



## Elektronika a Mikroelektronika A4B34EM

### 2. přednáška

- základní pojmy
- odpory, kapacitory, induktory
- polovodiče



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Základní pojmy

### ■ Elektrický proud

■ *Množství náboje, které projde určitým průřezem za jednotku času*

■ *Jednotka Ampér*

■ **Ampér** je stálý elektrický proud, který při průchodu dvěma přímými rovnoběžnými nekonečně dlouhými vodiči zanedbatelného kruhového průřezu umístěnými ve vakuu ve vzájemné vzdálenosti 1 metr vyvolá mezi nimi stálou sílu o velikosti  $2 \cdot 10^{-7}$  newtonu na 1 metr délky vodiče.



**André Marie Ampère**

francouzský matematik a fyzik, který proslul zejména svými pracemi z oblasti magnetismu a elektrodynamiky.



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Základní pojmy – Elektrické napětí

### ■ Elektrické napětí

■ *Rozdíl elektrických potenciálů mezi dvěma body v prostoru*

■ *Jednotka Volt*

■ Napětí 1 **Volt** je takové napětí, které je mezi konci vodiče, do kterého konstantní proud 1 A dodává výkon 1 W. V takovém případě má vodič odpor 1  $\Omega$ .



**Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta**  
italský fyzik proslulý svými objevy v oboru elektřiny. Objevil například statickou elektřinu, elektrický článek nebo kondenzátor.



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Základní pojmy - Elektrické napětí

■ **Stejnoseměrné napětí** je takové napětí, které nemění v čase svojí polaritu, velikost měnit může

■ **Střídavé napětí** je napětí, které se v čase mění s určitou periodou, přičemž jeho střední hodnota nemusí být nulová. Časový průběh (tvar) napětí může být libovolný, nejčastěji se můžeme setkat se sinusovým průběhem. Dalšími průběhy mohou být pilovité, obdélníkové nebo libovolné jiné

■ **Efektivní hodnota** střídavého napětí je takové napětí stejnosměrného proudu, při kterém se ve stejném vodiči vytvoří stejné množství tepla.



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Základní pojmy – Elektrický výkon

### ■ Elektrický výkon

■ *Stejnoseměrný elektrický výkon je součin napětí a proudu, jelikož změnu práce lze vyjádřit jako změnu elektrického náboje při daném napětí, tzn.  $\Delta W = U \Delta Q = UI \Delta t$*

$$P = \frac{dW}{dt} = U \cdot \frac{dQ}{dt} = U \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}$$

kde  $Q$  je elektrický náboj,  $U$  je napětí a  $I$  je proud.

■ *U střídavého výkonu je výpočet složitější protože závisí mimo velikosti napětí a proudu také na tvaru signálu a vzájemném fázovém posuvu napětí a proudu.*



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

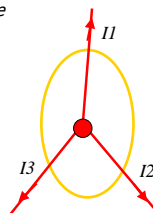


## Kirchhoffovy zákony

■ Pravidla formulující principy zachování náboje a energie v elektrických obvodech

■ **První Kirchhoffův zákon (o proudech, o uzlech)**

■ *Algebraický součet proudů v kterémkoliv uzlu obvodu je roven nule*



$$\sum I = 0$$



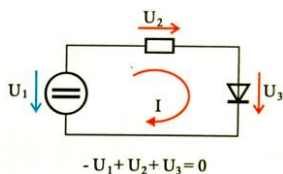
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Kirchhoffovy zákony

### ■ Druhý Kirchhoffův zákon (o napětích, o smyčkách)

- Součet svorkových napětí proudů elektrického obvodu v libovolné uzavřené smyčce se rovná nule.

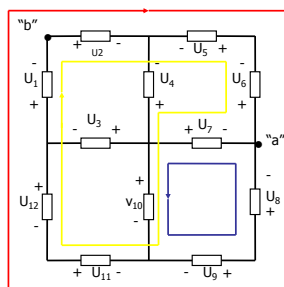


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Kirchhoffovy zákony

Suma úbytků napětí v uzavřené smyčce = 0



Modrá smyčka od bodu "a"  
 $-U_7 + U_{10} - U_9 + U_8 = 0$

Červená smyčka od bodu "b"  
 $+U_2 - U_5 - U_6 - U_8 + U_9 - U_{11} - v_{12} + v_1 = 0$

Žlutá smyčka od bodu "b"  
 $+U_2 - U_5 - U_6 - U_7 + U_{10} - U_{11} - U_{12} + U_1 = 0$



