

# Základy optoelektroniky

# Fotovodivosť

- Prejavuje sa tak, že po ožiarení látky žiarením s vhodnou vlnovou dĺžkou v nej pozorujeme vznik ďalších nosičov náboja, čo sa prejaví zväčšením elektrickej vodivosti.
- Nerovnovážne nosiče náboja vo vodivostnom páse môžu pochádzať z lokálnych energetických stavov v zakázanom páse alebo priamo z valenčného pásu.
- V prípade, že pochádzajú z valenčného pásu, zväčšuje sa koncentrácia vodivostných elektrónov aj dier. Priama rekombinácia (ich opätovné spojenie) týchto nosičov však nie je veľmi pravdepodobná.
- Väčšiu pravdepodobnosť má rekombinácia prostredníctvom rôznych porúch v mriežke. Koncentrácia takýchto rekombinačných centier býva vo fotoelektrickej látke zvyčajne väčšia ako je koncentrácia voľných nosičov náboja.

# Fotovodivosť

- Pozoruje sa, že absorpciou žiarenia sa vo väčšine prípadov elektrická vodivosť látok zväčšuje. Sú však známe aj prípady, kedy sa vodivosť s ožiarením nemení alebo naopak, klesá. V prvom prípade hovoríme o **normálnej fotovodivosti**, v druhom prípade o **anomálnej fotovodivosti**.
- Fotovodivosť sa vyznačuje dvoma charakteristickými vlastnosťami: **fotoelektrický prúd závisí od intenzity žiarenia** (závislosť môže byť u niektorých látok lineárna, u iných nelineárna); **fotoelektrická vodivosť závisí od času**. Okrem toho fotoelektrická vodivosť závisí aj od ďalších parametrov, akými sú napríklad **vlnová dĺžka žiarenia**, **intenzita elektrického poľa vo fotoelektrickej látke**, **optické vlastnosti**, **pohyblivosť nosičov**, **geometrické rozmery a tvar konkrétnej vzorky** a pod.

# Fotovodivosť

- pre elektrickú vodivosť polovodiča (izolantu) môžeme napísať

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p)$$

- pri ožiarení dôjde v látke k zväčšeniu koncentrácie voľných nosičov náboja o  $\Delta n$  a  $\Delta p$ , čo sa prejaví zväčšením elektrickej vodivosti. Jej prírastok  $\Delta\sigma$  teda bude

$$\Delta\sigma = q(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p)$$

# Fotovodivosť

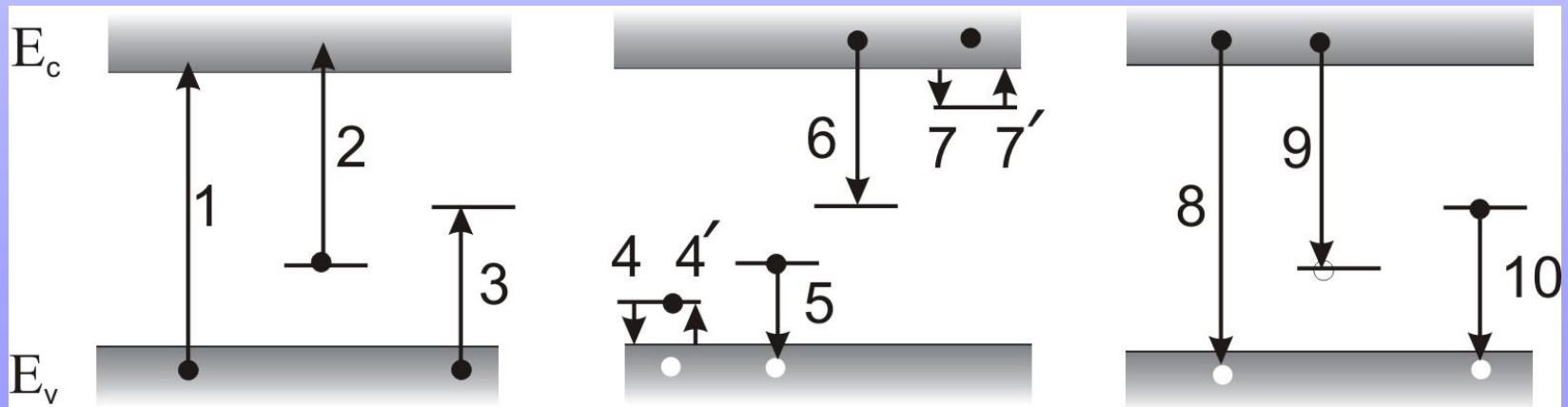
- Po priložení malého napätia na kontakty vzorky budeme pozorovať fotoelektrický prúd

$$I_f = q(\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p)E$$

- Pri bežných veľkostiach žiarivého toku je rýchlosť optickej generácie vo väčšine prípadov úmerná tomuto toku. Ak fotoelektrická vodivosť a fotoelektrický prúd sú úmerné druhej odmocnine žiarivého toku. Tento prípad nazývame **bimolekulárny** alebo ho tiež označujeme za tzv. **kvadratickú** rekombináciu.
- Ak je fotoelektrický prúd priamo úmerný veľkosti dopadajúceho žiarivého toku, ide o prípad lineárny alebo o tzv. **monomolekulárnu** rekombináciu.

