

# EL. PROUD V POLOVODIČÍCH

## Polovodiče - významy

teorie: 20. letů 20. st.

praxe: 50. letů 20. st.

definice:

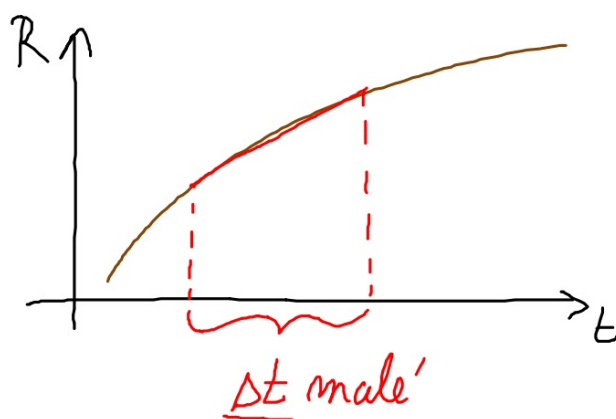
a) dle hodnoty měrného odporu  $\rho$ :

- kovy:  $\rho \in (10^{-8}, 10^{-6}) \Omega \cdot m$ ;  $\rho_{Ag} = 1,6 \cdot 10^{\boxed{8}} \Omega \cdot m$
- polovodiče:  $\rho \in (10^{-6}, 10^8) \Omega \cdot m$
- izolanty:  $\rho > 10^8 \Omega \cdot m$ ;  $\rho_{diamant} = 3 \cdot 10^{\boxed{16}} \Omega \cdot m$   
24 řádů

b) Závislost odporu na teplotě

- kovy:  $t \uparrow \Rightarrow R \uparrow$

$$R = R_0 (1 + \alpha \cdot \Delta t) \dots \text{linearnizace reálného průběhu}$$



• polovodiče

-  $T \uparrow \Rightarrow R \downarrow$

-  $T \uparrow \Rightarrow R \uparrow$ ; skromější než u kovů

# Venik el. proudu v polovodičích

## 1, Vlastní polovodiče

nejrozšířenější prvek pro výrobu: Ge, Si

BEZ PŘÍMĚSI

Si... 4. sk. PSP

↳ 4 valenční elektrony

• umožní namik vazby

• snadno se **uvolní**  $\Leftarrow$  pson

nejsou vzdáleny od jádra, přítahovací  
síla je slabá



□ musno dodat ENERGIU; tu musu  
e<sup>-</sup> dostat NAJEDNOU

mechanismy dodani energie:

- TEPERMA' EXCITACE ... ohrev, rozjem  
vibrami energie → vzplneni' elektronu
- SVETLMA' EXCITACE ... dopad svetla  
s maiton fraci' ( $h \cdot$  energii')

~ "staci" viditelni, protoze:

- $E_{e-si} = 1,1 \text{ eV}$

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \text{ J}$$

- E foton viditelneho svetla?

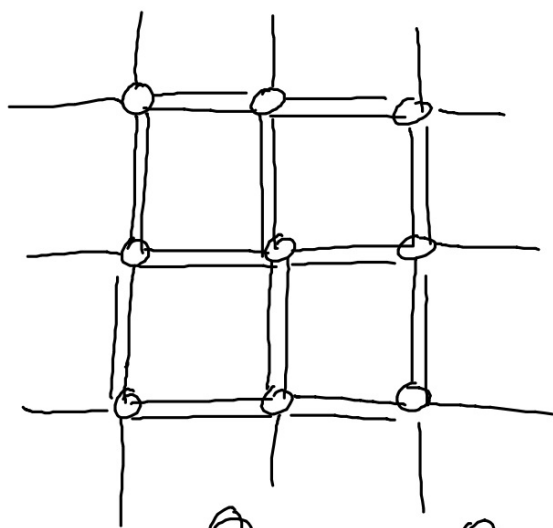
$$\lambda \in (400, 800) \text{ nm}$$

$$\lambda_1 = 600 \text{ nm} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$\text{Planck: } E = hf = \frac{hc}{\lambda_1} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ J} =}{6 \cdot 10^{-7}} = 3,3 \cdot 10^{-19} \text{ J} \doteq 2 \text{ eV}$$

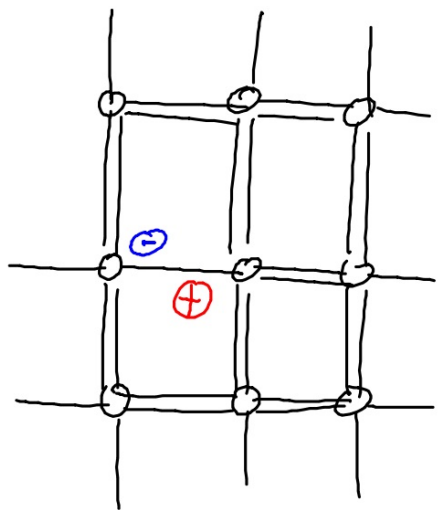
- EXCITACE EL. POLEM ... flo by mude' ryhorost + silne' elsd - pole, ale pritom by nastal PRŮRAZ a emicem' sonič'stly

Si - krydžlora' plošně centrovana' sonstora  
...  
↳ manualizace gen 2D



$$Q_{\text{molekuly}} = 0$$

+ E :



○ ... atom Si

— ...  $e^-$ , který se podílí na vazbě

⊖ ...  $e^-$

⊕ ... KVAZICÁSTICE DÍRA (= absence po elektronu)

VZNIK PÁRU  $e^-$  - díra PŘI DODÁNÍ ENERGIE  
= GENERACE

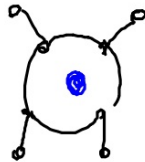
ZÁNİK PÁRU  $e^-$  - díra ZA UVOLNĚNÍ ENERGIE  
= REKOMBINACE

## 2) Příměsové polovodiče

- PŘÍMĚS - cíleně přidána („na klíč“)
- NEČISTOTA - omylem; může ovlivnit vodivost

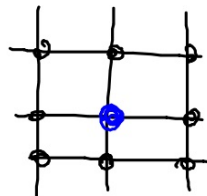
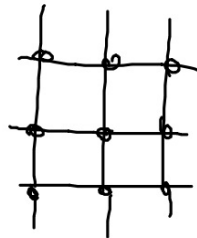
2 možnosti „umístění“ příměsí do struktury  $\text{Si}$

- INTERSTICIALEM (meziatomová) POLOHÁ



... změna  $V$ ;  $\frac{Q}{V}$  ... a vodivosti

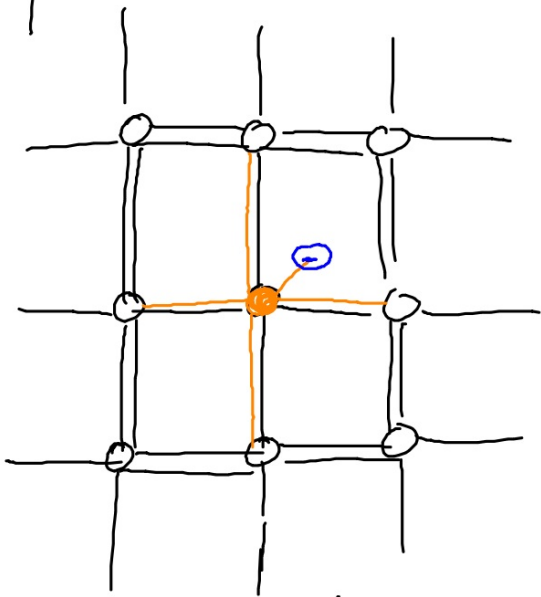
• SUBSTANCE



$V = \text{konst}$ , ale pridam  
malitok c'as'ku

pridanim „c'as'ku“ porok ZHIS'NE VODIVOST  
polovodice (PRIME SOLA' VODIVOST)

a) prímes z 5. sk. PSP ( $P, As, Sb, \dots$ )