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

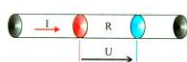


## Ohmův zákon

- Ohmův zákon vyjadřuje vztah mezi elektrickým odporem, napětím a proudem.

$$U = R \cdot I$$

- R je elektrický odpor vodiče mezi jeho dvěma průřezy, mezi nimiž je napětí U



Georg Simon Ohm (16. března 1789, Erlangen, Bavorsko – 7. července 1854)

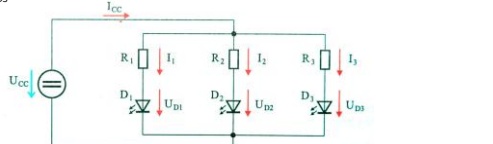


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Ohmův a Kirchhoffovy zákony - příklad

Vypočítejte úbytky napětí na rezistorech R1, R2 a R3 víte-li že, napájecí napětí  $U_{cc} = 5$  V  
 $U_{D1} = 1.7$  V – červená LED dioda  
 $U_{D2} = 2.2$  V – zelená LED dioda  
 $U_{D3} = 3.0$  V – modrá LED dioda



Řešení:

$$\begin{aligned} -U_{cc} + U_{R1} + U_{D1} &= 0 & U_{R1} &= U_{cc} - U_{D1} = 5 - 1.7 = 3.3 \text{ V} \\ -U_{cc} + U_{R2} + U_{D2} &= 0 & U_{R2} &= U_{cc} - U_{D2} = 5 - 2.2 = 2.8 \text{ V} \\ -U_{cc} + U_{R3} + U_{D3} &= 0 & U_{R3} &= U_{cc} - U_{D3} = 5 - 3.0 = 2.0 \text{ V} \end{aligned}$$

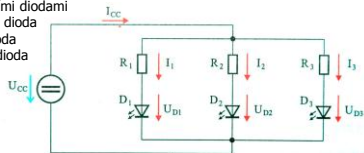


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Ohmův a Kirchhoffovy zákony - příklad

Vypočítejte velikosti odporů R1, R2 a R3 a celkový odběr jsou-li (dle katalogových hodnot) proudy protékajícími diodami  
 $I_1 = 12$  mA – červená LED dioda  
 $I_2 = 8$  mA – zelená LED dioda  
 $I_3 = 20$  mA – modrá LED dioda



Řešení:

$$\begin{aligned} R_1 &= U_{R1} / I_1 = 257 \\ R_2 &= U_{R2} / I_2 = 350 \\ R_3 &= U_{R3} / I_3 = 100 \end{aligned}$$

Celkový odběr:

$$\begin{aligned} I_{cc} - I_1 - I_2 - I_3 &= 0 \\ I_{cc} &= I_1 + I_2 + I_3 = 40 \text{ mA} \end{aligned}$$

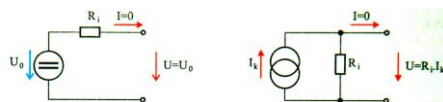


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Zdroje napětí a proudu

- Zdroje napětí a proudu si představujeme jako spojení ideálního zdroje  $U_0$  a jeho vnitřního odporu  $R_i$



Nezatížený napěťový zdroj – napětí naprázdno

Nezatížený proudový zdroj – napětí naprázdno (u ideálního zdroje by bylo nekonečné)

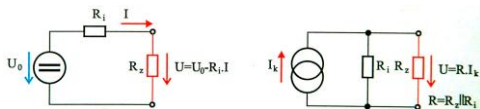


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Zdroje napětí a proudu

- Zatížený zdroj
- Zdroje napětí a proudu si představujeme jako spojení ideálního zdroje  $U_0$  a jeho vnitřního odporu  $R_i$



Zatížený napěťový zdroj – na vnitřním odporu vzniká úbytek díky protékajícímu proudu. Důsledkem je pokles napětí na výstupních svorkách zdroje

Zatížený proudový zdroj – měl by zátěží  $R_z$  protlačit požadovaný proud. Měl by být splněn požadavek  $R_z \ll R_i$

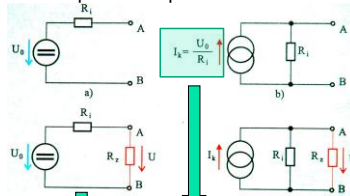


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Dualita zdroje napětí a proudu

