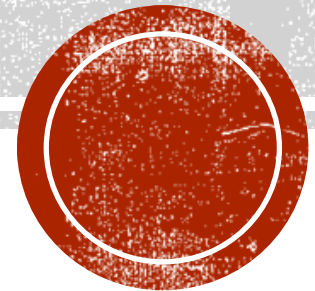


ELEKTRONIKA

Viera Stopjaková (viera.stopjakova@stuba.sk)

Ústav elektroniky a fotoniky

FEI STU

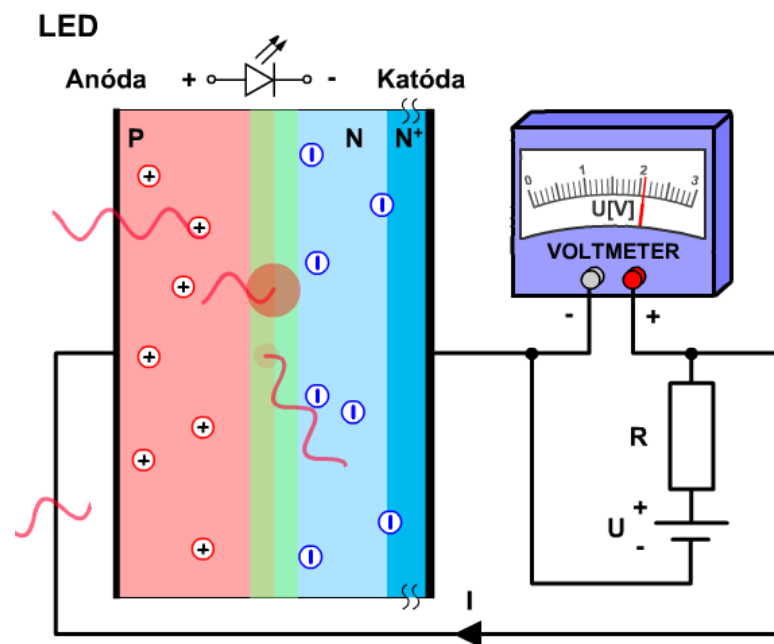
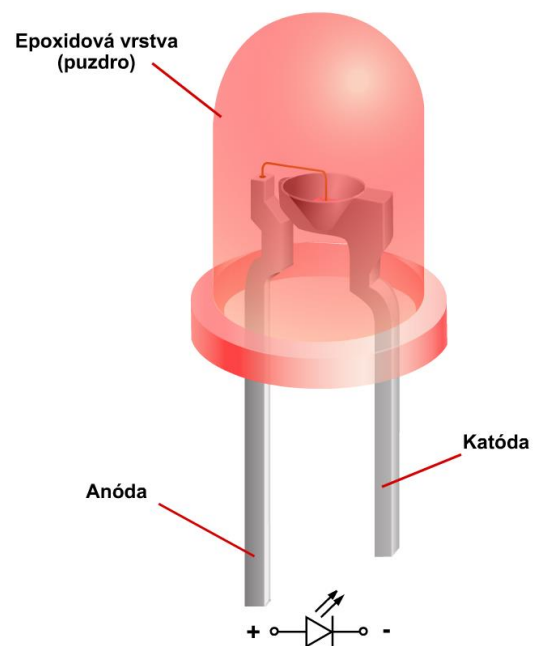


POLOVODIČOVÉ PRVKY

Prednáška

2

- Polovodičové diódy a tranzistory sú **aktívne** el. prvky
- Využívajú vlastnosti polovodičov a polovodičových *pn* priechodov



Elektronické materiály

- Z hľadiska vodivosti (resp. odporu) ich delíme na:

- **Vodiče**

- Merný odpor $\rho \approx 10^{-8} \Omega\text{m}$
- Kovy – slúžia na elektrické prepoje
- Polykryštalický kremík – hradlo MOS tranzistora

- **Polovodiče** – el. vodivosť sa mení v rozsahu viac ako 10 rádov

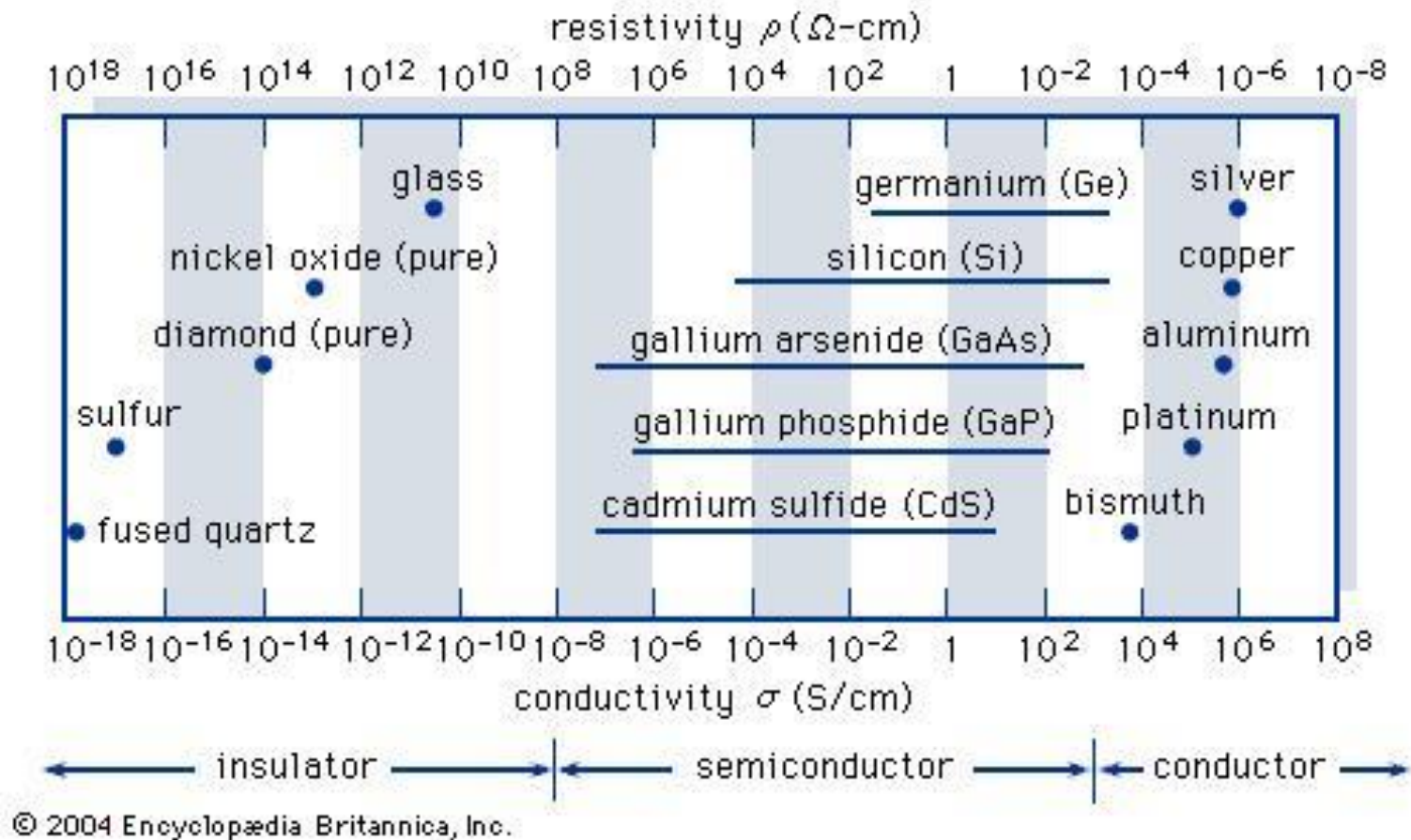
- teplotou, osvetlením, tlakom...
- dosahuje sa aj **pridávaním nečistôt** do polovodiča
- Merný odpor $\rho \approx 10^{-6} \Omega\text{m}$
- Si, SiGe, InP, GaN,....

- **Izolanty** – materiály slúžiace ako dielektrické vrstvy

- Vysoký merný odpor: $\rho \approx 10^{10}$ až $10^{16} \Omega\text{m}$

Elektronické materiály

▪ Vodivosť/Odpor rôznych materiálov

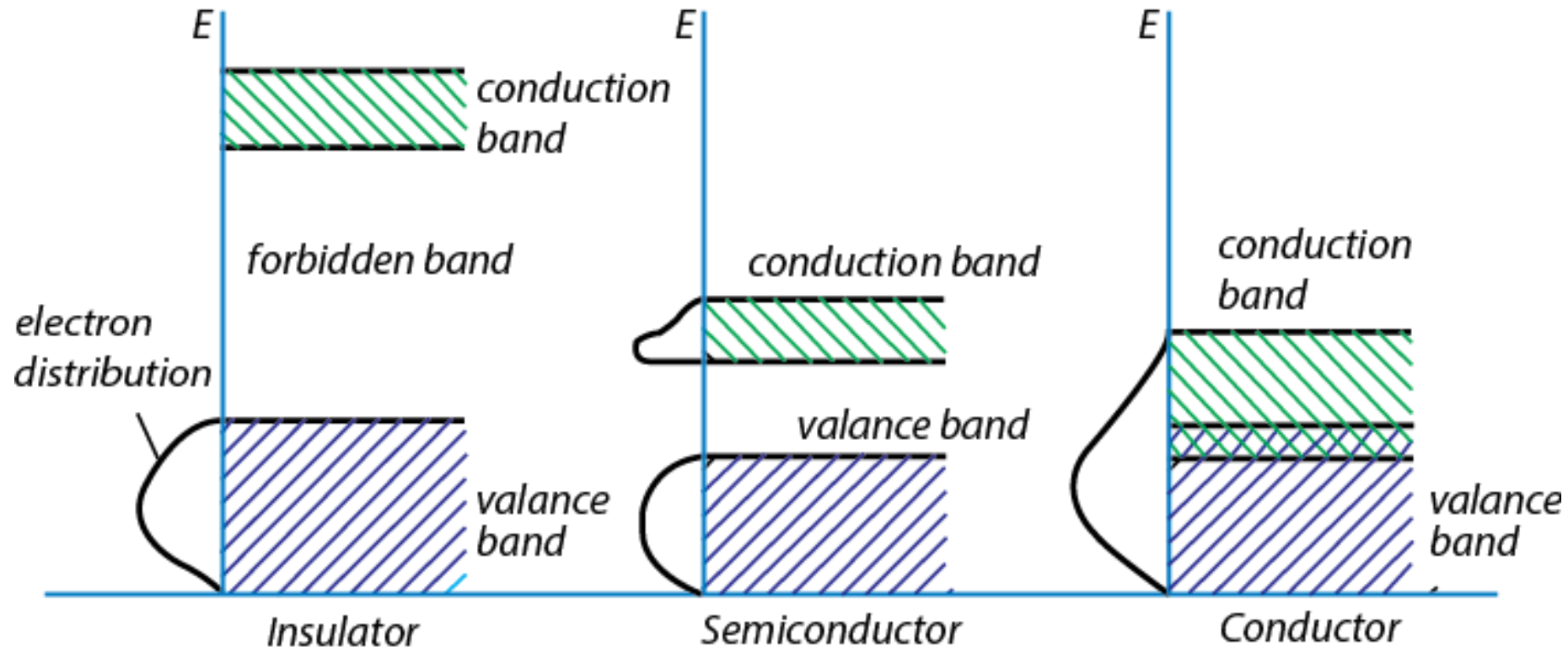


Periodická tabuľka prvkov

Perióda/ Skupina	II	III	IV	V	VI
2		B Bór	C ⁶ Uhlík	N Dusík	
3	Mg Horčík	Al Hliník	Si¹⁴_{28,09} Kremík	P Fosfor	S Síra
4	Zn Zinok	Ga Gallium	Ge Germánium	As Arzén	Se Selén
5	Cd Kadmium	In Indium	Sn Cín	Sb Antimón	Te Telúr
6	Hg Ortuť		Pb Olovo		