⊖ nemá 'svojich' rovných s atomy  $\underline{Si}$   
 $\Rightarrow$  je väzban s ľavé  
 $\Rightarrow$  môže sa oddeliť  
 a podílet se na vedení

el. prevodu (tj. máme "dodatkový zdroj  $e^-$ ")  
 $\rightarrow$  máme k vlastnej vodivosti



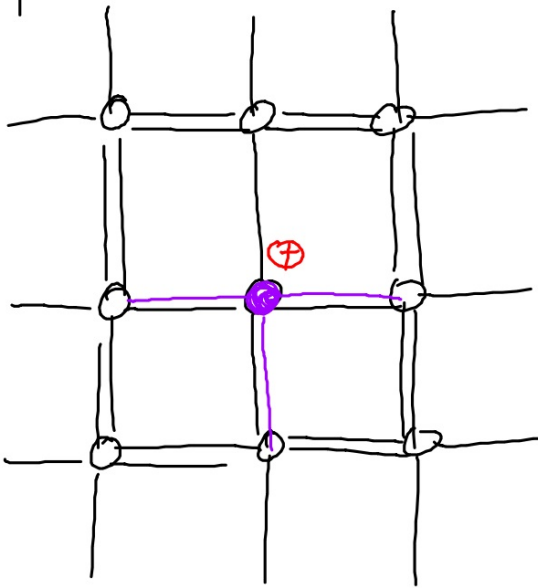
⊙ - DĀRĶE (DONOR)  $e^-$

⊖ - VĒTŠĪNOVI' (MAJORITĀI') nesitēlo'nalboņe

⊕ - *dīra* (2 nlasīnu' vrdīrosh) ... MENŠĪNOVI'  
(MINORITĀI') nesitel nālboņe

⇒ pīvosiņe elektroņnu' vrdīrost ... vrdīrost tīpu N  
(polarvrdī' tīpu N)

b) priměs ze 3. sk. PSP (B, Al, Ga, ...)



$\oplus$  mi'sto, kde cfr' elektron (ke vzniku vlny s atomem Si);  
díra

ta mi'se rekombinovat s elektronem (z jiné mi'sto)

mi'sta krystalu)  $\Rightarrow$  "přesun díry" na jiné mi'sto

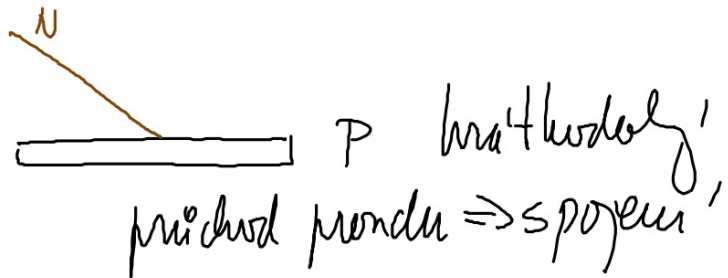
- ⊖ - PŘÍMĚNCE (AKCEPTOR) elektron
- ⊕ - majoritní nosiče náboje
- ⊖ - minoritní — " —

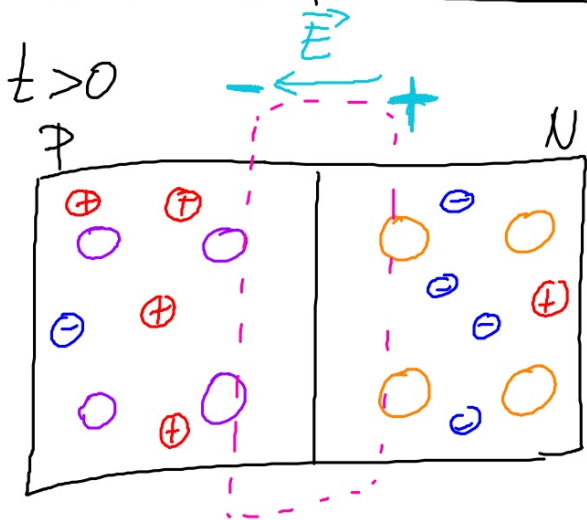
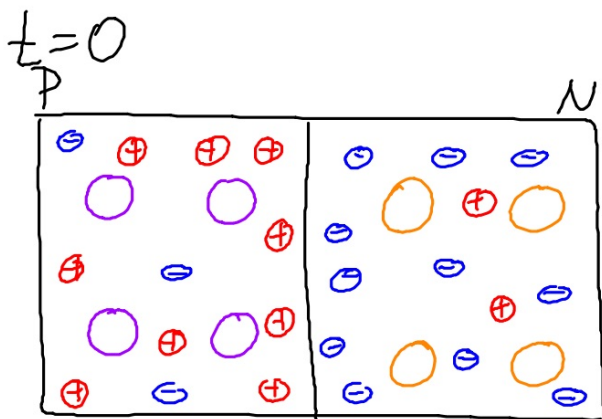
převážně ДЕРОВА' VODIVOST ... vodivost typu P  
 (převládá typ P)

# Přechod PN (hrotdo, gate)

1) Fyzikální podstata

spojení polovodiče P a N na MIKROSKOPICKE  
úrovni





○ — prihmės re 3-sk.  
(aniont)

○ — prihmės re 5-sk.  
(kationt)

⊕ — dily

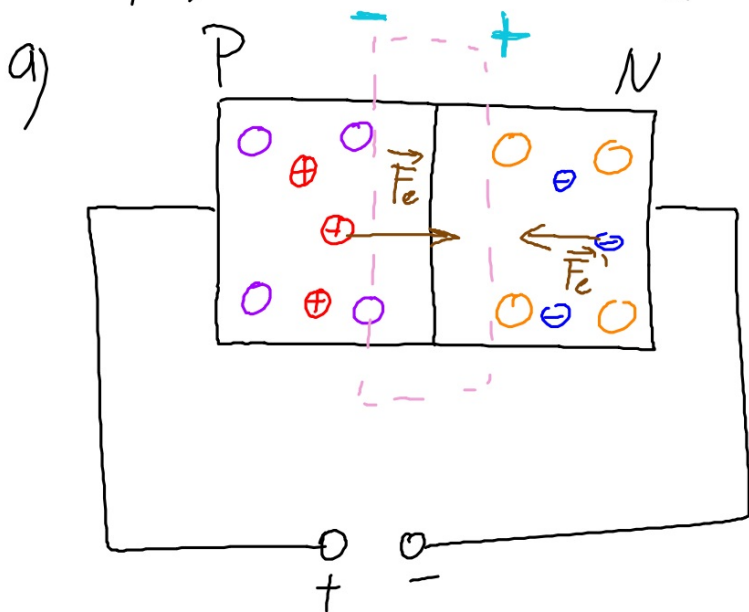
⊖ —  $e^-$

bes volny'ch  
mosič'ch na'bozej

$R \rightarrow \infty$

dily iontarn (sedič'ajm  
v m'oz'ci) se v m'  
v'm'line el'st. pole

## 2, Zapojení do obvodu



$\ominus, \oplus$  - VOLNĚ

$\vec{F}_e, \vec{F}_e'$  - síla,  
která „tlačí“  
částečky ke zdroji

- + ~ bariera  
pro páry  $\ominus$  a  $\oplus$

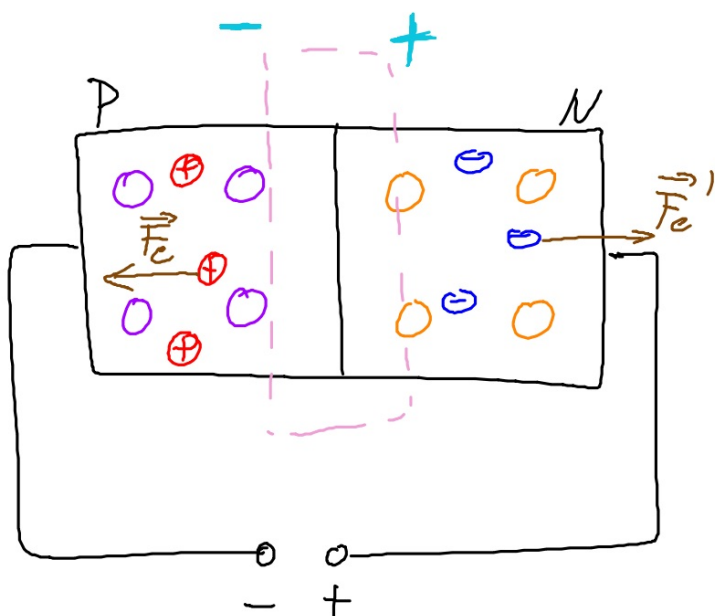
síly  $\vec{F}_e$  a  $\vec{F}_e'$  lze zvýšit zvýšením napětím zdroje  $\Rightarrow$   
 $\Rightarrow$  lze minimalizovat napětí, které musí zdroj mít, aby  
 el. proud pokračoval

toto napětí:  $U_p$  - PRAHOVÉ NAPĚTÍ  
 $U_p \sim 0,8 V$  (viz datasheet)

