

8.2 Polovodičové materiály

Diody, tranzistory a integrované obvody se vyrábějí z polovodičového monokrystalu.

Tyto materiály se nazývají polovodiče, protože jejich měrný odpor (měrná vodivost) je mezi odporem (vodivostí) vodičů (kovů) a nevodíků (izolantů), (**obr. 1**). Vodivost polovodičů lze velmi ovlivnit příměsemi (ve složení materiálu) nebo jinými vlivy, např. světlem, elektrickým polem nebo magnetickým polem.

Jako polovodičové materiály jsou téměř výhradně používány buď prvky (křemík nebo germanium) a chemické sloučeniny galiumarsenid nebo indiumantimonit, které krystalizují v krychlové soustavě jako diamant (**obr. 2**). Zde je každý atom spojen 4-mi vazbami se sousedními atomy.

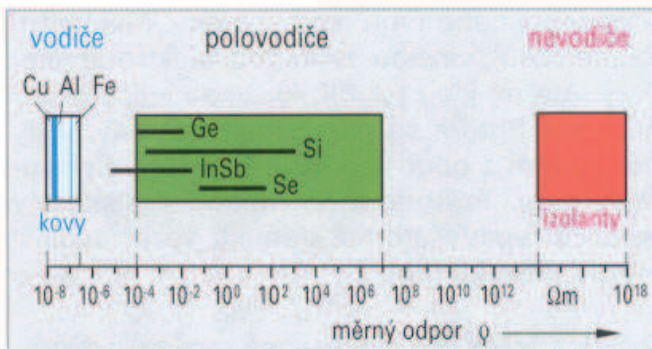
Polovodičové materiály (tabulka) jsou potřebné v mimořádné čistotě. Pomocí zvláštní technologie tažení monokrystalu a zónové tavby je možno docílit čistoty, při které na 10^{10} atomů (křemíku nebo germania) krystalu polovodiče připadne jen jeden atom jiné látky. Tato čistota odpovídá znečištění bazénu s 500 m^3 vody jedinou kapkou jiné látky ($0,05 \text{ ml}$).

Křemík jako základní materiál je dnes v polovodičové technice nejdůležitější prvek. Více než 90% polovodičových součástek je na bázi křemíku. Upřednostňování křemíku má tyto tři důvody:

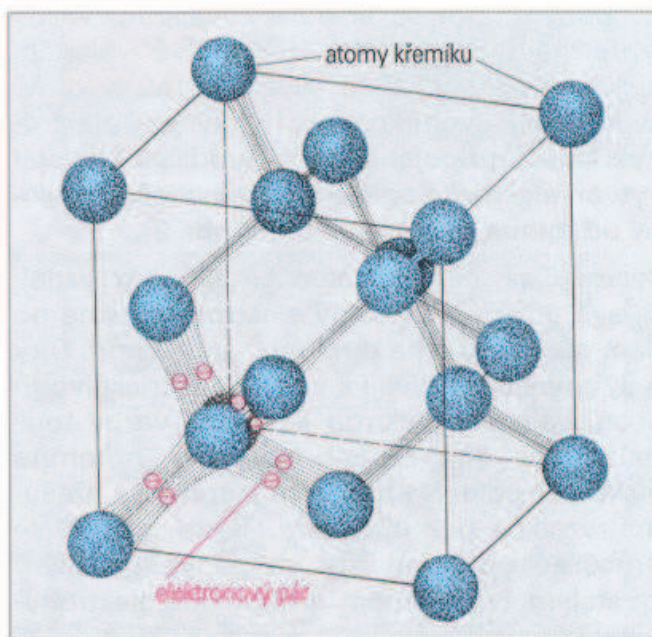
- křemíkové součástky vydrží teploty až do 150°C (oproti 75°C u germania),
- čištění i tažení monokrystalu křemíku je technologicky dobře zvládnuté a usnadněné tím, že se jedná o čistý prvek (a ne sloučeninu),
- při vysoké teplotě se křemík pokryje vrstvičkou oxidu SiO_2 , který dobře izoluje.

Jiné polovodiče se uplatňují jen v případech, kdy jsou vlastnosti křemíku v něčem nevyhovující. Např. germanium má při vysokých kmitočtech proudu výhodnější vlastnosti a dvouprvkový polovodič galiumarsenid má velkou pohyblivost nosičů elementárních nábojů.

Stavba atomů. Jádro atomu křemíku obsahuje 14 protonů a 14 neutronů. Elektronový obal má ve vnitřní vrstvě 2 elektrony, ve druhé vrstvě 8 elektronů a ve vnější valenční vrstvě 4 elektrony (**obr. 1, str. 166**). Elektrony ve valenční vrstvě se mohou účastnit chemických vazeb a nazývají se **valenční elektrony**¹.



