



## Elektronika a Mikroelektronika A4B34EM

### 3. přednáška

- Polovodiče
- PN přechod
- Diody
- Usměrňovače



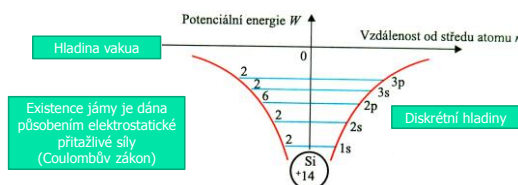
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Elektrická vodivost v pevných látkách

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

Potenciální energie elektronů osamělého atomu křemíku

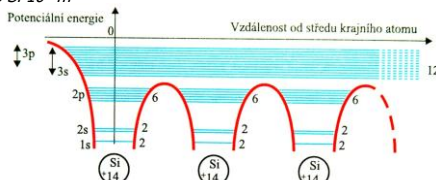


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## 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 hladin je dán počtem atomů v krystalu
  - Pro Si  $10^{28} m^{-3}$

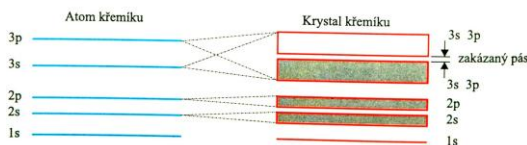


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Rozštěpení na energetické pásy (Si)

- Energetické hladiny jsou pro více atomů tak blízko, že je považujeme za **pás hodnot energií**
- Čtyři elektrony z každého atomu Si z nejvyšších hladin vytvoří **valenční elektrony**
- Pro vodivost je důležitý poslední zcela obsazený valenční pás a pás vodivostní - první částečně obsazený nebo neobsazený. Mezi těmito pásy je pás zakázaných energií.
- Rozhodují o vzájemné vazbě atomů a vlastnostech látky
- **Zakázaný pás** – mezera mezi posledním obsazeným a neobsazeným pásem

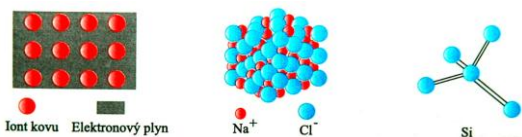


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## 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

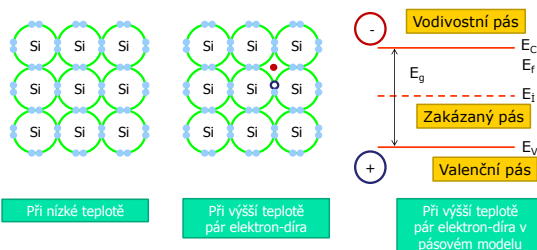


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Kovalentní vazba

- Alespoň částečná kovalentní vazba je nutná pro polovodiče
- Každý Si má čtyři valenční elektrony

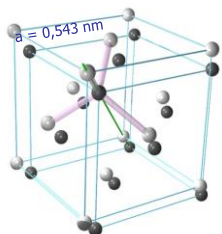


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## 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

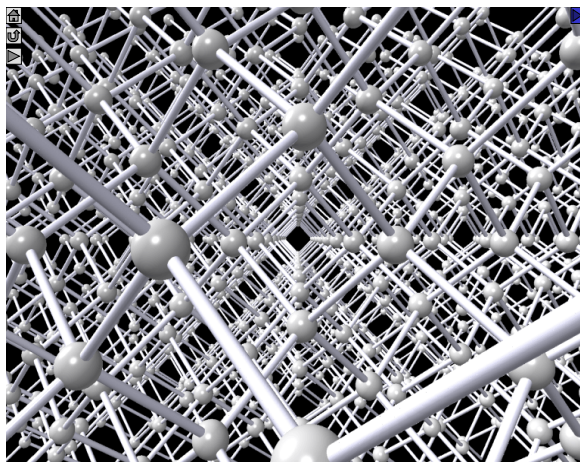
$^{14}\text{Si}$   
2,33 g/cm<sup>3</sup>  
Křemík

### Proč je křemík tak oblíben?

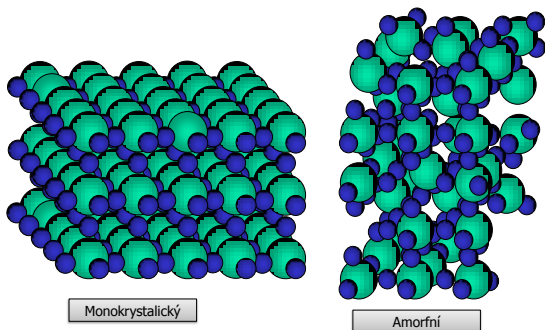
- Nejlevnější příprava vysoce čistého křemíku
- Vytváření termického oxidu – planární technologie
- Relativně vysoká hodnota měrného odporu intrinsického křemíku – 23 k $\Omega$