$U_{ZDROJE} > U_p$  ... el. proud prochází

toto zapojení: ZAPOJENÍ V PŘÍMÉM  
(PROPUSTNÉM) SMĚRU

b)



rovnováha bez  
 volných nosičů  
 má boje s ROZŠÍ-  
 ŘENÍM ⇒ proud  
 neprochází

při napětí  $U_{PR}$  - PRŮRAZOVÉ NAPĚTÍ nastane  
 PRŮRAZ PŘECHODU PN; pokud předtím nemí  
 napětí, je proud destruktivní;  $U_{PR}$  ~ desítky  
 voltů



foto zapojení: ZAPOJENÍ V ZÁVĚRNÉM  
SMĚRU

### 3, Osvětlení přechodu PN

energie světla způsobí GENERACI páru  $e^-$ -díra,  
dílně ovlivňuje vodivost přechodu  
aplikace: FOTODIODA

# Polovodičové součástky

## 1, Termistor

2 druhy:

• NTC (negistor) -  $t \uparrow \Rightarrow R \downarrow$  (digitální  
deplomér, 15 pondémí  
...)  
 $\alpha < 0$

• PTC (pozistor) -  $t \uparrow \Rightarrow R \uparrow$

$\alpha > 0$

(ochrana před přílišným proudem  
vlivem ohřevu)

## 2, Fotoristor

mění odpor v závislosti na osvětlení  
níže světla  $\Rightarrow R \downarrow$

princip: fotoefekt

— dominantní: free carriers

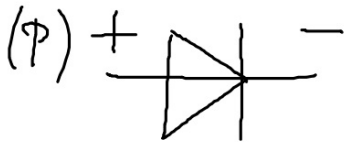
$$E_{\text{foton}} = h \cdot f \geq E_{\text{vytrácení } e^-}$$

— pak: 1 foton  $\sim$  1  $e^-$

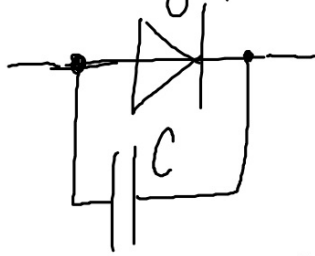
využití: "fotobuňky"

### 3, Dioda

#### a) Usměrňovací dioda



typy: HROTVA' - mala' plocha  
mały proud

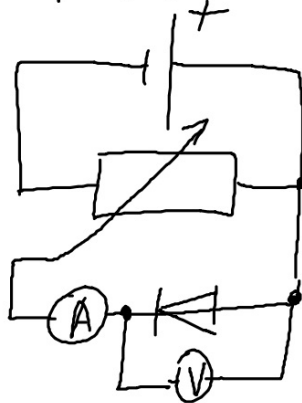


usměrňovací - skřídavý proud:  $X_C = \frac{1}{\omega C}$   
velká  $f \Rightarrow$  mala'  $X_C$

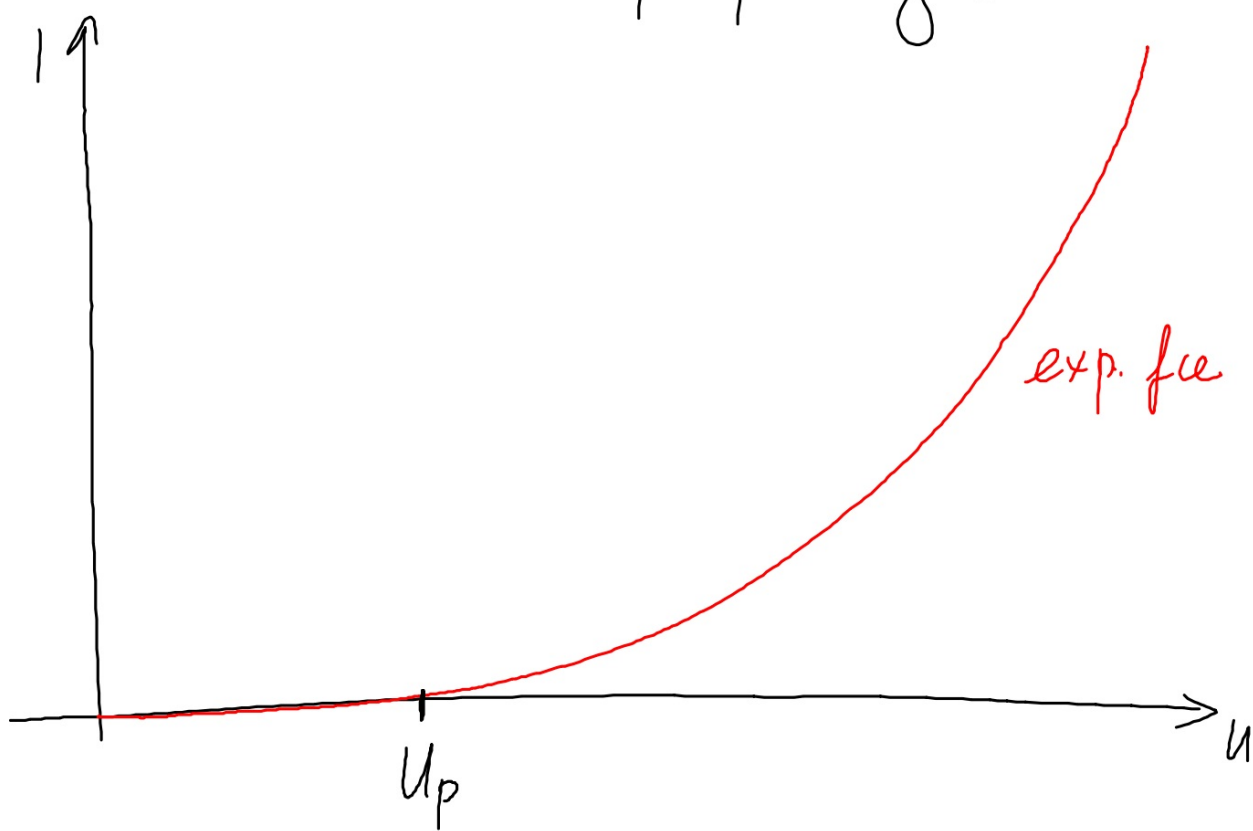
PLOŠANA' - snese veřto' proudy  
m směr mērui' proudu m'zto'  
přice

