

IEL — Polovodiče, diody

Petr Peringer
peringer AT fit.vutbr.cz

Vysoké učení technické v Brně,
Fakulta informačních technologií,
Božetěchova 2,
61266 Brno

(Verze: 8. října 2024)

Základní pojmy

Obsah:

- Měrný odpor materiálů (vodiče, polovodiče, izolanty)
- Polovodič, typ P a typ N
- Přechod PN
- Vlastnosti PN přechodu, modely
- Grafické řešení nelineárních obvodů
- Dioda
- Typy diod
- Aplikace diod

Poznámky: přechod kov-polovodič, ohmický kontakt

Vodiče, polovodiče, izolanty

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	$10^8 \dots \infty$

Měrný odpor — příklady

materiál	měrný odpor při 300K [$\Omega \cdot m$]
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 + příměsi	$10^{-5} \dots 10^6$
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	$10^{23} \dots 10^{25}$

(Mendeleev's) Periodic Table of Chemical Elements via TikZ

1 IA																	18 VIIIA											
1	1 1.0079 H Hydrogen															2 4.0025 He Helium												
2	3 6.941 Li Lithium	4 9.0122 Be Beryllium															5 10.811 B Boron	6 12.011 C Carbon	7 14.007 N Nitrogen	8 15.999 O Oxygen	9 18.998 F Fluorine	10 20.180 Ne Neon						
3	11 22.990 Na Sodium	12 24.305 Mg Magnesium	13 26.982 Al Aluminium	14 28.086 Si Silicon	15 30.974 P Phosphorus	16 32.065 S Sulphur	17 35.453 Cl Chlorine	18 39.948 Ar Argon																				
4	19 39.098 K Potassium	20 40.078 Ca Calcium	21 44.956 Sc Scandium	22 47.867 Ti Titanium	23 50.942 V Vanadium	24 51.996 Cr Chromium	25 54.938 Mn Manganese	26 55.845 Fe Iron	27 58.933 Co Cobalt	28 58.933 Ni Nickel	29 63.546 Cu Copper	30 65.39 Zn Zinc	31 69.723 Ga Gallium	32 72.64 Ge Germanium	33 74.922 As Arsenic	34 78.96 Se Selenium	35 79.904 Br Bromine	36 83.8 Kr Krypton										
5	37 85.468 Rb Rubidium	38 87.62 Sr Strontium	39 88.906 Y Yttrium	40 91.224 Zr Zirconium	41 92.906 Nb Niobium	42 95.94 Mo Molybdenum	43 96 Tc Technetium	44 101.07 Ru Ruthenium	45 102.91 Rh Rhodium	46 106.42 Pd Palladium	47 107.87 Ag Silver	48 112.41 Cd Cadmium	49 114.82 In Indium	50 118.71 Sn Tin	51 121.76 Sb Antimony	52 127.6 Te Tellurium	53 126.9 I Iodine	54 131.29 Xe Xenon										
6	55 132.91 Cs Caesium	56 137.33 Ba Barium	57-71 57-71 La-Lu Lanthanide	72 178.49 Hf Hafnium	73 180.95 Ta Tantalum	74 183.84 W Tungsten	75 186.21 Re Rhenium	76 190.23 Os Osmium	77 192.22 Ir Iridium	78 195.08 Pt Platinum	79 196.97 Au Gold	80 200.59 Hg Mercury	81 204.38 Tl Thallium	82 207.2 Pb Lead	83 208.98 Bi Bismuth	84 209 Po Polonium	85 210 At Astatine	86 222 Rn Radon										
7	87 223 Fr Francium	88 226 Ra Radium	89-103 89-103 Ac-Lr Actinide	104 261 Rf Rutherfordium	105 262 Db Dubnium	106 266 Sg Seaborgium	107 264 Bh Bohrium	108 277 Hs Hassium	109 268 Mt Meitnerium	110 268 Ds Darmstadtium	111 280 Rg Roentgenium	112 285 Uub Ununbium	113 284 Uut Ununtrium	114 289 Uuq Ununquadium	115 288 Uup Ununpentium	116 293 Uuh Ununhexium	117 292 Uus Ununseptium	118 294 Uuo Ununoctium										
			57 138.91 La Lanthanum	58 140.12 Ce Cerium	59 140.91 Pr Praseodymium	60 144.24 Nd Neodymium	61 145 Pm Promethium	62 150.36 Sm Samarium	63 151.96 Eu Europium	64 157.25 Gd Gadolinium	65 158.93 Tb Terbium	66 162.58 Dy Dysprosium	67 164.93 Ho Holmium	68 167.26 Er Erbium	69 168.93 Tm Thulium	70 173.04 Yb Ytterbium	71 174.97 Lu Lutetium											
			89 227 Ac Actinium	90 232.04 Th Thorium	91 231.04 Pa Protactinium	92 238.03 U Uranium	93 237 Np Neptunium	94 244 Pu Plutonium	95 243 Am Americium	96 247 Cm Curium	97 247 Bk Berkelium	98 251 Cf Californium	99 252 Es Einsteinium	100 257 Fm Fermium	101 258 Md Mendelevium	102 259 No Nobelium	103 262 Lr Lawrencium											

