

4. ELEKTRICKÝ PROUD V POLOVODIČÍCH

POLOVODIČE

- byly předpovězeny ve 20. letech 20. století
- první byly vyrobeny až po 2. světové válce

Podle měrného elektrického odporu lze látky rozdělit na:

- **vodiče** $\rho (10^{-8}; 10^{-6}) \Omega \cdot \underline{m}$
kovy (Ag, Al, Cu,...)
- **polovodiče** $\rho (10^{-4}; 10^8) \Omega \cdot m$
(Si, C, Te, Ge, Se
sloučeniny – sulfid olovnatý PbS, kademnatý CdS)
- **izolanty** $\rho (10^{10}; \infty) \Omega \cdot m$
(diamant, sklo, bakelit,...)

Důležitější než velikost ρ , je závislost na teplotě.
(teplotní závislost odporu):

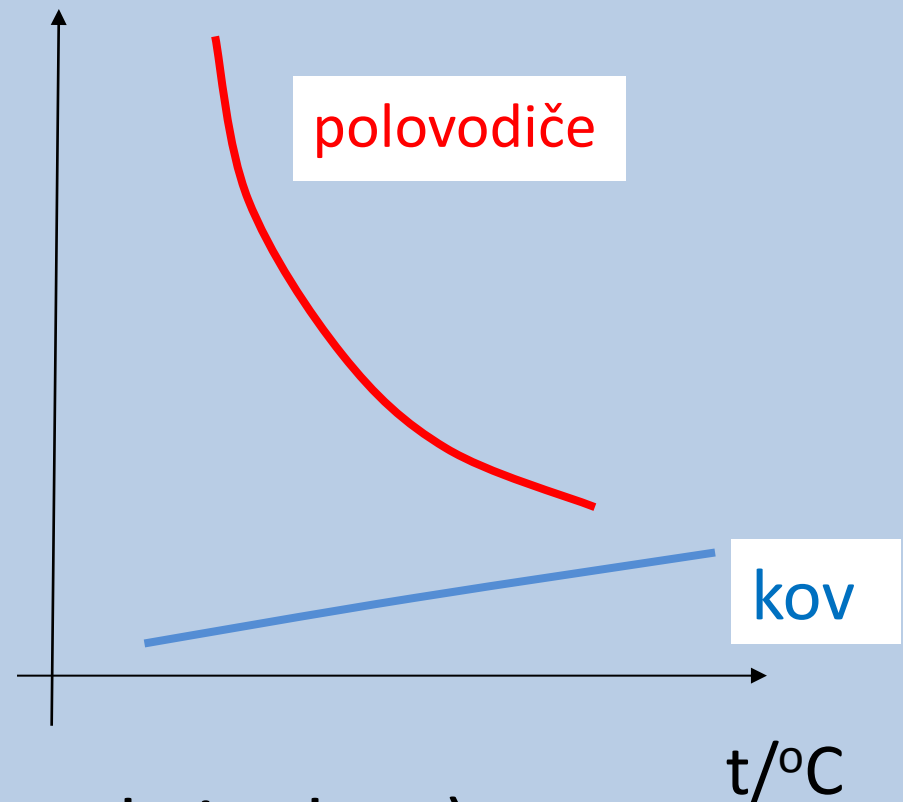
kovy

s rostoucí teplotou
roste měrný odpor
(a tedy i odpor)

polovodiče

s rostoucí teplotou
většinou měrný odpor (a tedy i odpor)
klesá (uvolní se více volných nosičů náboje)

$\rho / \Omega \cdot m$



4. 1. POLOVODIČE

ρ se mění s

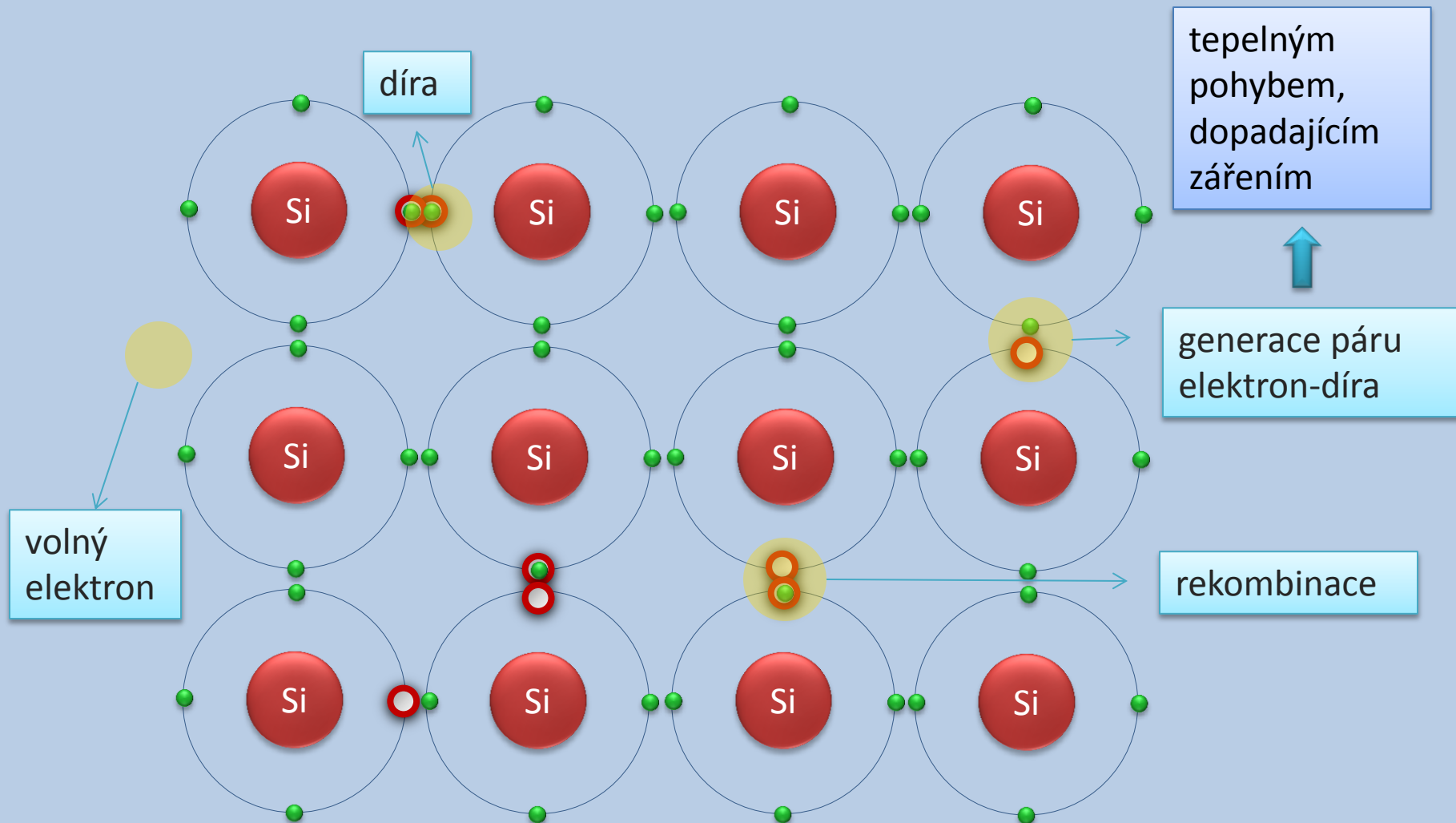
- teplotou
- dopadajícím zářením
- obsahem příměsi

Nejjednodušší polovodičové součástky

- **termistor**
 - vyroben ze směsi oxidů
 - slouží k měření a regulaci teploty
(s \uparrow teplotou se odpor \downarrow a proud \uparrow)
- **fotorezistor**
 - siriník kadmitý CdS
 - slouží k měření a regulaci osvětlení
(1 M Ω – neosvětlený, 10 k Ω – osvětlený)

**Ohmův
zákon
platí pro
polovodiče
stejně jako
pro kovy.**

4. 2. VLASTNÍ VODIVOST POLOVODIČE



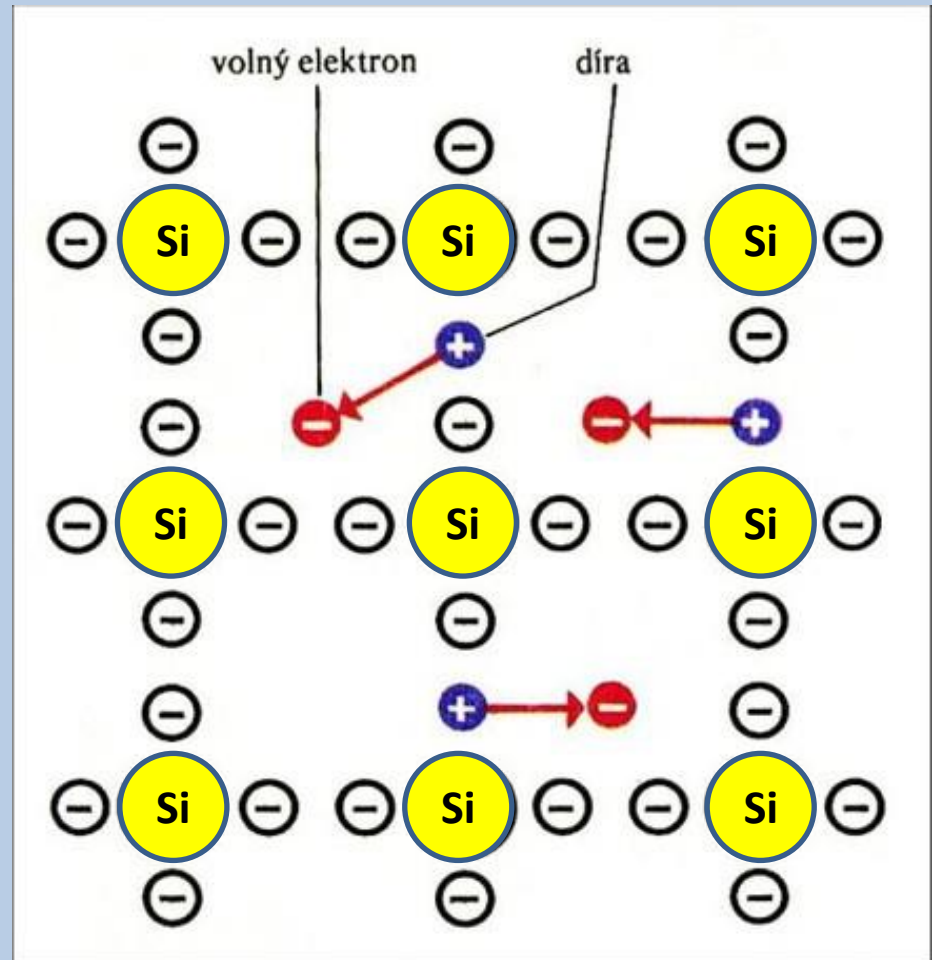
4. 2. VLASTNÍ VODIVOST POLOVODIČE

je způsobena pouze samotným prvkem, který tvoří polovodič (v čistém stavu)

Př.: Si – 14 elektronů

(10 vázáno k jádru, 4 valenční vytvářejí elektronové vazebné dvojice se sousedními atomy v mřížce.)

