

**TAL
TECH**



INSENERIAKADEEMIA



Kaasrahanud
Euroopa Liit



Eesti
tuleviku heaks

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut

PÄIKESEPATAREI KVANTEFEKTIIVSUSE MÕÕTMINE

INSENERIAKADEEMIA ÕPPEMATERJAL

Koostaja(d):

Mati Danilson, teadur

.....
/nimi, amet/

Tallinn 2025

SISUKORD

EESSÕNA	3
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU.....	4
SISSEJUHATUS	5
1 KIRJANDUSE ÜLEVAADE	6
1.1 Kvantefektiivsuse olemus ja tüübid	6
1.2 Kvantefektiivsuse mõõtmise põhimõte ja seadmed	6
1.3 Päikesepatarei kaod ja nende mõju kvantefektiivsusele	8
1.4 Keelutsooni laiuse määramine kvantefektiivsuse kõverast	9
1.5 Pingest ja lisavalgusest sõltuv kvantefektiivsus.....	9
2 PRAKTILINE OSA	12
2.1 Päikesepatareide struktuurid ja kontakteerimine	12
2.2 Kvantefektiivsuse mõõteseadmed	14
2.3 Mõõtmise tööjärjekord.....	15
2.4 Tulemuste analüüs	16
KOKKUVÕTE	17
KASUTATUD KIRJANDUS	18
Lisa 1. Aruande vorm	19

EESSÕNA

Käesolev õppematerjal on valminud Inseneriakadeemia projekti "Inseneriakadeemia ja IT Akadeemia kõrghariduses" toel, nr 2021-2027.4.04.23-0002. Antud õppematerjal on valminud tegevuse 2 – „Õppe tööturu ning ühiskonna ootustele vastavuse suurendamine“ raames.

Inseneriakadeemia on Eesti riigi, õppeasutuste, ettevõtete ja erialaliitude koostööalgatus inseneeria valdkonnaga seotud hariduse kvaliteedi tõstmiseks ja vajaliku tööjõuressursi tagamiseks ning valdkonna populaarsuse suurendamiseks. Toetuse andmise eesmärk on, et inseneeria valdkondades kõrgharidustaseme õpe ja lõpetajate arv vastaks tööturu vajadustele. Tegevuse tulemusena kasvab toetatavates valdkondades üliõpilaste vastuvõtt, väheneb väljalangevus, suureneb lõpetajate arv ja lõpetajate erialased teadmised ja oskused on kooskõlas tööturu vajadustega. Rahastatakse inseneeria valdkonnas õpet pakkuva partner-kõrgkooli tegevusi õppetegevuse kitsaskohtade lahendamiseks koostatud tegevuskavast lähtuvalt. Tegevuskava hõlmab tegevusi, mille eesmärk on tulevaste üliõpilaskandidaatide arvu suurendamine, õppe kaasajastamine vastavaks tööturu ootustele ja õpingute katkestamise vähendamine. Üliõpilaskandidaatide arvu suurendamisel on eriline tähelepanu naisüliõpilaste sihtrühmal.



INSENERIAKADEEMIA



LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

Lühend / sümbol	Selgitus
QE	Kvantefektiivsus (<i>Quantum Efficiency</i>)
EQE	Väline kvantefektiivsus (<i>External Quantum Efficiency</i>)
IQE	Sisemine kvantefektiivsus (<i>Internal Quantum Efficiency</i>)
E_g, E_g^*	Keelutsooni laius ja efektiivne keelutsooni laius
h	Plancki konstant
ν	Kiirguse sagedus
e	Elektroni elementaarlaeng
P_{opt}	Optiline võimsus antud lainepikkusel
$\alpha(E)$	Neeldumiskoeffitsient sõltuvalt energiast
TCO	Läbipaistev juhtiv oksiid (<i>Transparent Conductive Oxide</i>)
CIGS	Cu(In,Ga)Se_2 – vask-indium-gallium-di-seleniid
CZTS	$\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ – vask-tsink-tina-sulfiid
Cu_2GeS_3	Vask-germaanium-sulfiid
SPM-2	Prisma-monokromaatoril põhinev kvantefektiivsuse mõõtesüsteem
PTS-2-QE	Sciencetech kvantefektiivsuse automaatne mõõtesüsteem
PGSTAT30	Autolab voolu-pinge mõõtesead

SISSEJUHATUS

Päikesepatarei kvantefektiivsus (Quantum Efficiency, QE) kirjeldab, kui tõhusalt fotovolt seadis muundab sellele langevad footonid elektrivooluks. Kvantefektiivsuse mõõtmine on üks olulisemaid meetodeid, mis võimaldab hinnata ja mõista päikesepatarei erinevate kihtide optilisi ja elektroonseid omadusi ning avastada voolu kadusid, mida ei pruugi olla võimalik näha voolupinge (IV) karakteristikute kaudu.

Kvantefektiivsuse mõõtmisel saadakse spektraalne sõltuvus – kõver, mis näitab, kuidas päikesepatarei reageerib eri lainepikkustega valgusele. Sellest kõverast saab hinnata nii valguse neeldumist, laengukandjate eraldumist ja kogumist absorbermaterjalis kui ka määrata materjali efektiivse keelutsooni laiuse. Kõvera kuju ja maksimaalsed väärtused sõltuvad nii fotovoltseadise struktuurist kui ka absorbermaterjali kvaliteedist.

Tüüpiliselt eristatakse kahte kvantefektiivsuse mõistet:

- **väline kvantefektiivsus (EQE)**, mis võtab arvesse kogu päikesepatareile langeva valguse hulka ning peegeldus- ja läbilaskvuskadusid;
- **sisemine kvantefektiivsus (IQE)**, mis iseloomustab ainult neid footoneid, mis neelduvad ja mille tulemusena tekivad laengukandjad kogutakse välisesse vooluringi.

Käesoleva praktikumi eesmärk on tutvuda kvantefektiivsuse mõõtmise põhimõtetega ja omandada oskus hinnata päikesepatarei optilisi ning elektroonseid omadusi QE kõvera põhjal. Mõõtmise tulemustest määratakse uuritava fotovolt seadise absorbermaterjali efektiivne keelutsooni laius ning analüüsitakse võimalikud optilised ja elektroonsed kaod.

Praktikum võib viia läbi kahel alternatiivsel mõõteseadmel:

- **SPM-2 prisma-monokromaatoril põhinev süsteem**, kus valgusallikana kasutatakse halogeenlampi, footonite voog moduleeritakse ja signaal tuvastatakse Lock-In võimendiga;
- **Sciencetech PTS-2-QE spektromeetril**, mis on uuem integreeritud süsteem päikesepatareide välise kvantefektiivsuse (EQE) automaatse mõõtmiste jaoks.

SPM-2 süsteemi skeem on toodud juhendi joonisel 4 ning seda kasutatakse juhul, kui uus Sciencetech seade ei ole kättesaadav. Mõlema süsteemi tööpõhimõte on sarnane – mõõdetakse päikesepatareist väljuva fotovoolu ja sellele langeva footonivoo suhet üle lainepikkuse spektri.

1 KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1 Kvantefektiivsuse olemus ja tüübid

Päikeseplatari ehk fotovolt seadise kvantefektiivsus iseloomustab, kui tõhusalt muundab seadis sellele langevad footonid elektrivooluks.

Kvantefektiivsus määratakse tavaliselt lainepikkuse funktsioonina ja väljendab fotovoolu spektraalset sõltuvust.

Matemaatiliselt on kvantefektiivsus defineeritud kui fotovoolu põhjustanud elektronide arvu ja päikeseplatariile langenud footonite arvu suhe. Kui kõik footonid neelduvad ja kõik genereeritud vähemuslaengukandjad jõuavad välisesse vooluringi, on QE väärtus üks.

Eristatakse kahte tüüpi kvantefektiivsust:

- **väline kvantefektiivsus (EQE)** – arvestab kõiki valguse peegeldus- ja läbilaskvuskadusid, s.t. kogu valgusvoogu, mis seadisele langeb;
- **sisemine kvantefektiivsus (IQE)** – näitab, kui suur osa neeldunud footonitest annab tegelikult panuse elektrivoolu tekkesse, s.t. välistades peegelduse ja läbilaskvuse mõjud.

EQE ja IQE võrdlemine võimaldab eristada optilisi ja elektroonseid kadusid ning hinnata, kui efektiivne on laengukandjate genereerimine ja kogumine absorbermaterjalis [1].

Kvantefektiivsuse kõvera kuju ja maksimaalsed väärtused sõltuvad fotovolt seadise struktuurist, aknaikihi materjalist, absorbermaterjali keelutsooni laiusest ja sellest, kui hästi välditakse peegeldus- ja rekombinatsioonilisi kadusid [2, 3].

1.2 Kvantefektiivsuse mõõtmise põhimõte ja seadmed

Kvantefektiivsust mõõdetakse, suunates fotovolt seadisele monokromaatse valguse ja mõõtes sellele vastava fotovoolutugevuse. Monokromaatne kiirgus saadakse kas optilise prisma või võre abil, mis eraldab valguse spektraalseteks komponentideks. Fotovoolu suurus on proportsionaalne neeldunud footonite arvuga.

SPM-2 prisma-monokromaatoril põhinev süsteem

TalTechi Päikeseenergeetika materjalide teaduslaboris kasutatav klassikaline süsteem koosneb halogeenlambist, prismamonokromaatorist, mehaanilisest modulaatorist, peeglist ja proovihoidikust. Modulatsioonisignaal eraldatakse Lock-In võimendiga, mis suurendab mõõtmise tundlikkust ja vähendab müra.

Süsteem võimaldab mõõta **suhtelist välist kvantefektiivsust (EQE)**. Signaali mõõtmiseks on kaks võimalust:

1. **Lock-In'i voolu sisendi kaudu** – sobib juhtudel, kui maksimaalne fotovool ei ületa umbes 1 μA ;
2. **välist voolumõõteseadet kasutades** – tavaliselt **AUTOLAB PGSTAT30**, mille valitakse madalaim vooluvõimenduse režiim, mis katab ära kõige intensiivsema spektriosa. Autolab teisendab voolutugevuse kuni 1 V väljundpingeks, mis suunatakse Lock-In võimendi pinge sisendisse.

Selline signaalitöötlus võimaldab usaldusväärselt mõõta ka väga väikeseid fotovoolusid ja saavutada hea signaali-müra suhe.

Sciencetech PTS-2-QE spektromeeter

Uuem mõõteseade **Sciencetech PTS-2-QE** töötab samal põhimõttel: monokromaatne valgus moduleeritakse ja signaal mõõdetakse Lock-In võimendi abil. Erinevus seisneb selles, et voolu-pinge mõõtmiseks kasutatakse **Keithley** seadet, mille väljundpinge suunatakse Lock-In'i sisendisse, kust digiteeritud signaal edastatakse arvutisse.

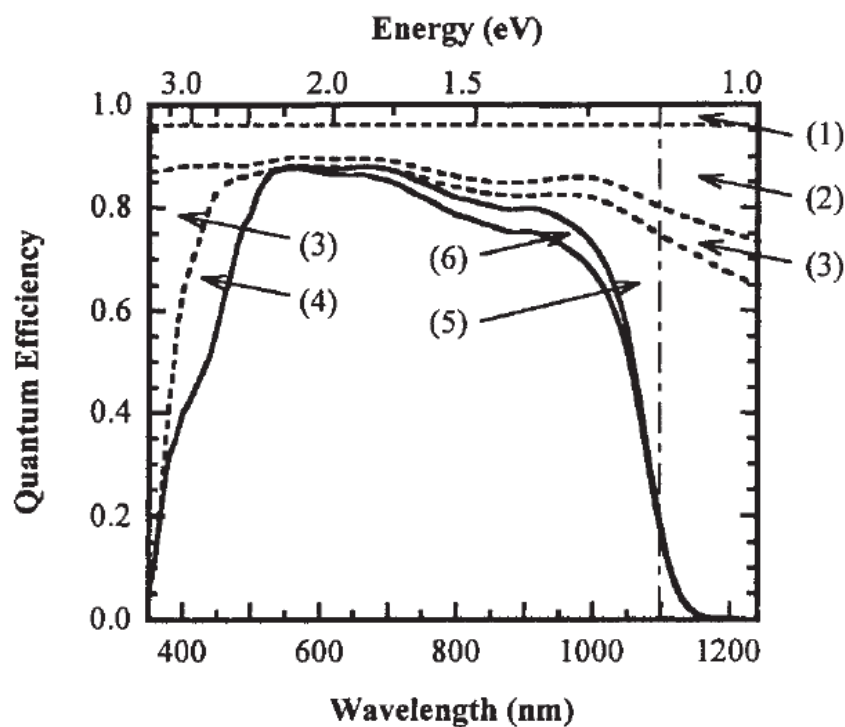
PTS-2-QE võimaldab määrata **absoluutseid** kvantefektiivsuse väärtusi (nii EQE kui IQE). Selleks mõõdetakse esmalt valgusallika intensiivsuse spektrisõltuvus **kalibreeritud detektori** abil. Mõõtetarkvara arvutab selle põhjal **parandusteguri**, mida kasutatakse fotovolt seadise mõõtmisel, et leida absoluutne kvantefektiivsus.

Sarnaselt vanale süsteemile saab ka PTS-2-QE seadmes määrata **pingest sõltuva kvantefektiivsuse**, kus pinge seadistamine toimub Keithley kaudu.

Oluline lisavõimalus on **lisavalgus (Bias Light)**, mida saab kasutada laengukandjate käitumise uurimiseks reaalsemates töötingimustes. Lisavalguse spektrit saab muuta filtrite abil (nt punane või sinine valgus), mis võimaldab uurida, kuidas erinev lisavalgus mõjutab fotovoolu ja laengukandjate kogumist absorbermaterjalis.