Z	mass	Symbol	name
1	1.0079	H	Hydrogen
2	4.0025	He	Helium

- Alkali Metal
- Alkaline Earth Metal
- Metal
- Metalloid
- Non-metal
- Halogen
- Noble Gas
- Lanthanide/Actinide

Zdroj: <https://texample.net/tikz/examples/periodic-table-of-chemical-elements/>

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)
Pozor: pro kovy je typická kladná závislost
- Měrný odpor a typ vodivosti velmi závisí na příměsích (PN-přechody)
- Optické vlastnosti (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
- Krystalová mřížka, poruchy mřížky
- Počet atomů v cm^3 je řádově 10^{22}
- Pásový model, šířka zakázaného pásu (křemík: $1.1eV$)
https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_band_structure
- Pojem *vlastní polovodič (Intrinsic Semiconductor)*
- Nosiče náboje: elektrony a "díry" (*holes*)
(díra je jen fiktivní částice = chybí elektron)
- Generování dvojic elektron-díra a *rekombinace*
- Role příměsí, vodivost typu P a N
- Závislost měrného odporu na koncentraci příměsí
- Závislost měrného odporu na teplotě

Role příměsí v polovodiči

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

Dva typy příměsí:

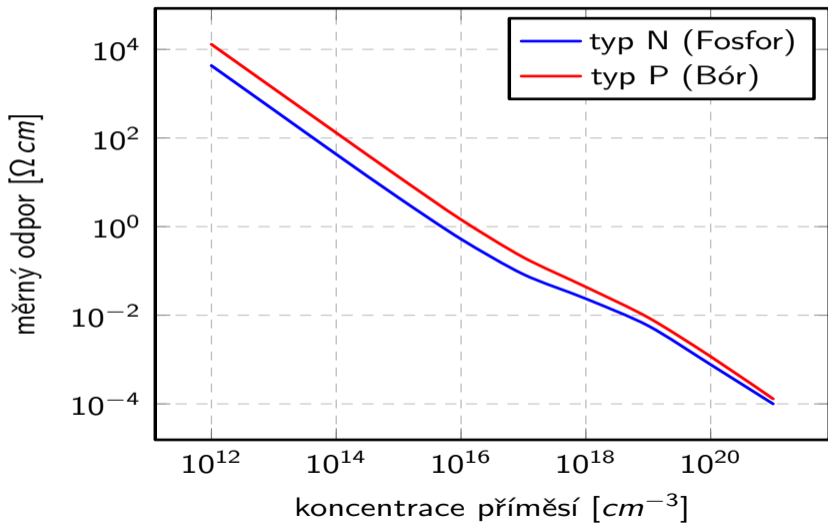
typ P: Si+B, Si+Al, ... — akceptory (díry)