- V praxi se často využívá tzv. dualita. Spojení zdroje napětí a vnitřního odporu se dá převést na spojení zdroje proudu a jeho vnitřního odporu. Toto platí i obráceně



$$U = \frac{R_z}{R_i + R_z} \cdot U_0 \quad \Rightarrow \quad U = \frac{R_z \cdot R_i}{R_i + R_z} \cdot I_k = \frac{R_z}{R_i + R_z} \cdot U_0$$

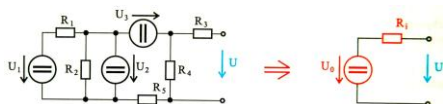


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Theveninův teorém

- Libovolně složitý lineární aktivní dvojpól je možné z hlediska libovolných dvou svorek nahradit jedním ideálním zdrojem napětí a sériově zapojeným odporem

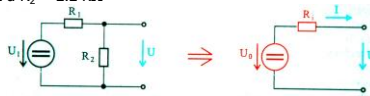


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Theveninův teorém - Příklad

- Zjednodušte obvod na obrázku. Napětí  $U_1$  je 15 V a velikost odporů  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$  a  $R_2 = 2.2 \text{ k}\Omega$



- Napětí  $U_0$  je dáno jako výstupní napětí naprázdno

$$U = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_1 = 10.3 \text{ V}$$

- $R_i$  určíme jako paralelní kombinaci  $R_1$  a  $R_2$ . Zdroj napětí je nahrazen zkratem

$$R_i = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 685.5 \Omega$$

- Výstupní napětí:

$$U = U_0 - R_i \cdot I = 10.3 - 687.5 \cdot I$$



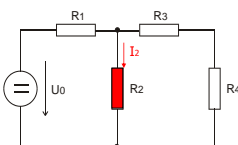
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Theveninův teorém – Příklad 2

- Vypočítejte proud  $I_2$  tekoucí rezistorem  $R_2$ , je-li dáno:

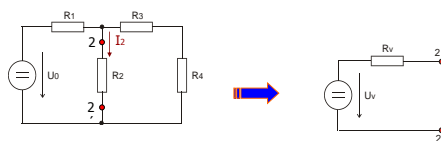
- $U_0 = 15 \text{ V}$
- $R_1 = 5 \text{ k}\Omega$
- $R_2 = 15 \text{ k}\Omega$
- $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$
- $R_4 = 5 \text{ k}\Omega$



## Theveninův teorém – Příklad 2

- Každou lineární soustavu můžeme na jejich výstupních svorkách nahradit zdrojem napětí.

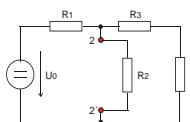
- Nejdříve tedy musíme označit výstupní svorky.
- Vzhledem k tomu, že počítáme proud rezistorem  $R_2$  ( $I_2$ ), budou výstupní svorky představovat spojení tohoto rezistoru se zbyvajícím obvodem:
- Na těchto svorkách tedy nahradíme zbyvajícím obvodem zdrojem napětí.



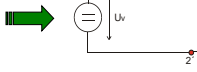


## Theveninův teorém – Příklad 2

Zapojení rozdělíme na dvě části:  
**lineární soustavu** s jejími výstupními svorkami (2 - 2') a  
**zátěž** ( $R_2$ )



Zapojení převedeme na zapojení s  
náhradním zdrojem napětí a jeho  
vnitřním odporem.



Pro náhradní zapojení je nutné určit charakteristické parametry náhradního  
zdroje napětí -  $U_v$  a  $R_v$ .



## Theveninův teorém – Příklad 2

Napětí náhradního zdroje určíme jako napětí  
naprázdno na výstupních svorkách ( $U_v = U_{22'}$ ).

Celkový proud  $I_0$  vytváří na jednotlivých  
rezistorech úbytky napětí  $U_1$ ,  $U_3$  a  $U_4$ .

