

Polovodiče, diody

Odpor vodivého materiálu (např. vodiče) při dané teplotě:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

kde:

ρ je měrný odpor (jednotka: $[\Omega m]$, $1 \Omega m = 100 \Omega cm$)

L je délka vodiče $[m]$

S je průřez vodiče $[m^2]$

Materiál	rozsah ρ $[\Omega m]$
kov (vodič)	$10^{-8} \dots 10^{-6}$
polovodič	$10^{-6} \dots 10^8$
izolant	$10^8 \dots \infty$

Příklady na ρ :

materiál	měrný odpor při 300K $[\Omega.m]$
Ag	1.59×10^{-8}
Cu	1.68×10^{-8}
Au	2.4×10^{-8}
Al	2.8×10^{-8}
Fe	1.0×10^{-7}
Nichrom	1.1×10^{-6}
GaAs + příměsí	$10^{-5} \dots 10^0$
Ge	4.6×10^{-1}
Si	6.4×10^2
sklo	$10^{11} \dots 10^{16}$
vzduch	$1.3 \times 10^{16} \dots 3.3 \times 10^{16}$
vosk	1×10^{17}
PET	10^{21}
Teflon	$10^{23} \dots 10^{25}$

Polovodiče

- Prvky: Si, Ge, C
- Sloučeniny: GaAs, SiC, CdS, GaN, InGaN, AlGaInP, ...
- Organické materiály


Základní vlastnosti (a kde se uplatní):

- Negativní tepelná závislost odporu (termistory – rostoucí teplota, nižší odpor)
Pozor: pro kovy je typická kladná závislost
- Měrný odpor a typ vodivosti velmi závisí na příměsích (PN-přechody)
- Optické vlastnosti – např. materiály, které jsou průhledné pro dané vlnové délky (LED, fotočlánky, lasery)
- ... (termočlánky, varistory, detektory: plynu, mag. pole, ...)
- Odolnost součástek proti vysokým teplotám (Ge: max 75°C, Si: až 150°C, SiC: > 200°C)

Základní principy – přehled

- Elektronový obal atomu, valenční elektrony – u polovodičů 4
- Krystalová mřížka, poruchy mřížky (porucha může způsobit nefunkčnost součástky)
- Počet atomů v cm^3 je řádově 10^{22}
- Pásový model (je tam tolik atomů že, jelikož mají různé náboje, zařadí se do pásů, vodivostní a zakázaný pás, zahřátím skočí elektrony ze zakázaného pásu do vodivostního), šířka zakázaného pásu (křemík: 1.1eV)
https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_band_structure

- Pojem vlastní polovodič (Intrinsic Semiconductor) – vodivost vzniká jen teplem / světlem, vznikají díry, je čistý, vodí proudů málo
- Nosiče náboje: elektrony a "díry" (holes) (díra je jen fiktivní částice = chybí elektron)
- Generování dvojic elektron-díra a rekombinace (Rekombinace vytvoří foton s vlnovou šířkou zakázaného pásu, dochází k nim podle koncentrace děr v objemu)
- Role příměsí, vodivost typu P a N – do krystalové struktury polovodiče (4 elekt.) přidám 3 val. elektrony a vznikne P vodivost, nebo přidám 5 val. elektrony a vznikne vodivost typu N
- Závislost měrného odporu na koncentraci příměsí – přidáním příměsí se sníží měrný odpor (10x víc příměsí, 10x menší odpor)
- Závislost měrného odporu na teplotě – při větší teplotě vznikají víc páru elektron-díra a tím se vodivost zvyšuje

- Typ N: 

- Elektronová vodivost

- Typ P: 

- Děrová vodivost, ze zakázaného pásu skočí elektron do děr (+) a další elektron pak na jeho díru... díry se posunou až k pólu zdroje

Role příměsí v polovodiči

Příměsí (anglicky: *Dopants*) — viz Periodická tabulka prvků

Dva typy příměsí:

typ P: Si+B, Si+Al, ... — akceptory (díry)