Obr. 1 Měrný odpor polovodičů



Obr. 2 Krystalová mřížka křemíku (diamantová struktura)

Tabulka: Polovodičové materiály

materiál	použití
křemík (Si)	diody, tranzistory, integrované obvody, tyristory, solární články
germanium (Ge)	vysokofrekvenční tranzistory, detektory radioaktivního záření
galiumarsenid (GaAs)	světelné diody, laser, vf – tranzistory
indiumantimonid (InSb) indiumarsenid (InAs)	magnetorezistory, Hallovy generátory
kadmiumsulfid (CdS)	fotoodpory, solární články
karbid křemíku (SiC)	topné spirály, varistory, světelné diody

¹ z latinského valere = být hodnotný

Atomy stejného typu jsou spojeny **kovalentní** (chemickou) **vazbou** tvořenou elektronovými páry. Atomy jsou tak blízko, že se jejich obaly prolínají. Přitom se přitáhnou elektrony, vždy po jednom z obou atomů a vytvářejí **elektronové páry**. Touto vazbou mohou 4 elektrony valenční vrstvy atomu křemíku vázat 4 další atomy křemíku (obr. 2).

8.2.1 Vlastní vodivost polovodičů

Při velmi nízkých teplotách nejsou v krystalech křemíku žádné volné nosiče nábojů. Při pokojové teplotě kmitají atomy křemíku neuspořádaně kolem svých rovnovážných poloh (tepelný pohyb). Tím se některé kovalentní vazby (zpretrhají) rozpadnou. Jednotlivé valenční elektrony se vzdálí od svých atomů a volně se pohybují uvnitř krystalu (vodivostní elektrony). Napětí připojené na polovodičový krystal vytvoří elektrické pole, které pak unáší elektrony od minus pólu k plus pólu (obr. 3).

Jakmile se nějaký valenční elektron vzdálí ze své pozice jako volný elektron, vznikne po něm mezera, zvaná **díra** nebo p-elektron. Díry tedy rovněž přispívají k vlastní elektrické vodivosti. Valenční elektron sousední vazby totiž může tuto díru zaplnit, pokud je přítomno elektrické pole. Na místě, ze kterého se přesunul, vznikne pak opět díra. Tento průběh se průběžně opakuje. Díra se pohybuje celým krystalem (v opačném směru než elektrony) (obr. 4).

Elektrické napětí připojené na krystal polovodiče způsobí pohyb vodivostních elektronů od záporného pólu ke kladnému a pohyb děr v opačném směru.

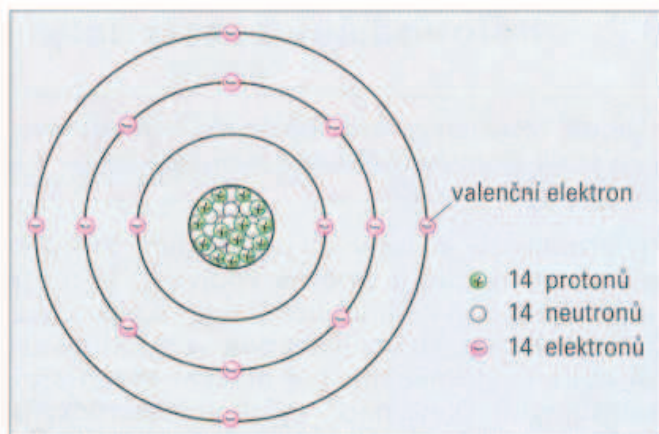
8.2.2 Nevlastní vodivost polovodičů (dotování polovodičů)

Přidáním nepatrného množství příměsí do ta-
veniny čistého polovodičového materiálu
stoupne enormně vodivost polovodičového
krystalu, např. jediný atom trojvazného bóru na 100 000 atomů křemíku zvětší tisíckrát vodivost. Cizí atomy, také např. hliníku nebo fosforu, naruší krystalovou mřížku (poruchy). Přidání cizích atomů do čistého polovodičového materiálu nazýváme **dotování**¹ (legování, znečišťování).

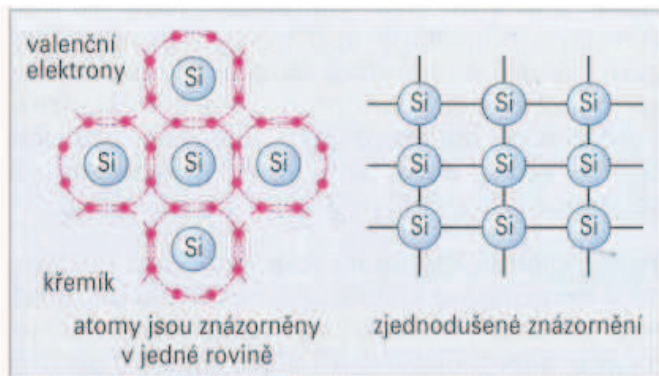
Nepatrné dotování čistého krystalu polovodiče cizími atomy, např. hliníku nebo fosforu, zvýší velmi silně jeho vodivost.