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

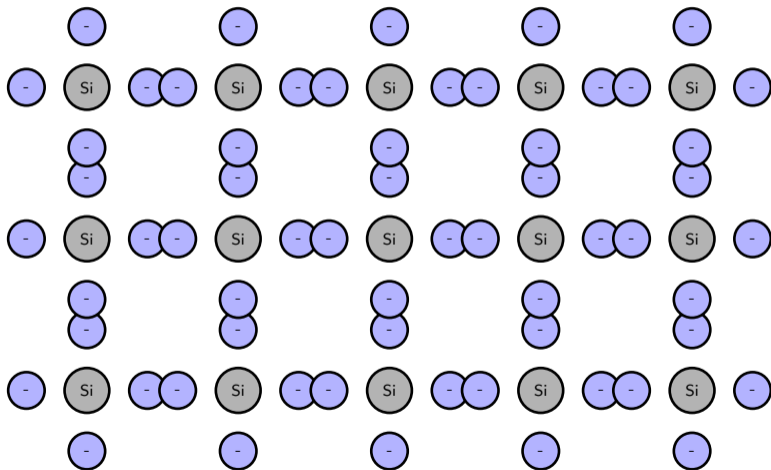
Majoritní (P:díry, N:elektrony) a minoritní nosiče náboje

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

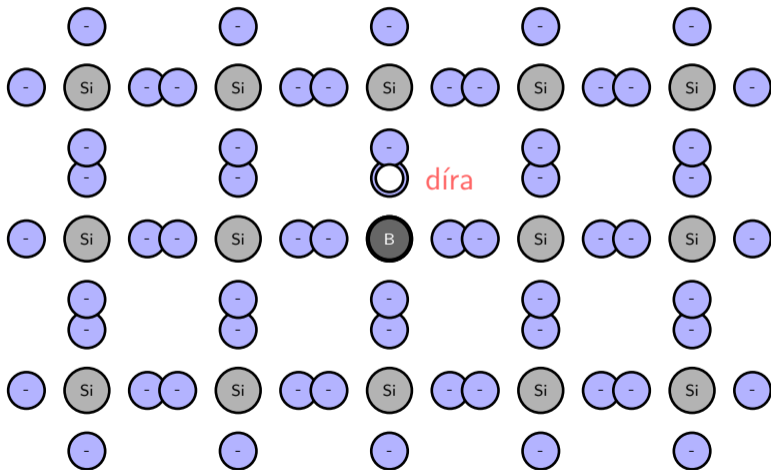
Měrný odpor křemíku (Si) může dosahovat 10^{-4} až $10^4 \Omega cm$ podle koncentrace příměsí — viz následující obrázek:

Měrný odpor křemíku ($T=300\text{K}$)

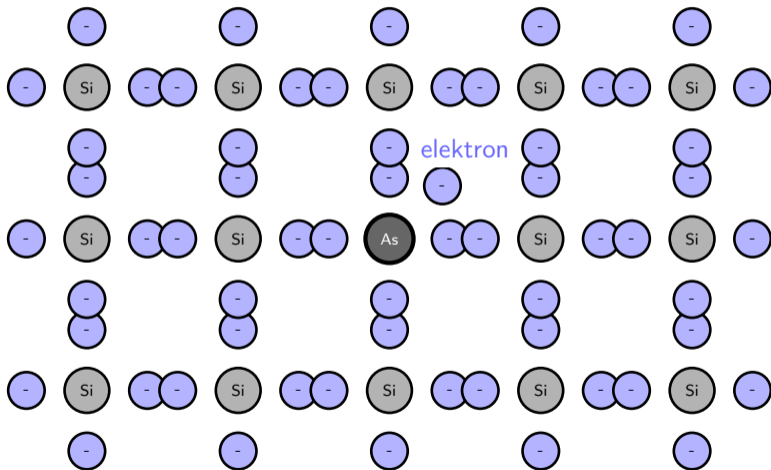
Polovodič (vlastní, *Intrinsic*)



