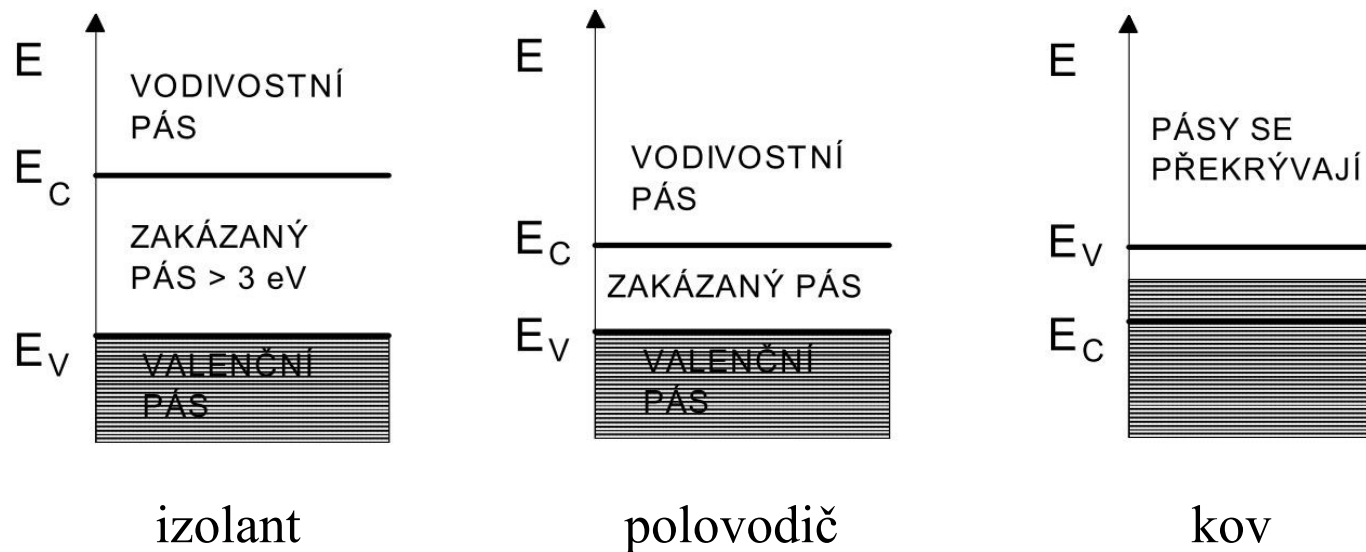


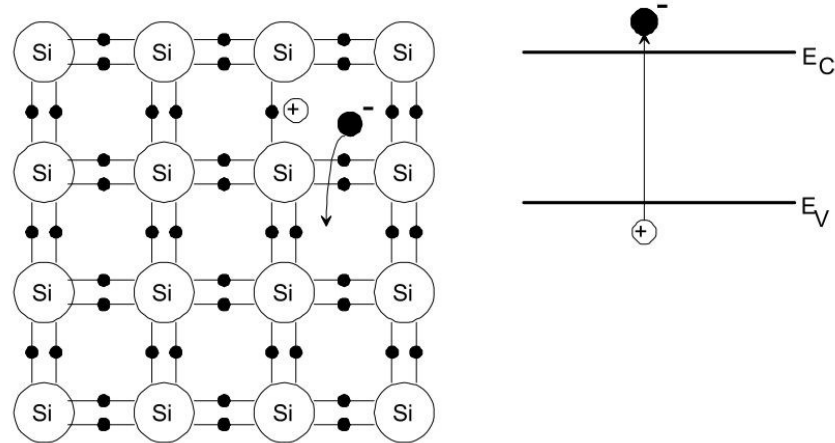
Polovodiče

- 1821 Thomas Seebeck PbS
- Vykazují záporný teplotní koeficient – el vodivost roste se zvyšující se T
- Pásová struktura – posouzení vodivosti



- Schopnost vést el. proud, pokud přejdou elektrony z valenčního do vodivostního pásu
- energie $1eV = q_e \cdot U = 1,602 \cdot 10^{-19} J$ ($U = 1 V$)
- Si: $E_G = 1,12 eV$ Ge: $E_G = 0,66eV$ (IV. skupina Menděl. soustavy)

Vlastní polovodič



Vliv teploty:

- $T = 0 \text{ K} \rightarrow$ žádný elektron v E_c – vlastnosti jako izolant
- T vyšší než $0 \text{ K} \rightarrow$ elektrony získaly dostatečnou energii ($E > E_G$) pro přechod do E_c

Po elektronu se záporným nábojem $-q$ (v E_c) vzniká stejně velký kladný náboj $+q$ (v E_v) v podobě díry

$$n = p = n_i$$

n – počet elektronů, p – počete děr, n_i – intrinzická konc. na jednotku objemu

$$\text{Si: } 10^{10} \text{ cm}^{-3} \quad \text{Ge: } 10^{13} \text{ cm}^{-3} \text{ (pro teplotu } 300 \text{ K)}$$

Vlastní polovodič

- pravděpodobnost, že je hladina obsazena elektronem → Fermi – Diracova rozdělovací funkce

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{kT}}} \quad (E_F - v \frac{1}{2} E_G)$$

E – uvažovaná energie, E_F – Fermiho energie

k – Boltzmanova konstanta, T – teplota (v Kelvinech)