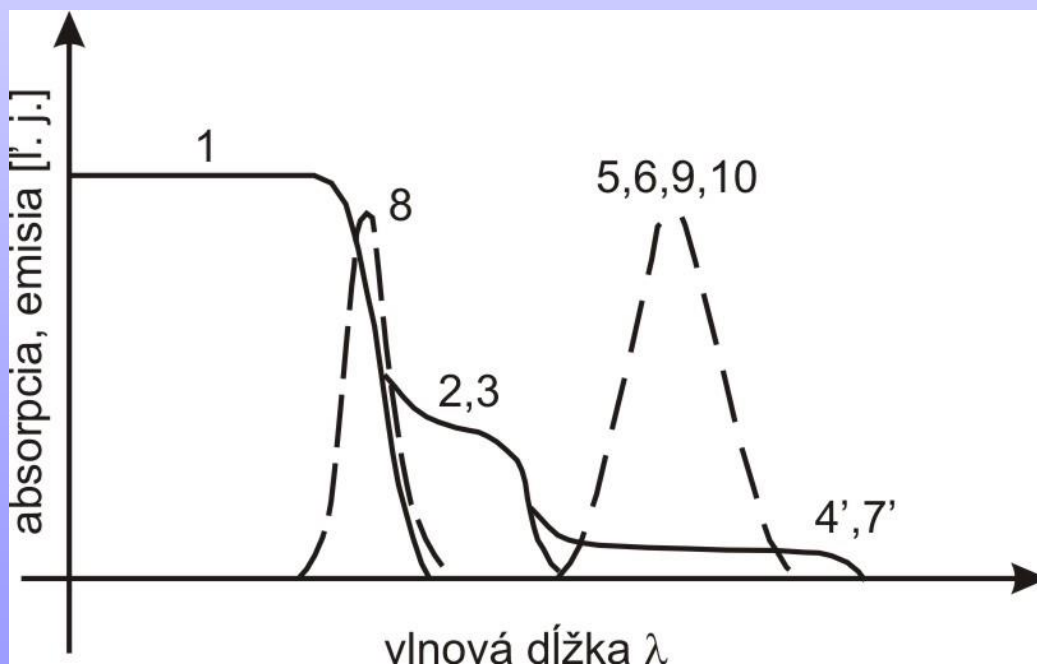
# Fotovodivosť

- Ukazuje sa, že pre fotoelektrickú vodivosť majú veľký význam záchytné energetické hladiny, nazývané **pasce**.
- Najbežnejšie prechody, s ktorými sa v súvislosti s fotoelektrickými procesmi v tuhých látkach stretávame:



# Fotovodivost'

- Jednotlivé typy prechodov sa prejavujú na spektrálnej charakteristike absorpcie a emisie žiarenia



# Fotovodivosť

- V dôsledku žiarenia vytvorené voľné elektróny a diery môžu byť **odvedené elektródami**, môžu **priamo rekombinovať** alebo byť **zachytené nejakými centrami**.
- Zachytné centrá môžeme rozdeliť na *rekombinačné centrá* a na *pasce*.
- Líšia sa od seba tým, že v prípade rekombinačného centra je väčšia pravdepodobnosť, že dôjde k rekombinácii zachyteného nosiča s nosičom náboja opačného znamienka než k návratu do voľného stavu vplyvom tepelnej excitácie, zatiaľ čo v prípade pasce je to naopak – pravdepodobnosť tepelnej znovu-excitácie je väčšia ako pravdepodobnosť rekombinácie.



# Fotovodivosť

- Existencia pascí sa prejavuje predovšetkým v tzv. **zotrvačnosti fotoelektrickej vodivosti**.
- Pozorovaná zotrvačnosť **je väčšia**, než doba života nosičov po ukončení optickej excitácie. Ak sa v látke **nenachádzajú pasce**, fotoelektrický prúd sa znižuje v závislosti na čase rovnako ako koncentrácia voľných nosičov a **zotrvačnosť je rovnaká ako doba života**.
- Ak je koncentrácia voľných nosičov porovnateľná alebo menšia ako koncentrácia nosičov zachytených v pasciach, potom **je zotrvačnosť** fotoelektrického javu v dôsledku tepelnej excitácie nosičov z pascí **väčšia** ako doba života voľných nosičov určená rekombinačnými procesmi.