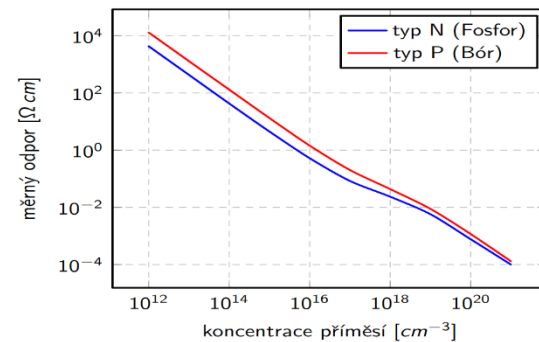
typ N: Si+P, Si+As, ... — donory (elektrony)

Majoritní (P:díry, N:elektrony) a minoritní nosiče náboje

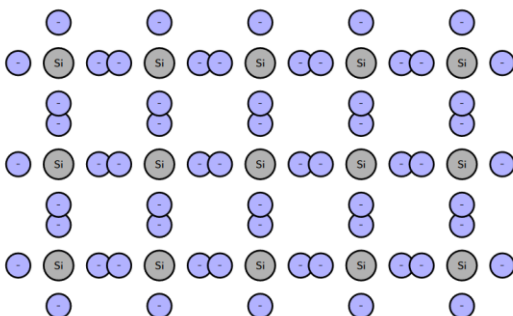
Koncentrace příměsí: 10^{12} až 10^{21} na cm^3
(Si atomů je cca $5 \times 10^{22}/cm^3$)

Měrný odpor křemíku (Si) může dosahovat 10^{-4} až $10^4 \Omega cm$ podle koncentrace příměsí — viz následující obrázek:

Měrný odpor křemíku (T=300K)

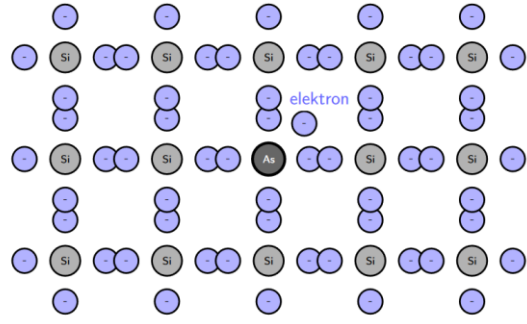
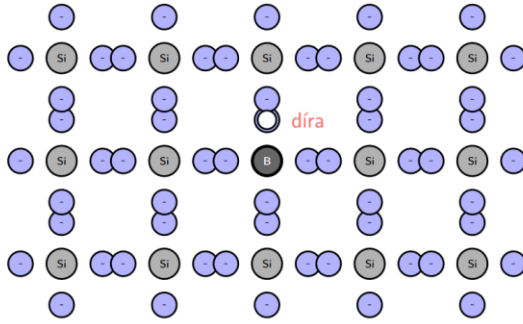


Polovodič (vlastní, *Intrinsic*)

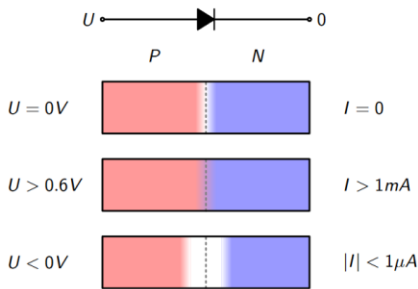


Polovodič typu P

Polovodič typu N



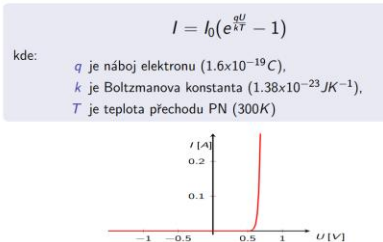
Přechod PN — struktura



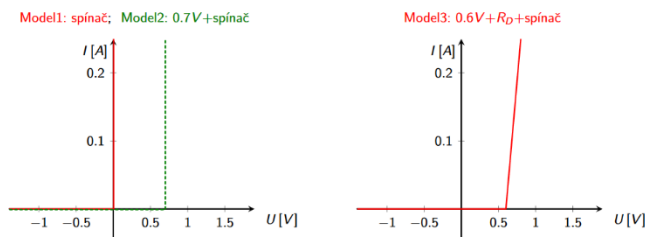
Pojmy: difúze nosičů náboje, rekombinace, potenciálová bariéra, oblast prostorového náboje (*Depletion region*)