Kremík naj častejšie používaný polovodič

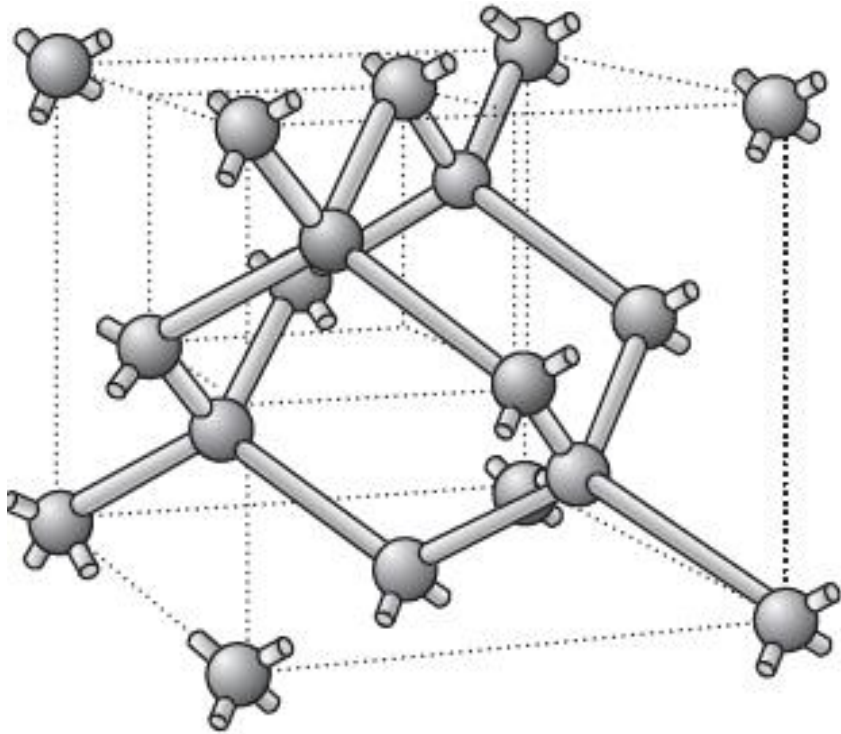
Energetický pásmový diagram



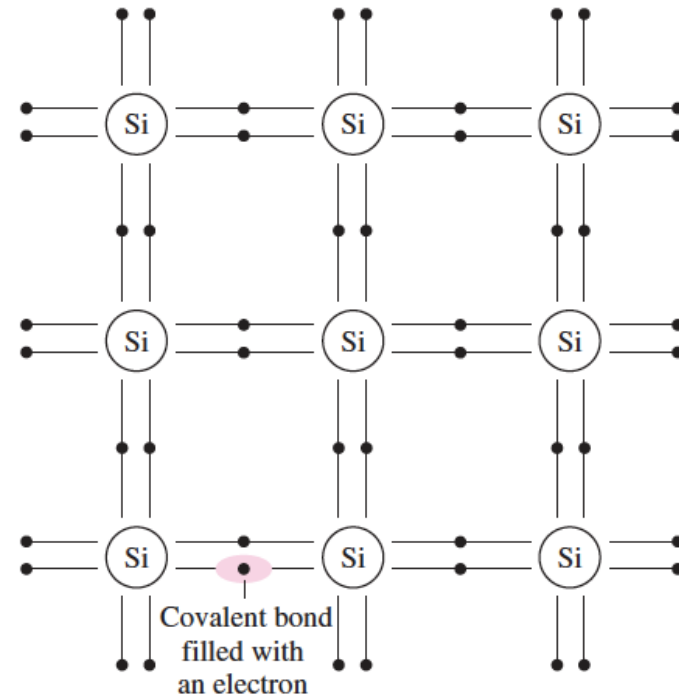
Zakázané pásmo - energia potrebná, aby sa elektrón dostal z valen ného do vodivostného pásma

Štruktúra kremíka

3D štruktúra



2D štruktúra

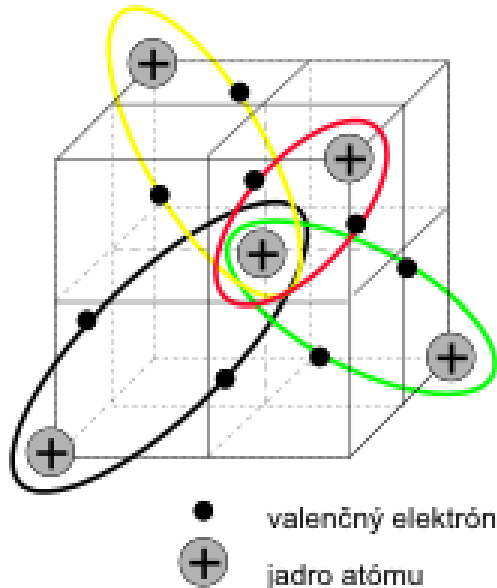


Elektróny sú viazané tzv.
kovalentnou väzbou

Vlastný polovodič

■ Čistý, t.j. **intrinzický polovodič**

- **Kremík** - medzi atómami existujú chemické väzby, ktoré viažu každý atóm na ďalšie štyri susedné atómy
- Za chemické väzby sú zodpovedné **valenčné elektróny**
- Táto väzba sa nazýva **kovalentná** (nasýtená)



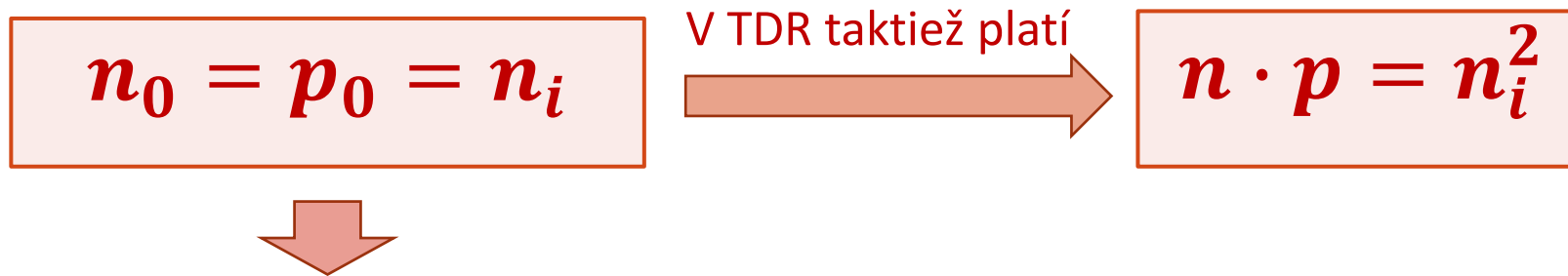
- Dodaním energie sa uvoľní elektrón z väzby - vzniká **voľný elektrón** (voľne sa pohybujúci záporný bodový náboj)
- Ionizovaný atóm v okolí neutrálnych atómov vytvára kladný bodový náboj - doplnený elektrónom zo susednej väzby
- Zdanlivý pohyb kladného bodového náboja sa nazýva **voľná diera**

Generácia a rekombinácia

- Vodivosť v čistom polovodiči je spôsobená **voľnými nosičmi náboja**
- Proces vzniku elektrónu a diery sa nazýva **generácia**
- **Rekombinácia** - pri interakcii elektrónu s dierou sa obsadí voľná diera voľným elektrónom za súčasného vyžiarovania energie
 - Ak sa energia uvoľňuje vo forme fotónu – dochádza k emisii svetla = žiarivá rekombinácia
- Základným typom generácie pri izbovej teplote je **tepelná generácia** (voľné elektróny a diery sú generované tepelnými kmitmi kryštalickej mriežky)

Podmienka elektrickej neutrality (vlastný polovodič)

- V intrinzickom (vlastnom) polovodiči

$$\boxed{n_0 = p_0 = n_i} \xrightarrow{\text{V TDR taktiež platí}} \boxed{n \cdot p = n_i^2}$$


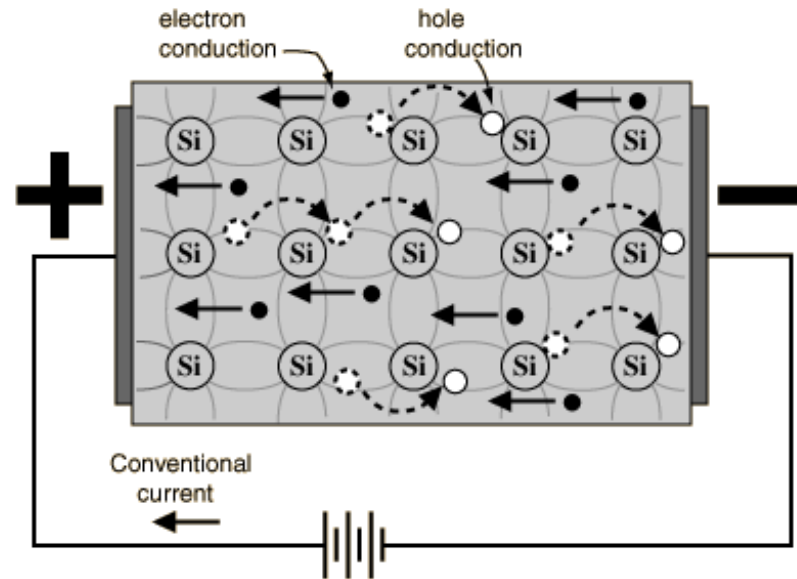
Koncentrácia voľných elektrónov sa musí rovna koncentrácii voľných dier; označíme ju n_i a nazývame ju vlastnou alebo **intrinzickou koncentráciou**

n_0 – rovnovážna koncentrácia **voľných elektrónov**

p_0 – rovnovážna koncentrácia **voľných dier**

Vlastný polovodič

- Otázka: Čo sa stane keď pripojíme napätie na čistý kremík?
Bude tiecť prúd?



↓

Odpoveď: Pri absolútnej nule **nie**,
ale pri vyššej teplote **áno**

Koncentrácia voľných elektrónov v 1 cm^3 čistého Si
pri teplote 27°C :

$$5 \times 10^{22} \text{ atómov Si/cm}^3$$

$$n_i = 10^{10} \text{ elektrónov/cm}^3$$

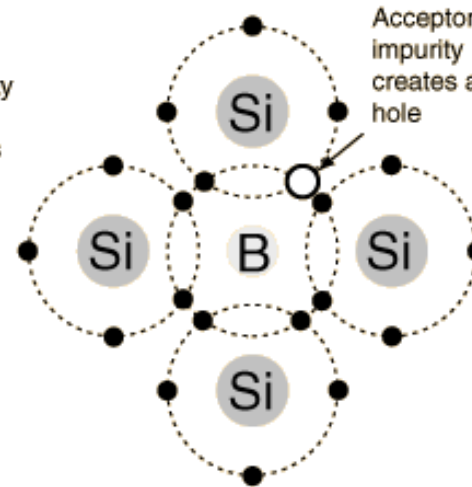
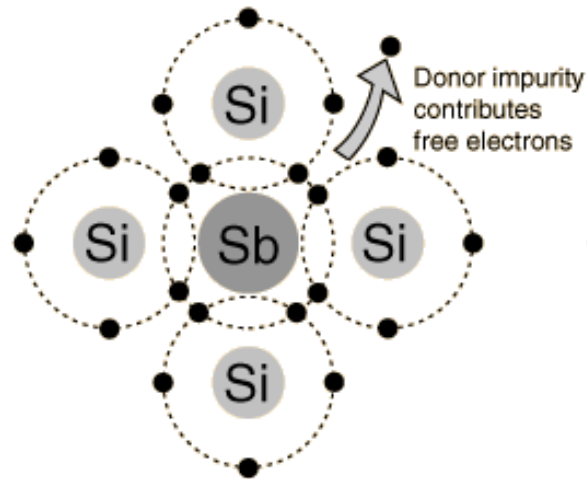
istý Si = zlý vodi

Prímesový polovodič

- Otázka: Ako zvýšime koncentráciu voľných nosičov náboja?