Pro hledané napětí  $U_{22'}$  platí:

$$U_{22'} = U_0 - U_1 = U_3 + U_4$$

Jednotlivé úbytky napětí vypočítáme z Ohmova  
zákonu:  $U_1 = I_0 \cdot R_1$ ;  $U_3 = I_0 \cdot R_3$ ;  $U_4 = I_0 \cdot R_4$

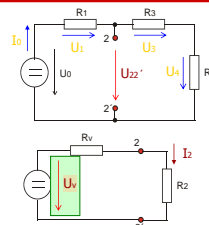
Dosadíme do rovnice pro  $U_{22'}$ :

Nejdříve vypočítáme celkový proud  $I_0$ :

$$I_0 = \frac{U_0}{R_1 + R_3 + R_4} = \frac{15}{5 + 10 + 5} = 0,75 \text{ mA}$$

Dosažením dostáváme:

$$U_{22'} = 15 - 3,75 = 7,5 + 3,75 = 11,25 \text{ V} = U_v$$



Nyní vypočítáme jednotlivé  
úbytky napětí:

$$U_1 = I_0 \cdot R_1 = 0,75 \cdot 5 = 3,75 \text{ V}$$

$$U_3 = I_0 \cdot R_3 = 0,75 \cdot 10 = 7,5 \text{ V}$$

$$U_4 = I_0 \cdot R_4 = 0,75 \cdot 5 = 3,75 \text{ V}$$



## Theveninův teorém – Příklad 2

Druhým charakteristickým parametrem náhradního zdroje je jeho vnitřní odpor  $R_v$ .

**Vnitřní odpor náhradního zdroje**  
napětí určíme jako **celkový odpor na**  
výstupních svorkách **lineární soustavy**  
při odpojené zátěži, když zdroj v  
soustavě vyřadíme ( $R_v = R_{22'}$ ).

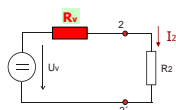
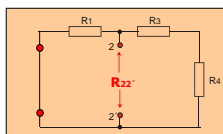
Nejdříve vyřadíme ideální zdroj.  
V zadané soustavě je jeden ideální zdroj  
napětí ( $U_0$ ), který vyřadíme **zkratem**.

Řešený obvod můžeme upravit.

Pro hledaný odpor  $R_{22'}$  platí:

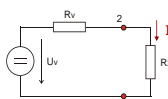
$$R_{22'} = R_1 // (R_3 + R_4)$$

$$R_{22'} = 5 // (10 + 5) = 3,75 \text{ k}\Omega$$



## Theveninův teorém – Příklad 2

Výpočet proudu  $I_2$  pro zadané hodnoty  $R_2$



Pro hledaný proud  $I_2$  platí:

$$I_2 = \frac{U_v}{R_v + R_2} \quad [\text{mA}; \text{V}, \text{k}\Omega] = 0,6 \text{ mA}$$

$$U_v = 11,25 \text{ V}$$

$$R_v = 3,75 \text{ k}\Omega$$



## Nortonův teorém

- Libovolně složitý lineární aktivní dvojpól je možné  
nahradit jedním ideálním zdrojem proudu a  
paralelně zapojeným odporem



## Pasivní součástky

- Rezistor
- Kapacitor
- Induktor

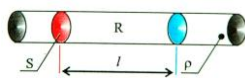




## Pasivní součástky - Rezistory

- Z praktického hlediska rezistory převádějí proud na napětí a naopak
- Pro odpor elektricky vodivého materiálu  $R$  platí vztah:

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



- $\rho$  – měrný elektrický odpor
- $l$  – délka vodiče
- $S$  – plocha příčného průřezu

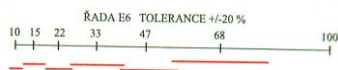


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Parametry rezistorů

- Charakterizují užité vlastnosti součástky a jsou uvedeny v katalogu
  - Např. jmenovitá hodnota odporu, jmenovitá zatížitelnost, tolerance...
- Řady jmenovitých hodnot
  - Rezistory se vyrábějí jen pro některé hodnoty dle dané tolerance
  - Typické řady: E6, E12, E24 (rozdělují dekádu hodnot rezistorů na určitý počet úseků)



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Parametry rezistorů

- Jmenovitá zatížitelnost

$$P = U \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R}$$

- Teplotní součinitel odporu
- Napěťový součinitel odporu (závislost na přiloženém napětí)
- Závislost na okolní vlhkosti
- Šumové vlastnosti
- Parazitní indukčnosti a kapacity