# Fotovodivosť

• Monomolekulárna

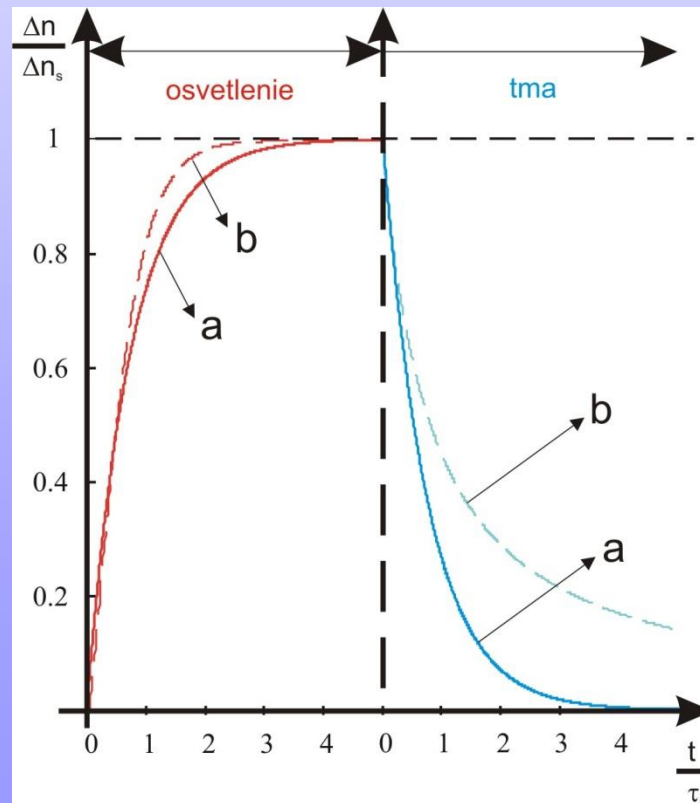
Bimolekulárna

$$\frac{d\Delta n}{dt} = G - a\Delta n$$

$$\Delta n = \frac{G}{a}(1 - e^{-at})$$

$$\frac{d\Delta n}{dt} = -a\Delta n$$

$$\Delta n = \frac{G}{a}e^{-at}$$



$$\frac{d\Delta n}{dt} = G - b(\Delta n)^2$$

$$\Delta n = \sqrt{\frac{G}{b}} \tanh(\sqrt{Gb} t)$$

$$\frac{d\Delta n}{dt} = -b(\Delta n)^2$$

$$\Delta n = \frac{\sqrt{\frac{G}{b}}}{\left(1 + \sqrt{Gb} t\right)}$$

# Fotovodivosť

- Podrobnejšie štúdium fotoelektrickej vodivosti si vyžaduje počítať s existenciou procesov zahrňajúcich vplyv pascí.
- Ak sú vo fotoelektricky vodivej látke rôzne druhy pascí s odlišnou aktivačnou energiou  $E_p$ , bude relaxačná krivka vyjadrená súčtom príslušného počtu exponenciál.
- V skutočnosti elektróny môžu byť zachytené, uvoľnené a opäť zachytené a celý tento sled sa môže aj niekoľkokrát opakovať.

# Fotovodivosť

- Často sa zotrvačnosť fotoelektrickej látky definuje ako parameter charakterizujúci túto látku z hľadiska fotoelektrickej vodivosti.
- V takom prípade sa pod ňou obyčajne myslí doba  $\tau_0$ , počas ktorej poklesne hodnota pôvodne stacionárneho fotoelektrického prúdu  $I_{fs}$  na hodnotu  $I_{fs}/e$ .
- Experimentálne bolo zistené, že zotrvačnosť je nepriamo úmerná veľkosti fotoelektrického prúdu. Najväčšia účinnosť fotoelektrickej vodivosti nastane vtedy, keď sa zotrvačnosť pri konštantnej intenzite elektrického poľa rovná dobe života voľných nosičov.

# Fotoelektrická citlivosť

- Aby bolo možné kvantitatívne ohodnotiť procesy generácie vodivostných elektrónov osvetlením v látkach a jednotlivé látky tak medzi sebou porovnávať, definujeme na to vhodné veličiny.
- Ako **citlivosť** fotoelektrickej látky označujeme podiel výstupnej ( $Y$ ) a vstupnej ( $X$ ) veličiny

$$G_s = \frac{Y}{X}$$

# Fotoelektrická citlivosť

- Výstupnou veličinou najčastejšie býva **elektrický prúd**. Vstupnou veličinou môže byť **žiarivý tok** (resp. svetelný tok), **intenzita ožiarenia** (príp. osvetlenie).
- Vzťah medzi vstupnou a výstupnou veličinou môže byť lineárny alebo nelineárny.
- V prípade nelineárnej charakteristiky má zmysel definovať tzv. **diferenciálnu citlivosť**  $G'_s$