Zvýšením teploty nebo osvětlením mohou kmity mřížky porušit vazby mezi atomy.

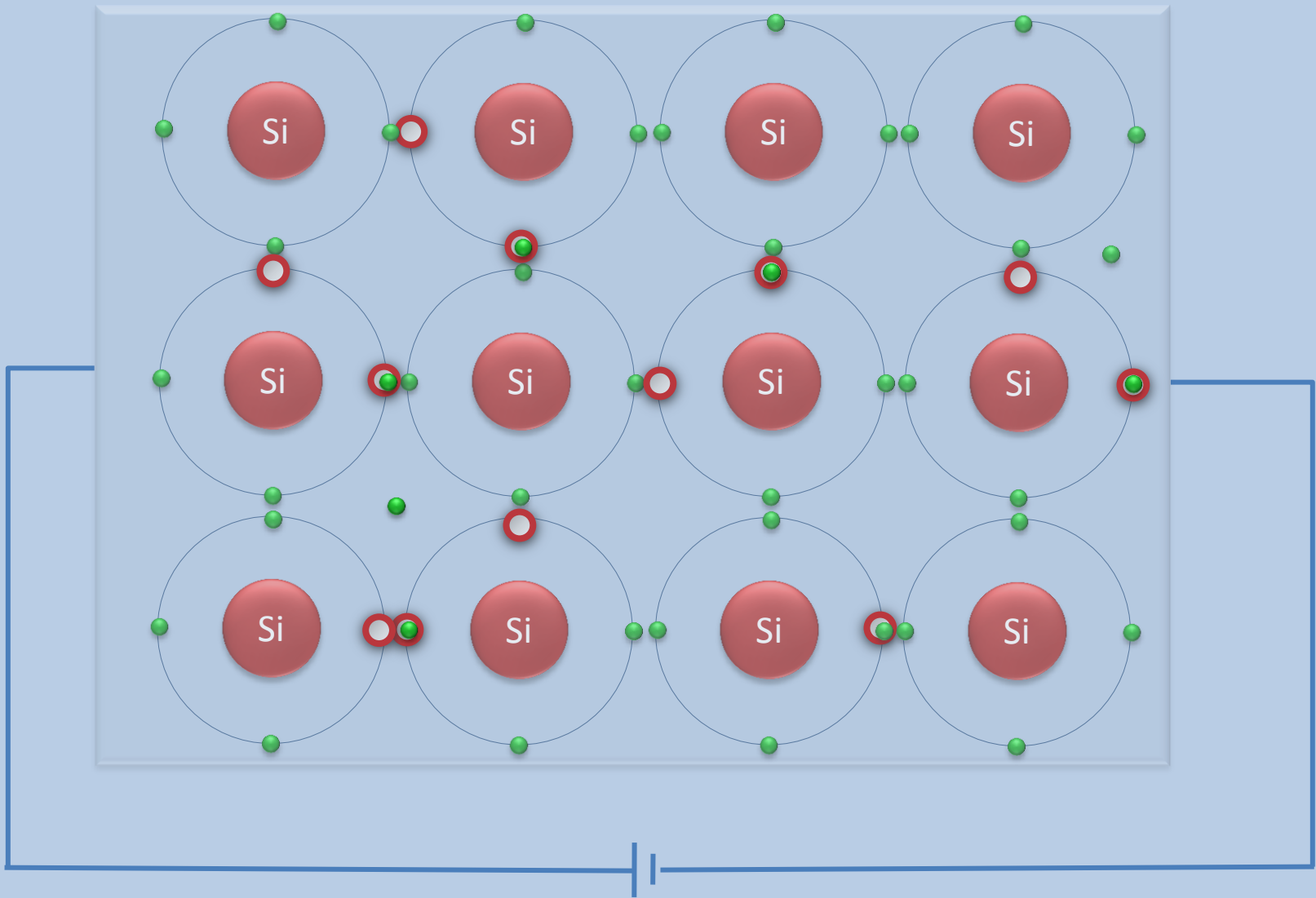


generace – vznik dvou typů volných částic
(–) volných elektronů a (+) děr

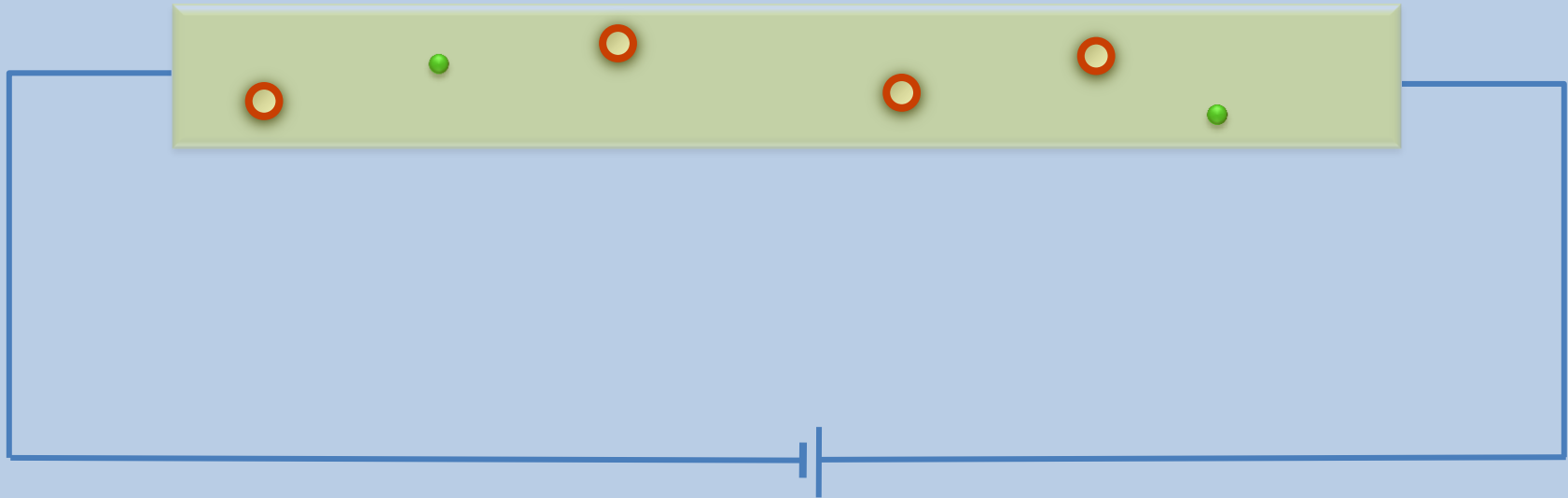
**Tomuto jevu říkáme vlastní vodivost
a těmto látkám pak vlastní polovodiče.**

rekombinace – zánik páru elektron – díra
(obsazení díry elektronem)

- při stálé teplotě je generace a rekombinace
v dynamické rovnováze



I_d ←
 I_e →
děrový proud
elektronový proud



elektrony a díry konají neuspořádaný pohyb

- připojíme-li zdroj napětí, vznikne v polovodiči pohyb
 - děr ve směru intenzity el. pole
 - elektronů proti směru intenzity
- výsledný el. proud je součtem proudu elektronového a děrového $I = I_{\text{děr}} + I_{\text{elektronů}} \quad I_{\text{děr}} = I_{\text{elektronů}}$

4. 3. NEVLASTNÍ VODIVOST POLOVODIČE

Vodivost polovodiče je ovlivněna **příměsí** – cizími atomy, které nahradí v čistém polovodiči některé atomy čistého krystalu.

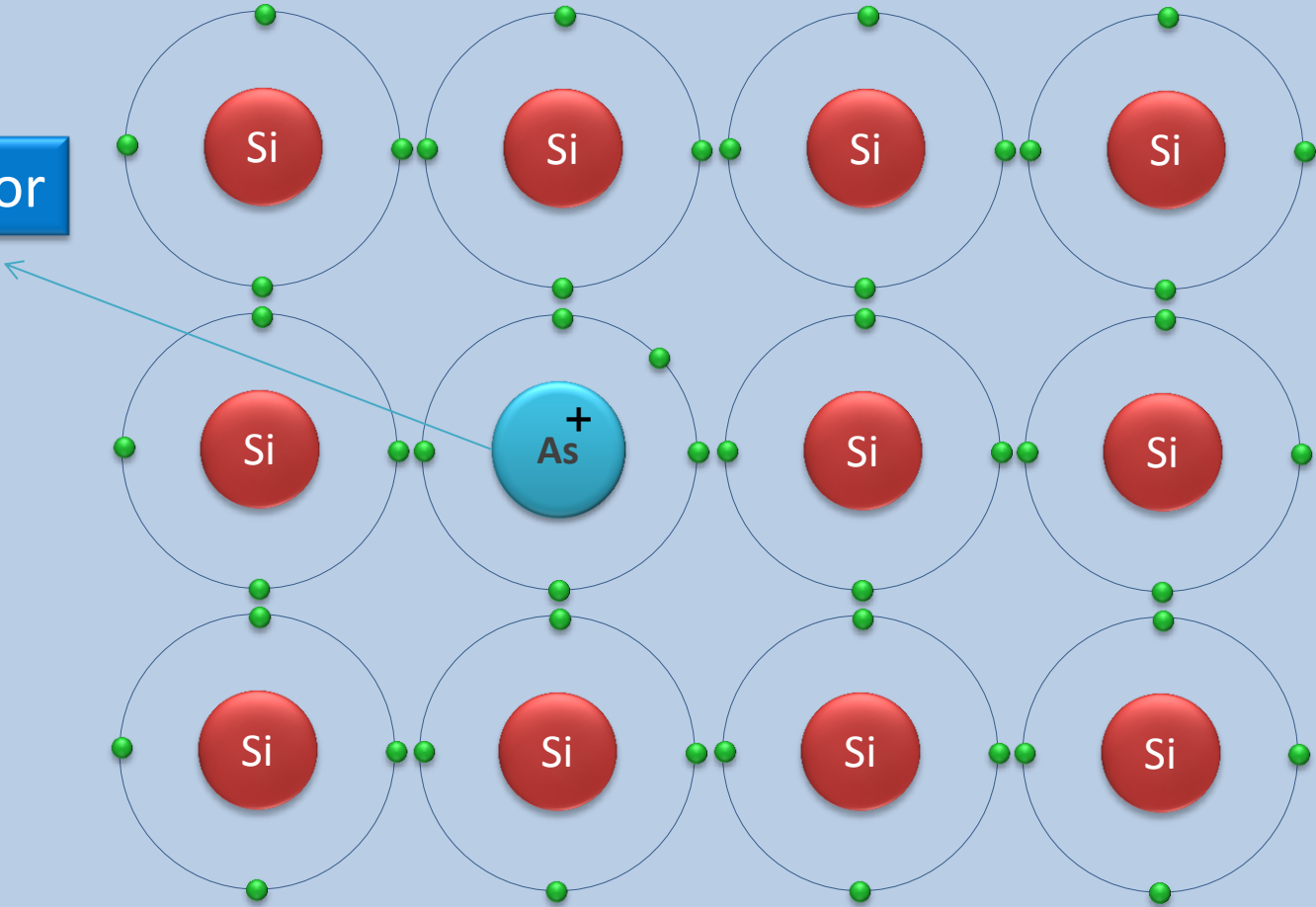
Rozlišujeme 2 typy vodivosti:

- elektronovou
- děrovou

Polovodič typu N

Majoritním = většinou nosičem náboje je elektron

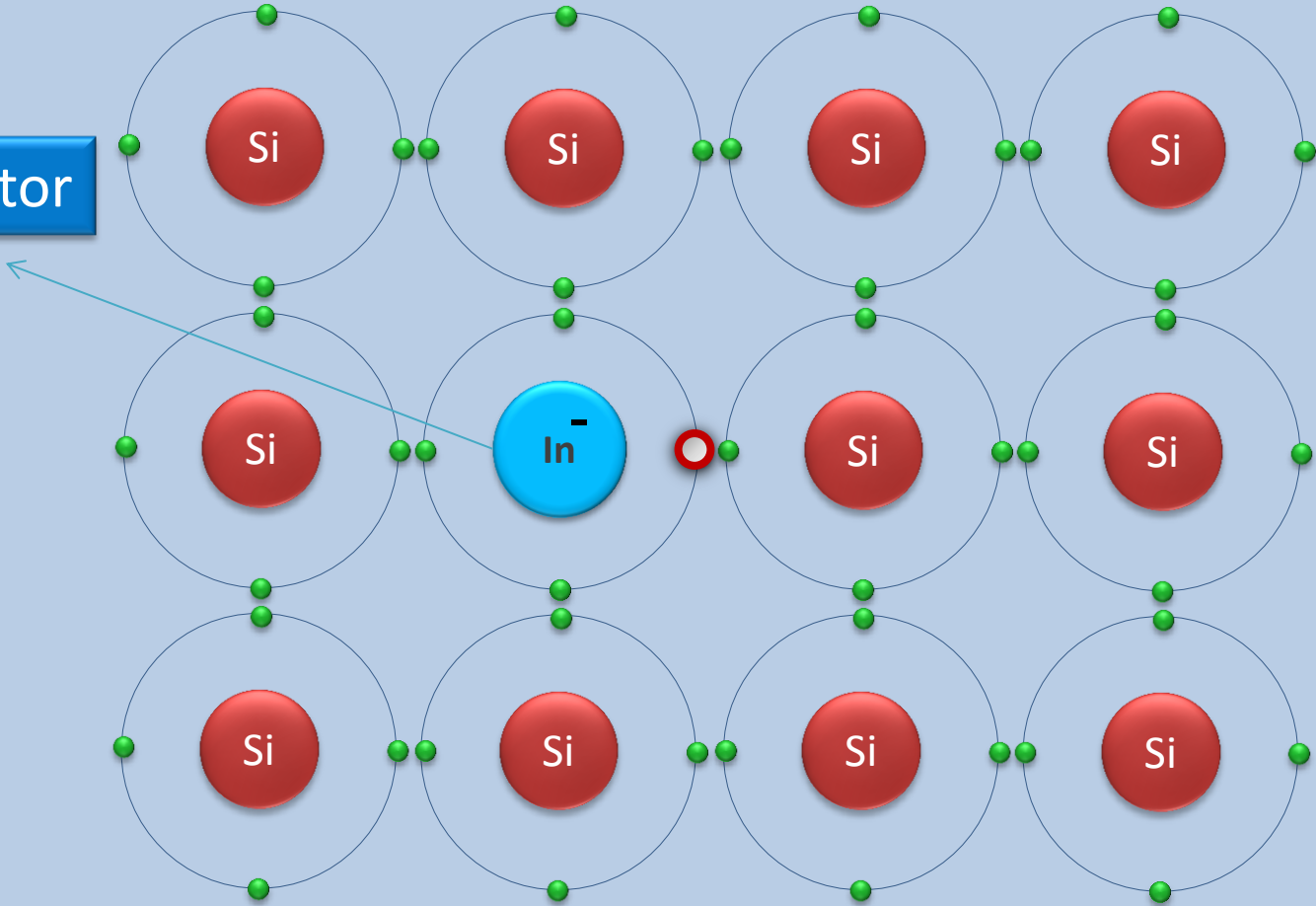
donor

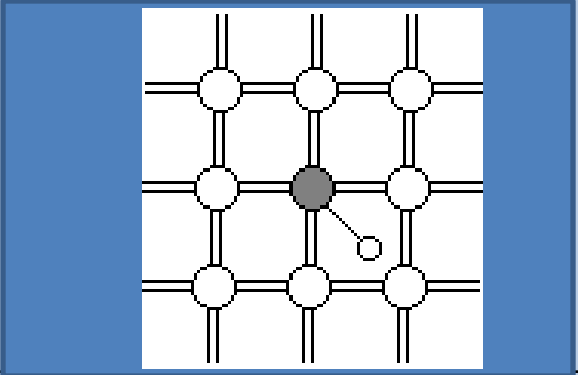
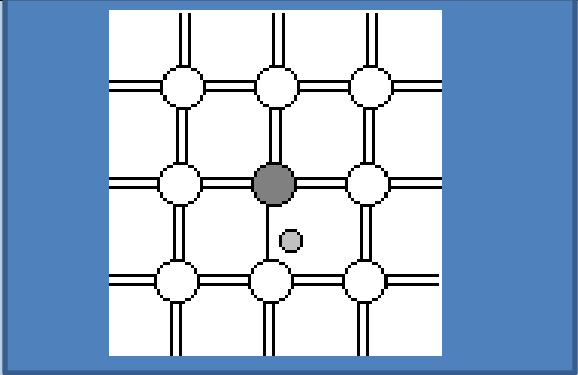


Polovodič typu P

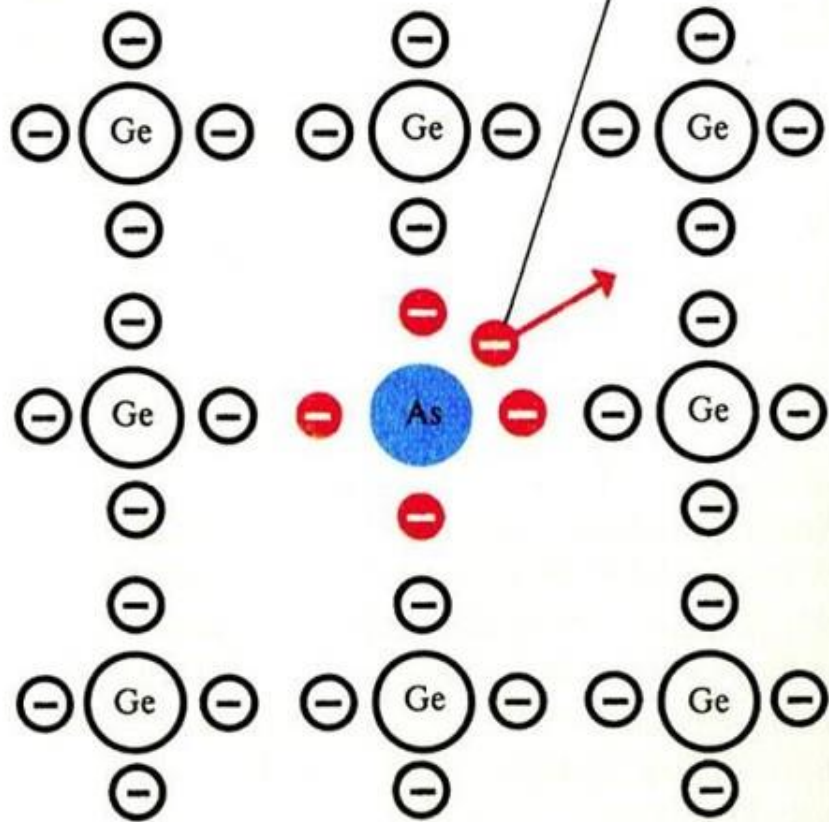
Majoritním = většinou nosičem náboje je
díra elektron

akceptor



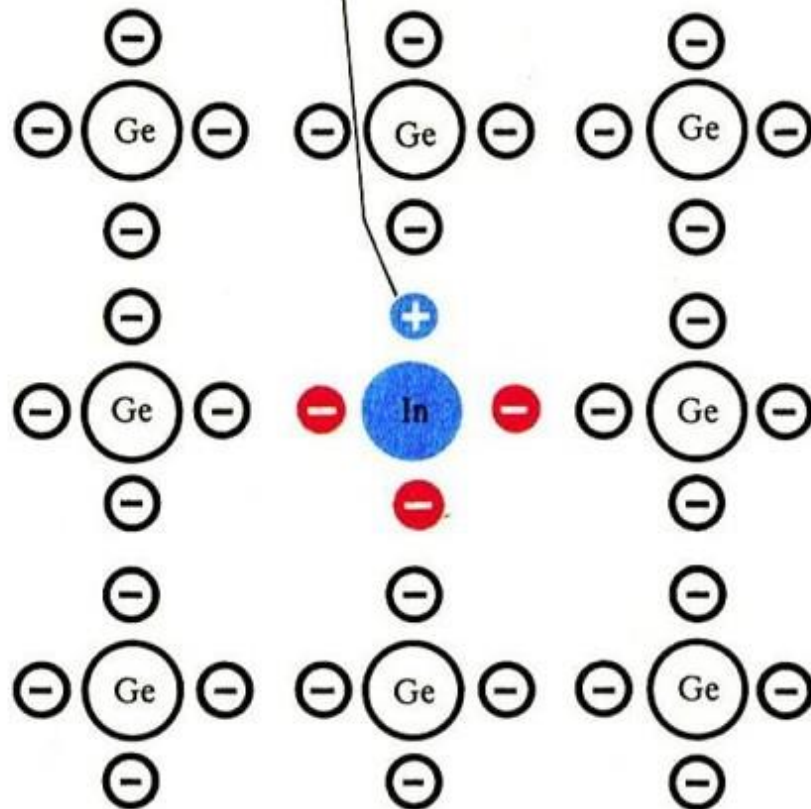
vodivost	ELEKTRONOVÁ	DĚROVÁ
příměs	5-ti mocná (P, As, Sb, Te)	3-mocná (B, Al, Ga, In)
		
