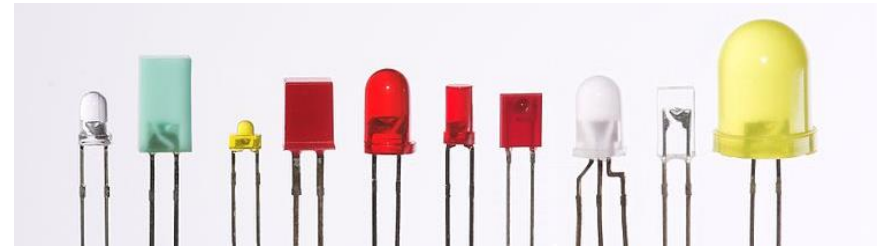
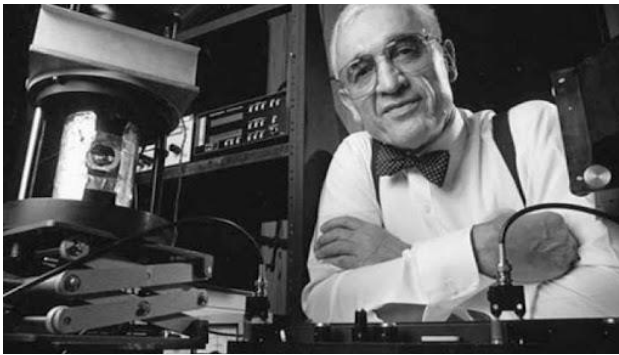


# Elektrický proud v polovodičích



# 21. Elektrický proud v polovodičích – vlastní vodivost

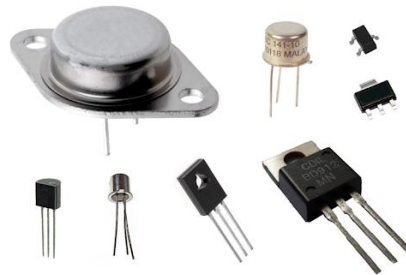
- Polovodičové prvky (diody, tranzistory, integrované obvody) mají velký význam pro rozvoj a miniaturizaci elektroniky (rádia, TV, mobily, PC)



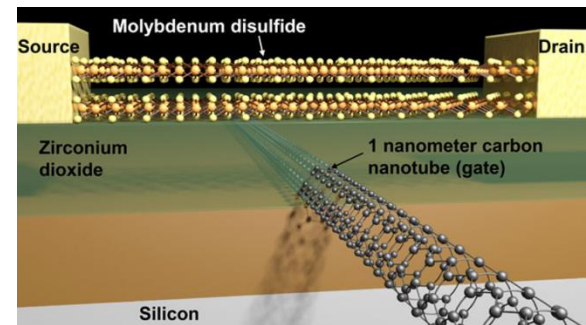
**Nick Holonyak (\*1928) – objevitel LED diody (1962)**



cca 15 cm =  $10^{-1}$  m



cca 5 mm =  $10^{-3}$  m (1980)

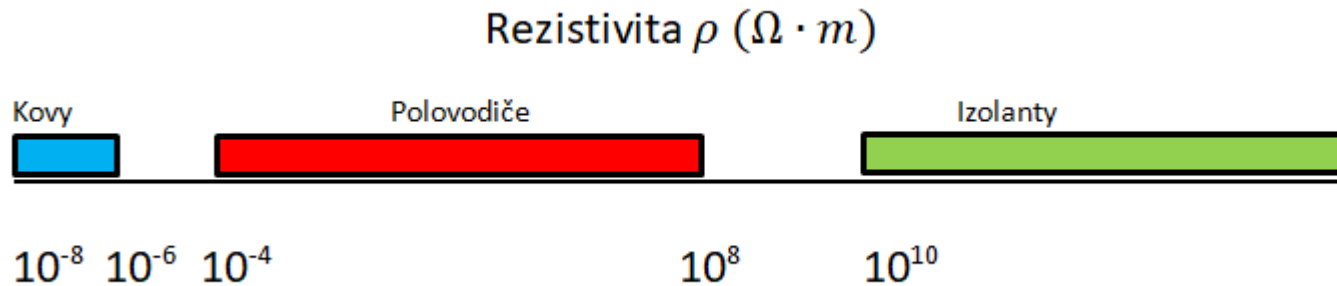


cca 1 nm =  $10^{-9}$  m (2016)

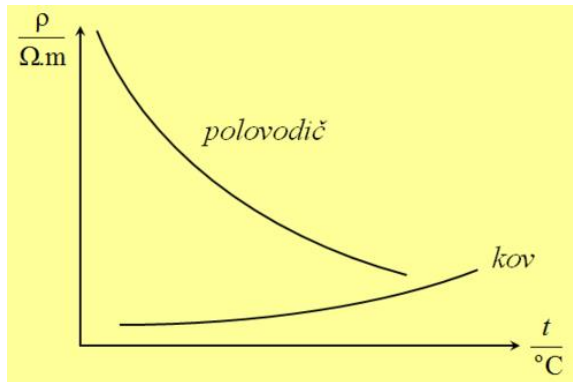
**John Bardeen (1908-1991), Walter Brattain (1902-1987), William Shockley (1910-1989)**

– 1. tranzistor, Nobelova cena za fyziku 1956

# 21. Elektrický proud v polovodičích – vlastní vodivost



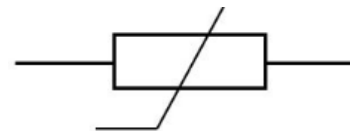
## Závislost odporu na teplotě



- **Vodič (kov):** s rostoucí teplotou roste odpor (téměř lineárně)
- **Polovodič: s rostoucí teplotou klesá odpor** (částečně lineárně)  
Př. termistor – digitální teploměry, regulace teploty



termistor



schematická značka

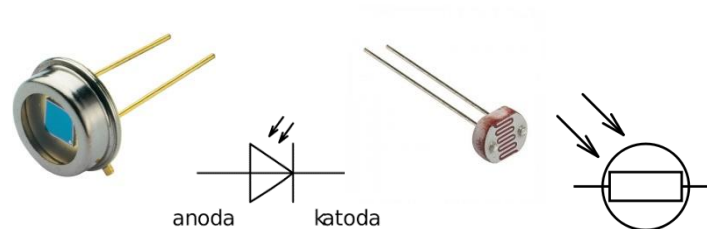
## Závislost odporu na světle

- **Fotodioda, fotorezistor**

Př. optické brány, optoelektronické prvky, TV ovladače, solární články

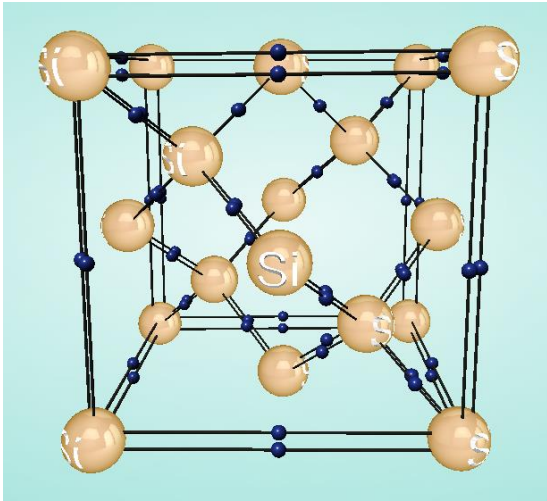
prvky: Si, Ge, Se, Te, C

sloučeniny: PbS, CdS, GaAs, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuO, NiO

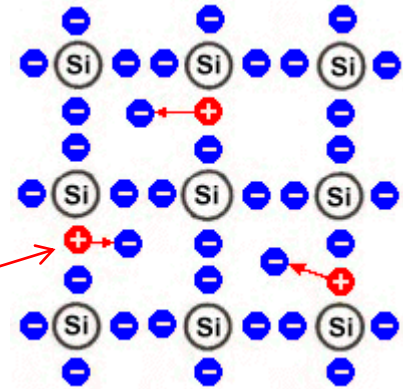


# 21. Elektrický proud v polovodičích – vlastní vodivost

## Vlastní polovodiče



- velmi čistý krystalický křemík Si, Ge (čistota 99,9999 % - 1 cizí částice na 10 000 atomů Si)
- Při pokojové teplotě mají elektrony dost energie, aby se uvolnily z vazby
- Si: 14 e<sup>-</sup>: 10 vázaných a 4 vodivostní
- uvolní-li se elektron z vazby, zůstane na jeho místě **kladná díra** (neobsazené místo ve vazbě)



## Generace a rekombinace

- **Generace:** uvolněním elektronu z vazby vlivem teploty → vzniká pár elektron-díra
- **Rekombinace:** zánik páru elektron-díra → elektron zaplní kladnou díru (splyne s ní)
- Generace a rekombinace probíhá v polovodiči současně v celém objemu polovodiče v počtu cca  $10^{17}$ - $10^{20}$  generací - rekombinací za 1 ms v  $1 \text{ cm}^3$

## Vlastní vodivost

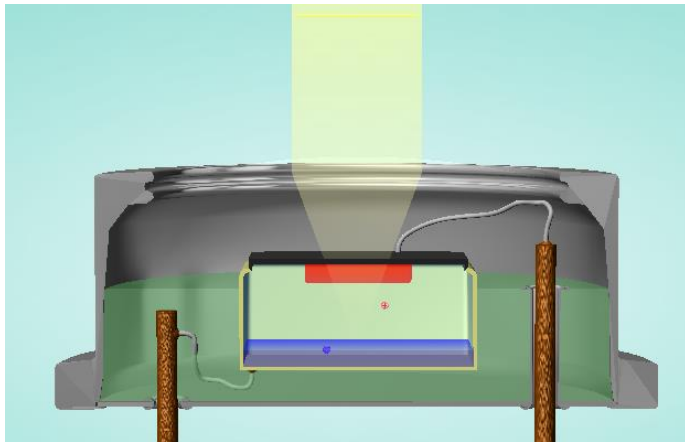
- **děrová:** pohyb kladných děr → zdánlivý pohyb → při zaplnění díry elektronem vzniká díra na jiném místě a vzniká dojem, že polovodičem se pohybuje kladná díra
- **elektronová:** reálný pohyb volných elektronů → elektron zaplní kladnou díru (splyne s ní)
- **Vnitřní fotoelektrický jev** – generování páru elektron-díra vlivem světla (fotodiody)

# 21. Elektrický proud v polovodičích – vlastní vodivost

## Corinth 3D - Lifeliqe - fotodioda



[fotodioda](#)



### Poznámky k modelu

**Fotodioda typu PIN**, jejíž řez vidíme na modelu, má oproti klasickému PN přechodu mezi polovodičem typu P (v modelu červeně) a polovodičem typu N (v modelu modře) **vnitřní vrstvu I** (v modelu světle modře) s **minimálně dopovaným polovodičem**.