- počet elektronů

$$n = \int_{E_c}^{E_{stop}} f(E) g_C(E) dE$$

g_C – počet dovolených stavů ve vodivostním pásu

- počet děr

$$p = \int_{E_{dno}}^{E_V} [1 - f(E)] g_V(E) dE$$

g_V – počet dovolených stavů ve valenčním pásu

Vlastní polovodič

- koncentrace elektronů

$$n = N_C \cdot e^{-\frac{E_C - E_F}{kT}}$$

N_C – efektivní hustota stavů ve vodivostním pásu

- koncentrace děr

$$p = N_V \cdot e^{-\frac{E_C - E_F}{kT}}$$

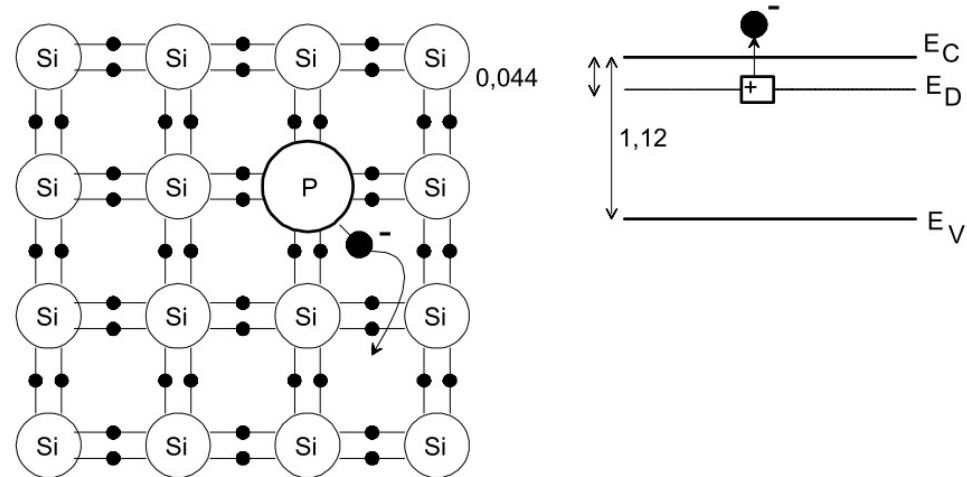
N_V – efektivní hustota stavů ve valenčním pásu

- hodnota intrinzické koncentrace

$$n \cdot p = n_i^2 = N_C N_V \cdot e^{-\frac{E_G}{kT}}$$

(E_G – energie zakázaného pásu)

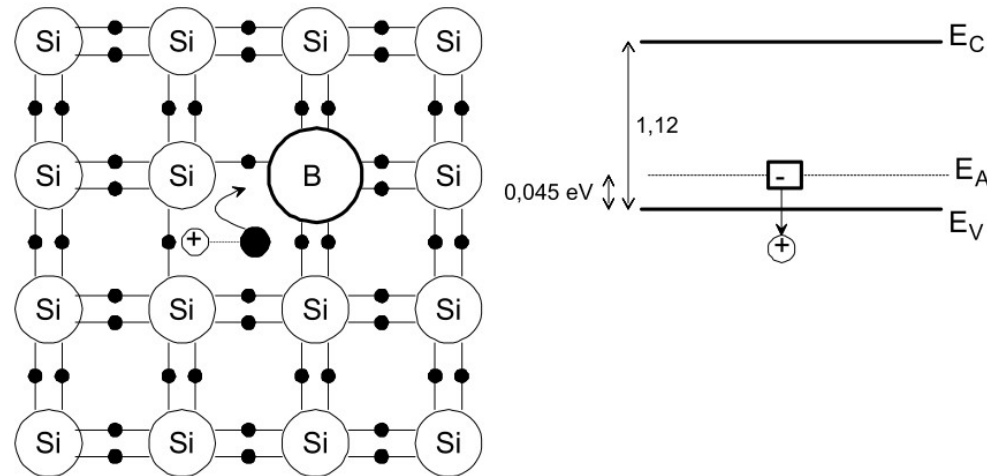
Nevlastní polovodič - N



Atom ze IV. skupiny (Si, Ge) nahrazen atomem V. skupiny (P, As, Sb)
→ **donory**

- velmi malá aktivační energie (0,05 eV) – při pokojové teplotě jsou již všechny příměsi aktivovány
- elektronová vodivost – **převažují elektrony** → majoritní nosiče
- E_F v blízkosti E_C
- $n \neq p, \quad n \cdot p = n_i^2$

Nevlastní polovodič - P



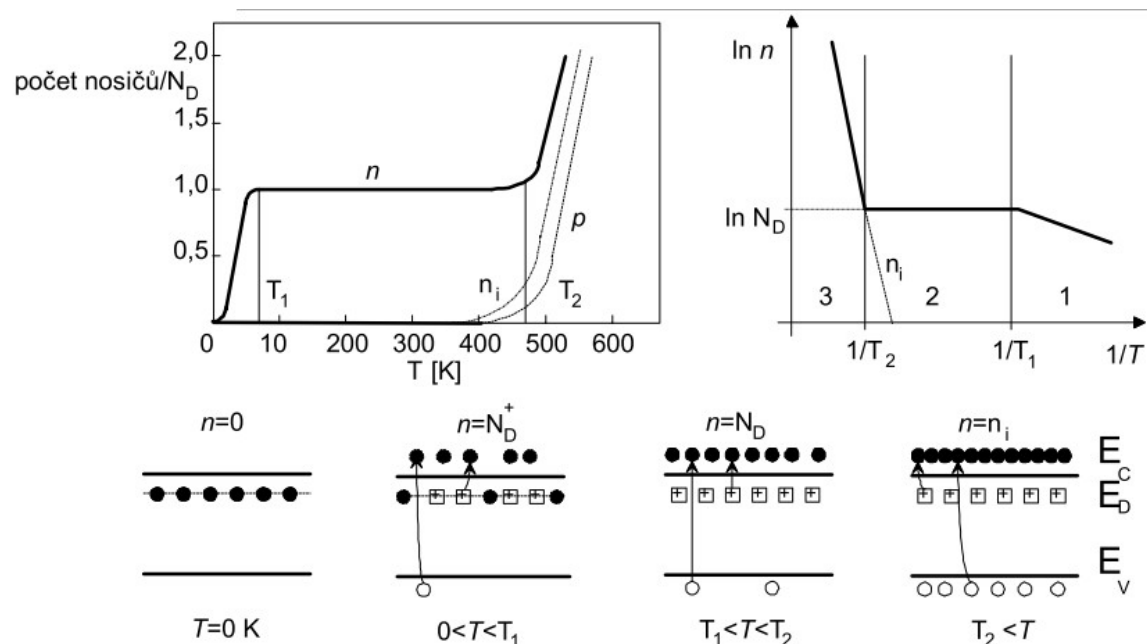
Atom ze IV. skupiny (Si, Ge) nahrazen atomem III. skupiny (B, In, Ga, Al)
→ **akceptory**