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



## Monokrystalický a amorfní Si



Monokrystalický

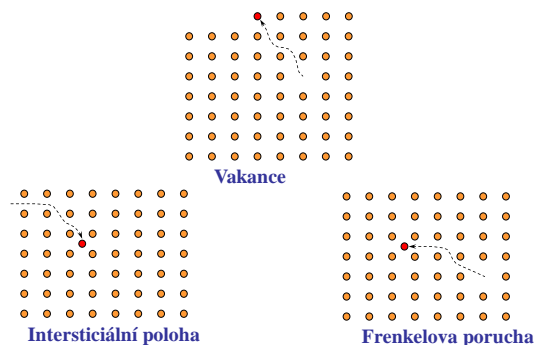
Amorfní



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



## Defekty v monokrystalu



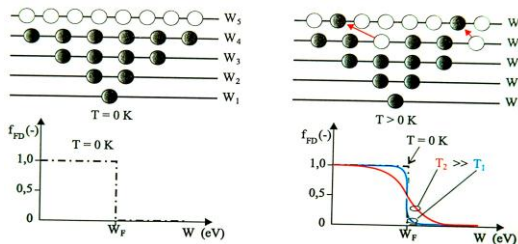
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## 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

■  $f_{FD}(W_F) = 0,5$

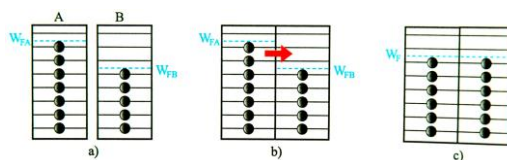


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Fermiho hladina pro dva materiály

- Dáme-li dohromady dva materiály s různou polohou Fermiho hladiny, dojde k jejímu vyrovnání a **nastane tepelná rovnováha**
- Elektronů spojeného materiálu se snaží nabýt minima energie
- Elektronů se přemístí
- 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

<b>Izolant</b>	$\rho = 10^{14} - 10^{20} \Omega \cdot \text{cm}$
<b>Polovodič</b>	$\rho = 10^{-4} - 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$
<b>Kov</b>	$\rho = 10^{-6} - 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$

$\rho$  - měrný odpor:  $\rho = 1 / \sigma$

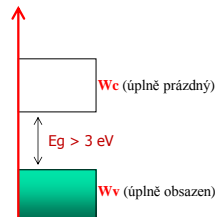


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Izolanty:

- Velikost zakázaného pásu určuje rozdíly mezi izolanty
- Vodivostní pás zůstane zcela neobsazen i při vysokých teplotách
- Vodivost bude zanedbatelná



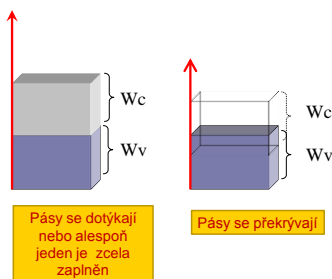
## Široký zakázaný pás mezi Wc a Wv

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



## Vodiče:

- Vodiče mají **vodivostní pás zaplněn jen částečně** a elektrony mají k dispozici velké množství blízkých energetických stavů



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



## Polovodiče při nízké teplotě



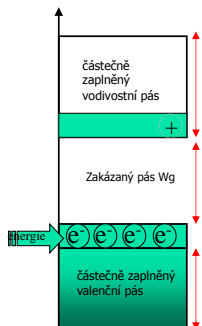
- Při nízkých teplotách je valenční pás plně obsazen a vodivostní pás je prázdný
- Polovodič se chová jako izolant
- Tepelná energie elektronů je menší než energie zakázaného pásu. Proto ji nemohou překonat



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



## Polovodiče



- Pokud dodáme dostatek energie elektronu  $e^-$ , který se nachází na vrchu valenčního pásu, tak překoná zakázaný pás na spodek valenčního pásu
- Elektron za sebou nechá **neobsazený energetický stav** ve valenčním pásu
- Tento neobsazený stav se nazývá **díra**
- Díry jsou nositelem **kladného náboje**
- K celkové vodivosti polovodičů **přispívají současně elektrony i díry**



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



## Excitační mechanismy přechodu elektronů z Wv do Wc

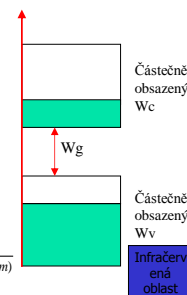
- Tepelná energie**
  - Tepelná energie**  $= k \cdot T = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
  - Při  $300 \text{ K} = 25 \text{ meV}$
  - Excitační rychlost je úměrná  $\exp(-E_g / kT)$
- Elektrické pole**
  - Malé elektrické pole nestačí k excitaci elektronů v běžných polovodičích jako je Si a GaAs.
  - Elektrické pole velikosti  $10^{10} \text{ V/m}$  dodá energii elektronu k překonání cca  $1 \text{ eV}$ .
- Elektromagnetické záření**