dioda = „PN přechod m krabičce se 2 vývody“

experiment - VA charakteristika



VA charakteristika - propustný směr

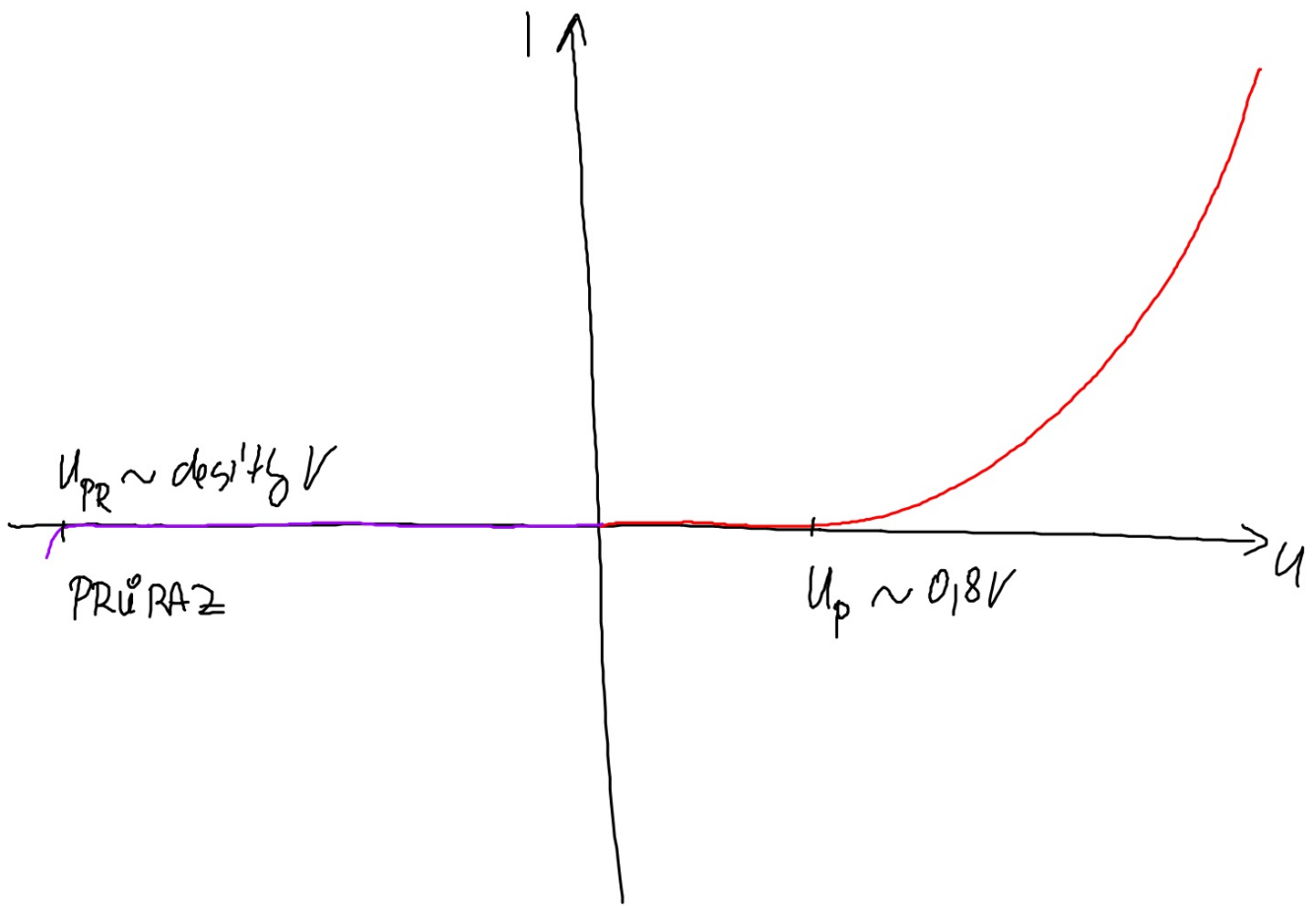


Odvislost neni' linearna'

↳ neplati  $R = \text{konst} \Rightarrow$   
 $\Rightarrow$  neplati Ohmova zakon

ale v kasde'm bodu' v'itny' plati:  $R_A = \frac{U_A}{I_A}$

A ~ aktualni' hodny





## b) Zenerova (stabilizacni) dioda



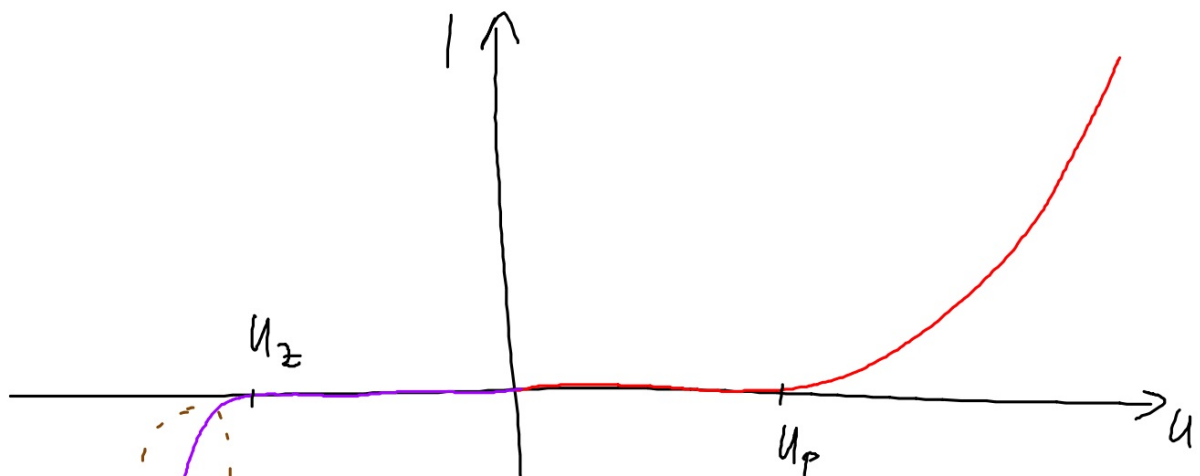
speciální konstrukce přechodu PN: přechod  
vytvorí el. pole s intenzitou  $500 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  
toto pole dobře vytrhne  $e^-$  ... Zenerův

$$\vec{E} \Rightarrow \Delta \varphi \Rightarrow U \Rightarrow \text{energie}$$

průraz (nedestruktivní)

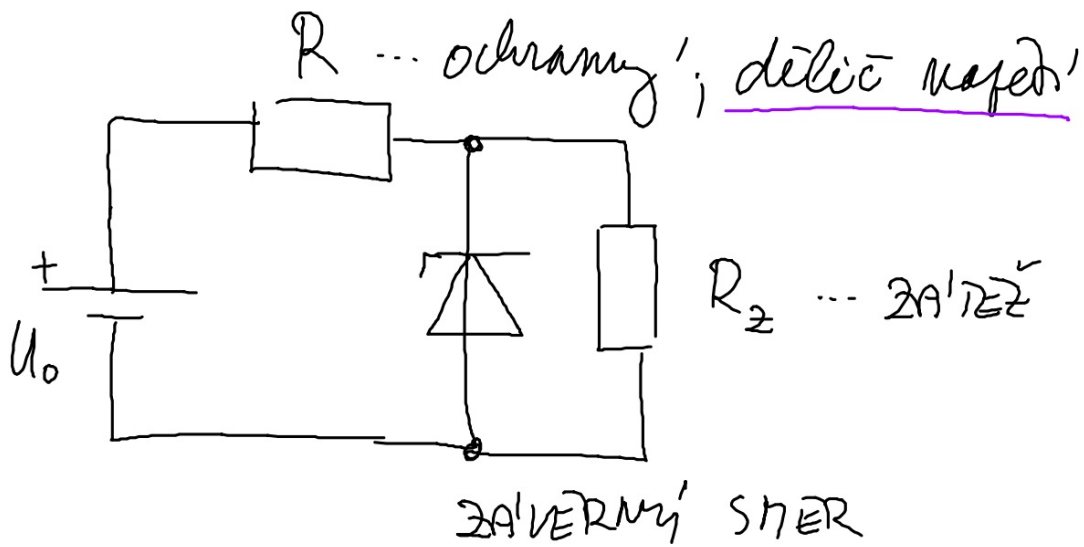
uvolnění  $e^-$  jsou rychlejší  $\Rightarrow$  na vesmírné úrovni  
další ... lavinový průraz

