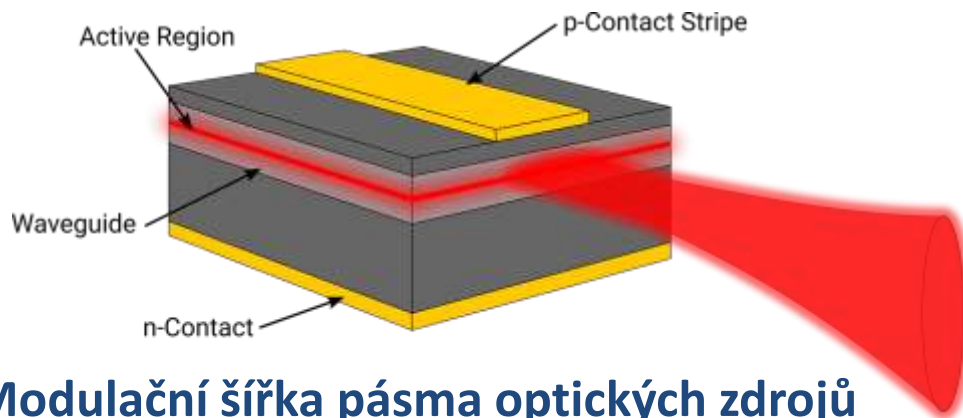
Luminiscenční dioda LED (Light Emitting Diode) je zdrojem **nekoherentního záření**. Fyzikální princip luminiscenční diody je založen na **rekombinaci elektronu s dírou**. Injekcí majoritních nosičů do polovodiče opačné vodivosti **při přiložení napětí na PN přechod**. **Pravděpodobnost zářivé rekombinace** je mnohonásobně větší pro polovodiče s tzv. **přímým přechodem**, např. u GaAs. **Pravděpodobnost zářivé rekombinace roste se zvětšující se šířkou zakázaného pásu**. U křemíku ($E_g = 1,12$ eV) je uvolňovaná energie převážně absorbována v krystalu (zvýšení teploty). U **GaAs** ($E_g = 1,423$ eV při 300 K) bude již nezanedbatelná část energie rekombinace vyzařována ve formě fotonů o příslušné vlnové délce v oblasti neviditelného **infračerveného záření**. **Náhradou části arsenu za fosfor získáme $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$** , vyzařuje na PN přechodu červené viditelné záření. Kombinací materiálu o vhodné šířce E_g lze vytvořit diody zelené, žluté nebo oranžové ($\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ a GaP – červená, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ – zelená, SiC - modrá).



	Barva	Vlnová délka	Polovodičový materiál	Úbytek napětí
	Infračervená	> 760 nm	GaAs; $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As})$	1,6 V
	Červená	$610 < \lambda < 760$	AlGaAs ; $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$; (GaP)	1,8 - 2,1 V
	Oranžová	$590 < \lambda < 610$	$\text{Ga}_x\text{As}_{1-x}\text{P}$; $(\text{Al,Ga,In})\text{P}$; GaP	2,2 V
	Žlutá	$570 < \lambda < 590$	GaAsP; AlGaInP ; GaP	2,4 V
	Zelená	$500 < \lambda < 570$	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$; GaN; GaP; $(\text{Al,Ga,In})\text{P}$	2,6 V
	Modrá	$450 < \lambda < 500$	ZnSe; $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$; SiC	3,0 - 3,5 V
	Fialová	$400 < \lambda < 450$	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	3,0 - 3,5 V
	Ultrafialová	$\lambda < 400$ nm	diamant (235 nm); BN (215 nm); $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$; AlN (210 nm)	3,5 V

Záření generované v oblasti PN přechodu je emitováno vrchní stranou čipu (plošné emitory). Některé struktury (Burrusova dioda) lze přímo navázat na optický světlovod.

Některé struktury využívají **hranovou emisi záření** a svojí strukturou jsou podobné laserovým diodám. LED s hranovou emisí záření generují **nižší optický výkon**, naproti tomu jejich **modulační šířka pásma** dosahuje 100 MHz oproti 20 MHz u plošných emitorů. Optický výkon LED dosahuje desítek mW.