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = (6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}) \times (3 \times 10^8 \text{ m/s}) / \lambda(\text{m}) \Rightarrow E(\text{eV}) = \frac{1.24}{\lambda(\text{in } \mu\text{m})}$$

$$\begin{aligned} h &= 6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \\ c &= 3 \times 10^8 \text{ m/s} \\ 1 \text{ eV} &= 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

$$\text{Pro křemík } E_g = 1.1 \text{ eV}$$

$$\lambda(\mu\text{m}) = \frac{1.24}{1.1} = 1.1 \mu\text{m}$$



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



## Polovodiče

- Elektrony vytvářejí elektrický proud ve vodivostním pásu zatímco díry ve valenčním
- Díry nejsou volné částice. Vytvářejí se vázány v krystalu polovodiče. Je to vlastně chybějící elektron.
- Množství volných elektronů a děr je v intrinsickém (nedotovaném) polovodiči stejný.



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)

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



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

$$v_n = -u_n \cdot E$$



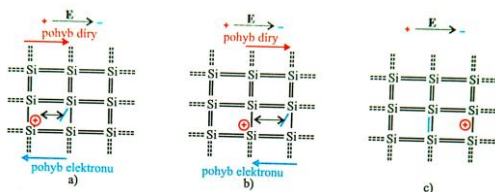
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Elektronová a děrová vodivost

- Díry se pohybují ve valenčním pásu, elektrony ve vodivostním

Pohyb díry v krystalové mřížce polovodiče

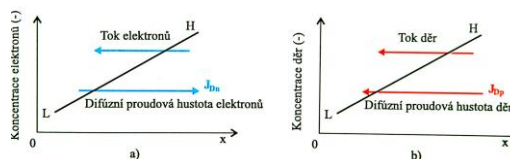


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Difúzní proud v polovodičích

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

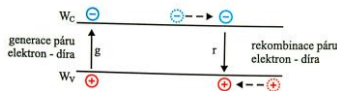


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Nevlastní polovodič

- Vlastní (intrinsická) 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



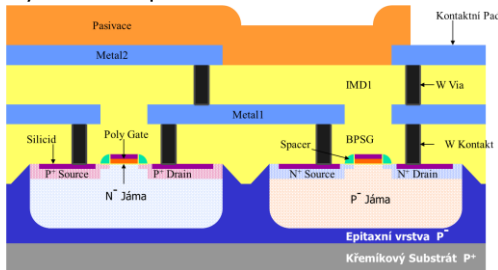
- Užitečnost polovodičů lze výrazně zvýšit použitím příměsí
- Jeden z řádově  $10^7$  atomů původního čtyřmocného polovodiče (Si, Ge) je nahrazen.
- Pětimocným prvem – donorem** (P, As), kdy vznikne polovodič typu N s dominantní elektronovou vodivostí
- Trojmocným – akceptorem** (B, Al, Ga), kdy vznikne polovodič typu P s vodivostí děrovou.



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

## K čemu je to dobré ?

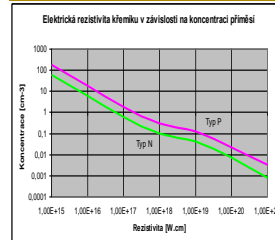
- Elektronické součástky
- Vytváření PN přechodů



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**



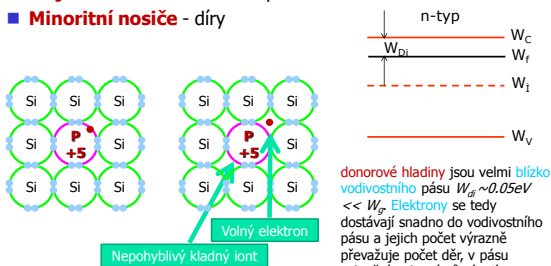
Typ vodivosti	Typ vodivosti
P (Pozitivní)	N (Negativní)
10,81 5 B Bór	30,97376 15 P Fosfor 74,9216 33 As



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

## Polovodič typu N

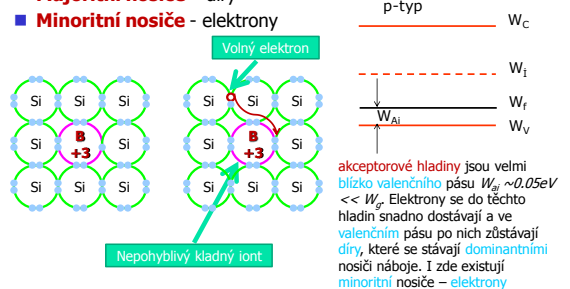
- Dotace **donorem** (prvek z páté skupiny P, As)
- Majoritní nosiče** – elektrony
- Minoritní nosiče** – díry