Na modelu vidíme, že světlo dopadající do oblasti I způsobí díky tzv. **vnitřnímu fotoelektrickému jevu vznik páru elektron-díra**. Tento proces, který nazýváme **generace páru elektron-díra**, je opačným jevem k rekombinaci. Volné elektrony pak zvyšují vodivost PN přechodu a je-li dioda zapojena do obvodu v závěrném směru, vzniklý **závěrný proud**  $I_B$  (back current) je **přímo úměrný intenzitě osvětlení**. Elektrony, které vznikají při procesu generace páru elektron-díra, se pohybují směrem ke katodě, kladné díry směrem k anodě.

Tato **lineární závislost proudu na osvětlení** je pak využívána v praxi při konstrukci fotodetektorů v **luxmetrech** (přístroj měřící osvětlení), **expozimetrech** (ve fotoaparátech) nebo v automatizaci jako členy **optických bran**.

V domácnosti najdeme fotodiodu v **automatických spínačích světla** závislých na osvětlení, nebo jako **přijímací diodu**, která je součástí televizoru, CD přehrávače či jiné **domácí elektroniky**, kde reaguje na IČ světlo vysílané diodou dálkového ovladače přístroje. Fotodiody uspořádané do tzv. **polí**, ve kterých jsou uspořádány stovky až tisíce těchto prvků, jsou např. **součástí CCD snímačů** v digitálních fotoaparátech nebo kamerách.

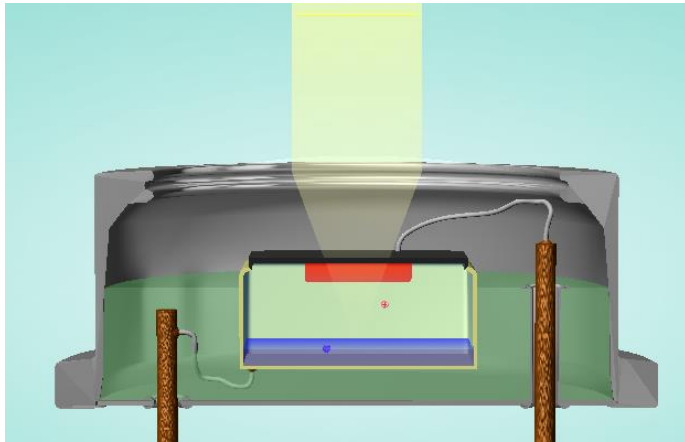


# 21. Elektrický proud v polovodičích – vlastní vodivost

## Corinth 3D - Lifelique - fotodioda



[fotodioda](#)



### Teorie

V **propustném směru** se fotodioda, která není osvětlena, chová jako **klasická křemíková dioda**. Toto zapojení nemá ale v zásadě **žádné využití**. V **závěrném směru** může fotodioda pracovat buď ve **fotovodivostním režimu** (stejně jako fotorezistor), nebo ve **fotovoltaickém**, kdy se chová jako **zdroj napětí**. Této vlastnosti využívají např. fotovoltaické (solární) články.

Světlo dopadající do oblasti PN přechodu může mít různou vlnovou délku. Energie fotonů světla musí být dostatečně velká, aby došlo k **excitaci elektronů z valenčního pásu do vodivostního**.

Pro oblast UV, viditelného světla a IČ oblasti se používají křemíkové diody (190-1100 nm). Pro větší vlnové délky lze použít germaniové diody (400-1700 nm), které mají pomalejší odezvu na změnu osvětlení nebo rychlejší InGa As diody (800-2600 nm).

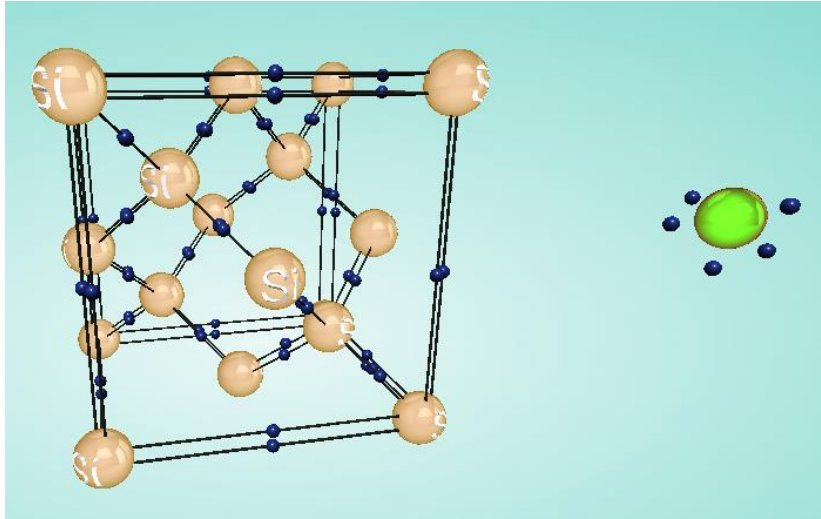
**Lavinová dioda**, pracující jako fotodetektor s vysokou citlivostí, našla využití v astronomii, spektroskopii, pozitronové emisní tomografii nebo v detektorech částic (CERN).

**LED dioda** (light-emitting diode) pracuje opačně než fotodioda. Napětí přivedené v propustném směru na vysoce dotovaný PN přechod způsobí **rekombinaci velkého počtu volných elektronů a kladných děr v ochuzené oblasti**, která je široká jen několik mikrometrů. Při rekombinaci dochází k přeskoku elektronů z vyšších hladin na nižší a k vyzáření fotonů – světla určité vlnové délky. LED diody dnes nahrazují klasické zdroje světla (žárovky, zářivky), protože mají při stejné svítivosti mnohem menší spotřebu elektrické energie.

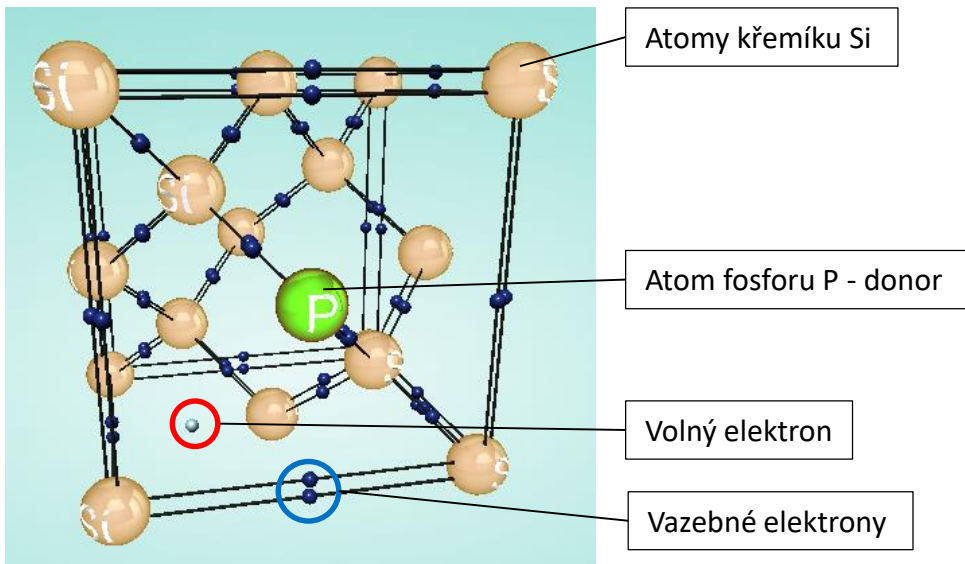
**Laserová dioda** pracuje na podobném principu jako dioda LED. Konstrukčně je upravena tak, aby **emitované světlo** bylo téměř **monochromatické a koherentní**, čímž se blíží vlastnostem klasického laserového světla. První laserová dioda byla vyrobena v laboratořích už v roce 1962. Laserová dioda má široké využití, od laserových ukazovátek, čteček čárových kódů, laserových tiskáren, CD-ROM a DVD-ROM mechanik, až po optické vlnovody v telekomunikacích nebo holografii. Diody s vysokým výkonem se používají v průmyslu k řezání nebo svařování kovů, ale také v lékařství jako chirurgický nástroj nebo v dentální medicíně místo klasických zubních vrtaček.