Dopovanie - úmyselne zavádzanie **prímesi** do polovodiča

N typ

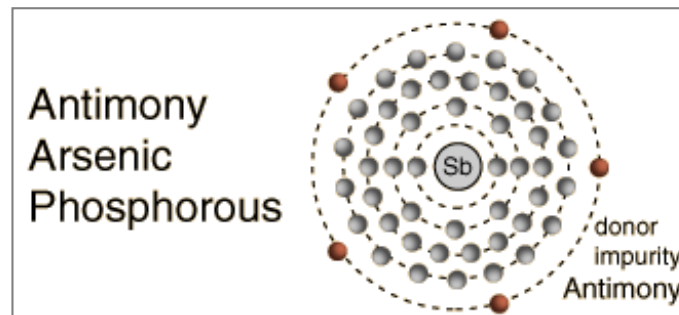


P typ

Prímesový polovodič

Typ vodivosti	Typ vodivosti
P	N
(Pozitívni)	(Negatívni)
10,81	30,97376
5B	15P
Bór	Fosfor
	33As
	Arzén

12



N - typ polovodiča = donorový

Prímesové atómy dodávajú elektrón, ktorý nie je viazaný vo väzbách s okolitými atómami

P - typ polovodiča = akceptorový

Prímesové atómy majú iba 3 valenčné elektróny, ktoré sú viazané vo väzbách s okolitými atómami

Podmienka elektrickej neutrality (prímesový polovodič)

- V termodynamickej rovnováhe (TDR) platí:

$$n + N_A^- = p + N_D^+$$



Súčet koncentrácie voľného a fixného kladného náboja sa rovná súčtu voľného a fixného záporného náboja

N_D^+ – koncentrácia **ionizovaných donorov**

N_A^- – koncentrácia **ionizovaných akceptorov**

n – koncentrácia **voľných elektrónov**

p – koncentrácia **voľných dier**

Podmienka elektrickej neutrality (prímesový polovodič)

- Pre polovodič **typu N** platí:

Koncentrácia
majoritných nosičov
náboja

$$n = N_D$$

$$p = \frac{n_i^2}{N_D}$$

Koncentrácia
minoritných nosičov
náboja

- Pre polovodič **typu P** platí:

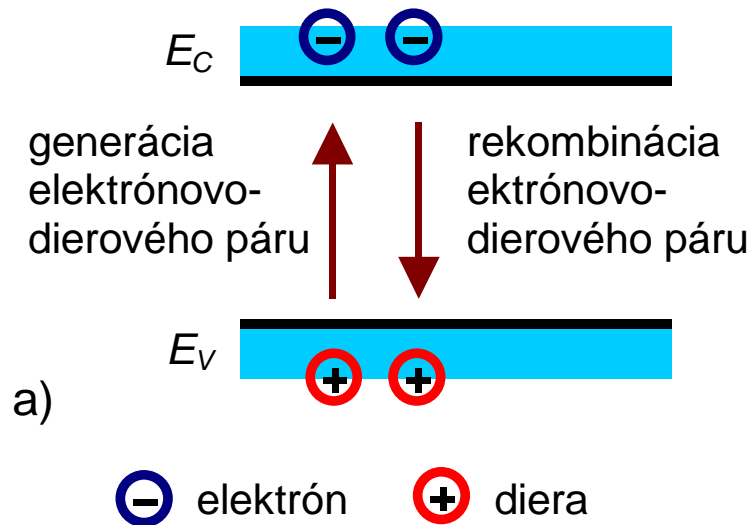
Koncentrácia
majoritných nosičov
náboja

$$p = N_A$$

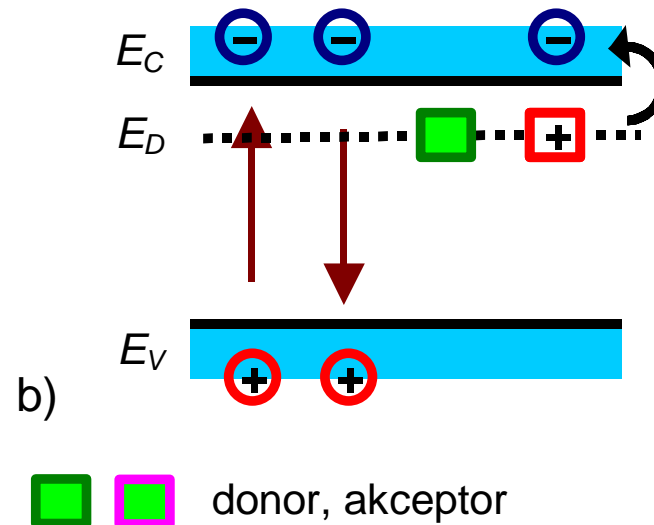
$$n = \frac{n_i^2}{N_A}$$

Koncentrácia
minoritných nosičov
náboja

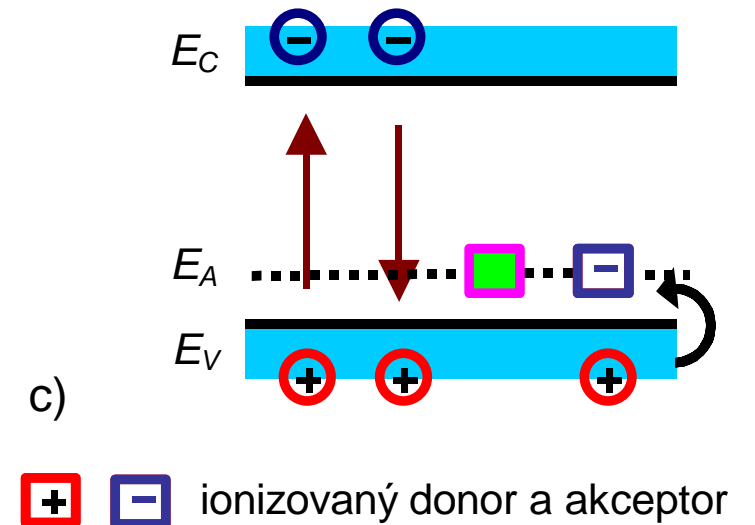
Energetický pásmový diagram



a) intrinzický



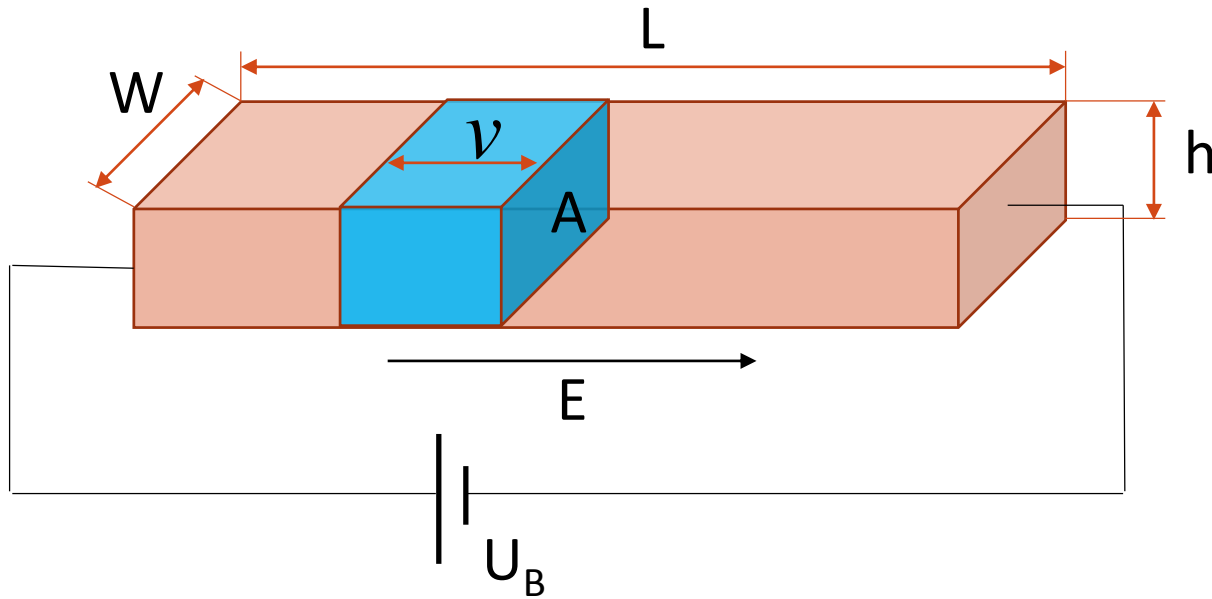
b) donorový



c) akceptorový

Driftový prúd

- Prúd spôsobený v polovodiči elektrickým poľom = **driftový prúd**



- Nosič náboja sa pohybuje rýchlosťou **v** metrov/s
- Objem **v.Wh** predstavuje množstvo náboja, ktoré prejde plochou **A** za 1 sek.
- Množstvo náboja za jednotku času = **prúd**

$$E = \frac{U_B}{L}$$

$$v = \mu E$$

Plocha $A = W \cdot h$

$$\text{prúd} = v A \cdot n \cdot q$$

Objem

Počet elektrónov

Náboj elektrónu

$$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{C}$$

Driftový prúd

$$\boxed{I = vA \cdot n \cdot q} \quad \begin{array}{c} v = \mu E \\ \xrightarrow{\hspace{1cm}} \\ E = \frac{U_B}{L} \end{array} \quad \boxed{I = \mu \frac{U_B}{L} A \cdot n \cdot q}$$

- **Hustota prúdu** = prúd na jednotku plochy $J = I/A$ [A/m²]
- Plocha $A = Wh$
- **Celkový prúd (prúdová hustota)** = súčet elektrónovej a dierovej zložky

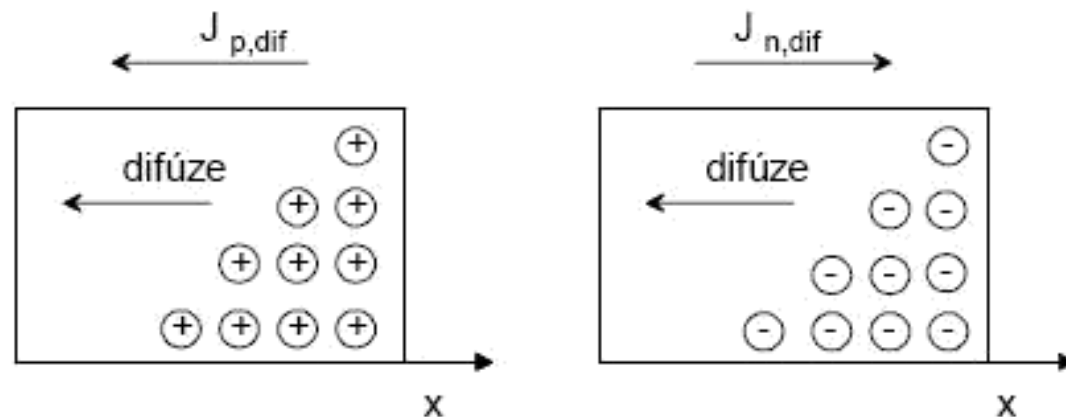


$$\boxed{J_{drif} = J_n + J_p = (\mu_n n + \mu_p p) E \cdot q}$$

Difúzny prúd

Difúzny prúd je spôsobený pohybom nosičov náboja z miesta s **vysokou koncentráciou** smerom k miestam s **nízkou koncentráciou**.