Modulační šířka pásma optických zdrojů

Frekvence napájení LED, kdy dochází k poklesu světelného výkonu o cca 70 % oproti stejnosměrnému napájení. K poklesu dochází vlivem časového zpoždění mezi injektovanými nosiči a emisí fotonů vlivem střídavého napětí. Výstupní světelný výkon je závislý na době života nosičů.

τ je doba života nosičů

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi\tau}$$

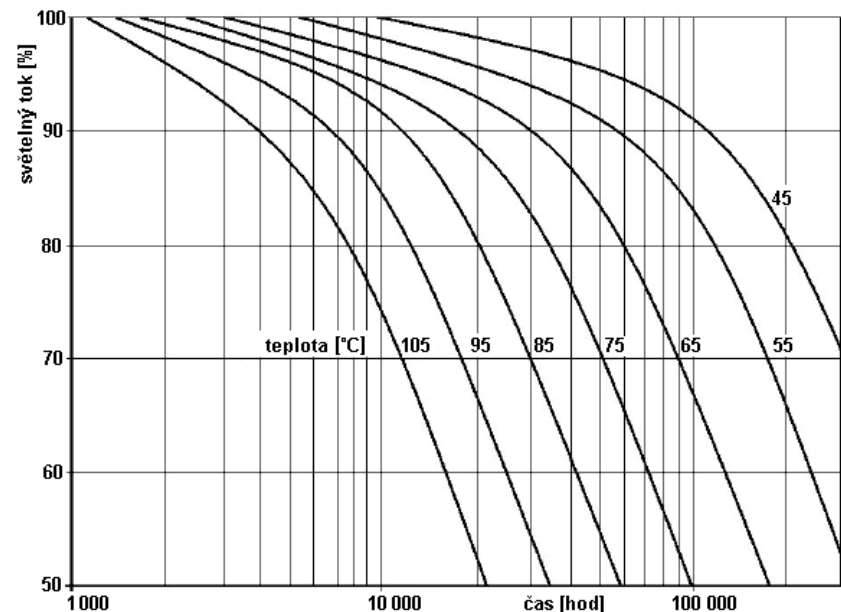
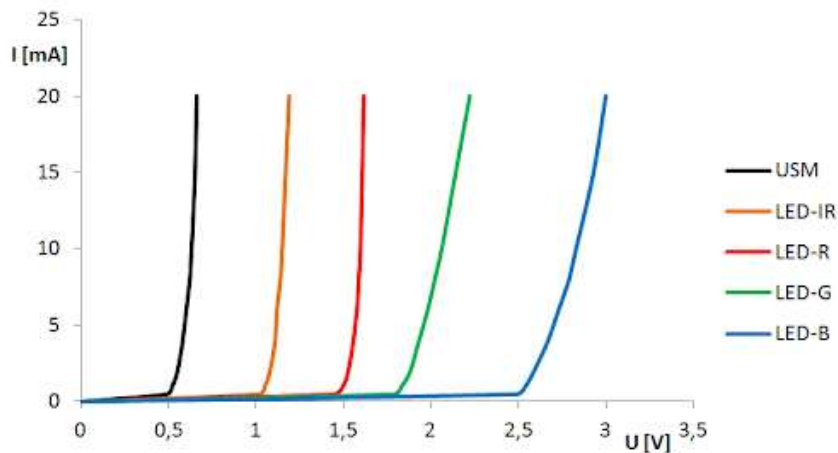
Výhody LED

- **Výkon** – LED produkují více záření/watt než klasické žárovky. Jejich výkon není ovlivněn tvarem, ani velikostí, na rozdíl od zářivek a žárovek.
- **Barva** – LED můžou vyzařovat požadovanou barvu bez použití barevných filtrů, jak je potřebné u tradičních zdrojů světla, což je mnohem efektivnější a s nižšími počátečními náklady.
- **Velikost** – LED mohou být velmi malé, menší než 2 mm.
- **Zapnutí/vypnutí** – LED se rozsvítí velmi rychle. Typická červená indikátorová LED dosáhne plné jasnosti v mikrosekundách.
- **Opakování cyklů** – LED jsou ideální pro použití v aplikacích s častým opakováním zapnutí/vypnutí, ne jako zářivky a žárovky, které se spálí rychleji při opakovaném rozsvětování a zhasínání.
- **Chladné světlo** – v kontrastu s ostatními zdroji světelného záření, LED vyzařují velmi málo tepla ve formě IR, které může vést k poškození citlivých předmětů.
- **Životnost** – mají relativně dlouhou použitelnost. Odhaduje se 35000 – 50000 hodin. Zářivky obvykle 10000 – 15000 hodin a žárovky 1000 – 2000 hodin.
- **Odolnost vůči nárazům** – jsou odolnější oproti křehkým žárovkám.
- **Toxicita** – LED neobsahují rtuť jako zářivky.

Nevýhody LED

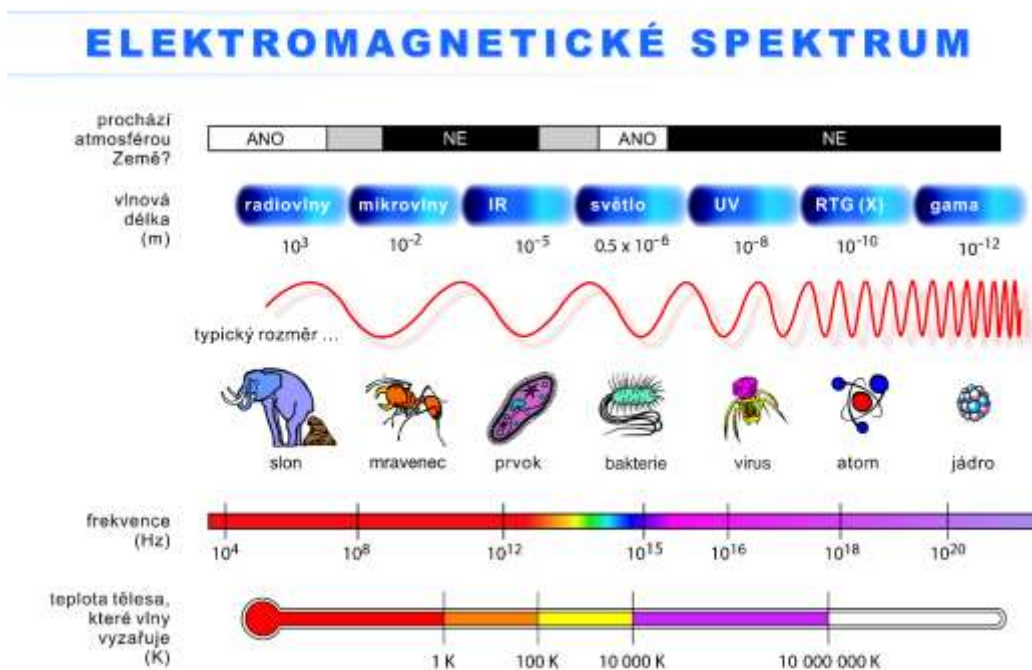
- Některé zářivky mohou být výkonnější.
- Teplotní závislost** – výkon závisí na okolní teplotě. Používání LED ve vysokých teplotách může vést k přehřátí jejich pouzdra, eventuálně k selhání součástky. Adekvátní teplota prostředí je vyžadována k udržení dlouhého života. To je velmi důležité se zřetelem na využití v automobilových, medicínských, vojenských přístrojích, kde zařízení musí pracovat v širokém rozsahu teplot a musí mít nízký index selhání.
- Napěťová závislost.**

A-V charakteristiky diod



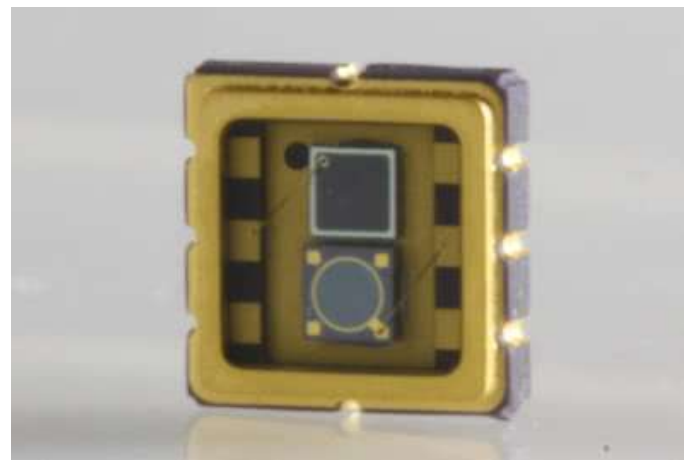
Detektory elektromagnetického záření

Tyto součástky jsou zařazeny jako **koncový člen OE systému**. Téměř všechny detektory záření používané v optoelektronických obvodech **pracují na principu fotoelektrického, event. fotovoltaiického jevu**. Při absorpci záření v polovodiči se buď **vytvářejí volné nosiče proudu**, což se projeví zvětšením jeho elektrické vodivosti, nebo **absorbovaná energie zvětší teplotu krystalu**, což může vést také ke zvýšení jeho vodivosti. Detektory jsou vyráběny jako **selektivní součástky pro určitý druh záření** (dle vlnové délky).



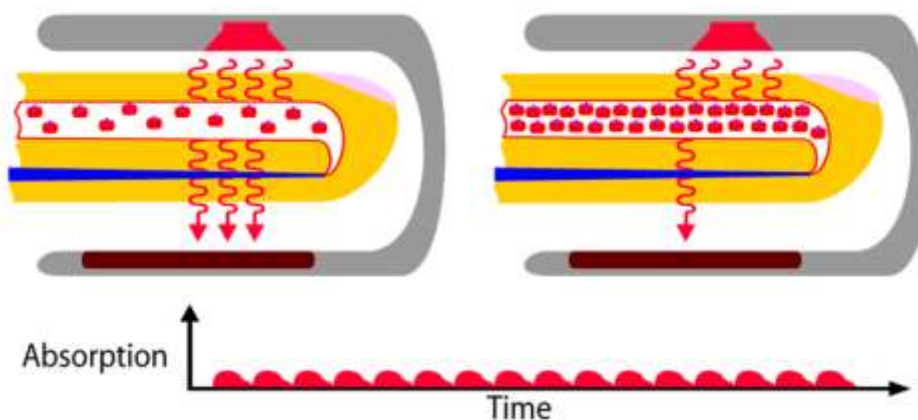
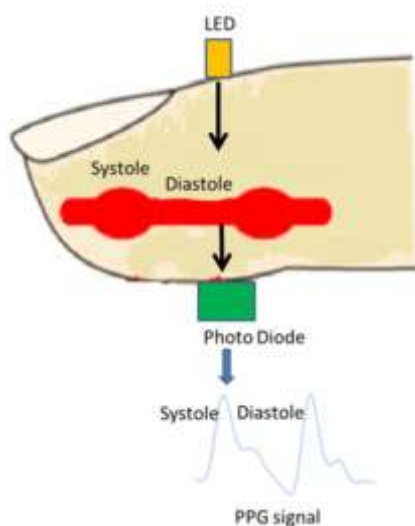
Provedení polovodičových detektorů

- **Fotorezistory**
- **Struktura detektoru s přechodem PN.** Si dioda vyrobená klasickou difuzní technologií.
- **Křemíková PIN dioda.** PIN diody se vyznačují vysokou fotocitlivostí, vysokou rychlostí odezvy a snadným přizpůsobením k integrovaným obvodům.
- **Fotodioda s heterostrukturou.** Veškeré dopadající záření je pohlcováno GaAs vrstvou N, kde jsou generovány nerovnovážné nosiče – díry. Tato oblast musí být technologicky „čistě“ provedena, aby v ní nebyla vytvořena nežádoucí rekombinační centra. Tyto detektory mají vysokou fotocitlivost, vysokou pracovní rychlost a vysokou účinnost.



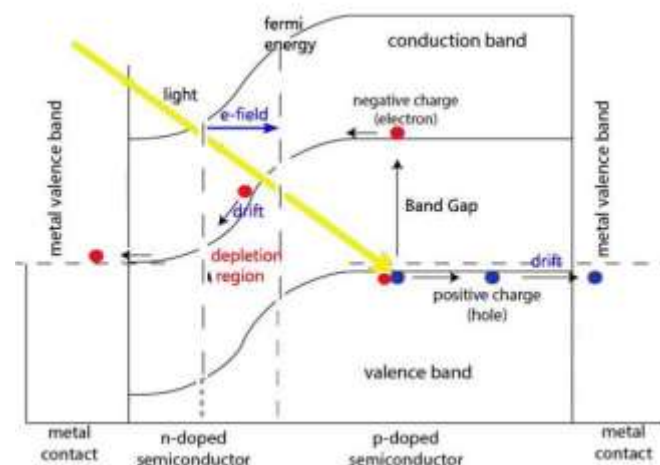
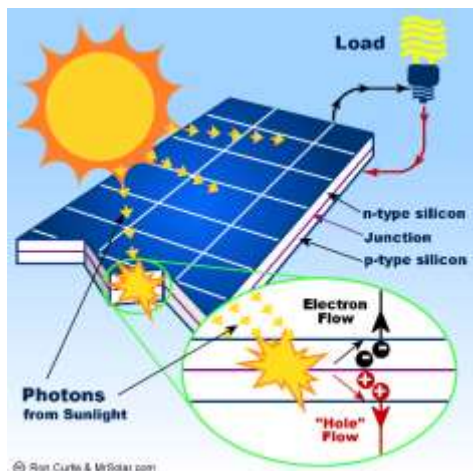
Aplikace

Fotodetektory mají široké uplatnění. Např. ve zdravotnictví se využívají jako **fotoelektrické pletysmografy**, které mohou pracovat s průsvitným nebo reflexním snímačem. **Světlo může procházet přes kapilární řečiště. Při změnách tlaku krve v souvislosti s činností srdce se mění objem kapilár, což způsobuje změnu absorpce, odrazu a rozptylu světla.** Tato metoda je použitelná pro vyhodnocování objemových změn kapilár, cév a tkání, frekvence tepů srdce, změn krve atd. Jako generátor infračerveného záření slouží GaAs dioda a jako detektor fotorezistor nebo fototranzistor CdS s malou časovou konstantou.



