

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 zvýšením 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 ožiareníím 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 Δn a Δp , čo sa prejaví zväčšením elektrickej vodivosti. Jej prírastok $\Delta\sigma$ teda bude

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

Fotovodivosť

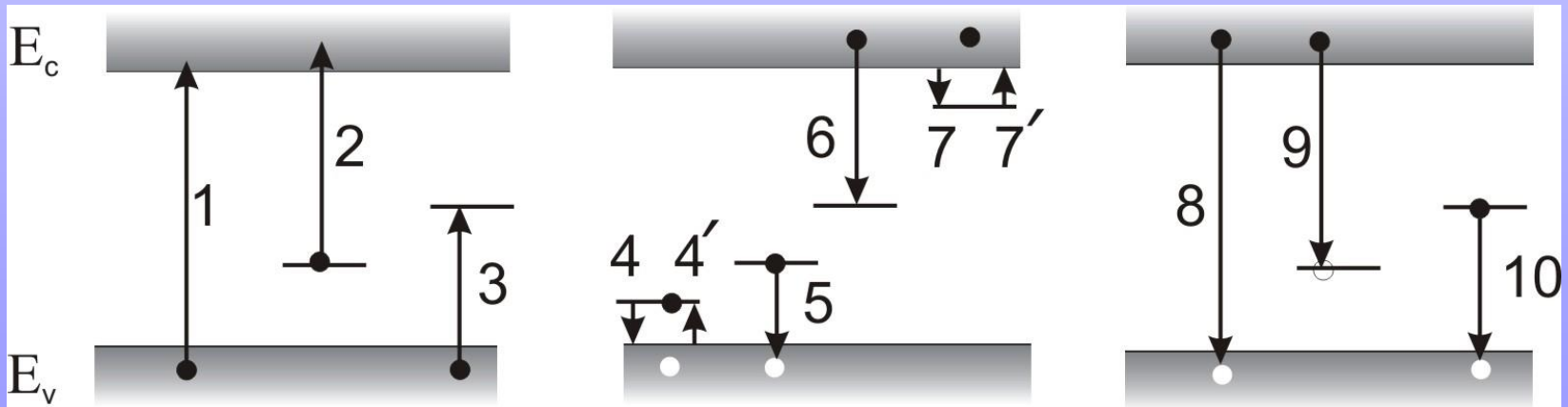
- Po priložení malého napätia na kontakty vzorky budeme pozorovať fotoelektrický prúd

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

- 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.