# VA charakteristika



pracovní  
oblast  
("stejně napětí než nízke na proudu")

$U_Z$  - Zenerovo napětí (~ Zenerio pířaz)



napětí na diodě je skoro STEJAKÉ bez ohledu  
 na proud tekoucí přes ochranný rezistor  
 resp. diodu  $\Rightarrow$  na zátěži je stejně skoro STEJAKÉ  
 napětí; STABILIZACE NAPĚTÍ zátěží

nerijhoda stabilizace: velký odběr  
proudu  $\Rightarrow$  „ztráta“ energie

4, LED

(světlo emitující dioda)

zařinik páru  $e^- + d^+na \Rightarrow$  volněm' energie ;  
pokud se energie volněm' ve vhodném materiálu,  
přeměm' se na světelnou energii

Vymožiti' polovodičové' techniky v praxi

hradla ovládací' el. obvody (čidlo  
teploty, tlaku, automat na kávu, ...);

lze simulovat pomocí' el. obvodů'  
se zábrnkami a spinači

realizace v praxi: tranzistory

logické' spojky: vstup: spinače  
výstup: zábrnka

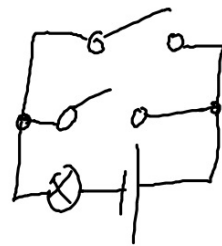
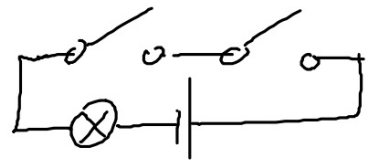
A	B	$A \wedge B$	$A \vee B$	$A \bar{\vee} B$	$A'$	$(A \wedge B)'$ A NAND B	$(A \vee B)'$ A NOR B
0	0	0	0	0	1	1	1
0	1	0	1	1	1	1	0
1	0	0	1	1	0	1	0
1	1	1	1	0	0	0	0

$\wedge$  - конъюнкция; а, а одновременно; AND

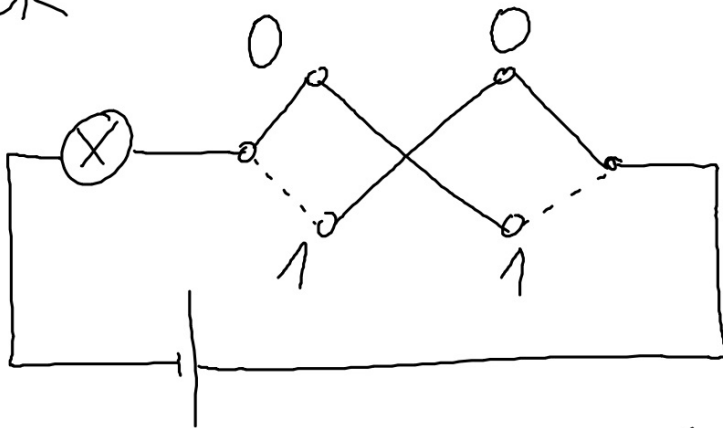
$\vee$  - дисъюнкция; либо, а также; OR

$\bar{\vee}$  - исключительное либо; либо... а либо; XOR

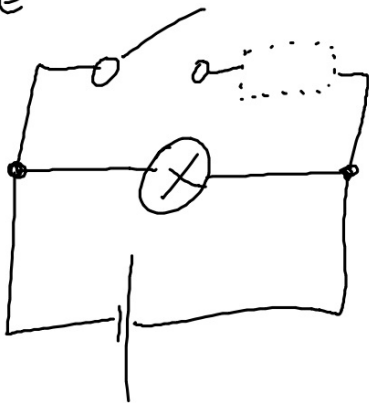
NAND



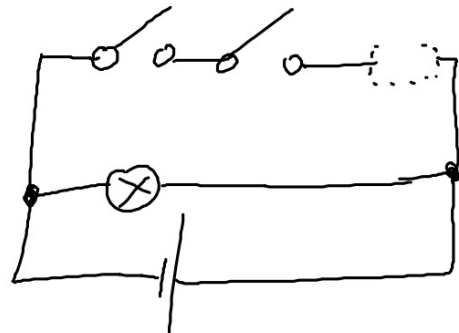
XOR



NEGATE



NAND



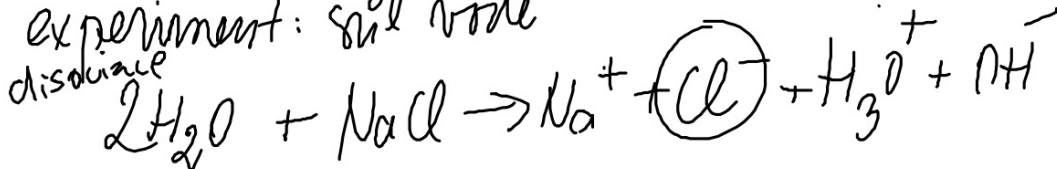
# EL. PROUD V KAPALINÁCH

Elektrolyt, elektrolyza

elektrolyt - kapalina s volnými nosiči náboje

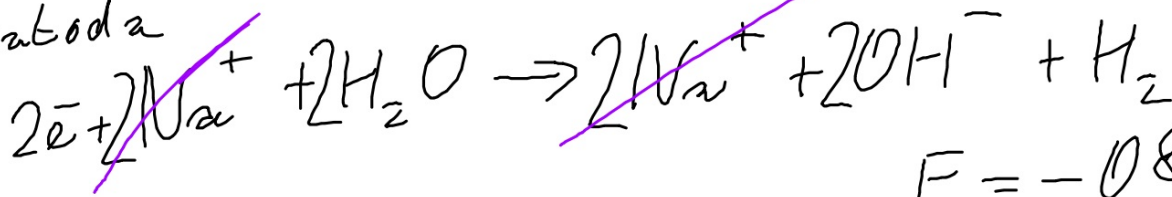
experiment: soľ vody

disociácia





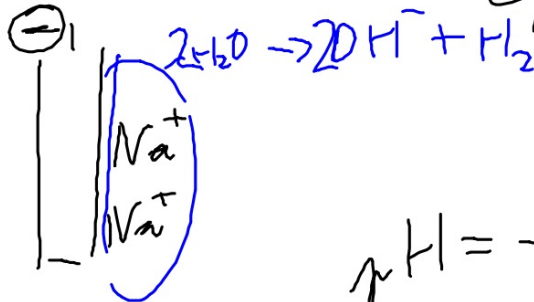
katoda



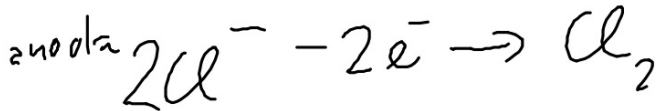
$$E_{H_2O/OH^-} = -0,828 V$$



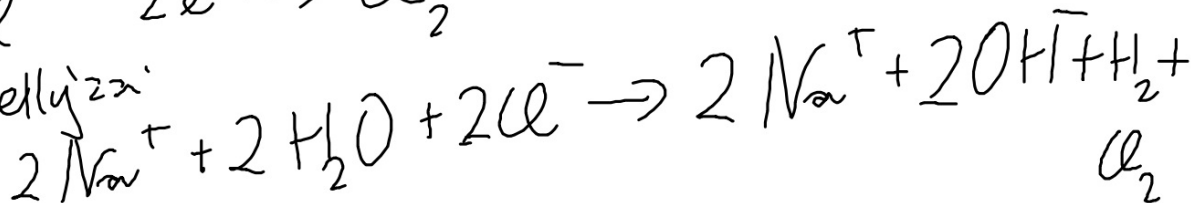
$$E_{Na^+/Na} = -2,714 V$$



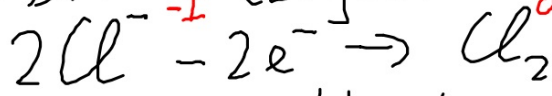
$$pH = -\log C_{H_3O^+}$$



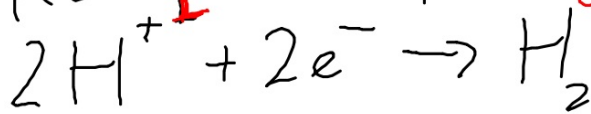
celhove ellyza



anoda - elektroda, na které probíhá  
OXIDACE (zvýšení ox. čísla)



katoda - elektroda, na které probíhá  
REDUKCE (pokles ox. čísla)