- velmi malá aktivační energie (0,05 eV) – při pokojové teplotě jsou již všechny příměsi aktivovány
- děrová vodivost – **převažují díry** → majoritní nosiče
- E_F v blízkosti E_V
- $n \neq p, \quad n \cdot p = n_i^2$

Nevlastní polovodič

- Vodivost příměsových polovodičů (typu N a P) – nevlastní vodivost.
- Při ionizaci (aktivaci) příměsi vzniká jeden pohyblivý nosič a jeden nepohyblivý iont

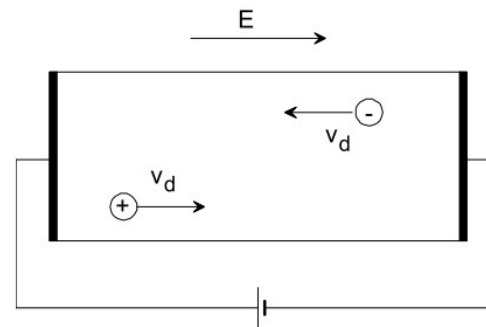
Koncentrace nosičů u nevlastního polovodiče (typ N)



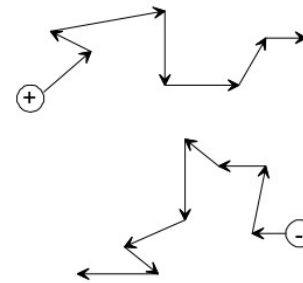
Nad T_1 – aktivovány všechny donory, nad T_2 – vlastní polovodič
 → pracovní oblast polovod. součástek mezi T_1 a T_2 (100 K až 450 K)
 (T_1 – první aktivační teplota, T_2 – druhá aktivační teplota)

Vedení proudu v polovodičích

1) Drift nosičů náboje



makroskopické měřítko



mikroskopické měřítko

Drift – pohyb nabitě částice vlivem přiloženého elektrického pole E

- díry urychlovány ve směru pole E
- elektrony urychlovány proti směru pole E – přenášejí však záporný náboj
→ výsledný proud je také ve směru pole E

driftová rychlost

$$v_d = \mu_n \cdot E \text{ (elektrony)}$$

$$v_d = \mu_p \cdot E \text{ (díry)}$$

μ_n, μ_p - pohyblivost elektronů a děr

$$(\mu_n > \mu_p)$$

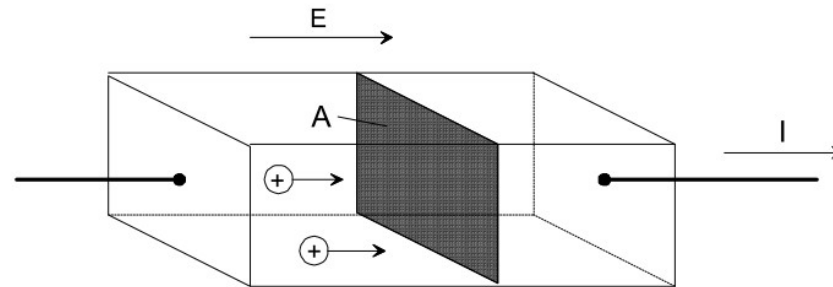
Vedení proudu v polovodičích

driftový proud

(pozn.: proud je definován jako náboj, který za jednotku času projde libovolnou plochou kolmou ke směru toku nosičů)

$$I_{n,drift} = qn v_d A$$

$$I_{p,drift} = qp v_d A$$



driftová proudová hustota ($J = \frac{I}{A}$)

$$J_{n,drift} = qn v_d$$

$$J_{p,drift} = qp v_d$$

dosazením za $v_d = \mu_n \cdot E$ respektive $v_d = \mu_p \cdot E$

$$J_{n,drift} = q\mu_n n E$$

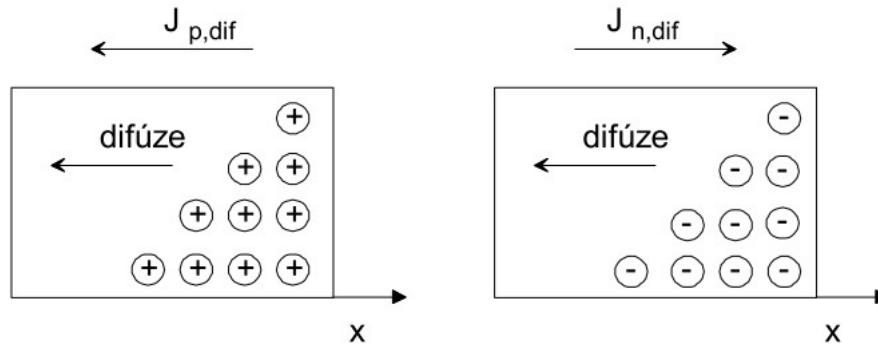
$$J_{p,drift} = q\mu_p p E$$

výsledný driftový proud (dán **součtem** proudu elektronů a děr)

$$J_{drift} = J_{p,drift} + J_{n,drift} = q(\mu_n n + \mu_p p) E$$

Vedení proudu v polovodičích

2) Difúze nosičů náboje



$$J = -D \text{ grad } c$$

(D – difúzní koef. c – koncentrace)

