



Materiály pre mechatroniku

prof. Ing. Dušan Maga, PhD.
maga@yhnet.sk

prof. Ing. Dušan Maga, PhD.
Brno, 11. – 15. 4. 2011
maga@yhnet.sk
www.kiwiki.info

**Znalosti a dovednosti v mechatronice - transfer
inovací do praxe, CZ.1.07/2.3.00/09.0162**





Materiály pre mechatroniku

Obsah



Vedenie elektrického prúdu v pevných látkach

Vlastné polovodiče

Nevlastné polovodiče

Kontakt kovu a polovodiča

PN priechod

Polovodiče v nerovnovážnom stave



Hodnotenie prednášky + študijné materiály:
www.kiwiki.info

prof. Ing. Dušan Maga, PhD.
Brno, 11. – 15. 4. 2011
maga@yhnet.sk
www.kiwiki.info

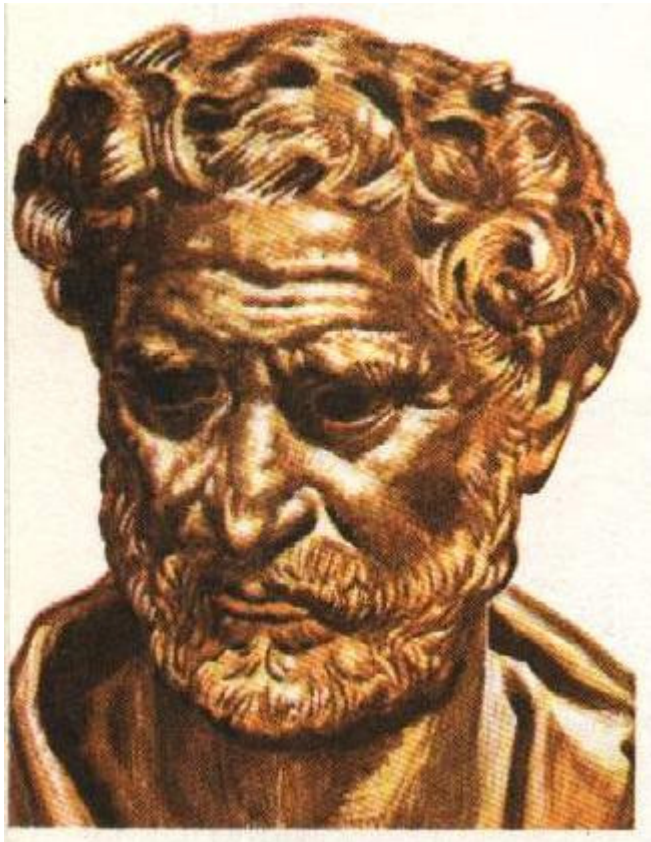
**Znalosti a dovednosti v mechatronice - transfer
inováci do praxe, CZ.1.07/2.3.00/09.0162**



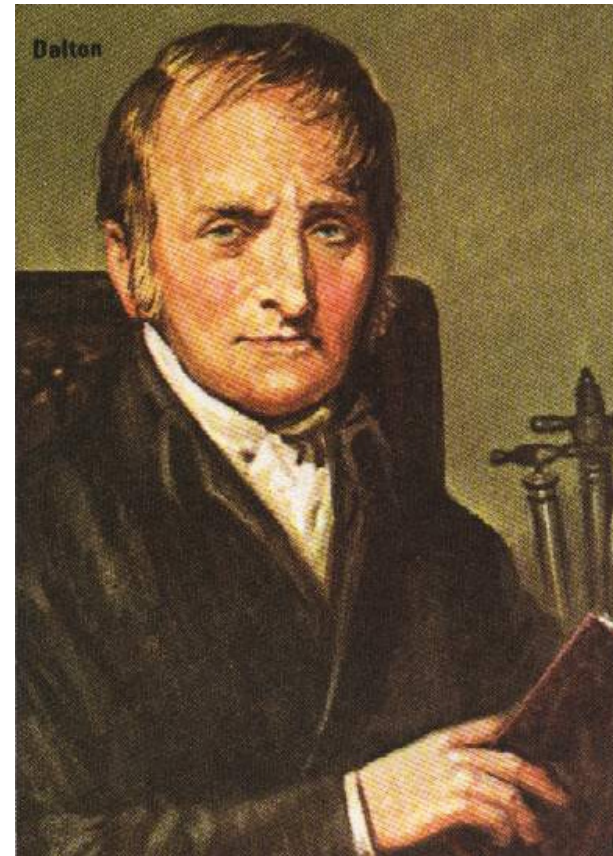


Materiály pre mechatroniku

Vedenie elektrického prúdu v pevných látkach



Démokritos (5. st. pr. n. l.)



John Dalton 1766 - 1844

prof. Ing. Dušan Maga, PhD.
Brno, 11. – 15. 4. 2011
maga@yhnet.sk
www.kiwiki.info

**Znalosti a dovednosti v mechatronice - transfer
inováci do praxe, CZ.1.07/2.3.00/09.0162**



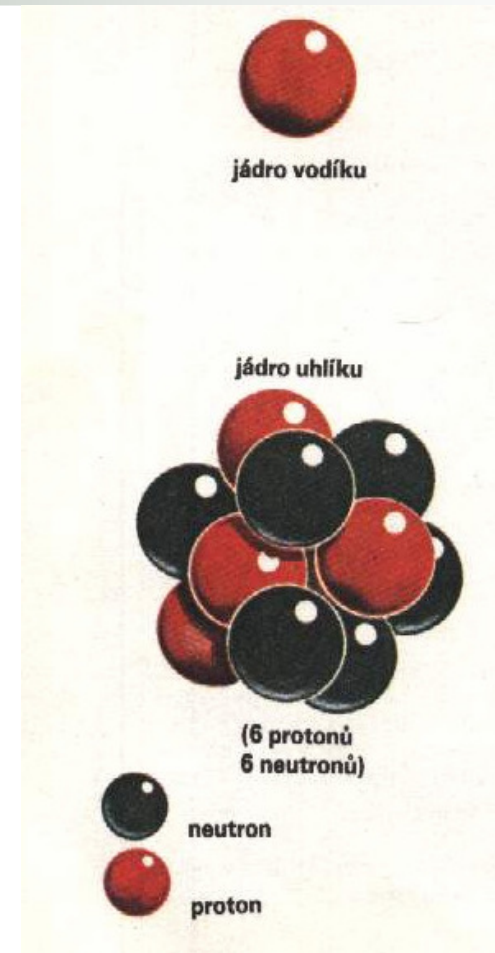
Materiály pre mechatroniku

Vedenie elektrického prúdu v pevných látkach



Atom:

- Jadro – protóny (+)
neutróny (0)
- Elektrónový obal – elektróny (-)



prof. Ing. Dušan Maga, PhD.
Brno, 11. – 15. 4. 2011
maga@yhnet.sk
www.kiwiki.info