# 22. Elektrický proud v polovodičích – příměsové polovodiče

## Polovodič typu N



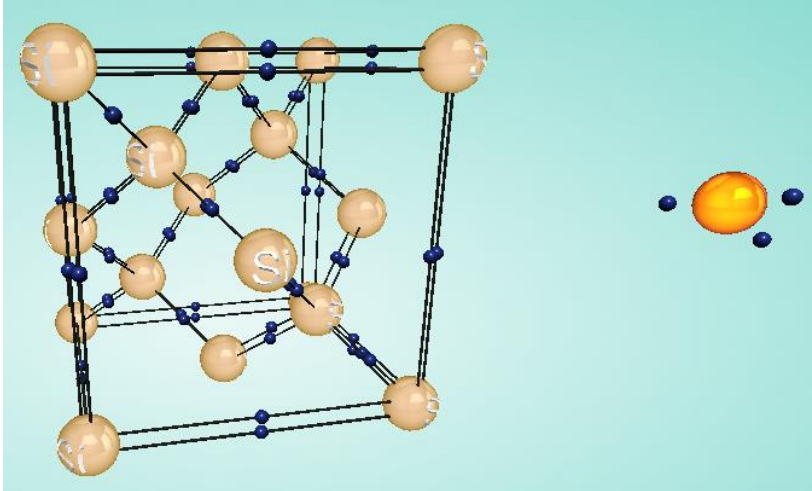
- **negativní vodivost**, převaha elektronů
- do struktury Si (resp. prvků skupiny IV.A) zabudujeme atomy prvku z V.A skupiny (např. P, As, Sb, Bi)
- prvek z V.A skupiny nazýváme **donor** (dárce)  
→ má **více elektronů než Si**
- **Majoritní** (většinová) **elektronová vodivost**
- Minoritní (menšinová) děrová vodivost



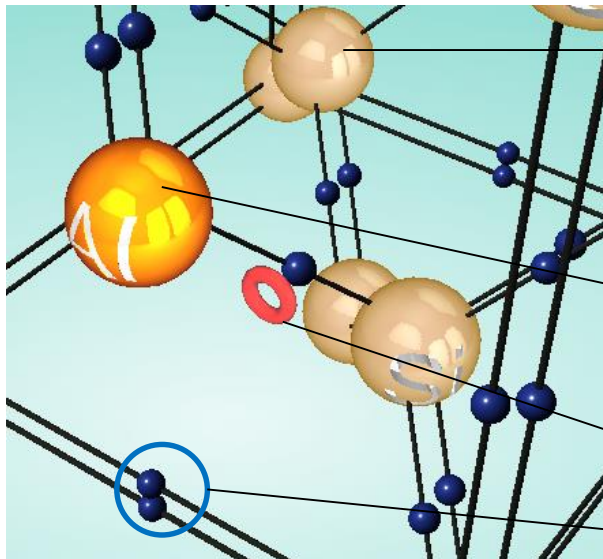
Monokrystal Si

# 22. Elektrický proud v polovodičích – příměsově polovodiče

## Polovodič typu P



- **pozitivní vodivost**, převaha kladných děr
- do struktury Si (resp. prvků skupiny IV.A) zabudujeme atomy prvku z III.A skupiny (např. Al, Ga, In)
- prvek ze III.A skupiny nazýváme **akceptor** (dárce) → má **méně elektronů než Si**
- **Majoritní** (většinová) **děrová vodivost**
- Minoritní (menšinová) děrová vodivost



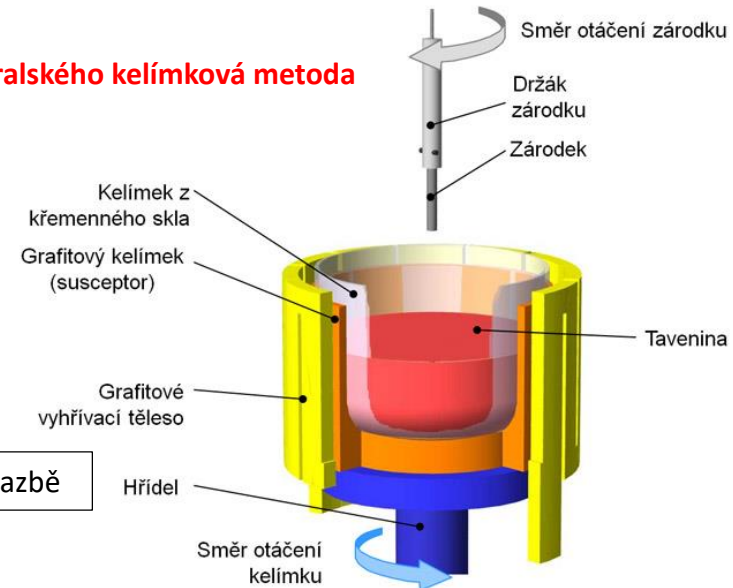
Atomy křemíku Si

Atom hliníku Al - akceptor

Kladná díra = chybějící elektron ve vazbě

Vazebné elektrony

## Czochralského kelímková metoda



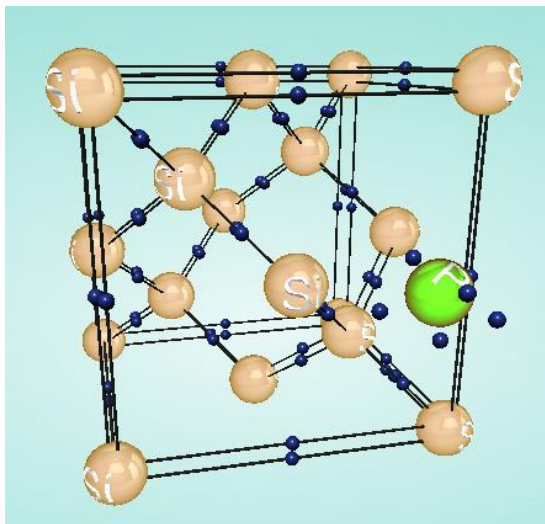


# 22. Elektrický proud v polovodičích – příměsové polovodiče

## Corinth 3D - Lifelique – Příměs v polovodiči



### [Příměs v polovodiči](#)



### Poznámky k modelu

**Příměsové polovodiče** vznikají zavedením malého množství cizích **příměsových atomů** (nesprávně nazývaných nečistotami) **do struktury polovodiče s vlastní vodivostí** (např. křemík, germanium). Tím dochází ke změně elektrické vodivosti polovodiče. Poměr počtu příměsových atomů ku počtu atomů vlastního polovodiče je přibližně  $1 : 10^7$ .

### Zajímavosti

Pro výrobu polovodičů se nejčastěji používají **monokrystaly křemíku nebo germania**, které se liší od křemíku v přírodě vyskytuje velmi vzácně.

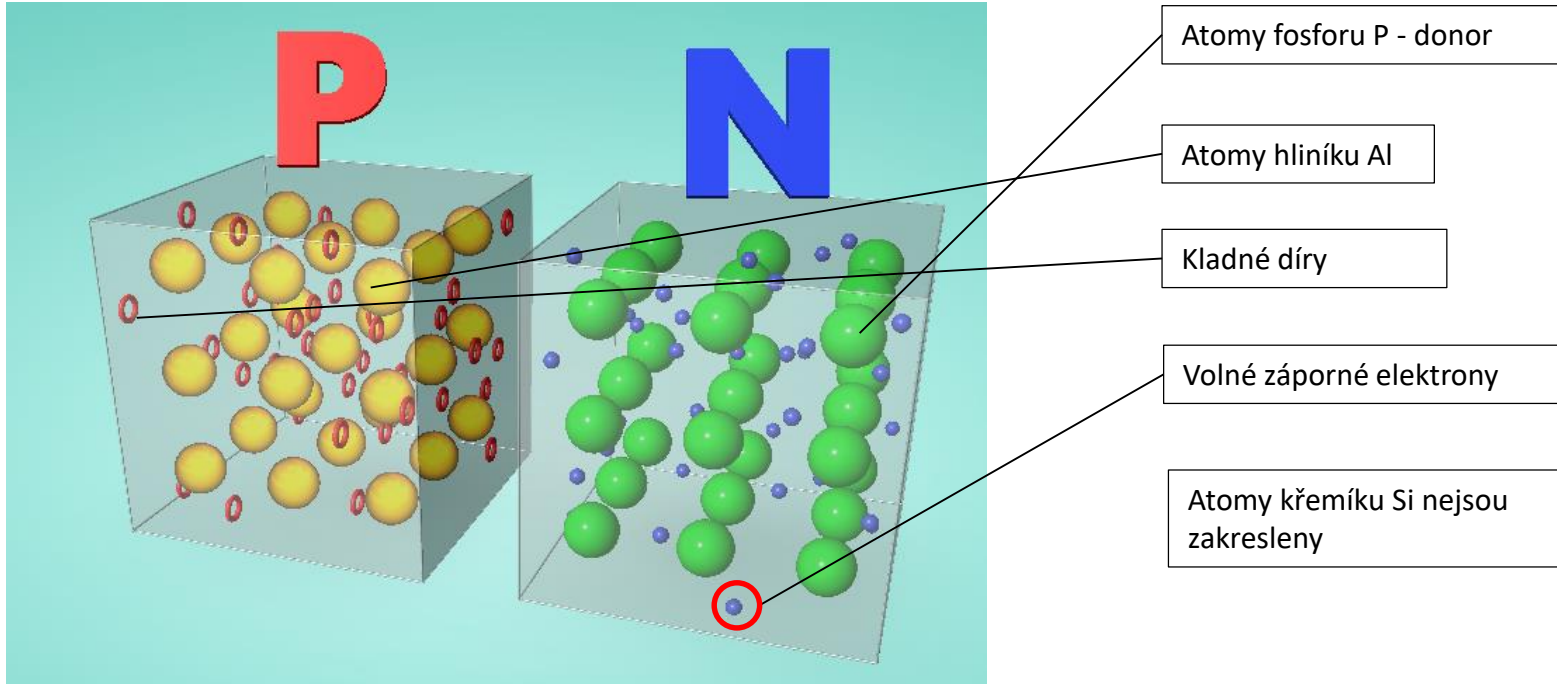
Křemík je druhým nejrozšířenějším prvkem na Zemi (po kyslíku), který s podílem 26 % tvoří součást většiny hornin a minerálů. Krystalický křemík je málo reaktivní, nerozpustný v kyselinách, rozpustný v zásadách.

**Výroba čistého monokrystalu křemíku** spočívá v několika krocích. Nejprve se vytvoří **čisté křemíkové jádro**, kolem kterého postupně narůstá **válcový ingot polykrystalického křemíku** o průměru až 20 cm. Čistota tohoto ingotu je tak vysoká (jeden atom příměsi na  $10^6$  atomů křemíku), že dostačuje pro většinu aplikací.

Polykrystalický křemík se následně převede na monokrystalický, nejčastěji tzv. **Czochralského kelímkovou metodou**, postupným tažením zárodečného krystalu z taveniny. Vzniklý monokrystal se dále brousí na požadovaný průměr, řeže na plátky diamantovou pilou, které se opět brousí a dále čistí a na závěr se leští. Výsledkem je Si deska (silicon wafer).