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

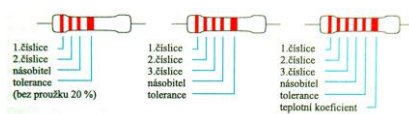


## Značení rezistorů

- Číselné značení



- Barevné kódy



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Kapacitory

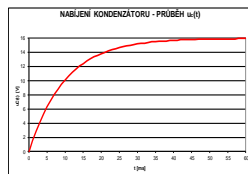
- Součástka schopná akumulovat elektrický náboj  $Q$
- Vztah mezi napětím a nábojem je:

$$Q = C U$$

- Proud kapacitou je přímo úměrný změně napětí na jeho svorkách:

$$I = C \frac{dU}{dt}$$

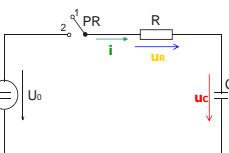
- Vzniká přechodový děj



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Nabíjení kapacitoru



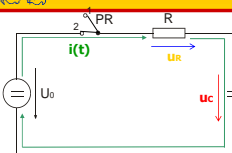
Přepínač vypnutý.  
Pro obvodové veličiny platí:  
 $u_C(t) = 0$  - kondenzátor je vybitý;  
 $i(t) = 0$  - obvod je rozpojený (PR v poloze 0);  
 $u_R(t) = 0$  - vzhledem k tomu, že  $i(t) = 0$ , nevznikne na R úbytek napětí.

**počáteční podmínky:**  
tj. podmínky v čase  $t = 0$ .

$$u_C(0) = i(0) = u_R(0) = 0.$$



## Nabíjení kapacitoru



Nyní přepneme přepínač PR z polohy 1 do polohy 2.

Vzhledem k tomu, že kapacitor C je vybitý a Rv zdroje je roven nule, bude počáteční proud obvodem omezen **pouze velikostí rezistoru R**. V okamžiku připojení zdroje  $U_0$  začne obvodem téct proud  $i(t) = U_0/R$ .

Kondenzátor se začne nabíjet přes rezistor R a napětí  $u_c$  se bude měnit podle vztahu

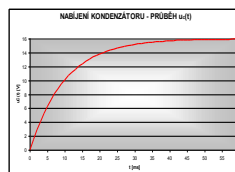
$$u_c(t) = U_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

Pro proud obvodem platí:  $i(t) = \frac{U_0 - u_c(t)}{R} = \frac{U_0 - U_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})}{R} = \frac{U_0 - U_0 + U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}}{R} = \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$

Napětí na rezistoru R je dáno vztahem:

$$u_R(t) = R i(t) = R \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

## Nabíjení kapacitoru



➤ průběh napětí na kondenzátoru  $u_c(t)$

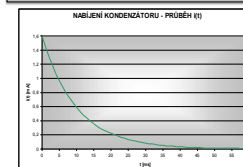
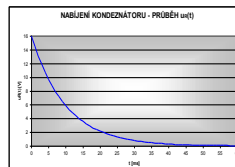
$$u_c(t) = U_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad [V; V, s, s]$$

➤ průběh napětí na rezistoru  $u_R(t)$

$$u_R(t) = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [V; V, s, s]$$

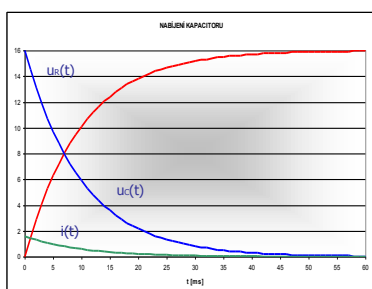
➤ průběh nabíjecího proudu  $i(t)$

$$i(t) = \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [A; V, \Omega, s, s]$$



## Nabíjení kapacitoru

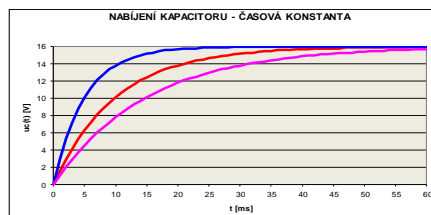
Průběhy v jednu grafu...



## Nabíjení kapacitoru

Průběhy pro různou hodnotu odporu R

- R = 5 kΩ; C = 1 μF; τ = 5 ms
- R = 10 kΩ; C = 1 μF; τ = 10 ms
- R = 15 kΩ; C = 1 μF; τ = 15 ms



## Kapacitory - vlastnosti

■ Kapacita deskového kondenzátoru:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}$$

■ Parametry kapacitorů

- přesnost kapacity
- ztrátový činitel
- teplotní součinitel kapacity
- izolační odpor

## Konstrukční typy kapacitorů

- Svitkové s dielektrikem z umělých hmot
  - velké rozměry, přesné, dobré vř vlastnosti
- Keramické kapacitory
  - Malé rozměry, velice nepřesné, nelineární
- Elektrolytické kapacitory
  - Největší hodnoty, nutná správná polarizace
- Monolitické v integrovaných obvodech
  - Velice omezená velikost