- Elektronů přelezou z N do P v bílé části
- Bílá část – nejsou tam díry volné elektrony – intrinzický polovodič – špatně vodi proud
- Při zvětšování napětí se zmenšuje potenciálová bariéra, až při určitém napětí (0.6V) zmizí a obvod se uzavře
- Při záporném napětí se bílá zóna zvětšuje a vznikne něco jako kondenzátor
- Destruktivní jev, při neomezení proudu se monokrystal roztaví
- Vlastnosti PN:
 - Difúze, vznik potenciálové bariéry
 - Propustný směr (Forward):
 - Napětí v propustném směru U_F má zápornou teplotní závislost (cca $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$ pro křemík).
 - Závěrný směr (Reverse):
 - Malý závěrný proud I_R velmi roste s teplotou.
 - Průrazné napětí přechodu U_{BR} (lavinový jev).
 - Kapacita přechodu C (klesá při zvyšování U_R)
 - Doba zotavení t_{rr} – doba, jak dlouho trvá diodě se zotavit při přepólování
 - Citlivost přechodu na světlo (foton generuje dvojici elektron + díra)

V-A charakteristika PN přechodu (teoretická)



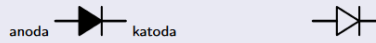
V-A charakteristika — zjednodušené modely



- Dioda (PN)

- Součástka tvořená přechodem PN v pouzdru se 2 vývody
- Princip funkce viz PN přechod

Schematický symbol (anoda=P, katoda=N):

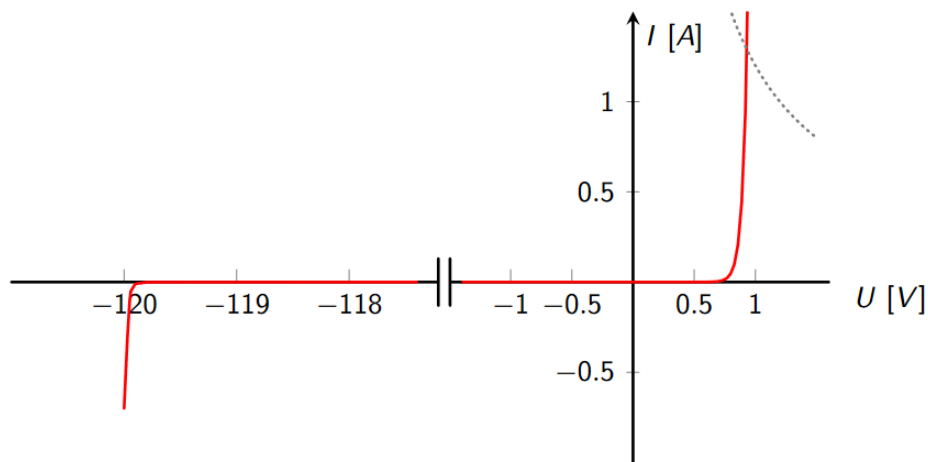


Šipka naznačuje směr proudu v propustném směru.

- Typické parametry diod: U_F – forward voltage, $I_{F(AV)}$ – průměrný usměrněný proud, U_{BR} – napětí v záporném směru, které ještě dioda vydrží, I_R - reverse leakage current, t_{rr} - doba zotavení, P_D – ztrátový výkon
- Zapouzdření:
 - Ovlivňuje max. ztrátový výkon P_D
 - Typické značení: proužek=katoda
- Příklady vyráběných diod: 1N4007, 1N4148, BAT18, BY127



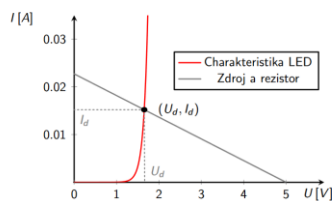
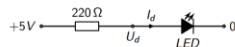
V-A charakteristika — reálná dioda



Lavinový průraz v závěrném směru
Omezení ztrátového výkonu ($P = UI$)

- Řešení obvodů s diodou

Řešení obvodů s diodou (graficky)