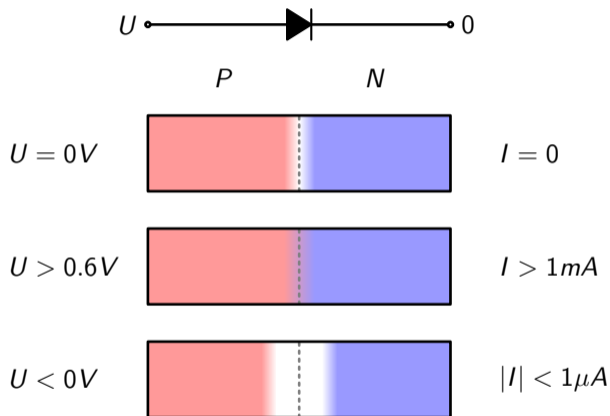
Polovodič typu P



Polovodič typu N



Přechod PN — struktura



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

Vlastnosti přechodu 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}
- Citlivost přechodu na světlo (foton generuje dvojici elektron+díra)

V-A charakteristika PN přechodu (teoretická)

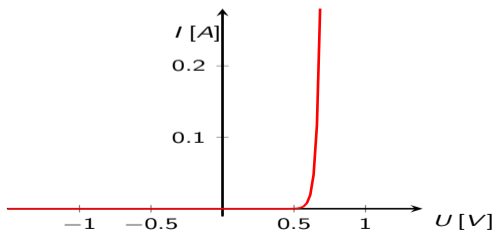
$$I = I_0 \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right)$$

kde:

q je náboj elektronu ($1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$),

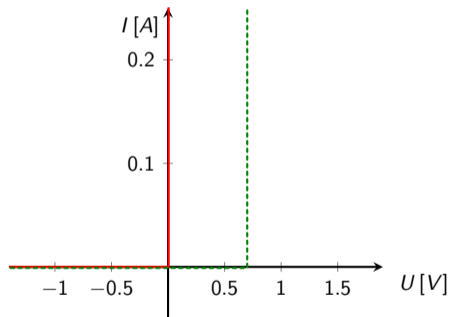
k je Boltzmanova konstanta ($1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$),

T je teplota přechodu PN (300 K)

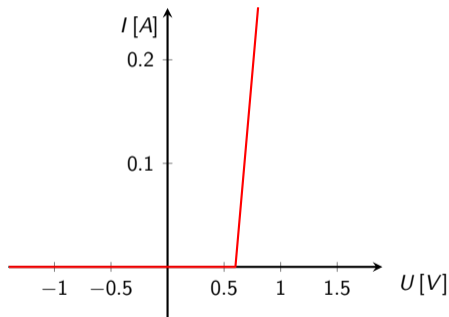


V-A charakteristika — zjednodušené modely

Model1: spínač; Model2: $0.7V$ +spínač



Model3: $0.6V + R_D$ +spínač



Dioda (PN)

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

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

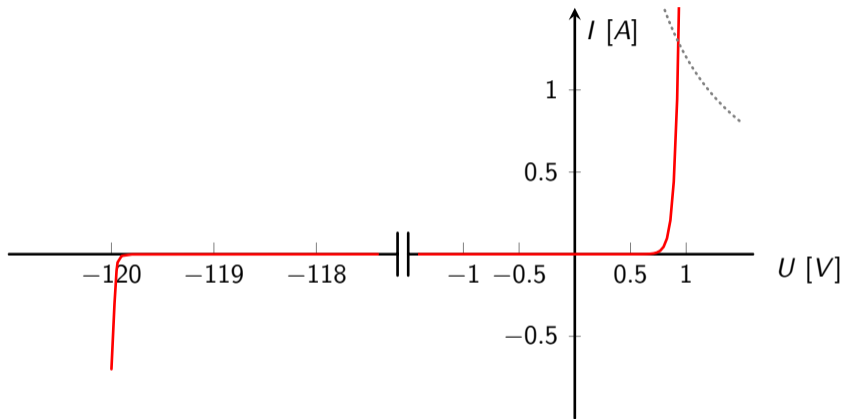


Šipka naznačuje směr proudu v propustném směru.