Difúzna prúdová hustota je závislá od gradientu koncentrácie prímesí a **difúzneho koeficientu** elektrónov D_n , resp. dier D_p :



$$J_{dif} = \left(D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx} \right) q$$

Celková prúdová hustota cez polovodič je daná súčtom **difúzného a driftového prúdu**.

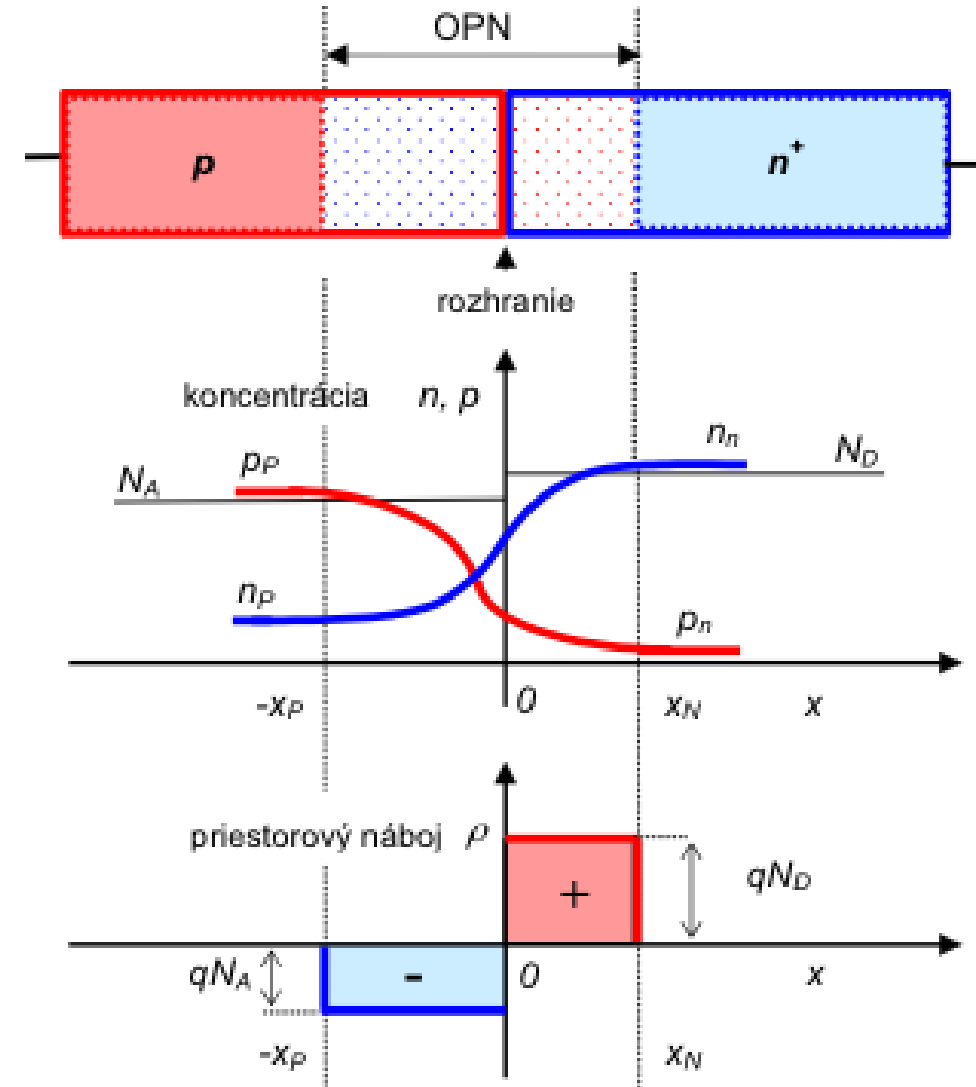
PN priechod

- Základná štruktúra **polovodičových prvkov**
- **PN priechod** – oblasť kde sa mení typ vodivosti polovodiča z **P** na **N**
- Rekombináciou v okolí rozhrania vzniká **oblasť ochudobnená o voľné nosiče náboja**



Oblasť priestorového náboja (OPN)

- v P type - oblasť so záporným nábojom
- v N type - oblasť s kladným nábojom



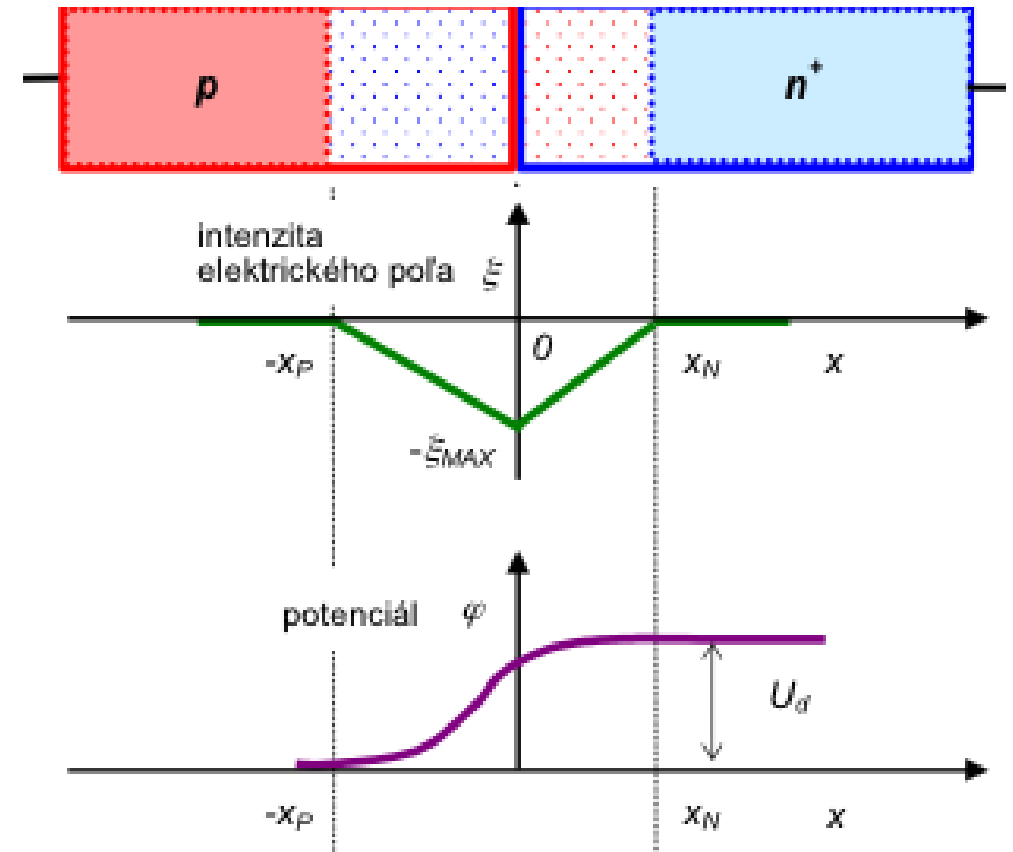
PN priechod

- OPN vytvára elektrické pole ktoré, bráni ďalšiemu pohybu majoritných nosičov náboja



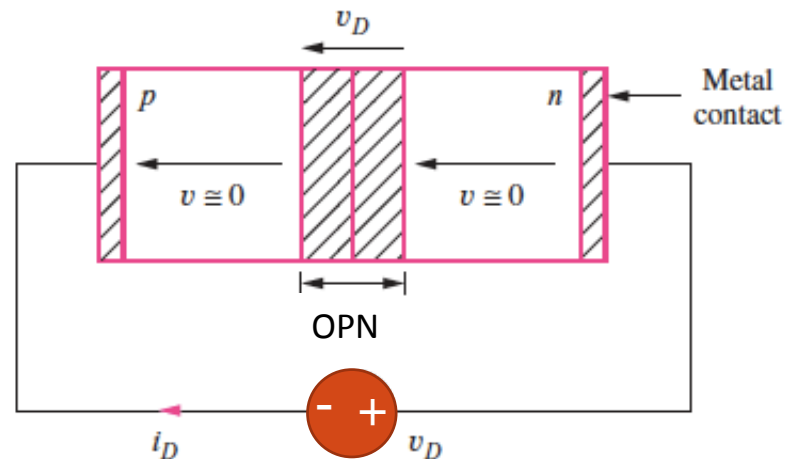
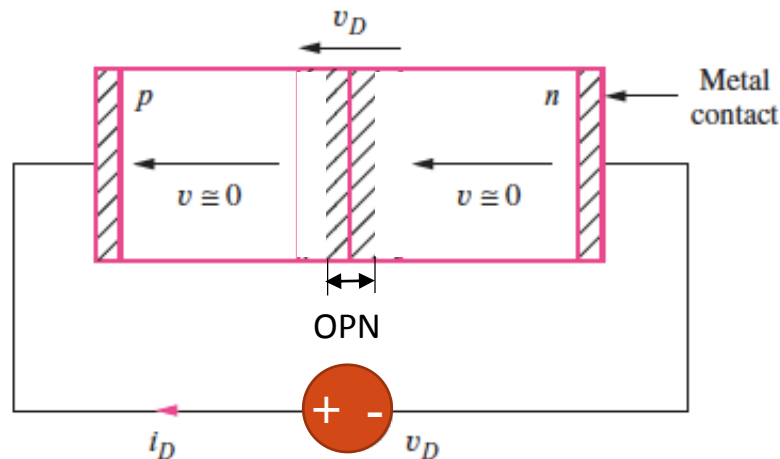
Potrebuje dodat' **energiu**
nosičom náboja na prekonanie
potenciálovej bariéry, ktorú
vytvára OPN

Pripojenie **vonkajšieho**
elektrického napätia



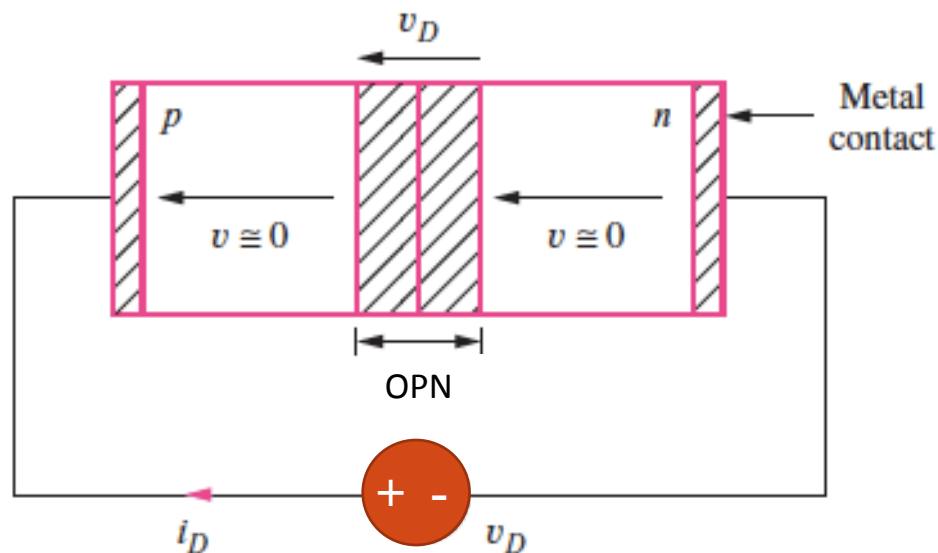
Polarizácia PN priechodu

- **Pripojením napätia** na PN priechod dochádza k zmene rozloženia potenciálu v okolí PN priechodu
 - **Polarita** priloženého napätia môže spôsobiť tok elektrického prúdu
- **POLARIZÁCIA**
 - **Priepustná** – na oblasť typu N je pripojený záporný a na oblasť typu P kladný pól napäťového zdroja
 - **Záverná** – kladné napätie na oblasť typu N a záporný pól na oblasť typu P