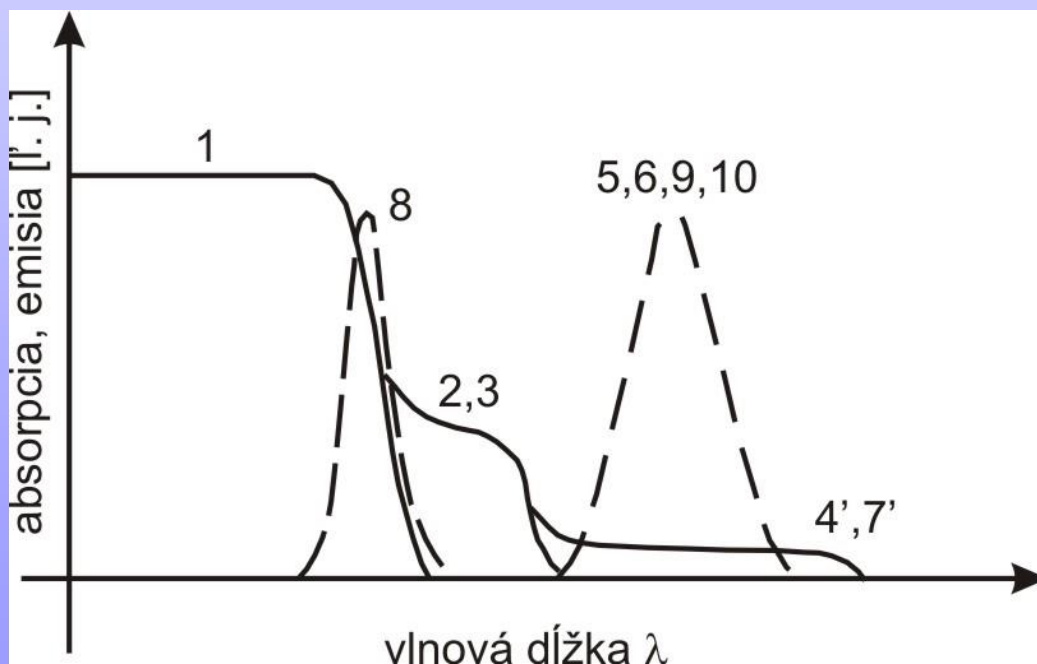
Fotovodivosť

- 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 prejavia 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**.
- Záchytné 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.

Fotovodivost'

• Monomolekulárna

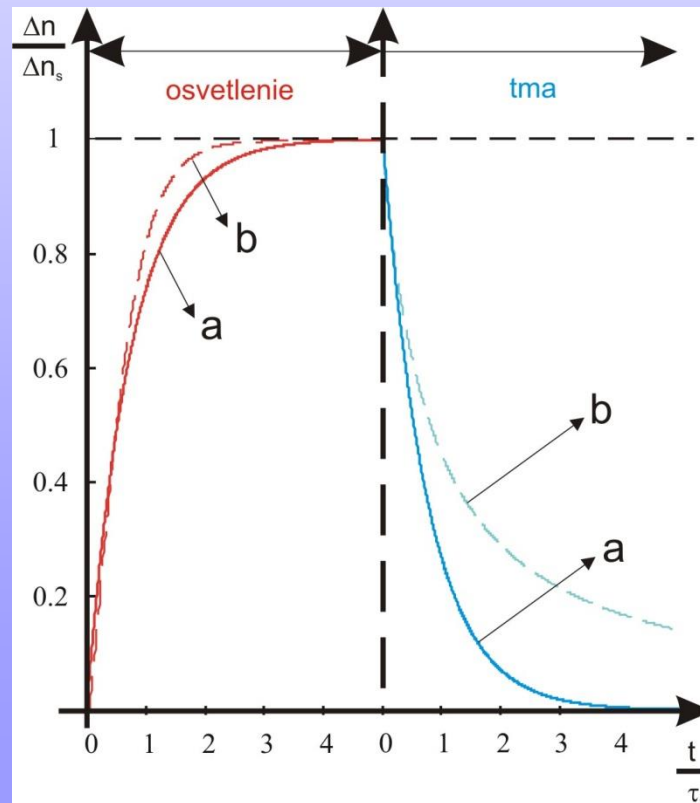
Bimolekulárna

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

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

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

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



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

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

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

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

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 τ_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

