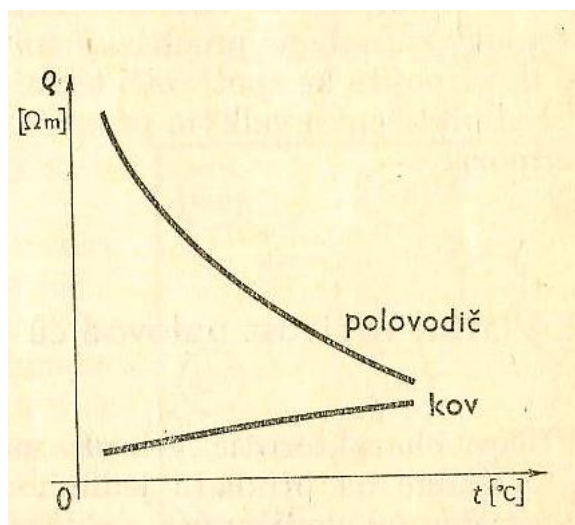


## 7. Elektrický proud v polovodičích

### 7.1 Elektrické vlastnosti polovodičů

Kromě vodičů a izolantů existují polovodiče.



#### Definice polovodiče:

Je to řada minerálů, rud, krystalů i amorfních látek, řada oxidů a slitin kovů, sloučeniny síry, teluru a selenu s kovy bór, hliník, křemík, germanium, cín, fosfor, arzén, antimon, síra, selen telur, jód.

Charakteristickým znakem je změna vnitřního odporu se změnou vnějších podmínek a s obsahem nepatrných příměsí určitých prvků. Za vnější podmínky považujeme změnu teploty či osvětlení.

U kovů se odpor s rostoucím teplem zvětšuje u polovodičů je tomu naopak a zmenšuje se podle exponenciální funkce.

#### Termistor

Je to polovodičová součástka, ve které se právě využívá vlastnosti, že s rostoucí teplotou klesá odpor.

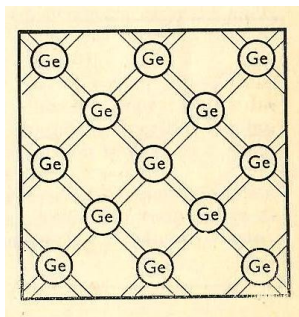
Jsou zhotoveny slinutím směsi oxidů kovů (Ni, Mn, Co) za vysoké teploty a mají tvar tyčinek nebo perliček a vše je umístěno v ochranném skleněném pouzdře.

Používají se k měření regulaci teploty, ochranné odpory, omezovače proudu či k měření vysokofrekvenčních proudů.

### 7.2 Vlastní vodivost polovodičů

Nejvýznamnější materiál germanium, křemík.

#### Germánium



Ge je 4. mocný prvek, a velmi pevné krystaly. Každý atom Ge sousedí s dalšími 4 atomy, vzdálenosti jsou tak malé, že jsou vzájemným silovým působením atomů ovlivněny pohyby valenčních elektronů, takže nelze určit příslušnost elektronu k určitému atomu. Elektrony jsou sdíleny sousedícími atomy (vytvoří se spárované elektronové dvojice) – **vazba kovalentní**.

V absolutně čistém Ge se všechny elektrony zúčastní vazeb mezi atomy, v krystalu nejsou volně pohyblivé nosiče. Při vyšší teplotě konají atomy Ge tepelný pohyb a elektrony, které získají dostatečnou energii, mohou překonávat vazebné síly a stávají se volnými nosiči náboje. Uvolnění elektronu dochází k porušení vazby mezi atomy, ve struktuře krystalu vzniká prázdné místo, na které může přejít jiný elektron uvolněný porušením vazby v jiném místě krystalu. Místo porušené vazby nazýváme **díra**.

Zachycení elektronu v díře nastává **rekombinace** páru elektron – díra. Díra zaniká, avšak objevuje se na jiném místě krystalu, kde se elektron z vazby uvolnil, čili kde nastala **generace** páru elektron – díra.

Tedy nejen elektrony, ale i díry konají v polovodiči tepelný pohyb.

Při určité teplotě vzniká rovnováha mezi počtem elektronů a děr, které generací vznikají a rekombinací zanikají.

Celková koncentrace volných nosičů náboje určuje vodivost nebo odpor polovodičů.