Dotované polovodiče nazýváme **nevlastními polovodiči**.

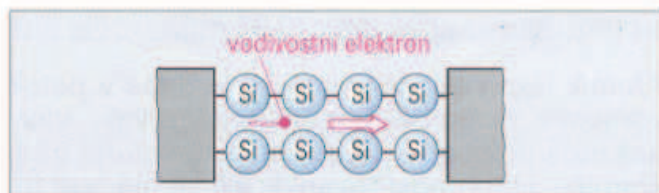
¹ z latinského dotare = opatřit, přidat



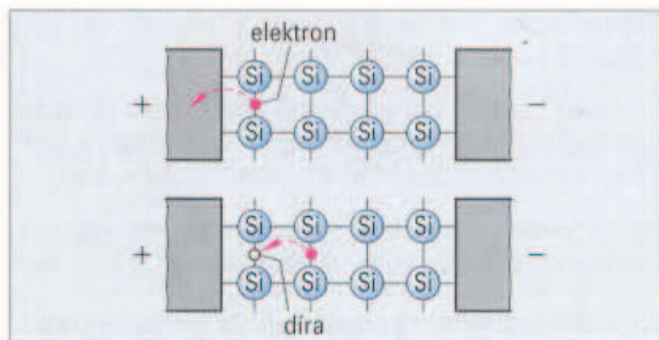
Obr. 1 Stavba atomu křemíku



Obr. 2 Chemické (kovalentní) vazby mezi atomy křemíku



Obr. 3 Elektronová vodivost v polovodiči



Obr. 4 Děrová vodivost v polovodiči

Při dotování krystalu křemíku umělými poruchami (nečistotami), způsobí atomy fosforu s 5 valenčními elektrony převahu vodivostních elektronů, a atomy hliníku se 3 valenčními elektrony nadbytek děr.

Polovodič typu N (s převahou negativních nábojů s elektronovou vodivostí). Jeden atom fosforu (nebo atom arsenu) má 5 valenčních elektronů. Při jeho umístění do krystalu křemíku využije 4 valenční elektrony k chemickým vazbám (obr. 1) a 5. elektron je volně vázán ke svému jádru. Stačí i malá teplota, aby se stal volně pohyblivým vodivostním elektronem. Fosforem dotovaný krystal křemíku se stane polovodičem typu N¹ s volnými elektrony. Tyto příměsi s volnými elektrony nazýváme **donory**.

Když se vodivostní elektrony vzdálí od atomů fosforu, zanechají kladné ionty, kterým chybí elektrony. Tyto anionty jsou pevně vázány v krystalové mřížce. Jako celek zůstává polovodič typu N elektricky neutrální.

Polovodiče typu N (negativní) obsahují volné elektrony (vodivostní elektrony) jako nosiče nábojů.

Vodivost dotovaného polovodiče se nazývá **nevlastní vodivost**. Tato nevlastní vodivost je na teplotě mnohem méně závislá než u čistého křemíku a stoupá s teplotou jen velmi pomalu, dokud neodevzdají všechny atomy příměsi (fosforu) svůj volný elektron.

Při průtoku proudu dotovaným (nevlastním) polovodičem se pohybují vodivostní elektrony od minus-pólu k plus-pólu (obr. 2).

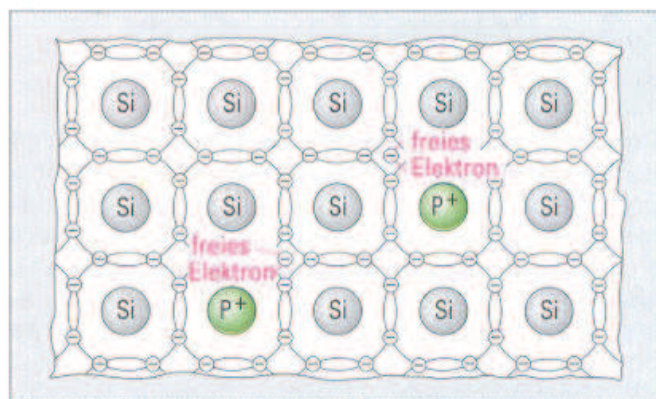
Polovodič typu P (s převahou pozitivních nábojů, s děrovou vodivostí). Do krystalové mřížky polovodiče, např. křemíku, jsou přidány atomy trojvazného prvku, např. bóru, hliníku nebo indiu, se třemi valenčními elektrony. Tyto příměsi nazýváme **akceptory**. Při dotování trojvazným (trojmocným) prvkem chybí v chemických (kovalentních) vazbách elektrony. Stačí i malá teplota, aby do volných vazeb přeskakovaly při tepelném pohybu elektrony z vazeb sousedních. Přesunuté elektrony zanechají opět díry. Trojvazné atomy tedy působí vznik děr v krystalové mřížce křemíku. Krystal křemíku se tak stává **polovodičem typu P²**, i když obsahuje kationty (po přijetí elektronu) trojvazné příměsi (např. hliníku), pevně vázané v krystalové mřížce.

