

## Pooljuhtide elektrilised mõõtmised

Prof. Jüri Krustok

---

---

---

---

---

---

---

---

## Pooljuhtide elektrilised mõõtmised

### Mida mõõta:

- ruum
- Schottky barjäär
- pn-üleminek

### Kuidas mõõta:

- I-V kõverad
- Mahtuvus, vahelduvvoolu juhtivus
- admittance spektroskoopia
- Hall efekt
- Erinevad siirdemõõtmised (transient):
  - Mahtuvuse siirded
  - DLTS
  - TSC

### Saadav informatsioon:

- juhtivuse mudel
- laengukandjate tüüp
- madalad tasemed
  - asukoht
  - tihedus
- sügavad tasemed
  - asukoht
  - tihedus
- dielektriline konstant
- laengukandjate liikuvus
- barjääri kõrgus

---

---

---

---

---

---

---

---

## Ruumilised kristallid

- Kristall oomiliste kontaktidega



Erijuhtivus p-tüüpi pooljuhhis:  $\sigma = e \mu_p p$

$$p \sim T^{3/4} \exp(-E_A/kT)$$

---

---

---

---

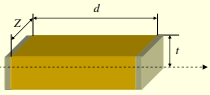
---

---

---

---

## Kuidas mõõta juhtivust?



Pooljuhtmaterjali (n-tüüpi) tüki eritakistus  $\rho$ :

$$\rho = \frac{1}{en\mu} \quad (\Omega \cdot \text{cm})$$

Iga pooljuhi takistus (juhtivus) koosneb:

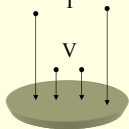
- Kontaktide takistusest
- Pooljuhi takistusest

Pooljuhi takistus avaldub siis:

$$R_s = \frac{1}{A} \int_0^l \rho dx = \frac{\rho d}{Zt} \quad (\Omega)$$

Mõnikord räägitakse ruudu takistusest  $R_{sh}$  (sheet resistance):

$$R_{sh} = \frac{1}{t(en\mu)} = \frac{\rho}{t} \quad (\Omega/\square)$$



4 sondi meetod

---

---

---

---

---

---

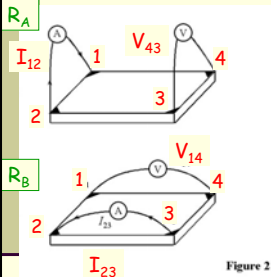
---

---

---

---

## Van der Pauw meetod



Ruudukujulise geomeetria puhul mõõdetakse takistused  $R_A$  ja  $R_B$  ning arvutatakse seejärel ruudu takistus  $R_S$

Teades kihi paksust  $d$  arvutatakse eritakistus.

$$\exp(-\pi R_A / R_S) + \exp(-\pi R_B / R_S) = 1$$

$$R_A = \frac{V_{43}}{I_{12}}, \quad R_B = \frac{V_{14}}{I_{23}}$$

$$\rho = R_S d$$

Figure 2

Igale kontaktide geomeeriale tuleb kõigepealt leida valem  $R_S$  arvutamiseks!

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Hall'i efekt

- Saab määrata laengukandjate **liikuvust!** (Muidugi ka kontsentratsiooni ning laengukandjate tüüpi)
- **Kuidas?** Aseta pooljuht välisesse magnetvälja  $B$ , lase vool temast läbi piki ühte telge ning mõõda indutseeritud Halli pinget  $V_H$  piki teist telge.

---

---

---

---

---

---

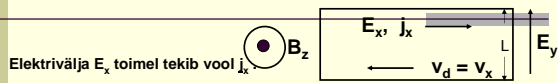
---

---

---

---

## Hall'i efekt



Elektrivälja  $E_x$  toimel tekib vool  $j_x$ . Magnetväli  $B_z$  mõjutab laengukandjaid  $y$ -koordinaadi suunalise Lorentzi jõuga. Elektronid kogunevad ühele tahule ning augud teisele, tekib elektrivälja tugevusega  $E_y$ .

$$F = -e(E + v \times B). \text{ Tasakaalus } j_y = 0 \text{ ja } F_y = -e(E_y - v_x B_z) = 0$$