# 23. Elektrický proud v polovodičích – PN přechod

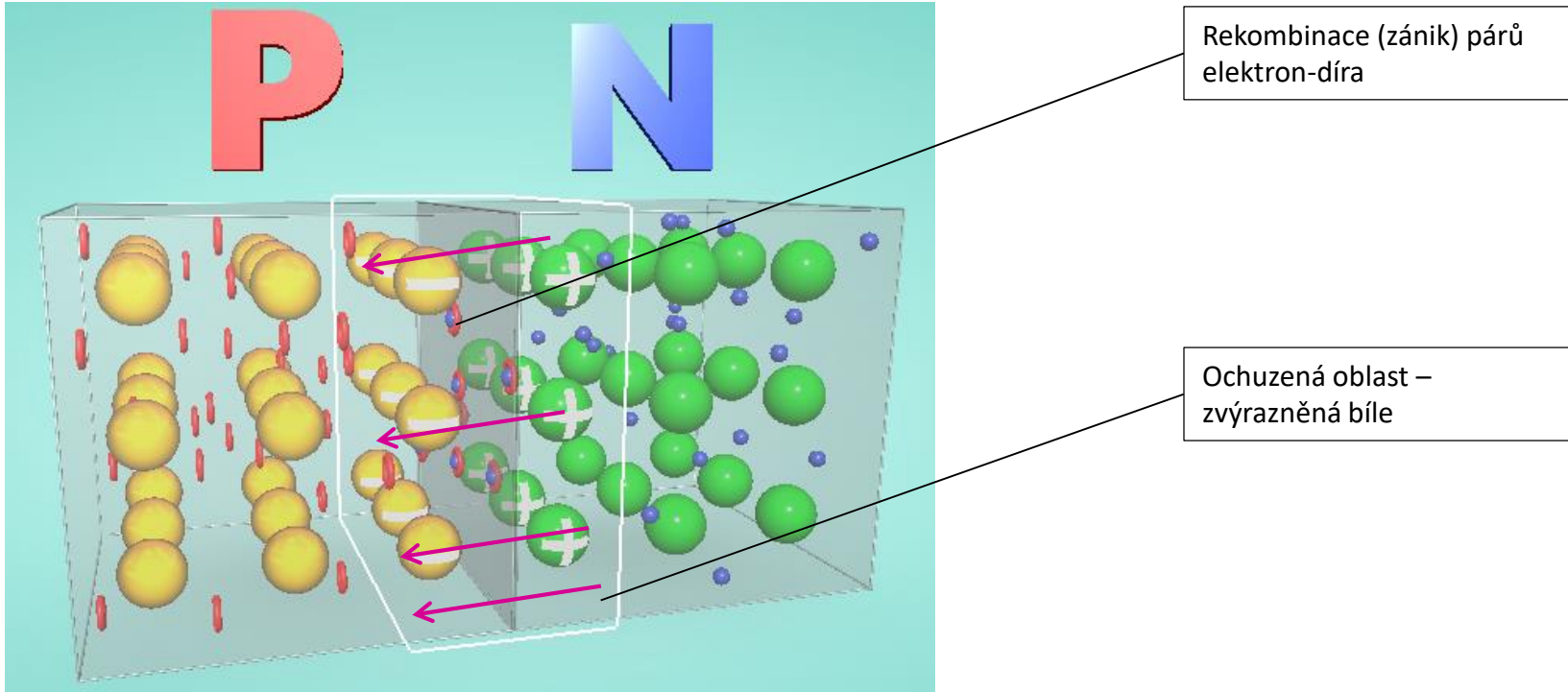
## PN přechod - vznik



- PN přechod vzniká na rozhraní polovodiče typu P a polovodiče typu N
- Po jejich spojení jsou **kladné díry** přitahovány směrem k **polovodiči N** a **volné elektrony** naopak migrují do **polovodiče P**
- Vzniká **difúzní proud**, při kterém dochází k **rekombinaci párů elektron-díra**
- Hradlová vrstva (PN přechod) má tloušťku cca 1  $\mu\text{m}$

# 23. Elektrický proud v polovodičích – PN přechod

## PN přechod – rekombinace

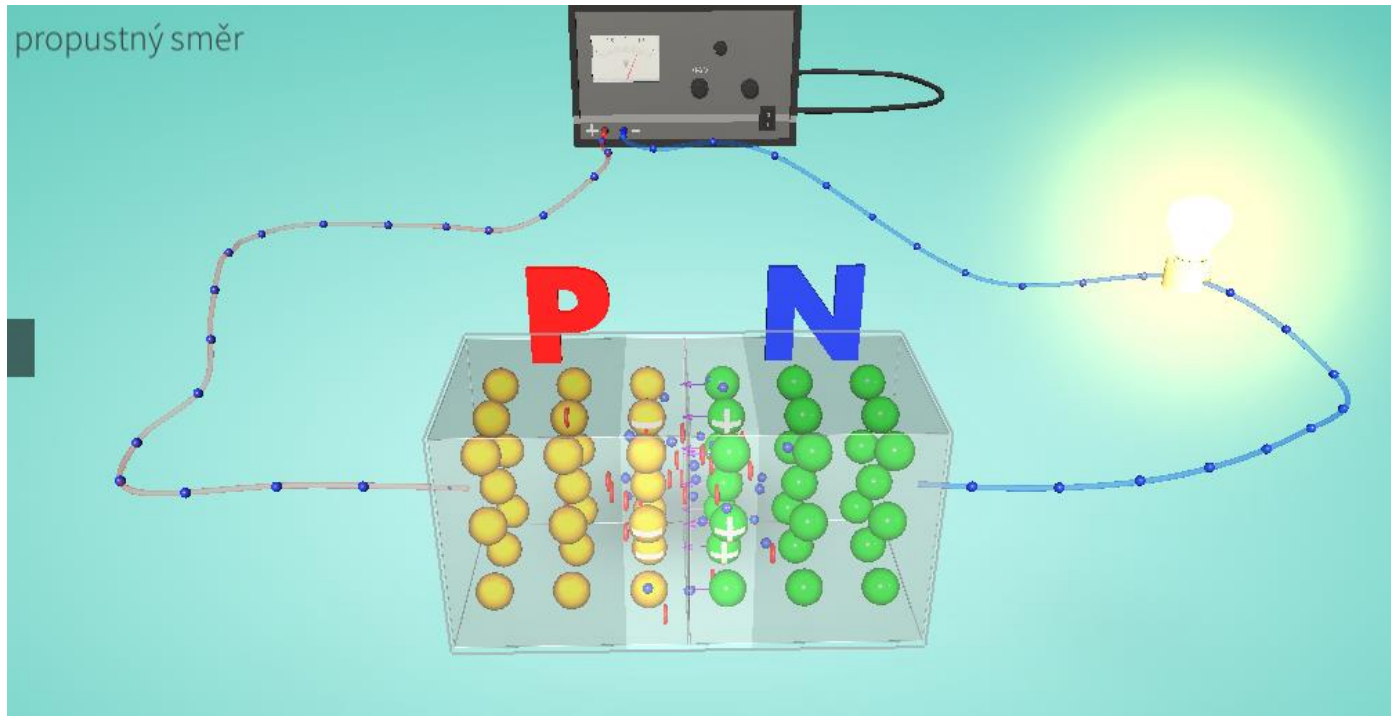


## Ochuzená oblast

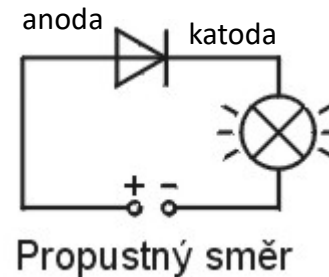
- vzniká po rekombinaci na rozhraní polovodiče P a N
- je to **oblast bez volných nosičů náboje** (kladných děr a volných elektronů)
- směr elektrické intenzity této oblasti má směr z N do P (**fialové šipky**)
- PN přechod využívá dioda (1) nebo tranzistor (2)

# 23. Elektrický proud v polovodičích – PN přechod

## PN přechod – propustný směr



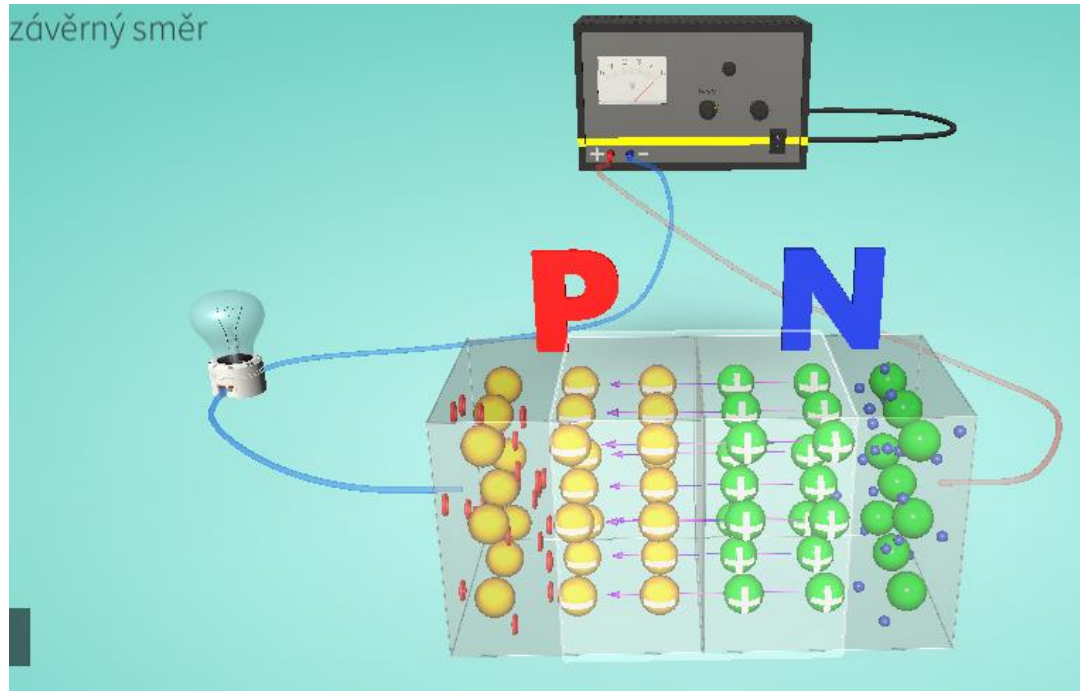
- Na polovodič typu P je připojen + pól ze zdroje, na N – pól zdroje
- PN přechod se zúží
- Obvodem **prochází** proud