Polovodiče typu P (pozitivní) obsahují volné díry (chybějící elektrony) jako nosiče nábojů.

Vodivost polovodiče typu P stoupá s teplotou jen do okamžiku, kdy všechny atomy příměsi trojvazného prvku (akceptoru) přijmou (akceptují) ve svých děrách elektrony ze sousedních vazeb při jejich tepelném pohybu.

Nevlastní elektrická vodivost polovodiče dotovaného příměsí donoru nebo akceptoru je na teplotě jen velmi málo závislá.

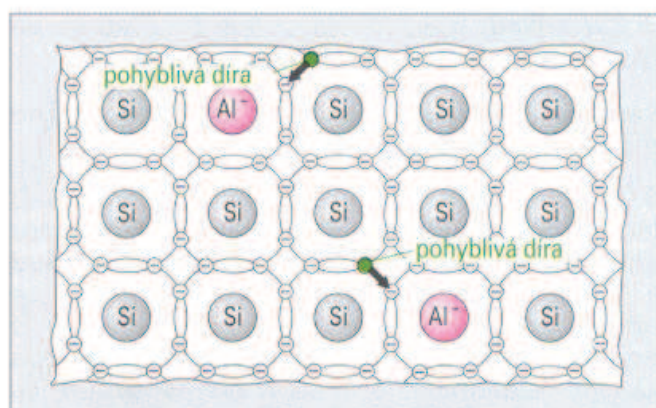
Elektrické pole (napětí připojené na polovodič) má na různé nosiče nábojů v krystalové mřížce polovodiče (elektrony a díry) různě silné účinky. Střední hodnota rychlosti elektronu ve směru intenzity elektrického pole E , daná driftem (unášením) elektronu v elektrickém poli, se nazývá **driftová rychlost**, kterou lze vyjádřit jako $v_n = -\mu_n \cdot E$. Konstanta úměrnosti mezi vektorem intenzity elektrického pole E a vektorem driftové rychlosti elektronu v_n se nazývá **pohyblivost** μ_n ($\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$). V krystalové mřížce křemíku činí pohyblivost elektronů $0,15 \text{ m}^2/(\text{Vs})$ a pohyblivost děr $0,06 \text{ m}^2/(\text{Vs})$, u germania: $0,38 \text{ m}^2/(\text{Vs})$ pro elektrony a $0,18 \text{ m}^2/(\text{Vs})$ pro díry.



Obr. 1 Polovodič typu N (křemík dotovaný fosforem)



Obr. 2 Průtok proudu N- a P-polovodičem



Obr. 3 P-polovodič (křemík dotovaný hliníkem)

¹ N od negativní

² P od pozitivní

8.3 Polovodičové diody

8.3.1 Princip činnosti

Pokus: Zapojte křemíkovou diodu např. BAY 44 k měření proudu a napětí v zapojení s chybou proudu (ampérmetr měří i proud protékající voltmetrem) v propustném směru a pak v zapojení s chybou napětí v závěrném směru (obr. 1). Nastavujte postupně napětí a měřte proud a nakreslete charakteristiku diody (obr. 2). Připojte obvody eventuelně přes předřadný odpor 1 kΩ na nastavitelný síťový zdroj a pomalu zvyšujte (stejnoseměrné) napětí do asi 1 V v propustném směru a v závěrném směru nejvýše do 50 V.

V propustném směru teče po překonání prahového napětí (u křemíku asi 0,7 V) velký proud, u zmíněné diody asi 100 mA při napětí 1 V.

Polovodičová dioda vede proud v propustném směru a uzavírá proud velkým odporem v nepropustném směru.

Katoda polovodičové diody se označuje zpravidla kroužkem (obr. 2). Na stranu kroužku se ve propustném směru připojuje **záporný pól**.

Parametry diod se liší podle polovodičového materiálu (tabulka).

V propustném směru (dopředném „forward“¹) teče při vzrůstajícím napětí v **propustném směru** U_F nad hodnotou **prahového napětí** U_{TO} proud v **propustném směru** I_F (charakteristika na obr. 2). V závěrném směru (zpětném „reverse“²) protéká diodou s narůstajícím **závěrným napětím** U_R jen zanedbatelně malý **závěrný proud** I_R . Nad mezí přípustného napětí v závěrném směru pak stoupne proud tak, že může diodu zničit.

8.3.2 PN-přechod

Každá polovodičová dioda má **PN-přechod**, který je základem usměrňovací schopnosti. Tento účinek má i přechod kov-polovodič, protože kov obsahuje přebytečné volné elektrony. Na hranici mezi P a N polovodiči se i bez napětí pohybují vlivem tepelného pohybu elektrony od N-polovodiče do P-polovodiče a **rekombinují**³ s dírami. Opačně difundují⁴ díry P-polovodiče do N-polovodiče a spojí se tam s volnými elektrony (obr. 3). Na obou stranách hranice (přechodu) se krystal ochuzuje o volné nosiče nábojů: hraniční vrstva působí jako izolátor a vytváří závěrnou vrstvu, a to působením potenciálové bariéry.