Siit järeldub, et  $E_y = +v_x B_z$

$$\text{Kuna } j_x = -nev_x \text{ siis } E_y = -j_x B_z / ne$$

$$\text{Hall'i eritakistus } \rho_H = E_y / j_x = -B / ne$$

$$\text{Hall'i koefitsient } R_H = E_y / j_x B_z = -1 / ne \quad \text{Hall'i pinge } V_H = E_y \cdot L$$

---

---

---

---

---

---

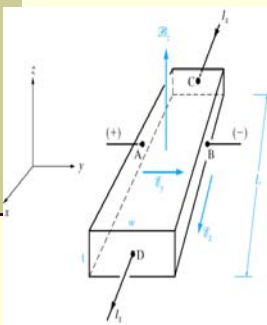
---

---

---

---

## Hall'i efekt



Tuntud geometriaga objekti takistusest  $R$  võib arvutada eritakistuse:

$$\rho(\Omega \cdot cm) = \frac{Rwt}{L} = \frac{V_{CD} / I_x}{L / wt}$$

Laengukandjate (aukude) liikuvuse võib leida Halli koefitsiendi ning eritakistuse kaudu:

$$\mu_p = \frac{\sigma}{qp_0} = \frac{1/\rho}{q(1/qR_H)} = \frac{R_H}{\rho}$$

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Hall aparatuur




---

---

---

---

---

---

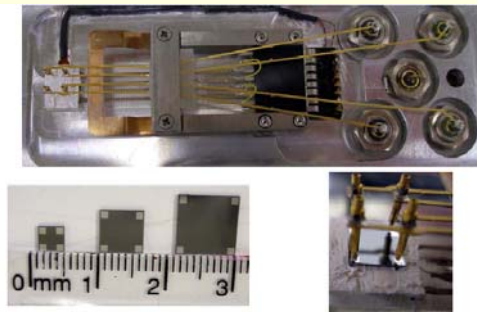
---

---

---

---

## Hall aparatuur




---

---

---

---

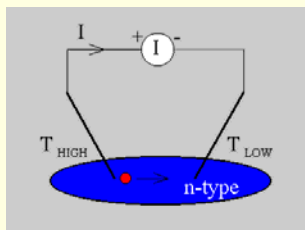
---

---

---

---

## Termo emj (hot probe)



Lihtne meetod laengukandjate tüübi määramiseks pooljuhhis.

Termo emj märgi järgi saab määrata, millised on põhilised laengukandjad!

---

---

---

---

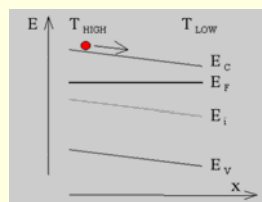
---

---

---

---

## Termo emj teooria



$$J = \mu_n n \left( \frac{\partial E_F}{\partial x} - q\mathcal{P} \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

kus

$$q\mathcal{P} = -k \left( \frac{5}{2} - \frac{T}{\mu_n} \frac{\partial \mu_n}{\partial T} + \ln \frac{N_C}{n} \right)$$

Genereeritav vool on seda suurem, mida suurem on temperatuuri gradient ja mida suurem on laengukandjate kontsentratsioon

---

---

---

---

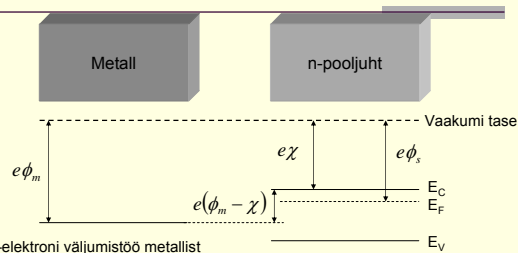
---

---

---

---

## Metalli-pooljuhi kontakt (Schottky barjäär)



$\Phi_m$  – elektroni väljumistöö metallist  
 $\chi$  – elektroni afiinsus pooljuhis,  
 $\Phi_s$  – elektroni väljumistöö pooljuhist

$$\Phi_s = \chi + (E_C - E_F)$$

Mis juhtub, kui me termilise tasakaalu tingimustes kontakteerime metalli ja pooljuhi?

---

---

---

---

---

---

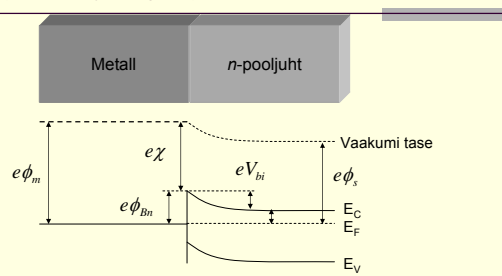
---

---

---

---

## Metalli-pooljuhi kontakt (Schottky barjäär)



Fermi tase peab olema konstantne termilises tasakaalus ja vaakumi tase peab olema pidev....