S rostoucí teplotou však převažuje počet volných částic vznikajících generací nad počtem zajišťujících rekombinací. **Výsledkem je rostoucí vodivost a snižující se odpor.**

### Definice vlastní vodivosti

Vodivost polovodičů podmíněnou generací elektronů a děr na úkor energie tepelného pohybu iontů krystalu nazýváme vlastní vodivostí a je pro ni charakteristický stejný počet volných elektronů a děr.

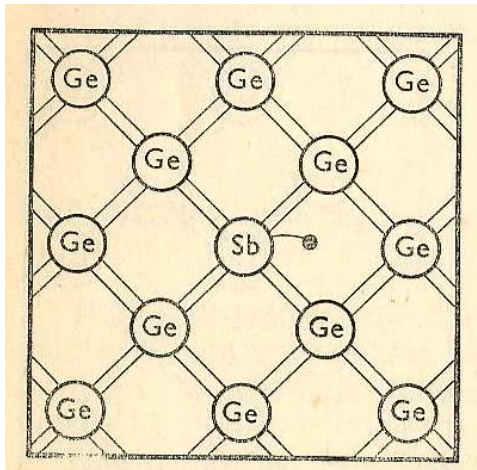
### 7.3 Elektronová a děrová vodivost

K vytvoření páru elektron – díra v čistém Ge je třeba energie  $1,2 \cdot 10^{-19} J$ , avšak střední kinetická energie atomu v krystalu nepřesahuje při pokojové teplotě hodnotu  $0,03 \cdot 10^{-19} J$ .

#### Řešení:

To znamená, že v polovodiči s vlastní vodivostí je generace nosičů náboje málo pravděpodobná. energii potřebnou k uvolnění je možno zmenšit poruchami krystalové mříže polovodiče cizími atomy.

Význam mají příměsi pětimocných (Sb, P, As) a trojmocných (B, Ga, In) prvky v koncentraci  $10^{-5} \%$ . Tím se energie potřebná k uvolnění nosiče sníží na  $0,02 \cdot 10^{-19} J$ .



#### Elektronová vodivost

Atom Sb (antimon) nahrazuje Ge. 4 z jeho pěti valenčních elektronů přispívají k nasycení vazeb, pátý je jen velmi slabě vázán. Při pokojové teplotě jsou prakticky volné, takže koncentrace volných nosičů náboje je dána koncentrací atomů v příměsi.

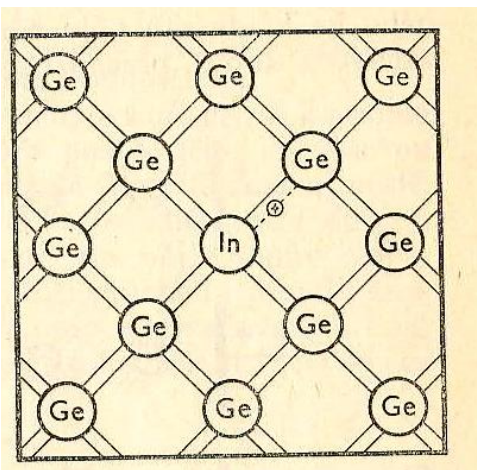
Pětimocné příměsi jsou dárci (donory) elektronů, jejichž počet je větší než počet děr vzniklých generací elektronů z vazeb.

Převládající nosiče náboje označujeme jako nosiče většinové (majoritní), nosiče s menší koncentrací nazýváme nosiče menšinové (minoritní).

#### Závěr:

V polovodiči s donory jsou majoritní nosiče elektronů se záporným (negativním) nábojem. Tyto polovodiče označujeme jako polovodiče typu N a jejich vodivost je elektronová.