**Znalosti a dovednosti v mechatronice - transfer
inovací do praxe, CZ.1.07/2.3.00/09.0162**



Materiály pre mechatroniku

Vedenie elektrického prúdu v pevných látkach



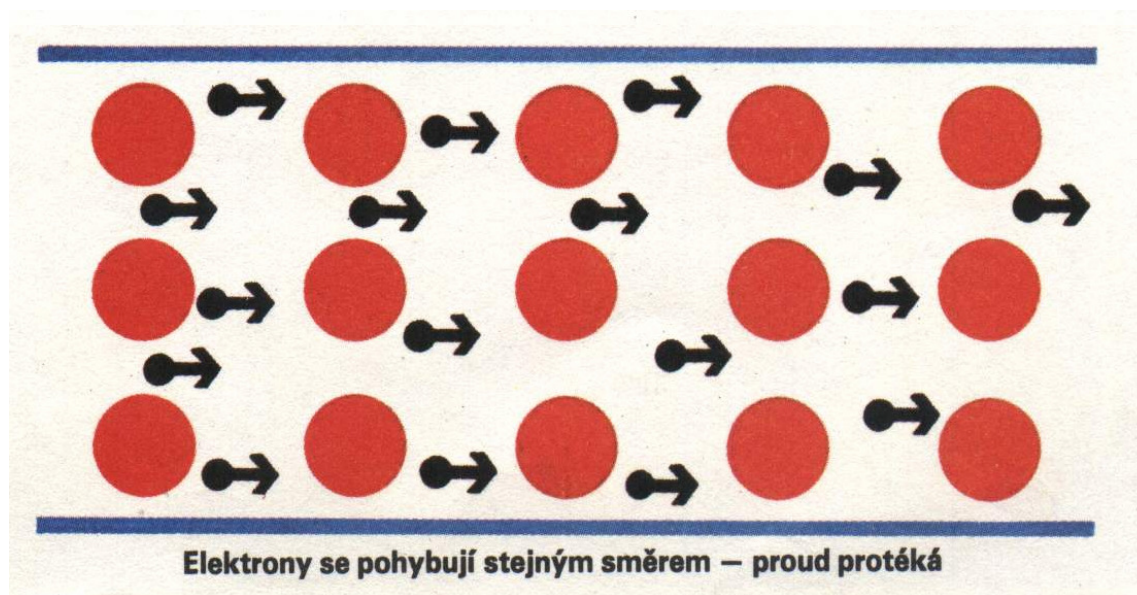
prof. Ing. Dušan Maga, PhD.
Brno, 11. – 15. 4. 2011
maga@yhnet.sk
www.kiwiki.info

**Znalosti a dovednosti v mechatronice - transfer
inováci do praxe, CZ.1.07/2.3.00/09.0162**



Materiály pre mechatroniku

Vedenie elektrického prúdu v pevných látkach



prof. Ing. Dušan Maga, PhD.
Brno, 11. – 15. 4. 2011
maga@yhnet.sk
www.kiwiki.info

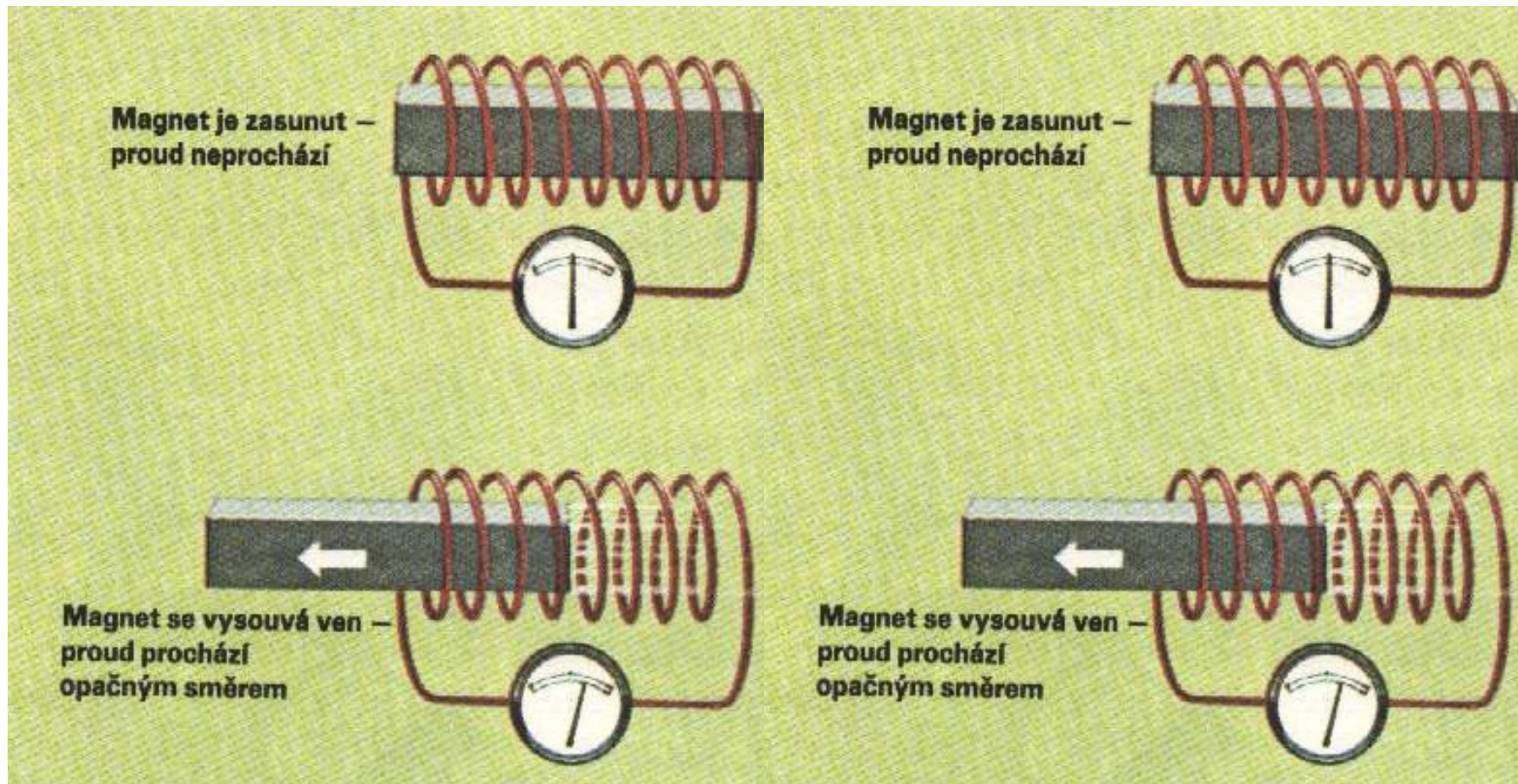
**Znalosti a dovednosti v mechatronice - transfer
inovací do praxe, CZ.1.07/2.3.00/09.0162**





Materiály pre mechatroniku

Vedenie elektrického prúdu v pevných látkach



prof. Ing. Dušan Maga, PhD.
Brno, 11. – 15. 4. 2011
maga@yhnet.sk
www.kiwiki.info

**Znalosti a dovednosti v mechatronice - transfer
inovací do praxe, CZ.1.07/2.3.00/09.0162**



Materiály pre mechatroniku

Vedenie elektrického prúdu v pevných látkach



Elektrický náboj $\rightarrow$ elektrón (obalová časť atómov)

$e = - 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C (Coulomb) = A.s}$

$m_0 = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg (klúdová hmotnosť)}$

prof. Ing. Dušan Maga, PhD.
Brno, 11. – 15. 4. 2011
maga@yhnet.sk
www.kiwiki.info

**Znalosti a dovednosti v mechatronice - transfer
inováci do praxe, CZ.1.07/2.3.00/09.0162**





Materiály pre mechatroniku

Vedenie elektrického prúdu v pevných látkach



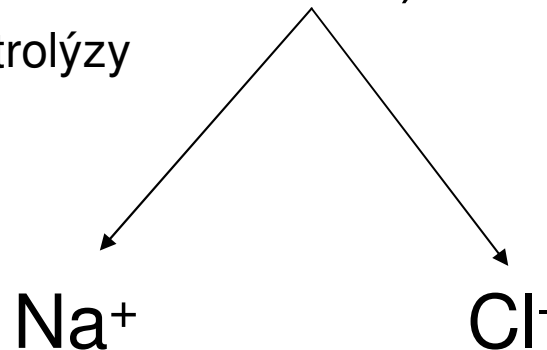
Nosiče náboja:

- elektróny (elektrónová vodivosť – kovy, polovodiče)

Tolman-Stewartov experiment (1917)

- ionizované atómy, molekuly (iónová vodivosť – iónové kryštály AgCl AgBr..., sklo, NaCl,)

Faradayove zákony elektrolýzy





Materiály pre mechatroniku

Vedenie elektrického prúdu v pevných látkach



Elektrický prúd:

$$I = \Delta Q / \Delta t$$

Náboj, ktorý určitým prierezom prejde za jednotku času. Fyzikálne kladný zmysel prúdu → smer pohybu kladných nábojov





Materiály pre mechatroniku

Vedenie elektrického prúdu v pevných látkach



Merná vodivosť (konduktivita) σ :

parameter úmernosti medzi prúdovou hustotou a intenzitou elektrického poľa:

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E}$$

$$[\sigma] = \frac{[J]}{[E]} = \frac{A / m^2}{V / m} = \frac{A}{V \cdot m} = S \cdot m^{-1}$$