$$G'_s = \frac{dY}{dX}$$

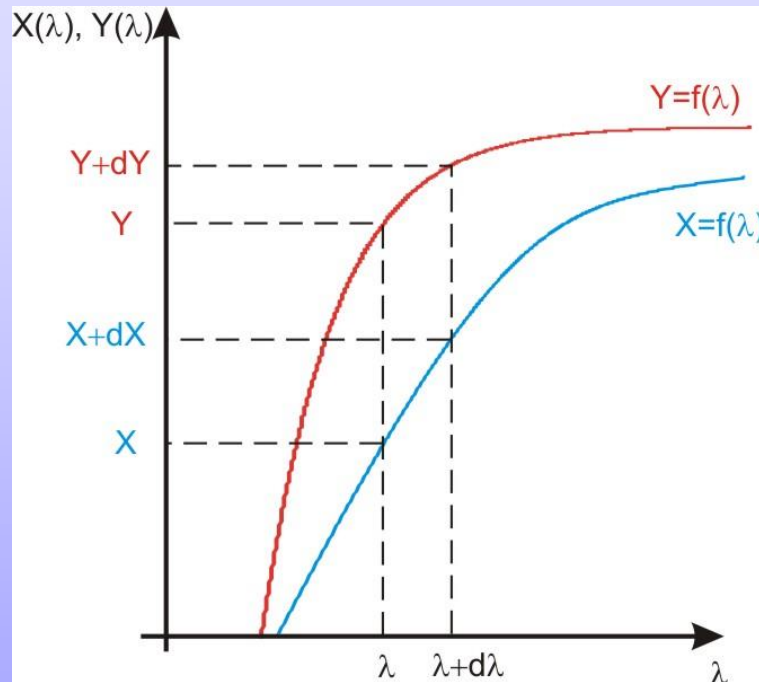
# Fotoelektrická citlivosť

- Jednou z najdôležitejších vlastností fotoelektrickej látky je závislosť jej citlivosti na vlnovej dĺžke žiarenia (energii). Z toho dôvodu sa zaviedla tzv. **spektrálna citlivosť** definovaná vzťahom

$$s(\lambda) = \frac{dY(\lambda)}{dX(\lambda)}$$

- $X(\lambda)$  je niektorá spektrálna žiarivá veličina, napr. monochromatický žiarivý tok a  $Y(\lambda)$  je príslušná spektrálna elektrická odozva

# Fotoelektrická citlivosť



- Pomocou spektrálnej citlivosti je možné vyjadriť aj citlivosť  $G_s$  vzťahnutú na nejaký širší spektrálny rozsah, definovaný intervalom vlnových dĺžok od  $\lambda_1$  do  $\lambda_2$

$$G_s = \frac{Y}{X} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X(\lambda)s(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X(\lambda)d\lambda}$$

- Túto citlivosť potom označujeme ako **integrálnu**.



# Fotoelektrická citlivosť

- Často sa citlivosť fotoelektrickej látky posudzuje výhodnejšie pomocou tzv. **kvantového výt'ážku**.

$$G_s = \frac{I_f}{\Phi_e} = \frac{I_f t}{\Phi_e t} = \frac{Q}{E} = \frac{n_e q}{n_f h\nu}$$

- Ak je kvantový výt'ážok definovaný ako počet žiarením vybudených elektrónov pripadajúcich na jeden fotón

$$\eta = \frac{n_e}{n_f}$$

$$\eta = G_s \frac{h\nu}{q}$$

# Fotoelektrická citlivosť

- Uvažovaná fotoelektrická vodivosť bola spôsobená nosičmi náboja, ktoré pri fotoexcitácii prechádzali z valenčného pásu do vodivostného pásu - **vlastná** (intrinzická) vodivosť.
- Podobne ako teplo, môže aj svetlo vyvolať prechody nosičov medzi lokálnymi energetickými hladinami vytvorenými v dôsledku prítomnosti prímiesí a vodivostným alebo valenčným pásom - **prímesová** (extrinzická) vodivosť.
- V prípade fotoexcitácie spôsobujúcej vlastnú fotoelektrickú vodivosť vzniká rovnaké množstvo nosičov opačného znamienka, zatiaľ čo v prípade prímesovej vodivosti sa väčšinou uvoľňujú len elektróny alebo len diery.
- Koeficient prímesovej absorpcie závisí od intenzity žiarenia (pri silnom osvetlení sa môže výrazne zmeniť obsadenosť prímiesí, v dôsledku čoho sa zníži absorpcia žiarenia).

# Organické polovodiče a fotovodiče

- Z veľkého množstva rôznych druhov pevných látok len niektoré vykazujú výraznú fotoelektrickú vodivosť. Tieto látky môžu byť **monokryštalické**, **polykryštalické** alebo aj **amorfné**.
- Polykryštalické látky sa s výhodou používajú vtedy, ak sa požaduje veľká ožarovacia plocha.
- Monokryštály sa používajú najmä pri základom výskume najmä preto, že sú lepšie fyzikálne definované.
- Dlhé obdobie bola jediným známym fotoelektricky vodivým materiálom šedá modifikácia selénu.

# Organické polovodiče a fotovodiče

- Na začiatku 20. storočia sa k nej pridali niektoré zlúčeniny ako  $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{Ag}_2\text{S}$ ,  $\text{CdS}$  a pod.
- Neskôr bola objavená fotovodivosť diamantu a alkalických halogenidov.
- V druhej polovici 20. storočia sa pozornosť sústredila na  $\text{CdS}$  a na zlúčeniny olova a potom na polovodiče ako germánium (Ge), kremík (Si) a telúr (Te).
- Po nich nasledovali polovodiče vytvorené zlúčením rvkov *III.* a *V.* skupiny periodickej sústavy prvkov.

# Organické polovodiče a fotovodiče

- Neskôr sa začala fyzika pevných látok zaoberať aj látkami organickými. Táto pozornosť bola a je podmienená požiadavkami techniky a biológie.
- Mnohé problémy elektroniky a optoelektroniky akými sú napr. premena svetelnej energie na elektrickú energiu, detekcia žiarenia, zobrazovanie (displeje), odstraňovanie elektrostatických nábojov z textílií, papierov, fólií, reprografické techniky, si vyžadujú organické vodiče, polovodiče a fotovodiče.
- Mechanizmy zodpovedné za vodivosť organických látok úzko súvisia s **poruchami, rozložením priestorového náboja** a v niektorých prípadoch aj s **nábojom injektovaným z okolia**.
- Možno tu nájsť podobnosť s mechanizmami existujúcimi v pevných látkach. Je možné teda taktiež hovoriť o pohybe voľných elektrónov, o tunelovom jave, o tzv. preskokovom mechanizme (hopping), pásový mechanizmus (vedúci k definícii pohyblivosti častice s nábojom) a pod.

# Organické polovodiče a fotovodiče

- Štruktúrnym modelom je grafit.
- Významnú skupinu organických polovodičov tvoria organické molekulové kryštály. Patria k nim polycyklické aromatické zlúčeniny a ich deriváty, organické komplexy s halogenovými a alkalickými iónmi, prenosové komplexy medzi dvoma organickými molekulami, heterocyklické a organokovové zlúčeniny (benzén, naftalén, antracén, pyrén, diketopyrrolopyrroly (DPP) a ich deriváty (diketofurofuran)).
- Očakáva sa, že by časom mohli nahradiť drahé tradičné anorganické polovodiče. Vďaka svojej fotovodivosti by tak mohli byť DPP použité na výrobu novej generácie fotodiód s nižším odberom alebo fotočlánky s vyššou účinnosťou premeny žiarivej energie na elektrickú energiu.

# Organické polovodiče a fotovodiče

- Akékoľvek využitie DPP smeruje predovšetkým k výrobe **lacnej elektroniky**, ktorej produkcia je šetrnejšia k životnému prostrediu a zároveň má menšiu spotrebu energie než aká je pri použití tradičných anorganických materiálov.
- V súčasnosti sa už vyrábajú displeje s použitím tzv. **OLED** (Organic Light Emitting Diode) alebo **OELD** (Organic Electro Luminescent Device), ktoré majú oproti starším displejom **vynikajúce podanie farieb** aj **pozorovacie uhly** a zároveň aj **nižšiu spotrebu energie**, čo umožňuje dlhšiu činnosť prenosných zariadení napájaných batériami.
- Zaujímavú a z hľadiska technického využitia sľubnú skupinu tvoria **fotovodivé polyméry**.

# Organické polovodiče a fotovodiče

- Ako príklad fotovodivého polyméru je možné uviesť napr. polyvinylkarbazol a tiofén.
- Požiadavky súčasných moderných technológií sa sústreďujú hlavne na **rýchlejšie, menšie a lacnejšie** elektronické súčiastky. Neuvažuje sa pri tom len s ľahko pripraviteľnými anorganickými polovodičmi, ale veľká pozornosť sa venuje práve vývoju nových organických elektronických súčiastok.
- Vlastnosti akými sú **nízka hmotnosť, výborná spracovateľnosť, mechanická flexibilita, farebná variabilita a protikorózna odolnosť** predurčujú organické polymérne materiály ako náhradu anorganických polovodičov a kovov v najrôznejších aplikačných oblastiach.



# Organické polovodiče a fotovodiče

- Medzi nesporné **výhody** organických vodivých polymérov patrí napr. už spomínaná **oxidačná stabilita, jednoduchá spracovateľnosť** a **vhodné optické vlastnosti**.
- Výnimočnosť týchto materiálov spočíva aj v tom, že ich **finálne parametre sa dajú prispôbovať konkrétnym požiadavkám danej aplikácie** a umožňujú tak pripraviť materiály doslova „šité“ na mieru alebo vytvoriť materiály úplne nové a originálne.

# Kontaktné javy medzi polovodičmi – PN prechod

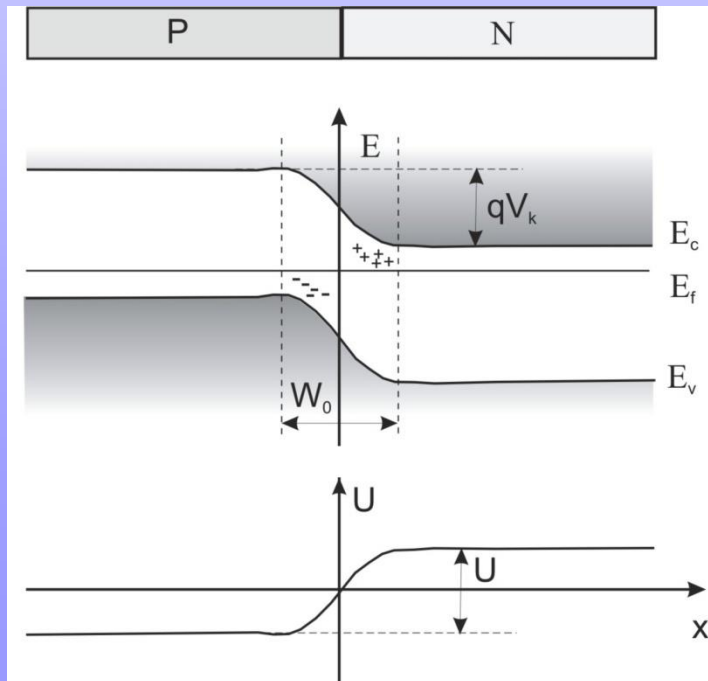
- Z hľadiska technických aplikácií samotné polovodiče nie sú často až také dôležité ako rôzne štruktúry technologicky vytvorené pospájaním vhodne dopovaných polovodičových materiálov.
- Na rozhraní týchto materiálov dochádza za rovnovážnych podmienok k nerovnomernému rozloženiu náboja na oboch stranách kontaktu a tým aj k deformáciám energetických pásov, ktoré majú nesúmerný priebeh potenciálu.
- Ukazuje sa, že takýto priebeh potenciálu je príčinou vzniku usmerňujúcich vlastností kontaktu, resp. prechodovej vrstvy, ktorá sa v okolí kontaktu vytvorí.

# Kontaktné javy medzi polovodičmi – PN prechod

- V pevných látkach môžeme vo všeobecnosti nerovnomerné rozloženie náboja a nesúmerný priebeh potenciálu dosiahnuť rôznymi spôsobmi, napr.:
- kontaktom dvoch kovov s odlišnými hodnotami výstupnej práce
- kontaktom medzi kovom a polovodičom
- povrchovými stavmi v polovodičoch
- vytvorením prechodov medzi polovodičmi typu N a P, napr. (PN, N<sup>+</sup>N, P<sup>+</sup>P, PNP, NPN, PIN, kde I označuje prítomnosť vrstvy vlastného (intrinzického) polovodiča)
- vytvorením rôznych typov prechodov medzi polovodičmi (typu N a P, všeobecne - S), izolantami (I) a kovmi (M) prípadne aj oxidmi kovov (O), napr. (MIN, MIP, MIS, MOS)
- vytvorením heteroprechodov (vznikajú v oblasti spojenia dvoch kryštalických polovodičov s odlišnou šítkou zakázaného pásu).

# Kontaktné javy medzi polovodičmi – PN prechod

- Zo všetkých vyššie spomenutých štruktúr patrí v optoelektronických zariadeniach k najrozšírenejším tzv. **PN prechod**. Tento prechod tvorí základ väčšiny detektorov a svetlo emitujúcich zariadení.



Šírka tzv. vyprázdnenej oblasti (hradlovej vrstvy) je

$$W_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} V_k \frac{n_n + p_p}{n_n p_p}}$$

# Kontaktné javy medzi polovodičmi – PN prechod

- Ak nie je prechod PN pripojený k žiadnemu vonkajšiemu zdroju napätia (elektrického poľa), vytvorí sa rovnovážny stav a súčtový prúd (elektrónov a dier) je nulový.
- Ak pripojíme kladný pól k oblasti P a záporný pól k oblasti N, dôjde k zníženiu potenciálovej bariéry a k zmenšeniu šírky hradlovej vrstvy.
- Zároveň dochádza k porušeniu rovnovážneho stavu medzi elektrónovými a dierovými prúdmi, pretože oveľa viac dier bude mať dostatočnú energiu na prekonanie zníženej bariéry a bude môcť prejsť do oblasti N a zároveň aj viac elektrónov z oblasti N bude môcť prejsť do oblasti P.
- Náhle zvýšenie koncentrácie nerovnovážnych minoritných nosičov náboja v okolí prechodu vyvolá prílev kompenzujúcich nosičov náboja z vnútra príslušnej oblasti (elektrónov z oblasti N a dier z oblasti P), čo vedie k značnému nárastu prúdu cez prechod – hovoríme o tzv. **injekcii** nosičov náboja.

# Kontaktné javy medzi polovodičmi – PN prechod

- Pre celkový prúd prechádzajúci PN prechodom v priepustnom smere teda môžeme napísať

$$I = (I_{p0} + I_{n0}) \left[ e^{\frac{eU'}{kT}} - 1 \right]$$

# Kontaktné javy medzi polovodičmi – PN prechod

- Ak pripojíme vonkajší zdroj v **závernom smere**, výška potenciálovej bariéry sa zväčší a zväčší sa aj šírka hradlovej oblasti.
- V oblasti P (N) sa značne zníži počet dier (elektrónov), ktoré ju môžu prekonať - hovoríme o tzv. **extrakcii** nosičov.
- V oblasti N je však počet dier, ktoré tam vzniknú nezmenený a pod účinkom poľa sa môžu veľmi ľahko dostať cez bariéru do oblasti P. Driftový prúd cez prechod sa teda prakticky nemení - prúd dier tečie sprava doľava a prúd elektrónov zľava doprava (vzhľadom na obr. ) Celkový prúd (v závernom smere) teda bude

$$I_z = (I_{p0} + I_{n0}) \left[ 1 - e^{-\frac{eU'}{kT}} \right]$$

# Fotovoltaický jav

- Odchýlky od rovnomerného usporiadania priestorového náboja vedú k vzniku tzv. **fotoelektrického napätia** a pozorujeme tak rôzne **fotovoltaické javy**.
- Obyčajne fotovoltaické javy vznikajú na PN prechodoch buď priamou excitáciou elektrónov a dier v dôsledku ožiarenia látky alebo v kombinácii s tunelovým javom, ak nie je energia fotónov väčšia ako energia odpovedajúca šírke zakázaného pásu.