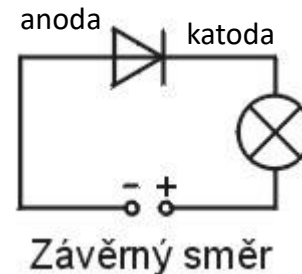


# 23. Elektrický proud v polovodičích – PN přechod

## PN přechod – závěrný směr



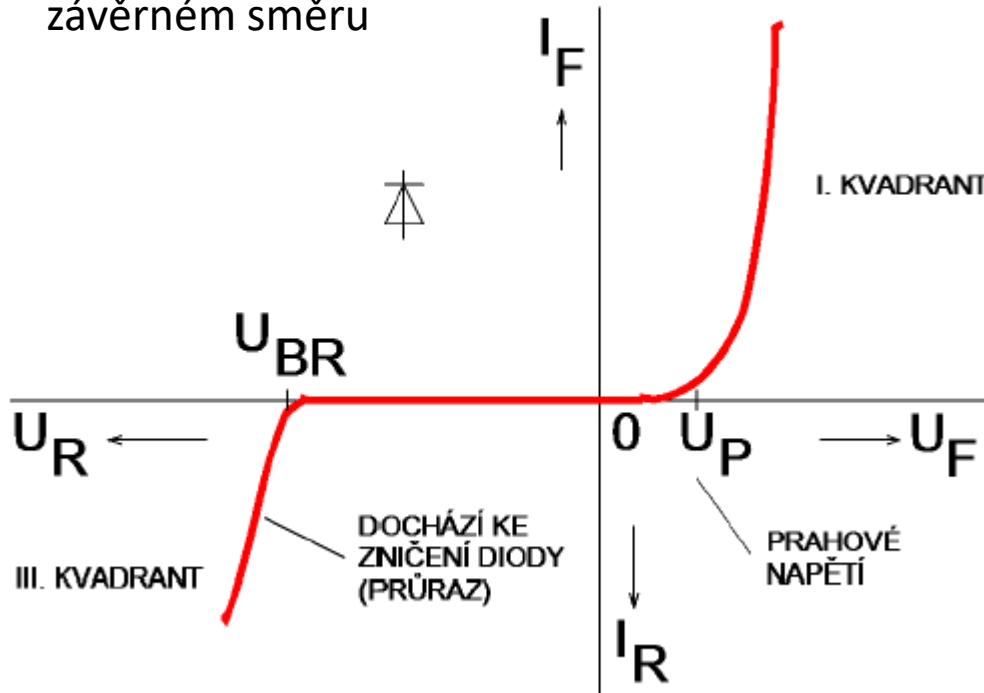
- Na polovodič typu P je připojen – pól ze zdroje, na N + pól zdroje
- PN přechod se rozšíří
- Obvodem **neprochází** proud
- **Diodový jev** – závislost vodivosti diody na polaritě přiloženého napětí



# 23. Elektrický proud v polovodičích – usměrňovací dioda

## VA charakteristika usměrňovací diody

- Volt-ampérová charakteristika diody je graf závislosti proudu na napětí v propustném a závěrném směru

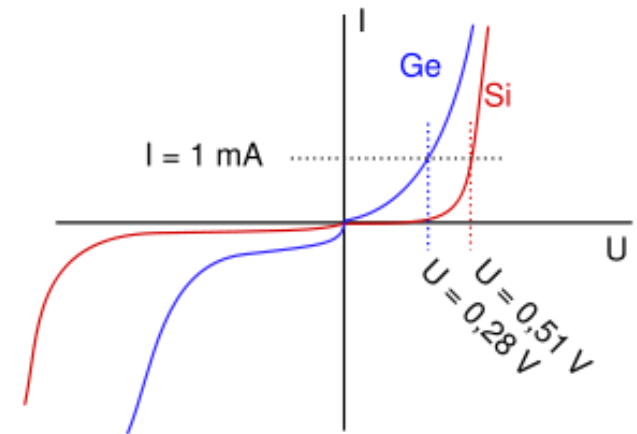


### I. kvadrant – propustný směr

Velký **propustný proud**  $I_F$  (forward current) nezačne obvodem protékat okamžitě, ale až po překročení určité hodnoty napětí (na obr. je to cca 0,57 V), kterou nazýváme **prahové napětí**  $U_{F0}(U_P)$ . Dioda tak plní funkci sepnutého spínače.

### III. kvadrant – závěrný směr

$U_{BR}$  – **průrazné napětí** → po jeho překročení dochází u normální diody k jejímu poškození



VA charakteristika Ge a Si diody

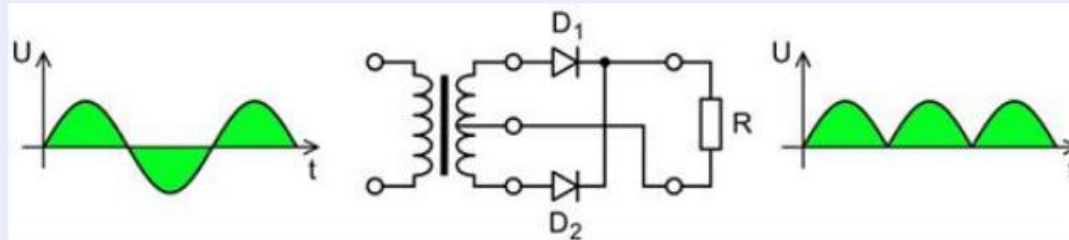
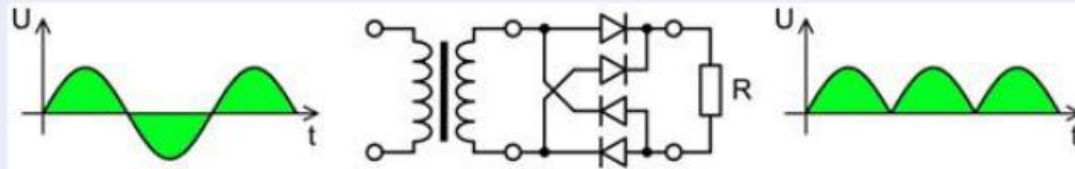
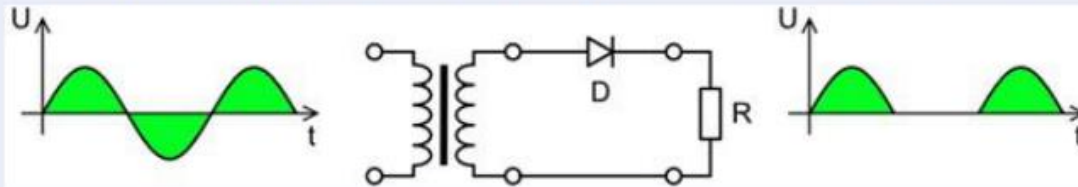
# 23. Elektrický proud v polovodičích – usměrňovač

## Usměrňovač střídavého proudu

- Mění střídavý proud (sinusový průběh) na stejnosměrný (konstantní průběh)
- a) jednocestný usměrňovač – **pulzní napětí a tepavý proud** na výstupu
- b) Graetzovo zapojení se 4 diodami – usměrnění obou půlperiod
- c) dvoucestný usměrňovač – usměrnění obou půlperiod

### Neřízené usměrňovače

Výstupní napětí usměrňovačů s diodami nelze řídit.

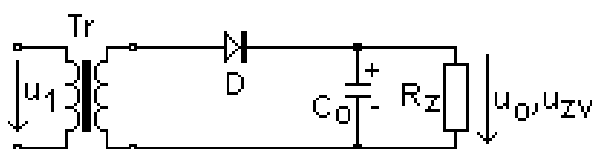


# 23. Elektrický proud v polovodičích – usměrňovač

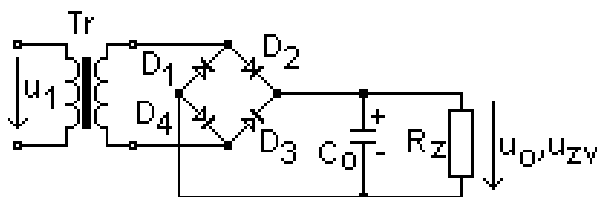
## Usměrňovač střídavého proudu

- Kondenzátor zabraňuje poklesu napětí → místo pulzního napětí je na výstupu pilovité napětí
- Při **větší kapacitě kondenzátoru** je pokles menší a tím je **menší zvlnění** křivky
- Lze dosáhnout téměř konstantní závislosti (jako u stejnosměrného proudu)

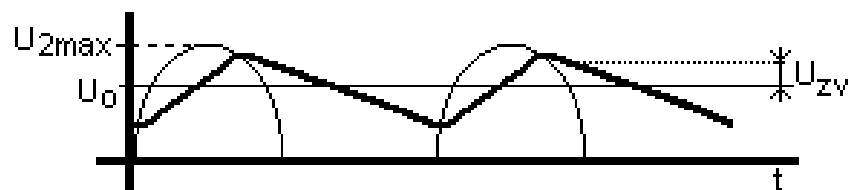
### Srovnání zvlnění na jednotlivých typech usměrňovačů



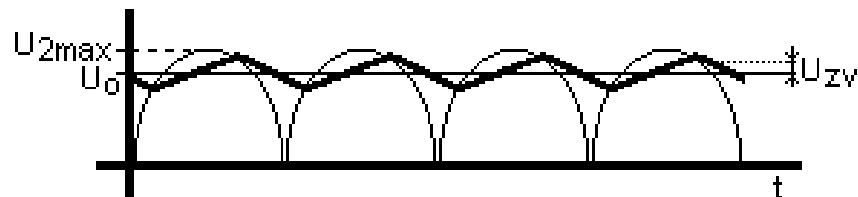
Jednocestný usměrňovač



Dvoucestný usměrňovač



Průběhy napětí j.u. se sběracím kondenzátorem



Průběhy napětí dv.usm. se sběracím kondenzátorem

Poznámka:  
Pilovitý průběh se  
PROKLÁDÁ  
1. harmonickou  
(sinusoidou) !!!  
Není zakresleno !!!  
 $U_{zv}$  ...je maximální  
amplituda  
1.harmonické !!!