# Faradayovy zákony elektrolyzy

popisují množství látky uvolněné  
na elektrodách

látke ve formě iontů  $\Rightarrow$  při uvolnění

kovu na KATODĚ iont přijímá měřítky

proct elektronů

$v$  - počet  $e^-$  nutných ke vzniku neutrálního atomu

$Q$  - mólby, litery' pomyde obrodem

1 elektron ...  $e$

$N$  ... počet atomu', litery' lse a mólbye  $Q$   
zi'skat

1 atom ...  $\gamma$  elektronu' ...  $\gamma e$  (mólby)

$$N = \frac{Q}{\gamma e}$$

$$N = m N_A = \frac{m}{M_m} N_A$$

$$\left. \begin{array}{l} N = \frac{Q}{\gamma e} \\ N = m N_A = \frac{m}{M_m} N_A \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{m}{M_m} N_A = \frac{Q}{\gamma e}$$

$$m = \frac{Q}{\gamma e N_A} M_m$$

$$m = \frac{M_m}{\gamma e N_A} Q = \frac{M_m}{\gamma F} \cdot I \cdot t$$

C: F

$$F = e N_A = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6 \cdot 10^{23} \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$F = 9,6 \cdot 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$$

1. FARADAYŪV ZAKON  $m \sim Q$   
 $m = A \cdot Q$

2. FARADAYŪV ZAKON  $A = \frac{M_m}{\gamma F} \dots$  elektrochemiŭj/  
 ekvivalent kaitij

$$m N_A = \frac{Q}{\gamma e}$$

$$m = \frac{Q}{\nu F}$$

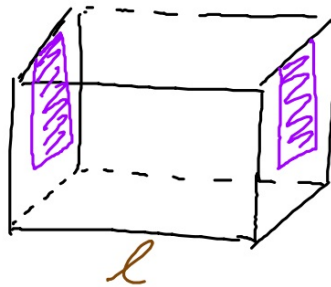
$$m \nu = \frac{Q}{F}$$

$Q = \text{konst.}$  :  $\frac{m_1 \nu_1}{m_2 \nu_2} = 1 \Rightarrow \boxed{m_1 \nu_1 = m_2 \nu_2}$

$\sim$  chemische Äquivalenz  
lätze

# Odpor elektrody

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

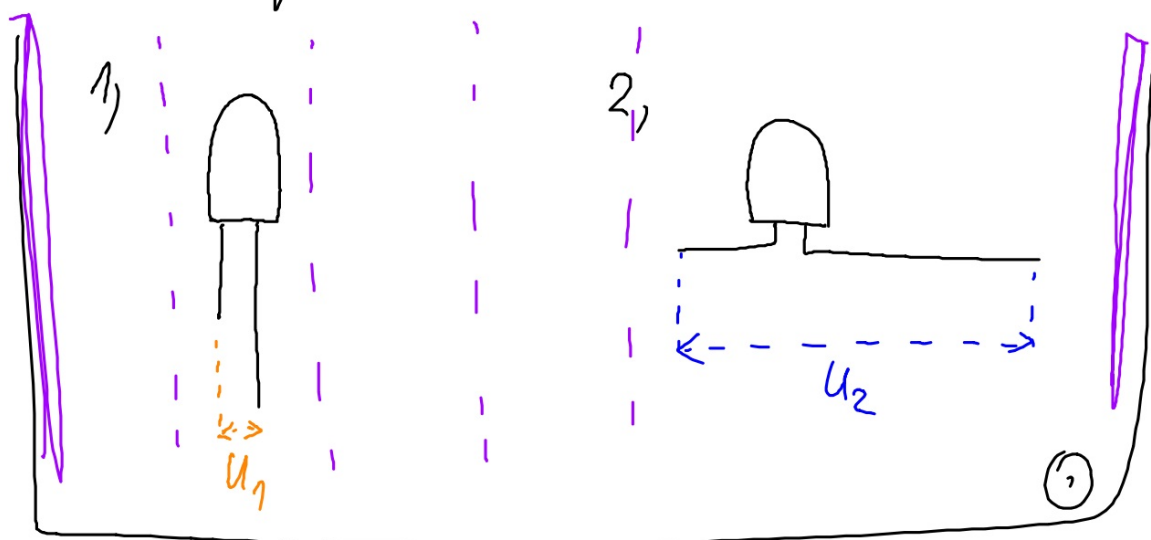


$l$  - vzdálenost elektrod

$S$  - aktivní plocha elektrod

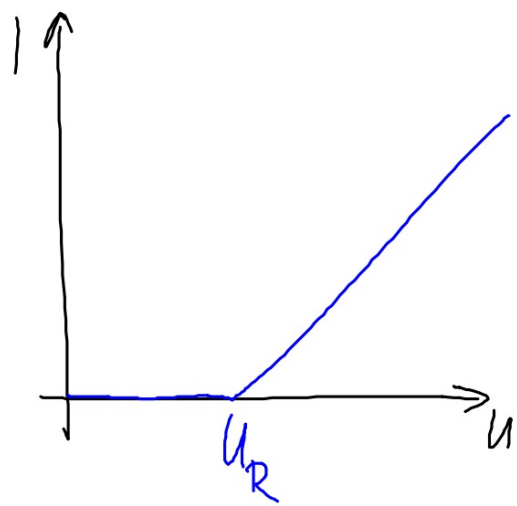
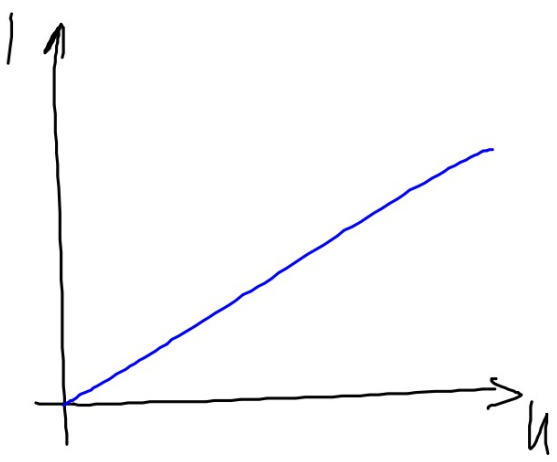
$\rho$  - měrný odpor elektrody

Wrookwe' mapeh' ~ LED ne roode-





VA



ROZKLADNE'  
MAPETI'

# EL. PROUD V PLYNECH

=  $n_j \cdot v_j$

$N_{\text{samostatny}} \times \text{samostatny } n_j \cdot v_j$

---

plyn mede el. proud  $\Leftrightarrow$  n plyn  $n \cdot v_{\text{son}}$   
VOLUME NABITE ČÁSTICE:

- $e^-$
- ionty

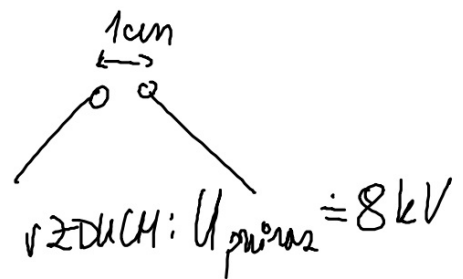
k vytržení částic: ENERGIE  $\rightarrow$  IONIZACE

2 možnosti získání energie :