## Induktory

- Součástka schopná „udržet“ elektrický proud.
- Prochází-li elektrický proud  $I$  uzavřeným obvodem, vzniká magnetický tok:

$$\Phi = L \cdot I [\text{Wb}]$$

- **Indukčnost 1 H** znamená, že při stálém napětí **1 V** vzroste proud o **1 A** za **1 s**

$$L = \mu_0 \mu_r \frac{S}{l} \cdot N^2$$

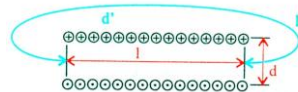


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Indukčnost příklad

- Vypočítejte indukčnost vzduchového induktoru dle obr. o délce  $l = 50 \text{ mm}$ , průměru  $d = 8 \text{ mm}$ , jeli počet závitů  $N = 100$



$$L = \mu_0 \mu_r \frac{S}{l} \cdot N^2 = \mu_0 \mu_r \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot l} \cdot N^2 = 12.7$$



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Induktory

- Parametry induktorů
  - Jmenovitá hodnota a zatížitelnost
  - stejnosměrný odpor
  - číselník jakosti  $Q$  (poměr reaktance a nežádoucího stejnosměrného odporu)
  - elektrická pevnost
  - rozsah pracovních teplot
- Nejdůležitější aplikace
  - Tlumička
  - Transformátor
  - Elektromotor, reproduktor, relé...



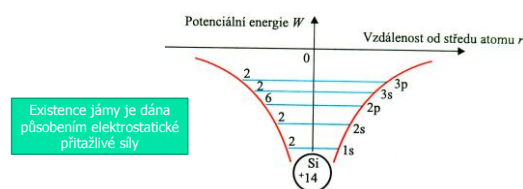
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Elektrická vodivost v pevných látkách

- Energetická pásová struktura
  - Atom křemíku Si (nejrozšířenější polovodičový materiál)

Potenciální energie elektronů osamělého atomu křemíku

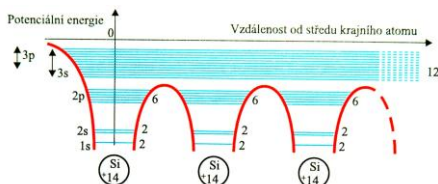


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Štěpení diskretních hladin v krystalu

- Krystalická mřížka – uspořádání, které se periodicky opakuje
  - Má nejkratší vzdálenost mezi atomy – mřížková konstanta
  - **Pauliho vylučovací princip:** žádné dva elektrony v celém krystalu nemohou existovat ve stejném kvantovém stavu
  - Proto se původní diskretní hladiny rozštěpí
  - Reálný počet je dán počtem atomů v krystalu (Pro Si  $10^{28} \text{ m}^{-3}$ )

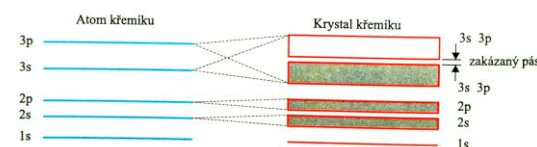


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Rozštěpení na energetické pásy (Si)

- Čtyři elektrony z každého atomu Si z nejvyšších hladin vytvoří **valenční elektrony**
- Jsou nejvíce vzdáleny od jádra
- Rozhodují o vzájemné vazbě atomů a vlastnostech látky



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



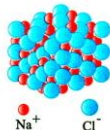


## Typy vazeb

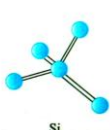
- **Kovová** – valenční elektrony jsou vázány jen volně – elektronový plyn
- **Iontová** – málo nebo hodně zaplněný valenční pás, tvoří ionty
- **Kovalentní** – je tvořena dvěma elektrony (každý od jednoho atomu) s opačným spinem



Iont kovu Elektronový plyn



Na<sup>+</sup> Cl<sup>-</sup>



Si

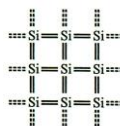


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

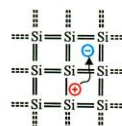


## Kovalentní vazba

- Alespoň čístečná kovalentní vazba je atributem pro polovodiče
- Každý Si má čtyři valenční elektrony



Při nízké teplotě



Při vyšší teplotě pár elektron-díra



Při vyšší teplotě pár elektron-díra v pásovém modelu

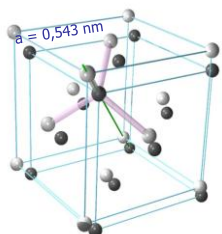


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Proč křemík ?