# 23. Elektrický proud v polovodičích – Zenerova dioda

## VA charakteristika Zenerovy diody

- **Zenerova dioda** se používá ke stabilizaci napětí
- používá se výhradně v **závěrném směru**
- po překročení závěrného napětí dochází k **nedestruktivnímu průrazu PN přechodu**
- **odpor diody klesne z  $M\Omega$  na  $\Omega$**  → při konstantním napětí  $U_Z$  se zvyšuje proud

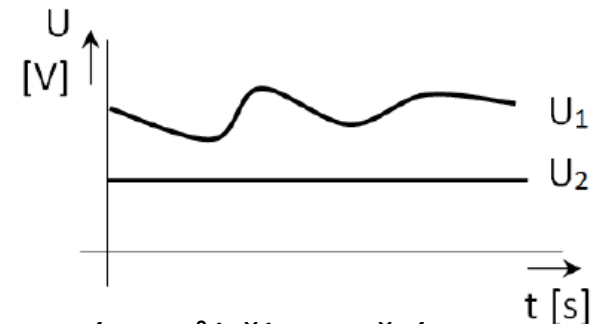
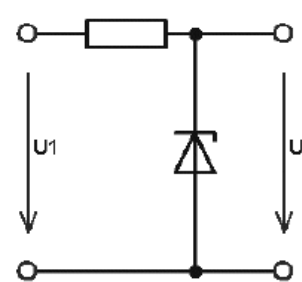
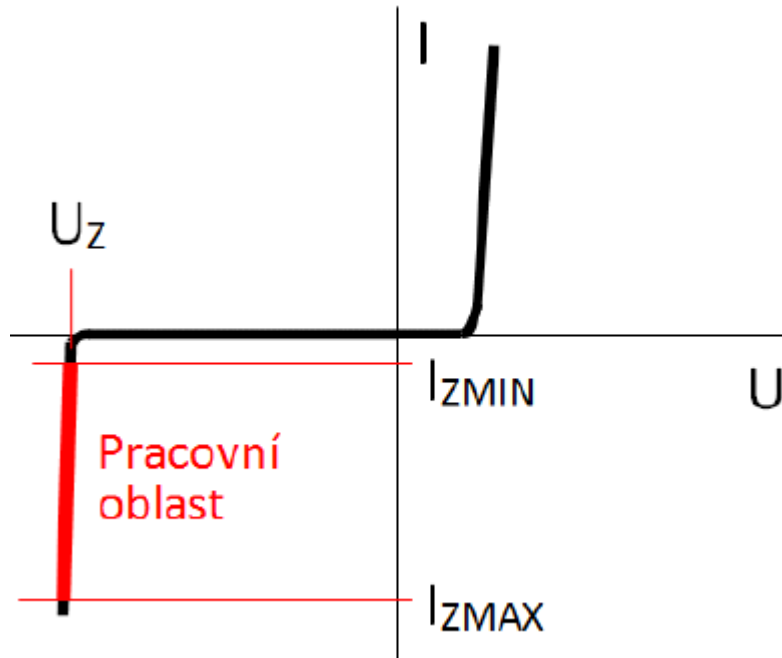
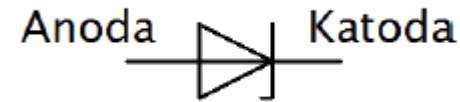
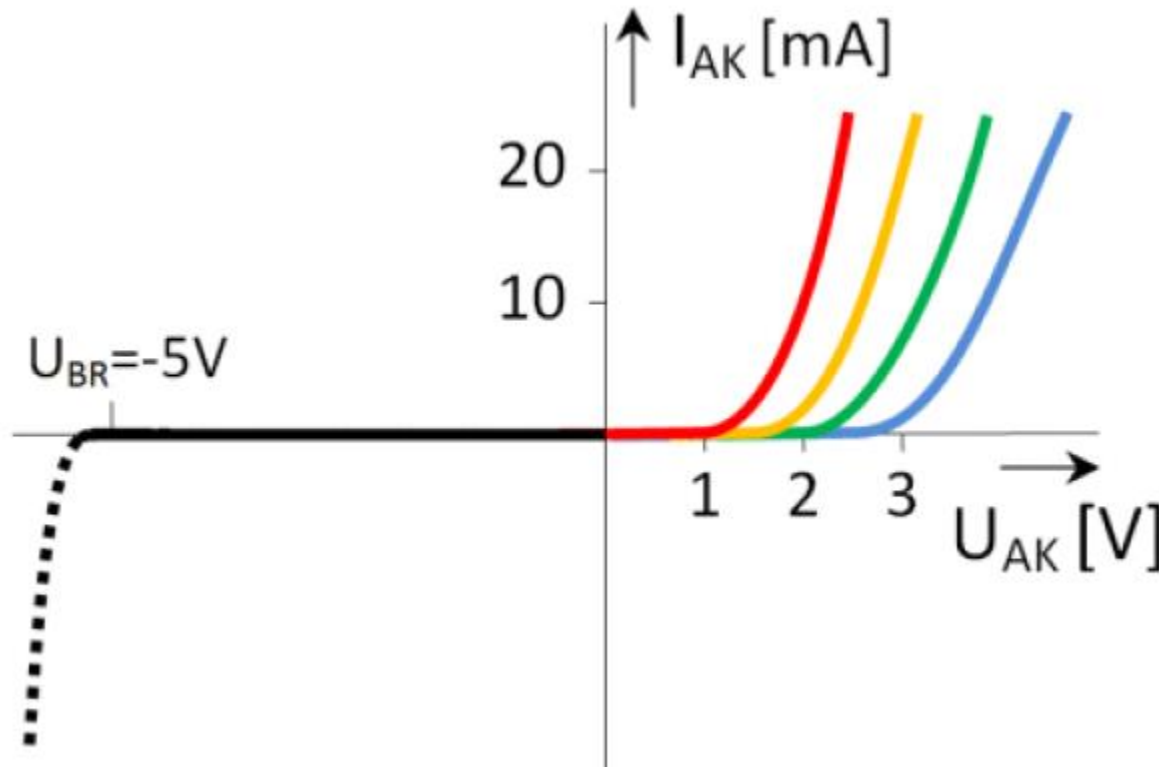


Schéma zapojení a průběh napětí

# 23. Elektrický proud v polovodičích – LED dioda

## VA charakteristika LED diody

- **LED diody** se používají k osvětlení, jako barevné kontrolky, ve světlometech automobilů
- používají se výhradně v **propustném směru**
- velmi malé průrazné napětí cca  $U_{BR} = 5 \text{ V}$

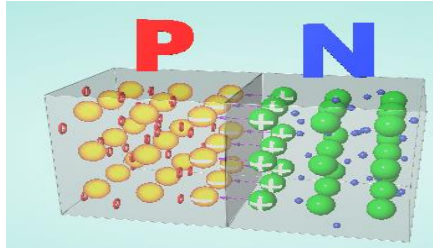


# 23. Elektrický proud v polovodičích – PN přechod

## Corinth 3D - Lifeliqe – PN přechod



### [PN přechod](#)



### Poznámky k modelu

**PN přechod** vzniká na **rozhraní polovodiče typu P a polovodiče typu N**. Pro jednoduchost si vznik přechodu můžeme představit, jako spojení krychle s vodivostí P s krychlí s vodivostí N.

**V krychli označené P** jsou **dominantními** (majoritními) nosiči **kladné díry** (červené kroužky), které se nachází **mezi záporně nabitými atomy akceptoru** (ve scéně jsou pro zjednodušení vynechány atomy křemíku a jsou zde zobrazeny pouze atomy akceptoru žlutě a donoru zeleně).

**V krychli označené N** jsou **dominantní volné elektrony** (světle modré kuličky), které se pohybují **mezi kladně nabitými atomy donoru**.

Po spojení obou částí **volné elektrony difundují** z krychle **N** přes **rovinu přechodu** do krychle **P**, kde je nedostatek volných elektronů. Podobně z krychle **P** **difundují** přes rovinu přechodu **do polovodiče typu N kladné díry**.

Při setkání záporného elektronu s kladnou dírou na rozhraní obou typů polovodičů dojde k tzv. **rekombinaci (zániku) páru elektron-díra** a vytvoření **ochuzené oblasti bez volných nosičů náboje**. **Směr elektrické intenzity této oblasti** je vyznačen v modelu **fialovými šipkami** a směřuje od kladných iontů donoru v krychli N k záporným iontům akceptoru v krychli P.

### Zajímavosti

Pohyby **majoritních nosičů** (volných elektronů z oblasti N do oblasti P a kladných děr z oblasti P do oblasti N) vytváří tzv. **difuzní proud**. **Prostorový náboj**, který vzniká v důsledku difuze v oblasti roviny přechodu mezi polovodičem P a polovodičem N, **vytváří** v oblasti PN přechodu **rozdíl potenciálů** (napětí), který **brání další difuzi** elektronů i děr.

Kromě majoritních nosičů náboje dochází **v oblasti PN přechodu** i k **pohybu minoritních nosičů náboje** z obou oblastí do druhé. Menšinové elektrony se pohybují směrem do oblasti N, na jejímž rozhraní je kladný náboj donorů a stejně tak menšinové kladné díry se pohybují z oblasti N do oblasti P, kde jsou záporné ionty akceptoru. Proud těchto minoritních nabitých částic označujeme jako **driftový proud**.

V PN přechodu, který není připojen na vnější zdroj napětí, jsou pak oba proudy, difuzní i driftový v rovnováze, a výsledný proud přes rovinu přechodu je nulový.

PN přechod se vytváří na vyleštěné straně Si desky (výroba viz model Příměs v polovodiči), která je vytvořena jako polovodič typu P nebo N. Do daného typu polovodiče se potom pomocí procesu **epitaxe, iontové implantace** nebo **termické difuze** vnesou v dostatečné koncentraci příměsi opačného typu. Např. při iontové implantaci se ionty akceptorů nebo donorů urychlují elektrickým polem a pak se nastřelují do určité hloubky Si desky. Při termické difuzi se při teplotách okolo 1000 °C do Si desky vnášejí příměsi ve formě prvků (B, P, As) nebo oxidů ( $B_2O_3$ ,  $P_2O_5$ ). V obou výše uvedených případech se příměsi vnášejí do přesně stanovené hloubky desky a s přesně stanovenou koncentrací.

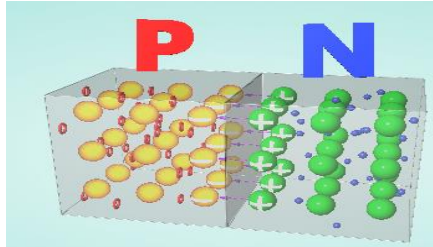
Polovodičová součástka s **jedním PN přechodem** je např. **dioda**, **dva PN přechody** má např. **tranzistor**. PN přechod mají např. i **LED diody, solární články** nebo **integrované obvody**.