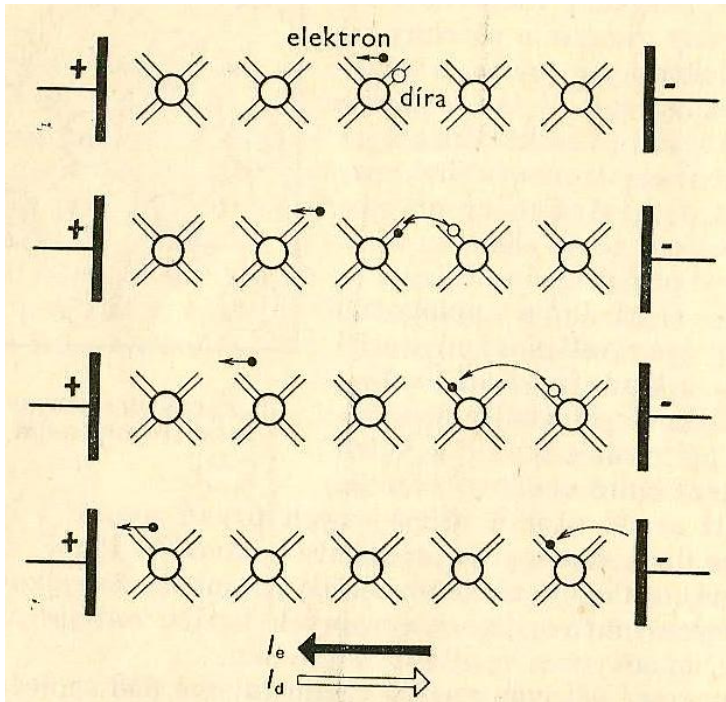
#### Děrová vodivost



Atom In nahrazuje Ge. K nasycení vazeb se sousedními atomy přispívají 3 elektrony a jedna z vazeb zůstává nenasyčená. v tomto místě vzniká díra. Trojmocné příměsi jsou příjemci (akceptory) elektronů a v polovodiči s akceptory jsou majoritní nosiče náboje díry s kladným (pozitivním) nábojem. Takové polovodiče označujeme jako polovodiče typu P a jejich vodivost nazýváme děrová.

Elektronovou i děrovou vodivost nazýváme příměrová. Odpor polovodičů s příměrovou vodivostí je za stejných podmínek menší, než odpor polovodičů s vodivostí vlastní.

## 7.4 Elektrický proud v polovodičích



Dosud jsme uvažovali pouze chaotický pohyb (tepelný). Jestliže v polovodiči vytvoříme elektrické pole mění se chaotický pohyb v pohyb uspořádaný a polovodičem prochází elektrický proud. Avšak i v tomto případě dochází k rekombinaci elektronů a děr.

**Elektrony se v polovodiči v elektrickém poli pohybují od záporného pólu zdroje ke kladnému a pohyb děr od kladného k zápornému.**

Proud  $I$  má dvě složky: proud elektronů  $I_e$  orientovaný nesouhlasně s  $E$  a proud děr  $I_d$  orientovaný souhlasně.

Platí:  $I = I_e + I_d$ .

Proud  $I$  je dán vztahem:  $I = n e v S$ ,  
 $n$  – koncentrace nosičů náboje,  $v$  –

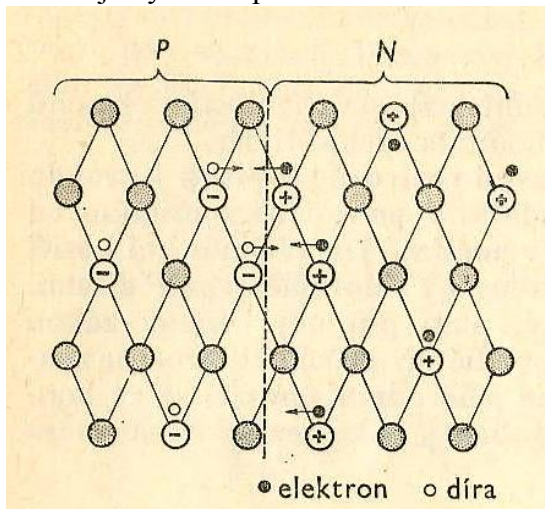
střední rychlost,  $S$  – příčný průřez,  $e$  – absolutní hodnota náboje nosiče.

Celkový proud je:  $I = n_e e v_e S + n_d e v_d S = e S (u_e v_e + u_d v_d)$ .

V polovodiči s vlastní vodivostí přispívají k proudu elektrony i díry stejným dílem, kdežto v polovodiči s průměrovou vodivostí je proud zprostředkován v podstatě jen většinovými nosiči náboje – v polovodiči typu N elektrony a v polovodiči typu P dírami.

## 7.5 Diodový jev

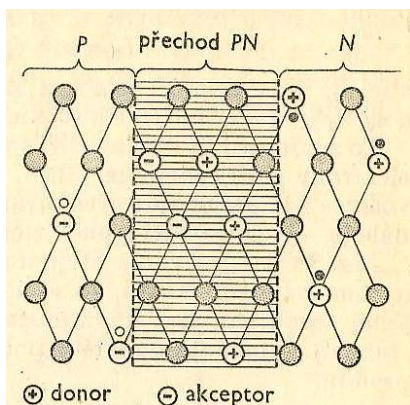
Největší význam mají polovodiče, v nichž jsou dvě oblasti s opačným typem vodivosti (P, N). V místě rozhraní mezi oblastí P a N vzniká přechod PN. V praxi se toto provádí tak, že z krystalu s vodivostí N se vyřízne destička, na ni se položí kapka  $I_n$  a ve vakuu se zahřeje na  $500\text{ }^\circ\text{C}$ .  $I_n$  se roztaví a difuzí pronikne do Ge kapkou a v této oblasti se změní vodivost na typ P. Tím je vytvořen přechod PN.



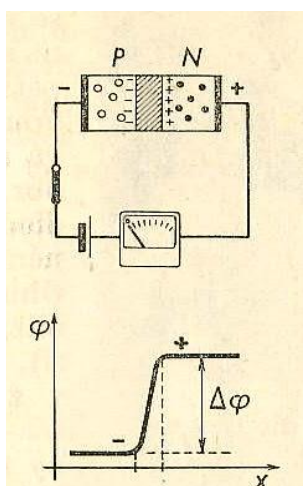
V oblasti P jsou nepohyblivé akceptory, jejichž celkový záporný náboj je stejně veliký jako celkový kladný náboj volných děr, takže celkový náboj oblasti P je vyrovnán. Obdobně jsou v oblasti s vodivostí typu N nepohyblivé kladné donory, jejich celkový náboj je vyrovnán nábojem uvolněných elektronů.

Je-li nestejná koncentrace volných nosičů náboje nastává difúze děr do oblasti N a elektronů do oblasti P.

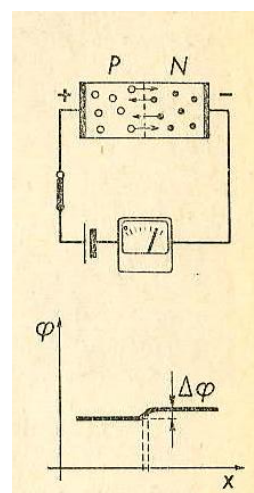
V oblasti P převládá náboj záporný, v N náboj kladný. Kolem přechodu vzniká elektrické pole ve směru z N do P. Záporný náboj v oblasti P a kladný v oblasti N.



Nastává rovnovážný stav, charakterizovaný difúzí menšinových nosičů náboje. Určitý počet elektronů prochází jedním směrem, stejný počet děr prochází směrem opačným a celkové rozložení náboje se nemění. V oblasti přechodu PN však je koncentrace volných nosičů náboje podstatně menší než v oblastech od přechodu vzdálenějších. Proto má oblast přechodu PN velký odpor a ten rozhoduje o celkovém odporu polovodiče.



Vložme polovodič s přechodem PN do obvodu elektrického proudu. Je-li P na minus a N na plus zvětší se rozdíl potenciálů a tím se zvětší intenzita elektrického pole zabraňující difúzi elektronů a děr přechodem. Tím se dále sníží koncentrace nosičů náboje v oblasti přechodu, odpor přechodové vrstvy se zvětší a v elektrickém obvodu teče nepatrný proud. Říkáme, že řechot PN je zapojen v závěrném směru.



Změníme-li polaritu zdroje, tím se rozdíl potenciálů zmenší, do oblasti přechodu pronikají elektrony a díry ze vzdálenějších oblastí, obnovuje se difúze mezi oběma oblastmi krystalu. To se projeví jako zmenšení odporu přechodové vrstvy a elektrickým obvodem protéká větší proud. Říkáme, že přechod PN je zapojen ve směru propustném.

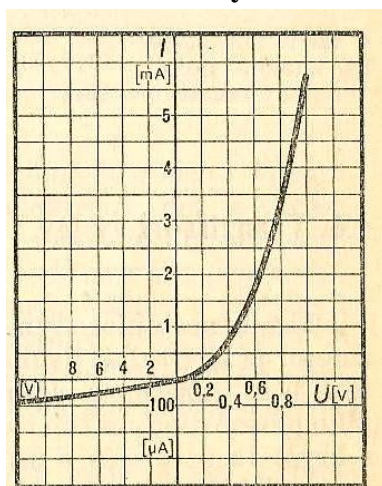
### Polovodičová dioda

Popsaný jev se nazývá diodový jev.

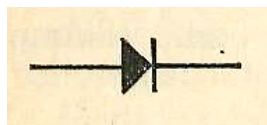
Polovodič s přechodem PN – polovodičová dioda

K charakteristice jakým způsobem protéká diodou proud, slouží voltampérová charakteristika.

### Voltampérová charakteristika diody



V propustném proud téměř  
Označení diody:



směru platí přibližně Ohmův zákon, v závěrném neprochází.

### Druhy diod:

plošné – nejčastěji křemíkové či germaniové.

hrotové – přechod PN může být vytvořen na rozhraní kovu a polovodiče.

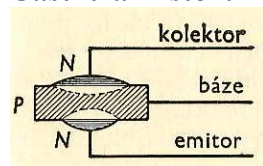
**Použití diod:** usměrnění proudu

## 7.6 Tranzistorový jev

Je to polovodič se dvěma PN přechody.

Zhotovení je jako u diody. V základní destičce s určitým typem vodivosti se vytvoří u protilehlých stěn dvě oblasti s opačným typem vodivosti.

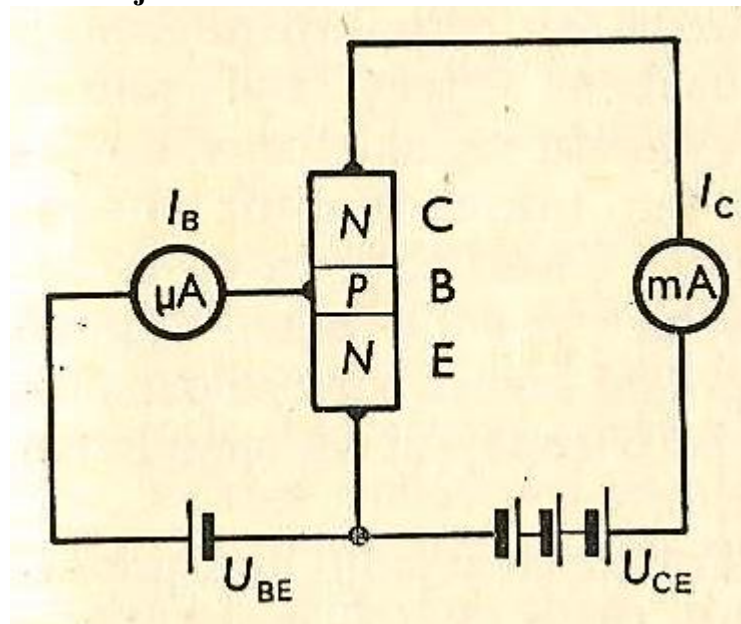
### Části tranzistoru



Základní destička se nazývá **báze**, část s přechodem o větší ploše je **kolektor**, přechod o menší ploše **emitor**.

Objem oblasti báze mezi přechody je velmi malý a platí, že čím je menší tím lépe – větší zesilovací činitel. Připojíme-li mezi kolektor a emitor napětí proud neprotéká, neboť jeden z přechodů je zapojen v závěrném směru. Změna nastane připojením zdroje mezi bázi a emitorem v propustném.

### Podstata jevu



Obvodem báze protéká proud báze  $I_B$ , při němž do malého objemu báze proniká emitorovým přechodem více elektronů, než je v bázi děr. Nastává injekce menšinových nosičů náboje do oblasti báze. Elektrony pronikají difúzí až do blízkosti kolektorového přechodu, kde jsou silně přitahovány kladným nábojem kolektoru a pronikají do oblasti kolektoru. Poněvadž jsou elektrony v bázi typu P menšinovými nosiči náboje, mohou pronikat kolektorovým přechodem připojeným v závěrném směru a vytvářejí

kolektorový proud  $I_C$ .

Jelikož je odpor emitorového přechodu připojeného v propustném směru malý, vzniká proud báze již při velmi malém napětí  $U_{BE}$  mezi bázi a emitorem a podmiňuje tím vznik značného kolektorového proudu. Dochází ke značnému zesílení.

### Schématické značky tranzistoru