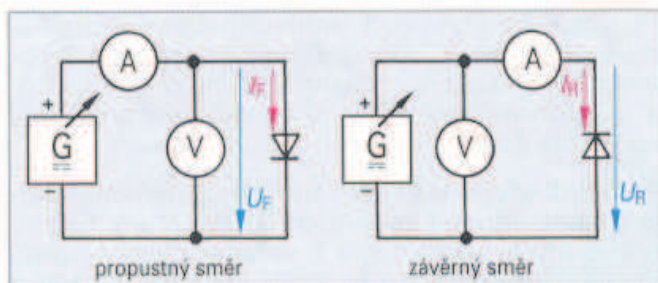
Na PN-přechodu polovodičů vzniká závěrná vrstva.

¹ anglicky forward = dopředný

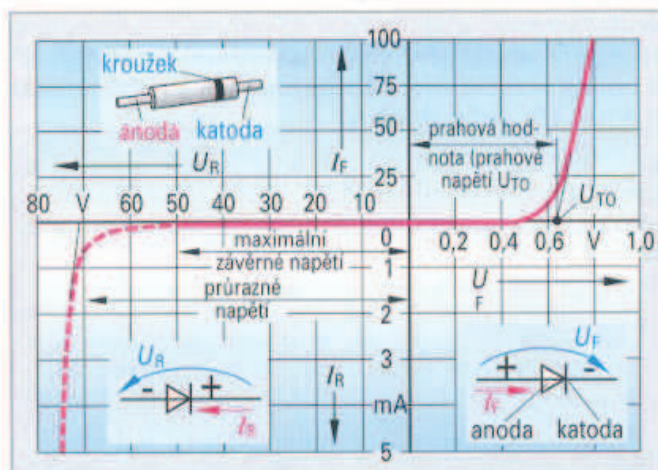
² anglicky reverse = zpětný

³ latinsky recombine = znovu spojit

⁴ latinsky difundere = rozšiřovat se, rozptýlit se



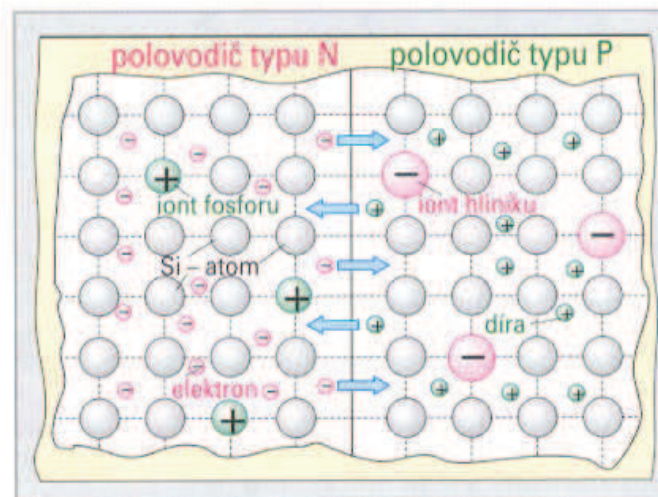
Obr. 1 Zapojení k měření charakteristik diody



Obr. 2 Charakteristika křemíkové diody (BAY 44)

Tabulka: Srovnání germaniových a křemíkových diod

parametr	germaniové diody	křemíkové diody
prahová hodnota napětí v propustném směru	= 0,3 V	= 0,7 V
proudová hustota	0,5 A/mm ²	1,5 A/mm ²
maximální provozní teplota	= 75°C	= 150°C
účinnost	95 %	99 %
špičkové napětí v závěrném směru	30 ... 120 V	100 ... 2000 V



Obr. 3 Děje v okolí PN-přechodu

Chybí-li v hraniční vrstvě vodivostní elektrony a díry, uplatní se svým vlivem náboje iontů (příměsí) vázaných na pozicích v krystalové mřížce: N-hraniční oblast je kladně, P-hraniční oblast záporně nabitá (**obr. 1**). Tyto oblasti prostorových nábojů ukončí další difuzi: záporná P-hranice přitahuje difundující díry a N-hraniční vrstva přitahuje proniknuvší (ven) elektrony zpět. Náboje v hraniční vrstvě silné asi $1\text{ }\mu\text{m}$ jsou zdrojem **difuzního napětí** na PN-přechodu, jehož velikost je velikostí prahového napětí v propustném směru.

Přechod PN působí jako kondenzátor, závěrná vrstva má svou kapacitu, tzv. **kapacitu závěrné vrstvy**.