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

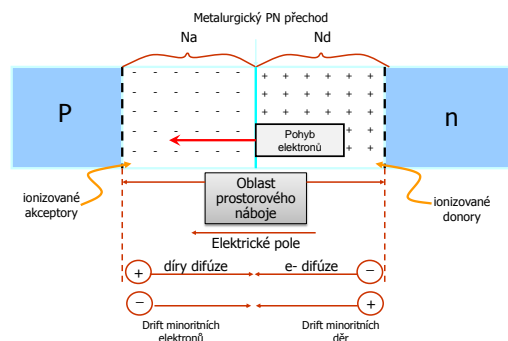
## PN Přechod

### PN Přechod



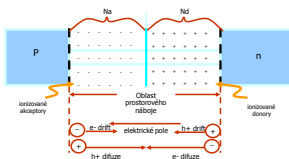
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

## PN Přechod



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

## PN Přechod



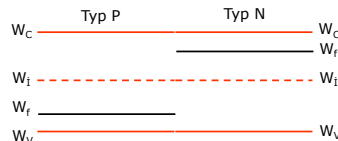
V oblasti PN přechodu dochází k **difúzi děr** do oblasti N a **elektronů** do oblasti P. V oblasti P vzniknou ionizované donory a v N ionizované akceptory. S probíhající difúzí vzniká elektrické pole, které odsává minoritní nosiče náboje z oblasti P a N. Vzniká **difúze elektronů a děr**.

- **Oblast prostorového náboje (ochozená vrstva):** Tvoří PN přechod. Nemá žádné volné nosiče náboje. Obsahuje pouze nepohyblivý náboj ionizovaných příměsí a chová se proto jako dielektrikum. Její tloušťka je dána koncentrací příměsí
- **Metalurgický přechod:** Rozhraní styku P a N polovodiče.
- **Na & Nd:** Reprezentuje množství (koncentraci) příměsí. Udává se v počtu atomů příměsí na krychlový centimetr. Obvyklý rozsah:  $10^{15}$  to  $10^{21}$



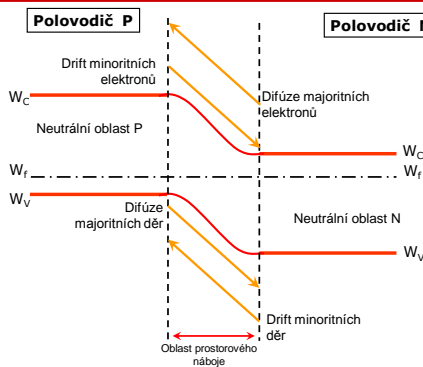
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

## Pásový diagram pro P-N přechod před ustanovením teplotní rovnováhy



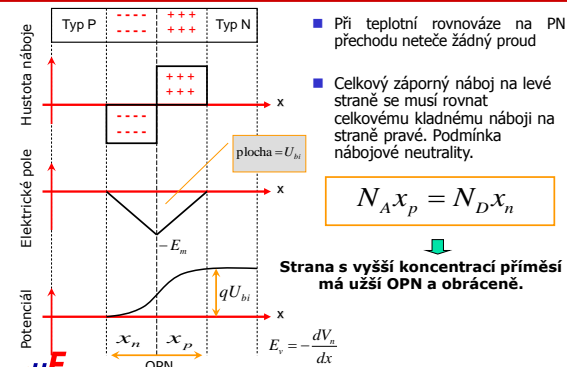
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

## Pásový diagram pro P-N přechod v teplotní rovnováze



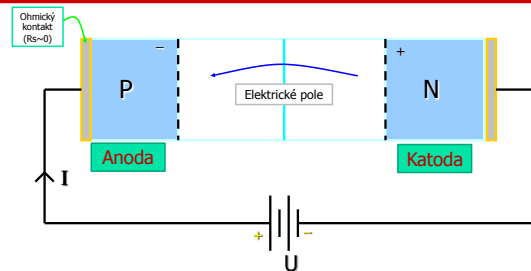
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

## P-N přechod – Náboj, elektrické pole, potenciál



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

## PN přechod s přiloženým vnějším napětím

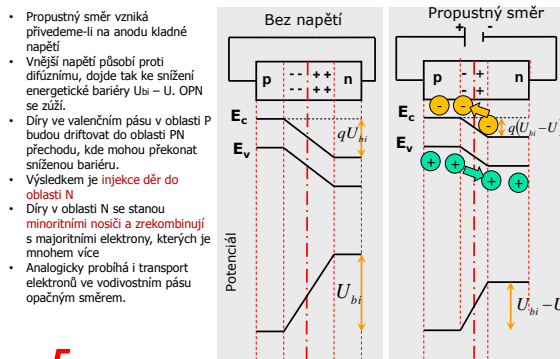


- Pro aplikované vnější napětí rozeznáváme dva případy:
  - **Propustné napětí (propustný směr)**
  - **Závěrné napětí (závěrný směr)**