Materiály pre mechatroniku

Vedenie elektrického prúdu v pevných látkach



Merný elektrický odpor:

$$\frac{1}{\sigma} = \rho$$

$$[\rho] = \frac{\text{m}}{\text{S}} = \Omega \cdot \text{m}$$

prof. Ing. Dušan Maga, PhD.
Brno, 11. – 15. 4. 2011
maga@yhnet.sk
www.kiwiki.info

**Znalosti a dovednosti v mechatronice - transfer
inovací do praxe, CZ.1.07/2.3.00/09.0162**





Materiály pre mechatroniku

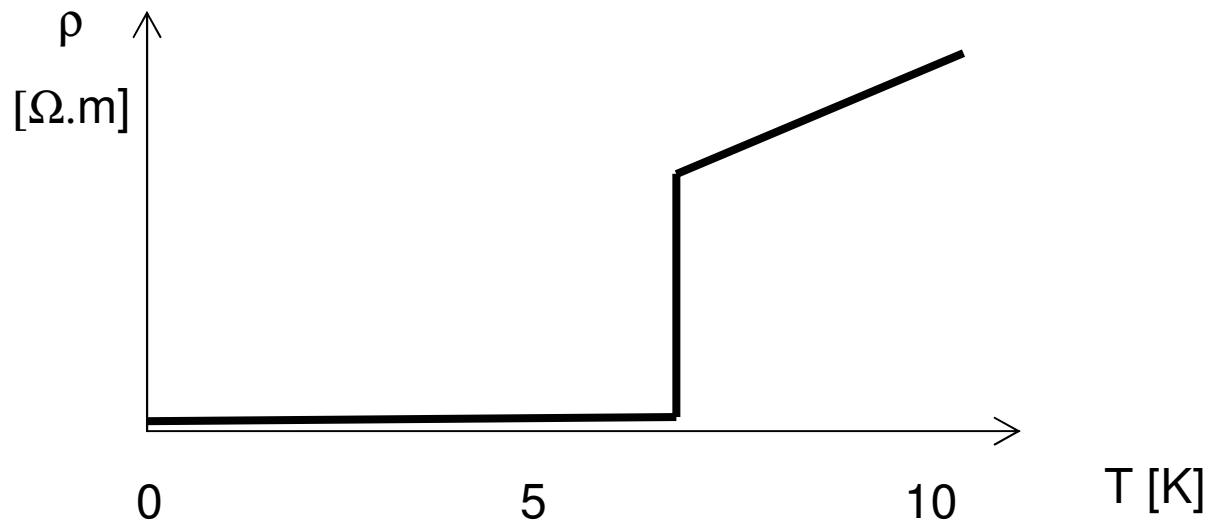
Vedenie elektrického prúdu v pevných látkach



Supravodivosť:

1911 H. Kamerling Onnes (Holandsko) → ortuť, olovo, cín

hlavne u kovov, pri extrémne nízkych teplotách (dosiahnuté odparovaním hélia)





Materiály pre mechatroniku

Vlastné polovodiče



Polovodiče → látky, kde sa na prenose elektrického náboja zúčastňujú prevažne elektróny alebo diery, pričom ich konduktivita σ pri teplote 300K je rádovo $10^5 - 10^{-11}$ S/m (izolanty $10^{-7} - 10^{-18}$ S/m)

Vlastné polovodiče:

Neobsahujú poruchy v kryštalickej mriežke.

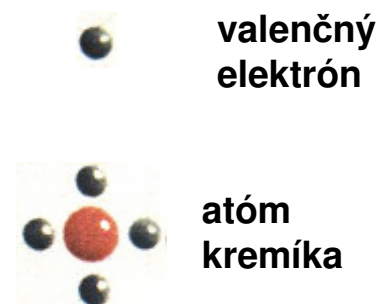
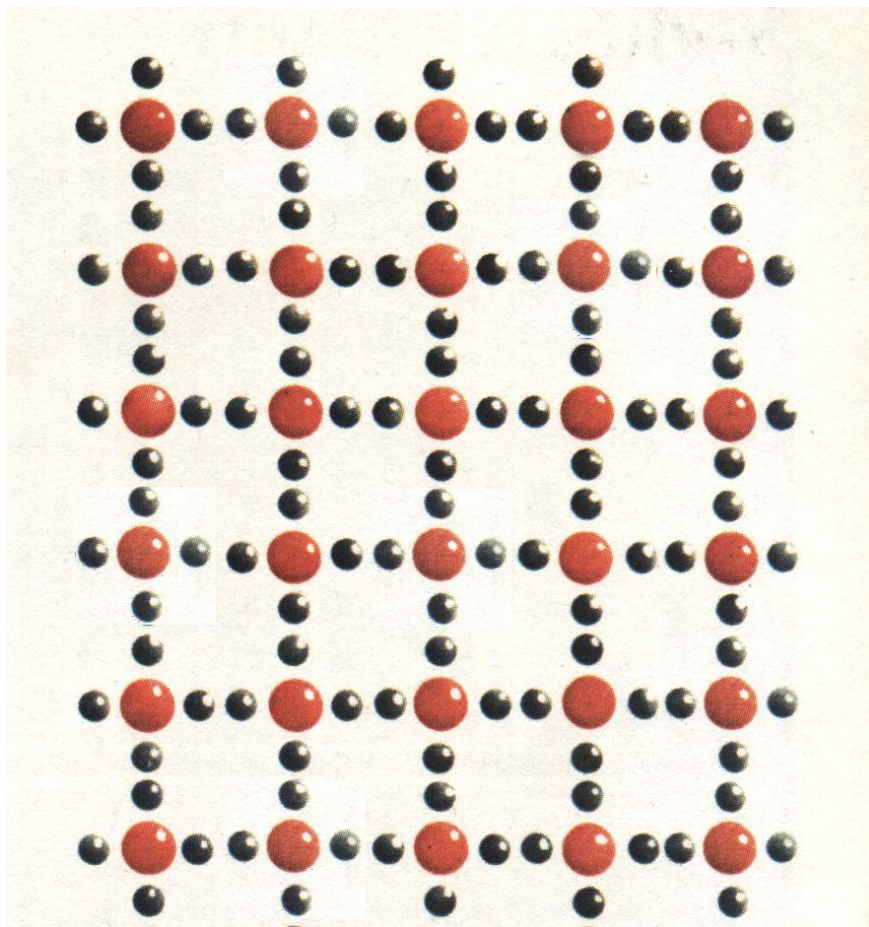
zvyčajne: štvormocný kremík v diamantovej kryštalickej sústave.





Materiály pre mechatroniku

Vlastné polovodiče



prof. Ing. Dušan Maga, PhD.
Brno, 11. – 15. 4. 2011
maga@yhnet.sk
www.kiwiki.info