Polovodiče P i N jsou na koncích (vzdálených od PN přechodu) opatřeny kovovými kontakty. Dioda je zapojena v závěrném směru, je-li plus pól napětového zdroje spojen s N-polovodičem (katodou) a minus pól s P-polovodičem (anodou). Závěrné napětí U_R má pak stejný směr jako difuzní napětí na přechodu a rozšíří tak ještě závěrnou vrstvu (**tabulka**).

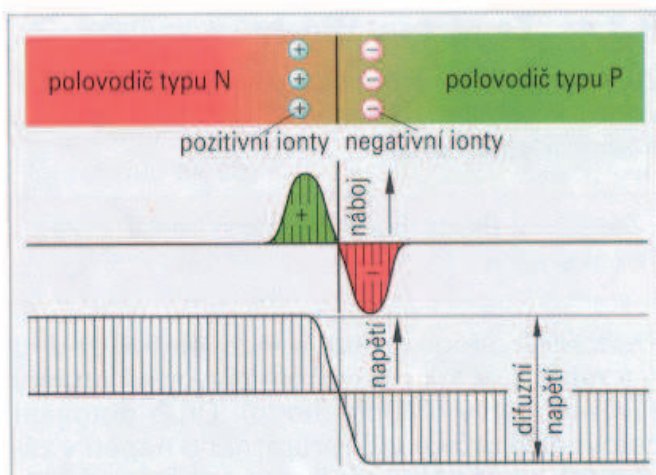
V **propustném směru** je plus-pól vnějšího zdroje napětí připojen na P-polovodič (anodu) a minus pól zdroje na N-polovodič (katodu). Propustné napětí U_F je orientováno proti difuznímu napětí, odbourá tak závěrnou vrstvu na přechodu a protéká proud I_F v propustném směru.

Napětí v závěrném směru rozšíří závěrnou vrstvu a zmenší její kapacitu: PN-přechod uzavírá cestu elektrickému proudu. Napětí v propustném směru (+ na anodě a – na katodě) odbourá závěrnou vrstvu: polovodičovou diodou protéká proud v propustném směru.

8.3.3 Usměrňovací diody

Výkonové diody mohou usměrňovat a spínat proudy velkých výkonů (str. 191). Pro lepší odvod ztrátového tepla je vhodné umísťovat polovodičové křemíkové prvky do kovového pouzdra, které se dá přišroubovat přímo na plech nebo kovový chladič (**obr. 2**). Křemíkové diody snesou až $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ teplotu závěrné vrstvy. Jsou vyráběny pro jmenovitá napětí až do 4000 V a pro proudy v propustném směru až do 1000 A .

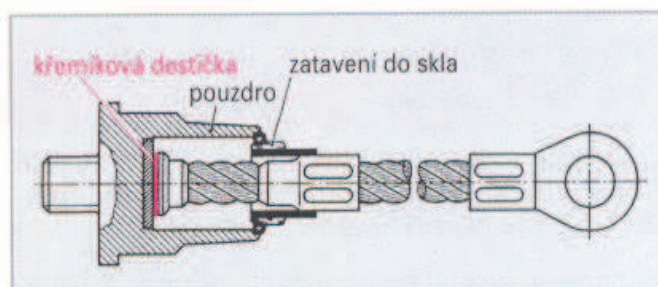
Hrotové diody mají velmi malou kapacitu ($\leq 1\text{ pF}$). Skládají se z germaniové destičky typu N, na kterou je pružně usazen kovový hrot (**obr. 3**). Prvním proudovým nárazem (formováním) se kovový hrot přitaví ke germaniovému krystalu. V okolí kovového hrotu se přitom vytvoří téměř bodový PN přechod s velmi malou kapacitou závěrné vrstvy. Hrotová dioda dovoluje jen malé proudy ($I_F \leq 100\text{ mA}$). Jsou používány k vysokofrekvenčnímu usměrňování a jako rychlé spínací diody.



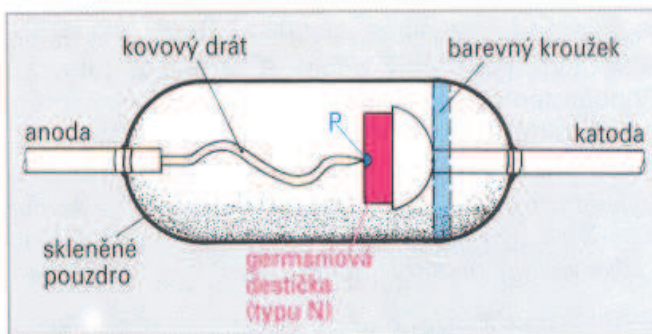
Obr. 1 PN-přechod bez vnějšího napětí

Tabulka: Provoz polovodičové diody

v závěrném směru	bez napětí	v propustném směru



Obr. 2 Konstrukce výkonové křemíkové diody



Obr. 3 Konstrukce germaniové hrotové diody

8.3.4 Zenerovy diody

Zenerovy diody jsou omezovací diody využívané v oblasti strmého nárůstu proudu v závěrném směru.