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

## Propustný směr: $U > 0$



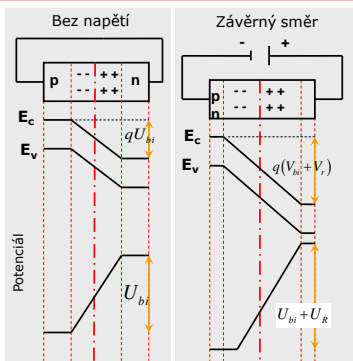
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL





## Závěrný směr: $U < 0$

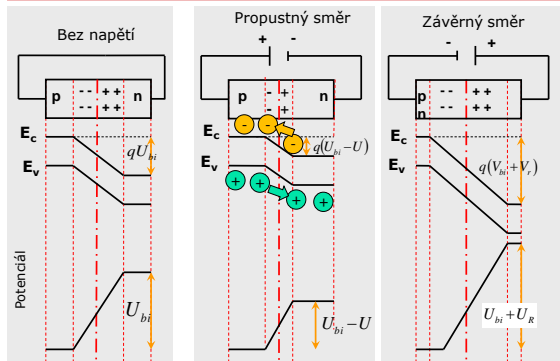
- Závěrný směr vzniká přivedeme-li na anodu záporné napětí
- Vnější napětí působí souhlasně s difúzním, dojde tak ke zvýšení energetické bariéry  $U_{bi} + U_R$ . OPN se rozšíří.
- Majoritní díry ve valenčním pásu v oblasti P nemohou překonat zvýšenou bariéru.
- Minoritní díry v oblasti N však PN přechod překonat mohou a jsou extrahovány v oblasti P
- Koncentrace je děr v oblasti N je velice malá, tak i vzniklý proud bude malý
- Při pokojové teplotě je proud prakticky nulový
- Tento jev probíhá analogicky i v případě elektronů ve vodivostním pásu opačným směrem.



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



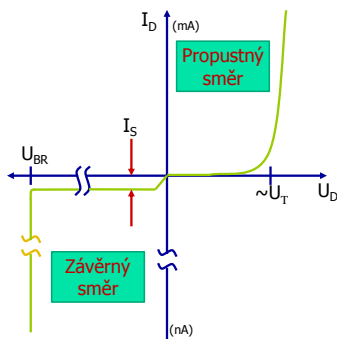
## P-N přechod s vnější napětím



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



## Voltampérová charakteristika reálné diody



- $U_D$  = Napětí na diodě
- $I_D$  = Proud diodou.  $I_D$  je záporný pro závěrný směr a kladný pro propustný směr
- $I_S$  = Závěrný saturační proud
- $U_{BR}$  = Průrazné napětí
- $U_T$  = Napětí bariérové



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



## Shockleyho rovnice

Celková proudová hustota:

$$J_{Total} = q \left[ \frac{D_n n_{p0}}{L_n} + \frac{D_p p_{n0}}{L_p} \right] \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] = J_o \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

Vynásobeno plochou:

$$I = I_o \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

Shockleyho rovnice

Rovnice je platná pro propustný i závěrný směr



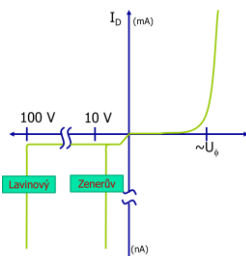
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Průrazné napětí $U_{BR}$

- Závěrně polarizovanou diodou teče velice malý závěrný proud.
- Při vyšších hodnotách závěrného napětí se k saturačnímu proudu  $I_o$  přičítá svodový proud vzniklý tepelnou generací v OPN
- Při určité velikosti závěrného napětí dojde k průrazu, skokovému nárůstu závěrného proudu...
- Rozeznáváme dva druhy průrazu:

- Zenerův jev (průraz)** vzniká ve vysoce dotovaných PN přechodech. Průrazné napětí okolo 6V.
- Lavinový jev (průraz)** projevuje se u méně dotovaných přechodů. Průrazné napětí vyšší než cca 14V.



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



## Vlastnosti reálných diod



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



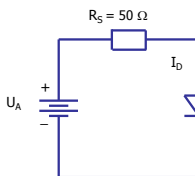
## Parametry diod

### Ideální dioda



Proud teče pouze jedním směrem. Ideální vodič v propustném směru a ideální izolant v závěrném směru.

**Příklad:** Předpokládejme ideální diodu na znázorněném schématu. Určete hodnotu proudu  $I_D$  jestliže a)  $U_A = 5$  voltů (propustný směr) a b)  $U_A = -5$  voltů (závěrný směr)



- a) Při  $U_A > 0$  se dioda chová jako ideální vodič, proto:  
 $I_D = U_A / R_S = 5 \text{ V} / 50 \text{ Ohm} = 100 \text{ mA}$   
 b) Při  $U_A < 0$  se dioda chová jako dokonalý izolant, proto  $I_D = 0$ .