- Snadno dostupný - Druhý nejrozšířenější prvek v zemské kůře
- Plošně centrovaná kubická struktura
- Každý atom křemíku má čtyři sousedy se kterými tvoří vazbu



28,0885

<sup>14</sup>Si

2,33 g/cm<sup>3</sup>

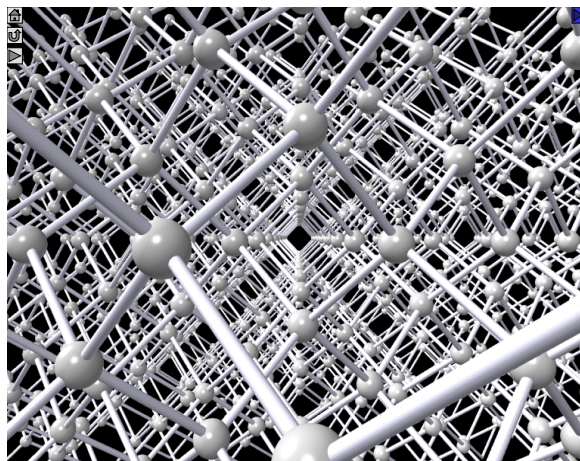
Křemík

### Proč je křemík tak oblíben?

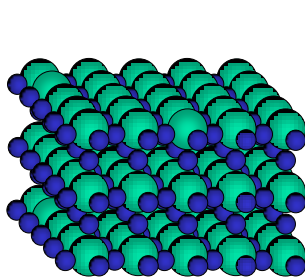
- ♦ Nejlevnější příprava vysoce čistého křemíku
- ♦ Vytváření termického oxidu – planární technologie
- ♦ Relativně vysoká hodnota měrného odporu intrinsického křemíku – 23 kΩ



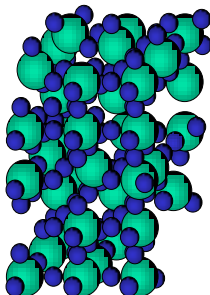
Jiří Jakovenko, katedra mikroelektroniky, ČVUT FEL



## Monokrystalický a amorfní Si



Monokrystalický



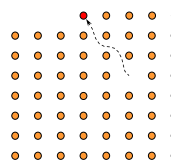
Amorfní



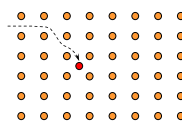
Jiří Jakovenko, katedra mikroelektroniky, ČVUT FEL



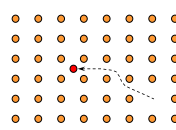
## Defekty v monokrystalu



Vakance



Intersticiální poloha



Frenkelova porucha



Jiří Jakovenko, katedra mikroelektroniky, ČVUT FEL

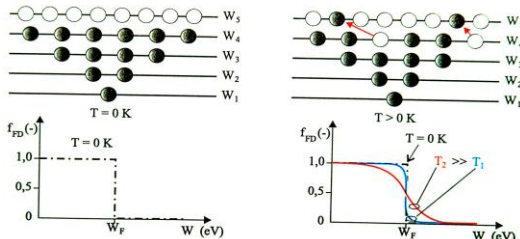




## Fermiho hladina $W_F$

- Fermi-Diracova rozdělovací funkce  $f_{FD}$ 
  - Pravděpodobnost, že náhodně zvolený elektron obsadí interval  $W + \Delta W$  z celkového množství dostupných energetických stavů

$f_{FD}(W_F) = 0,5$

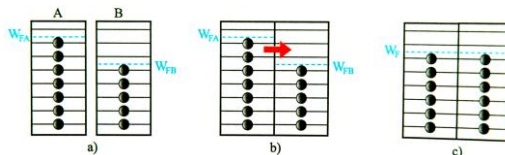


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Fermiho hladina pro dva materiály

- Dámeli dohromady dva materiály s různou polohou Fermiho hladiny, dojde k jejímu vyrovnání a nastane tepelná rovnováha
- Toto bude důležité pro vysvětlení PN přechodů !