Difúze – částice migrují z oblasti s vysokou koncentrací do oblasti s nízkou koncentrací dokud není koncentrace v celém objemu konstantní

- koncentrační gradient je pro elektrony i díry dle obrázku shodný → elektrony i díry difundují ve směru $-x$ → difúzní tok

$$J_{n,dif} \text{ - teče ve směru } +x, \text{ tedy } J_{n,dif} = qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_{p,dif} \text{ - teče ve směru } -x, \text{ tedy } J_{p,dif} = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

Výsledný difúzní proud (dán „rozdílem“ dif. proudu elektronu a děr)

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

Vedení proudu v polovodičích

Výsledný proud

Určen součtem driftového a difúzního proudu

$$J = J_{drift} + J_{dif}$$

$$J = qE_x(\mu_p p + \mu_n n) + q \left(D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx} \right)$$

Pozn.: vedení proudu v polovodičích je ovlivněno procesem generace a rekombinace.

- generace → vzniká pár elektron – díra
- rekombinace → zaniká pár elektron – díra

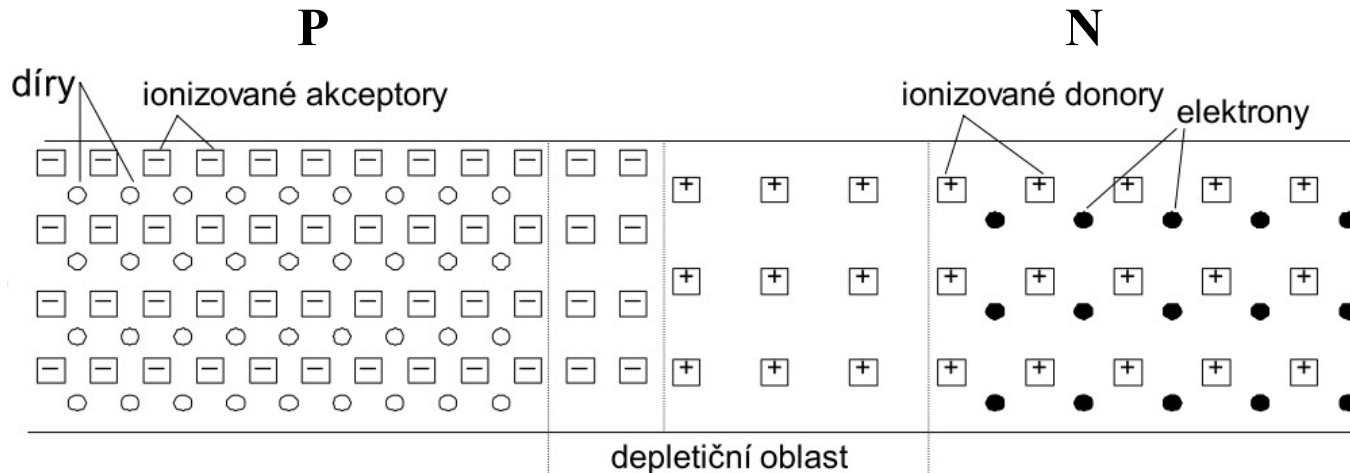
Teplotní napětí (*Einsteinův vztah*)

$$U_T = \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q}$$

pro 300 K je velikost $U_T = 26 \text{ mV}$

PN přechod

Spojením polovodiče N a P



- elektrony v blízkosti přechodu difundují z oblasti N do P a zanechávají za sebou kladný prostorový náboj – ten odpuzuje kladné volné díry difundující ze strany P
- díry v blízkosti přechodu difundují z oblasti P do N a zanechávají záporný prostorový náboj – odpuzuje volné elektrony difundující ze strany N
- v oblasti přechodu volné elektr. a díry rekombinují → vznik depl. oblasti
- driftové síly el. pole vytvořeného prostorovým náboje působí proti difúznímu pohybu → v oblasti přechodu rovnováha difu. a drift. sil

PN přechod

- v oblasti přechodu je rozdíl potenciálů \rightarrow difúzní napětí U_D

$$U_D = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right)$$

N_A – koncentrace akceptorů, N_D – koncentrace donorů

pro: $kT/q = U_T = 26 \text{ mV}$

$$n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

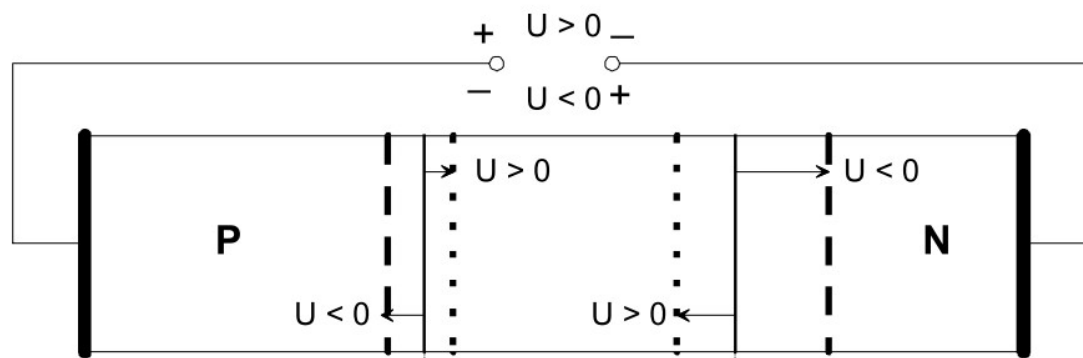
$$N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$U_D = 0,599 \text{ V}$$

PN přechod

Při přiložení vnějšího napětí



- při kladné polaritě napětí ($U > 0$) se snižuje depletiční oblast
- při záporné polaritě napětí ($U < 0$) se rozšiřuje depletiční oblast

saturační proud:

$$I_0 = qA \left(\frac{D_n}{L_n} \frac{1}{N_A} + \frac{D_p}{L_p} \frac{1}{N_D} \right) n_i^2$$

D_n, D_p – difúzní koeficient,

L_n, L_p – střední difúzní délka minorit. nosičů

N_A, N_D – koncentrace donorů a akceptorů

A – plocha přechodu

PN přechod

Rovnice diody (Shockleyho rovnice ideální diody)

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) = I_0 \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right)$$

U – napětí na PN přechodu

U_T – teplotní napětí (cca 26 mV)

Propustní směr

$$U \gg U_T$$

$$I \approx I_0 \left(e^{\frac{U}{U_T}} \right)$$

$$R_d \approx \frac{U_T}{I}$$

závěrný směr

$$U \ll |U_T|$$

$$I \approx I_0$$

Kapacita PN přechodu

Bariérová kapacita

- převažuje v závěrném směru
- vlivem prostorového náboje v depletiční vrstvě

$$C_j = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1 - \frac{U}{U_D}}}$$

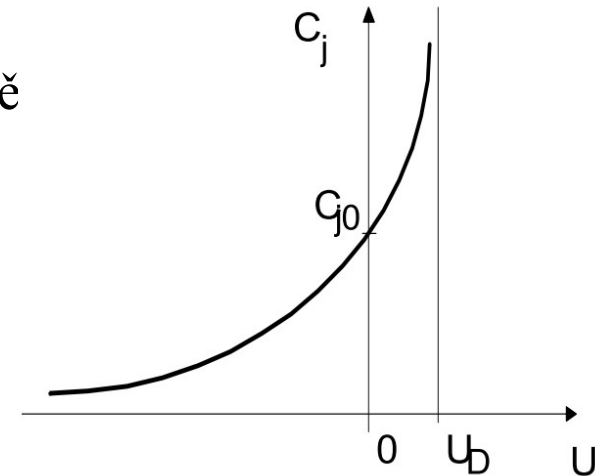
Difúzní kapacita

- převažuje v propustném směru

Celková kapacita

- součtem bariérové a difúzní kapacity

$$C = C_j + C_d$$



Literatura – hlavní zdroj informací pro polovodiče a PN přechody:

Musil, V. a kol.: *Elektronické součástky*. 2. vyd. Brno: VUT, 1996.

ISBN 80-214-0821-9.(Skriptum)

Polovodičové diody

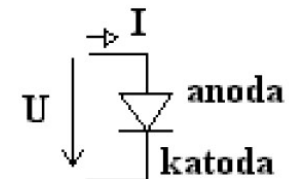
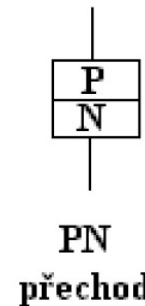
Využívají nelineárních vlastností PN přechodu

Dělení dle konstrukce:

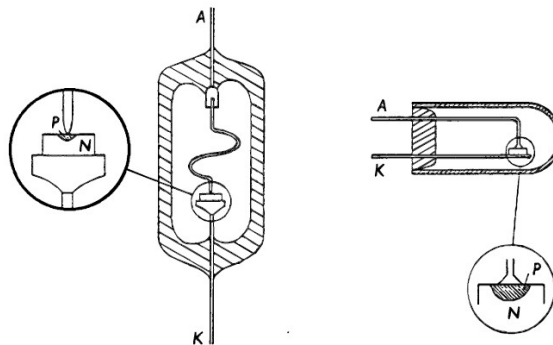
- hrotové
- plošné (slitinové, difúzní, planární a Schottkyho)

Dělení dle funkce a použití

- usměrňovací (nízkovýkonové a výkonové)
- detekční a spínací
- stabilizační a referenční (tzv. Zenerovy diody)
- tunelové a inverzní
- kapacitní (varikapy, varktory)
- luminiscenční (svítivé a laserové)
- fotodiody
- speciální diody



Polovodičové diody



hrotová

s přivař. zlatým hrotem

Výroba: proti destičce 1 x 1 x 0,1 mm připevněné na držáku se pohybuje zahnutý wolframový hrot než dojde k el. kontaktu. Následuje zatavení konců skleněné trubičky, v níž je destička umístěna. Jako poslední operace se provádí formování el. impulzem v propustném směru – vlivem velké teploty se pod hrotem pozmění krystalická struktura.

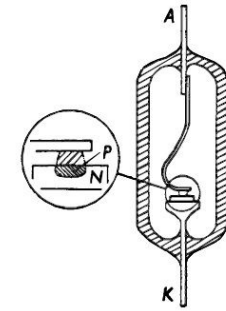
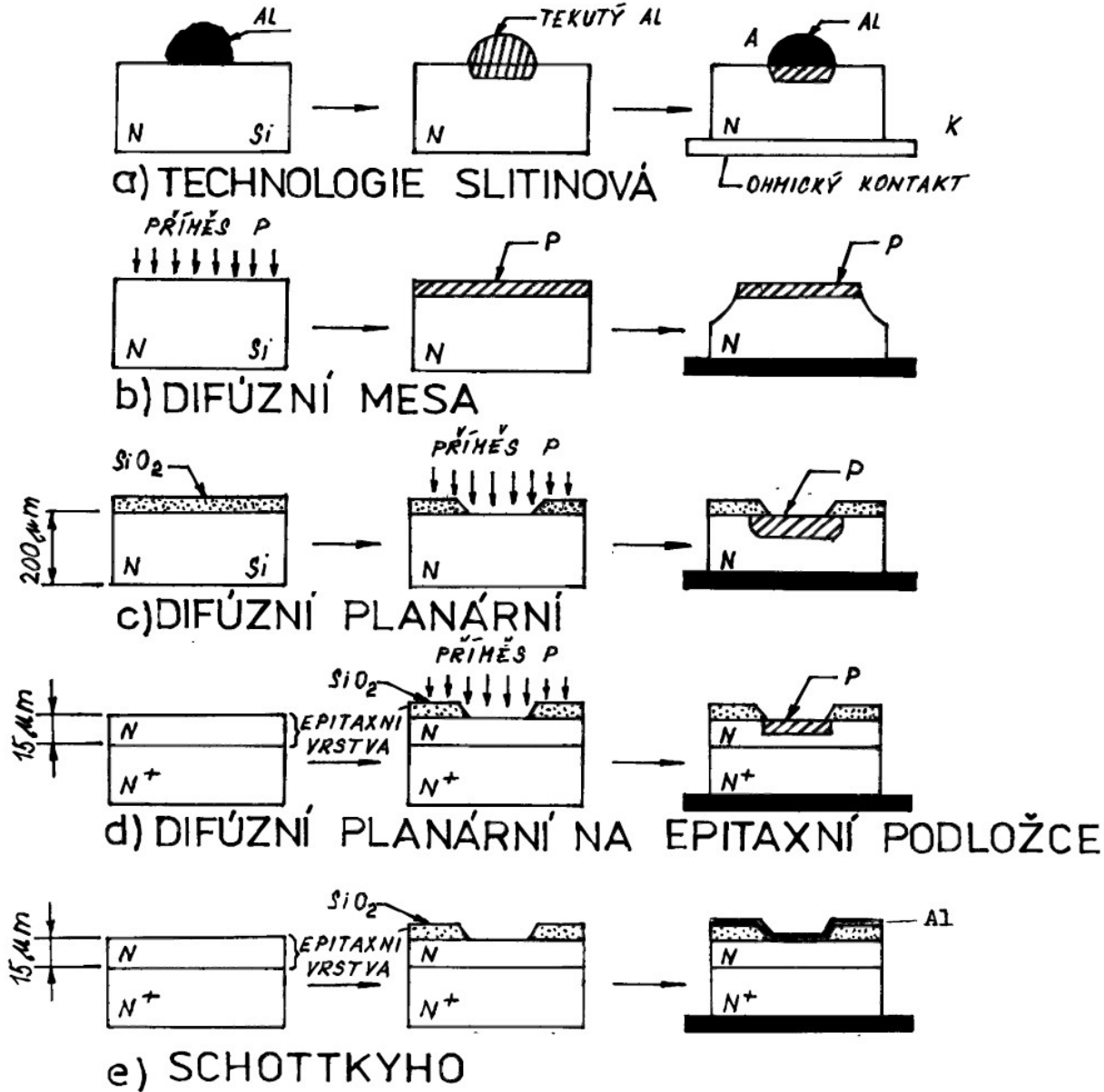
Vlastnosti:

- malá parazitní kapacita
- malý ztrátový proud (cca 10mW)
- malá hodnota max. proudu (desítky mA)
- velký sériový odpor
- krátká zotavovací doba

Použití: usměrnění malých signálů velkých kmitočtů (tzv. mikrovlnné diody)

