

# Polovodiče

Michal Šerý

Technické principy počítačů

# Obsah

- 1 Polovodiče**
  - Vlastnosti
  - Struktura
  - Periodická soustava prvků
  - Křemík
- 2 Přejchod PN**
  - V-A charakteristika diody
- 3 Tranzistory**
  - Bipolární tranzistor
  - Unipolární tranzistor

## TEP1

- 1) Vodiče, Izolanty, Polovodiče
- 2) Přejchod
- 3) Dioda, usměrnění, stabilizace, svítivá
- 4) Tranzistor unipolární a bipolární, klopné obvody
- 5) Zapojení zesilovač

# Polovodiče

## Definice wiki

**Polovodič** je pevná látka, jejíž elektrická vodivost závisí na vnějších nebo vnitřních podmínkách, a dá se změnou těchto podmínek snadno ovlivnit. Změna vnějších podmínek znamená dodání některého z druhů energie – nejčastěji tepelné, elektrické nebo světelné, změnu vnitřních podmínek představuje příměs jiného prvku v polovodiči. Mezi polovodiče patří prvky křemík, germanium, selen, sloučeniny arsenid galia GaAs, sulfid olovnatý PbS aj. Většina polovodičů jsou krystalické látky, existují však také polovodiče amorfnní (některá skla). Polovodiče se využívají u elektronických součástek.

<https://cs.wikipedia.org/wiki/Polovodič>

# Monokrystal

## Definice wiki

**Monokrystal** (někdy též objemový monokrystal) je makroskopický krystal se zanedbatelnými poruchami krystalové struktury.

<https://cs.wikipedia.org/wiki/Monokrystal>

# Monokrystal

## Materiály



**Obrázek:** Monokrystal křemíku

# Vodivost materiálu

## Definice wiki

**Měrná elektrická vodivost** (též **konduktivita**) je fyzikální veličina, která popisuje schopnost látky dobře vést elektrický proud. Látka, která je dobrým vodičem, má vysokou hodnotu konduktivity, špatně vodící látky mají nízkou hodnotu konduktivity. Konduktivita závisí na teplotě (viz též teplotní součinitel elektrického odporu), zejména u polovodičů je tato závislost velmi významná.

Pro připomenutí vztah mezi měrnou vodivostí a měrným odporem materiálu.

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

<https://cs.wikipedia.org/wiki/Konduktivita>

# Vodivost materiálu

## U polovodičů

U polovodičů rozlišujeme dva typy vodivosti a to **vlastní** a **nevlastní** vodivost.

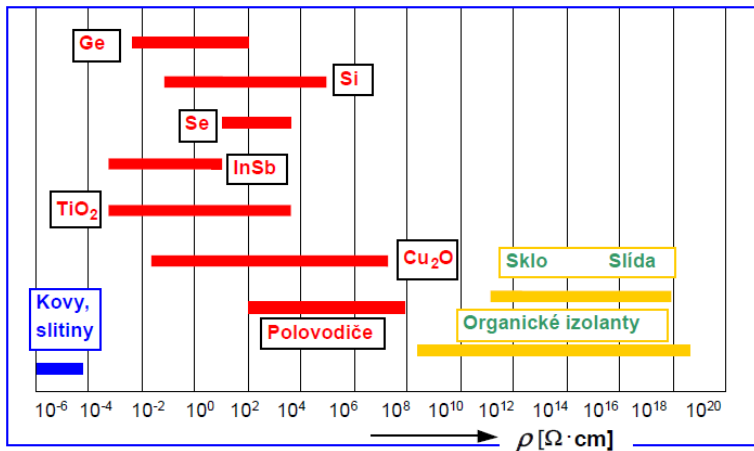
**Vlastní** vodivost je způsobena existencí volných nábojů, které vznikají například na poruchách krystalové struktury materiálu.

**Nevlastní** vodivost (též příměsová) je způsobena „v“olnými náboji vzniklými nahrazením některých atomů ve výchozím materiálu atomy jiných prvků s jiným počtem valenčních elektronů.



# Měrný odpor

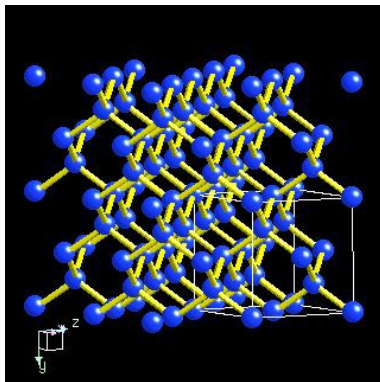
## Materiály



Obrázek: Měrný odpor

# Křemík

## Struktura 3D

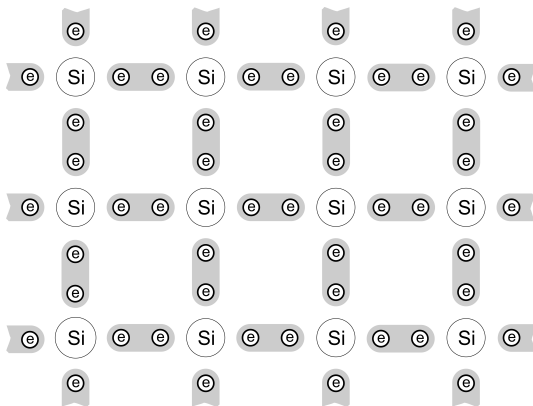


**Obrázek:** 3D model

[https://www.webelements.com/silicon/crystal\\_structure.html](https://www.webelements.com/silicon/crystal_structure.html)

# Křemík

## Struktura



**Obrázek:** 2D model

$R_2O$ RH		RO RH <sub>2</sub>		$R_2O_3$ RH <sub>3</sub>		RO <sub>2</sub> RH <sub>4</sub>		$R_2O_5$ RH <sub>5</sub>		RO <sub>3</sub> H <sub>2</sub> R		$R_2O_7$ HR		18																					
1	1											18																							
I. A														VI. A																					
1	1,0079 <b>1 H</b> 1,008 Vodík	2											13	14	15	16	17	4,00 <b>2 He</b>																	
		II. A											III. A	IV. A	V. A	VI. A	VII. A	Helium																	
2	6,94 <b>3 Li</b> 0,97 Litium	4	9,01 <b>4 Be</b> 1,50 Berylium	alkalické kovy		kovy alkalických zemin		přechodné kovy		kovy		polovodiče		nekovy		halogeny		vzácné plyny		10,81 <b>5 B</b> 2,00 Bor	12,01 <b>6 C</b> 2,50 Uhlík	14,01 <b>7 N</b> 1,00 Dusík	16,00 <b>8 O</b> 3,50 Kyslík	19,00 <b>9 F</b> 4,00 Fluor	20,18 <b>10 Ne</b>										
3	22,99 <b>11 Na</b> 1,00 Sodík	12	24,31 <b>12 Mg</b> 1,20 Hořčík	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	26,98 <b>13 Al</b> 1,50 Hliník	28,09 <b>14 Si</b> 1,70 Křemík	30,97 <b>15 P</b> 2,10 Fosfor	32,06 <b>16 S</b> 2,40 Síra	35,45 <b>17 Cl</b> 2,80 Chlor	39,95 <b>18 Ar</b>										
4	39,10 <b>19 K</b> 0,91 Draslík	20	40,08 <b>20 Ca</b> 1,00 Vápník	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	69,72 <b>29 Cu</b> 1,70 Měď	65,38 <b>30 Zn</b> 1,70 Zinek	69,72 <b>31 Ga</b> 1,80 Gallium	72,61 <b>32 Ge</b> 2,00 Germanium	74,92 <b>33 As</b> 2,20 Arsen	78,96 <b>34 Se</b> 2,50 Selen	79,90 <b>35 Br</b> 2,70 Brom	83,80 <b>36 Kr</b>								
5	85,47 <b>37 Rb</b> 0,89 Rubidium	38	87,62 <b>38 Sr</b> 0,99 Stroncium	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	101,07 <b>45 Rh</b> 1,00 Rhenium	102,91 <b>46 Pd</b> 1,40 Palladium	106,42 <b>47 Ag</b> 1,30 Stříbro	107,87 <b>48 Cd</b> 1,50 Kadmium	112,41 <b>49 In</b> 1,50 Indium	114,82 <b>50 Sn</b> 1,70 Cín	118,71 <b>51 Sb</b> 1,80 Antimon	121,75 <b>52 Te</b> 2,00 Tellur	127,60 <b>53 I</b> 2,20 Jod	131,29 <b>54 Xe</b>						
6	132,91 <b>55 Cs</b> 0,86 Cesium	56	137,33 <b>56 Ba</b> 0,97 Baryum	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	178,49 <b>72 Hf</b> 1,20 Hafnium	180,95 <b>73 Ta</b> 1,30 Tantal	183,85 <b>74 W</b> 1,30 Wolfram	186,21 <b>75 Re</b> 1,50 Rhenium	190,20 <b>76 Os</b> 1,50 Osmium	192,22 <b>77 Ir</b> 1,50 Iridium	195,08 <b>78 Pt</b> 1,40 Platina	196,97 <b>79 Au</b> 1,40 Zlato	200,59 <b>80 Hg</b> 1,40 Hlazen	204,38 <b>81 Tl</b> 1,40 Thalium	207,20 <b>82 Pb</b> 1,50 Olovo	208,98 <b>83 Bi</b> 1,70 Bismut	209 <b>84 Po</b>	210 <b>85 At</b> 1,80 Astat	222 <b>86 Rn</b> 1,90 Radon	
7	223 <b>87 Fr</b> 0,86 Francium	88	226,03 <b>88 Ra</b> 0,97 Radium	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	257 <b>104 Rf</b>	268 <b>105 Db</b>	269 <b>106 Sg</b>	270 <b>107 Bh</b>	271 <b>108 Hs</b>	272 <b>109 Mt</b>	278 <b>110 Ds</b>	281 <b>111 Rg</b>	285 <b>112 Cn</b>	286 <b>113 Nh</b>	289 <b>114 Fl</b>	288 <b>115 Mc</b>	293 <b>116 Lv</b>	294 <b>117 Ts</b>	294 <b>118 Og</b>	
				Rutherfordium	Dubnium	Seaborgium	Bohrium	Hassium	Mitlerium	Darmstadtium	Roentgenium	Copernicium	Nihonium	Flerovium	Moscovium	Livermorium	Tennessine	Oganesson																	

6	Lanthanoidy	138,91 <b>57 La</b> 1,10 Lanthan	140,12 <b>58 Ce</b> 1,10 Cer	140,91 <b>59 Pr</b> 1,10 Praseodym	144,24 <b>60 Nd</b> 1,10 Neodymium	~145 <b>61 Pm</b> 1,10 Promethium	150,36 <b>62 Sm</b> 1,10 Samarium	151,96 <b>63 Eu</b> 1,00 Europium	157,25 <b>64 Gd</b> 1,10 Gadolium	158,93 <b>65 Tb</b> 1,10 Terbium	162,50 <b>66 Dy</b> 1,10 Dysprosium	164,93 <b>67 Ho</b> 1,10 Holmium	167,26 <b>68 Er</b> 1,10 Erbium	168,93 <b>69 Tm</b> 1,10 Thulium	173,04 <b>70 Yb</b> 1,10 Ytterbium	174,04 <b>71 Lu</b> 1,10 Lutetium
7	Aktinoidy	227,03 <b>85 Ac</b> 1,00 Aktinium	232,04 <b>90 Th</b> 1,10 Thorium	231,04 <b>91 Pa</b> 1,10 Protaktinium	238,03 <b>92 U</b> 1,20 Uran	~245 <b>93 Np</b> 1,20 Neptunium	~244 <b>94 Pu</b> 1,20 Plutonium	~243 <b>95 Am</b> 1,20 Americium	~247 <b>96 Cm</b> 1,20 Curium	~247 <b>97 Bk</b> 1,20 Berkelium	~251 <b>98 Cf</b> 1,20 Kalifornium	~252 <b>99 Es</b> 1,20 Einsteinium	~257 <b>100 Fm</b> 1,20 Fermium	~258 <b>101 Md</b> 1,20 Mendelevium	~259 <b>102 No</b> 1,20 Nobelium	~260 <b>103 Lr</b> 1,20 Lawrencium

# Křemík

## Změna vodivost

Pomocí příměsí prvků:

III. skupiny: bor, hliník, gallium nebo indium. Atom má o jeden valenční elektron méně. Pak ve vazbě chybí tento elektron a lze to chápat jako „kladný náboj“, který akceptuje volný elektron proto - **akceptor**. Tuto oblast označujeme jako polovodič typu P. Vodivost děrová.

# Křemík

## Změna vodivost

Pomocí příměsí prvků:

V. skupiny: fosfor, arsen nebo antimon. Atom má o jeden valenční elektron více. Pak ve vazbě přebývá tento elektron a lze to chápat jako „záporný náboj“, který dodává volný elektron proto - **donor**. Tuto oblast označujeme jako polovodič typu N. Vodivost elektronová.

## Majoritní nosiče

Takto vzniklé nosiče náboje se označují jako **majoritní** nosiče.

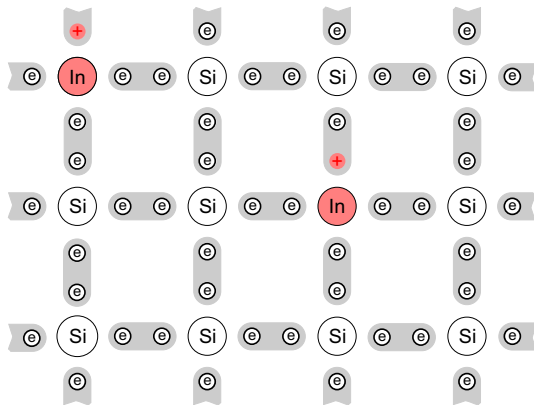
# Křemík

## Minoritní nosiče

Ovšem v reálném materiálu vždy budou existovat v polovodiči typu N nějaké zbytkové díry a v polovodiči typu P nějaké zbytkové elektrony. Tyto náboje označujeme jako **minoritní** nosiče.

# Polovodič typu P

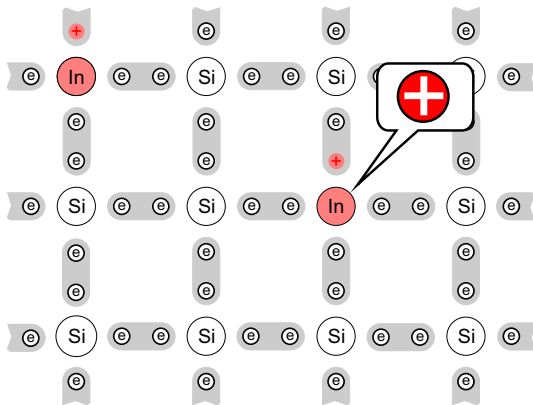
## Struktura





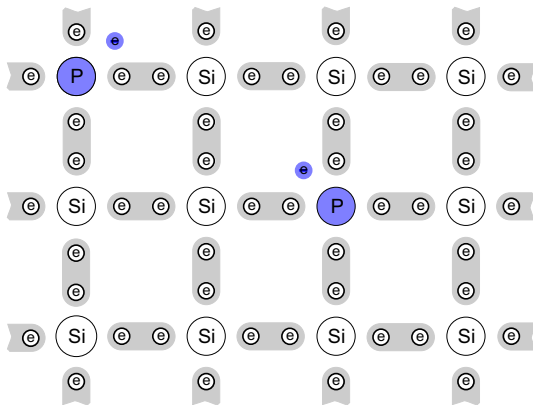
# Polovodič typu P

## Struktura



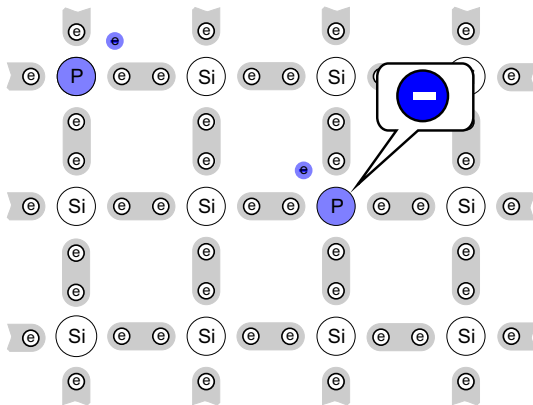
# Polovodič typu N

## Struktura



# Polovodič typu N

## Struktura

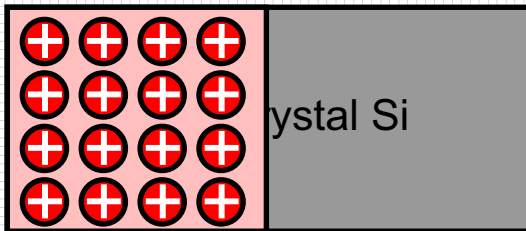


## Výchozí situace

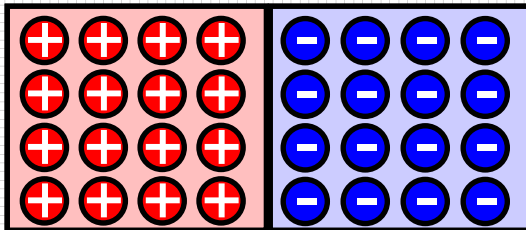


Monokrystal Si

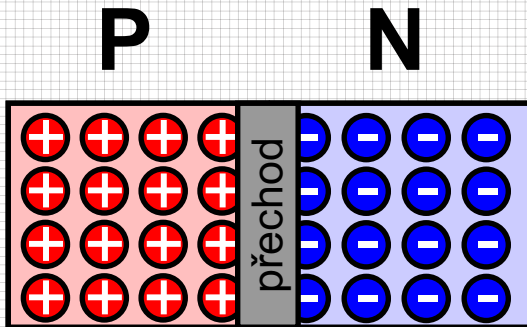
## Vytvoří se oblast P



## Vytvoří se oblast N



Na styku oblasti P a oblasti N vznikne oblast přechodu PN



## Na styku oblasti P a oblasti N vznikne oblast přechodu PN

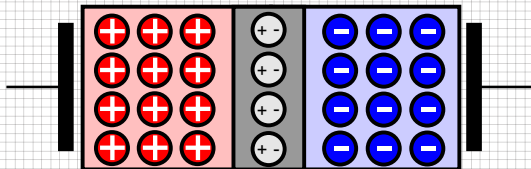
### Přechod PN

Oblast přechodu (hradlová oblast) je ta část polovodivého materiálu, kde dojde k rekombinaci volných elektronů a děr, čímž dojde ke vzniku oblasti bez volných nosičů - to znamená oblast s vysokým odporem.

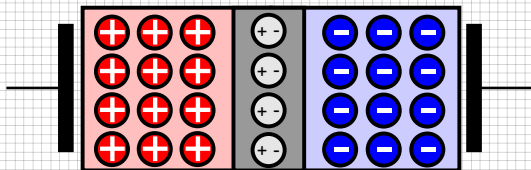
K čemu je to dobré?



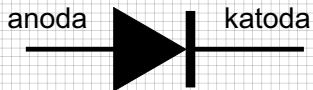
# Přechod PN - opatříme elektrodami



# Přechod PN - opatříme elektrodami



Schématická značka diody

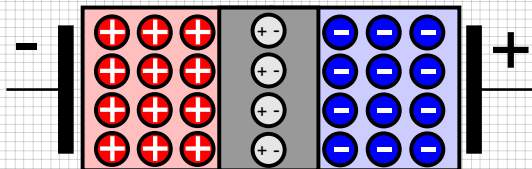


# Na styku oblasti P a oblasti N vznikne oblast přechodu PN

## Přechod PN

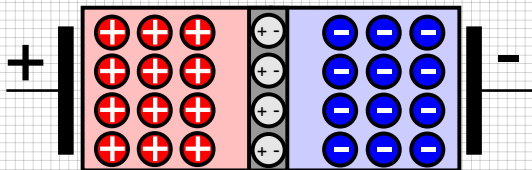
Přiložíme napětí

## Přechod PN - napětí - -> + závěrný směr



Oblast přechodu se rozšiřuje. Protéká jen velmi malý proud ( $\sim \mu\text{A}$ ). S rostoucím napětím se proud příliš nemění, až se dosáhne tzv. průrazného napětí a proud lavinovitě naroste a přechod je obvykle zničen. Dioda se chová skoro jako nevodič (izolant) je orientovaná v **závěrném směru**.

## Přechod PN - napětí + -> - propustný směr



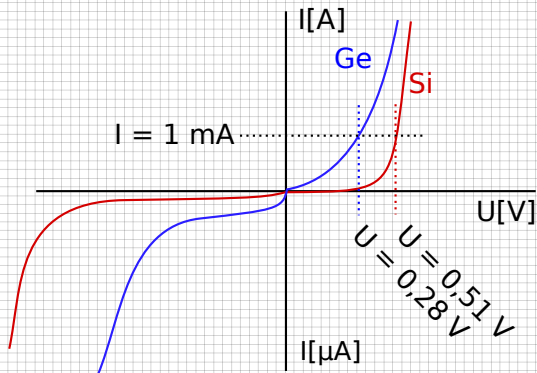
Oblast přechodu se zužuje. Po dosažení tzv. hradlového napětí ( $\sim 0,5$  V) začne protékat proud. S rostoucím napětím proud velmi rychle roste. Dioda se chová skoro jako vodič je orientovaná v **propustném směru**.

<https://www.youtube.com/watch?v=Cw10H1Nru7g>

## Přechod PN - dioda

Takto posaný efekt: závislosti průchodu proudu na polaritě napětí platí pro majoritní nosiče.  
Pro minoritní nosiče je orientace napětí opačná.

# Volt-ampérová charakteristika diody Si, Ge

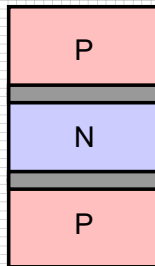
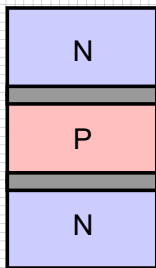


## Bipolární tranzistor (BJT – Bipolar Junction Transistor)

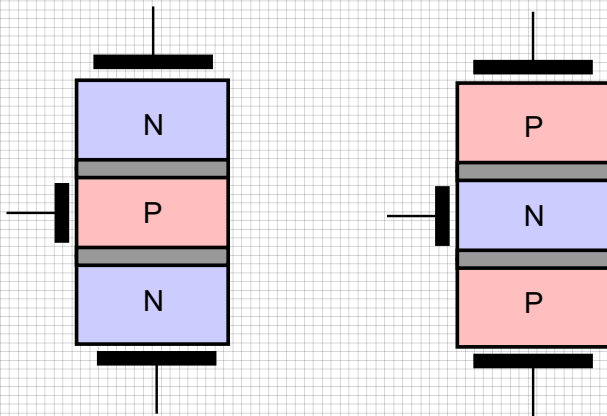
Přidáme třetí vrstvu polovodiče. Máme dvě možnosti. Buď vznikne struktura NPN nebo PNP.



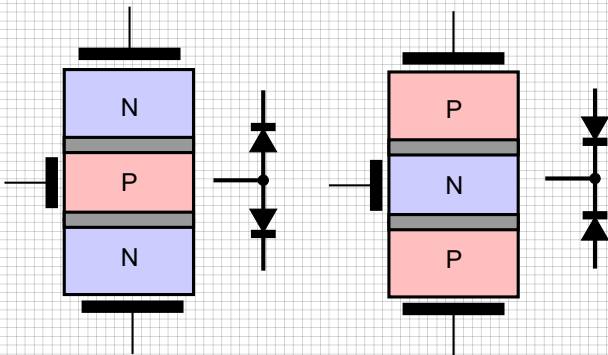
# NPN a PNP uspořádání



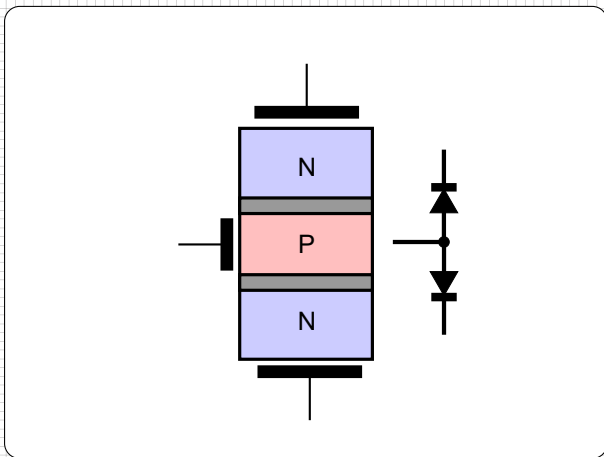
## NPN a PNP uspořádání s elektrodami



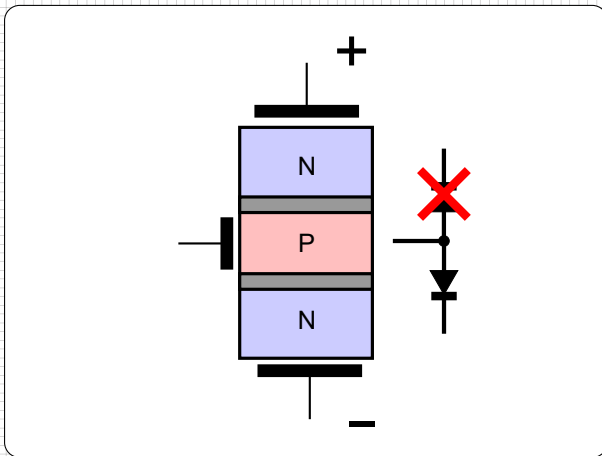
# NPN a PNP uspořádání diodová interpretace



## NPN uspořádání (struktura)



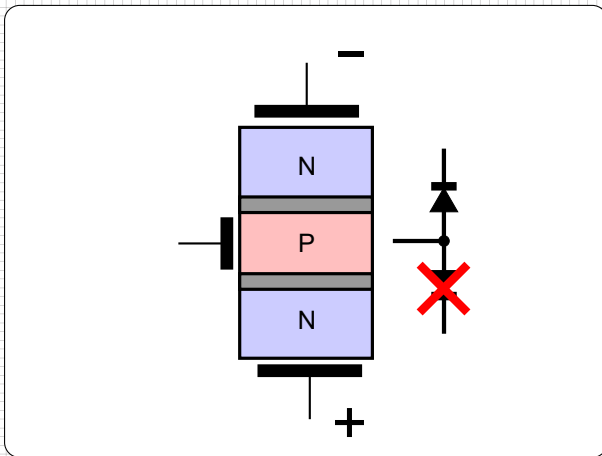
## NPN + napětí. Nahoře kladné dole záporné.



## NPN + napětí. Nahoře kladné dole záporné.

Nastane situace, kdy dolní přechod je polarizován v propustném směru. Horní přechod je polarizován v závěrném směru. Veškerý napěťový spád je na zavřeném horním přechodu a na dolním přechodu proto není dostatečné napětí na jeho otevření. Tudíž struktura jako celek nevede.

## NPN + napětí. Nahoře záporné dole kladné.



## NPN + napětí. Nahoře kladné dole záporné.

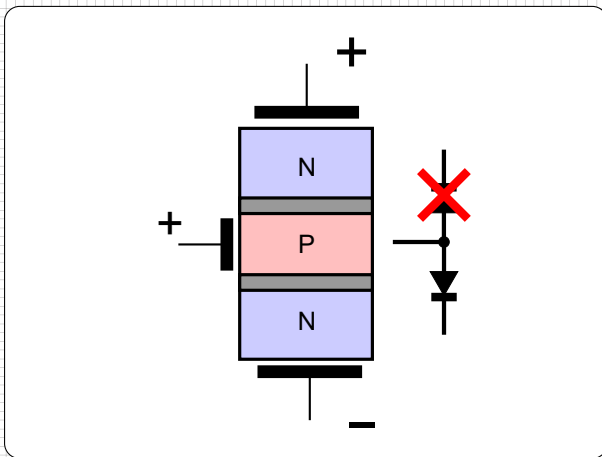
Nastane situace, kdy dolní přechod je polarizován v závěrném směru, ale horní přechod je polarizován v propustném směru (otevřený). Tudíž struktura opět jako celek nevede.

Co s tím?

Je třeba si uvědomit, že popisované děje platí pro majoritní nosiče náboje. Pro minoritní jsou polarity napětí opačné.



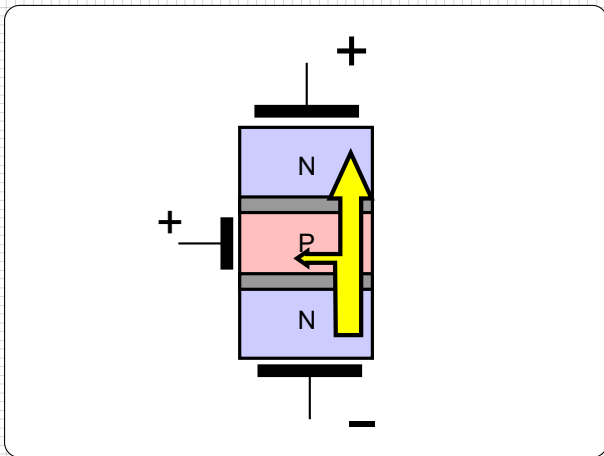
**NPN + napětí (nahore + dole - a malé kladné na prostřední vrstvě).**



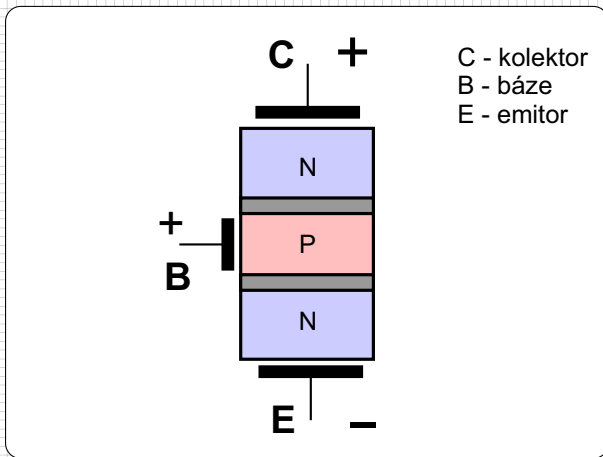
## NPN + napětí (nahore + dole - a malé kladné na prostřední vrstvě).

Výchozí situace je popsána výše. Pokud budeme postupně zvyšovat přídavné napětí na prostřední vrstvě, tak dojde k otevření spodního PN přechodu. V tomto „okamžiku“ začne procházet proud a tudíž elektrony ze spodní vrstvy (N) překročí do vrstvy prostřední (P). Ovšem v polovodiči typu P jsou elektrony minoritními nosiči a pro ně je horní přechod PN otevřený. Vzhledem k tomu, že kladné napětí na horní vrstvě je výrazně větší než na prostřední vrstvě, většina elektronů projde do horní vrstvy.

## NPN - grafická zobrazení průchodu proudu.



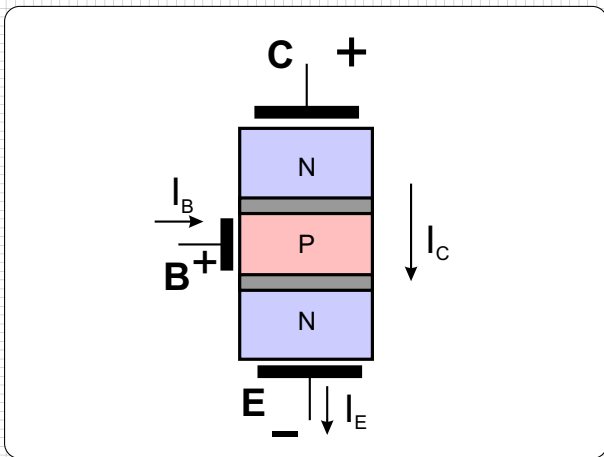
## NPN - označení elektrod



## NPN - označení elektrod

U reálných tranzistorů nejsou struktury jednotlivých vrtev stejné, tudíž nelze zaměnit kolektor a emitor. Proto je označení elektrod důležité.

# NPN - proudy



## NPN - shrnutí

$$I_E = I_B + I_C$$

Proudový zesilovací činitel:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

Bipolární tranzistor je zesilovačem proudu. Řídicím prvkem je velikost **proudu** do báze tranzistoru. Proudové tranzistorů prochází přes dva typy vodivosti proto bipolární tranzistory.

(U PNP tranzistorů jsou polarita napětí opačné.)

## Unipolární tranzistor (FET – Field Effect Transistor)

Další variantou jsou unipolární tranzistory. U nich proud prochází přes jeden typ vodivosti, proto unipolární tranzistory. Těchto tranzistorů je několik typů, které se liší podle principu vzniku vodivého kanálu.

Společným rysem je, že vliv na chování kanálu má primárně velikost napětí přiloženém na řídicí elektrodu G (GATE). Další elektrody se označují D (DRAIN) a S (SOURCE).

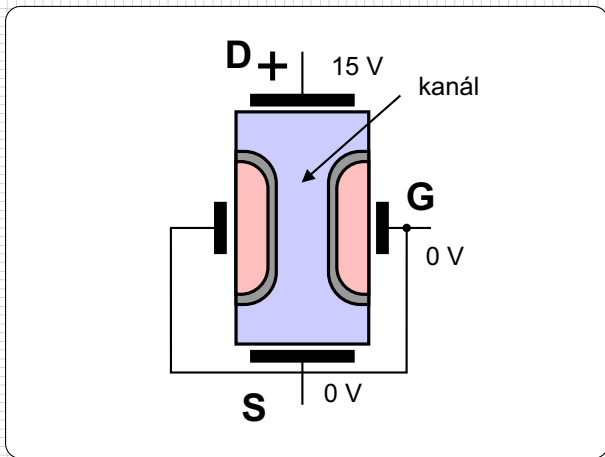
Vydeme z jedné varianty těchto tranzistorů a to JFET. Základní struktura je podobná jako u bipolárních tranzistorů. Ale zapojení je jiné a princip činnosti také.



# JFET

Základní uspořádání.

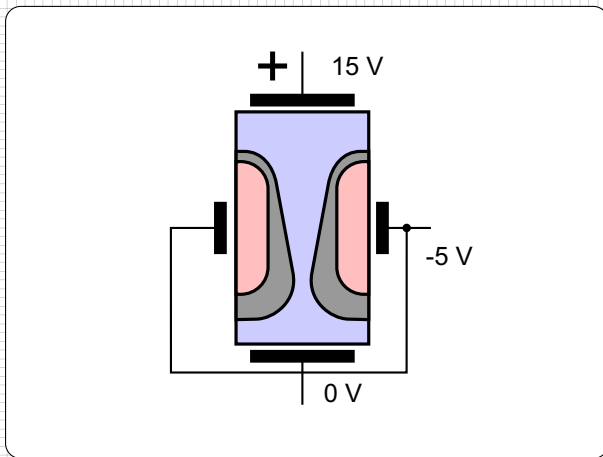
## JFET



# JFET

Na elektrodu G připojíme záporné napětí. Tímto napětím se začne hradlová oblast přechodu rozšiřovat do oblasti kanálu.

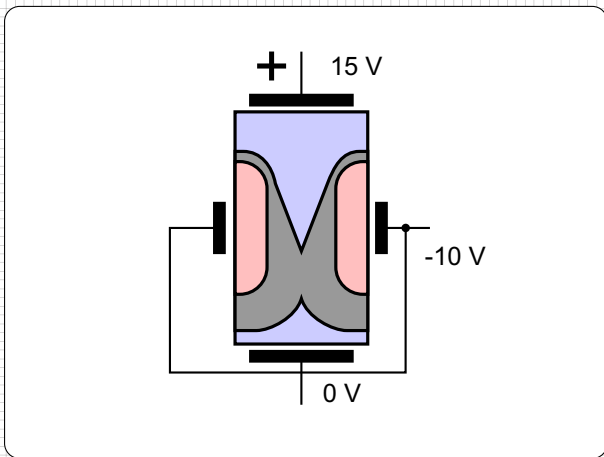
## JFET



# JFET

Hradlová oblast má velmi malou vodivost a rozšiřování hradlové oblasti do kanálu dochází k postupnému „uzavírání“ kanálu až do jeho úplnému uzavření.

## JFET



## FET - typy

**Unipolární** – (FET – Field Effect Transistor)

JFET – (Junction FET) Řídící elektroda je tvořena závěrně polarizovaným přechodem PN.

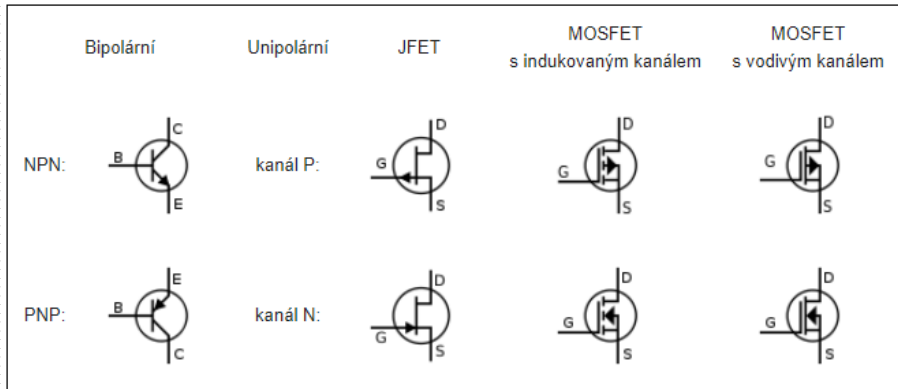
MESFET – (Metal Semiconductor FET) Řídící elektroda je tvořena závěrně polarizovaným přechodem kov–polokov.

MOSFET – (Metal Oxide Semiconductor FET) Řídící elektroda je izolována od zbytku tranzistoru oxidem. Jejich výkonnostní varianty mají mezi Drain a takzvanou Body diodou, která jím pomáhá zvládat napěťové špičky opačného napětí způsobené rychlým rozpojováním induktoru např. motoru (pro jehož řízení se často používají).

MISFET – (Metal Insulated Semiconductor FET) Obecný název pro tranzistor s izolovanou řídící elektrodou. Izolantem nemusí být jen oxid (např. nitrid...).

<https://cs.wikipedia.org/wiki/Tranzistor>

# Typy tranzistorů





## Režimy práce tranzistorů

Tranzistory mohou pracovat ve dvou režimech.

1. režim je jako zesilovač signálu. Využívá se spojitých signálů.
2. režim je jako spínač. V tomto režimu se využívá stavu, kdy je tranzistor buď úplně zavřený nebo úplně otevřený (ON - OFF). V počítačích se setkáme převážně s tímto režimem.

# Tranzistory

Tranzistory jsou základním stavebním prvkem všech obvodů počítače. Z tranzistorů se skládají hradla, klopné obvody, paměti, ...

# Odkazy

[https://www.webelements.com/silicon/crystal\\_structure.html](https://www.webelements.com/silicon/crystal_structure.html)

<https://sketchfab.com/3d-models/silicon-crystal-lattice-73e292f32ffe4ca490e166faeba317e7>

<https://web.vscht.cz/~nadhern1/psp.pdf>