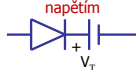


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



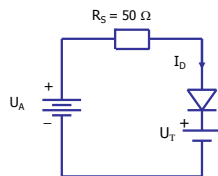
## Parametry diod

### Ideální dioda s prahovým napětím



Tento model je přesnější a zohledňuje potenciálovou bariéru PN přechodu, kterou reprezentujeme v modelu jako zdroj napětí zapojený sériově s diodou.

**Příklad:** Použijte k řešení předchozího příkladu model s prahovým napětím. Předpokládejme  $U_T = 0.3$  voltů (typická hodnota pro germaniovou diodu). Určete hodnotu proudu  $I_D$  jestliže  $U_A = 5$  voltů.



Při  $U_A > 0$  je dioda v propustném směru a chová se jako ideální vodič:

$$0 = U_A - I_D R_S - U_T$$

$$I_D = \frac{U_A - U_T}{R_S} = \frac{4.7 \text{ V}}{50 \text{ Ohm}} = 94 \text{ mA}$$



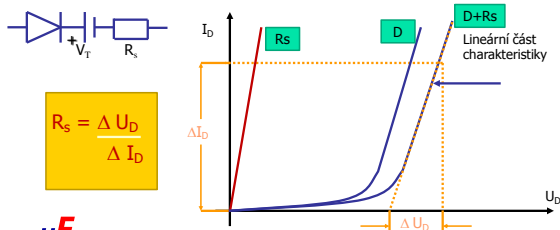
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Parametry diod

### Ideální dioda s prahovým napětím a sériovým odporem

Model obsahuje sériový odpor odvozený ze sklonu lineární části charakteristiky (nebo linearizované). Typická hodnota se pro křemíkové a germaniové diody pohybuje v rozmezí 2 – 5 V.



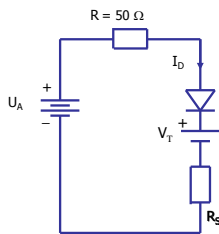
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Parametry diod

### Ideální dioda s prahovým napětím a sériovým odporem

**Příklad:** Použijte k řešení předchozího příkladu model s prahovým napětím. Předpokládejme  $U_T = 0.3$  voltů (typická hodnota pro germaniovou diodu) a  $R_S = 5$  Ohm. Určete hodnotu proudu  $I_D$  jestliže  $U_A = 5$  voltů.



**Řešení:**

$$0 = U_A - I_D R - U_T - I_D R_S$$

$$I_D = \frac{U_A - U_T}{R + R_S} = \frac{5 - 0.3}{50 + 5} = 85.5 \text{ mA}$$



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



## Porovnání modelů

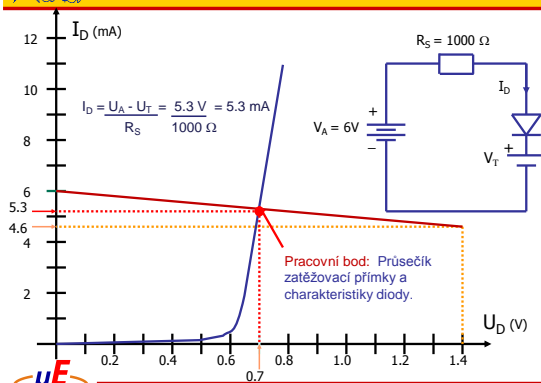
	Ideální model	Model s prahovým napětím	Model s prahovým napětím a sériovým odporem
$I_D$	100 mA	94 mA	85.5 mA



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



## Stejnosměrný pracovní bod



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





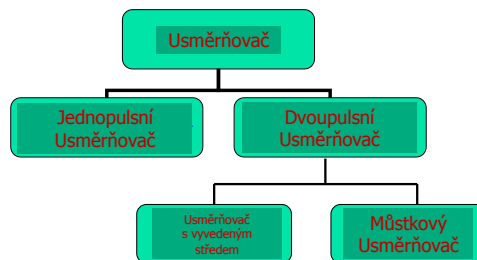
## Aplikace diod Usměrňovače



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



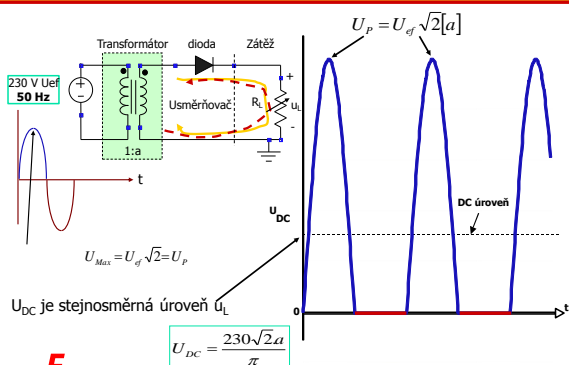
## Typy usměrňovačů



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



## Jednopolnsí usměrňovač



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



## Střední hodnota jednopolnsího usměrňovače

Odvození vztahu pro střední hodnotu

$$\begin{aligned}
 U_{DC} &= \frac{1}{T} \int_0^T U \, dt \\
 &= \frac{1}{2\pi} \left[ \int_0^\pi U_p \sin \theta \, d\theta + \int_\pi^{2\pi} 0 \, d\theta \right] \\
 &= \frac{U_p}{2\pi} [-\cos \theta]_0^\pi \\
 &= \frac{U_p}{\pi}
 \end{aligned}$$



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



## Efektivní hodnota jednopolnsího usměrňovače

Odvození vztahu pro efektivní hodnotu

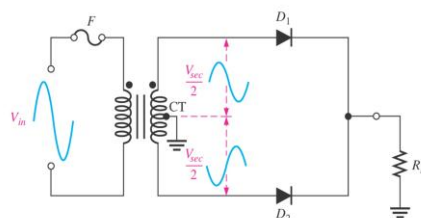
$$\begin{aligned}
 U_{ef}^2 &= \frac{1}{T} \int_0^T U^2 \, dt \\
 &= \frac{1}{2\pi} \left[ \int_0^\pi U_p^2 \sin^2 \theta \, d\theta + \int_\pi^{2\pi} 0 \, d\theta \right] \\
 &= \frac{U_p^2}{2\pi} \int_0^\pi \sin^2 \theta \, d\theta = \frac{U_p^2}{2\pi} \int_0^\pi \left( \frac{1}{2} (1 - \cos 2\theta) \right) d\theta \\
 &= \frac{U_p^2}{4\pi} \left[ \theta - \frac{1}{2} \sin 2\theta \right]_0^\pi \\
 &= \frac{U_p^2}{4}
 \end{aligned}$$



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



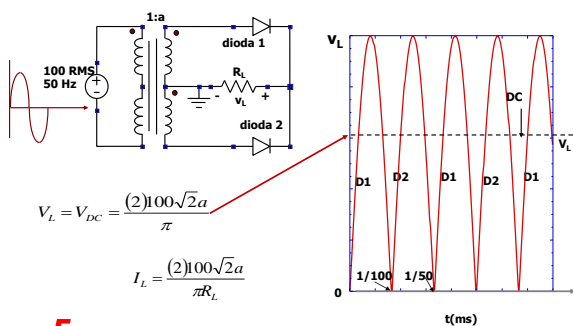
## Dvoucestný usměrňovač



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



## Dvoucestný usměrňovač



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



## Střední hodnota dvoupulsního usměrňovače

Odvození vztahu pro střední hodnotu

$$\begin{aligned}
 U_{DC} &= \frac{1}{T} \int_0^T U dt \\
 &= \frac{1}{\pi} \int_0^\pi U_p \sin \theta d\theta \\
 &= \frac{U_p}{\pi} [-\cos \theta]_0^\pi \\
 &= \frac{2U_p}{\pi}
 \end{aligned}$$



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



## Efektivní hodnota dvoupulsního usměrňovače

Odvození vztahu pro efektivní hodnotu

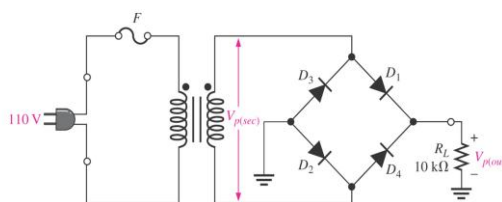
$$\begin{aligned}
 U_{rms}^2 &= \frac{1}{T} \int_0^T U^2 dt \\
 &= \frac{1}{\pi} \int_0^\pi U_p^2 \sin^2 \theta d\theta \\
 &= \frac{U_p^2}{\pi} \int_0^\pi \left( \frac{1}{2} (1 - \cos 2\theta) \right) d\theta \\
 &= \frac{U_p^2}{2\pi} \left[ \theta - \frac{1}{2} \sin 2\theta \right]_0^\pi \\
 &= \frac{U_p^2}{2}
 \end{aligned}$$



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



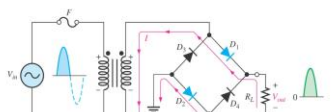
## Dvoupulsní Můstkový usměrňovač



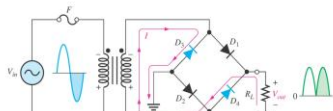
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Dvoupulsní Můstkový usměrňovač



(a) During the positive half-cycle of the input,  $D_1$  and  $D_2$  are forward-biased and conduct current.  $D_3$  and  $D_4$  are reverse-biased.



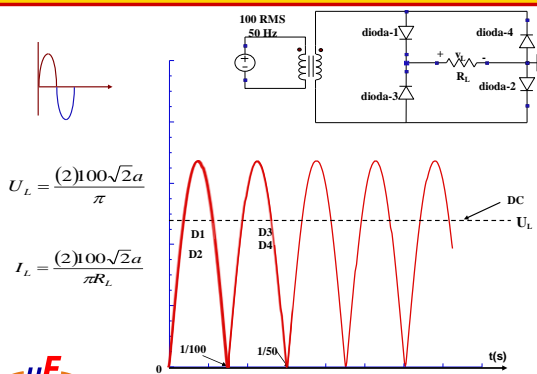
(b) During the negative half-cycle of the input,  $D_3$  and  $D_4$  are forward-biased and conduct current.  $D_1$  and  $D_2$  are reverse-biased.



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



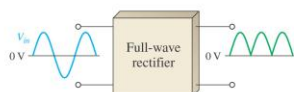
## Dvoupulsní Můstkový usměrňovač



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



## Usměrňovač s filtrem



(a) Rectifier without a filter



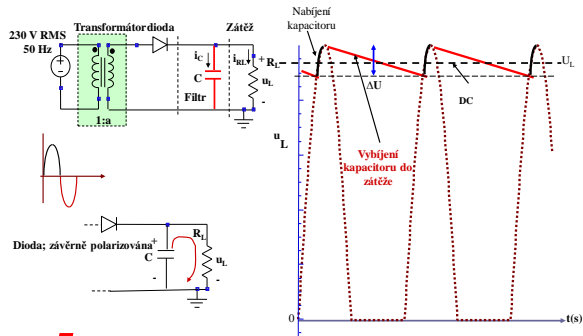
(b) Rectifier with a filter (output ripple is exaggerated)



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



## Filtr pro vyhlazení špiček - kapacitor

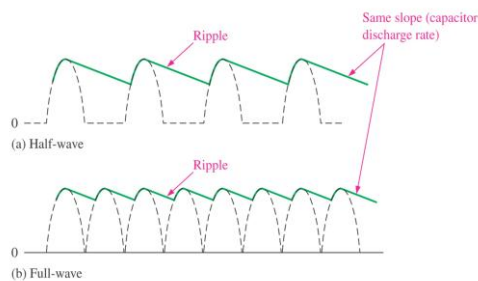


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Porovnání průběhu napětí jedno a dvou pulsního usměrňovače

stejný kapacitor a stejná zátěž



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

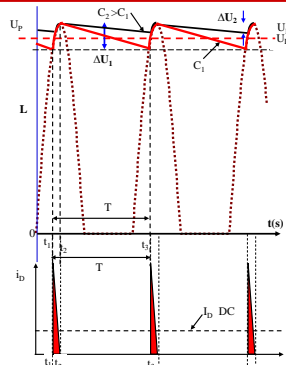


## Filtr pro vyhlazení špiček – různé kapacitory

Jednocestný:

Budeli  $T \lll R_L C$

$$\Delta U \approx \frac{U_p T}{R_L C}$$



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



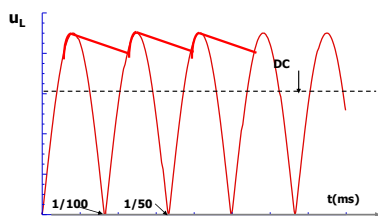
## Filtr pro vyhlazení špiček – různé kapacitory

Dvoucestný:

Budeli  $T \lll R_L C$

$$\Delta U \approx \frac{U_p T}{R_L C}$$

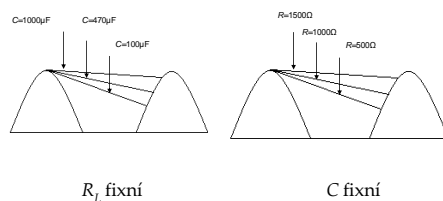
$$T \approx T/2$$



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



## Filtr pro vyhlazení špiček – různé kapacitory a zátěže



$R_L$  fixní

C fixní



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



## Porovnání usměrňovačů

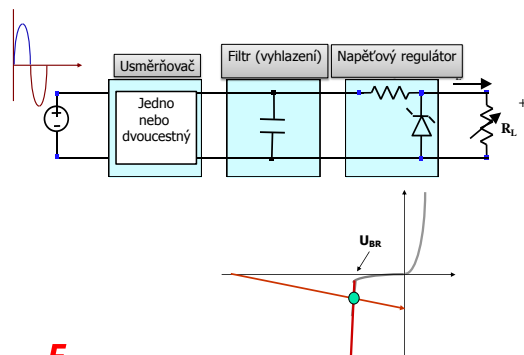
	Jednoplusní	Dvoupulsní	Můstkový
Počet diod	1	2	4
Nutnost transformátoru	Ne	Ano	Ne
Maximální účinnost	40.6%	81.2%	81.2%



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



## Stabilizovaný zdroj



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