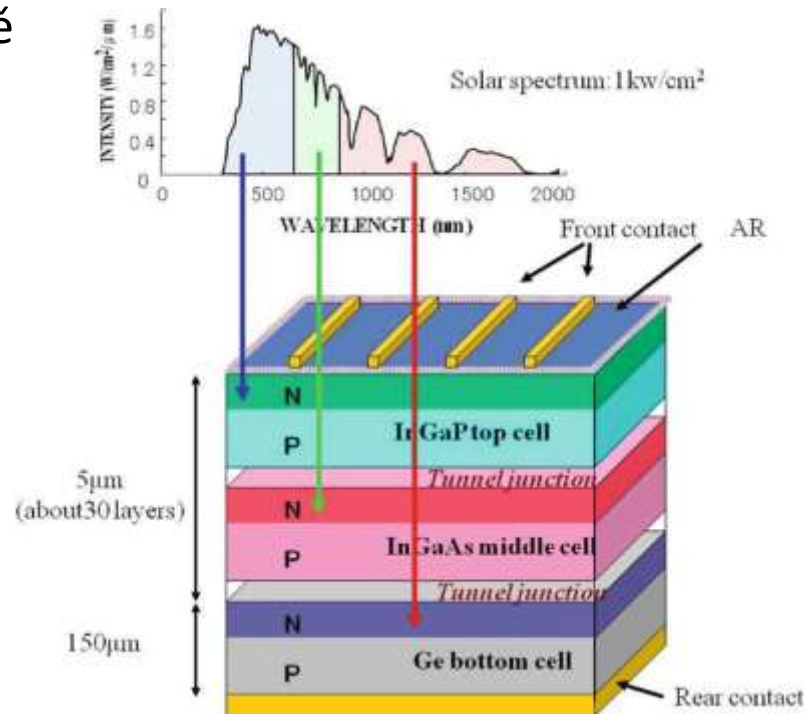
Materiály pro fotovoltaické články

Solární článek (fotovoltaický článek) se skládá ze **dvou vrstev krystalického křemíku**. Vrchní vrstva křemíkového plátku je sycena obvykle fosforem (polovodič typu N) a spodní strana je potištěna mřížkou stříbra (Ag) s příměsí hliníku (Al). Hliník v průběhu výrobního procesu pronikne do křemíkového plátku a vytvoří vrstvu P (polovodič typu P). Mezi těmito vrstvami se vytvoří NP přechod. **Dopadem světla na vrchní vrstvu křemíku typu N se vlivem předávání energie světla atomům krystalické mřížky uvolňují elektrony, které díky elektrické bariéře tvořené přechodem PN nemohou přecházet do vrstvy s vodivostí P a hromadí se v horní vrstvě s vodivostí N.** Nahromadění volných elektronů v horní vrstvě vytváří elektrický potenciál o napětí asi **0,6 V** na jeden solární článek.



- **Křemík** - dnes nejvíce používaný materiál pro výrobu solárních článků:
 - **Polykrystalický nebo amorfni křemík** - vhodný pro menší výkony, hlavní výhodou je poměrně dobrá účinnost i při nižších hladinách osvětlení.
 - **Monokrystalický křemík** - vhodný pro větší výkony, při dostatečném osvětlení mají články vyšší účinnost než při použití polykrystalického křemíku.
- **Arsenid galia (GaAs)** - hlavní výhodou je vyšší účinnost – 20 %, větší odolnost proti kosmickému záření a schopnost pracovat bez snížení efektivity i při teplotách nad 100 °C. Mezi nevýhody patří mnohem vyšší cena a větší hustota GaAs oproti krystalickému křemíku. Nyní se vyvíjejí kombinace obou článků, protože oba materiály mají odlišnou spektrální citlivost – křemíkové články využívají hlavně oblast viditelného světla směrem k modré barvě a články GaAs oblast spektra směrem k červené barvě. Vhodnou kombinací obou typů lze dosáhnout účinnosti 30 % a ve spojení s koncentrátory se očekává dosažení ještě vyšší účinnosti.
- **Copper-indium-galium-selen (CIGS)** je přímý polovodič se šířkou zakázaného pásu 1.0-1.7 eV (CuInSe-CuGaSe). Používá se ve formě tenkých polykrystalických vrstev. Články dosahují účinnosti až 20 %.

- **Sulfid kademnatý (CdS)** - články tvořené přechodem Cu_2S a CdS dosahují účinnosti 10 %. Jejich výhodou je malá hmotnost, díky čemuž se používaly při kosmických aplikacích. Nevýhodou je malá stabilita těchto článků.
- **Telurid kademnatý (CdTe)** - Díky absorpčnímu koeficientu je CdTe efektivní materiál pro výrobu tenkovrstvých solárních článků, které jsou srovnatelné s tenkými polykrystalickými vrstvami připravenými z Si. CdTe je důležitý materiál pro přípravu detektorů infračerveného, rtg a gama záření. Tyto detektory pracují při pokojové teplotě



Kontrolní otázky

- Vysvětlete, co je součinitel reflexe.
- Co se stane s dopadajícím světelným zářením na polovodičové materiály?
- Jaký je rozdíl mezi vnitřním a vnějším fotojevem?
- Vysvětlete princip elektroluminiscence.
- Za jakých podmínek vzniká zářivá rekombinace?
- Jaký je rozdíl mezi LED a laserovou diodou?
- Jaký je rozdíl mezi koherentním a nekoherentním zářením?
- Jaké jsou výhody a nevýhody LED?
- Co je modulační šířka pásma optických zdrojů?
- Co je a k čemu se používá fotoelektrický pletysmograf?
- Vysvětlete princip fotovoltaičských článků.
- Jaké materiály se používají pro fotovoltaičské články?