Záverne polarizovaný PN priechod

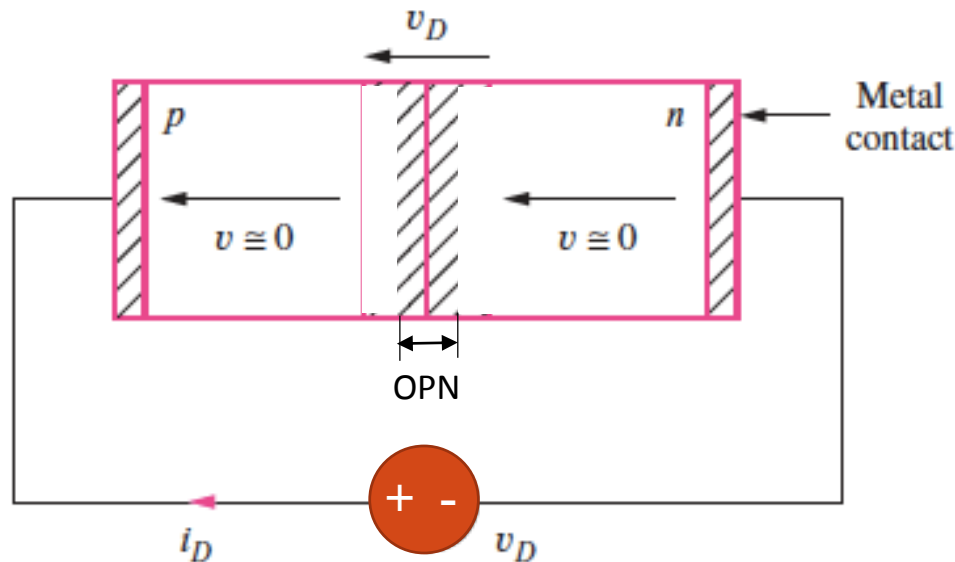
- Pri **závernej polarizácii** - vonkajší napäťový zdroj zväčšuje rozdiel potenciálov na kontaktoch
 - **Potenciálová bariéra** brániaca majoritným nosičom prechádzať cez rozhranie sa **zvyšuje**
- Prúd prechádzajúci PN priechodom v závernom smere je **veľmi malý**, rádovo pod μA a nazýva sa **zvyškový prúd diódy I_S**



Záverná polarizácia PN -
OPN sa rozširuje

Priepustne polarizovaný PN priechod

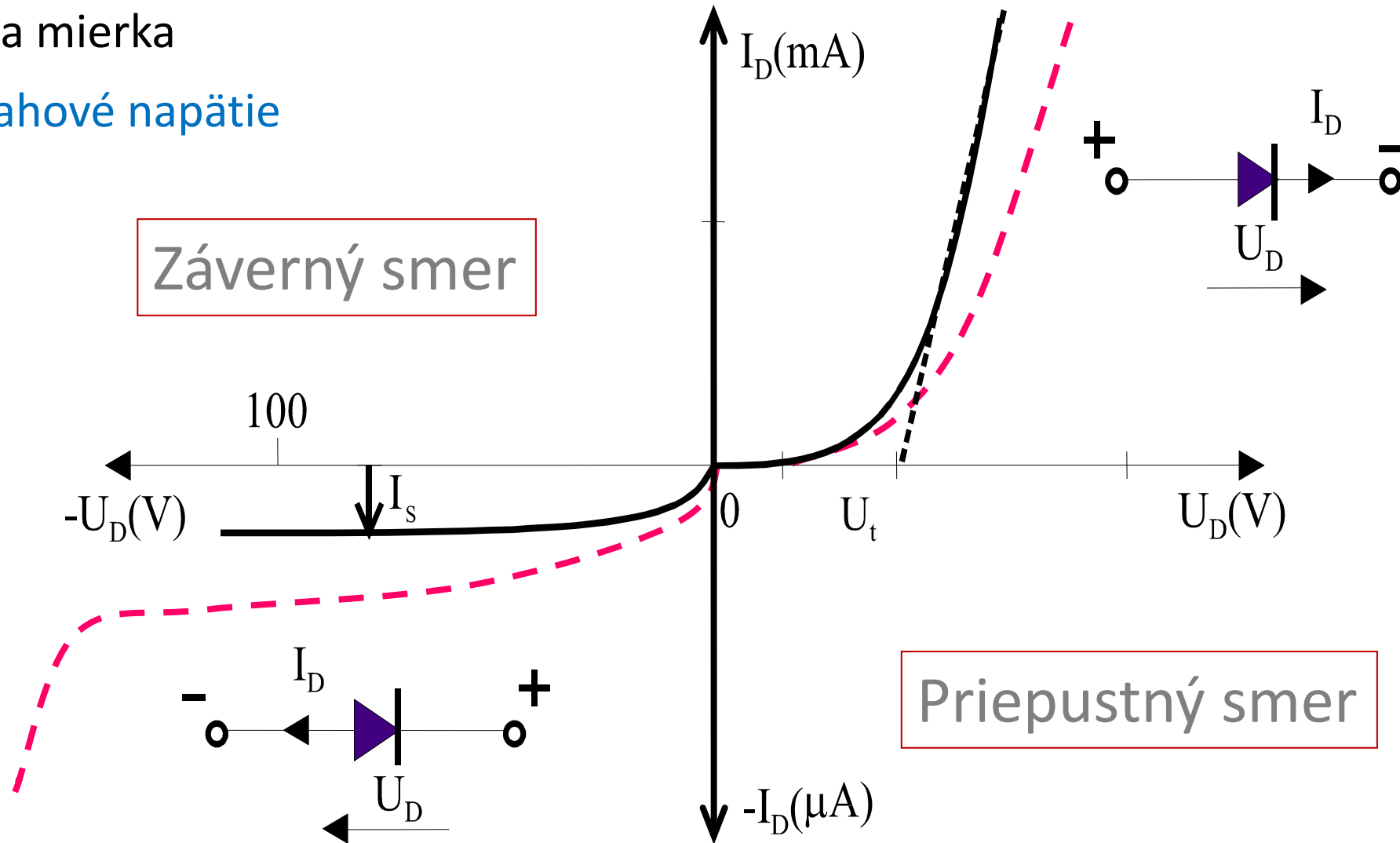
- Pri priepustnej polarizácii - potenciálová bariéra sa znižuje
 - Voľné elektróny z oblasti N sú vháňané do oblasti P , kde sa stávajú minoritnými a difundujú do objemu polovodiča P (diery sú vtláčané z oblasti P do oblasti N)
- Miera **injekcie nosičov náboja** je daná napätím zdroja U



Zvyšovaním hodnoty napätia U sa OPN zužuje

V-A charakteristika PN priechodu

- lineárna mierka
- U_t – prahové napätie



PN priechod – Shockleyho rovnica

- V-A charakteristiku ideálneho *PN* priechodu možno opísať exponenciálnou závislosťou, **tzv. Shockleyho rovnicou**

$$I_F = I_S \left(\exp \left(\frac{qU_F}{nkT} \right) - 1 \right)$$

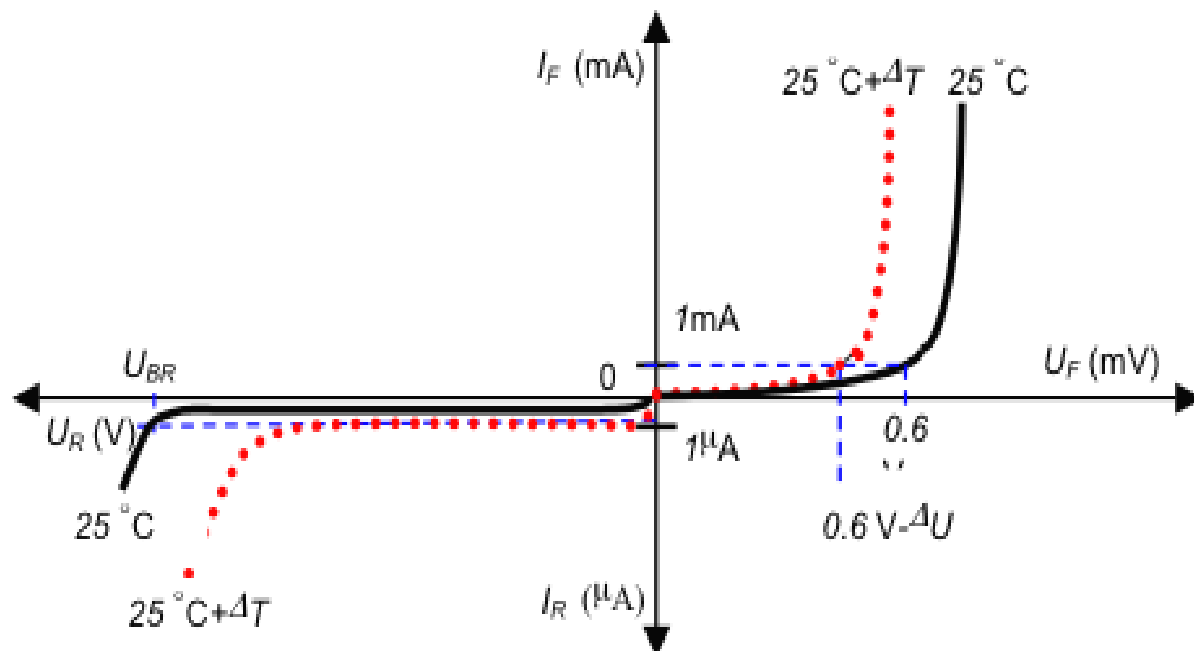
I_S - je zvyškový prúd diódy v závernom smere

U_F - je napätie na *PN* priechode

n - je idealizačný faktor *PN* priechodu (od 1 po 2)

k - Boltzmanova konštanta

T - absolútna teplota



Prúd *PN* priechodom v priepustnom smere **exponenciálne narastá** a v závernom smere sa blíži ku konštantnej hodnote **zvyškového prúdu**

Prieraz PN prechodu

- V závernom smere môže dôjsť k **napäťovému prierazu**
- Prudké zvýšenie prúdu v závernom smere po prekročení určitého **prierazného napätia U_{BR}**

Prierazné mechanizmy:

- Tepelný
- Zenerov
- Lavínový
- **Tepelný prieraz** - spôsobený lokálnym prehriatím materiálu
(veľká výkonová strata koncentrovaná do malého objemu)
 - vzniká pri nedostatočnom odvode tepla
 - je deštruktívny, dochádza k znehodnoteniu súčiastky

Prieraz PN prechodu

- **Zenerov prieraz** - nastáva pri silnej závernej polarizácii strmého *PN* priechodu
 - prierazné napätia sú nízke ($0 \div 5,6$ V)
 - na rozhraní *PN* priechodu vzniká veľmi vysoké EP
 - V silnom EP sú valenčné elektróny vytrhávané z atómových väzieb a stávajú sa voľnými (vnútorný emisný jav)
 - Zvýšenie počtu voľných elektrónov v polovodiči spôsobuje prudký nárast elektrického prúdu
 - **Jav tunelovania** cez *PN* priechod (zakázané pásmo sa v EP zošikmuje)
 - Ak je EP dostatočne silné, pásmo sa zošikmí natoľko, že potenciálová bariéra zakázaného pásma sa stane veľmi úzkou → **nastáva tunelovanie**