---

---

---

---

---

---

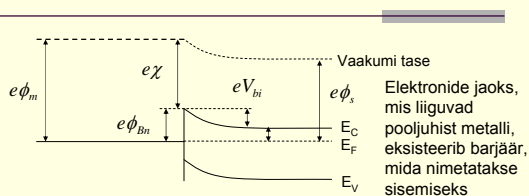
---

---

---

---

## Metalli-pooljuhi kontakt (Schottky barjäär)



p-tüüpi pooljuhi jaoks on vastavad avaldised:

$$e\phi_{Bp} = E_g - (e\phi_m - e\chi)$$

$$eV_{bi} = e\phi_s - e\phi_m$$

$$eV_{bi} = e\phi_m - e\phi_s$$

Elektronide jaoks, mis liiguvad pooljuhist metalli, eksisteerib barjäär, mida nimetatakse sisemiseks potentsiaaliks (built-in potential).

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Siirdeala paksus

Kui Schottky barjääri kõrgus on teada, võime me arvutada elektrivälja profiili, siirdeala paksuse ja muud barjääri omadused.

Siirdeala paksus n-tüüpi pooljuhi korral avaldub:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V)}{eN_D}}$$

$N_D$  – doonorite kontsentratsioon  
 $V$  – rakendatud väline pinge (positiivne päripinge korral)

---

---

---

---

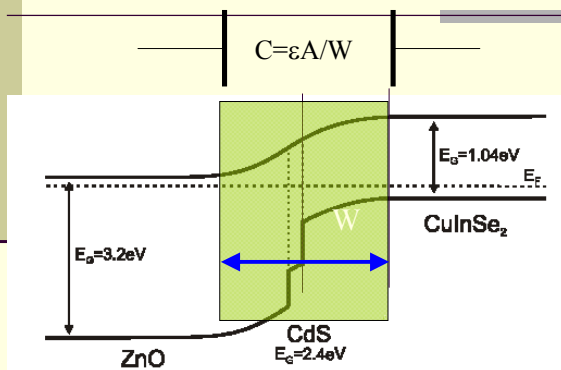
---

---

---

---

## Siirdeala- nagu plaatkondensaator



---

---

---

---

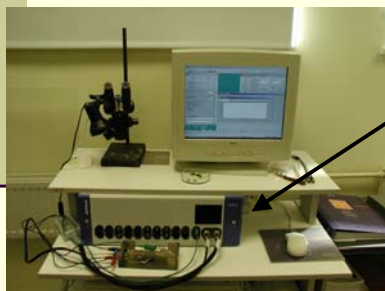
---

---

---

---

## C-V kõverate analüüs



Autolab  
PGSTAT 30  
 $f_{\max} = 1\text{MHz}$

---

---

---

---

---

---

---

---

## C-V kõverate analüüs

$$C^{-2} = 2(V_{bi} - V) / A^2 q \epsilon N_A$$

Põhivalem

Barjääri kõrgus

Barjääri mahtuvus

Ülemineku pindala

Laengukandjate kontsentratsioon  
NB! Peab olema nn. ühepoolne siire!

---

---

---

---

---

---

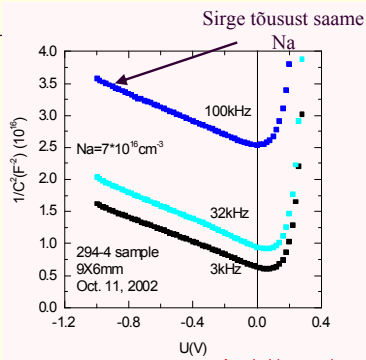
---

---

---

---

## C-V kõverate analüüs



Aga kuidas saada mahtuvust C ???

