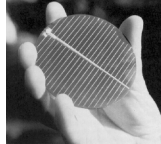


Päikesepatareid ning nendega seotud füüsika ja tehnoloogia.



Päikesepatarei (solar cell) muudab päikesevalguse otse elektrienergiaks

1

Päike kui hiiglaslik pirn.



100W



$3.8 \cdot 10^{26} \text{W}$

$T=5800^\circ\text{C}$

Miks mitte seda "pirni" kasutada?

2

Päikese energia

- Maa saab ühes tunnis niipalju päikeseenergiat, et selleks jätkuks kogu inimkonnale terveks aastaks!
- Valgus- see on energia!
- Ühe tavalise (40-50 tuhat pealtvaatajat) jalgpallistaadioni valgustamiseks on vaja ~1000 kW elektrivõimsust!

3

Päikesepatareide loomiseni viinud sündmused:

- **1839:** Edmund Becquerel avastas 19 aastast fotoelektrilise efekti.
- **1873:** Willoughby Smith avastas seleeni fotojuhtivuse.
- **1904:** Albert Einstein avaldas oma kuulsat töö fotoelektrilise efekti kohta ja sai selle eest Nobeli preemia (aastal 1923).
- **1916:** Millikan tõi fotoelektrilise efekti eksperimentaalse tõestuse.
- **1918:** Poola teadlane Czochralski lõi meetodi monokristalse räni kasvatamiseks.
- **1951:** Esimene Ge päikesepatarei laboris.
- **1954:** Bell Labs uurijad Pearson, Chapin ja Fuller löid esimese ränipatarei (Si) efektiivsusega 4.5% .

4

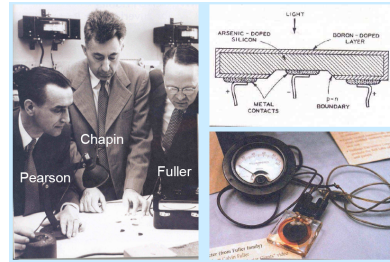
Esimese päikesepatarei patenteerija



Russell Ohl
 esimene Si päikesepatarei 1940,
 esimene patent 1946

5

Esimene Si päikesepatarei



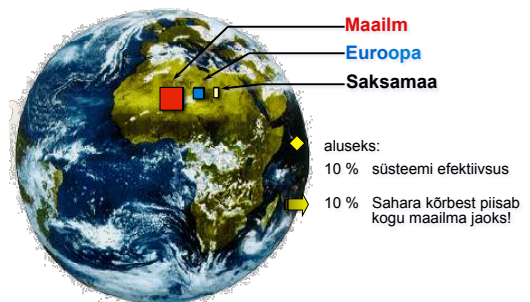
6

Arvutame veidi:

- 1m² pinnale langeb maksimaalselt 1kW päikeseenergiat
- Eestis tarbiti (1987) aastas iga inimese kohta keskmiselt 8MWh elektrienergiat, praegu palju vähem.
- Iga päev tuleks seega inimese kohta toota 8MWh/365=22kWh
- Valget aega keskmiselt 12 tundi, seega piisab inimese kohta pinnast 2m²
- Kasuteguri juures 10% vajatakse umbes 20 m²

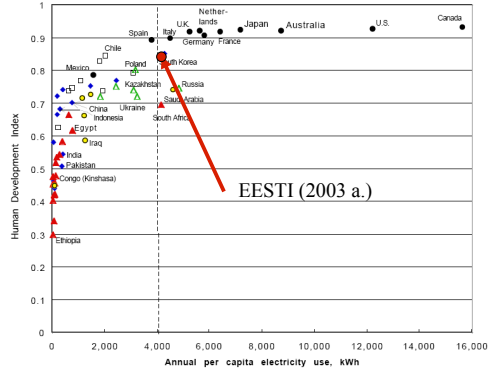
7

Päikesepatareide vajalik pindala



8

Palju siis elektrit peaks tootma?