nositeli náboje	elektrony	díry
vodivost typu	N (negativní elektrony)	P (pozitivní díry)
příměsové atomy	donory = dárci (stávají se kladnými ionty)	akceptory = příjemci (stávají se zápornými ionty)
minoritní nosiče náboje	díry	elektrony

nadbytečný elektron = volný elektron

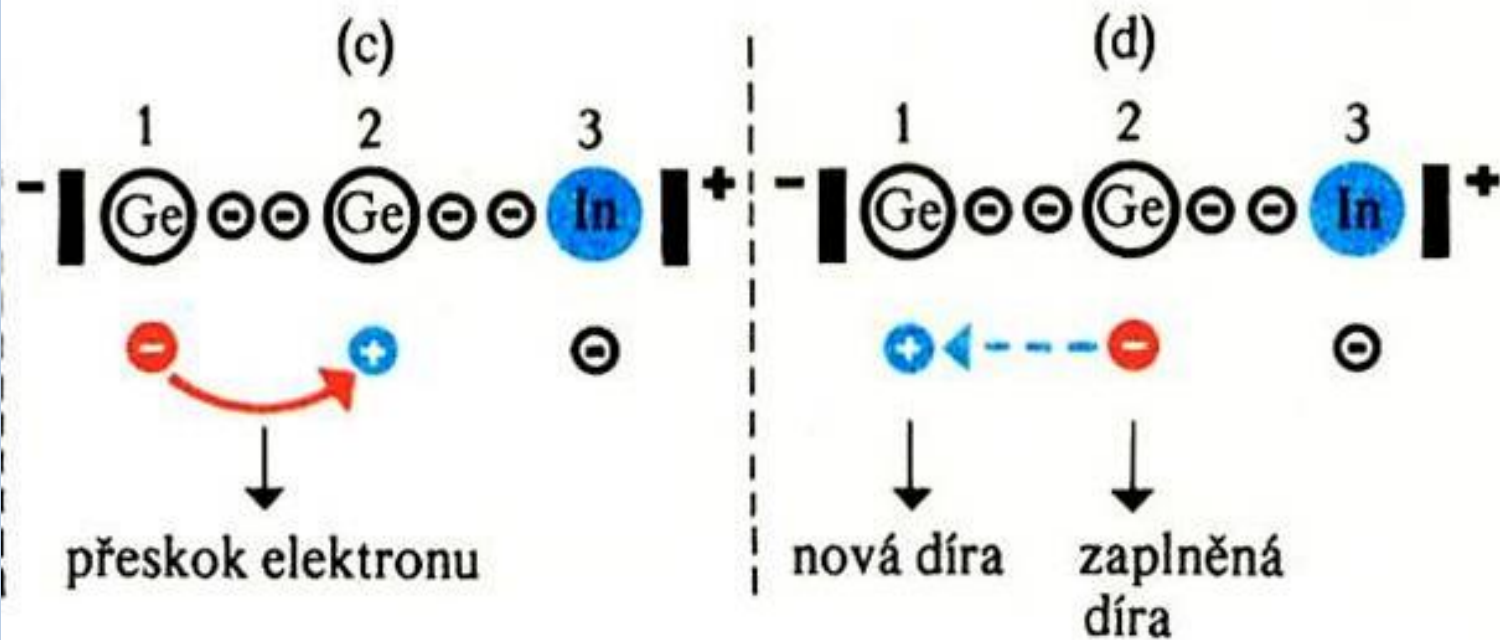
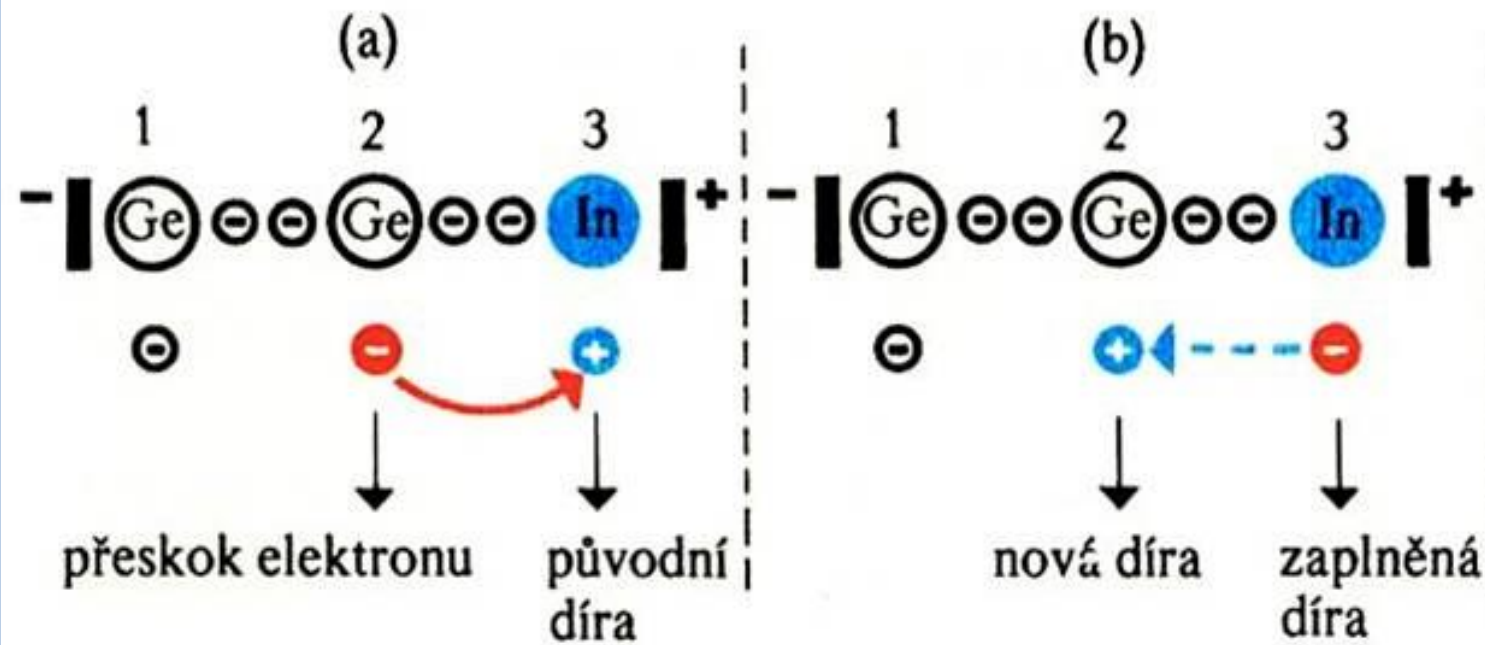


donor: arsen As

chybějící elektron = díra



akceptor: indium In



Hustota volných nosičů náboje
je daná množstvím příměsi.

Rozlišujeme

nečistotu – ve struktuře polovodiče se objevuje nahodile a její přítomnost není žádaná.

Do struktury polovodiče se dostává např. při tuhnutí taveniny přímo při výrobě krystalu polovodiče.

příměs – do struktury polovodiče se zabudovává cíleně tak, aby požadovaným způsobem ovlivnila vodivost polovodiče

Oba typy vodivosti (vlastní a nevlastní) se uplatňují
současně

při ↓ teplotě – nevlastní

při ↑ teplotě – vlastní (nežádoucí)

4. 4. PŘECHOD PN, POLOVODIČOVÁ DIODA

PN přechod – místo, kde se stýká polovodič typu P
a polovodič typu N

(vytvoření PN přechodu – sléváním, tavením)

**Polovodičové součástky lze rozdělit
podle počtů přechodů PN:**

- **0 přechodů PN** – termistor, fotorezistor
- **1 přechod PN** – polovodičová dioda
- **2 přechody PN** – tranzistor

Termistory

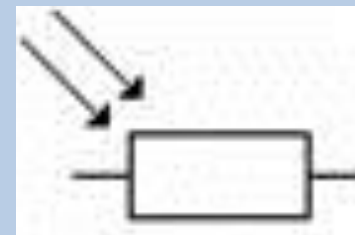
- se vyrábějí z oxidu kovu (Mn, Fe, Co, Ni, ...) rozemletého na prášek a podle požadovaných vlastností vyráběného termistoru se přidají další příměsi a pojidlo.
- směs se za vysokého tlaku slisuje
- tvar termistoru (tyčinky, destičky, ...) závisí na jeho pozdějším použití
- vypálí se v peci (při teplotách přes 1000°C).

Podle závislosti odporu na teplotě rozdělujeme:

- 1. NTC** (se záporným teplotním součinitelem odporu) - s rostoucí teplotou jeho odpor klesá, neboť roste vodivost a tedy i proud.
- 2. PTC** (pozistor; s kladným teplotním součinitelem odporu) – s rostoucí teplotou roste odpor, přičemž roste mnohem rychleji než u kovů.

Fotorezistor

- je součástka, která využívá energii dopadajícího elektromagnetického záření (a tedy i světla) ke zmenšení svého odporu.
- Vyrábí se nejčastěji ze CdS, CdSe, ...
- Energie viditelného světla má energii větší než je práce nutná k odtržení elektronu z atomu. Po dopadu fotonu viditelného světla tedy vzniká pár elektron - díra a tím se zvětšuje vlastní vodivost polovodiče.
- S růstem vodivosti klesá odpor fotorezistoru.
- Tento jev se nazývá vnitřní fotoefekt.