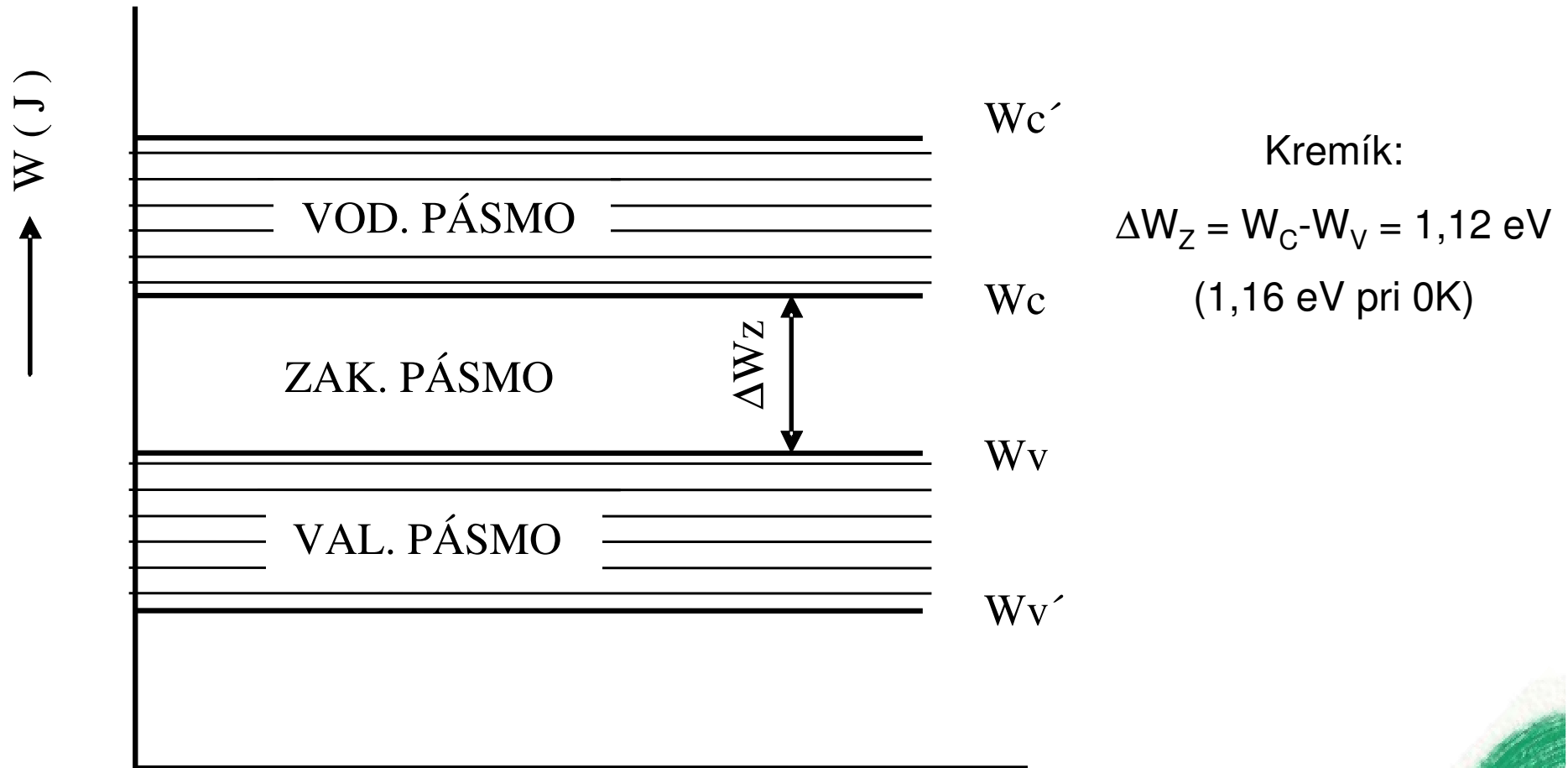
**Znalosti a dovednosti v mechatronice - transfer
inovací do praxe, CZ.1.07/2.3.00/09.0162**





Materiály pre mechatroniku

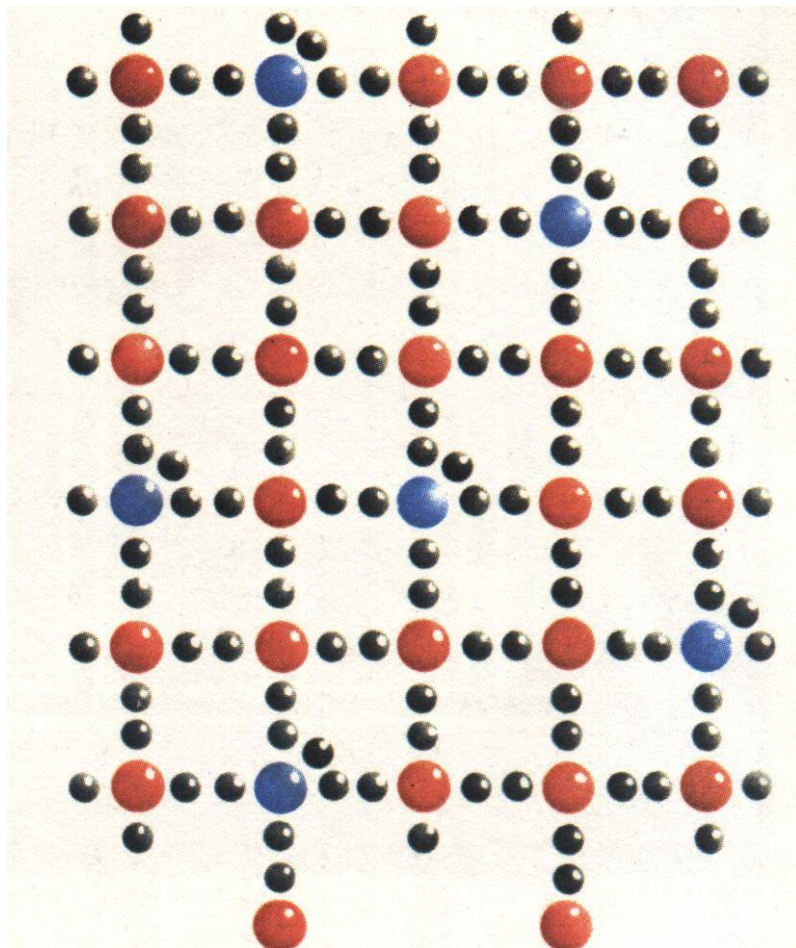
Vlastné polovodiče





Materiály pre mechatroniku

Nevlastné polovodiče



valenčný
elektrón



atóm
kremíka

14



atóm
fosforu

15

prof. Ing. Dušan Maga, PhD.
Brno, 11. – 15. 4. 2011
maga@yhnet.sk
www.kiwiki.info

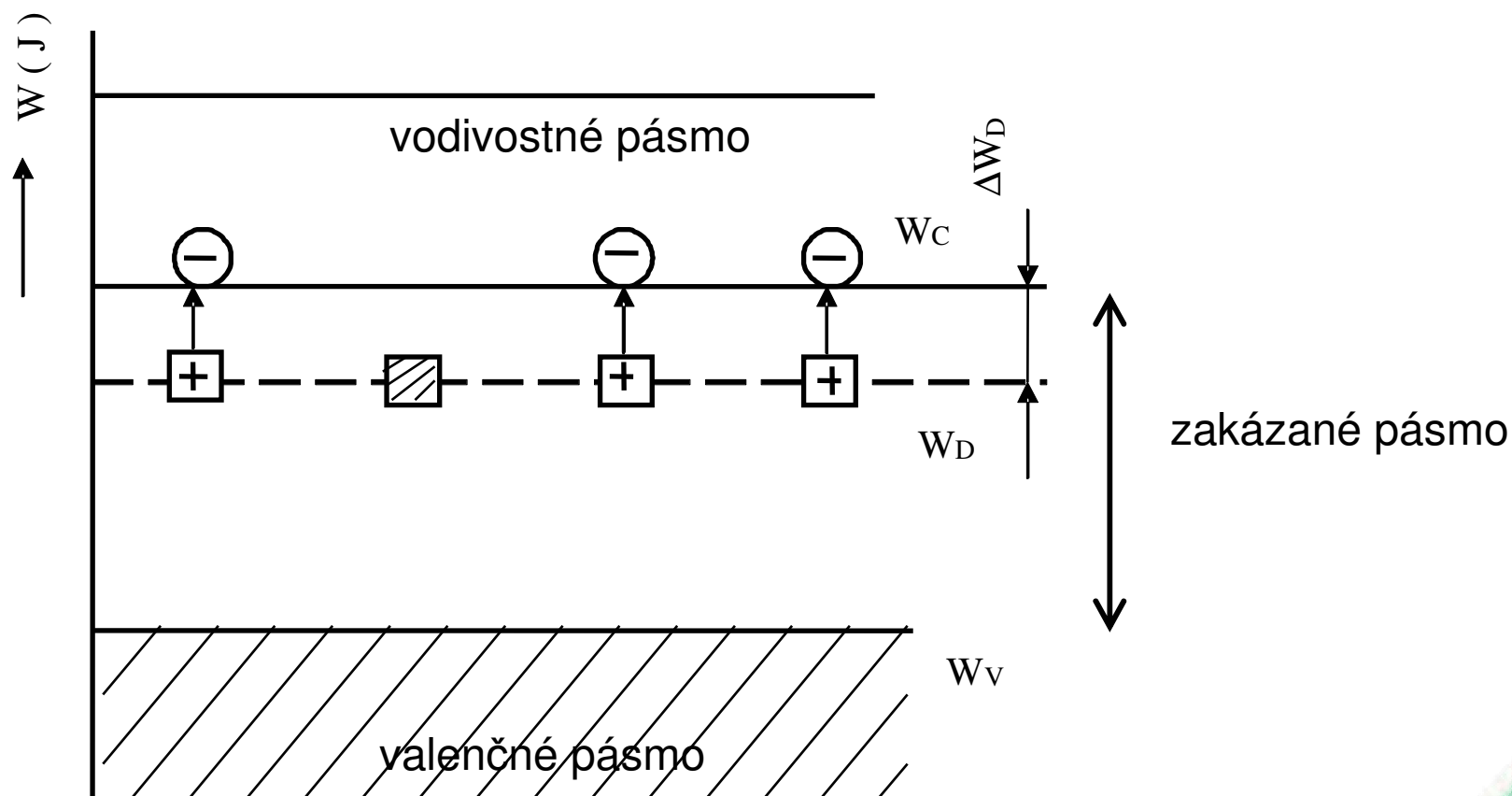
**Znalosti a dovednosti v mechatronice - transfer
inováci do praxe, CZ.1.07/2.3.00/09.0162**