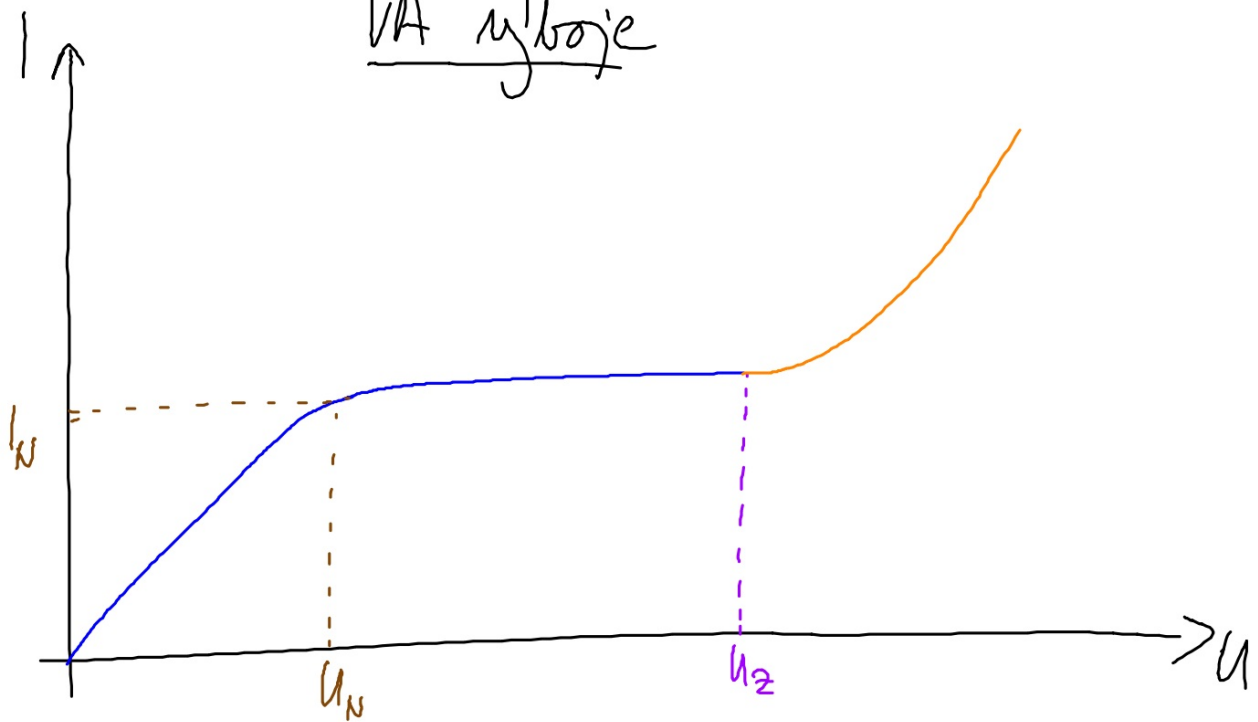
- Energie dodávané zvenčí ... IONIZÁTOR  
(plamen svíčky, RTG záření, UV záření, ...)
- ionizace nárazem - používají se  
částice (relativně vysokého el. pole) předá  
část své kinetické energie molekulám plynu  
⇒ ionizace

~ NESAMOSTATNÝ VÝBOJ

— SAMOSTATNÝ VÝBOJ



# VA nýboje



$I_N$  - nasyceny proud;  $U \in (U_N; U_Z) : I = \text{konst}$   
(anoda'ha mezi 'om'kami' a rekonb'nci')

$U_Z$  - od'palno' nap'eti'

# Typy výbojů

1, ze atmosférického tlaku

## • OBLOUKAČI

- dlouhodobý
- relativně velký proud  $\Rightarrow$   
 $\Rightarrow$  ohřev  $\Rightarrow$  opotřebené elektrody
- přík: obloukové lampy  
svařička

• JISKROV!

- kra'tholy'
- mensi' el. prond => mensi' shiro
- maxe: zapalovao  
blesh

• KORONA

- frseny' y'byj
- ostre' kray, kroy, ...
- Elia' s'it' ohen



## 2, 2a sm'z'enello halin

◦ DOUVAK' ~ obloukoy'

- nižō' hal ⇒ me'mē cā'sh'e ⇒

⇒ pro mykšene' e- nebo ionty (orl'mem  
2droje nofōti) je me'mē „pčeka'žeh“

⇒ nižō' nofōti mež n obloukonekko

- 2a'it'ly  
reklama' kulica  
plazmova' klenle

# STACIONARNI' MG-POLE

Zakladni' pojmy, pozn's

2 typy mg. pole:

- STACIONARNI'

- klasičnosti' jsou neměnné' v čase
- $\vec{B} = \text{konst}$ ; mg. indukce

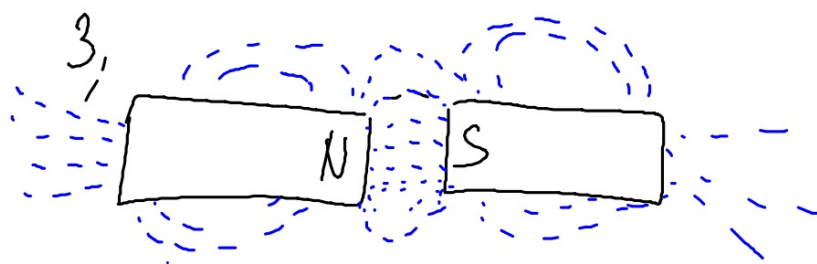
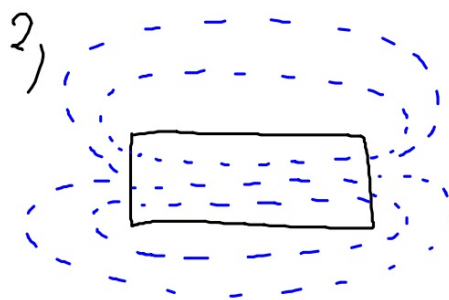
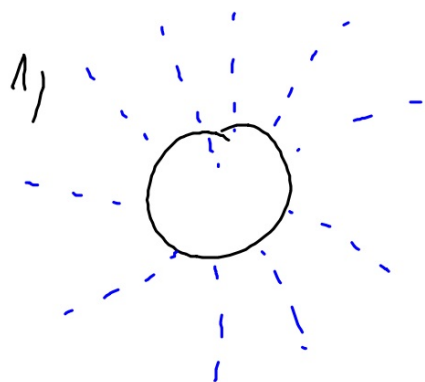
- NESTACIONARNI'

- $\vec{B}$  je v čase proměnná'



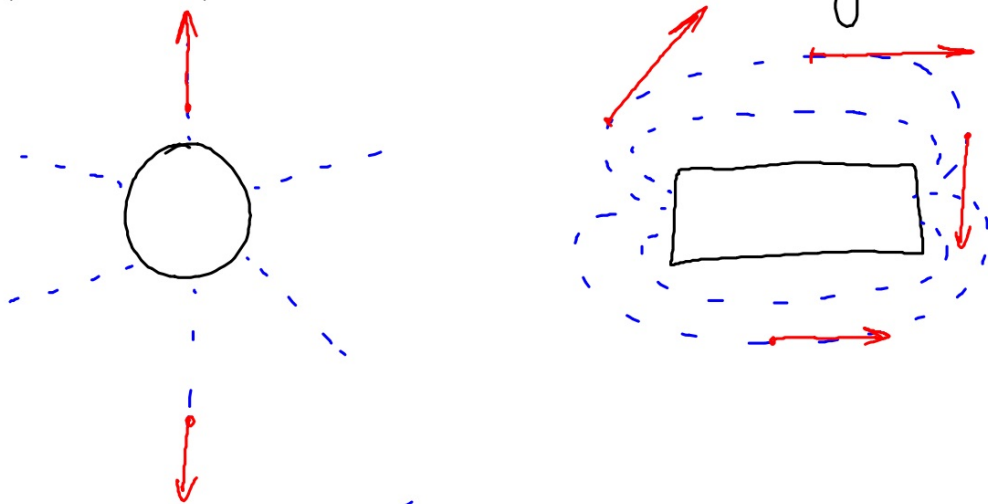
popri's mag. pole:

- pomocou obrazku: magnet + železnej píličky



- magnet + mg. fo'lie

- popri's pomocu' vektoru mg. indukcie



..... MG. INDUKCIJA ČÁRY  
 → MG. INDUKCE; TĚŽNÝ VEKTOR K MĚ;  $\vec{B}; [B]=T$   
 (tesla)

Jesla - relativně velká

$$B_{\text{Země}} \sim 20 \mu\text{T}$$

$$B_{\text{NEODYM}} \sim 1 \text{ T}$$

Mic jsou uzavřené vlny:  $N \rightarrow S$  (VNĚ  
MAGNETU)

Zdroj mag. pole:

- magnet

- Země

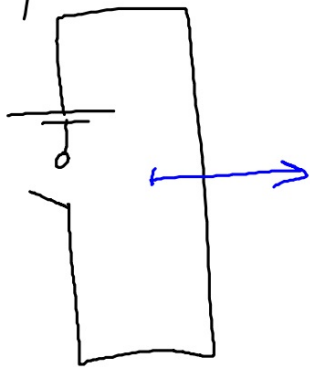
- vodič, kterým teče el. proud

# Mg. pole v okolí vodiče s proudem

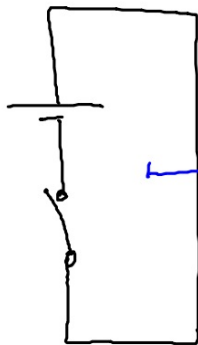
experiment: vodič s proudem + sonda

SHORA

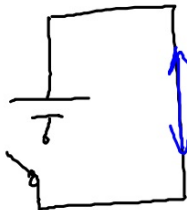
1, a)



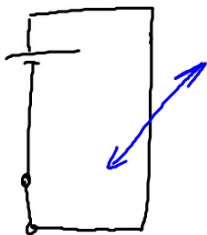
b)



2, a)



b)



3, změna polarity  
odruče => nejčten  
středů na druhem  
strann

4) skrička pod vodičom

5) vodič ... snižka u skričke

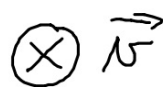
mg. pole vodiče:

- nič ... sonškie dno' hce koľom vodiče
- nič lezi' u non'ne KOLME' k vodiči
- směr dalm DOPLUVOU - Ampé'ro  
meridlo PRAVE' RUKY

znacím' směru magnetického pole k nárysnu

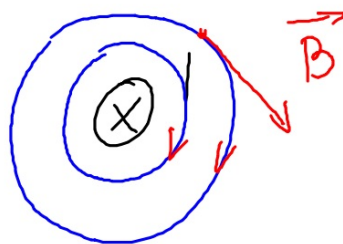
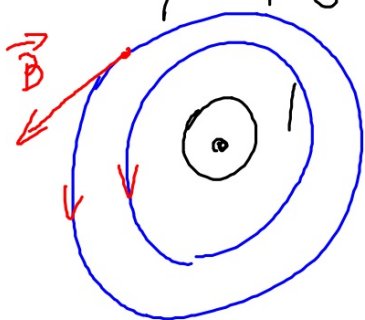


Z NARÝSNY



DO NARÝSNY

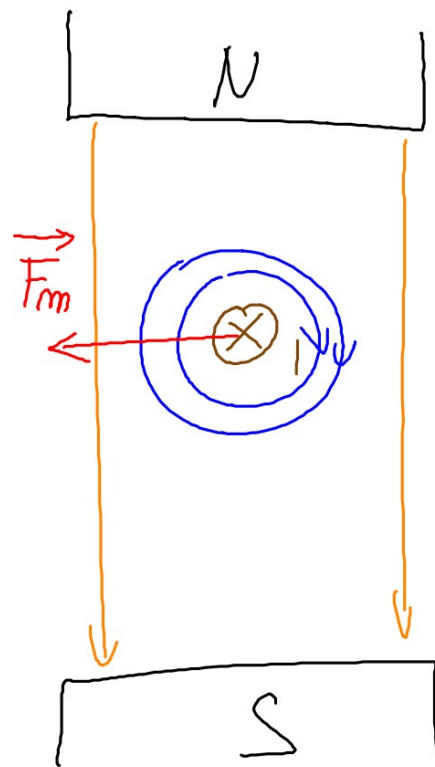
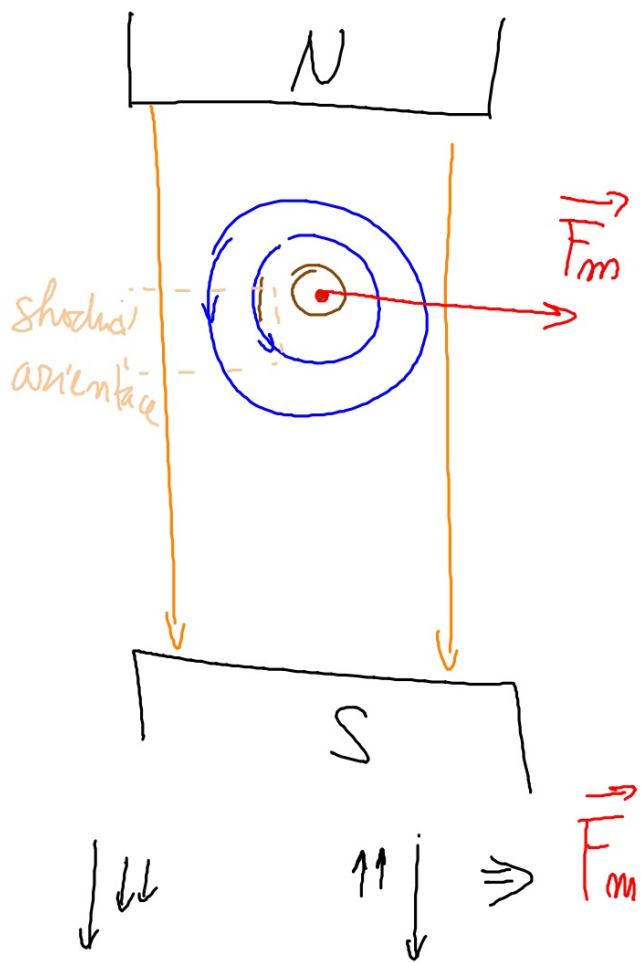
takéž u el. proudu  $I$ : směr dle DOKLADU  
přesně podle KLADBY ČÁSTIC



## Mg. síla

přísobí mezi:

- 2 magnety
- mezi vodičem s proudem a magnetem
- mezi 2 vodiči s proudem
- pohybující se částicí a mg. polem





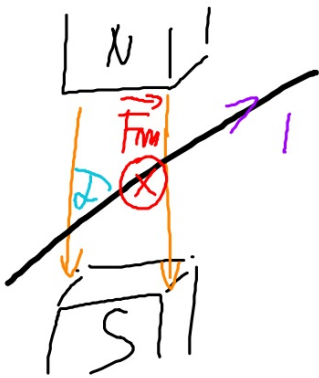
Směr  $\vec{F}_m$  : FLEMINGOVO PRAVIDLO LEVE!

RUKY:

- MÍČ UMĚJŠÍHO POLE ... do dlaně
- domulový směr proudu ... prsty
- odtažený palec  $\sim \vec{F}_m$

$F_m$  računována:

- $B$  mag. pole
- $l$  ( $\sim$  mag. pole vodiče)
- $I$  - císlna vodiče
- úhel mezi vodičem a  $M$  c



$$F_m = B I l \sin \alpha$$

$$\vec{F}_m \perp \vec{B} \quad \wedge \quad \vec{F}_m \perp \text{rodic} \dots \text{VZDY}$$

mění se u hel mezi rodicem a  $\vec{B}$