- Typické parametry diod: U_F , $I_{F(AV)}$, U_{BR} , I_R , t_{rr} , P_D
- Zapouzdření:
 - Ovlivňuje max. ztrátový výkon P_D
 - Typické značení: *proužek=katoda*
- Příklady vyráběných diod: 1N4007, 1N4148, BAT18, BY127

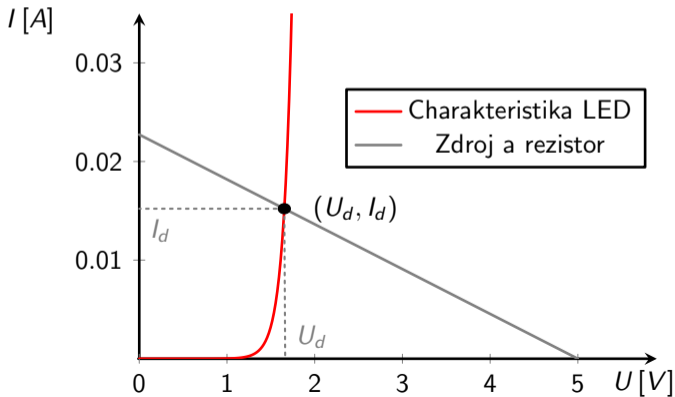
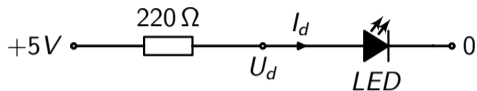


V-A charakteristika — reálná dioda



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

Řešení obvodů s diodou (graficky)

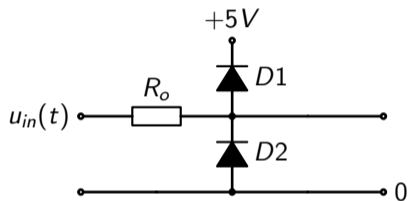


Aplikace diod

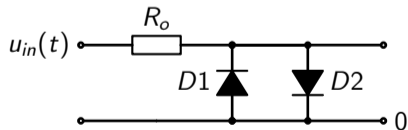
- Usměrňovače střídavého napětí (zdroje)
- Spínání (ochrany vstupů IO, spínané zdroje)
- Fotodioda: detekce světla, telekomunikace, fotovoltaika
- Měření teploty
- Detektory radiových signálů (přijímače)
- Modulátory, násobiče kmitočtu (vysílače)
- Detekce radiace
- + Různé typy diod (Zenerova, LED, ...) = další aplikace

Poznámky: sériové/paralelní zapojení diod (problémy, řešení)

Ochrana vstupů proti přepětí

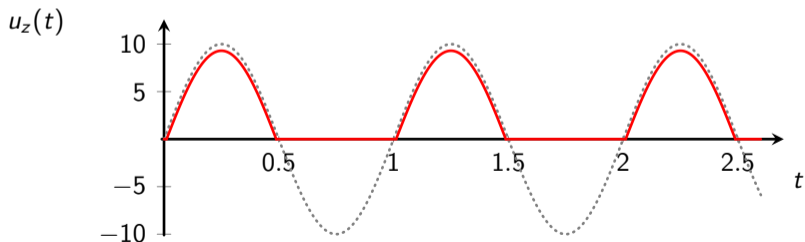
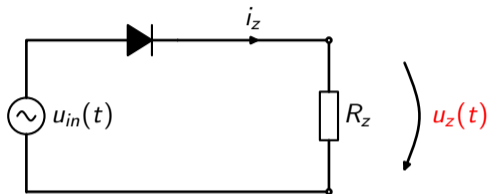


$$u_{out}(t) \in (-0.7; 5 + 0.7)V$$

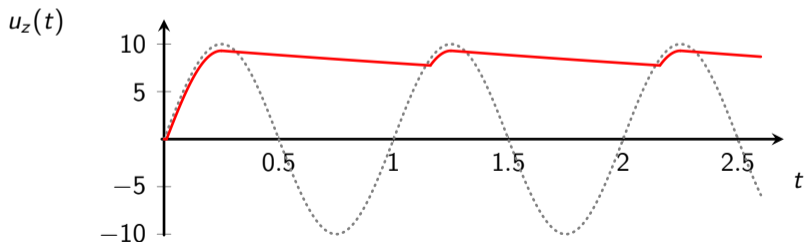
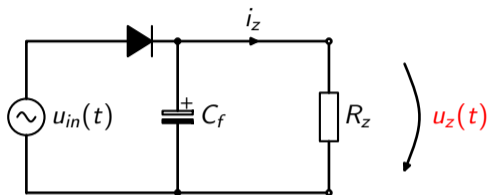