Materiály pre mechatroniku

Nevlastné polovodiče



prof. Ing. Dušan Maga, PhD.
Brno, 11. – 15. 4. 2011
maga@yhnet.sk
www.kiwiki.info

**Znalosti a dovednosti v mechatronice - transfer
inováci do praxe, CZ.1.07/2.3.00/09.0162**



Materiály pre mechatroniku

Nevlastné polovodiče



Polovodiče, kde voľné nosiče elektrického náboja vznikajú ionizáciou DONOROV → polovodiče typu **N**. Koncentrácia voľných elektrónov je vyššia ako koncentrácia dier → elektróny sú majoritné a diery minoritné nosiče náboja.

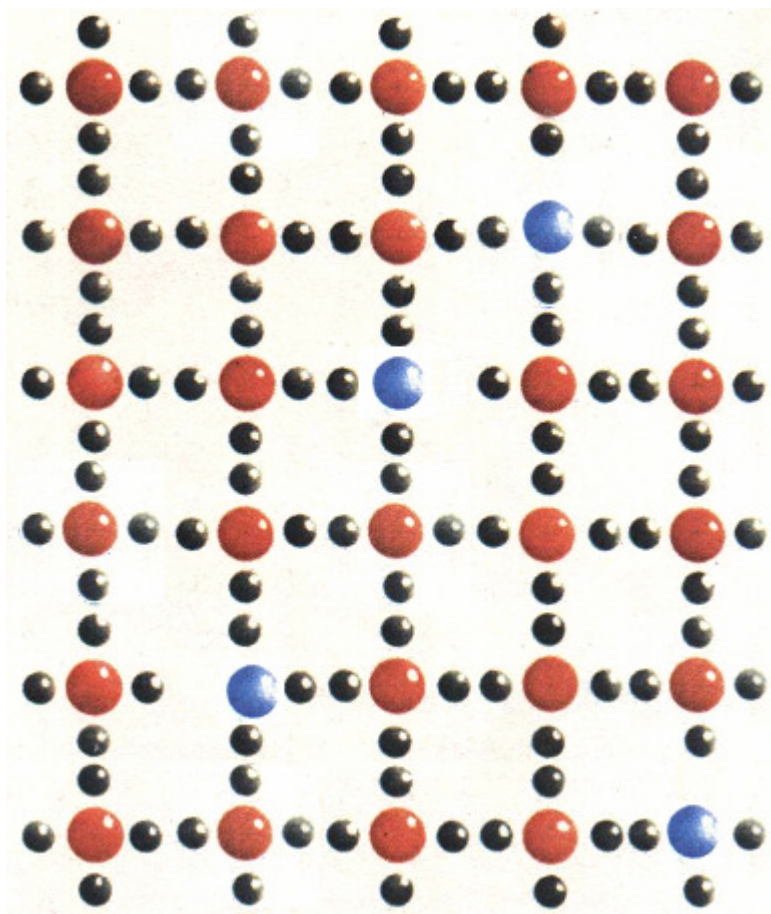
Podobne: antimón, dusík, arzén, a pod.





Materiály pre mechatroniku

Nevlastné polovodiče

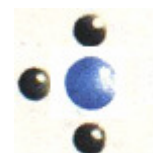


valenčný
elektrón



atóm
kremíka

14



atóm
india

49

prof. Ing. Dušan Maga, PhD.
Brno, 11. – 15. 4. 2011
maga@yhnet.sk
www.kiwiki.info

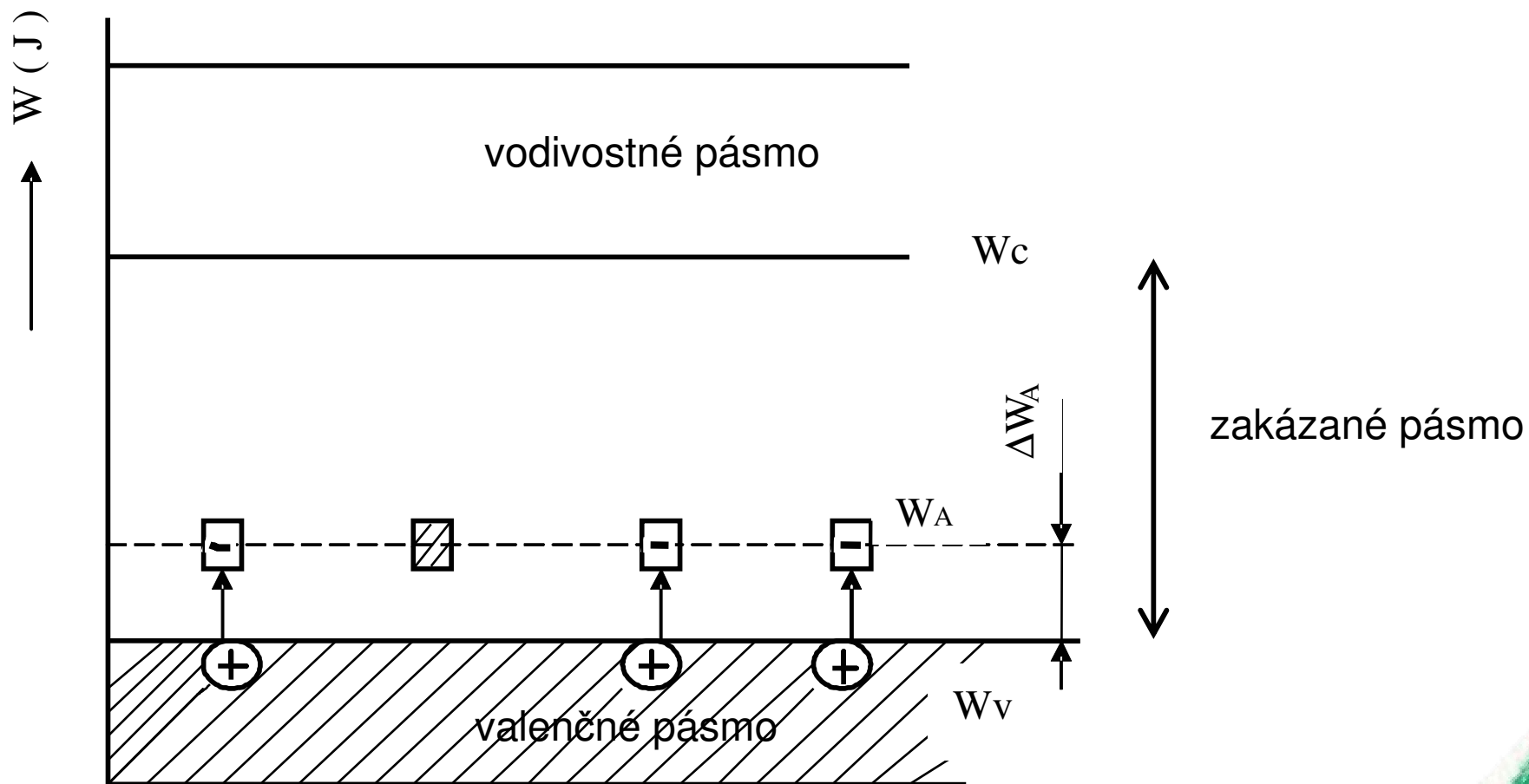
**Znalosti a dovednosti v mechatronice - transfer
inováci do praxe, CZ.1.07/2.3.00/09.0162**





Materiály pre mechatroniku

Nevlastné polovodiče



prof. Ing. Dušan Maga, PhD.
Brno, 11. – 15. 4. 2011
maga@yhnet.sk
www.kiwiki.info

**Znalosti a dovednosti v mechatronice - transfer
inovací do praxe, CZ.1.07/2.3.00/09.0162**



Materiály pre mechatroniku

Nevlastné polovodiče



Polovodiče, kde voľné nosiče elektrického náboja vznikajú ionizáciou AKCEPTOROV → polovodiče typu **P**.