Zenerovy diody jsou provozovány v závěrném směru.

Předřadný odpor omezuje v závěrném směru I_Z a zabraňuje tak překročení přípustné teploty závěrné vrstvy (PN-přechodu). Druh dotování polovodiče určuje výši průrazného napětí v závěrném směru U_Z . Leží-li toto napětí pod hranicí 5 V, mluvíme o Zenerově¹ napětí (nebo Zenerově efektu). Elektrické pole překoná při intenzitě přes 20 kV/mm účinek závěrné vrstvy v oblasti PN-přechodu tak, že uvolní valenční elektrony z vazeb v mřížce a ty pak spolu se vzniklými dírami tvoří průrazový proud I_Z . Při napětí nad 7 V (v závěrném směru) vznikne u Zenerovy diody **lavinový efekt** (Avalanche² efekt), průraz při kterém napětí v závěrném směru urychlí nosiče nábojů natolik, že ty pak vyřazují při srážkách valenční elektrony z jejich vazeb v mřížce. Tyto elektrony pak mohou uvolnit při srážkách další nosiče nábojů.

Zenerovy diody mají v závěrném směru od určitého (Zenerova) napětí strmou proudovou charakteristiku (oblast průrazu). Potřebují vždy předřadný odpor k omezení proudu.

Důležitou charakteristikou je diferenciální odpor r_z v okolí pracovního bodu daný změnou proudu ΔI_Z při změně napětí ΔU_Z .

Zenerovy diody se používají hlavně ke stabilizaci a omezení stejnosměrných napětí (viz tabulka).

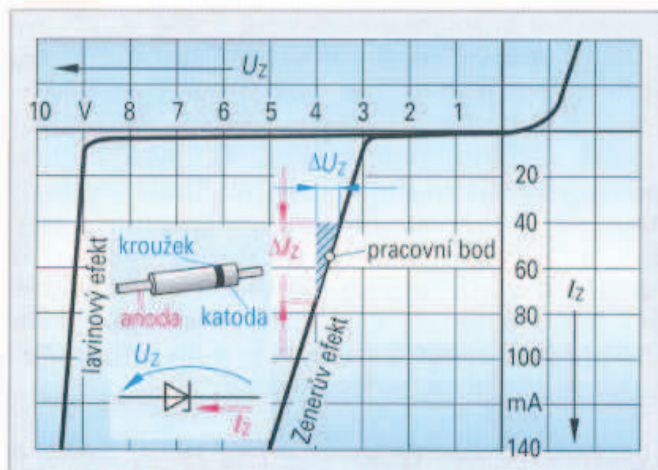
Pokus: Zapojte do série se Zenerovou diodou, např. BZX/C5V6, předřadný odpor $R_V = 560 \Omega$ (obr. 2). Připojte tento obvod k nastavitelnému stejnosměrnému zdroji a pomalu zvyšujte vstupní napětí U_1 . Měřte výstupní napětí U_2 .

Výstupní napětí *vzrůstá nejprve rovnoměrně téměř až k Zenerovu napětí diody 5,6 V a pak se nemění, i když vstupní napětí U_1 dále stoupá.*

V oblasti stabilizace je na Zenerově diodě konstantní úbytek napětí a při kolísání vstupního napětí U_1 se mění úbytek napětí jen na předřadném odporu R_V . Předřadným odporem navíc protéká zatěžovací proud, je-li Zenerova dioda připojena paralelně k zátěži R_L (obr. 2).

¹ C. M. Zener, americký fyzik, nar. 1905

² avalanche (anglicky) = lavina



Obr. 1 Charakteristiky Zenerových diod

Tabulka: Použití Zenerových diod

stabilizace napětí	ochrana před přetížením
stabilizátor napětí se Zenerovou diodou a tranzistorem	stabilizátor proudu

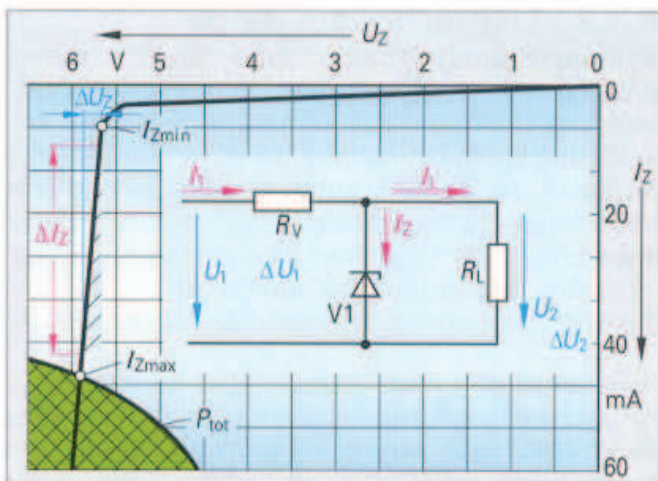
r_z diferenciální odpor v závěrném směru

$$r_z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$$

ΔU_Z změna napětí v okolí pracovního bodu

ΔI_Z změna proudu odpovídající změně napětí ΔU_Z

$$[r_z] = \frac{V}{A} = \Omega$$



Obr. 2 Stabilizace napětí pomocí Zenerovy diody (BZX/C5V6)