# 23. Elektrický proud v polovodičích – PN přechod – propustný směr

## Corinth 3D - Lifeliqe – PN přechod – propustný směr



[PN přechod - propustný směr](#)



### Poznámky k modelu

Nejjednodušší polovodičovou součástí, která má jeden PN přechod je **dioda**. U diody rozeznáváme **anodu** a **katodu**. Je-li dioda (PN přechod) zapojena **v propustném směru**, je **kladný pól zdroje připojen na anodu** (polovodič typu P) a záporný pól zdroje na katodu (polovodič typu N).

Po přiložení napětí na PN přechod můžeme v modelu pozorovat **zmenšení šířky přechodu**, které je vyznačeno zmenšením délky fialových šipek znázorňujících intenzitu elektrického pole přechodu, a snížením počtu iontů akceptoru a donoru tvořících prostorový náboj.

Elektrony (modré kuličky) se pohybují z oblasti N do oblasti P a dále se pohybují elektrickým obvodem. Kladné díry (červené kroužky) se pohybují z oblasti P do oblasti N.

Velký **propustný proud**  $I_F$  (forward current) nezačne obvodem protékat okamžitě, ale až po překročení určité hodnoty napětí (v animaci je to 0,6 V), kterou nazýváme **prahové napětí**  $U_{F0}$ . Dioda tak plní funkci sepnutého spínače.

### Zajímavosti

Zapojíme-li diodu v propustném směru, dojde k **zúžení ochuzené oblasti**, a majoritní nosiče náboje mohou opět ve velkém množství procházet **potenciálovou bariérou** PN přechodu. **Difuzní proud** je tedy významně větší než driftový a jejich rozdíl je výsledný **propustný proud**  $I_F$  (forward current).

Velikost **driftového proudu**, který tvoří minoritní nosiče, není vnějším napětím zdroje nijak ovlivněna.

Schopnost diody vést elektrický proud pouze v propustném směru se využívá při **usměrnění střídavého proudu** pomocí **diodového usměrňovače**.

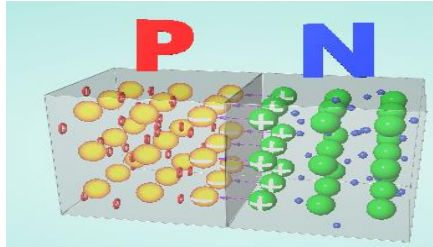


# 23. Elektrický proud v polovodičích – PN přechod – závěrný směr

## Corinth 3D - Lifeliqe – PN přechod – závěrný směr



[PN přechod - závěrný směr](#)



### Zajímavosti

Zapojíme-li diodu **v závěrném směru**, dojde k **rozšíření ochuzené zóny**, díky čemu majoritní nosiče náboje nemohou procházet **potenciálovou bariérou** PN přechodu. **Difuzní proud** je tedy významně menší než driftový, a jejich rozdíl je velmi malý **závěrný proud**  $I_B$  (back current).

Velikost **driftového proudu**, který tvoří minoritní nosiče, není vnějším napětím zdroje nijak ovlivněna.

**Zenerova dioda** zapojená v závěrném směru se využívá při **stabilizaci napětí ve stabilizovaných napěťových zdrojích**. Využívá speciální konstrukce, která umožňuje opakovaným nedestruktivním průrazům v závěrném směru, a zajišťuje víceméně konstantní hodnotu výstupního napětí na svorkách zdroje při velkých změnách odebíraného proudu. V jiných typech obvodů se používá jako **regulační napěťový prvek**.

### Poznámky k modelu

Nejjednodušší polovodičovou součástkou, která má jeden PN přechod je **dioda**. U diody rozeznáváme **anodu** a **katodu**. Je-li dioda zapojena **v závěrném směru**, je **kladný pól zdroje připojen na katodu** (polovodič typu N) a záporný pól zdroje na anodu (polovodič typu P).

Po přiložení napětí na PN přechod můžeme v modelu pozorovat **zvětšení šířky přechodu**, které je vyznačeno zvětšením délky fialových šipek znázorňujících intenzitu elektrického pole přechodu, a zvýšením počtu iontů akceptoru a donoru tvořících prostorový náboj. V modelu je tento nárůst znázorněn zvýrazněním polarity atomů donoru a akceptoru ve druhé řadě.

Elektrony (modré kuličky) se pohybují pouze v oblasti N od přechodu PN směrem ke kladnému pólu zdroje. Kladné díry (červené kroužky) se pohybují pouze v oblasti P od ochuzené oblasti k zápornému pólu zdroje.

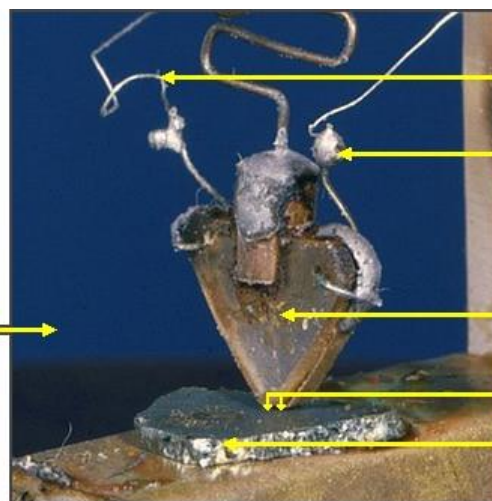
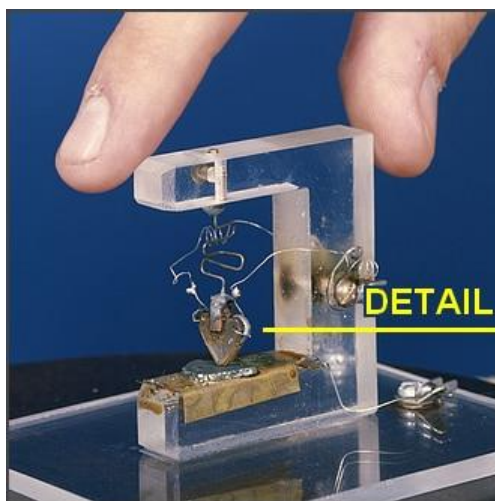
Obvodem protéká velmi malý **závěrný proud**  $I_B$  (back current), který dosahuje velikosti maximálně řádu  $\mu\text{A}$ . Napětí na diodě nesmí překročit hodnotu, kterou nazýváme **průrazné napětí**  $U_{BR}$  (reverse breakdown voltage), po jehož překročení dojde k poškození diody. Dioda zapojená v závěrném směru plní funkci rozepnutého spínače.

## 24. Elektrický proud v polovodičích – tranzistor, operační zesilovač, integrovaný obvod

### Tranzistor

Walter Brattain (1902-1987), William Shockley (1910-1989), John Bardeen (1908-1991)

– 1. tranzistor sestaven v roce 1947 – BELL laboratoře, Nobelova cena za fyziku 1956



emitor

kolektor

plastový "klín"

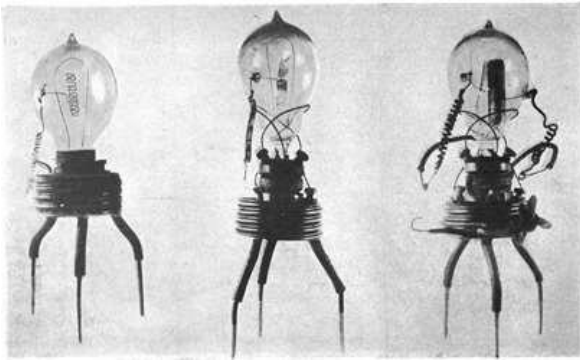
hroty

krystal germánia

# 24. Elektrický proud v polovodičích – tranzistor, operační zesilovač, integrovaný obvod

## W.B. Shockley

- polovodičová součástka se 2 PN přechody
- 3 konektory: emitor E, báze B, kolektor C



Prototypy tranzistoru (triody) vytvořené W. Shockleym

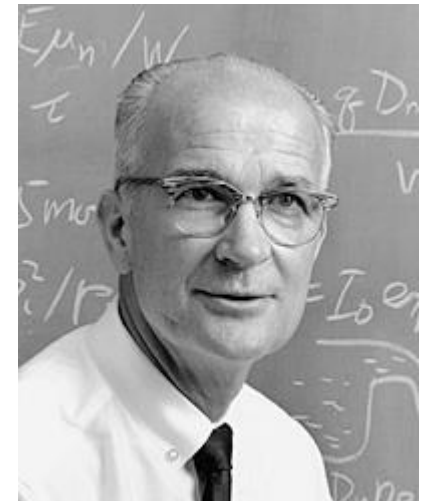


Různé typy dnešních tranzistorů

W. B. Shockley

## William Shockley (1910-1989)

- americký vědec a elektrotechnik, vystudoval Caltech, doktorát na MIT
- zakladatel první laboratoře na vývoj elektronických součástek v dnešním Silicon Valley
- průmyslovou výrobu založil na křemíku Si, podle kterého později získalo jméno celé údolí
- sám ve svých experimentech používal germanium
- spolupracoval na vývoji radaru



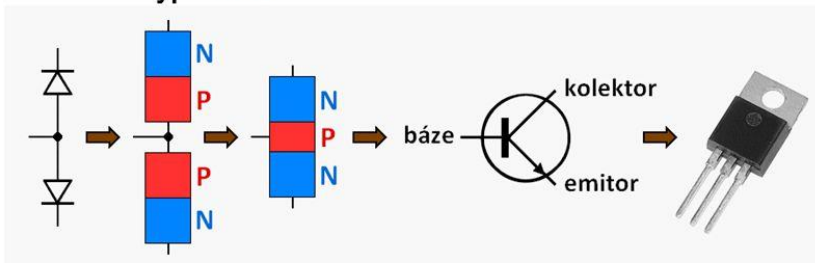
# 24. Elektrický proud v polovodičích – tranzistor, operační zesilovač, integrovaný obvod