Koncentrácia voľných dier je vyššia ako koncentrácia elektrónov → diery sú majoritné a elektróny minoritné nosiče náboja.

Podobne: bór, gálium, hliník a pod.





Materiály pre mechatroniku

Kontakt kovu a polovodiča



Povrch materiálu → iné vlastnosti ako vnútro (nenasýtené väzby, množstvo porúch a nečistôt, nie sú ideálne hladké)

Ideálny kontakt → hrúbka kontaktu $\approx$ vzdialenosť medzi atómmi

Dôležitý parameter: hodnoty výstupných prác elektrónov:
najprv elektrón z materiálu s menšou výstupnou prácou do druhého → vytvorenie elektrického poľa → opačný jav

Po krátkom čase nastane rovnováha





Materiály pre mechatroniku

Kontakt kovu a polovodiča



W_K – výstupná práca elektrónu z kovu

W_P – výstupná práca elektrónu z polovodiča

Kontaktné napätie:
$$U_K = \frac{W_K - W_P}{e} \quad [V]$$

zvyčajne cca 1 V



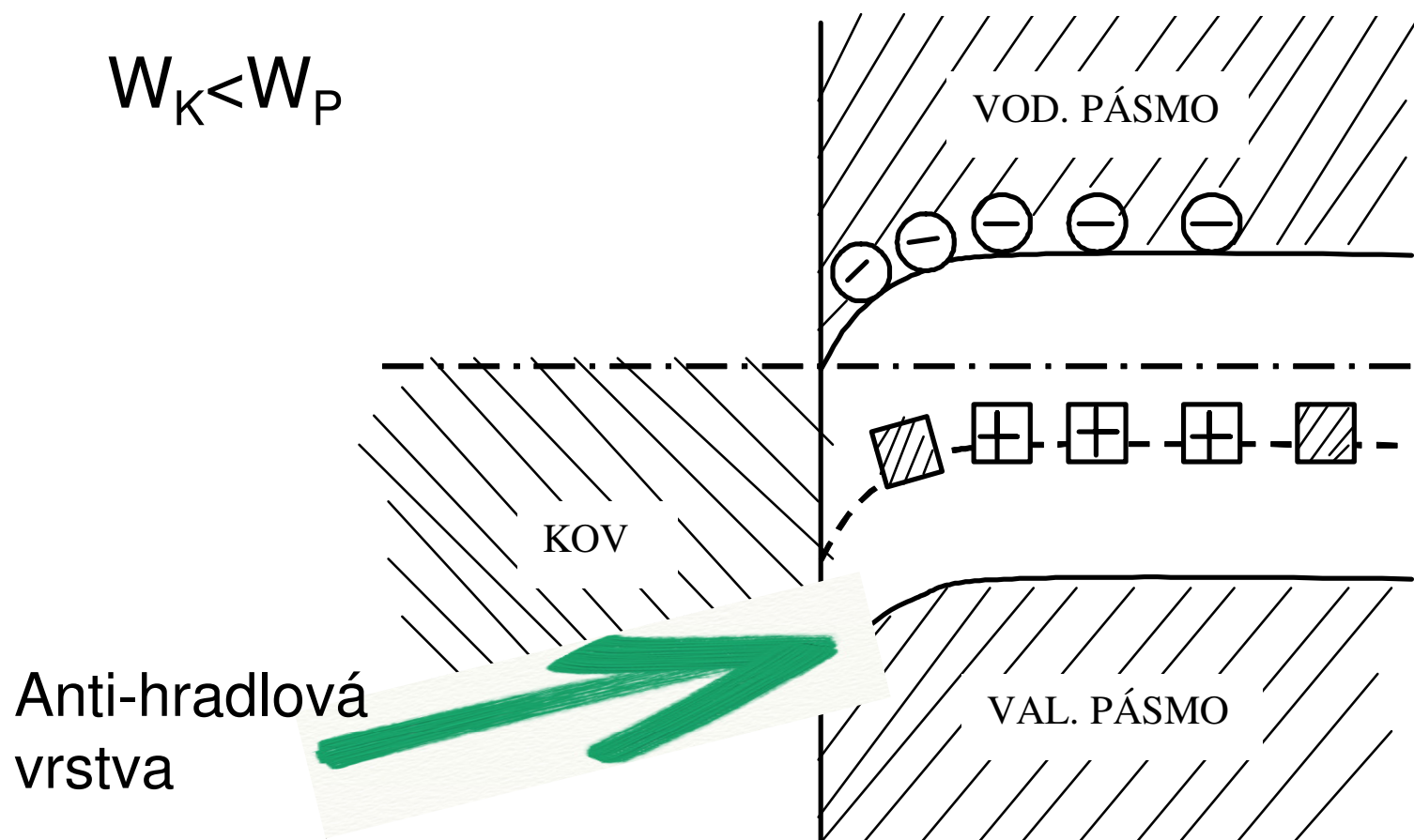


Materiály pre mechatroniku

Kontakt kovu a polovodiča



$$W_K < W_P$$



prof. Ing. Dušan Maga, PhD.
Brno, 11. – 15. 4. 2011
maga@yhnet.sk
www.kiwiki.info