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

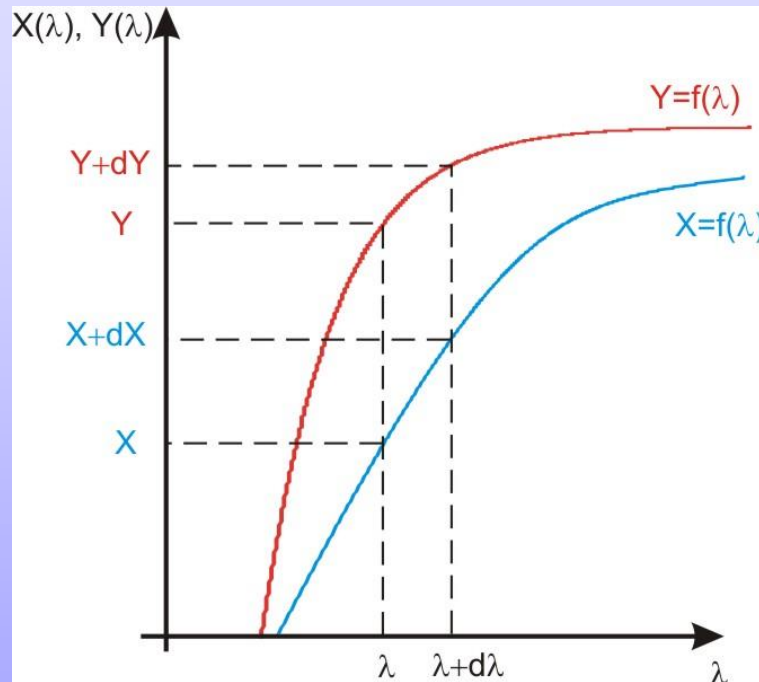
Fotoelektrická citlivosť

- 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 λ_1 do λ_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 Sb_2S_3 , Cu_2O , Ag_2S , CdS a pod.
- Neskôr bola objavená fotovodivosť diamantu a alkalických halogenidov.
- V druhej polovici 20. storočia sa pozornosť sústredila na 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

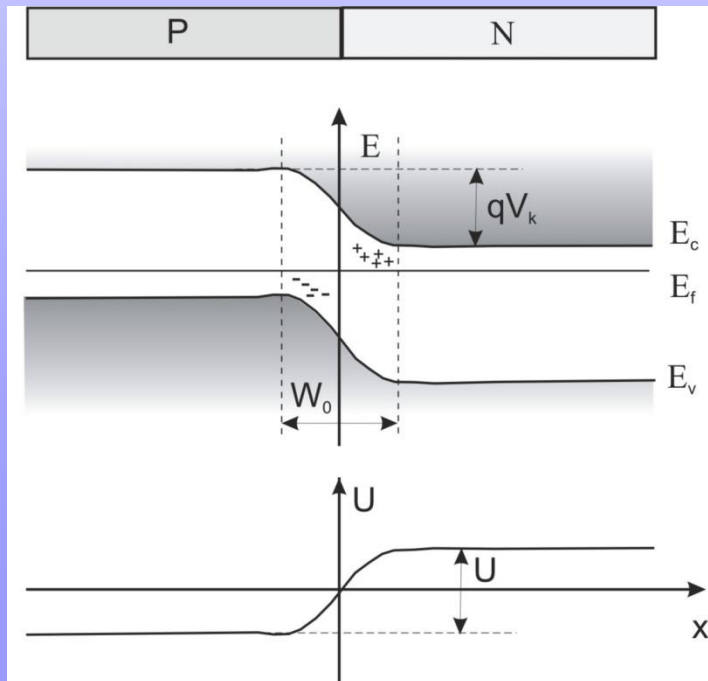
- Z hľadiska technických aplikácií samotné polovodiče nie sú často až také dôležité ako rôzne štruktúry technologicky vytvorené pospájaním vhodne dopovaných polovodičových materiálov.
- Na rozhraní týchto materiálov dochádza za rovnovážnych podmienok k nerovnomernému rozloženiu náboja na oboch stranách 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⁺N, P⁺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 fotovoltaickom jave (Demberov jav)** silno absorbované žiarenie v pevnej látke vytvára vysoké koncentrácie elektrónov a diery 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 fotovoltaických 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