Potřebná velikost předřadného odporu R_V leží mezi hodnotami R_{Vmin} a R_{Vmax} . Při překročení R_{Vmax} již nepracuje Zenerova dioda ve strmé části charakteristiky. Je-li $R_V < R_{Vmin}$, dochází k přetěžování Zenerovy diody. Doporučuje se volit R_V v blízkosti R_{Vmax} a vstupní napětí U_1 přibližně dvojnásobné než U_Z . Pak lze dosáhnout vysokého činitele stabilizace S .

Zenerovy diody se kromě jiného používají při spojování stupňů tranzistorových zesilovačů, ochraně tranzistorů při induktivní zátěži, jako ochrana před přetížením nebo k potlačení nuly u ručkových přístrojů (vymezení rozsahu).

8.3.5 Označování polovodičových součástek

Polovodičové součástky používané ve spotřební elektronice, jako např. v televizorech, radiopřijímačích a magnetofonech, jsou často označovány 3 písmeny a číslicemi. První písmeno označuje druh polovodičového materiálu, druhé charakterizuje funkci součástky a třetí písmeno a cifry odpovídají některým důležitým technickým údajům. Např. Zenerovy diody jsou označeny typem a dále lomítkem, oddělenými značkami pro toleranci (A: $\pm 1\%$, B: $\pm 2\%$, C: $\pm 5\%$, D: $\pm 10\%$). Jmenovitá hodnota Zenerova napětí je dána s přesností na jedno desetinné místo a místo desetinné čárky je použito písmeno V.

Příklady: BZY92/C9V1 je křemíková Zenerova dioda, průmyslový typ se Zenerovým napětím 9,1 V a tolerancí $\pm 5\%$. AA – 118 označuje germaniovou diodu a BAY 89 průmyslový typ křemíkové diody.

R_V předřadný odpor
 U_1 vstupní napětí
 U_Z Zenerovo napětí
 I_Z Zenerův proud
 I_L proud zátěže

indexy max a min
 znamenají největší
 a nejmenší hodnotu

S činitel stabilizace
 U_2 výstupní napětí

$$R_{Vmin} = \frac{U_{1max} - U_Z}{I_{Zmax} + I_{Lmin}}$$

$$R_{Vmax} = \frac{U_{1min} - U_Z}{I_{Zmin} + I_{Lmax}}$$

$$S = \frac{\Delta U_1 \cdot U_2}{\Delta U_2 \cdot U_1}$$

Tabulka: Značení polovodičových součástek

příklad:

B	A	Y	89
1.	2.	3.	písmeno

první písmeno (označení materiálu polovodiče)

A	germanium	D	např. indiumantimonid
B	křemík	R	polykrystalické látky pro magnetorezistory, fotoelementy
C	III. – V. materiál např. galiumarsenid		

druhé písmeno (typ součástky)

A	dioda	Q	vysílač záření
B	kapacitní dioda	R	řízený usměrňovač
C	NF-tranzistor	S	spínací tranzistor
D	NF-výkonový tranzistor	T	řízený výkonový usměrňovač
F	HF-tranzistor	Y	výkonová dioda
H	Hallův generátor	Z	Zenerova dioda
L	HF-výkonový tranzistor		
P	přijímač záření		

třetí písmeno a číslice

3. písmeno označuje (obchodně) průmyslové typy. Číslo pak slouží k číslování podle typů a hodnot

Otázky k opakování

- Jaký je nejdůležitější polovodičový materiál?
- Kolik valenčních elektronů mají atomy hlavních polovodičových prvků?
- Co rozumíme vlastní vodivostí polovodičů?
- Vysvětlete rozdíl mezi vlastní a nevlastní vodivostí.
- Jaké nosiče nábojů má polovodič typu P, jaké polovodiče typu N a jak vznikají?
- Jaké vlastnosti má zóna po obou stranách PN-přechodu diody?
- Vysvětlete činnost polovodičové diody.
- Jak se póluje dioda v propustném směru?
- Co se děje na PN přechodu, je-li provozován v závěrném směru?
- Porovnejte u diody difuzní napětí a prahové napětí.
- Jaké zvláštnosti mají Zenerovy diody?
- Vysvětlete Zenerův efekt a lavinový průraz u Zenerovy diody.
- Proč je třeba dávat u Zenerovy diody pozor na omezení proudu?
- Uveďte oblasti použití Zenerových diod.