**Znalosti a dovednosti v mechatronice - transfer
inovací do praxe, CZ.1.07/2.3.00/09.0162**

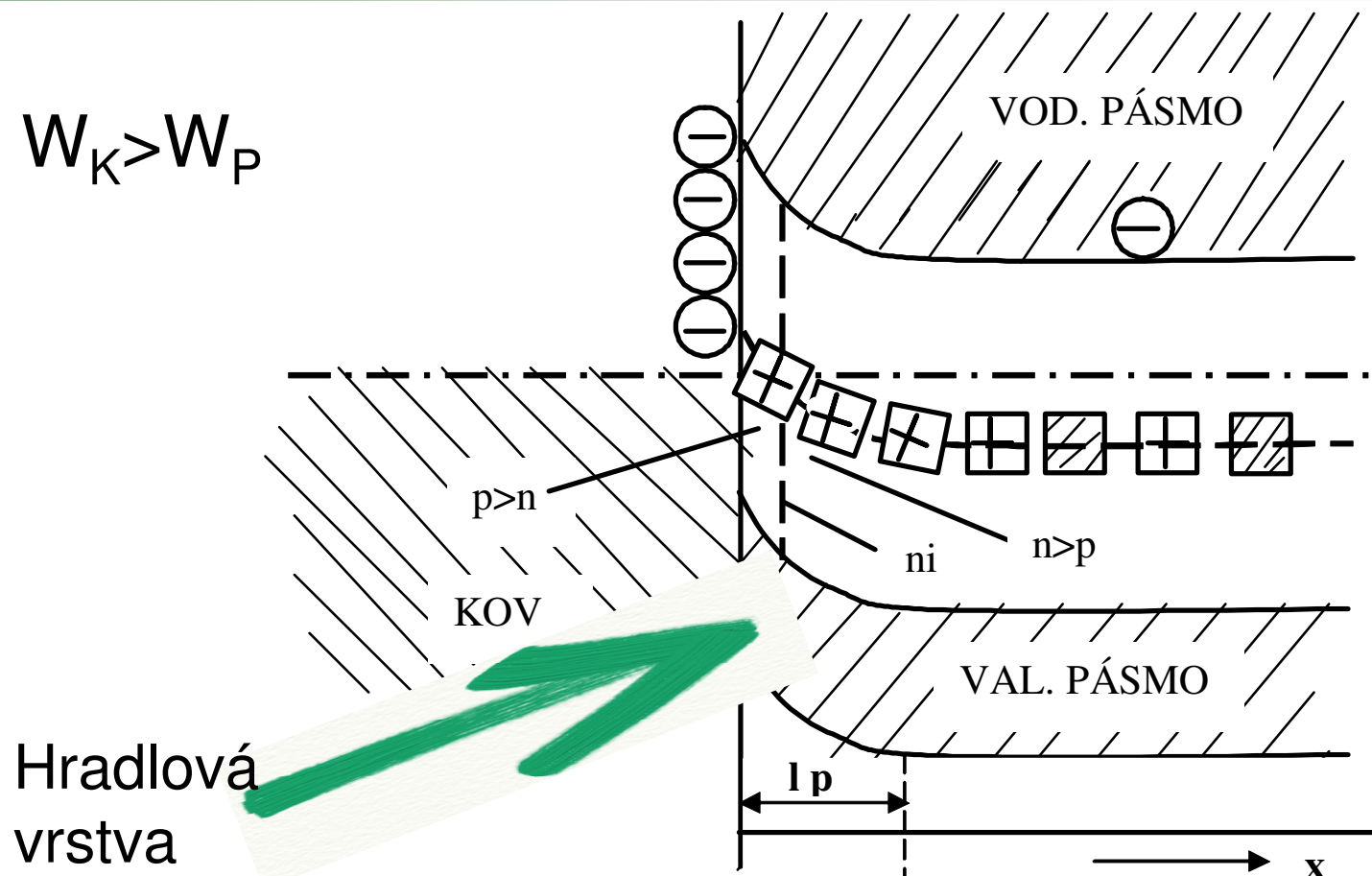


Materiály pre mechatroniku

Kontakt kovu a polovodiča



$$W_K > W_P$$



prof. Ing. Dušan Maga, PhD.
Brno, 11. – 15. 4. 2011
maga@yhnet.sk
www.kiwiki.info

**Znalosti a dovednosti v mechatronice - transfer
inovací do praxe, CZ.1.07/2.3.00/09.0162**



Materiály pre mechatroniku

PN Priechod



PN priechod → priestorová zmena typu polovodiča

- do jednej časti donory
- do druhej časti akceptory.





Materiály pre mechatroniku

PN Priechod



Difúzia $\rightarrow$ elektróny z „**N**“ do „**P**“ a diery z „**P**“ do „**N**“ až kým nenastane rovnovážny stav. Vznikne el. pole, ktoré bráni ďalšej difúzii.

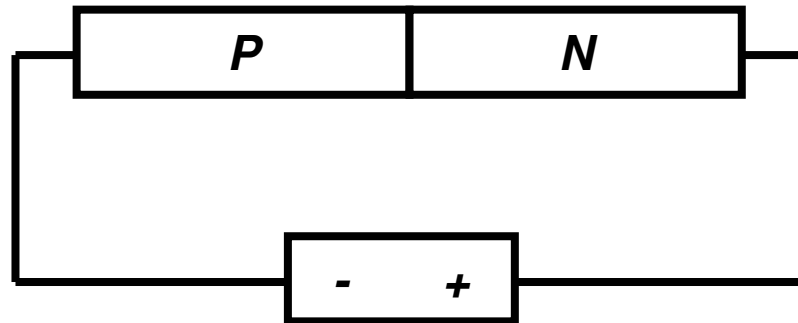
Vzniká vrstva ochudobnená o nosiče $\rightarrow$ hradlová vrstva. Jej hrúbku možno regulovať pripojeným napätím



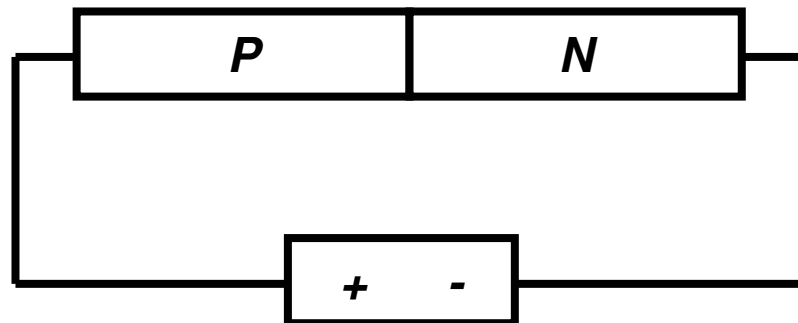


Materiály pre mechatroniku

PN Priechod



Polarita zhodná s polar.
difúzneho napätia $U_D \rightarrow$
major. nosiče sú vytláčané zo
stredu PN priechodu
k okrajom $\rightarrow$ zväčšenie
hradlovej vrstvy



Zmenšenie hradlovej vrstvy
 $\rightarrow$ ak $U = U_D \rightarrow$ hradl. vrstva
zanikne

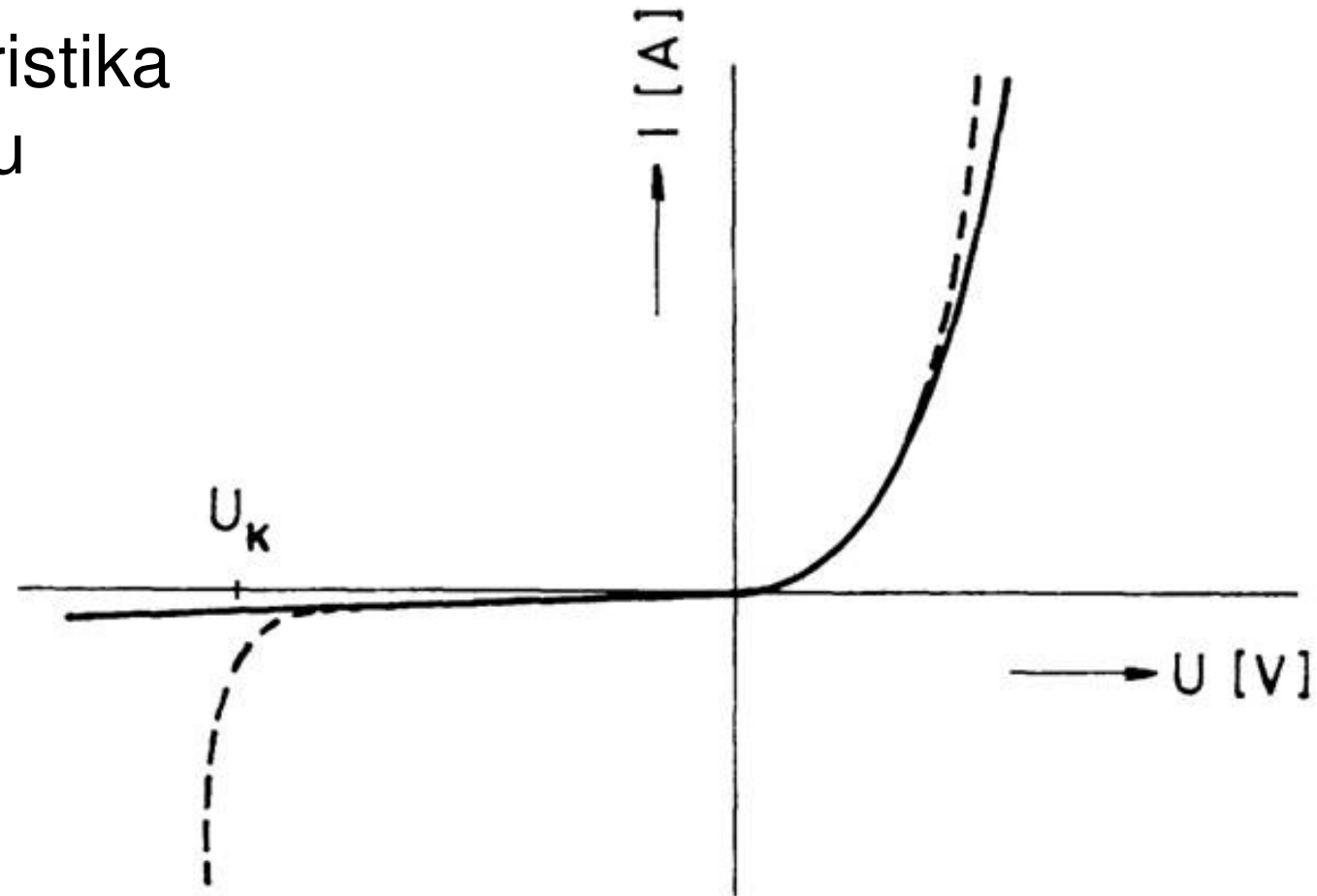


Materiály pre mechatroniku

PN Priechod



VA charakteristika PN priechodu



$$e \cdot D_n \frac{dn}{dx} = e \cdot n \cdot u_n \cdot E_D$$

$$J = J_s \left[e^{\pm \frac{eU}{kT}} - 1 \right]$$

prof. Ing. Dušan Maga, PhD.
Brno, 11. – 15. 4. 2011
maga@yhnet.sk
www.kiwiki.info