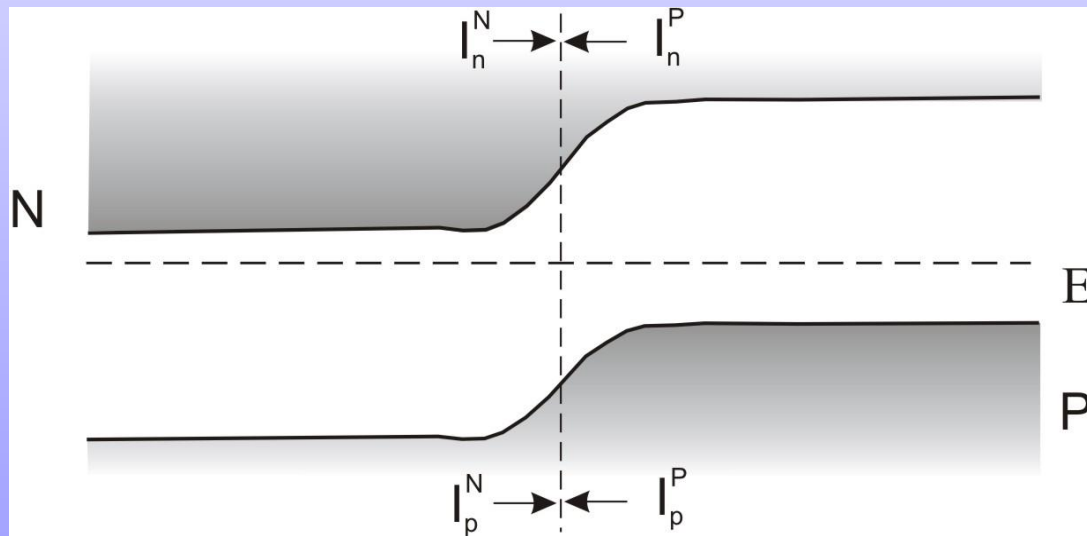
- **Anomálny fotovoltaický jav**, ktorý vzniká v niektorých polovodičoch (napr. Ge, Si, GaAs, ZnS,...) v tenkých vrstvách špeciálne pripravených epitaxným rastom. Napätie pri tomto jave vzniká pozdĺž povrchu a nie je povrchovým javom. Je možné ho vysvetliť modelom vrstvených chýb, modelom striedavých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

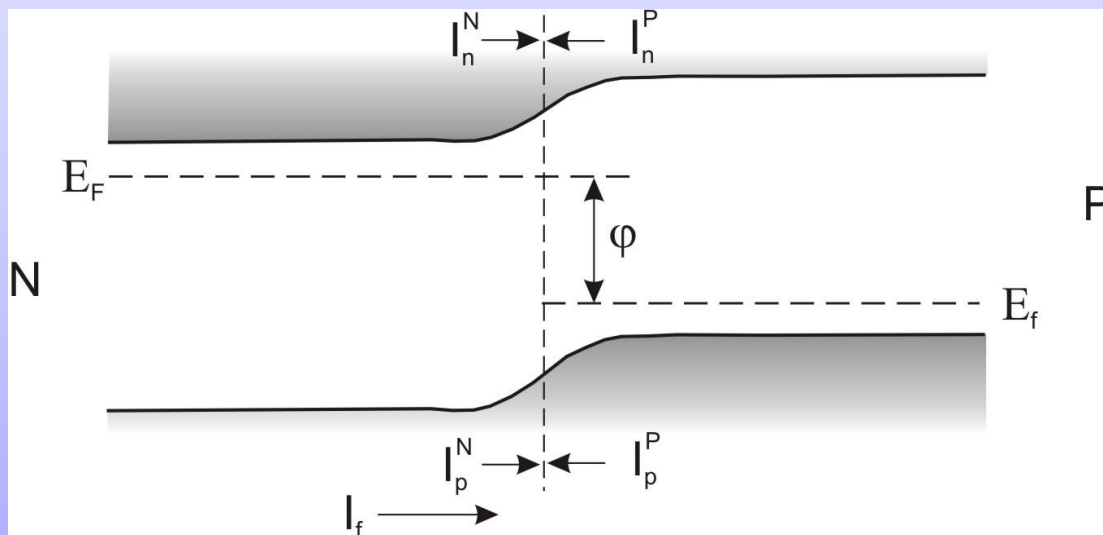
- Zároveň platí, že algebraický súčet elektrónových aj dierových prúdov tečúcich cez PN prechod je rovný nule:

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

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).