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Vahelduvvool: Impedants ja näivjuhtivus

- Impedants -> elektriline takistus (põhiliselt vahelduvvoolu puhul)
- Sinusoidsaalsel juhul pinge käitub:

$$U = U_0 \sin \omega t$$

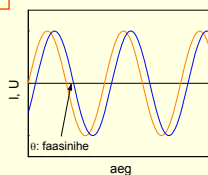
t: aeg  
f: sagedus  
 $\omega$ : ringsagedus =  $2\pi f$   
 $\phi$ : faasinurk

..ja voolutugevus:

$$I = I_0 \sin(\omega t + \theta)$$

$\theta$ : faasinihke

- Impedants:  $Z = U/I$




---

---

---

---

---

---

---

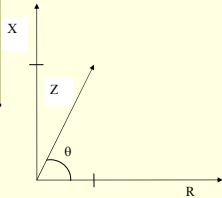
---

---

---

## Impedants ja näivjuhtivus

- Ohmi seadusest on impedants  $Z$  pinge ja voolu suhe. Vahelduvvoolu puhul tuleb arvestada ja faasinihet, s.t.  $Z$  esitatakse reaalse ja imaginaarse osa summana:



$$Z^*(\omega) = Z' + j Z'' = Z_{\text{Re}} + j Z_{\text{Im}} = R + j X$$

$$j = \sqrt{-1}$$

---

---

---

---

---

---

---

---

## Impedants ja näivjuhtivus

- Impedantsi  $Z$  asemel võib kasutada ka tema pöördväärtust ehk näivjuhtivust  $Y$  (Admittance)
- Ingliskeelsed terminid siis:  
 $Z$ : impedance (impedants)  $Y$ : admittance (näivjuhtivus)  
 $R$ : resistance (takistus)  $G$ : conductance (juhtivus)  
 $X$ : reactance (reaktiivtak.)  $B$ : susceptance (reaktiivjuht.)

$$R = \frac{G}{G^2 + B^2}$$

$$G = \frac{R}{R^2 + X^2}$$

$$X = \frac{B}{G^2 + B^2}$$

$$B = \frac{X}{R^2 + X^2}$$

$$Z^*(\omega) = R + j X$$

$$Y^*(\omega) = G + j B$$

---

---

---

---

---

---

---

---

## Impedants ja näivjuhtivus

- Nagu oli näha võib vahelduvvool olla faasis nihutatud pinge suhtes
- Faasinihe sõltub objektist
- Et voolu käitumist modelleerida tuleb kasutada ekvivalentskeeme, kus elementideks on  $R$ ,  $C$  ja  $L$ )
- Vool läbi takisti  $R$  ei oma faasinihet  $\rightarrow$  impedants ei sõltu sagedusest!
- Takisti mõjutab ainult impedantsi reaalosa!

---

---

---

---

---

---

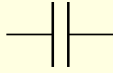
---

---



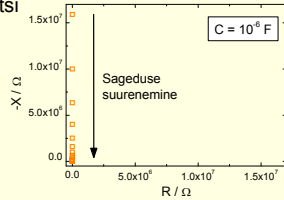
## Kondensaator

$$C = \epsilon \frac{A}{L} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{L}$$



Mõjutab vaid impedantsi  
imaginaarosa, ehk

$$X = -(\omega C)^{-1}$$



---

---

---

---

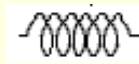
---

---

---

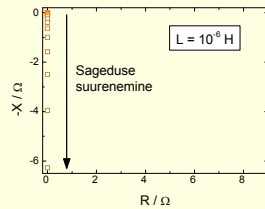
---

## Induktiivsus L



Mõjutab impedantsi  
imaginaarosa

$$X = \omega L$$



---

---

---

---

---

---

---

---

## Impedants ja näivjuhtivus

- Üldjuhul on uuritav süsteem keeruline kooslus, kus eksisteerivad nii mahtuvused, takistused kui ka muud skeemielemendid.
- Vahelduvvoolu mõõtmisi esitatakse erineval kujul:
  - Nyquist graafikuna ( $-\text{Im}(Z)$  vs.  $\text{Re}(Z)$ )
  - Bode graafikuna (näit.  $\log |Z|$  vs.  $f$ )
  - $C$  vs.  $\log(f)$
  - $G/f$  vs.  $\log(f)$

---

---

---

---

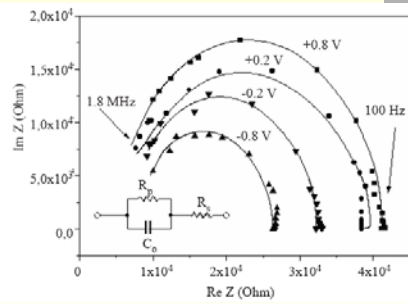
---

---

---

---

## Nyquist graafik



---

---

---

---

---

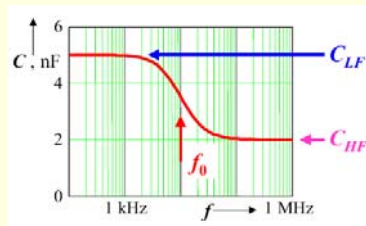
---

---

---

## Mahtuvus

- Kõige sagedamini kasutatakse mahtuvuse (C) sõltuvusi sagedusest.



---

---

---

---

---

---

---

---

## Mahtuvus

- Mahtuvust otseselt mõõta ei saa, mahtuvus **arvutatakse!**
- Vahelduvvoolu spektromeetrid annavad tavaliselt impedantsi **reaalosa Z'** ja **imaginaarosa Z''** sõltuvalt nii alalispingest U kui ka sagedusest f.
- Arvutuste aluseks on ekvivalentskeemid.

---

---

---

---

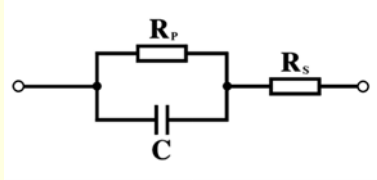
---

---

---

---

## Ekvivalentskeemid



Tüüpiline päikesepatarei ekvivalentskeem

---

---

---

---

---

---

---

---

## Ekvivalentskeemid

- Sellise paralleelse skeemi puhul:

$$Z = R_s + \frac{R_p}{1 + (\omega R_p C)^2} - i \frac{R_p^2 C \omega}{1 + (\omega R_p C)^2} \quad \text{kus } \omega = 2\pi f$$

$$Z' = R_s + \frac{R_p}{1 + (\omega R_p C)^2} \quad \text{Impedantsi reaalosa}$$

$$-Z'' = \frac{R_p^2 C \omega}{1 + (\omega R_p C)^2} \quad \text{Impedantsi imaginaarosa}$$

---

---

---

---

---

---

---

---

## Mahtuvus paralleelse skeemi puhul

- Eelnevatest valemitest saab leida mahtuvuse C:

$$C = \frac{-Z''}{\left[ (Z' - R_s)^2 + (-Z'')^2 \right] \omega}$$

$R_s$  väärtus tuleb eelnevalt leida ja ette anda!

---

---

---

---

---

---

---

---

## Mahtuvusspektroskoopia.

- Mõõtes siirde mahtuvust sõltuvalt sagedusest ja temperatuurist on võimalik määrata sügavate lõksutasemete parameetreid.
- Sellel baseerub näivjuhtivuse spektroskoopia (admittance spectroscopy)

---

---

---

---

---

---

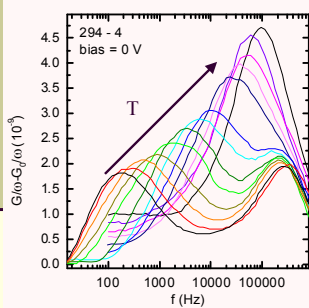
---

---

---

---

## Admittance spectroscopy



$$C_{\text{tot}} = C_d + \frac{C_1}{1 + (\tau\omega)^2},$$

$$G_{\text{tot}} = G_d + \frac{G_1 (\tau\omega)^2}{1 + (\tau\omega)^2},$$

C spektris järsk langus  
G spektris maksimum

---

---

---

---

---

---

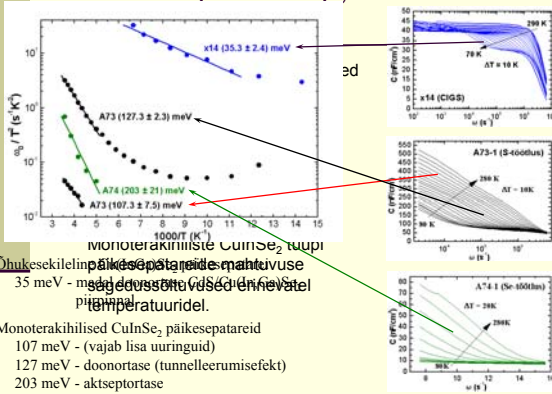
---

---

---

---

## Admittance spectroscopy



monoterakiinilise CuInSe₂ tüüpi  
 Ohukesekilinipäikesepatareide mahtuvuse  
 sagedussõltuvuse mõõtmiseks erinevatel  
 temperatuuridel.

Monoterakiinilised CuInSe₂ päikesepatareid  
 107 meV - (vajab lisa uuringuid)  
 127 meV - doonortase (tunnelleerumise efekt)  
 203 meV - akseptortase

---

---

---

---

---

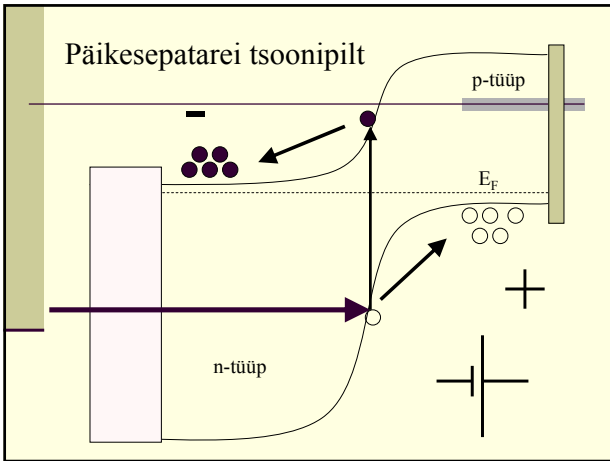
---

---

---

---

---




---

---

---

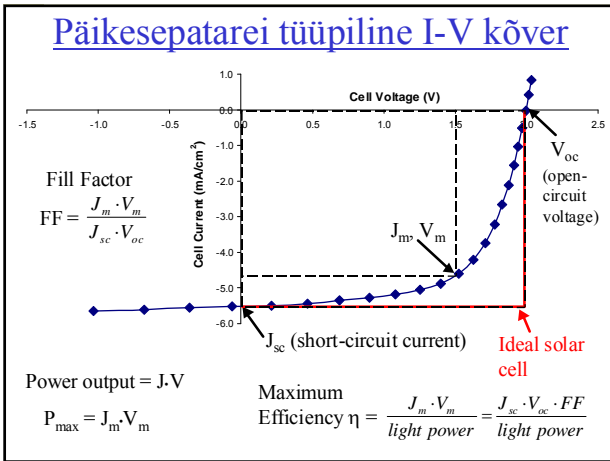
---

---

---

---

---




---

---

---

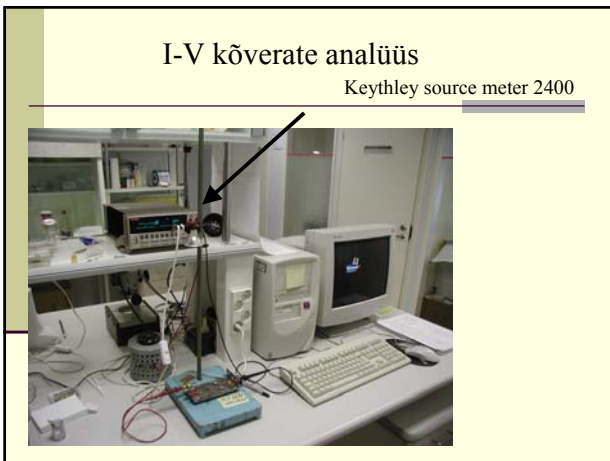
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---

### Päikesepatarei ideaalvõrrand:

$$J = J_0 \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - J_L$$

$$J_0 = \frac{qn_i^2 D_p}{N_A L_p}$$

$J_0 = 10^{-11}$  to  $10^{-14}$  A/cm<sup>2</sup>

Pp vool = diodi vool – valguse poolt genereeritud vool

Kui  $V=0$ ,  $J = -J_L =$  lühisvool (short circuit current) =  $J_{sc}$

Kui  $J=0$ ,  $V = V_{oc}$

$V_{oc}$  on maksimaalne kui  $J_0$  on minim.

$$J = 0 = J_0 \left( e^{\frac{qV_{oc}}{kT}} - 1 \right) - J_L$$

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{J_L}{J_0} \right)$$

---

---

---

---

---

---

---

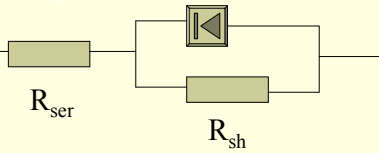
---

---

---

### Realse päikesepatarei võrrand.

$$J = J_0 \left( e^{\frac{q(V - R_{ser}J)}{nkT}} - 1 \right) + \frac{V - R_{ser}J}{R_{sh}} - J_L$$




