

# Mahtuvus-pinge sõltuvuste mõõtmine

**Mati Danilson**

## 1. Tööülesanne

Leida diodi ja päikesepatarei lisandi aatomite kontsentratsioon sõltuvalt kaugusest siirdest ning anda hinnang saadud tulemuste õigsuse kohta.

## 2. Töövahendid

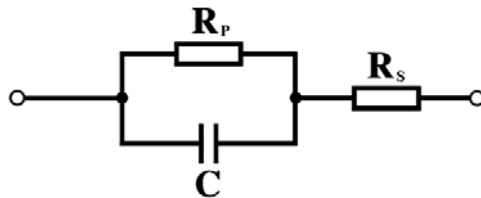
Modular Electrochemical Instrument Autolab PGSTAT30, uuritavad objektid

## 3. Töö teoreetilised alused

Üks enam kasutatavaid mahtuvuslikke siirde uurimise meetodeid on mahtuvus-pinge ehk  $C-V$  meetod. Selleks mõõdetakse siirde mahtuvust sõltuvalt alalispingest, millele on lisatud fikseeritud sageduse ja amplituudiga vahelduvpinge komponent. Ideaalsel juhul annavad need mõõtmised vabade laengukandjate kontsentratsiooni siirde serval.

Kuna mahtuvus ei ole otseselt mõõdetav suurus, leitakse see arvutuslikult impedantsi kaudu. Selle tõttu nimetatakse ka sageli vastavaid seadmeid impedants spektromeetriteks. Spektromeeter ise annab väljundina impedantsi reaali ( $Z'$ ) ja imaginaarosad ( $-Z''$ ) sõltuvalt nii pingest ( $U$ ) kui sagedusest ( $f$ ). Et antud suurustest mahtuvust arvutada, tuleks koostada uuritava objekti kohta ekvivalentskeem ja vastavalt skeemile tuletada valemid.

Ekvivalentskeem iseloomustab antud objekti ja näitab, milliseid elektrilisi omadusi mõõdetav objekt omab. Skeem peaks olema võimalikult lihtne ja samas ka piisav, et antud olukorda interpreteerida. Enamasti on diodi kirjeldavas ekvivalentskeemis takistid ja kondensaatorid aga võib ka lisada muid komponente, kui olukord nõuab. Tingimuseks on aga see, et kõigil nendel komponentidel peaks olema ka mingi füüsikaline sisu.



Joonis 1. Uuritava objekti ekvivalentskeem.

Üks lihtsamaid skeeme, mida kasutatakse ja mis on ka lisatud enamasti spektreid mõõtvase-analüüsivasse tarkvarasse, on toodud joonisel 1. See koosneb omavahel paralleelselt ühendatud takistist  $R_p$  ja kondensaatorist  $C$  ning nendega jadamisi ühendatud takistist  $R_s$ . Seejuures tuleb märkida, et selline ekvivalent skeem töötab väikeste pingete puhul, kui diodid ei ole veel päris avanenud. Seega, antud skeemi impedants kompleks kujul  $Z = R + iX$  on avaldatavad järgnevalt:

$$Z = R_s + \frac{R_p}{1 + (\omega R_p C)^2} - i \frac{R_p^2 C \omega}{1 + (\omega R_p C)^2}$$

kus  $\omega = 2\pi f$ ,  $Z'$  on reaalosa

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

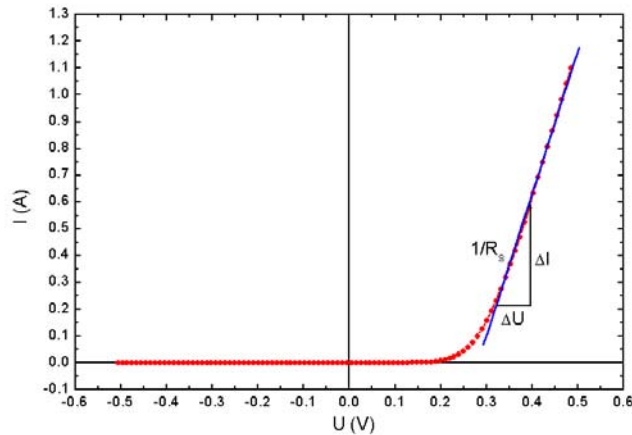
ja  $-Z''$  on imaginaarosa

$$-Z'' = \frac{R_p^2 C \omega}{1 + (\omega R_p C)^2},$$

millest, pärast mõningaid matemaatilisi teisendusi tehes, on võimalik avaldada mahtuvus  $C$ :

$$C = \frac{-Z''}{\left[ (Z' - R_s)^2 + (-Z'')^2 \right] \omega} \quad (1)$$

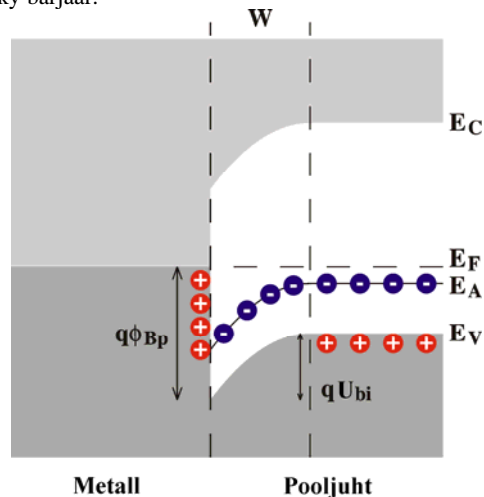
Nagu tuletatud valemist selgub, ei ole antud skeemi korral (kui  $R_s \neq 0$ ) võimalik mahtuvust ainult impedantsi kaudu avaldada, mistõttu on väga oluline leida ka järjestiktakistuse  $R_s$  väärtus kasutades mõnda muud meetodit. Üheks sobivaimaks meetodiks järjestiktakistuse hindamisel on volt-amper karakteristikute mõõtmise meetod ehk  $I$ - $V$  meetod, mille korral mõõdetakse uuritava objekti voolutugevuse sõltuvust rakendatavast pingest. Sealjuures järjestiktakistus leitakse positiivse pinge osast, kus voolutugevus kasvab lineaarselt (joon. 2) ehk diood on juba avanenud.



Joonis 2. Diooni volt-amper karakteristik, mille päripinge osast saab leida järjestiktakistuse  $R_s$ .

### Schottky barjäär

Schottky barjäär saadakse metalli ja pooljuhi pinna väga lähedasel kontaktil. Joonisel 3 on näha metalli ja p-tüüpi pooljuhi Schottky barjäär.



Joonis 3. Pärast metalli ja pooljuhi kontakti moodustunud Schottky barjäär. Tulemuseks on kompenseerimata laengute piirkond laiusel  $W$ .

Joonistel tähistavad  $E_F$  Fermi tasemeid nii metallis kui ka pooljuhis.  $E_V$  ja  $E_C$  on vastavalt valentstsooni lagi ja juhtivustsooni põhi.  $E_A$  on aktseptortase pooljuhis. Suurused  $W$ ,  $U_{bi}$  ja  $\phi_{Bp}$  tähistavad vastavalt

ruumlaengute piirkonna laiust, sisemist pinget ja barjääri kõrgust ning  $q$  on laeng. Viimasest kolmest on lähemalt juttu edaspidi. „-“ ja „+“ märgiga ringikesed tähistavad vastavalt elektrone ja auke.

Tasakaaluolekus, kui välised pinged puuduvad, peab Fermi tase olema konstantne üle kogu objekti ulatuses, muidu tekiks vool. Metallis on Fermi tase kõrgemal elektronidega täidetud tasemetest, samal ajal kui pooljuhis on Fermi taseme kõrgus määratud lisandite tasemega. Fermi tasemed sobitatakse järgmisel teel: enne tasakaalu on Fermi tase pooljuhis madalam, järelikult liiguvad elektronid metallist pooljuhti. See põhjustab laengute suurenemise mõlemal pool kontaktpindu, mille tulemuseks on elektrivälja ja seetõttu ka potentsiaali gradient vastavalt Poissoni valemile

$$d^2U/dx^2 = \rho(x)/\epsilon\epsilon_0, \quad (2)$$

kus  $\rho(x)$  on ruumlaengute tihedus kohal  $x$ ,  $\epsilon$  on antud keskkonna dielektriline läbitavus ja  $\epsilon_0$  on dielektriline konstant. See on siis niinimetatud tsooni kõverdumine. Selles alas on elektrivälja põhjustatud aukude äraliikumisest kontaktpinnalt; nad triivisid valentstsooni lae juurde. Tulemuseks on see, et ruumlaengute piirkonnas, laiusega  $W$ , on negatiivsete laengute ülejääk põhjustatud kompenseerimata laetud aktseptoritest.

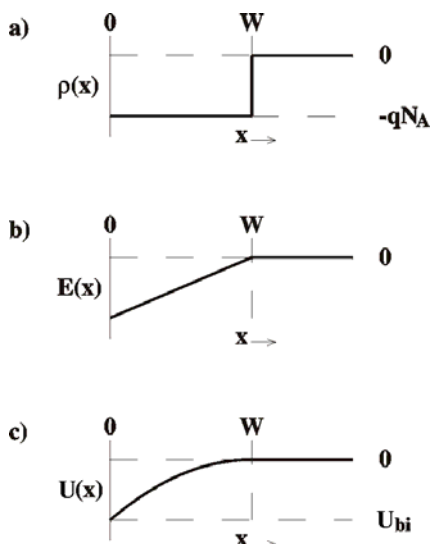
Parameetrid, mis kirjeldavad Schottky barjääri on:

- $\phi_{Bp}$ : barjääri kõrgus. Barjäär, mida kohtavad (enamus-) laengukandjad, mis tulevad metallist. See sõltub metalli ja pooljuhi elektronide afiinsusest ehk metalli ja pooljuhi elektronide väljumistõöst ning ka keelutsooni laiusest  $E_g$ . Barjääri kõrgus ei sõltu aga Fermi taseme asukohast pooljuhis ega ka lisandite olemasolust.
- $U_{bi}$ : sisemine pinge või null-pingega tsooni kõverdumine. Barjäär, mida kohtavad (enamus-) laengukandjad, mis lähevad metalli. See on määratud Fermi tasemete erinevusega enne metalli ja pooljuhi kontakteerimist.
- $W$ : ruumlaengute piirkonna laius. (Enamus-) laengukandjatest vaba piirkonna laius. Ruumlaengute piirkonna laius sõltub lisandite kontsentratsioonist.

Schottky barjääri jaoks on päripinge siis, kui positiivne pinge on rakendatud (p-tüüpi) pooljuhile ja negatiivne pinge metallile. See kompenseerib tsooni kõverdumist ja vähendab barjääri kõrgust.

### Schottky barjääri ruumlaengute piirkonna laiuse arvutamine

Schottky barjääri ruumlaengute piirkonna laiuse saab leida Poissoni valemist  $d^2U/dx^2 = \rho(x)/\epsilon\epsilon_0$ . Esmases lähenduses võime eeldada ristkülikukujulist ruumlaengute jaotust.



See kehtib juhul, kui aktseptorid on kõik ioniseeritud ja vabad laengud on liikunud ära kontaktpinnalt, jättes maha nüüd kompenseerimata ioniseeritud aktseptorid kuni kauguseni  $W$  (joon. 4a). Valemis:

$$\rho(x) = qN_A, \quad \text{kui } x \leq W \text{ ja}$$

$$\rho(x) = 0, \quad \text{kui } x > W.$$

Selisel juhul saame arvutada elektrivälja tugevuse, integreerides avaldist (2):

$$E(x) = dU/dx = (qN_A/\epsilon\epsilon_0)(x - W), \quad (3)$$

kus rajatingimuseks kasutati  $E(W) = 0$ . Sõltuvus ruumi koordinaadist on näidatud joonisel 4b. Integreerides valemist (3) saame pinge sõltuvuse ruumi koordinaadist ruumlaengute piirkonnas:

$$U(x) = (qN_A/2\epsilon\epsilon_0)(x - W)^2$$

(rajatingimusega  $U(W) = 0$ ). Jooniselt 4c on näha, et pinge väheneb ruutsõltuvusega. Kohal  $x = 0$  peab pinge

Joonis 4. a) laengute tiheduse, b) elektrivälja tugevuse ja c) pinge sõltuvused ruumi koordinaadist.

olema võrdne sisemise pingega  $U_{bi}$ , milleks saame:

$$U_{bi} = qN_A W^2 / 2\epsilon \epsilon_0, \quad (4)$$

millest

$$W = \sqrt{2\epsilon\epsilon_0 U_{bi} / qN_A}$$

on ruumlaengutepiirkonna laius 0V välise pinge korral. Kui objektile rakendada pinge, peab potentsiaalide vahe kohal  $x=0$  olema võrdne  $U_{bi} - U$ , järelkult saame ruumlaengute piirkonna laiuseks:

$$W = \sqrt{2\epsilon\epsilon_0 (U_{bi} - U) / qN_A} \quad (5)$$

### Schottky barjääri mahtuvus

Olgu barjäärele rakendatud väikese amplituudiga vahelduvpinge. Kui objektile pingelang muutub, siis saavutatakse uus tasakaaluolek uue ruumlaengu suurusega. Schottky barjääri vahelduvvoolu mahtuvust võib defineerida kui ruumlaengu juurdekasvulist muutust  $\Delta Q$  pinge juurdekasvulisel muutusel  $\Delta U$ ,  $C = dQ/dU$ . Paneme tähele, et see mahtuvus on sõltuv välispingest, vastupidiselt tavalisele kondensaatorile, mille mahtuvus on konstantne  $C = Q/U$ . Ristkülikukujulise jaotuse jaoks, mida ülalpool kirjeldasime, on  $Q$  võrdne  $qN_A W A$ , kus  $A$  on objekti aktiivne pindala ja potentsiaal on antud valemiga (4). Järelkult:

$$C = dQ/dU = d(qN_A W A) / d(W^2 qN_A / 2\epsilon\epsilon_0) = \epsilon\epsilon_0 A / W.$$

Nagu näha, on mahtuvus määratud täielikult ruumlaengute piirkonna laiusega:

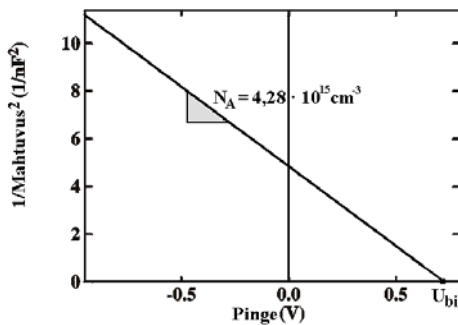
$$C = A\epsilon\epsilon_0 / W. \quad (6)$$

See näitab, et Schottky barjäär käitub nagu kondensaator, mis on tehtud kahest paralleelsest plaadist pindalaga  $A$ , vahekaugusega  $W$ . Asendades leitud ruumlaengute piirkonna laiuse valemist (5) saame mahtuvuseks:

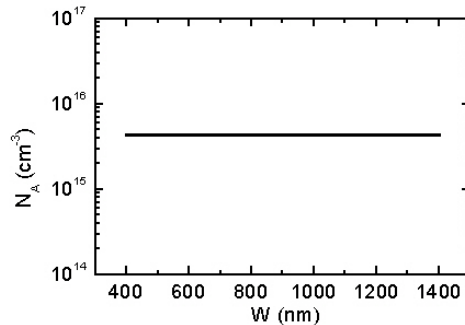
$$C = A\sqrt{q\epsilon\epsilon_0 N_A / 2(U_{bi} - U)}. \quad (7)$$

See näitab, et Mott-Schottky joonisel ehk  $C$ - $V$  graafikul (joonis 5) ( $C^{-2}$  sõltuvalt  $U$ ) on sirge, mille tõusust võib arvutada lisandiatomite kontsentratsiooni:

$$N_A = \frac{-2}{A^2 q\epsilon\epsilon_0} \frac{\Delta U}{\Delta C^{-2}}$$



Joonis 5. Mott-Schottky joonis.



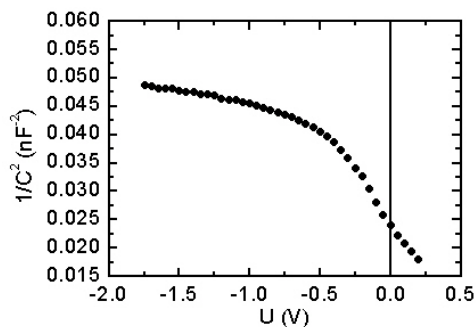
Joonis 6. Lisandiatomite kontsentratsioon  $N_A$  sõltuvalt kaugusest  $W$  siirdest.

Joonisel 5 ekstrapoleerides kuni  $C^{-2} = 0$  on võimalik leida sisemise pinge  $U_{bi}$ . Kuna ideaalse diodi puhul jääb tõus  $\Delta C^{-2} / \Delta U$  muutumatuks igas vahemikus  $\Delta U$ , vastab igale kaugusele siirdest sama kontsentratsioon (joon. 6). Kontsentratsioonile vastav kaugus  $W$  leitakse valemi (6) abil. Äramärkimist vajab ka asjaolu, et  $C$ - $V$  meetodil leitud  $N_A$  näitab vaid ruumlaengute piirkonnas (ehk tõkkekihis ehk siirde alas) antud pinge amplituudi, sageduse ja temperatuuri korral mahtuvuse muutusest osa võtnud laengute kontsentratsiooni. Kusjuures tulemust võivad oluliselt moonutada sügavad sügavad defektid ja ka vähemlaengukandjate defektid, nagu näiteks doonordefektid  $p$ -tüüpi pooljuhisis.

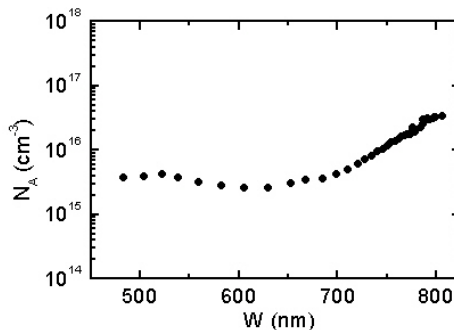
C-V sõltuvuse graafikuks on sirge vaid sel juhul, kui defektitasemete kontsentratsioon on üle kogu ruumi ühesugune. Kui aga C-V kõver käitub mittelineaarselt, leitakse defektitasemete kontsentratsioon ruumis:

$$N_A(W) = \frac{-2}{q\epsilon\epsilon_0 A^2} \left( \frac{dC^{-2}}{dU} \right)^{-1}, \quad (8)$$

kus ruumi koordinaat  $W$  leitakse vastava mahtuvuse  $C$  kaudu, kasutades valemit (6). Joonisel 7 on toodud mittelineaarselt käituv C-V kõver, millest leitud vastavad defektitasemete kontsentratsioonid kaugusel  $W$  siirdest on toodud joonisel 8.



Joonis 7. Mott-Schottky joonis.

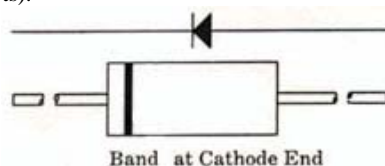


Joonis 8. Lisandiaatomite kontsentratsioon  $N_A$  sõltuvus kaugusest  $W$  siirdest.

#### 4. Töö käik

##### Objekti kontakteerimine

Objekt kontakteeritakse magnet-tald kontaktidega vastaval alusel või krokodillnäpitsatega objektist välja toodud otste külge. Kontakteerimisel püüda järgida diodi ühendamise polaarsuse nõuet (punane pistiku isolatsioon tähistab „+“ ja must „-“ otsa).  $p-n$  siirde korral on „+“ klemmiks  $p$ -pool ja „-“ klemmiks  $n$ -pool. Diodi puhul on „+“ anood klemm (joonisel 6 parempoolne ots) ja „-“ katood klemm (joonisel vasakpoolne ots).



Joonis 6. Diodi skeemitähis ja vastav märgistus katoodi poolse kontakti jaoks.

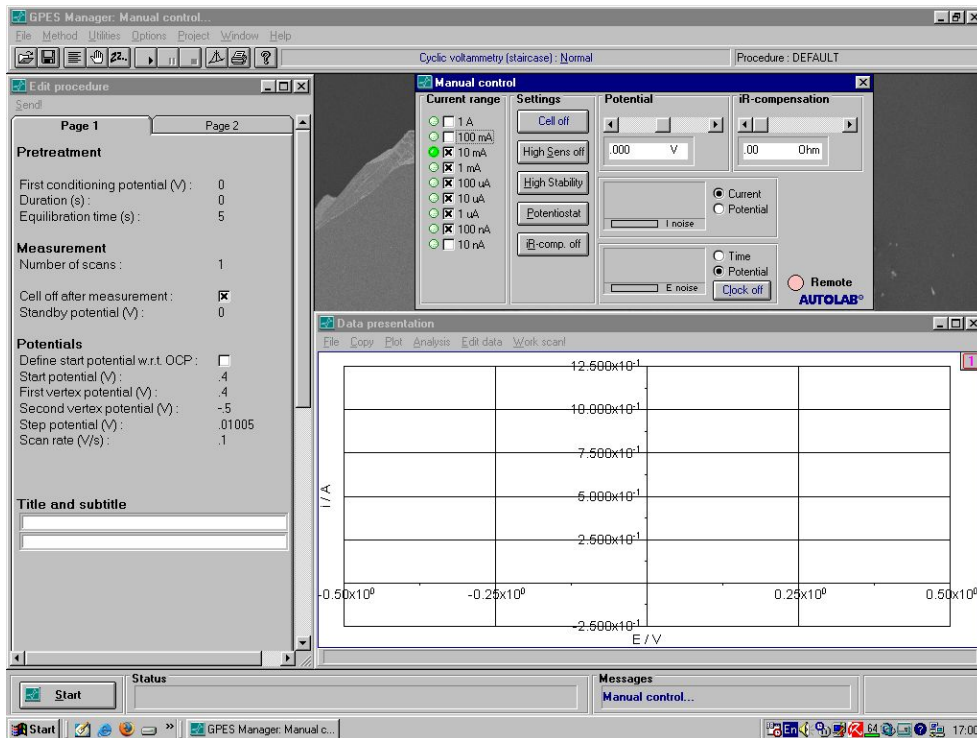
Ühenduse polaarsuse kontrollist on juttu järgmises punktis.

Parema signaal-müra suhte saamiseks tuleks ühendada ka objekti alus maandusega (roheline kaabel).

##### Polaarsuse ja kontakti headuse kontroll

Diodi ja päikesepatarei kontakteerimise õigsust ja kontaktide headust kontrollitakse alati peale objekti kontakteerimist, enne mõõtmiste alustamist, et vältida n.ö. tühja tööd või koguni uuritava objekti riknemist. Selleks:

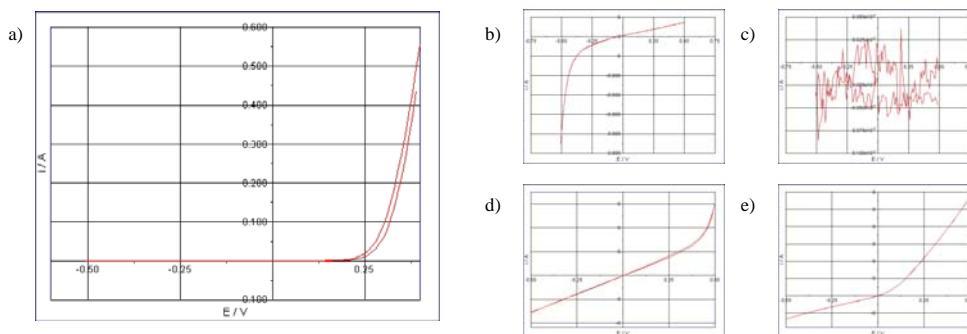
- Lülitada sisse Autolab PGSTAT30 seade.
- Käivitada programm GPES (*General Purpose Electrochemical System*) kas *START* menüüst *Programs / Autolab Software / Gpes* või töölaual olevalt ikoonilt (eeldusel, et arvuti on sisse lülitatud ja töötab).
- Ekraanile ilmuvaks aknas (joon. 7) on näha *GPES Manager* pea menüü riba ja kolm lisa akent: *Edit procedure*, *Manual control* ja *Data presentation*. Ekraani alumisse äärde jääval ribal on mõõtmist käivitav nupp **Start** ja olekut ning teateid kuvavad lahtridid.



Joonis 7. GPES Manager aken.

- Diiodi või päikesepatarei voolutugevuse-pinge sõltuvuse ehk  $I$ - $V$  kõvera ülesvõtmiseks tuleks programm eelnevalt häälestada. Selleks tuleks valida peamenüüst *File / Open procedure...*. Ilmunud aknas tuleks kataloogist  $C:\backslash\text{Autolab4.9}\backslash\text{Autolab}$  avada: **diiodi korral** – *IV-measure\_Diode.icw* fail; **päikesepatarei korral** – *IV-measure\_Solar Cell.ocw* fail. Programmi avamisel on vaikimisi viimase kasutuse sätted.
- *Edit procedure* aknas esimese lehe all tuleks täita ka *Title and subtitle* lahtrid.
- Pärast seadistusi käivitada mõõtmine ekraani all vasakus nurgas olevast nupust **Start**. Mõõtmise ajal on käivitusnupul kiri **Abort**, millele taaskord vajutades on võimalik vajaduse korral mõõtmine katkestada. Samuti on võimalik mõõtmine katkestada vajutades klaviatuuril klahvi *Escape*.

Kontakteerimine on olnud edukas juhul, kui mõõdetud kõver käitub üldjoontes sarnaselt teoreetilisel kirjeldatud diiodi  $I$ - $V$  kõverale (joon. 8a), nagu näidatud all vasakpoolsel joonisel. Parempoolsel joonistel (joon. 8b, 8c, 8d, 8e) on toodud olukorrad, kus on kas vale pidi kontakteeritud, kontakt puudub või on halb kontakt.



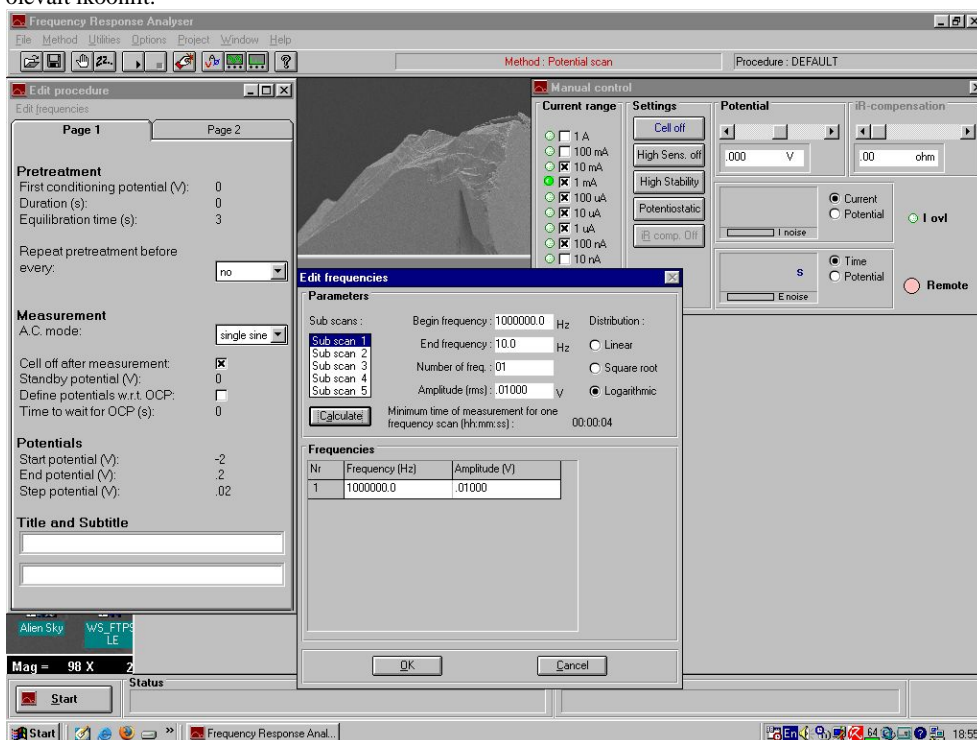
Joonis 8. a) ideaalse diiodi  $I$ - $V$  kõver, b) vale polaarsus, c) kontakt puudub, d) halb kontakt ja e) liiga suur  $R_s$ .

Kui kontakteerimine ei olnud edukas, siis tuleks: valida õige polaarsus, kontrollida ühendusi nii objekti kui ka aluse küljes või proovida objektile olevaid teisi kontakte. Kui kontakteerimine on aga olnud edukas, siis tuleks mõõtmistulemus salvestada, valides peamenüüst *File/Save scan As...* Mõõdetud volt-amper kõveralt on võimalik määrata järjestiktakistus  $R_s$ , mida läheb hiljem tarvis mahtuvuse arvutamisel. Järjestiktakistust leitakse *I-V* kõvera suurima päripinge osast, kus diod on täielikult sisse lülitatud ja vool kasvab kiiresti oomiliselt. Selleks tuleb leida *I-V* kõvera tõusu pöördväärtus elmainitud pingete piirkonnas.

*C-V* kõverate mõõtmiseks tuleks leida parima diodikõvera kujuga olukord, et oleks võimalikult ligilähedaselt täidetud *C-V* mõõtmiste tingimused: (i) võimalikult väike  $R_s$ , (ii) võimalikult suur  $R_p$  ja (iii) voolutugevus vastupinge osas ei tohiks ületada  $\approx 10 \mu A$ .

### C-V kõvera ülesvõtmine

*C-V* kõverate mõõtmiseks peab sulgema *GPES* programmi ning avama *FRA (Frequency Response Analysis)* programmi (joon. 9) kas *START* menüüst *Programs/Autolab Software/Fra* või töölaual olevalt ikoonilt.



Joonis 9. *Frequency Response Analyser* aken.

Seejärel tuleks programm seadistada mahtuvus-pinge sõltuvuste mõõtmise olekusse. Selleks valida peamenüüst *File/Open procedure*. Ilmunud aknas tuleks kataloogist *C:\Autolab4.9\Autolab* avada fail *CV-curve.pfr*. Antud olek on häälestatud sedasi, et skaneerimise sagedus on 1MHz, vahelduvpinge amplituud on 10mV ja alalispinge skaneerimise vahemik on  $-2,0V$  kuni  $+0,2V$  sammuga 0,02V. Sarnaselt *GPES* programmiga on vaikimisi viimase programmi kasutuse sätted.

Enne mõõtmist tuleks kuvada *Data presentation* aknas impedantsi reaali- ja imaginaarosade graafikud  $Z'$  versus  $E$  ning  $-Z''$  versus  $E$  menüüst *View / Potential scan plot*. Nendelt graafikutelt on võimalik jälgida vastavalt impedantsi reaali- ja imaginaarosade pinge sõltuvusi. Üldjuhul ei tohiks mõõdetud punktid tugevasti fluktuueruda. Suuremate pidevuse katkevuste korral tuleks muuta parameetreid või kontrollida kontakte.

Pärast seadeid võib käivitada mõõtmise all vasakus nurgas olevast **Start** nupust. Sarnaselt *GPEs* programmile on võimalik mõõtmist katkestada **Abort** nupust või *Escape* klahvi vajutades, kui mõõtmise käigus on näha, et parameetrid pole sobivad või on kontakt halb.

Pärast esimest mõõtmist tuleks muuta vahelduvpinge sagedust ning mõõtmist korrata. Vahelduvpinge komponendi häälestamiseks tuleks avada *Edit frequencies* aken klikkides *Edit procedure* akna ülal vasakul oleval *Edit frequencies* nupul. Mõõtmisagedus määratakse lahtris *Begin frequency* – lahtri *End frequency* sisu ei oma tähtsust, kui mõõdetavate sageduste arv on 1 (lahtris *Number of freq.*). Teisel ja kolmandal mõõtmisel tuleks kasutada vastavalt sagedusi 100kHz ja 10kHz.

**NB! Enne seadistuste kinnitamist (OK) lasta kindlasti programmil vajalikud mõõtmispunktid välja arvutada vajutades nupule *Calculate*.**

Pärast iga mõõtmist tuleb andmed salvestada valides peamenüüst *File/Save data As...*

Kogu protseduur tuleb teha nii diodi kui ka päikesepatarei jaoks – kokku 6 mõõtmist.

Kui kõik mõõtmised on teostatud, siis tuleb mõõtmisfailid konverteerida ASCII failideks. Selleks tuleb valida peamenüüst *File / Convert to ASCII*, avanenud *Convert data* aknas leida [kataloogi](#)puust salvestatud failid, ükshaaval aktiivseks tehes vajutada nupule *Convert*, avanenud lehel valida faili sisu tüüpidest kolmas (*E, Z', -Z''*), eemaldada märgistus *Include tm, Edc and Idc* juurest ning konverteerida fail vajutades veel kord nupule all vasakus nurgas *Convert*.

Saadud andmetest:

1. *I-V* kõvera suurima päripinge osast arvutada järjestiktakistused  $R_S$  nii diodi kui ka päikesepatarei jaoks;
2. arvutada siirde mahtuvus  $C$  kõikidel sagedustel kasutades valemit (1) ning koostada graafik siirde mahtuvuse ruudu pöördväärtus sõltuvalt vastupingest ( $1/C^2$  vs.  $U$ ) nagu joonistel 5 ja 7. Diodi ja päikesepatarei tulemused kanda eraldi graafikutele.
3. leida konstrueeritud graafikutelt lisandi aatomite kontsentratsioonid  $N_A$  ja esitada need graafikul  $N_A$  vs.  $W$ , kus  $W$  on kaugus siirdest, nagu näidatud joonistel 6 ja 8. Nüüd tuleks kanda diodi ja päikesepatarei lisandiatomite kontsentratsioonide profiilid ühele graafikule.

Deleted: Arvutada

Protokollis esitada ainult graafikud (mõõtmistulemuste tabelleid pole vaja).

Vajalikud andmed:

Objekt	$\epsilon$	$A$	$R_S$
Si diod	11,9		
CuInSe <sub>2</sub> või Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> päikesepatarei	13,6		