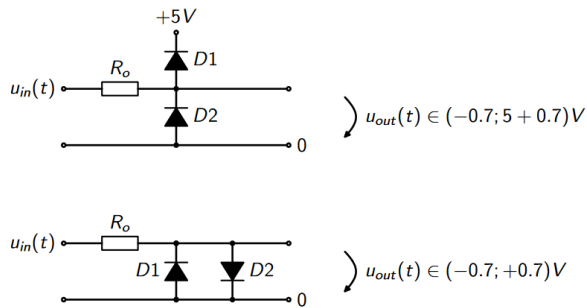


- Aplikace diod

- Usměrnovače střídavého napětí (zdroje)

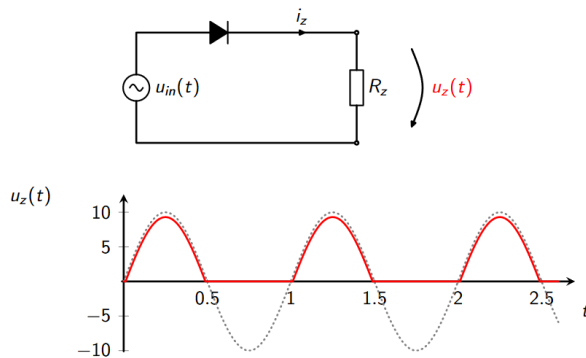
- Spínání (ochrany vstupů IO, spínání zdroje)
- Fotodiody: detekce světla, telekomunikace, fotovoltaika
- Měření teploty
- Detektory rádiových signálů (přijímače)
- Modulátory, násobiče kmitočtu (vysílače)
- Detekce radiace
- + Různé typy diod (Zenerova, LED, ...) = další aplikace
- Poznámky: sériové/paralelní zapojení diod (problémy, řešení)

Ochrana vstupů proti přepětí



○

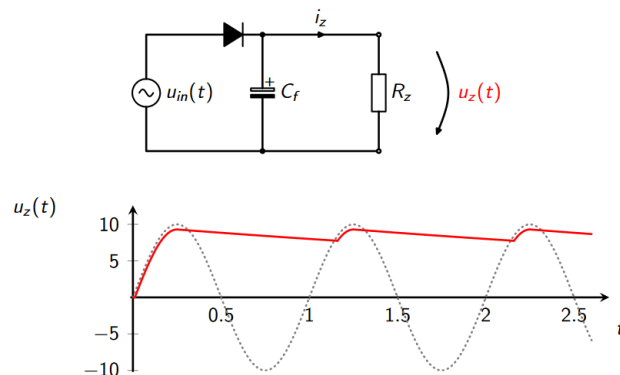
Jednocestný usměrňovač



○

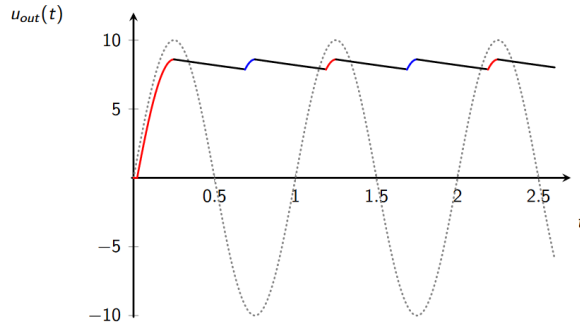
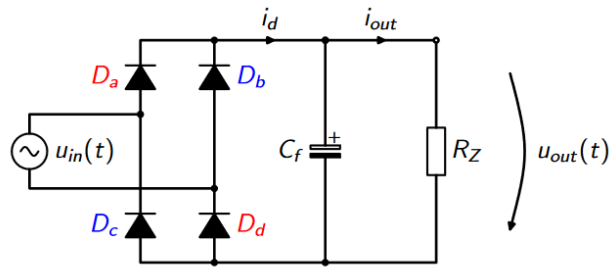
- Červená čára je o 0.7V menší než vstupní napětí
- Většinou se přidá filtrační kondenzátor