---

---

---

---

---

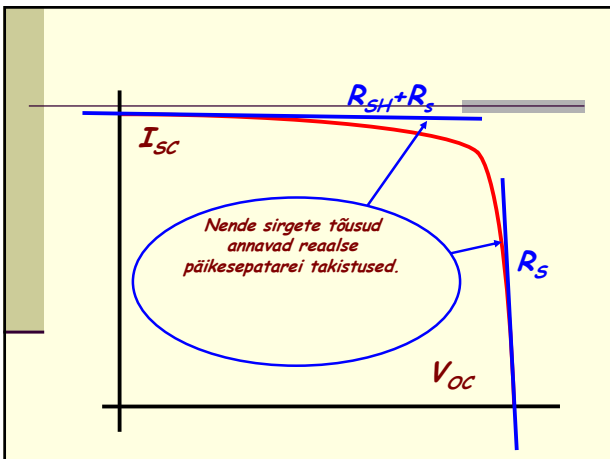
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

### $V_{oc}$ vs T mõõtmised

Teoriast: 
$$V_{oc} = \frac{E_a}{q} - \frac{AkT}{q} \ln\left(\frac{j_{00}}{j_{sc}}\right)$$

$E_a = E_g$  - rekombinatsioonilised kaod ruumis

$E_a < E_g$  - interface recombination

---

---

---

---

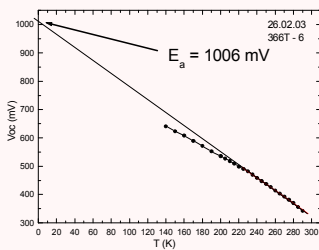
---

---

---

---

### $V_{oc}$ vs T mõõtmised



$E_a = E_g$  - rekombinatsioonilised kaod ruumis

---

---

---

---

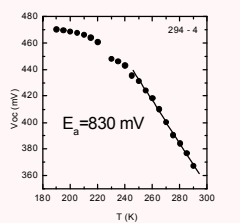
---

---

---

---

### $V_{oc}$ vs T mõõtmised



$E_a < E_g$  - interface recombination

---

---

---

---

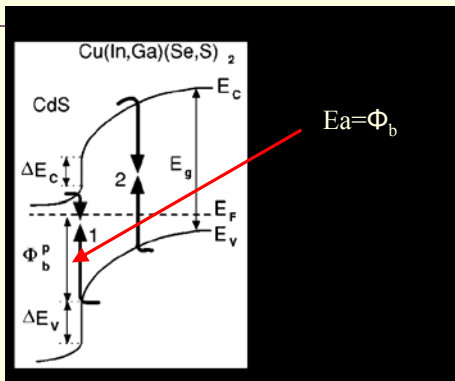
---

---

---

---

### V<sub>oc</sub> vs T mõõtmised




---

---

---

---

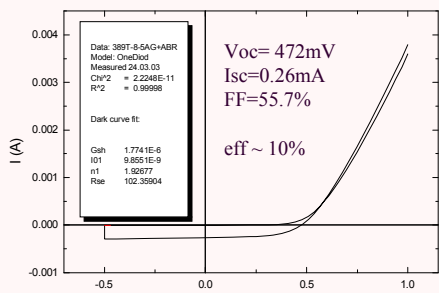
---

---

---

---

### I-V kõverate analüüs



$$J = J_0 \left( e^{\frac{q(V - R_{ser}J)}{nkT}} - 1 \right) + \frac{V - R_{ser}J}{R_{sh}} - J_L$$

---

---

---

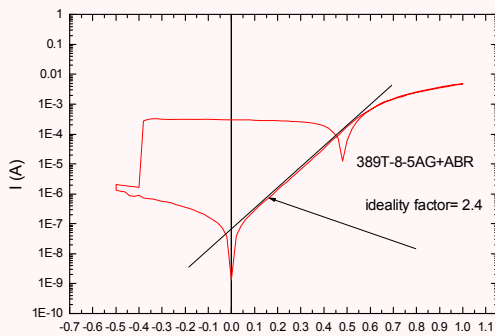
---

---

---

---

---



$$J = J_0 \left( e^{\frac{q(V - R_{ser}J)}{nkT}} - 1 \right) + \frac{V - R_{ser}J}{R_{sh}} - J_L$$

---

---

---

---

---

---

---

---