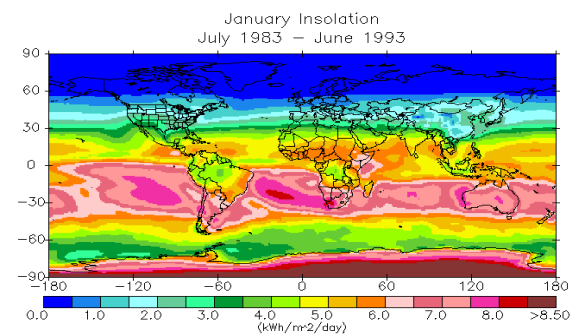
9

Päikesepatareide pindala

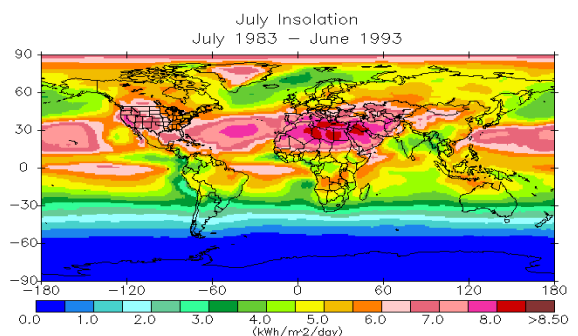


10

Päikesekiirguse intensiivsus-talv



Päikesekiirguse intensiivsus-suvi



Päikesepatareidel põhinev maailma suurim elektrijaam



Asukoht: Saksamaa, Passau
Ehitaja: Shell Solar
Võimsus: 10 MWp
Mooduleid: 58000
Hind: 40 miljonit Eurot
Pindala: 32 ha

13

Päikesepatareide eelised:

- Päikese kui energiaallika ammendamatus.
- Väga väikesed jooksvad kulutused hooldusele.
- Pikeaalisus ja usaldusväärsus (juba praegu valmistatavatele süsteemidele antakse garantii 10 aastaks, kusjuures nende kasutusajaks loetakse vähemalt 20 aastat).
- Nad ei saasta loodust.
- Päikesepatareide süsteem asub tarbijale tavaliselt nii lähedal, et kaob ära vajadus kulukate elektriliinide ehitamiseks.
- Puuduvad liikuvad osad mis muudaksid süsteemi tarbetult keerukaks.
- Tema paigaldamine ja ümberseadistamine on lihtne.

14

Probleemid

- Liiga kõrge hind
1W → \$ 1 (2012.a.)
- Liiga väike toodang

Soome näide: Soome energiavajaduse rahuldamiseks päikesepatareidega peaks kogu maailma tehased töötama **50 aastat**.

15

Kui kõrge on hind?

Praeguste hindade juures tuleks ühe individuaalelamu elektrienergia vajaduste rahuldamiseks ainult päikeseenergiaga kulutada üle **30 000 €**.

Fakt- päikesepatarei on praegu liiga kallis

Siit ka ülesanne: leida tehnoloogiad, millede abil saaks vähendada hinda

16

Mis päikesepatareid Eestis maksavad?

Võib osta umbes 2-3 €/W

Sellele lisandub paigaldus ja inverter



100W pimi süütamine maksaks siis ~400 €

17

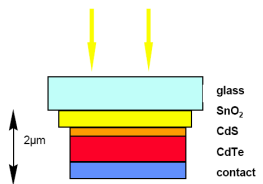
Uued materjalid:

- Cu(In,Ga)Se_2
- CdTe
- a-Si
- Orgaanilised pooljuhid

18

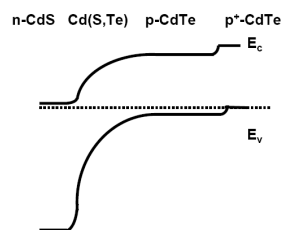
CdTe päikesepatareid

schematic structure



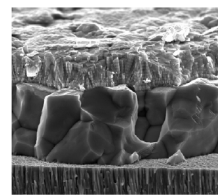
efficiency: 16 % (Matsushita, NREL)

band diagram

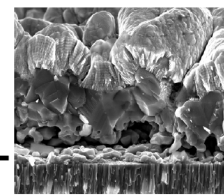


19

Cu(In,Ga)Se_2 ja CuInS_2 võrdlus



Cu(In,Ga)Se_2



CuInS_2

1 μm

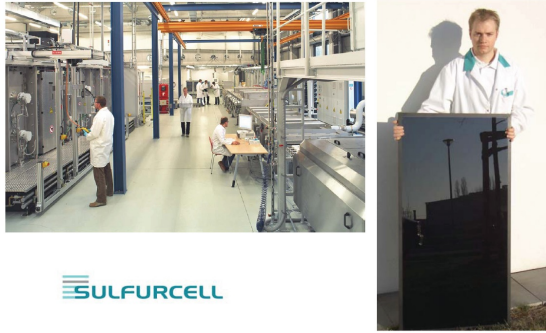
ZnO

CIS

Mo

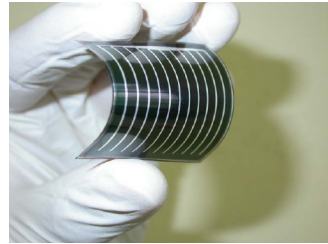
20

CuInS₂ päikesepatareide tootmine



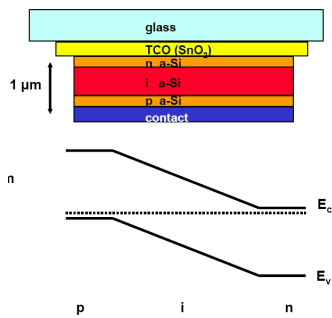
SULFURCELL

Painduval Ti-alusel CIGS päikesepatareid



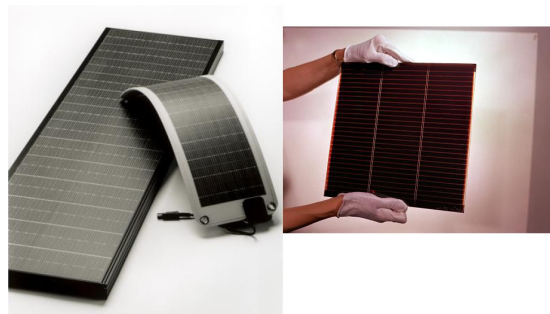
22

Amorfse räni päikesepatarei



23

Amorfse räni moodulid



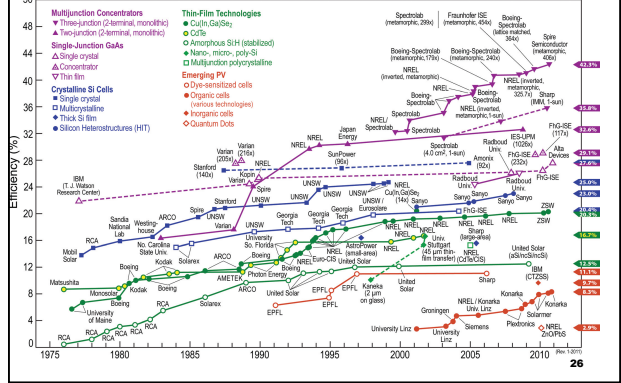
24

Amorfse räni moodulite tootmine

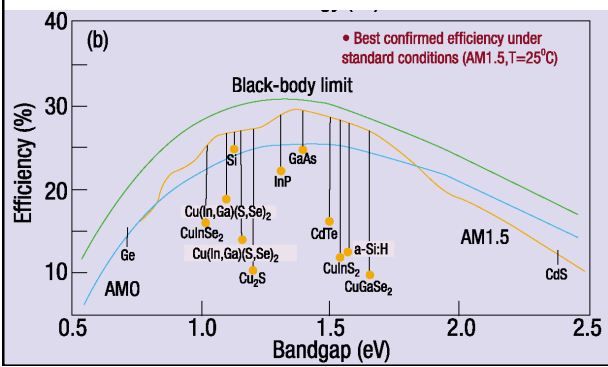


United Solar (NREL)