# Fotovoltaický jav

- Pri **objemovom fotovoltaiickom jave (Demberov jav)** silno absorbované žiarenie v pevnej látke vytvára vysoké koncentrácie elektrónov a dier pri jej povrchu a takýmto spôsobom vytvorené voľné častice difundujú do objemu materiálu. Elektróny s vyššou pohyblivosťou predbiehajú diery a dochádza tak k oddeleniu náboja v objeme látky. Povrch sa nabíja kladne a vnútro záporne. Aby došlo k tomuto javu, musí byť buď pevná látka určitým spôsobom nehomogénna alebo ak je homogénna, stačí použiť nehomogénne osvetlenie. Tento jav vzniká pri povrchu pevných látok v okolí kontaktu kovu a polovodiča ale aj pozdĺž polovodiča medzi jeho ožiarenou a neožiarenou časťou. Demberovo napätia vzniká nezávisle od iných fotovoltaiických javov a jeho príspevok k týmto javom sa buď pričítava alebo odčítava.

# Fotovoltaický jav

- **Fotomagnetoelektrický jav** - ak ožiarime látku žiarením, ktoré je v nej silno absorbované, vznikajú páry elektrón – diery, ktoré difundujú smerom od povrchu. Po aplikovaní magnetického poľa s vektorom magnetickej indukcie kolmým na difúzny prúd, odchýlia sa elektróny a diery pri svojom pohybe v dôsledku Lorentzovej sily na opačné strany a kolmo na smer vektora aj na smer dopadajúceho žiarivého toku vzniká elektrické napätie.

# Fotovoltaický jav

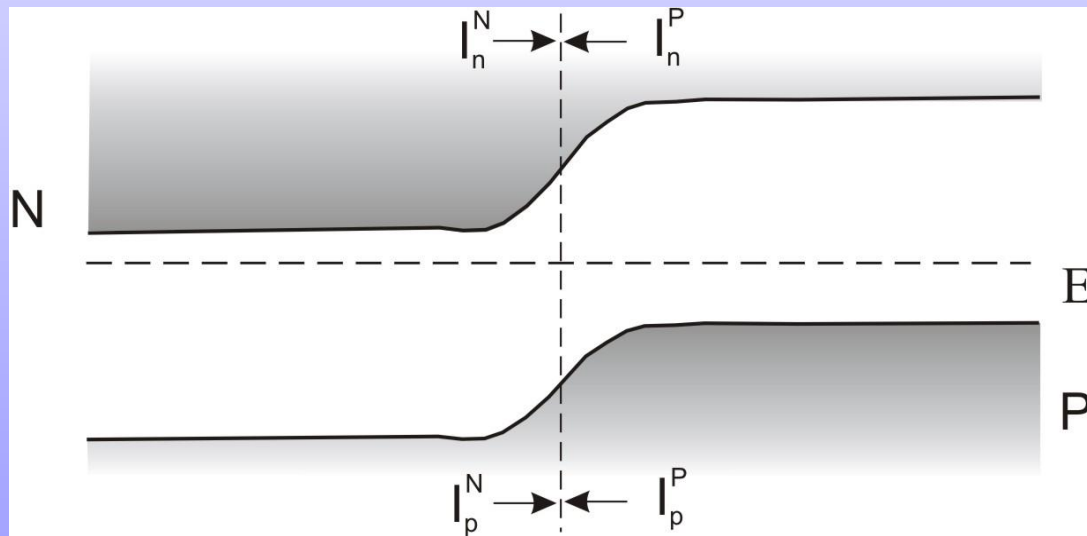
- **Anomálny fotovoltaický jav**, ktorý vzniká v niektorých polovodičoch (napr. Ge, Si, GaAs, ZnS,...) v tenkých vrstvách špeciálne pripravených epitaxným rastom. Napätie pri tomto jave vzniká pozdĺž povrchu a nie je povrchovým javom. Je možné ho vysvetliť modelom vrstvených chýb, modelom striedavých PN prechodov alebo modelom založeným na Demberovom jave.

# Fotovoltaický jav

- Medzi fotovoltaické javy zaradujeme aj **priečny fotovoltaický jav**, ktorý vzniká na opticky indukovaných bariérach a na stupňovitých zakázaných pásoch a tzv. **fotopiezoelektrický jav**, pri ktorom dochádza k zmene šírky zakázaného pásu v dôsledku deformácie hrotom.

# Fotovoltaický jav

- Najznámejší a z technického hľadiska najvýhodnejší je **bariérový fotovoltický jav** (vznikajúci na prechode PN).