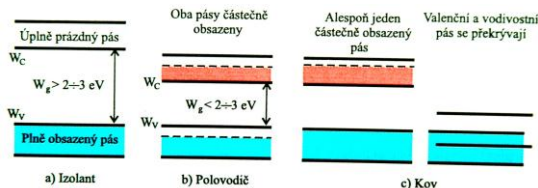


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Izolanty, kovy, polovodiče

- Šířka zakázaného pásu má zásadní význam pro hodnotu elektrické vodivosti
- Izolant**  $\rho = 10^{14} - 10^{20} \Omega \cdot \text{cm}$
- Polovodič**  $\rho = 10^{-4} - 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$
- Kov**  $\rho = 10^{-6} - 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$



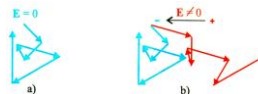
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Driftová rychlost a pohyblivost

- Při nenulové teplotě se volný elektron pohybuje mřížkou tepelnou rychlostí kterou vyvolí tepelné kmity mřížky a)

$$v_T = \frac{\sqrt{3kT}}{m} = \text{cca } 10^6 \text{ m/s pro } 300\text{K}$$



- V elektrickém poli je elektronu dodávána energie vnějšího na
- pět b) a pohybuje se driftovou rychlostí

$$v_n = -u_n \cdot E$$



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Elektronová a děrová vodivost

- Díry se pohybují ve valenčním pásu, elektrony ve vodivostním

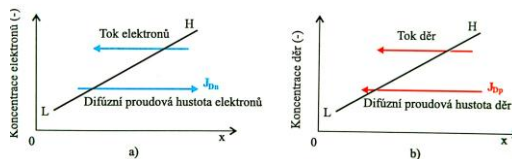


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Difúzní proud v polovodičích

- Částice (elektrony, díry) se pohybují z oblasti vysoké koncentrace do oblasti nízké koncentrace za vzniku tzv. **Difúzního proudu**



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Nevlastní polovodič

- Vlastní (intrinická) koncentrace nosičů náboje je v polovodiči při dané teplotě konstantní
- V polovodiči dochází k generaci a rekombinaci párů elektron-díra



- Ke konstrukci elektronických součástek potřebujeme vrstvy s různou koncentrací elektronů a děr
- Dosahujeme toho tzv. **dotací** vlastního polovodiče

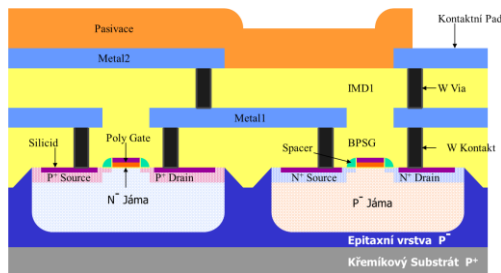


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## K čemu je to dobré ?

- Elektronické součástky

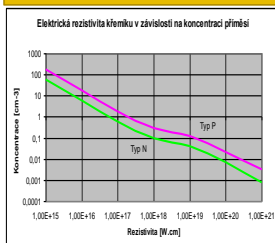


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Typ vodivosti křemíku

Příměsí některých prvků - **dopantů** - lze výrazně ovlivnit elektrickou vodivost křemíku **bór, fosfor, arzén**.



| Typ vodivosti | Typ vodivosti |
|---------------|---------------|
| P (Pozitivní) | N (Negativní) |
| 10,81         | 30,97376      |
| 5B            | 15P           |
| Bór           | Fosfor        |
|               | 74,9216       |
|               | 33As          |

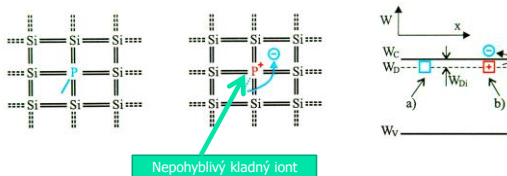


Jiří Jakovenko, katedra mikroelektroniky, ČVUT FEL



## Polovodič typu N

- Dotace **donorem** (prvek z páté skupiny F, As)
- **Majoritní nosiče** – elektrony
- **Minoritní nosiče** – díry

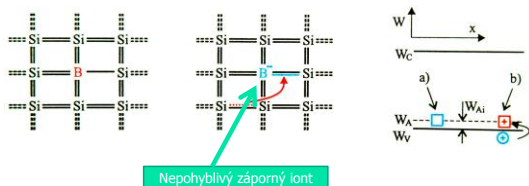


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Polovodič typu P

- Dotace **akceptorem** (prvek ze třetí skupiny B)
- **Majoritní nosiče** – díry
- **Minoritní nosiče** – elektrony



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL