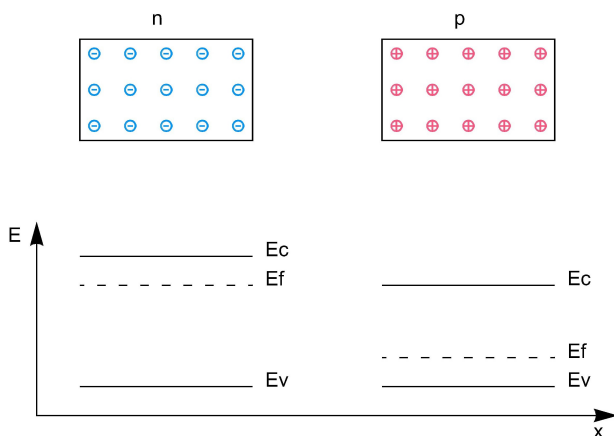


Tallinna Tehnikaülikool
Inseneriteaduskond
Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut

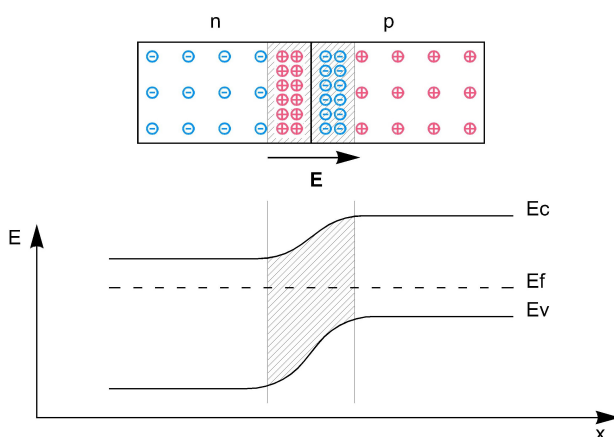
Päikesepatarei volt-amper karakteristikku mõõtmine

Praktikumi juhend

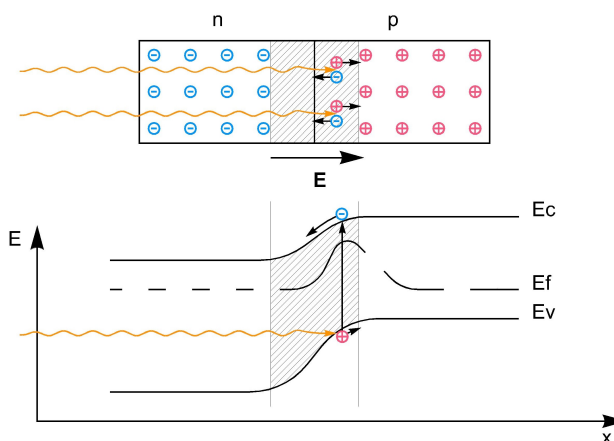
1. Päikesepatarei tööpõhimõte



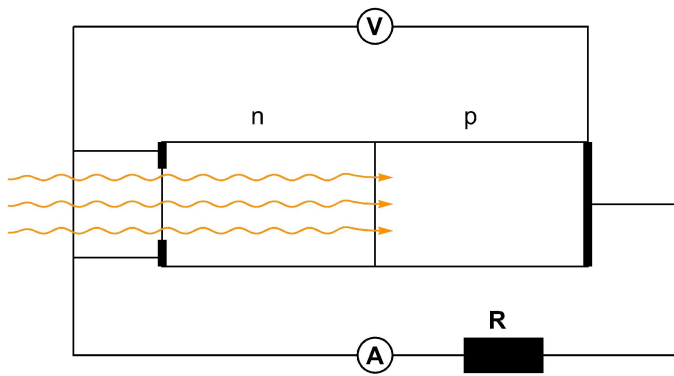
Joonis 1a. Tüüpiline päikesepatarei koosneb kahest erinevast pooljuhist; **p-tüüpi** ning **n-tüüpi**. n-tüüpi pooljuht on legeritud **doonoritega**, seetõttu on seal ülekaalus negatiivsed laengukandjad ehk **elektronid**. p-tüüpi pooljuht on legeritud **aktseptoritega** ning ülekaalus on seal positiivsed laengukandjad ehk **augud**. Energiatelg joonisel näitab elektronide energia kasvamise suunda. Aukude energia suureneb vastassuunas. Vabade elektronide energia on suurem p-tüüpi pooljuhis kui n-tüüpi pooljuhis. E_c on **juhtivustsooni** põhi, E_f on **fermi nivoo** ning E_v on **valentssooni** lagi.



Joonis 1b. Kahe eritüübilise pooljuhi kokkupuutel, tekib kontaktpinna lähedale **siirdeala**. Kontsentratsioonide erinevuse tõttu hakkavad augud p-tüüpi pooljuhist difundeeruma vasakule ning elektronid n-tüüpi pooljuhist paremale. Protsess toimub seni kuni n- ja p-tüüpi pooljuhtide fermi nivood ühtlustuvad. Jõudes siirde vastaspoolele, muutuvad need laengukandjad lokaliseerituks ning tekitavad statsionaarse **elektrivälja**, mis takistab edasist laengu difusiooni siirde vastaspoolele.

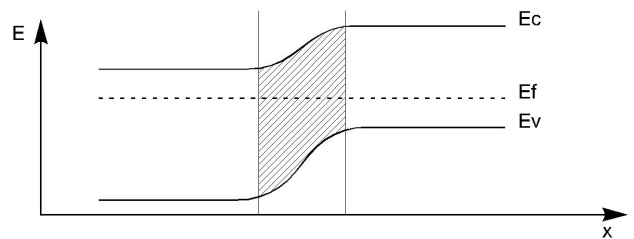
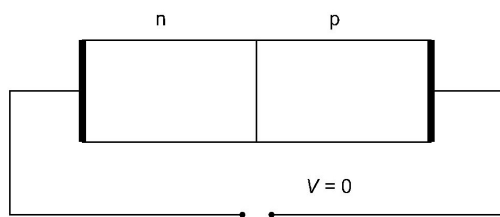


Joonis 1c. Päikesepatarei tööskem kasutab ära siirdealal tekkinud elektrivälja. Siirdealal neelduv footon tekitab seal vaba elektroni ning augu, mis hakkavad elektrivälja mõjul liikuma vastassuundades. Nagu näha ei ole valgustatud päikesepatarei tasakaalulises olekus ning fermi nivoo ei ole sirge.

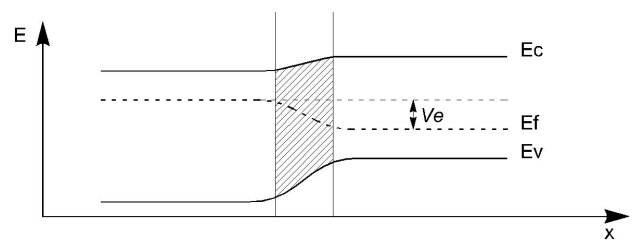
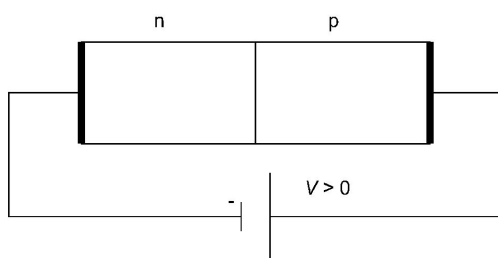


Joonis 2. Kui pn-siirde otstele ühendada oomilised kontaktid ongi päikesepatarei valmis. Kui me ühendame kontaktide külge koormuse, tekib vooluring ning pinge kontaktidel alaneb. Mida väiksem on koormustakistus R , seda suurem on vool. Kui koormus vähendada nullini, on päikesepatarei lühistatud olekus ning voolutugevus kasvab maksimumini.

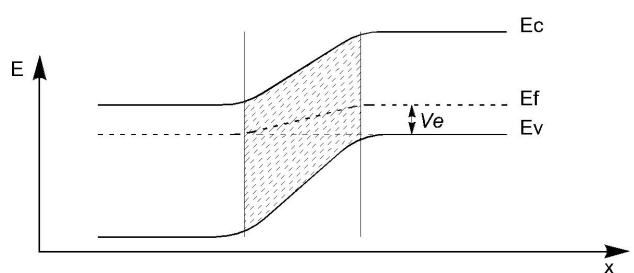
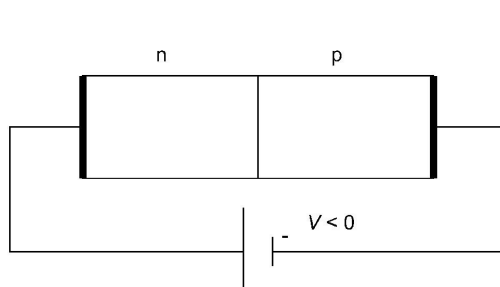
2. Päikesepatarei pingestatud olekus



Joonis 3a. pn-siire pingestamata olekus. p- ja n-tüüpi pooljuhtide fermi nivood ühtlustuvad. Juhtivustsooni põhi ning valentstsooni lagi on p-tüüpi pooljuhis kõrgema potentsiaaliga kui n-tüüpi materjalis. Vaba elektroni energia on suurem p-tüüpi pooljuhis ning vaba augu energia on suurem n-tüüpi pooljuhis. Seega on eelistatud elektronide liikumise suund paremalt vasakule. Teises suunas on takistuseks siirdealale tekkinud barjäär.



Joonis 3b. pn-siirdele rakendatud päripinge vähendab laengukandjate liikumist takistava barjääri kõrgust ning vähendab siirdeala laiust.



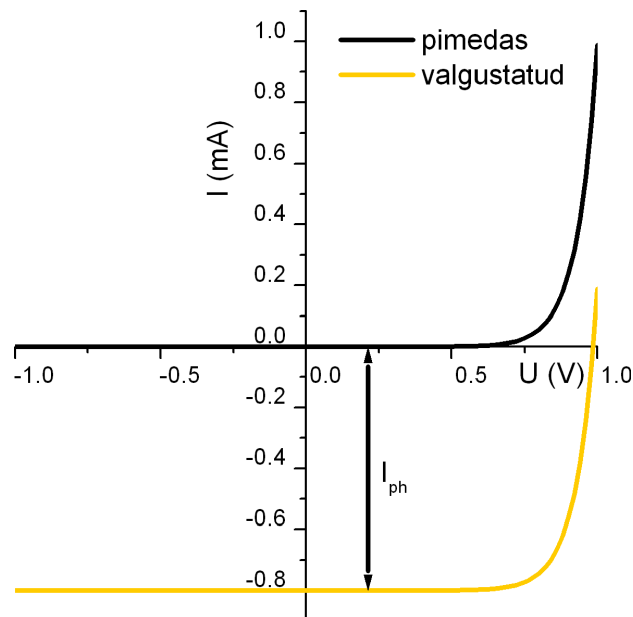
Joonis 3c. pn-siirdele rakendatud vastupinge suurendab barjääri kõrgust, suurendab siirdeala laiust, ning piirab laengukandjate liikumist läbi siirde veelgi.

3. Efektiivsus

Päikesepatarei kvaliteedi kontrollimiseks tuleb ära mõõta tema volt-amper karakteristik ehk **IV- kõver**. Päikesepatarei kõige lihtsam ekvivalentskeem on diood. Joonisel 4 on toodud päikesepatarei IV-kõverad lähtudes **ideaalse dioodi mudelist**. Ideaalse dioodi IV-kõver pimedas on määratud valemiga

$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

kus J on voolutihedus, J_0 on **küllastusvoolutihedus**, e on elektroni laeng, V on pinge, n on dioodi **ideaalsustegur**, k on Boltzmanni konstant ning T on temperatuur. Siinkohal on tähtis kasutada samasuguseid energiaühikuid eksponendi all



Joonis 4. Päikesepatarei IV kõverad pimedas (must joon) ning valgustatud (kollane joon) olekus.

olevas nimetajas ja lugejas. Näiteks kui kasutada energiaühikuna elektronvolte, siis $k = 8.61E-5$ eV/K. Valemile (1) vastav IV-kõver on toodud joonisel 4 musta joonega. Valgustatud olekus tuleb valemile (1) lisada **fotovoolutihedus** J_{ph} . Sellisel juhul on IV-kõver määratud valemiga

$$J_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] - J_{ph}, \quad (2)$$

Vastav IV-kõver on kujutatud joonisel 4 kollase joonega. Valgustatud oleku IV-kõveralt on võimalik välja lugeda mitmeid tähtsaid päikesepatarei parameetreid (vt. joonist 5). Punkti, kus graafik lõikab pinge telge nimetatakse **avatud ahela pingeks** ning tähistatakse V_{oc} . Sellises olekus ei ole päikesepatarei kontaktidele ühendatud koormust ning voolutugevus läbi päikesepatarei on null. Punkti, kus IV-kõver lõikab voolutugevuse telge nimetatakse **lühisvooluks** ning tähistatakse I_{sc} . Sellisel juhul on päikesepatareile ühendatud koormus nulltakistusega ning pinge kontaktidel võrdub nulliga. Nimetatud V_{oc} ning I_{sc} punktid näitavad ära maksimaalse pinget ning voolutugevust, mida antud patareist on võimalik kätte saada.

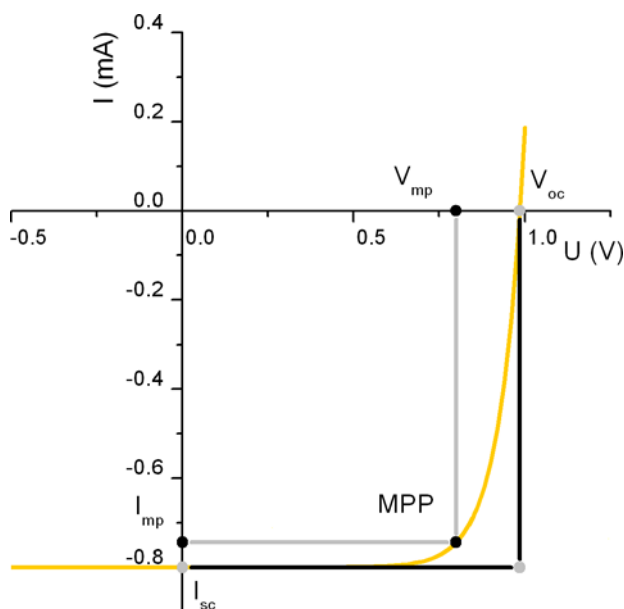
Päikesepatarei efektiivsus on seda suurem, mida suuremad on tema V_{oc} ning I_{sc} . Millises punktis IV-kõveral parasjagu päikesepatarei töötab on määratud kontaktidele ühendatud koormusega. Igale IV-kõvera punktile vastab genereeritud võimsus $P = I \cdot V$. **MPP (Maximum Power Point)** on valgustatud päikesepatarei IV-kõvera punkt, kus võimsus on maksimaalne. Sellele punktile vastab pinge V_{mp} ning voolutugevus I_{mp} .

Selge on see, et mida lähemal on V_{mp} V_{oc} -le ning I_{mp} I_{sc} -le, seda suurem on saavutatav võimsus. Reaalsel päikesepatareil tekkivat võimsuse kadu näitavat tegurit nimetatakse **täituvusastmeks** ning tähistatakse **FF (Fill Factor)**. Täituvusaste arvutatakse valemiga:

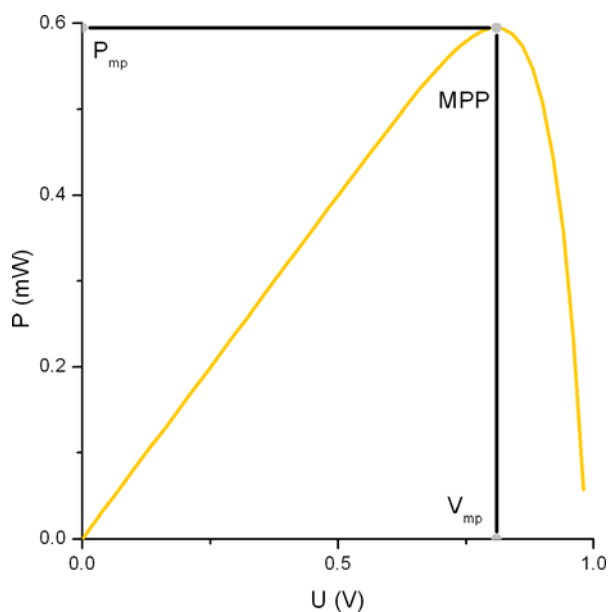
$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (3)$$

Päikesepatarei kõige tähtsamaks parameetriks on **efektiivsus**. Efektiivsus on maksimaalse genereeritava võimsuse ja peale langeva valguse võimsuse P_{light} suhe:

$$\eta = \frac{V_{mp} J_{mp}}{P_{light}} \quad (J_{mp} \text{ on siin voolutihedus } J_{mp} = I_{mp}/S \text{ [mA/cm}^2\text{]}, V_{mp} \text{ on pinge voltides)} \quad (4)$$

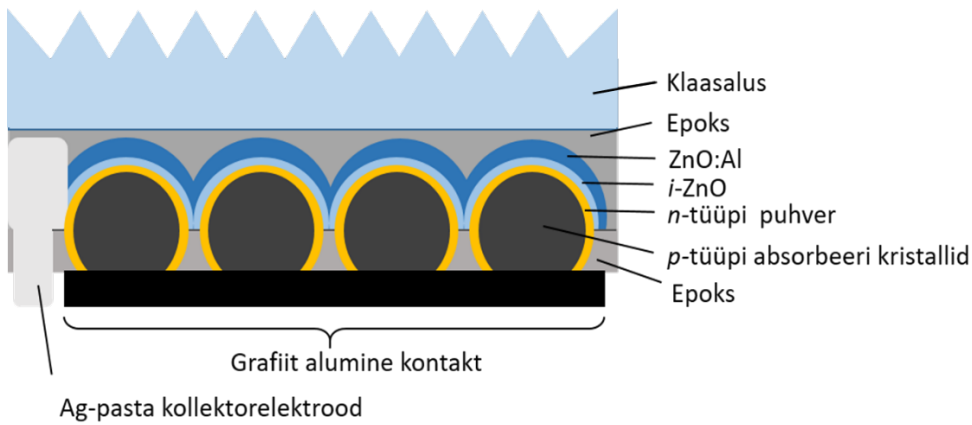


Joonis 5a. Päikesepatarei IV-kõver valgustatud olekus. MPP on punkt, kus patarei töötab maksimaalse võimsuse režiimis. Sellele punktile vastavad voolu ning pinge väärtused V_{mp} ja I_{mp} . V_{oc} on avatud ahela pinge ning I_{sc} on lühisvool.

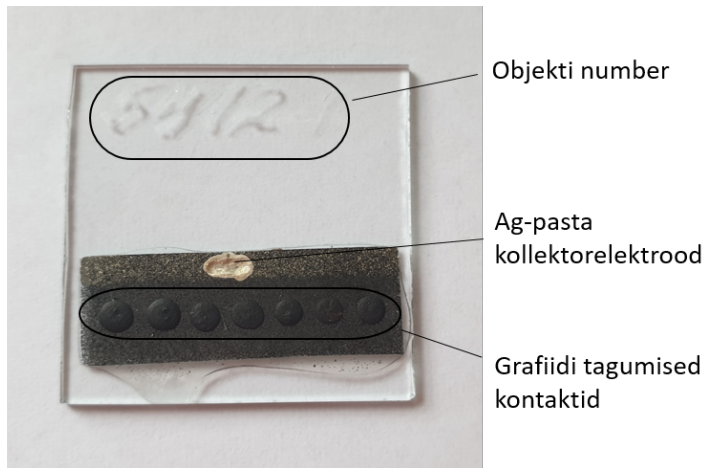


Joonis 5b. Päikesepatarei võimsuse kõver valgustatud olekus. MPP on punkt, kus patarei töötab maksimaalse võimsuse režiimis. Sellele punktile vastavad võimsuse ning pinge väärtused P_{mp} ja V_{mp} .

4. Monoterakihtpäikesepatarei ehitus



Joonis 6. Monoterakihtpäikesepatarei ristlõike skeem.



Joonis 7. Monoterakihtpäikesepatarei foto.

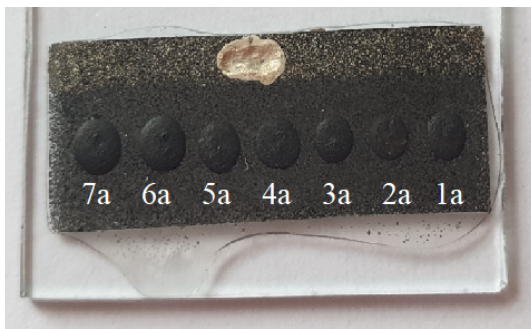
5. Töökäik

IV-kõvera mõõtmine toimub arvutiga juhitud bipolaarse toiteallika **Keithly 2400** abil. Bipolaarne toiteallikas on selline, mis on võimeline töötama pingevoolu teljestiku kõigis neljas sektoris. See tähendab, et ta võib toimida nii voolu allika kui ka neeluna. Toiteallika juhtimine toimub arvutiprogrammi **IVC-Student** abil. IV-kõvera mõõtmiseks valgustatud olekus on üles seatud päikese simulaator, mille valgusvõimsus aluse peal on 100 mW/cm^2 .

Katseobjektideks on Tallinna Tehnikaülikoolis Päikeseenergeetika materjalide teaduslaboris valmistatud monoterakihtpäikesepatareid.

Objekti kaart

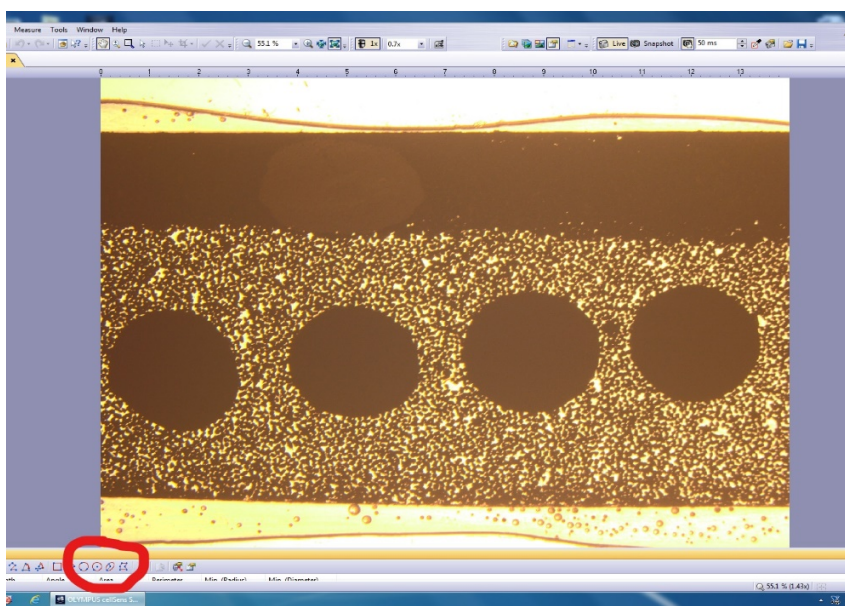
Selleks, et mees pidada milline IV kõver vastab millisele objekti kontaktile, tuleb skitseerida objekti joonis. Joonisele tuleb kanda kontaktide asukohad objektile ning igale kontaktile tuleb vastavusse seada unikaalne tähis (nt. järjekorranumber).



Joonis 7. Näide objekti grafiitkontaktide tähistamise kohta.

Päikesepatarei alumise kontakti pindala määramine

Efektiivsuse arvutamiseks, valemis (4), on tarvis teada voolutihedust. IV-kõvera mõõtmisel saame me aga voolutugevuse. Seetõttu oleks tarvis teada päikesepatarei töötavat pindala (S, cm^2). Avatud pind on määratud kahe parameetriga. Esiteks on tarvis teada kontaktide pindala. Eeldades, et ZnO:Al kihi suure juhtivuse tõttu töötab ülemine kontakt (Ag) üle kogu pinna, on limiteerivaks alumise kontakti ehk grafiiditäpi pindala. Grafiitkontakti pindala on võimalik määrata Olympus optilise mikroskoobi ja cellSens Standard programmi abil. Paigutades päikesepatarei mikroskoobi alla ja avades arvuti deskpõhil oleva cellSens Standard programmis „Live“ võimaluse, avaneb päikesepatareist peegelpildis olev vaade. Erinevate valikutega on võimalik lihtsalt määrata kontaktide pindalad. Vaata jooniseid 8 ja 9.



Joonis 8. Olympus optiline mikroskoop. Joonis 9. Vaade päikesepatareist cellSens Standard programmis. Punase ringi sees on ära toodud kontaktide pindalade määramiseks sobilikud funktsioonid.

I-V kõverate mõõtmine

Kõigepealt tuleb objekt kontakteerida. Selleks tuleb ühendada päikesepatarei pealmine kontakt (klaasaluse poolne) vooluallika miinusega ning mõõdetav alumine kontakt vooluallika plussiga. Päikesepatarei valgustamine toimub klaasi poolt, seega tuleks objekti alus peale kontakteerimist ümber pöörata. Valgustamine toimub läbi aluses oleva ümmarguse augu. IV-kõvera mõõtmine toimub programmi *IVC-student* abil. Kõigepealt peab paika panema skaneerimise vahemikud. Sobivad parameetrid on $V_{\text{max}} = 1.5 \text{ V}$, $V_{\text{min}} = -0.5 \text{ V}$ ja $\text{step} = 0.02$. Selliste parameetrite kasutamisel toimub IV-kõvera mõõtmine 1.5-st kuni -0.5 voldini ning tagasi sammuga 0.02 V. Enne mõõtmise alustamist tuleb sisestada objekti nimi.

Skaneerimise alustamiseks tuleb vajutada nuppu Scan. Skaneerimine negatiivses suunas toimub valgustamata olekus. Kui pinge jõuab -0.5 voldini hakkab skaneerimine toimuma positiivses suunas. Selliselt on võimalik ühe skaneerimisega ära mõõta IV-kõver nii pimedas kui ka valgustatud olekus. Skaneerimist tuleb korrata kõikide grafiitkontaktide jaoks. Peale iga mõõtmist salvestatakse IV-kõver faili. Programm salvestab andmed tekstifailina.

Tulemuste arvutamine ning esitamine

Kõigepealt tuleb leida MPP punkt. Selleks tuleb igale valgustatud IV-kõvera punktile arvutada vastav võimsus ning leida nendest maksimum P_{MPP} . Seda võib teha kasutades olemasolevat tabelarvutusprogrammi (Excel, Origin, ...). Arvestada tuleb seda, et MPP punkt asub IV-kõveral I_{sc} ja V_{oc} punktide vahel (vt. joonis 5). Teistes IV teljestiku sektorites päikesepatarei kasulikkude võimsust ei genereeri. MPP punktist tuleb määrata pinge V_{mp} väärtus. I_{mp} väärtuse saab IV kõveral pingel V_{mp} . Kohtadest, kus valgustatud IV-kõver lõikab telgi, saab leida lühisvoolu I_{sc} ning avatud ahela pinge V_{oc} . I_{sc} väärtuse leiab punktis, kus $V_{oc} = 0$ ning V_{oc} väärtuse leiab punktis, kus $I_{sc} = 0$. Kui mõõdetud punkt ei asu 0 punktis, tuleb 0 punktile vastav väärtus välja arvutada. Kasutades saadus väärtusi ning valemit (3) saab välja arvutada täituvusastme FF. Järgmiseks tuleb leida efektiivsus kasutades valemit (4) ning arvestades, et valguse võimsustihedus objekti pinnal on $P_{light} = 100 \text{ mW/cm}^2$. Mõõtmistulemused tuleb esitada tabeli kujul (vt. näidistabelit 1). Mõõtmistulemustega koos tuleb esitada ka kaks graafikut. Esimesel graafikul peavad olema kõigi mõõdetud kontaktide IV-kõverad valgustatud olekus (nagu joonis 5a). Teisel graafikul peavad olema kõigi mõõdetud punktide genereeritud võimsused sõltuvalt pingest (nagu joonis 5b).

Tabel 1.

Kontakt	Alumise kontakti pindala cm^2	I_{mp} mA	J_{mp} mA/cm ²	V_{mp} V	P_{MPP} mW	I_{sc} mA	J_{sc} mA/cm ²	V_{oc} V	FF %	η %
1a	0.045	0.33	7.33	0.320	2.37	0.41	9.1	0.442	58	2.37
...