$$u_{out}(t) \in (-0.7; +0.7)V$$

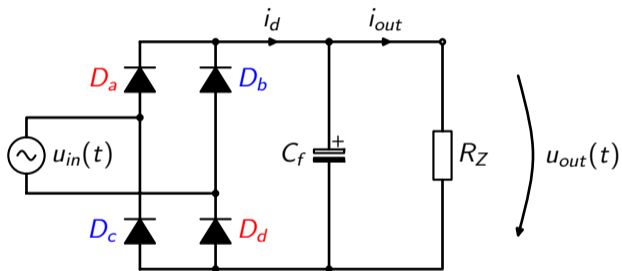
Jednocestný usměrňovač



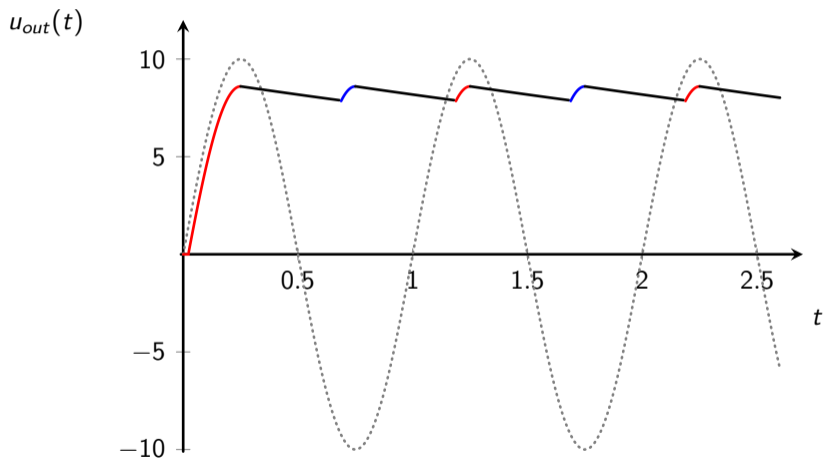
Jednocestný usměrňovač s filtračním kondenzátorem



Můstkový usměrňovač

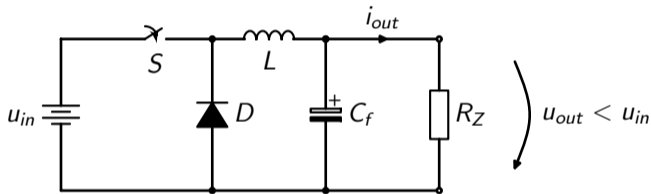


Dvoucestně usměrněné napětí



Spínaný zdroj

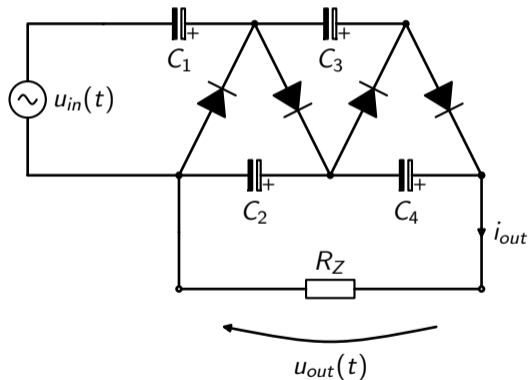
Snižující měnič (*buck converter*) — dioda vede při rozpojení S



Poznámka: PWM (*Pulse-Width Modulation*)

Test znalostí

Určete co dělá následující obvod:



Další typy diod (a typické aplikace)

- 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)

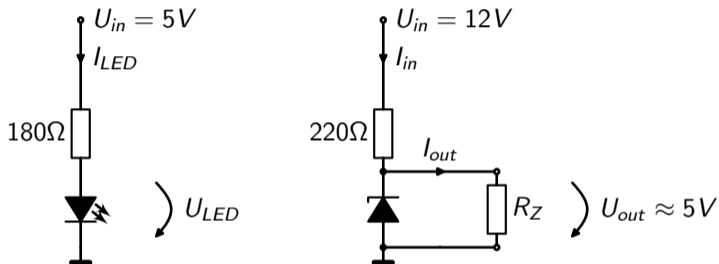


- Varikap, *Varactor* (vysokofrekvenční laděné obvody)