Prierez PN prechodu

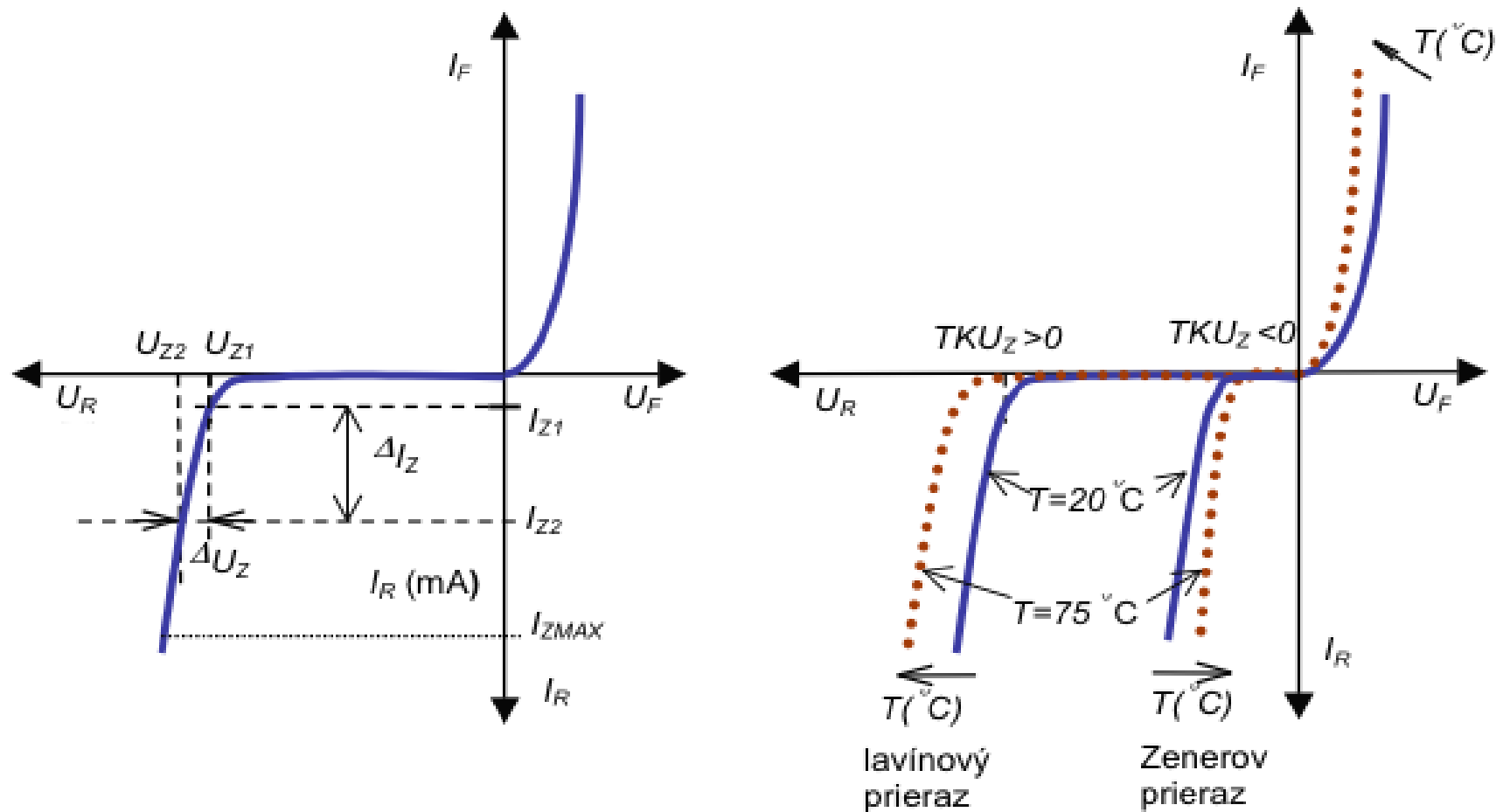
- **Lavínový prierez** - urýchľovanie voľných elektrónov v silnom EP
 - elektróny získajú kinetickú energiu dostatočnú na ionizáciu základných atómov polovodiča (vyrážajú ďalšie elektróny z väzieb a znásobujú počet)
 - voľné elektróny sú ďalej urýchľované opäť vyrážajú viazané elektróny
 - Počet VNN rastie geometrickým radom (nastáva pri napätí $> 5,6 \text{ V}$)



Zenerov aj lavínový prierez sú **nedeštruktívne**
a citlivé na zmeny teploty -> využitie v
stabilizačných diódach

Prierez PN prechodu

- V-A charakteristika stabilizačnej diódy s naznačenou teplotnou závislosťou pre jednotlivé typy nedeštruktívneho prierezu



Dióda (PN priechod)

- Aktívna elektronická súčiastka s jedným PN priechodom a s dvomi elektródami, ktorá má nelineárne **usmerňujúce vlastnosti**

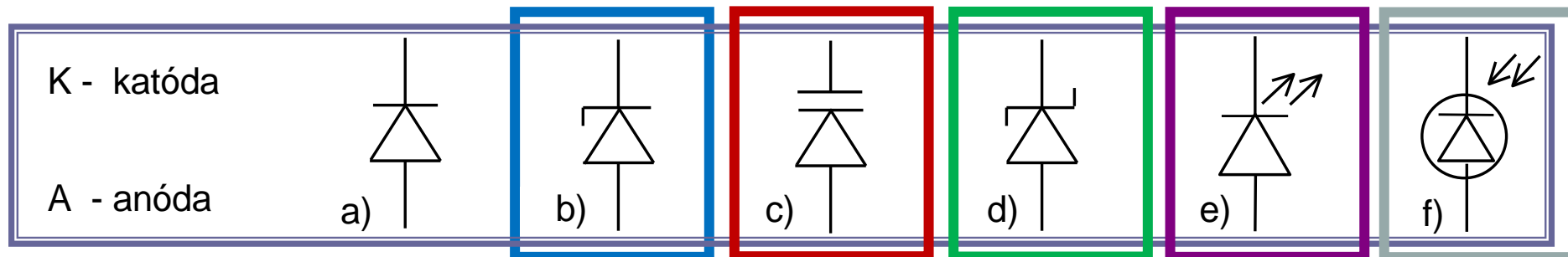
Model



Symbol



- a) usmerňovacia dióda
- b) stabilizačná dióda
- c) kapacitná dióda
- d) Schottkyho dióda
- e) svetlo emitujúca dióda
- f) fotodióda

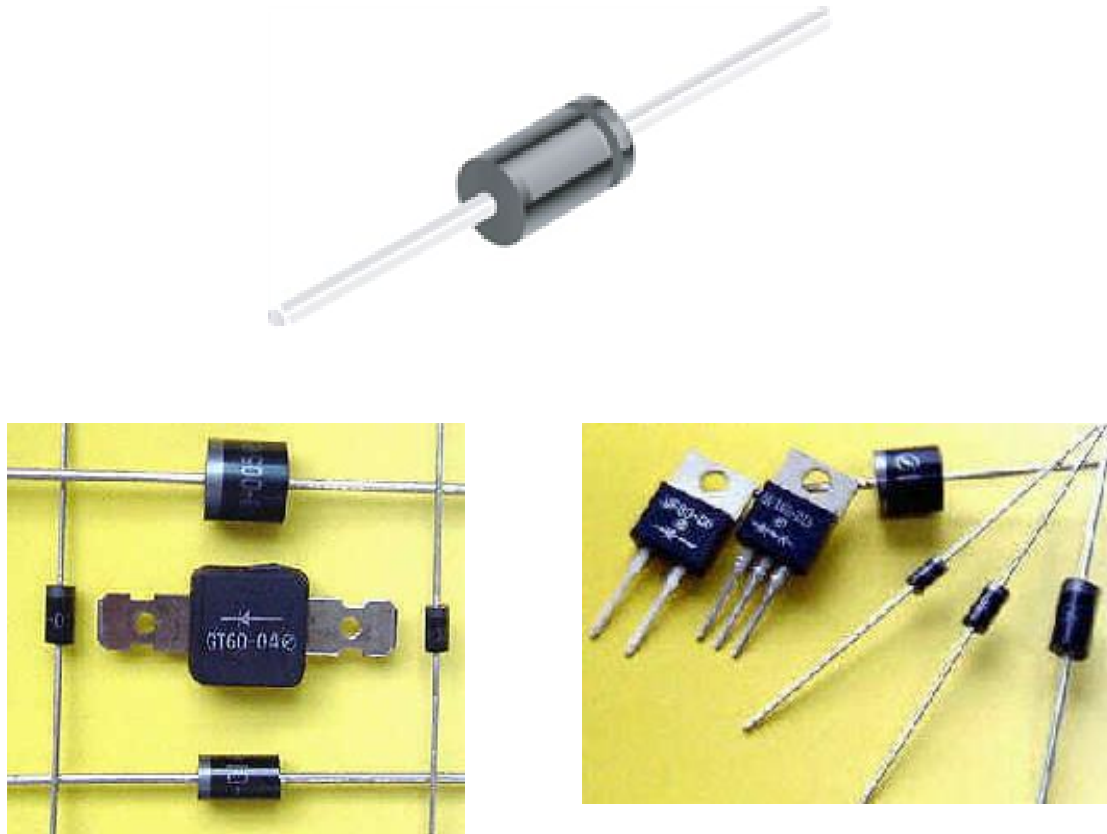


Rozdelenie diód podľa použitia

typ diódy	využívané vlastnosti
usmerňujúce	asymetrická V-A charakteristika
stabilizačné	napäťový prieraz v závernom smere
kapacitné	bariérová kapacita <i>PN</i> priechodu
fotodetekčné	optická generácia voľných elektrónov a dier
svetlo emitujúce	žiarivá rekombinácia voľných elektrónov a dier
mikrovlnné	mikrovlnné vlastnosti
spínacie	asymetrická V-A charakteristika
tunelové	záporný dynamický odpor

Rozdelenie diód podľa puzdrenia

Diódy s drôtovými vývodmi

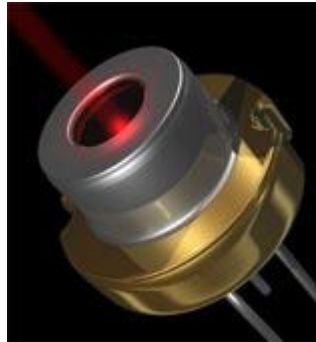


SMD diódy

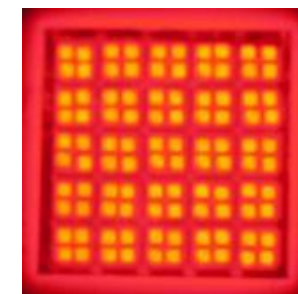
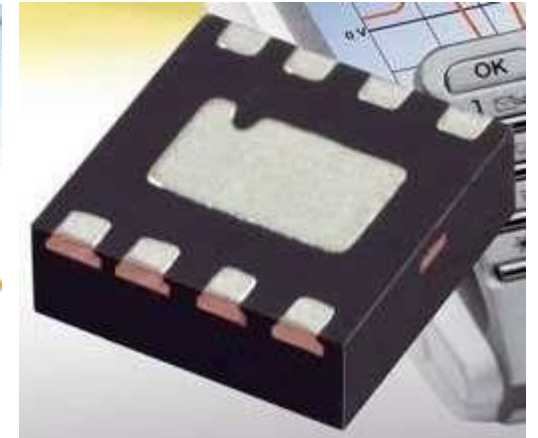
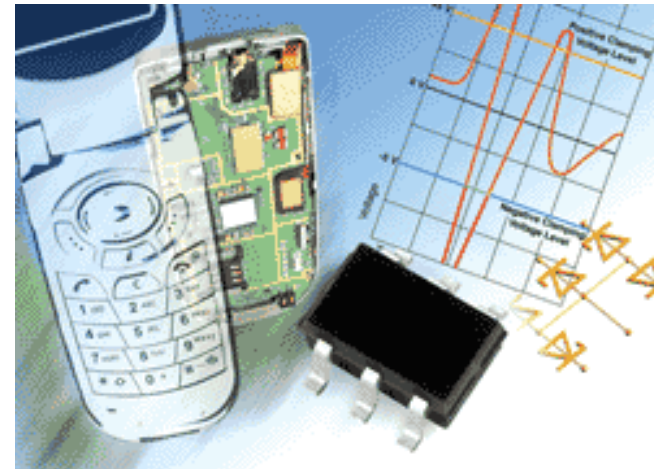


Rozdelenie diód podľa integrácie

Diskrétne diódy



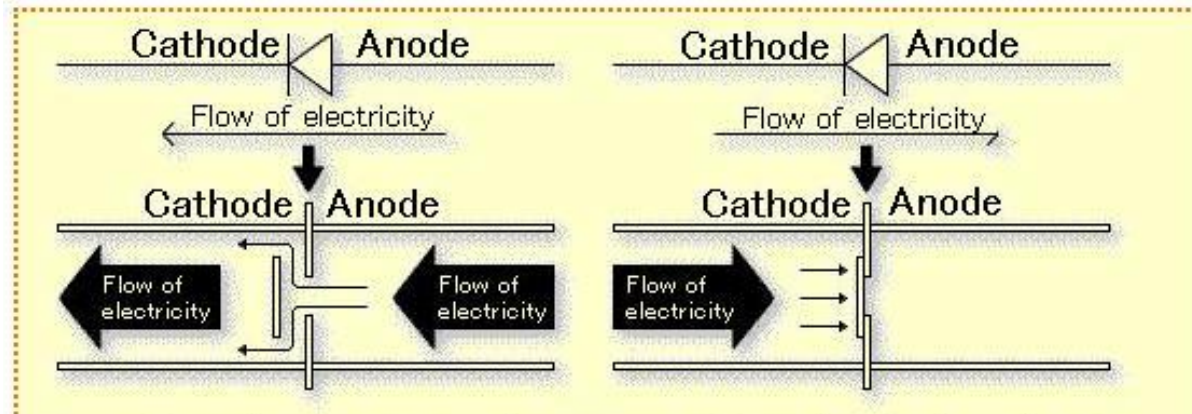
Diódové polia



Automotive
Headlamps

Usmerňovacia dióda

- využíva sa **asymetrická vodivosť** PN na usmernenie striedavého prúdu

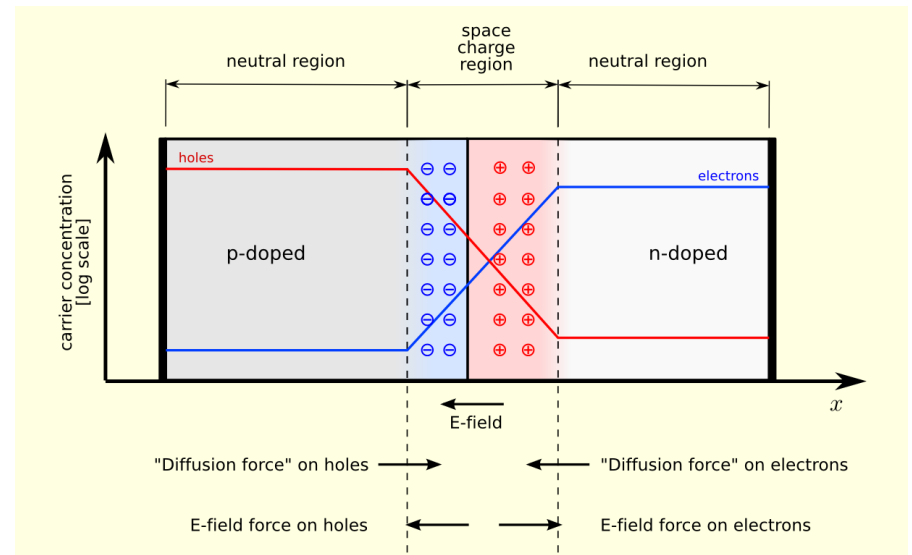


Priepustný smer

Záverný smer

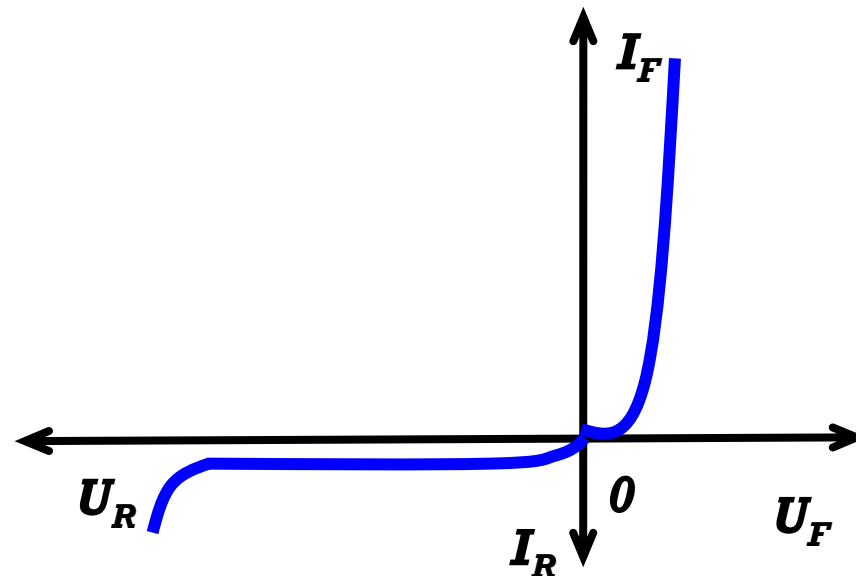
- Využívajú sa hlavne v napäťových zdrojoch
 - usmerňovače
 - násobiče napätia
 - obmedzovače napätia

Asymetrický PN prechod



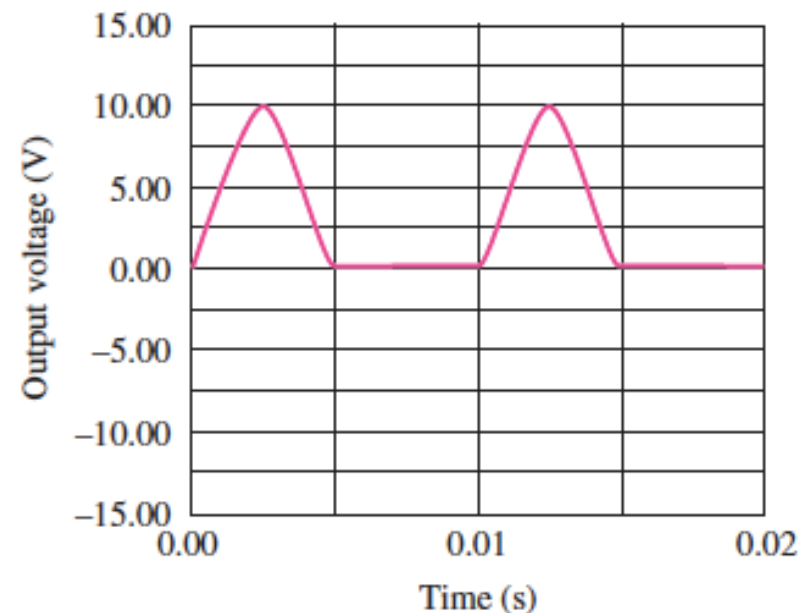
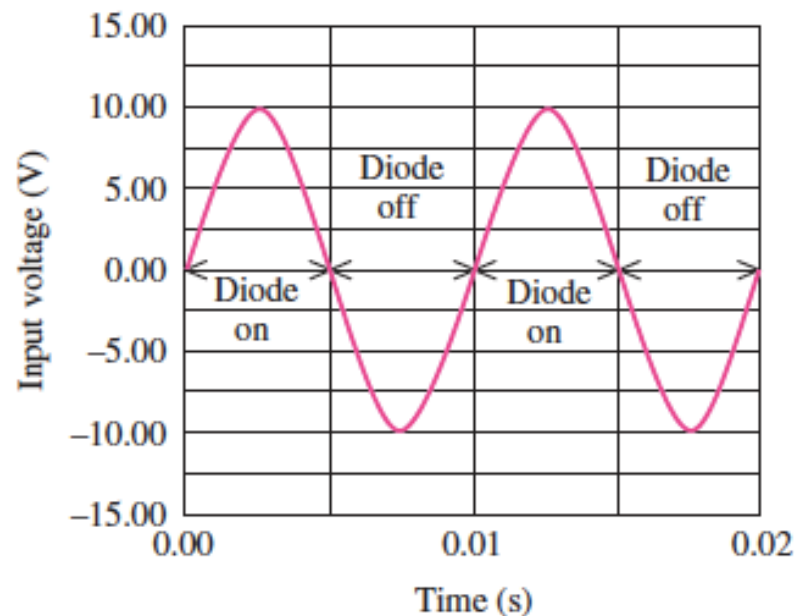
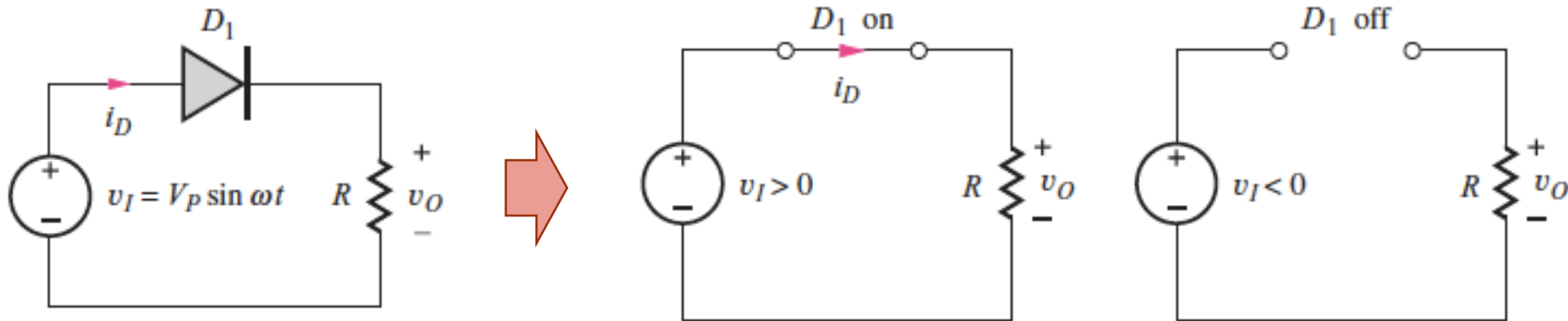
Ideálna vs. reálna usmerňovacia dióda

- **Ideálna** usmerňovacia dióda
 - V závernom smere **nekonečne veľký odpor** (netečie prúd)
 - V priepustnom smere má **nulový odpor**
- **Reálna** usmerňovacia dióda
 - V závernom smere **veľký dynamický odpor** (rádovo desiatky $M\Omega$)
 - V priepustnom smere **malý dynamický odpor** (rádovo jednotky Ω)



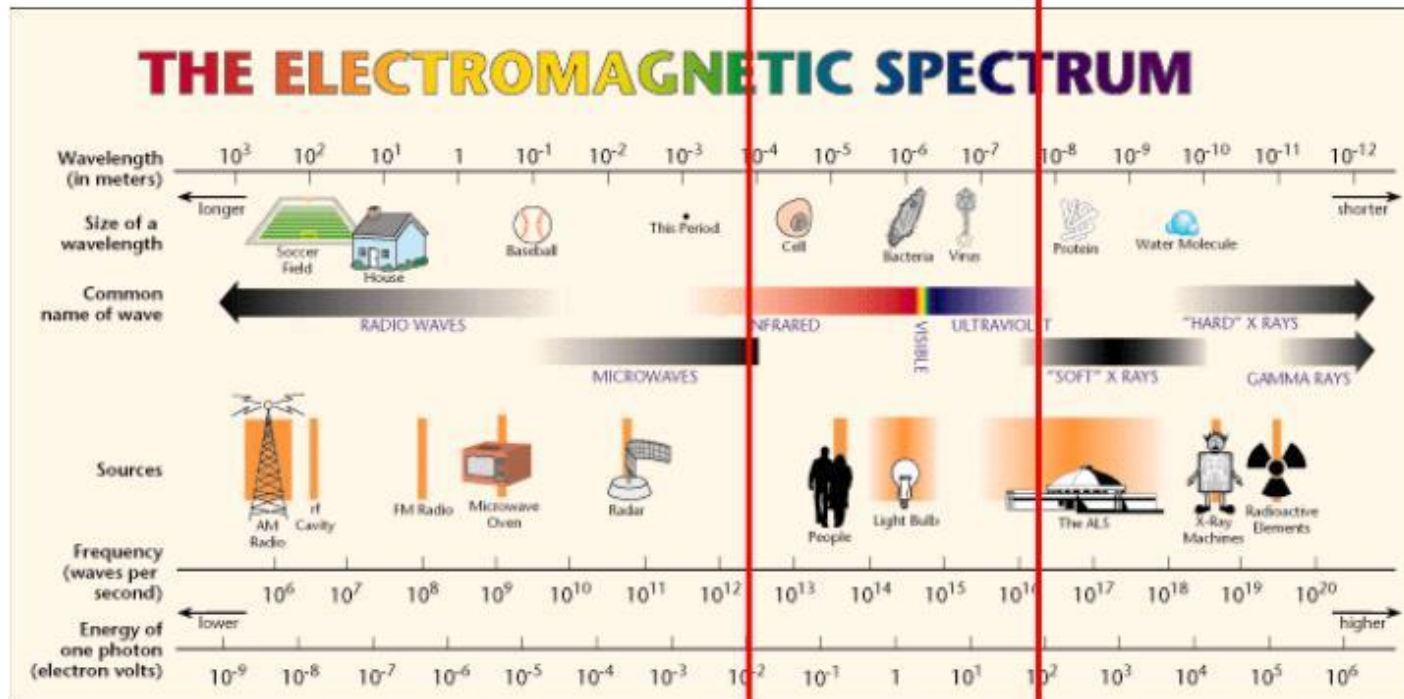
Usmerňovacia dióda – aplikácia

- **Jednocestný usmerňovač** – premena striedavého napätia na jednosmerné



Optoelektronické súčiastky

Spektrum žiarenia



Svetlo: 380 – 760 nm

optoelektronika

➔ **Vlnová dĺžka λ**
viditeľného žiarenia
od cca 400 do 800 nm

Luminiscenčná (LED) dióda

- **LED** - *Light Emitting Diode*
 - Účinnosť premeny elektrickej energie na svetelnú 25 až 30%
- Princíp činnosti – **rovnaký ako pri usmerňovacej dióde**
 - V priepustnom smere dochádza k injekcii nosičov náboja cez *PN* priechod
 - Po prekonaní určitej vzdialenosti dochádza k **rekombinácii**, čo spôsobuje uvoľňovanie energie vo forme **fotónu**
 - **Vlnová dĺžka emitujúceho žiarenia** je daná rozdielom energií pred a po rekombinácii



$$\Delta W = W_2 - W_1 = \frac{hc}{\lambda}$$

W_1 – energia pre rekombináciou

W_2 – energia po rekombinácii

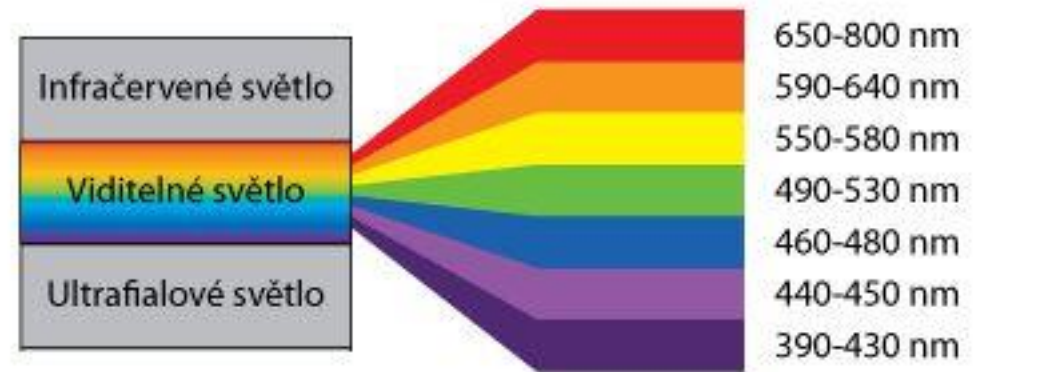
c - rýchlosť svetla

h - Planckova konštanta

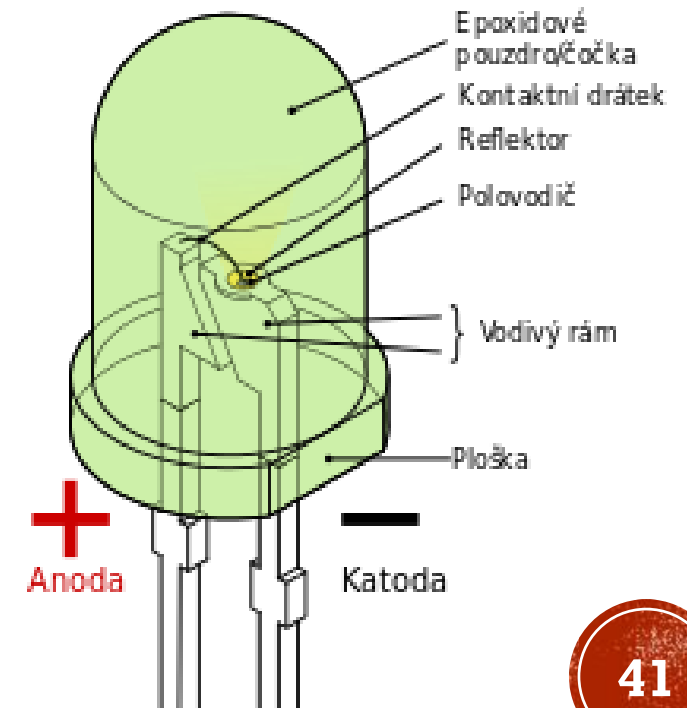
λ - vlnová dĺžka

Luminiscenčná (LED) dióda

- Od vlnovej dĺžky závisí farba žiarenia

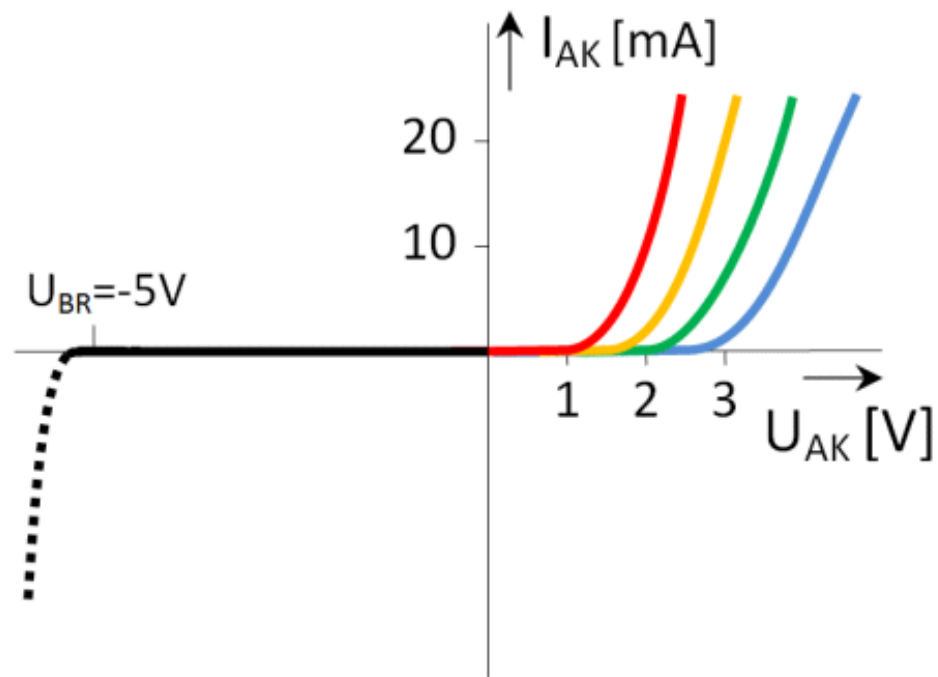


- **Konštrukcia LED diódy** – prispôsobená tak, aby dochádzalo k čo najmenšej absorpcii emitovaného žiarenia v objeme polovodiča
- Rozdiel oproti usmerňovacím – **väčší úbytok napätia**
 - najnižší červená 1,5 V najvyšší modrá 3,6 V
 - usmerňovacie majú 0,2 až 0,8 V



Luminiscenčná (LED) dióda

- V-A charakteristika LED diód



Ultrafialová a infračervená LED dióda



Viacfarebné a farebné LED



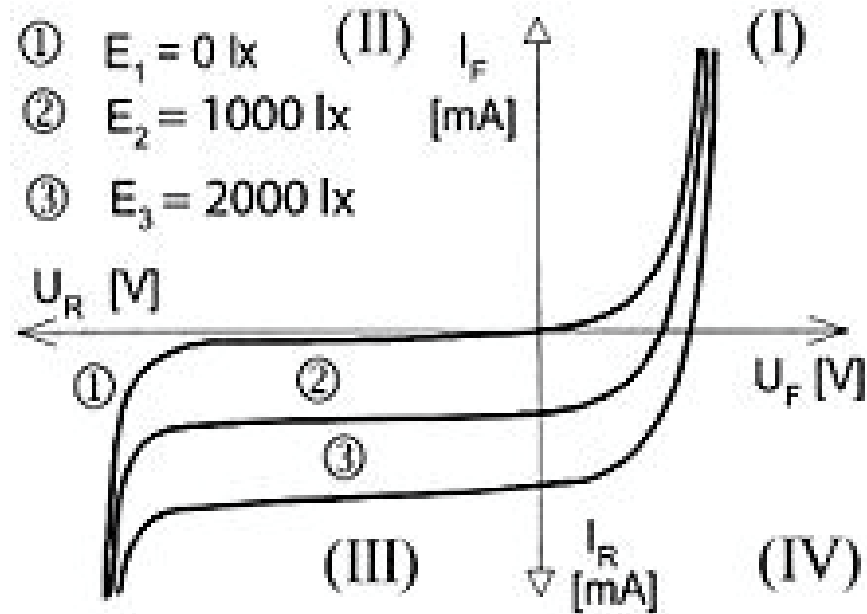
Fotodióda

- **Detekcia** zmeny svetla a **konverzia svetla** na napätia/prúd
- Princíp činnosti – vnútorný fotoelektrický jav
 - Po dopade fotón odovzdáva energiu valenčnému elektrónu – generácia páru **elektrón-diera**
 - Voľný elektrón a diera vytvárajú v polovodiči napätie = **fotovoltaický jav**
 - **Prúd** cez diódu je úmerný intenzite svetla
- Energia, ktorú fotón odovzdá musí byť väčšia ako **šírka zakázaného pásma**

$$\frac{hc}{\lambda} > E_g$$

Fotodióda

■ V-A charakteristika fotodiódy



Fotodióda sa v **III kvadrante** používa na **detekciu svetla**

- **I a III kvadrant:** V-A charakteristika podobná s usmerňovacou diódou
- **IV kvadrant:** pracuje ako generátor napätia (záťažou tečie prúd)



Fotodióda sa v **IV kvadrante** používa ako generátor napätia = aplikácia v **solárnych článkoch**