Jednocestný usměrňovač s filtračním kondenzátorem



▪

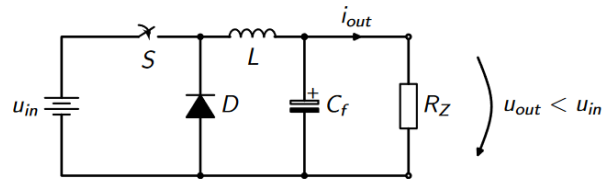
○ Můstkový usměrňovač



- Úbytek napětí je už $2 \times 0.7V$

○ Spínaný zdroj

Snižující měnič (*buck converter*) — dioda vede při rozpojení S



Poznámka: PWM (*Pulse-Width Modulation*)

- Další typy diod

- Zenerova/Lavinová (stabilizace, ochrana proti přepětí)



- LED (osvětlování, displeje, IR vysílač)



- Fotodiody (solární panely, IR přijímač)



- Schottky = přechod kov-polovodič (usměrňovače s malým U_F)



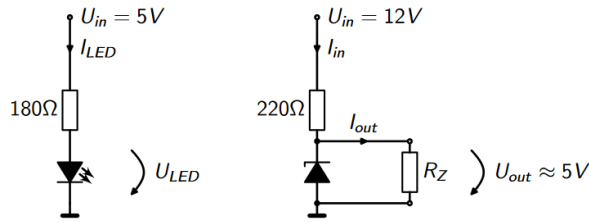
- Varikap, *Varactor* (vysokofrekvenční laděné obvody)



- PIN dioda, tunelová dioda, inverzní dioda, Gunnova dioda, ...

○

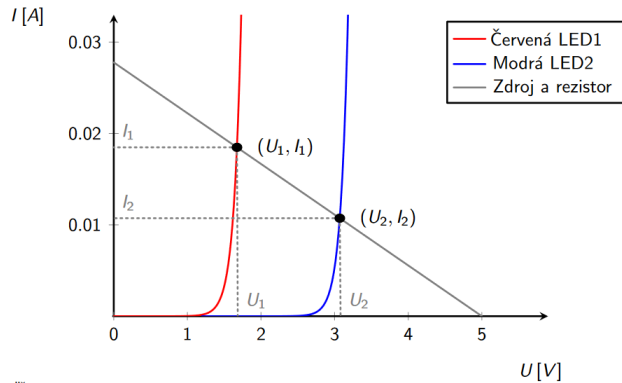
- Příklady: LED, Zenerova dioda



U_{LED} je podle barvy světla v rozsahu 1.6V (červená) až 3.3V (bílá).
 Takzvané *Zenerovy diody* se běžně vyrábí pro napětí 3V až 200V.

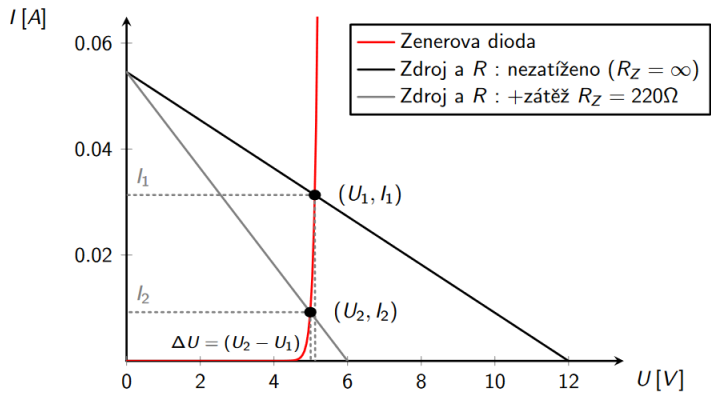
- Test znalostí: Vypočítejte *ztrátový výkon* na LED a na Zenerově diodě.

Příklad1: Řešení pro různé LED a rezistor 180Ω



- - Kdyby byli paralelně tak by svítila jen červená
 - Pokud by napětí bylo 4, ne 5, čára by měla stejný sklon ale končila by ve 4V
 - Sériové zapojení – sečtení vzdálenosti od Y osy

Příklad2: Stabilizovaný zdroj 5V se Zenerovou diodou, napájení $U_{in} = 12V$, $R = 220\Omega$ a proměnná zátěž R_Z



- - Tenhle obvod je zvaný *stabilizátorem napětí*