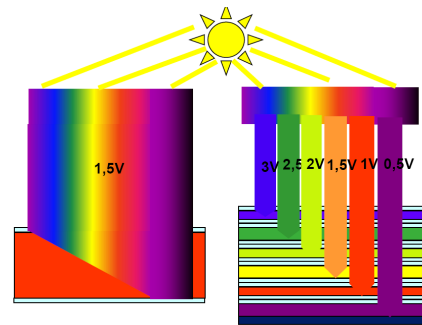
Best Research-Cell Efficiencies



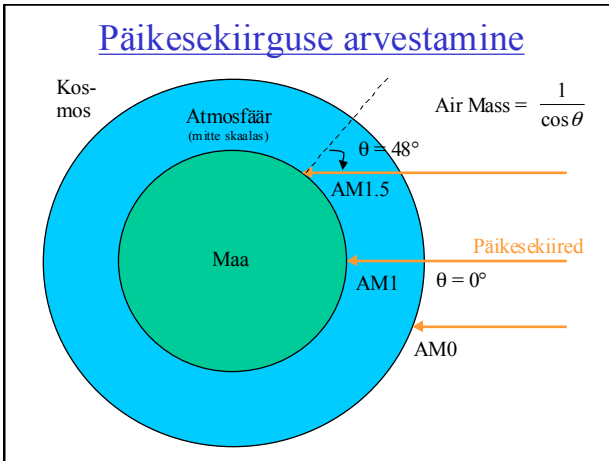
Mõningate päikesepatareide saavutatud efektiivsused:



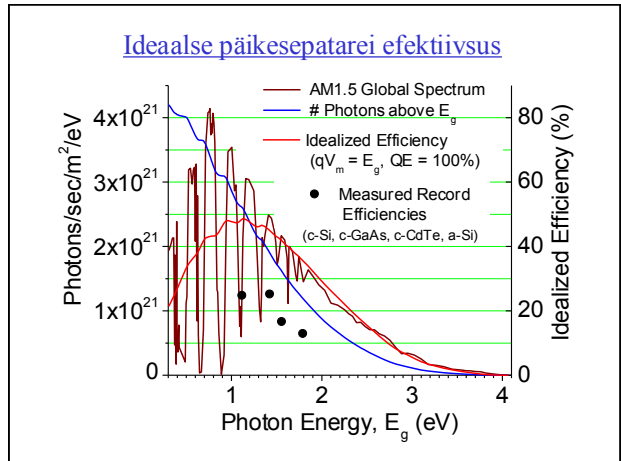
Mitmehihilised päikesepatareid



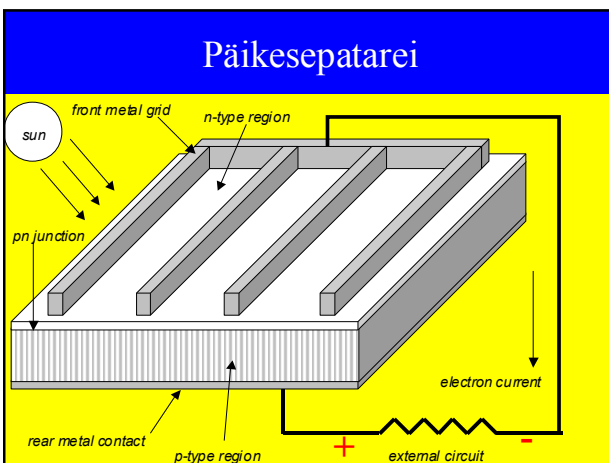
Päikesekiirguse arvestamine



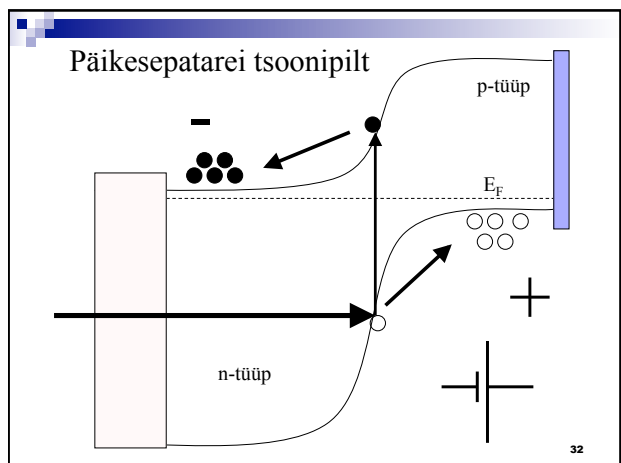
Ideaalse päikesepatarei efektiivsus



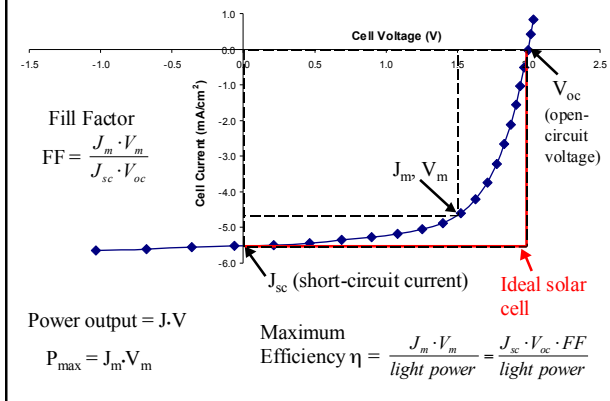
Päikesepatarei



Päikesepatarei tsoonipilt



Päikesepatarei tüüpiline I-V kõver



Päikesepatarei ideaalvõrrand:

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

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

$$J_0 = 10^{-11} \text{ to } 10^{-14} \text{ A/cm}^2$$

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.

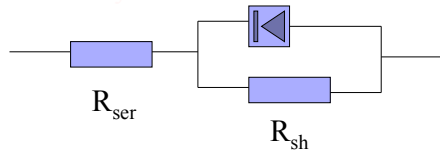
$$J = 0 = J_0 \left(e^{\frac{qV_{oc}}{kT}} - 1 \right) - J_L$$

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

Realse päikesepatarei võrrand.

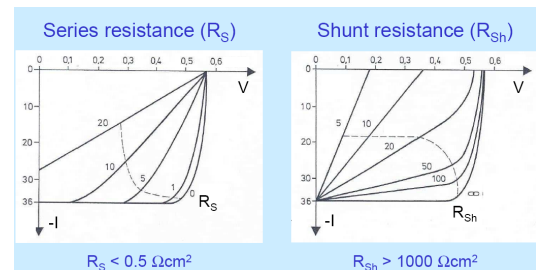
$$J = J_0 \left(e^{\frac{q(V - R_{ser}J)}{nkT}} - 1 \right) + \frac{V - R_{ser}J}{R_{sh}} - J_L$$

n- ideality factor



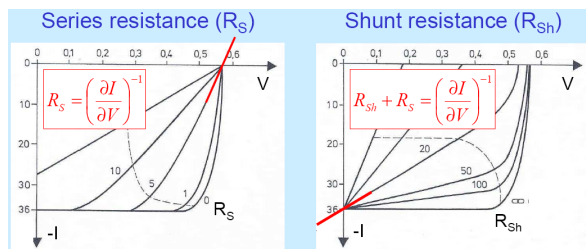
35

R_{ser} ja R_{sh} mõju I-V kõveratele



36

R_{ser} ja R_{sh} leidmine



37

Heas päikesepatareis:

- 90% pealelangevatest fotonitest kasutatakse ära
- FF on 70-80%
- Kasutegur on 10-25%
- Mittepõhiliste laengukandjate suur eluiga parandab Voc-d
- Hea valguse kogumine parandab Jsc-d.
- Väike järjestiktakistus Rse parandab FF-i.