**Znalosti a dovednosti v mechatronice - transfer
inovací do praxe, CZ.1.07/2.3.00/09.0162**



Materiály pre mechatroniku

Polovodiče v nerovnovážnom stave



Termodynamická rovnováha →
elektrická neutralita + tepelná rovnováha

prof. Ing. Dušan Maga, PhD.
Brno, 11. – 15. 4. 2011
maga@yhnet.sk
www.kiwiki.info

**Znalosti a dovednosti v mechatronice - transfer
inovací do praxe, CZ.1.07/2.3.00/09.0162**





Materiály pre mechatroniku

Polovodiče v nerovnovážnom stave



Porucha = porušenie elektrickej neutrality

dôležité: za aký čas sa objaví rovnováha

→ frekvencia vonkajších porúch bez skreslenia signálu

$$\varepsilon \operatorname{div} E = \rho \quad \operatorname{div} = \partial / \partial x + \partial / \partial y + \partial / \partial z$$

kde:

ε – absolútna permitivita [Fm^{-1}]

E – intenzita elektrického poľa [Vm^{-1}]

ρ – priestorový náboj [Cm^{-3}]

prof. Ing. Dušan Maga, PhD.

Brno, 11. – 15. 4. 2011

maga@yhnet.sk

www.kiwiki.info

**Znalosti a dovednosti v mechatronice - transfer
inováci do praxe, CZ.1.07/2.3.00/09.0162**





Materiály pre mechatroniku

Polovodiče v nerovnovážnom stave



Porucha → vyvolá usmernený pohyb voľných nosičov náboja tak, aby porucha zanikla.

Hustota elektrického prúdu:

$$J = \sigma \cdot E$$

σ [Sm^{-1}] → konduktivita





Materiály pre mechatroniku

Polovodiče v nerovnovážnom stave



Náboj sa zmenšuje podľa vzťahu:

$$-\frac{d\rho}{dt} = \text{div} J$$

$$-\frac{d\rho}{dt} = \sigma \text{div} E \rightarrow \frac{d\rho}{dt} + \frac{\sigma}{\varepsilon} \rho = 0$$

riešenie :

$$\rho = \rho_0 e^{-\frac{t}{\tau_r}}$$

ρ_0 [Cm⁻³] priestorový náboj v čase $t = 0$

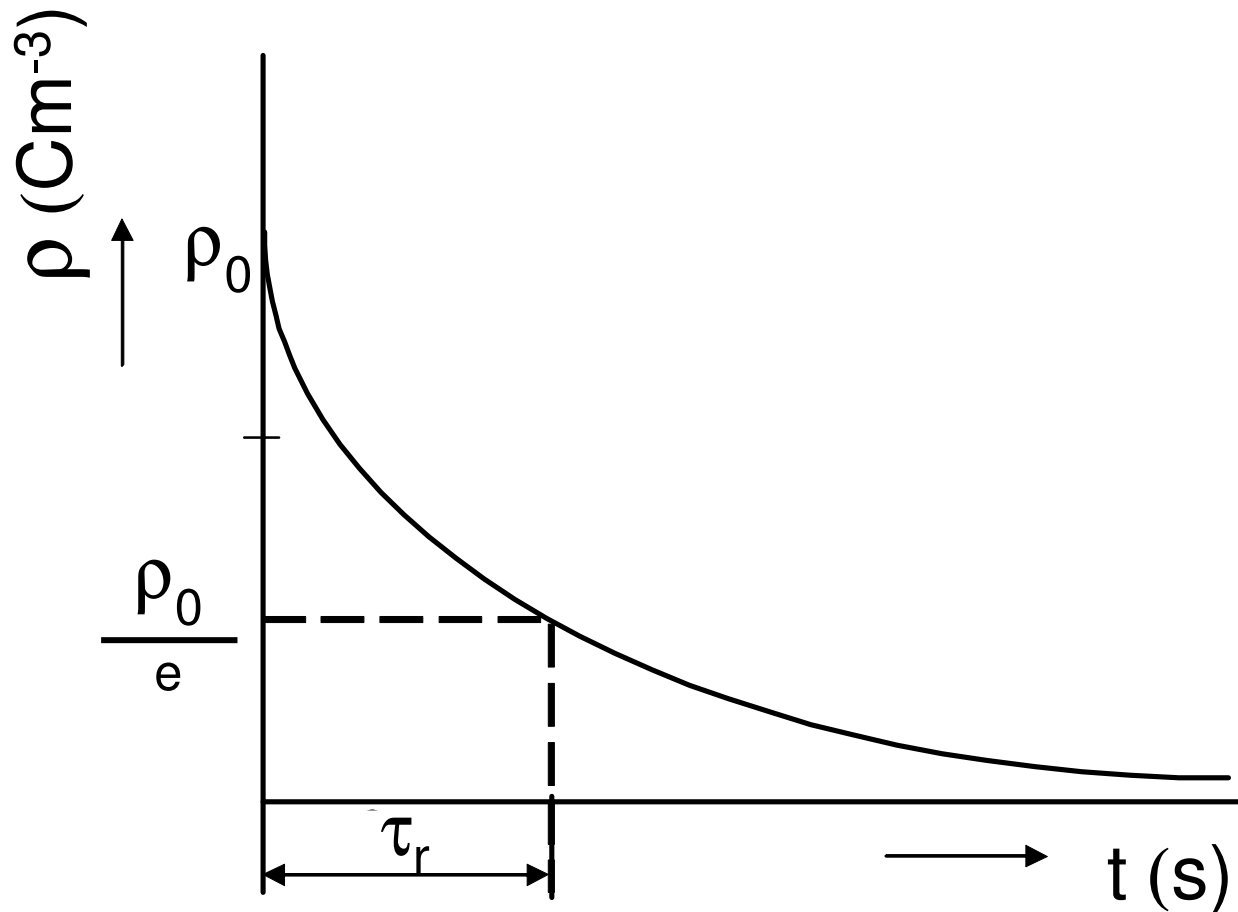
τ_r [s] relaxačný čas: $\tau_r = \varepsilon/\sigma$





Materiály pre mechatroniku

Polovodiče v nerovnovážnom stave



prof. Ing. Dušan Maga, PhD.
Brno, 11. – 15. 4. 2011
maga@yhnet.sk
www.kiwiki.info

**Znalosti a dovednosti v mechatronice - transfer
inovací do praxe, CZ.1.07/2.3.00/09.0162**



Materiály pre mechatroniku

Polovodiče v nerovnovážnom stave



Zánik deja:

pre $t \geq 3\tau_r$

kremík, germánium:

$\tau_r = 10^{-12} \text{ s} \rightarrow f \approx 300 \text{ GHz}$



t (s)	$\rho \text{ (Cm}^{-3}\text{)}$
0	100,00%
τ_r	36,79%
$2\tau_r$	13,53%
$3\tau_r$	4,98%
$4\tau_r$	1,83%
$5\tau_r$	0,67%
$6\tau_r$	0,25%

prof. Ing. Dušan Maga, PhD.
Brno, 11. – 15. 4. 2011
maga@yhnet.sk
www.kiwiki.info

**Znalosti a dovednosti v mechatronice - transfer
inováci do praxe, CZ.1.07/2.3.00/09.0162**