Využití:

1. NTC


- k měření teploty
- k určování velikosti rychlosti proudění tekutin (tekutina proudí, ochlazuje ho a je tedy možné určit velikost rychlosti proudění),
- převodník teplota - napětí (při měření teploty na počítačích),
- v obrazovkách (zabraňuje žhavicímu vláknu se přehřát při zapnutí počátečním velkým proudem - je zapojen s vláknem v sérii, čímž část tepla vzniklého průchodem proudu „absorbuje“)

2. PTC

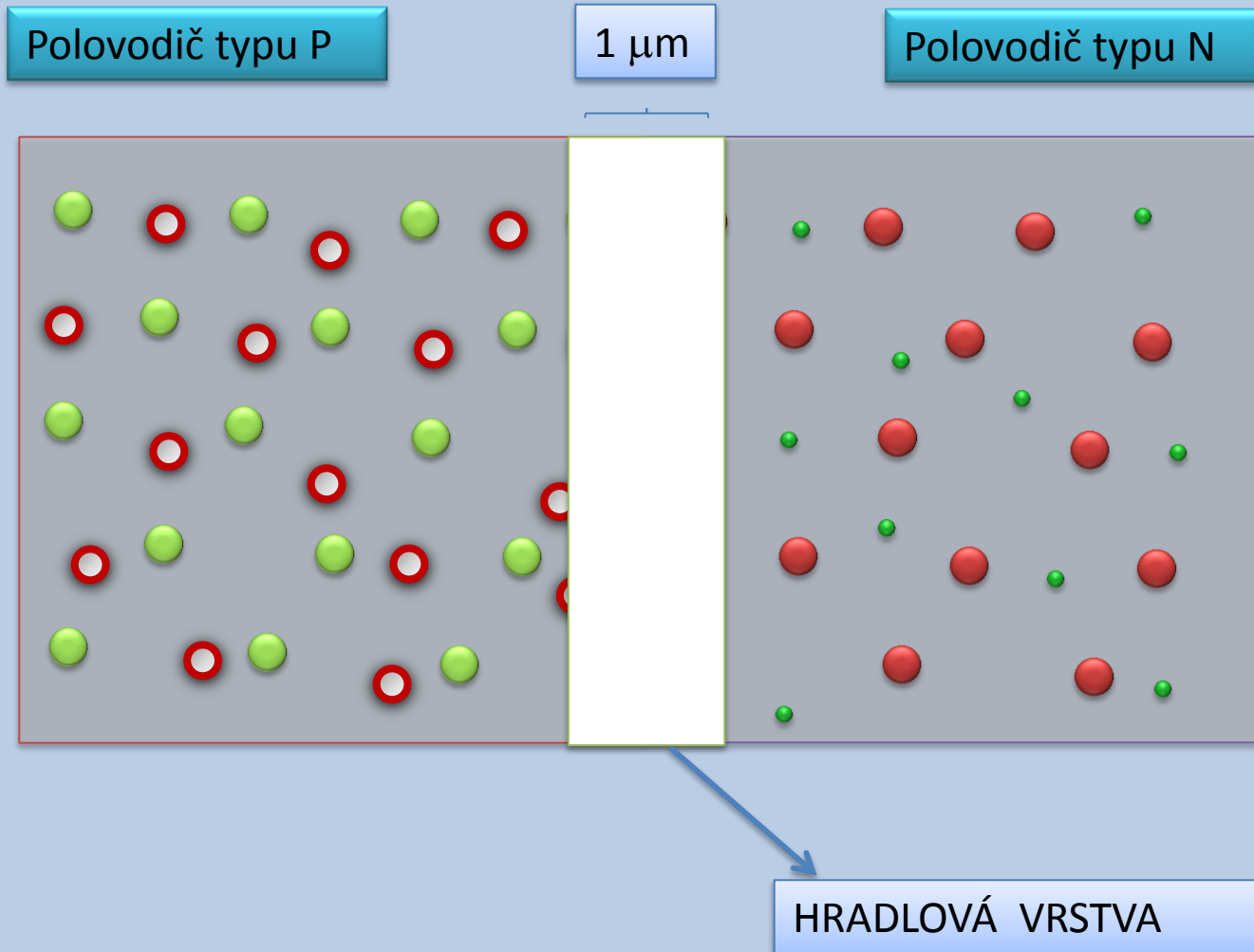
- v elektrických troubách a vařičích ke stabilizaci napětí
- indikuje vzrůst nebo pokles teploty,
- v termostatech („hrubé“ rozdíly zpracuje pozistor, zbytek doladí termistor)

polovodičová dioda

- součástka se dvěma vývody, připojenými ke krystalu polovodiče s jediným přechodem PN
- propouští proud v jednom směru

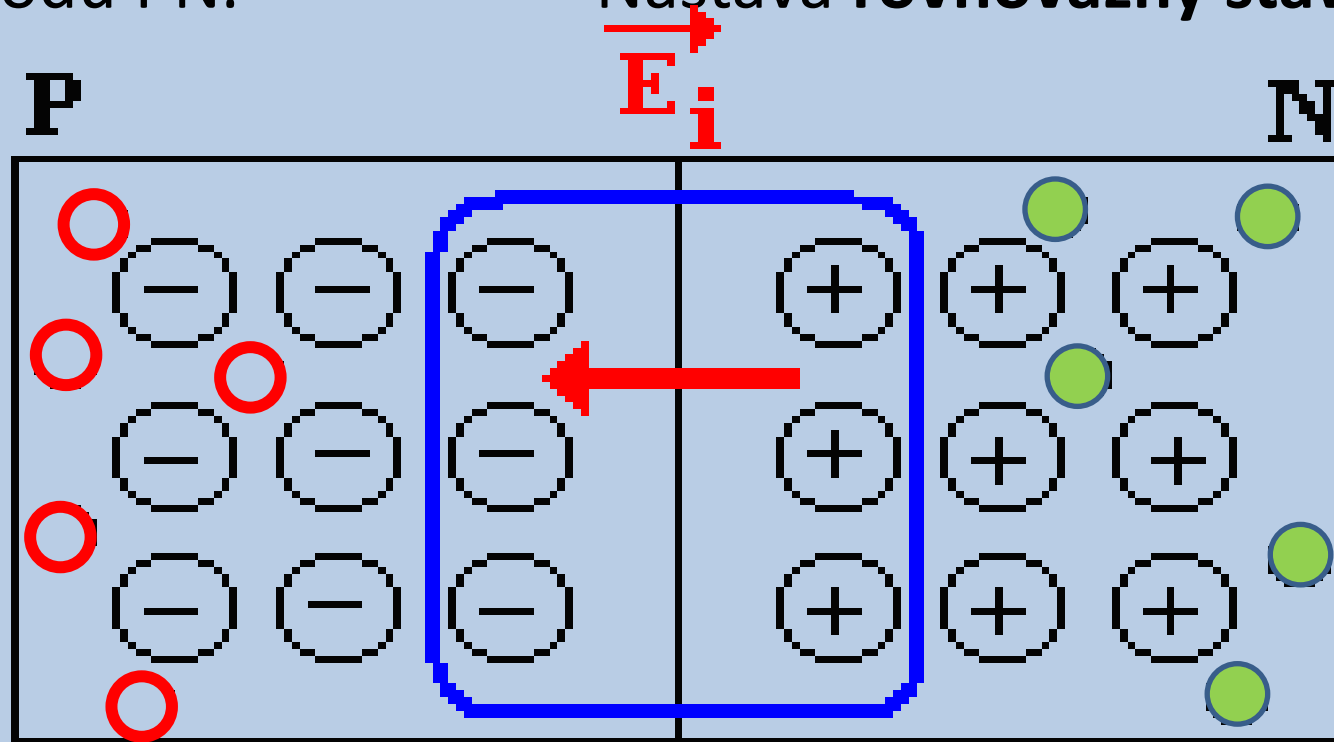
	
P	N
Anoda	Katoda





hraniční hradlová vrstva (1 μm) tenká vrstva mezi P a N s elektrickým polem, jehož intenzita směřuje z N do P a brání dalšímu pronikání děr a elektronů do blízkosti přechodu PN.

Nastává **rovnovážný stav**.



přechod (hradlo)

⊖ akceptor

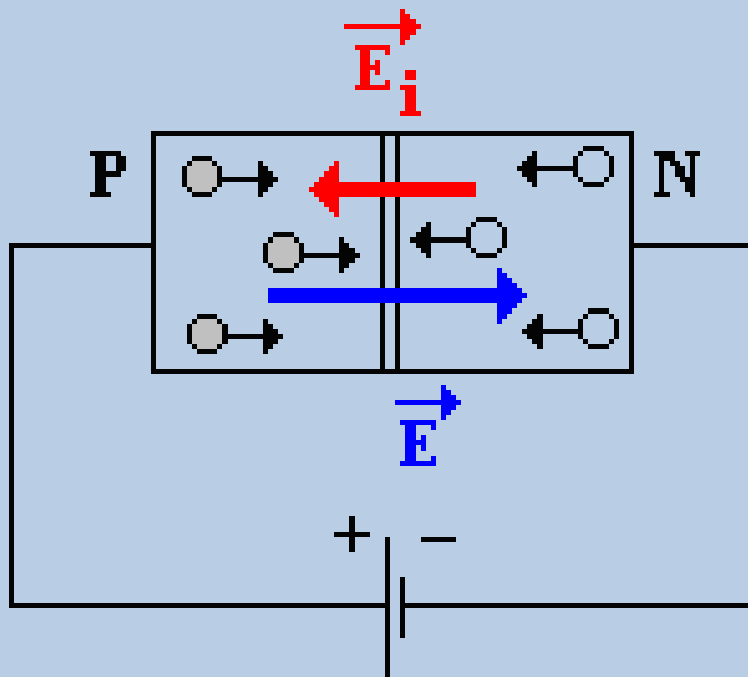
○ díra

⊕ donor

● volný elektron

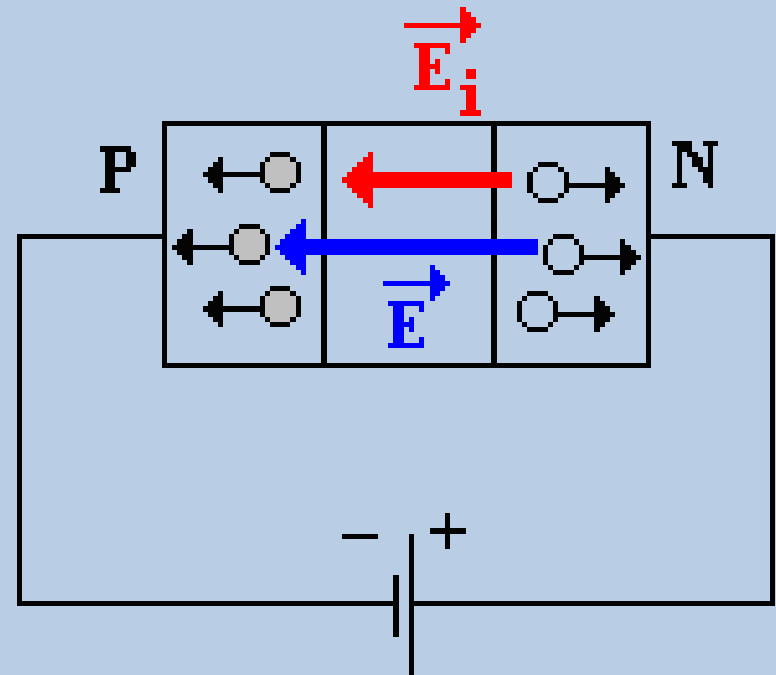
propustný směr

Elektrické pole vytvořené zdrojem je orientováno opačně, než pole hradlové vrstvy a potlačí ho.

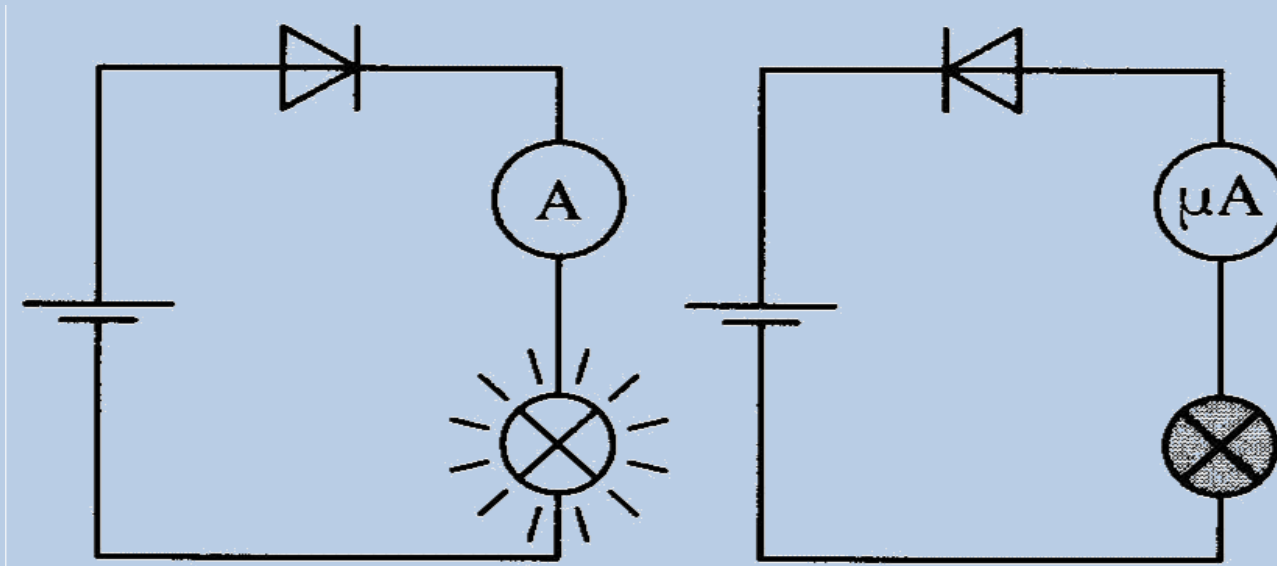


závěrný směr

Elektrické pole vytvořené zdrojem je orientováno stejně jako pole hradlové vrstvy a hradlová vrstva se zvětší.



diodový jev - závislost vodivosti diody na polaritě připojeného napětí



anoda na (+) propustný směr
(prochází téměř stejný proud jako bez diody)

anoda na (-) závěrný směr
($I = 0 \text{ A}$)

Voltampérová charakteristika diody - graf závislosti proudu, který prochází diodou na napětí.

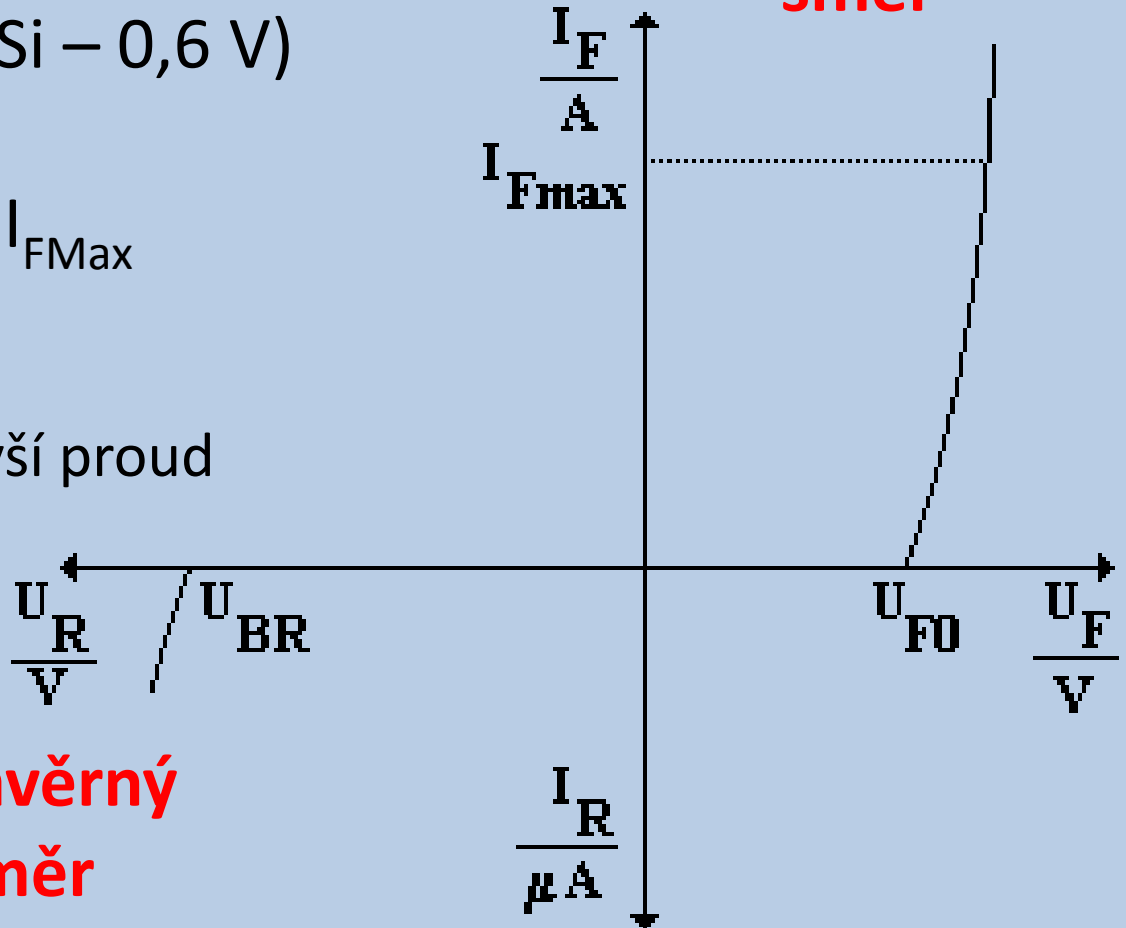
propustný
směr

U_{FO} – prahové napětí (Si – 0,6 V)

I_F – nesmí překročit I_{FMax}

U_{BR} – průrazné napětí
(při překročení se zvýší proud
a zničí se dioda)

závěrný
směr

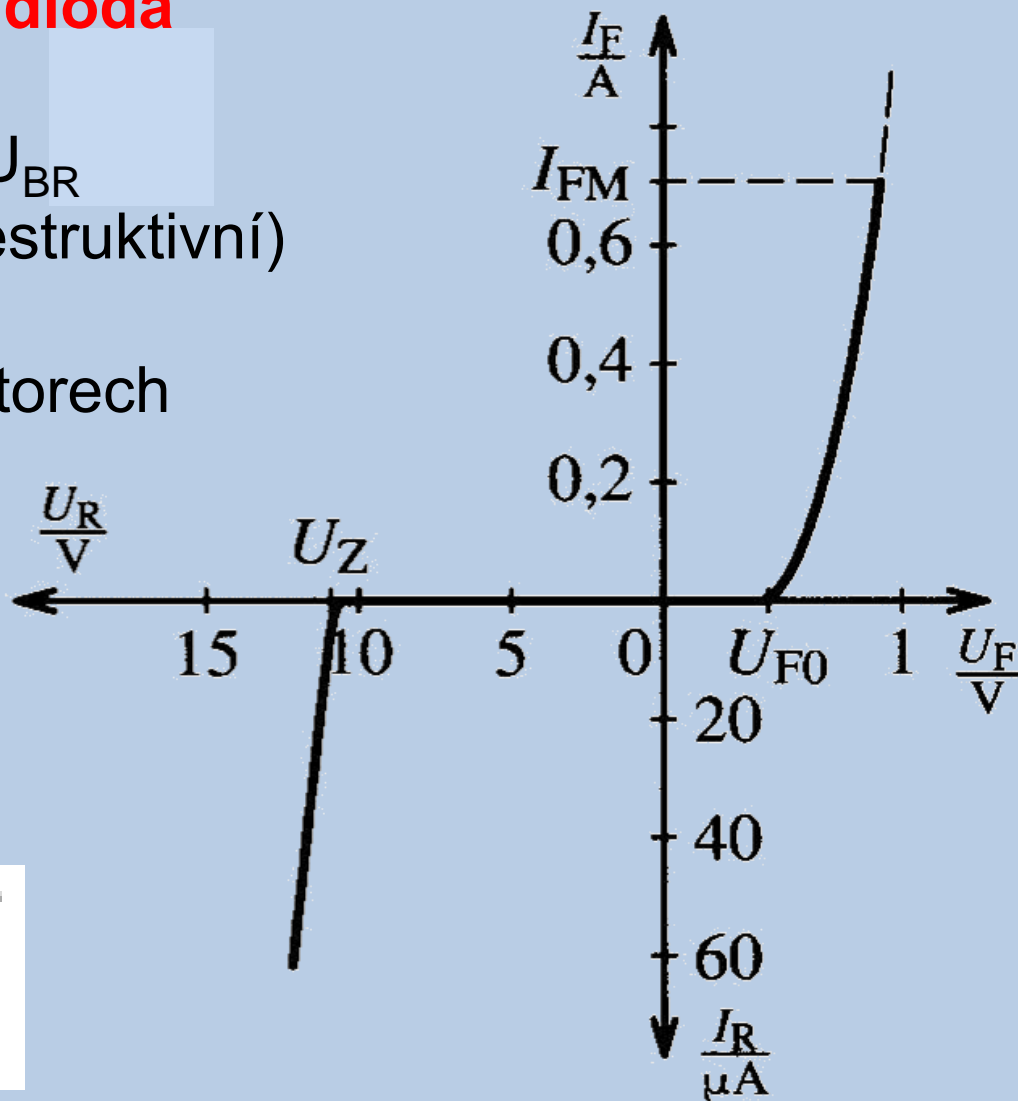
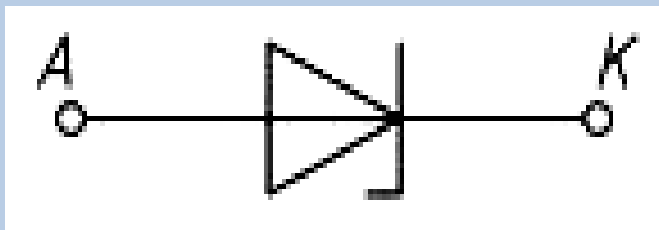


Zenerova (stabilizační) dioda

nezničí se překročením U_{BR}
(lavinovitý průraz je nedestruktivní)

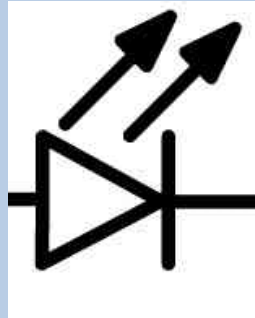
(používají se ve stabilizátorech
stejnosměrného U)

U_Z - Zenerovo napětí



LED diody

Light Emitting Diode
(světlo emitující dioda)

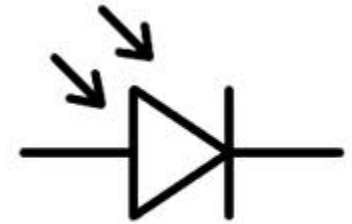


Barva světla je dána použitým materiálem.
Nejjednodušší je výroba červené LED,
protože červené světlo má nejmenší energii.



fotodioda

zdroj elektrické energie
v solárních článcích



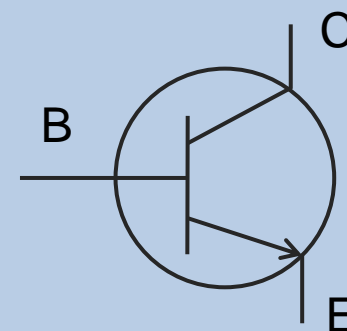
Využívá hradlového fotoefektu:
do oblasti přechodu PN proniká
elektromagnetické záření,
které generuje páry elektron – díra.