38

Miks iga päikesepatarei pole ideaalne?

1. Kaod tänu kasutatavate materjalide optilisele neeldumisele.
2. Kaod shunteerivate ühenduste tõttu (R_{sh})
3. Kaod tänu laengukandjate rekombinatsioonile kasutatavates materjalides. (R_{ser})
4. Kaod tänu tagumise "oomilise" kontakti mitteoomilisusele.
5. Kaod tänu laengukandjate rekombinatsioonile läbi piirpindadel olevate tasemete (interface recombination)

39

Mida tehakse TTÜ-s ?

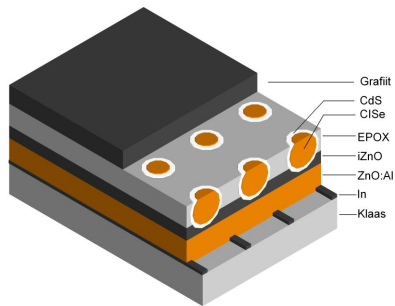
Uut tüüpi materjal- CuInSe₂ (CIS)- suurima neeldumiskoeffitsiendiga p-tüüpi pooljuht
Veelgi odavam Cu₂ZnSnS₄

Uut tüüpi konstruktsioon- monoteriline päikesepatarei

Koostöö firmaga crystalsol

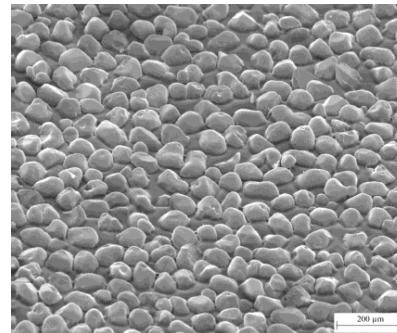
40

ZnO-CdS-CuInSe₂ päikesepatarei ehitus



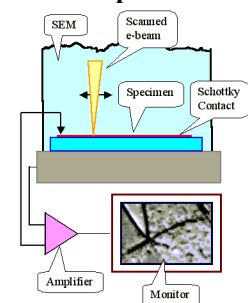
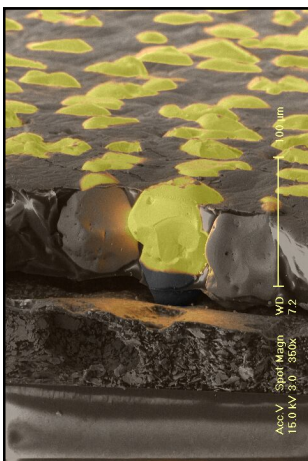
41

Monoteralse CIS päikesepatarei pind



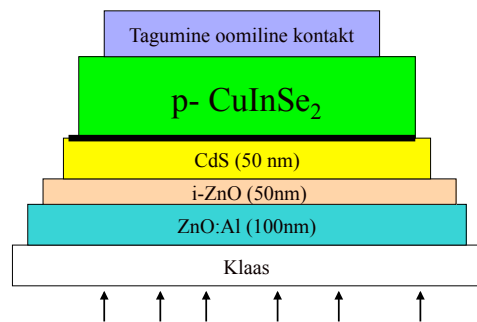
42

Monoteralse CISe päikesepatarei EBIC pilt



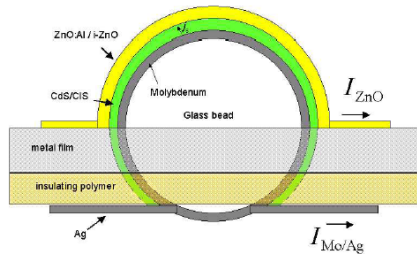
43

CuInSe₂ päikesepatarei ehitus



44

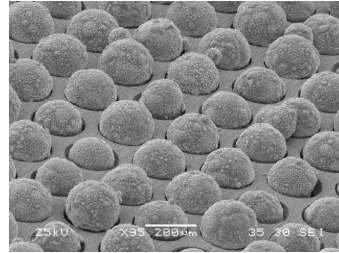
Klaaskuulidele valmistatud päikeseplatariid