## Tranzistory NPN a PNP

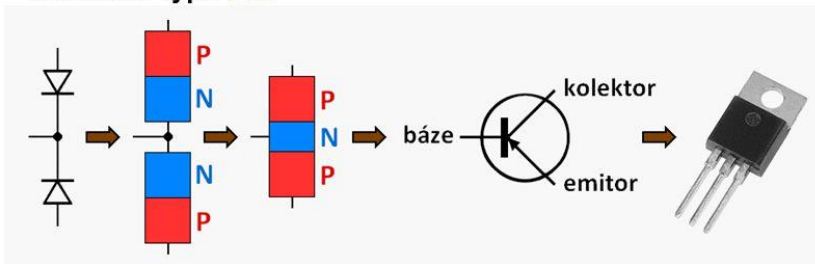
- sendvičové propojení polovodičů typu N a P
- NPN – šipka ven, PNP – šipka dovnitř jde

### Struktura tranzistoru

Tranzistor typu NPN



Tranzistor typu PNP



- elektrony se pohybují z emitoru do prostoru báze, kde malá část rekombinuje → **malý bázevý proud  $I_B$**
- většina elektronů projde do oblasti kolektoru, kde vytvoří **velký kolektorový proud  $I_C$**
- dochází tedy k zesílení kolektorového proudu → **malé vstupní napětí  $U_1$**  je zesíleno na **větší výstupní napětí  $U_2$**
- $+U_{CC}$  je napájecí napětí celého zapojení

## Tranzistorový jev

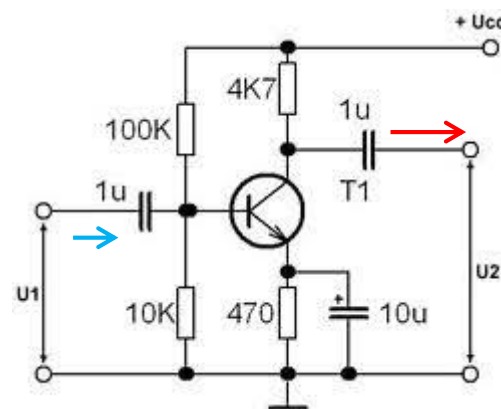
Malá změna bázevého proudu vyvolá velkou změnu kolektorového proudu.

## Kolektorový obvod

- zapojen v závěrném směru

## Bázevý obvod

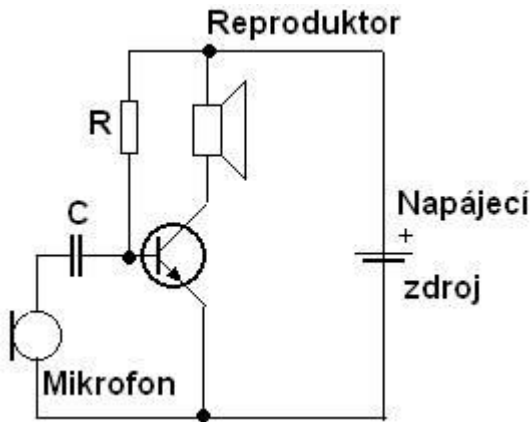
- zapojen v propustném směru



## 24. Elektrický proud v polovodičích – tranzistor, operační zesilovač, integrovaný obvod

### Tranzistor jako zesilovač

- základní činnost tranzistoru spočívá v zesílení signálu (napětí)
- plní tedy funkci jednoduchého **zesilovače**
- jsou základem všech integrovaných obvodů (IO) → procesory, paměti



### Proudový zesilovací činitel – $\beta$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \sim 10^2$$

### Zajímavosti

#### běžné tranzistory:

- slouží pro zpracování signálu ať už jako jednotlivé „diskrétní“ součástky, či součástky v **čipech** a mikročipech **integrovaných obvodů**
- jsou dnes základním prvkem spotřební i nespotební elektroniky (televize, rádia, počítače, mobilní telefony...)
- běžné tranzistory obvykle zpracovávají signál v jednotkách voltů, proud přitom bývá nejvýše v řádu miliampérů

#### výkonové tranzistory:

- jsou klíčovým prvkem používaným ve **výkonové elektronice**, například v oblasti **spínaných zdrojů** nebo **frekvenčních měničů**
- výkonová elektronika je rovněž klíčová při **realizaci moderních zdrojů světla** (úsporná žárovka, LED), moderních trakčních vozidel s asynchronními motory, **hybridních automobilů a elektromobilů, fotovoltaických a větrných elektráren**.
- současné výkonové tranzistory jsou schopny ve spínacím režimu pracovat s **napětím až v řádu kilovoltů** a s **proudy v řádu  $10^2$  až  $10^3$  A**

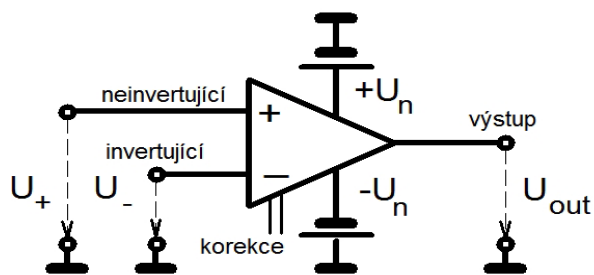
- v procesoru Intel Pentium 4 je cca 42 000 000 tranzistorů se spoji o šířce 0,18  $\mu\text{m}$



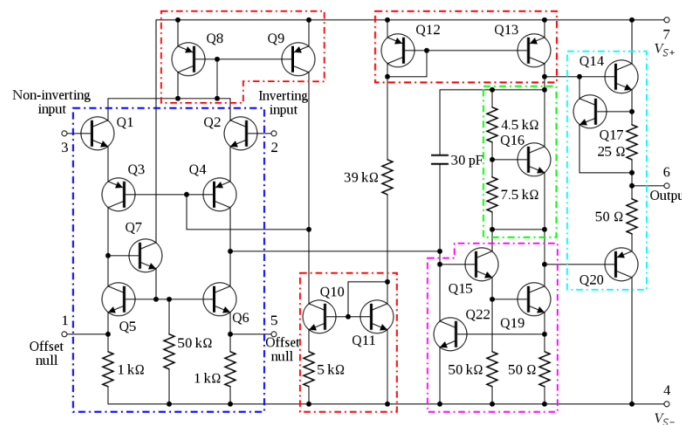
# 24. Elektrický proud v polovodičích – tranzistor, operační zesilovač, integrovaný obvod

## Operační zesilovač

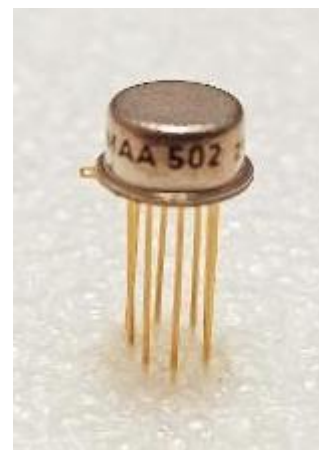
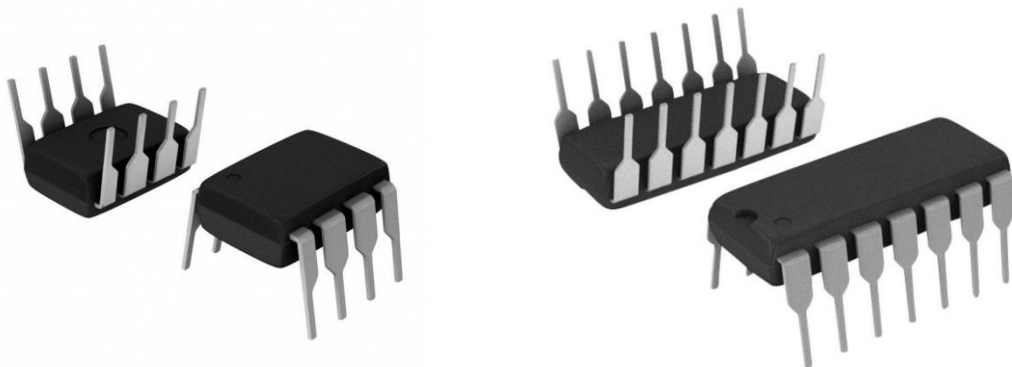
- univerzální stejnosměrný zesilovací analogový elektronický obvod
- je základem všech analogových elektronických obvodů
- složen z desítek miniaturních tranzistorů, rezistorů, kondenzátorů



schématická značka OZ s označením konektorů



Vnitřní zapojení prvků OZ

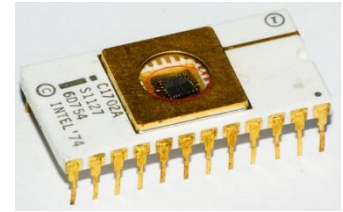




# 24. Elektrický proud v polovodičích – tranzistor, operační zesilovač, integrovaný obvod

## Integrovaný obvod alias „šváb“

- složen z desítek miniaturních tranzistorů, rezistorů, kondenzátorů, OZ
- jako celek jde o elektrický obvod, který vykonává určitou funkci
- první IO vytvořen v roce 1958 v Texas Instruments
- meze integrace součástek závisí krom jiného i na **Heisenbergových relacích neurčitosti**  
→ součástky i jejich počet na  $\text{mm}^2$  nelze zmenšovat do nekonečna



## Využití

- veškeré spotřební elektronice, ale i různá vědecká zařízení, např. na **umělých družicích**.
- televize, videa, satelitní přijímače, dálková ovládání
- rádia, CD či MP3 i MP4 přehrávače
- digitální hodinky, kalkulačky
- mobilní telefony, vysílačky, GPS přijímače
- fotoaparáty, digitální fotoaparáty
- počítače, tiskárny, monitory, PDA
- automobily, letadla a další dopravní prostředky
- lékařské, vědecké a měřicí přístroje

## Zajímavosti

**Nejmenší IO na světě:** Vědci z IBM dokázali vytvořit **nejmenší logický obvod na světě sestávající z jediné molekuly kyslíčnicku uhelnatého**. Tento obvod má rozměr menší než jedna triliontina čtverečního palce (a je tedy 260 000 x menší než obdobný obvod na křemíkové bázi).



## Nejmenší tranzistor na světě

- výzkumníci z MIT vytvořili 3D tranzistory o průměru pouhých 2,5 nanometrů
- Na jediný mikročip o velikosti nehtu lze umístit až desítky miliard těchto drobných tranzistorů