Osvětlený přechod PN diody je vodivý
i v závěrném směru
a sám se stává zdrojem napětí.

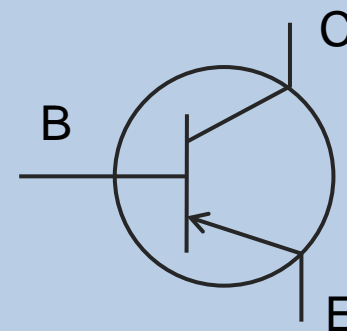


4. 5. TRANZISTOR

krystal polovodiče se **2 přechody PN**



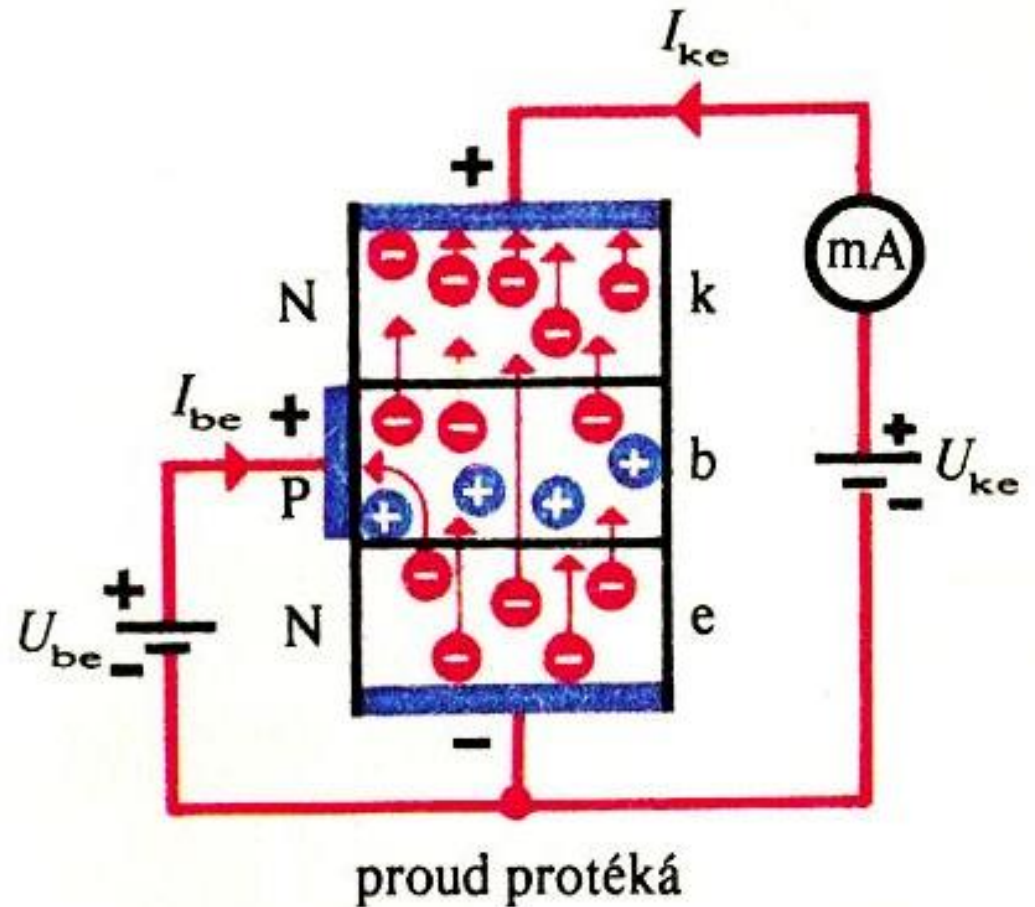
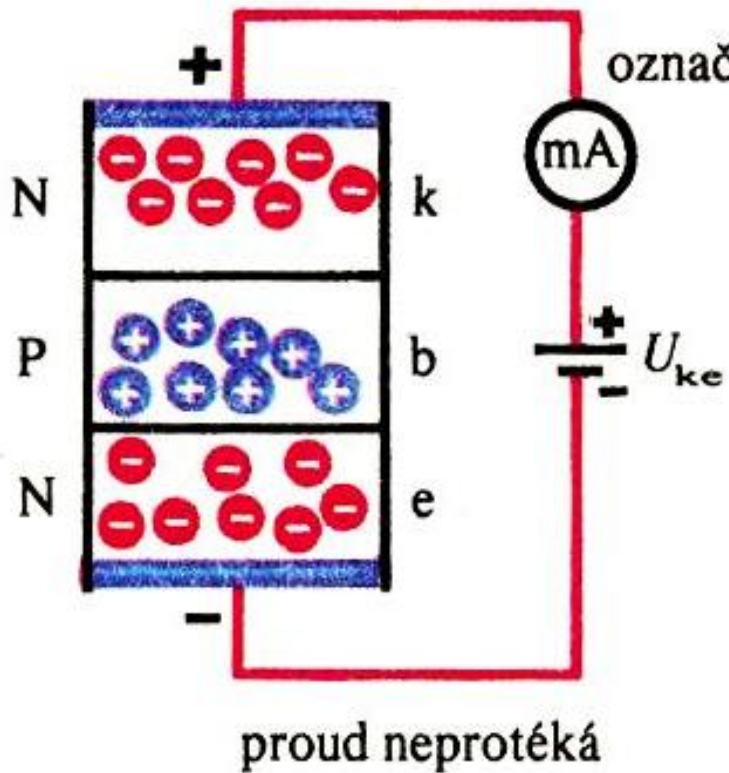
NPN



PNP

tranzistor jako zesilovač

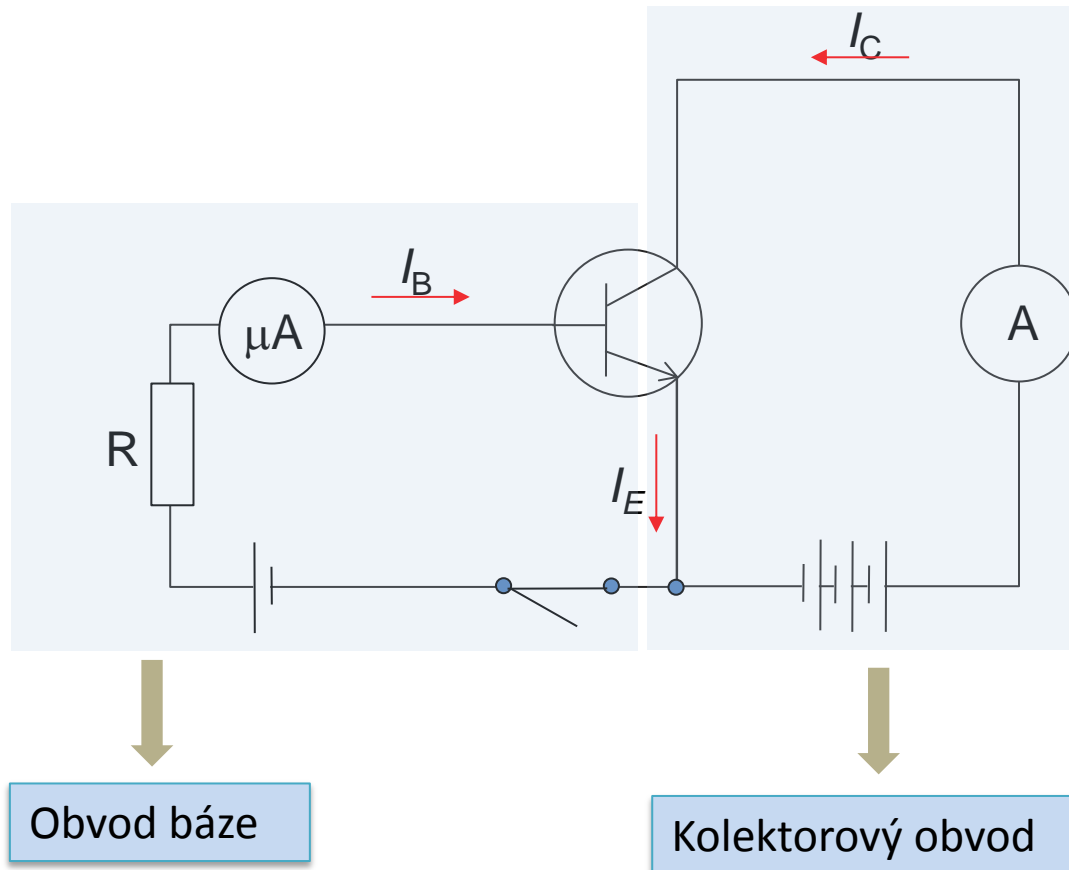
(napětí mezi kolektorem k a emitorem e,
proto označení U_{ke})



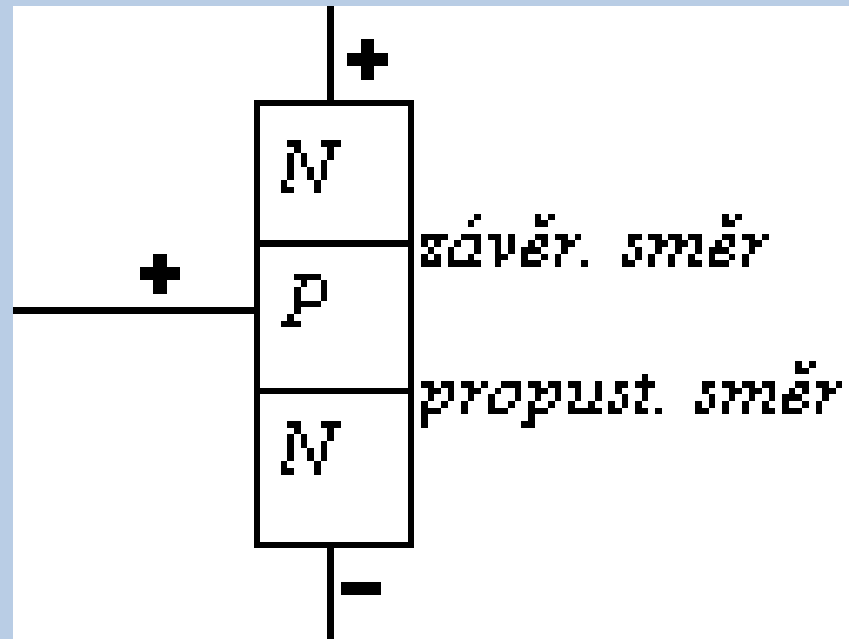
TRANZISTOROVÝ JEV (v laboratořích firmy Bell 1947)

Bardeen, Brattain, Shockley

Malé napětí vzbuzuje v obvodu báze proud, který je příčinou mnohokrát většího proudu v obvodu kolektorovém.



- **kolektorový obvod** $C \rightarrow B$ kolektorový přechod je zapojen v závěrném směru
 => kolektorovým obvodem neprochází proud
- **obvod báze** $B \rightarrow E$ je zapojen v propustném směru
 => obvodem začne procházet proud I_B
 => pak začne procházet proud i kolektorovým obvodem $I_C \gg I_B$

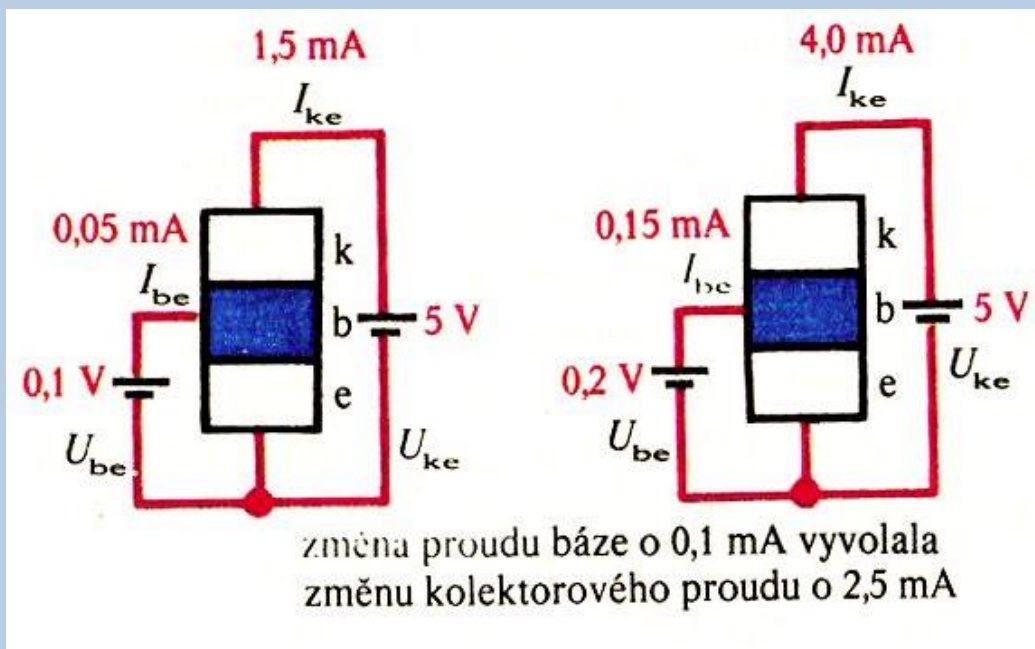


převodní charakteristika tranzistoru

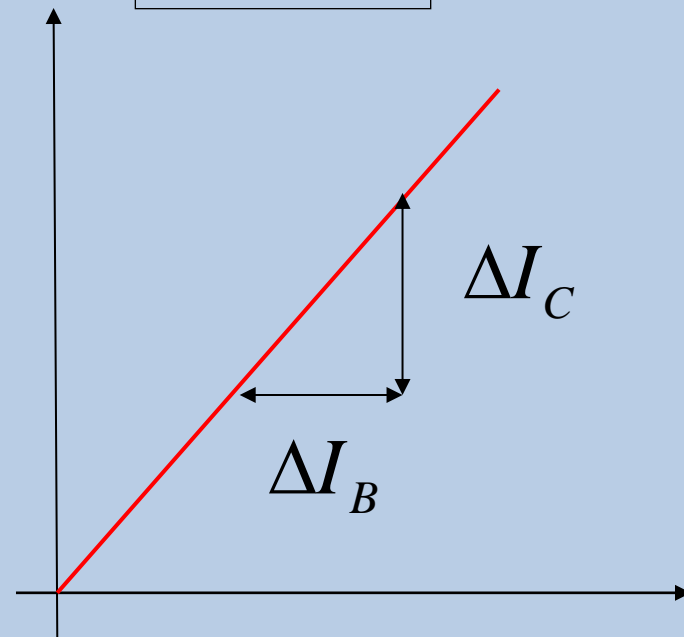
graf závislosti I_C na I_B

Proudový zesilovací činitel
při $U_{CE} = \text{konst.}$

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad \beta \approx 10^2$$

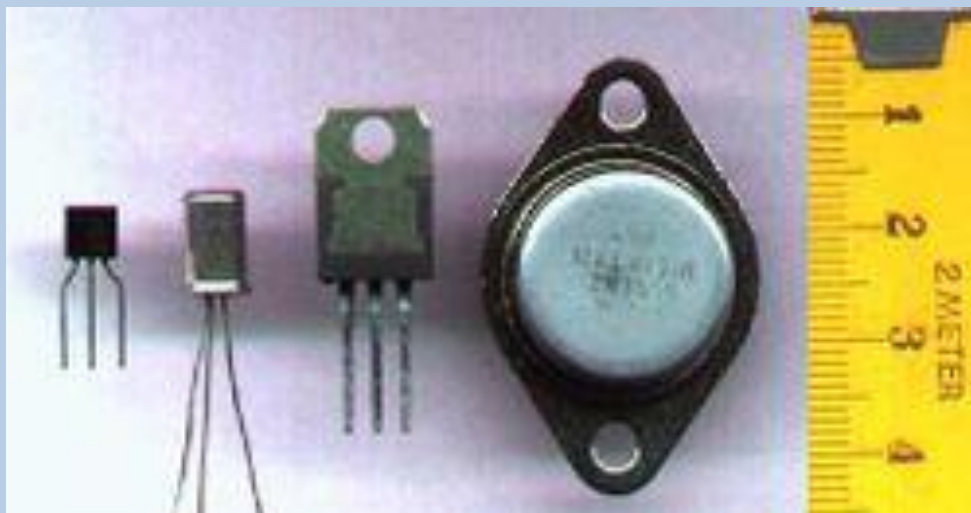


I_C/mA



$I_B/\mu\text{A}$

Druhy tranzistorů:



Bipolární

ovládán připojením **elektrického proudu** na bázi. Velikost proudu je ovládána proudem procházejícím mezi emitorem a kolektorem.

Unipolární

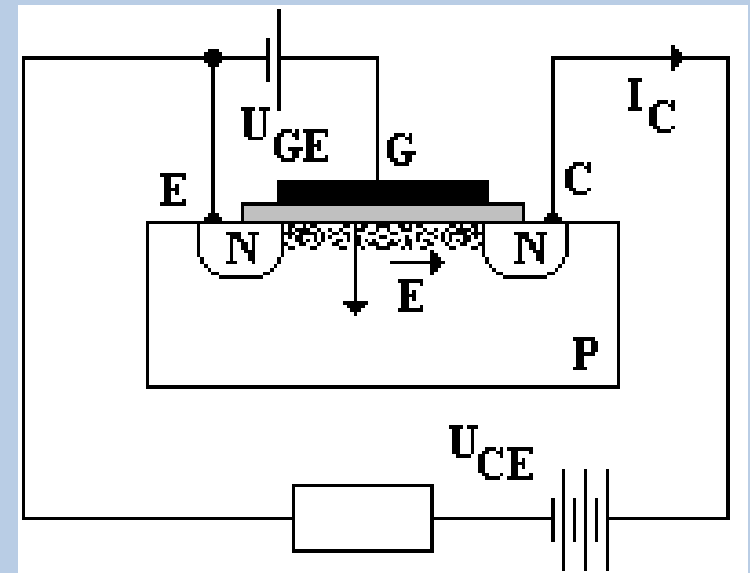
využívají k řízení proudu **elektrické pole (napětí)**, vytvořeného v obvodu řídicí elektrody G (gate).

Tranzistory řízené elektrickým polem (unipolární tranzistory) – spínač

— dielektrikum
(oxid křemičitý)
⊗⇋ inverzní vrstva

- Báze = hradlo G (*gate*).
- (tenká vrstva kovu plní funkci řídicí elektrody).
- Tento typ tranzistoru se označuje jako MOSFET

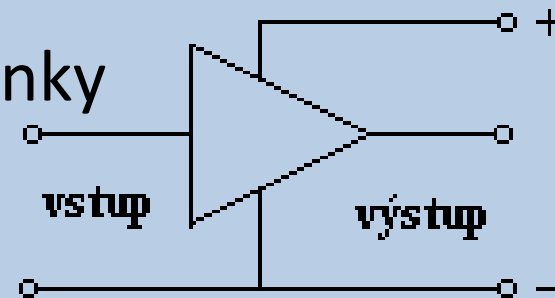
(Metal - Oxid - Semiconductor:
kov - oxid - polovodič).



- Vstupní obvod je obvod mezi emitorem a hradlem,
- výstupní obvod je mezi emitorem a kolektorem.
- Jeden z přechodů PN je zapojen v závěrném směru.
- U povrchu je elektrická intenzita E kolmá na povrch, což způsobuje odpuzování majoritních nositelů náboje - děr.
- Odpuzování může být natolik intenzivní, že vznikne inverzní vrstva - u povrchu polovodiče typu P vznikne vrstva polovodiče typu N.

4. 6. INTEGROVANÝ OBVOD

- začátek 20. století – vakuové elektronky
- 1948 – tranzistor
- 60. léta 20. století – objev integrovaného obvodu, (obor – mikroelektronika)



Integrovaný obvod

- **křemíková destička** malého rozměru (tzv. čip) je vytvořena velkým množstvím tranzistorů, diod, rezistorů, ...
- není ho možné rozčlenit na jednotlivé součástky
- má pouze vstupní, výstupní svorky, svorky pro připojení napájecího zdroje a pro připojení pomocných obvodů

Rozdělení podle charakteru signálů, k jejichž zpracování jsou určeny:

- **integrované obvody analogové techniky**
užívají se pro zpracování spojitých (analogových) signálů, které se s časem mění spojitě - např. zvukový signál, signál nesoucí informaci o okamžité hodnotě fyzikální veličiny (teplota, napětí).
- **integrované obvody pro zpracování číslicového (digitálního) signálu**
je tvořen sledem impulsů napětí, které se mění skokem mezi dvěma hodnotami (0 a 1)
- **mikroprocesor** – (70. léta)
- integrovaný obvod číslicové techniky, který je základní funkční součástí počítače.
Jeho logické funkce lze programovat.