Polovodičové diody

Plošné diody



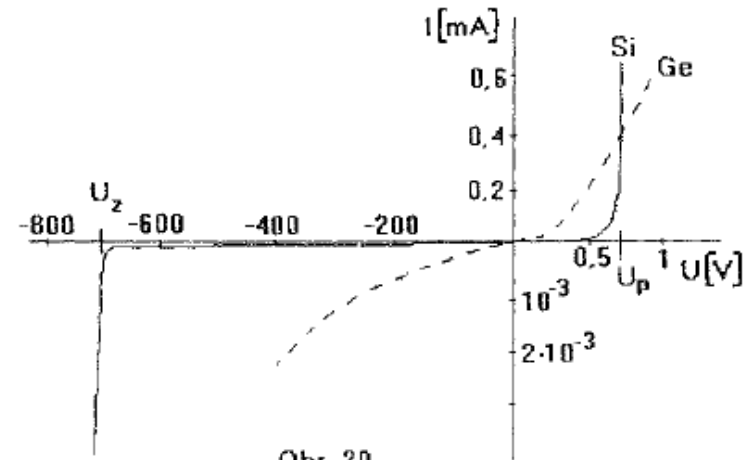
Náhradní obvod diody

U_p – prahové napětí

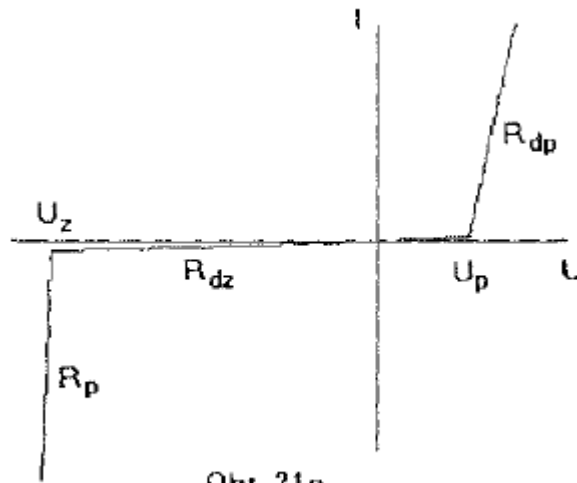
Si: 600 mV

Ge: 200mV

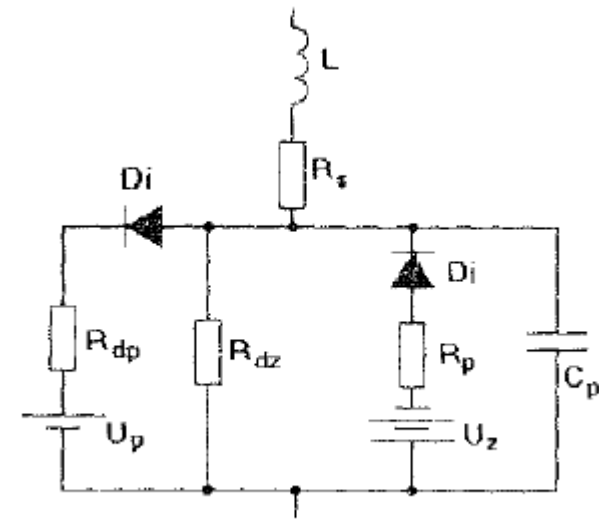
U_z – závěrné napětí



Obr. 20



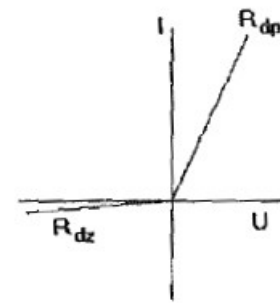
Obr. 21a



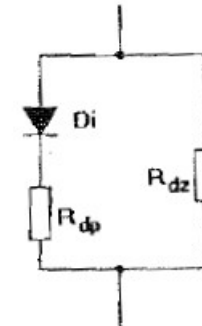
Obr. 21b

Dioda

- Ne vždy používáme diodu ve všech oblastech
- Náhradní zapojení lze zjednodušit
- Nevystihuje dynamické vlastnosti

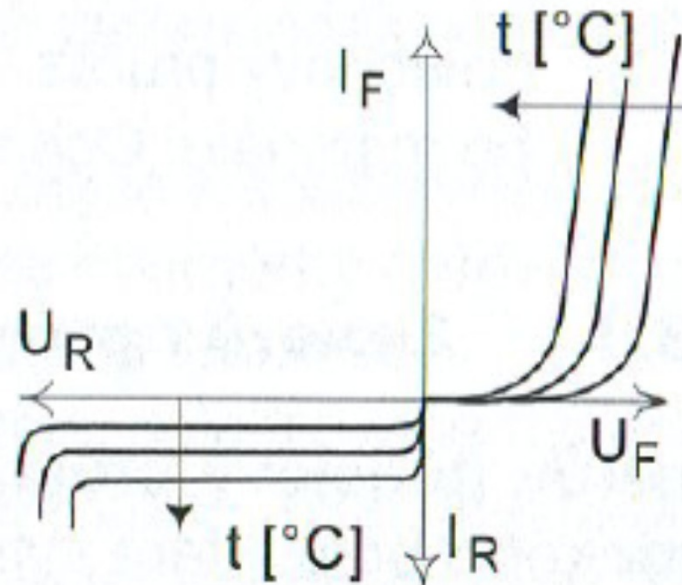


Obr. 22a

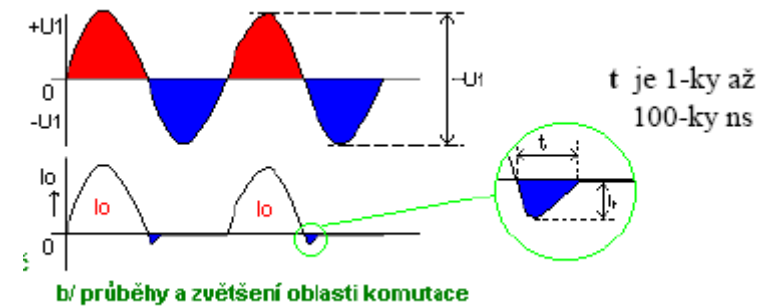
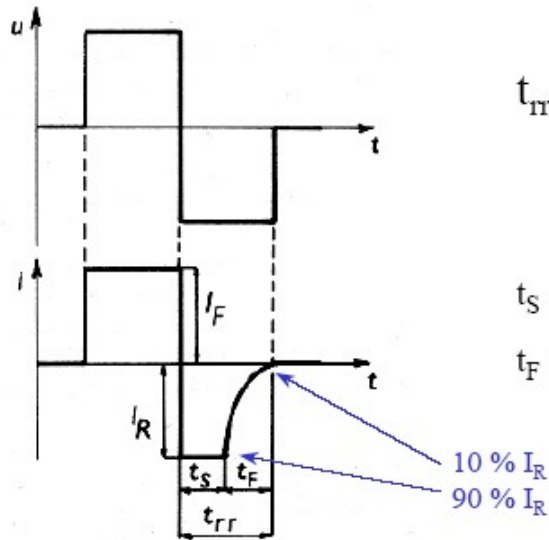


Obr. 22b

Změna VA – charakteristiky
v závislost na teplotě

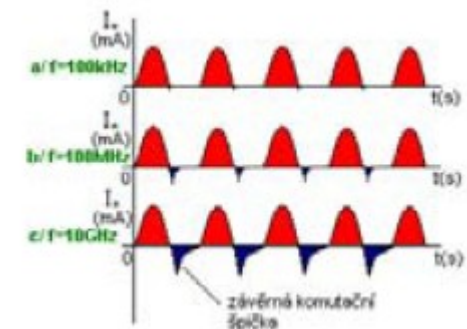


Komutace u diody

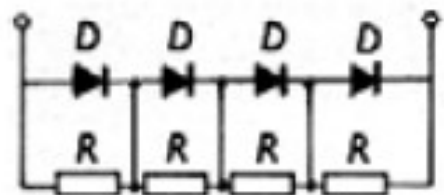


Může způsobovat rušení

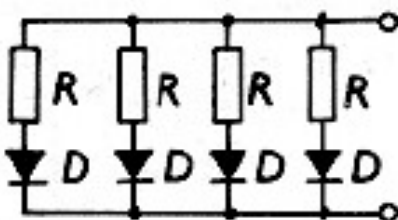
U vysokých frekvencí
nezanedbatelný závěrný proud



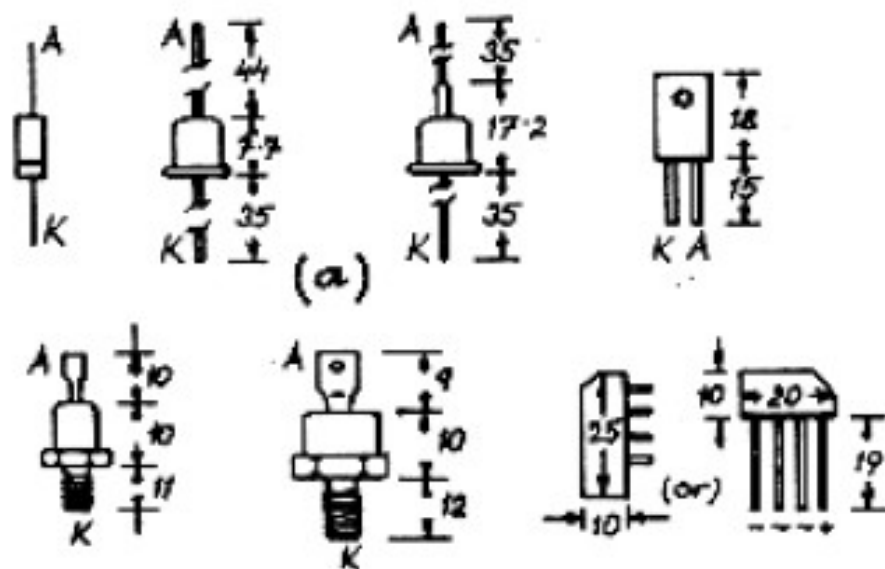
Spojování diod



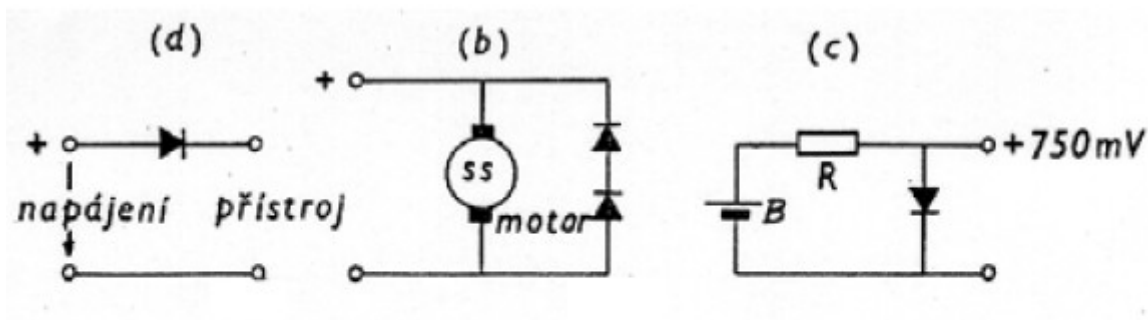
Sériové - zvýšení
závěrného napětí



Paralelní - zvýšení
propustného proudu



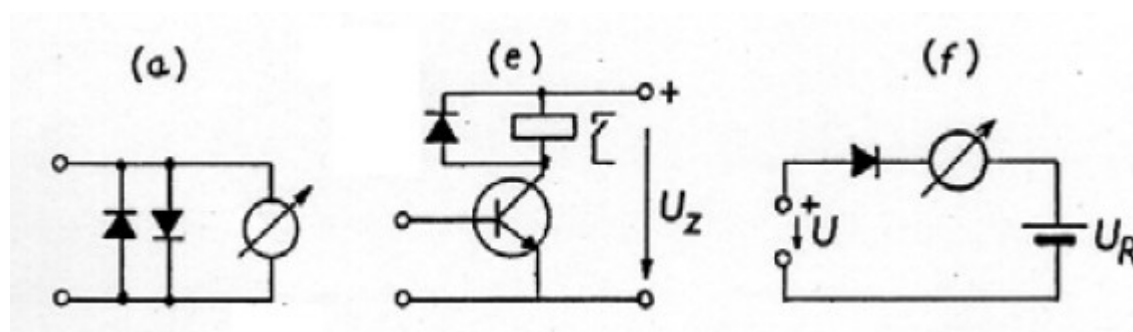
Příklady použití diody



Ochrana před
přepólováním
zdroje

Odrušení
komutátorov.
motorku

Stabilizace
napětí
(prahové napětí)



Ochrana
měřidla proti
přetížení

Ochrana
tranzistoru
při spínání
indukční
zátěže

Indikace
napětí nad
 U_R