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

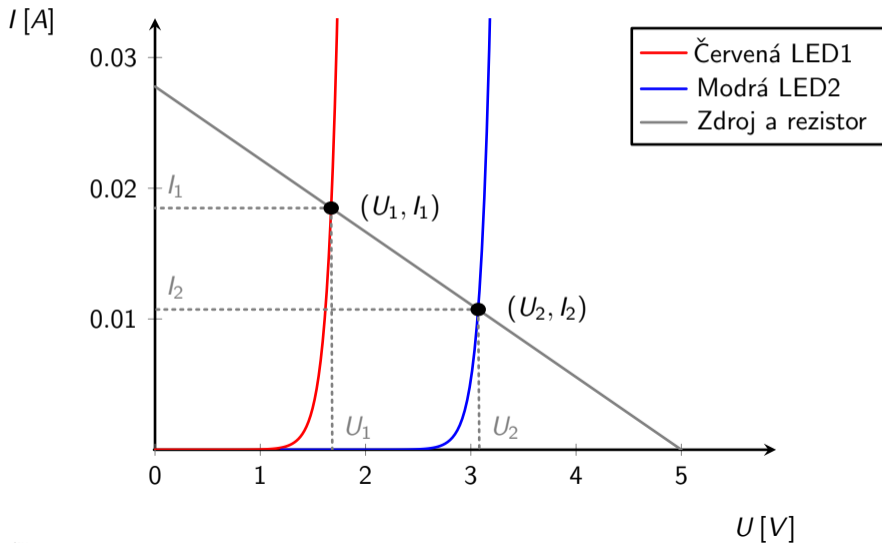
Příklady: LED, Zenerova dioda



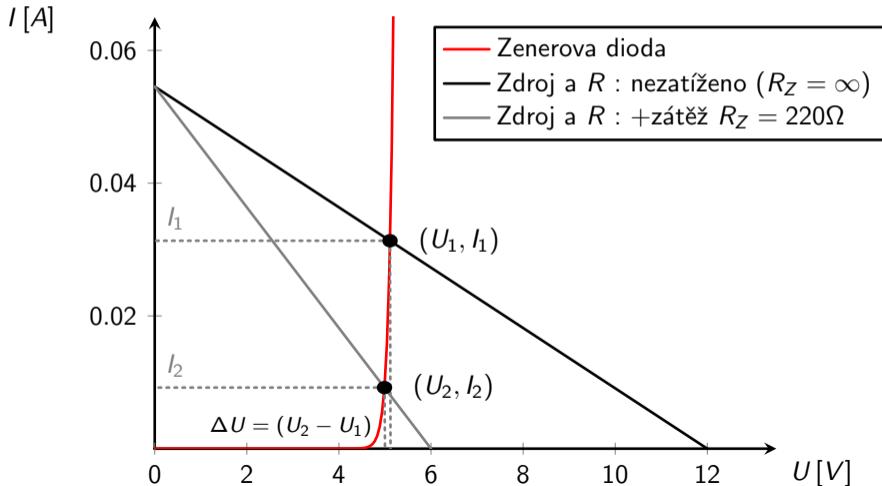
U_{LED} je podle barvy světla v rozsahu 1.6V (červená) až 3.3V (bílá).
 Takzvané *Zenerovy diody* se běžně vyrábí pro napětí 3V až 200V.

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

Příklad1: Řešení pro různé LED a rezistor 180Ω



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



Závěr

Shrnutí:

- Základní principy polovodičových součástek
- Přechod PN a jeho vlastnosti
- Dioda
- Aplikace diod
- Grafické řešení nelineárních obvodů
- Doplnková literatura viz WWW

- Co jsme úmyslně vynechali (energetické hladiny, Hallův jev, kontakt kov-polovodič, další aplikace, ...)