- V rovnovážnom stave:

$$I_n^N - I_p^N - I_n^P + I_p^P = 0$$

# Fotovoltaický jav

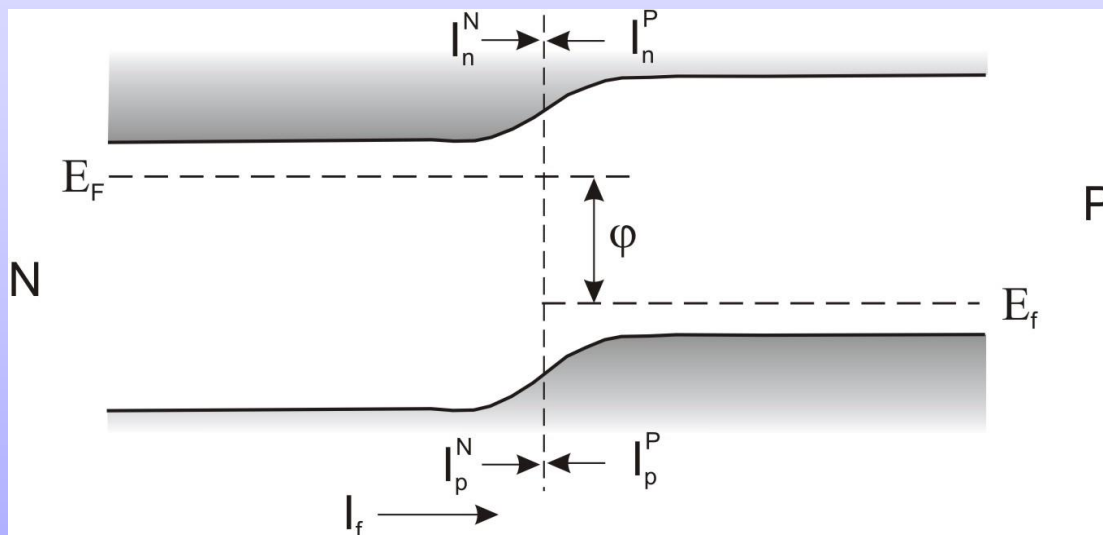
- Zároveň platí, že algebraický súčet elektrónových aj dierových prúdov tečúcich cez PN prechod je rovný nule:

$$I_n^N = I_n^P = I_{ns} \quad I_p^N = I_p^P = I_{ps}$$

# Fotovoltaický jav

- Ak ožiarime jeden z polovodičov, napr. s elektrónovou vodivosťou (typ N), vytvoria sa v ňom páry elektrón – diera.
- Kvôli potenciálovej bariére vytvorenej v dôsledku PN prechodu len veľmi málo elektrónov môže preniknúť do oblasti polovodiča typu P a preto vplyv osvetlenia sa podstatne prejaví len zväčšením koncentrácie minoritných nosičov náboja (dier v polovodiči typu N), v prípade ktorých sa vplyv potenciálovej bariéry neprejaví.
- Tým sa vytvára prúd dier, ktorého prírastok označme ako  $I_f$ . Tento prúd však mení podmienky rovnováhy. Prúd dier spôsobuje nabíjanie polovodiča typu P kladne vzhľadom na polovodič typu N. To znamená, že Fermiho hladiny majú teraz v oboch polovodičoch odlišnú polohu.

# Fotovoltaický jav



- Rozdiel ich polôh odpovedá potenciálovému rozdielu  $U_f = \phi/q$  vytvorenému v dôsledku osvetlenia. Posuvom hladín pri osvetlení rastie prúd rovnovážnych elektrónov z polovodiča typu N do polovodiča typu P a rovnovážnych dier v opačnom smere. Pre zmenené hodnoty príslušných prúdov

$$I_n^N = I_{ns} e^{\frac{\phi}{k_B T}} \quad I_p^P = I_{ps} e^{\frac{\phi}{k_B T}}$$



# Fotovoltaický jav

- Prúd v ustálenom stave:  $I_n^N - I_p^N - I_n^P + I_p^P + I_f = 0$
- Elektromotorické napätie:  $U_f = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{I_f}{I_s} + 1\right)$
- Ak je PN prechod pripojený k vonkajšiemu obvodu, ktorým tečie prúd  $I$ :  $U_f = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{I_f - I}{I_s} + 1\right)$
- V prípade, že je PN prechod pripojený k zaťažovaciemu odporu  $R$  a v obvode je ešte aj zdroj s napätím  $U$ :  
$$I_f - I_s \left( e^{\frac{\varphi}{k_B T}} - 1 \right) = \frac{U_f - U}{R}$$

# Fotovoltaický jav

- Skutočné PN prechody sú väčšinou asymetrické, t.j. vodivosti oboch typov polovodičov sa od seba značne odlišujú. Všetky procesy sú tak určené silnejšie dopovaným materiálom, t.j. buď prúdom dier alebo elektrónov.
- Z hľadiska aplikácií sa PN prechody s fotovoltaickým javom využívajú najmä na premenu optického signálu na signál elektrický (napr. fototranzistory a detektory v komunikačnej technike) a v zariadeniach určených na premenu žiarivej energie na elektrickú energiu (fotovoltaické meniče).