Koostöö firmaga Scheuten Glas (Holland)

45

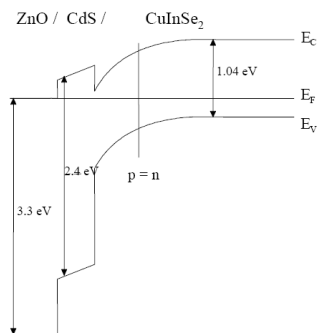
Klaaskuulidest päikeseplatari



CuInS₂ materjali baasil valmistatud painduva päikeseplatari pind

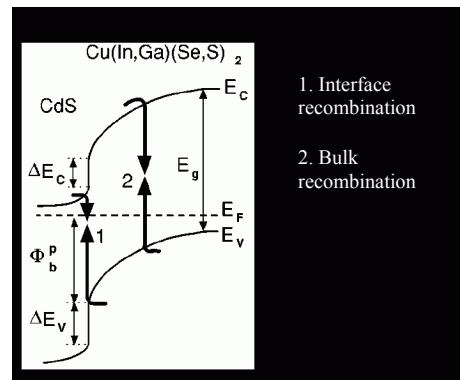
46

CuInSe₂ päikeseplatari ≈ tsoonipilt:



47

Rekombinatsioonilised kaod CIS päikeseplatariis.



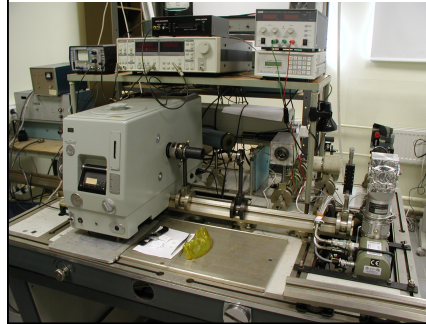
48

Päikesepatareide füüsikalised uuringud

1. Spektraaltundlikkuse mõõtmised.
2. V_{oc} vs T mõõtmised
3. I-V kõverate analüüs
4. C-V kõverate analüüs
5. Admittance spectroscopy
6. Defektide uuringud

49

Päikesepatareide füüsikalised uuringud



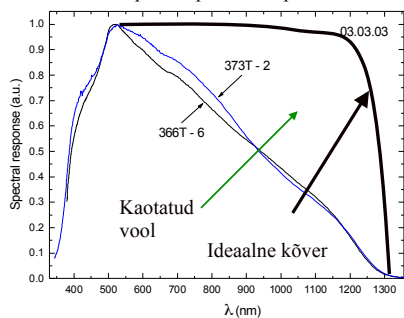
**Optilised ja
termilised
mõõtmised**

T=10-300K

50

Spektraaltundlikkuse mõõtmised.

Mõnede meie päikesepatareide spektraalkõverad.



11

Spektraaltundlikkuse mõõtmised.

Teoreetiliselt peaks CuInSe₂-CdS-ZnO päikesepatarei kvantefektiivsus avalduma valemiga:

$$Q(\lambda) = (1 - R) \exp(-\alpha_{ZnO} d_{ZnO}) \exp(-\alpha_{CdS} d_{CdS}) \left[1 - \frac{\exp(-\alpha_{CIS} W_{CIS})}{1 + \alpha_{CIS} L_{CIS}} \right]$$

- R- Kaod peegeldusele
- α - neeldumiskoeffitsiendid
- L – mittepõhiliste laengukandajate difusioonitee pikkus
- W- siirdeala paksus
- d- vastava kihi paksus

52

V_{oc} vs T mõõtmised

Teoriast:

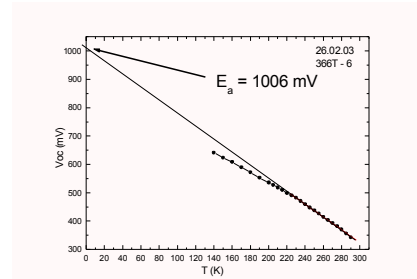
$$V_{oc} = \frac{E_a}{q} - \frac{AkT}{q} \ln\left(\frac{j_{00}}{j_{sc}}\right)$$

$E_a = E_g$ - rekombinatsioonilised kaod ruumis

$E_a < E_g$ - interface recombination

53

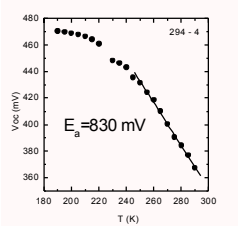
V_{oc} vs T mõõtmised



$E_a = E_g$ - rekombinatsioonilised kaod ruumis

54

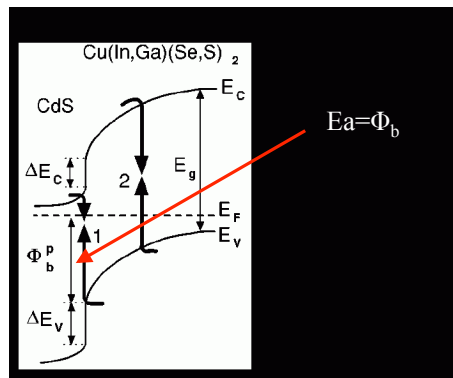
V_{oc} vs T mõõtmised



$E_a < E_g$ - interface recombination

55

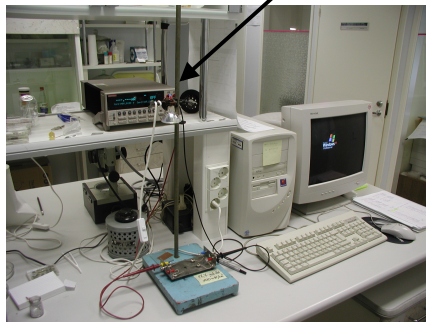
V_{oc} vs T mõõtmised



56

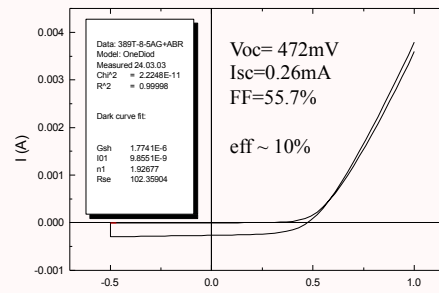
I-V kõverate analüüs

Keythley source meter 2400



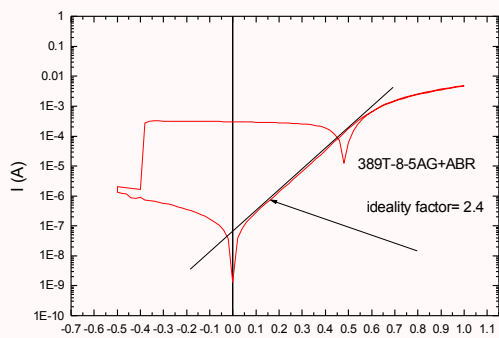
57

I-V kõverate analüüs



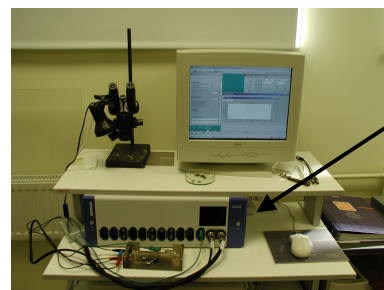
$$J = J_0 \left(e^{\frac{q(V-R_{ser}J)}{nkT}} - 1 \right) + \frac{V - R_{ser}J}{R_{sh}} - J_L$$

58



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

C-V kõverate analüüs



Autolab
PGSTAT 30
fmax = 1MHz

60