1.3 Päikesepatarei kaod ja nende mõju kvantefektiivsusele

Kvantefektiivsuse kõver peegeldab mitmeid füüsikalisi protsesse, mis võivad põhjustada optilisi või elektroonseid kadusid fotovolt seadises (joonis 1).



Joonis 1. Optiliste kadudega Cu(InGa)Se_2 päikesepatarei kvantefektiivsus pingetel 0V (alumine pidevjoon) ja -1V (ülemine pidevjoon), mille Cu(InGa)Se_2 keelutsooni laius on $E_g = 1,12\text{eV}$ (märgitud horisontaalse kriips-punktjoonega); kaod on määratletud järgnevas loendis.

Optilised kaod:

1. kammelektroodi varju mõju;
2. valguse peegeldumine seadise esipinnalt ja erinevate kihtide piirpindadelt;
3. valguse neeldumine aknakihis (TCO – *Transparent Conductive Oxide*);
4. valguse neeldumine vahekihis, kust laengukandjaid ei koguta;
5. osaline valguse neeldumine keelutsooni energia lähedal, eriti kui absorbermaterjalil esineb keelutsooni gradient [3].

Elektroonsed kaod:

6. fotogenereeritud laengukandjate mittetäielik kogumine absorbermaterjalis ja rekombinatsioonilised kaod kristalliitidevahelistel defektidel ja piirpindadel [4];

QE kõvera pikema lainepikkuse ääre asukoht määrab absorbermaterjali efektiivse keelutsooni laiuse E_g^* . Lühema lainepikkuse osa kuju sõltub peamiselt aknakihi ja piirpindade kvaliteedist.

1.4 Keelutsooni laiuse määramine kvantefektiivsuse kõverast

QE kõvera madala energia osa (st pikema lainepikkuse piirkond) võimaldab hinnata absorbermaterjali efektiivset keelutsooni laiust. Otsese keelutsooniga pooljuhtides järgib neeldumiskoeffitsient $\alpha(E)$ ligikaudu seadust [5]:

$$\alpha(E) = B(E - E_g^*)^{1/2}$$

kus E_g^* on **efektiivne keelutsooni laius** ja B on konstant. Kui neeldumine on väike, saab kvantefektiivsuse avaldada ligikaudu kujul:

$$QE \approx A \frac{(E - E_g^*)^{1/2}}{E}$$

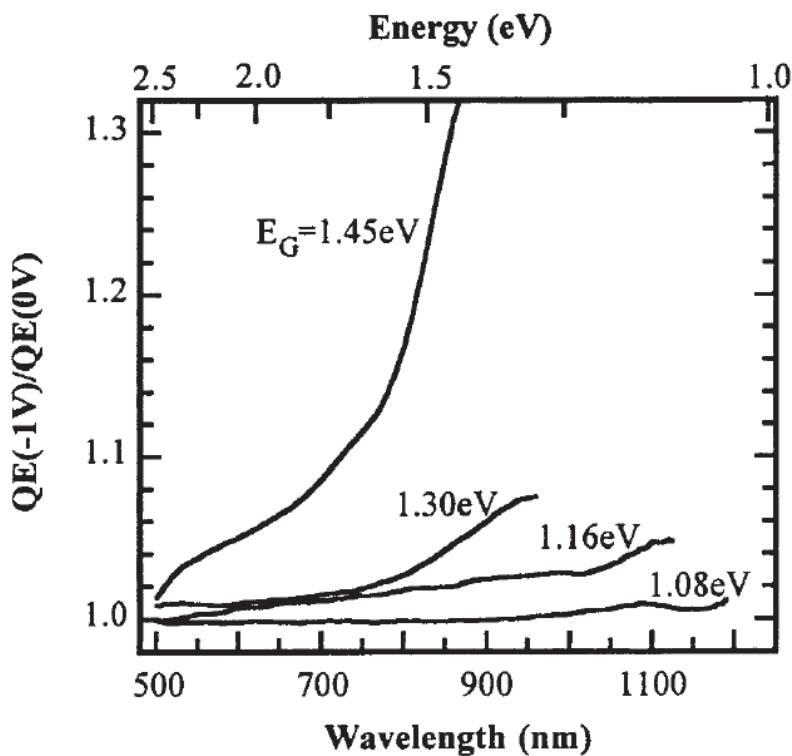
Kujutades $(E \cdot QE)^2$ sõltuvuse energia E funktsioonina, saadakse ligikaudu lineaarne osa, mille ekstrapoleerimisel nulli leitakse E_g^* väärtus.

See meetod on laialt kasutatav, kuna kvantefektiivsus on neeldumiskoeffitsiendiga otseselt seotud ja võimaldab hinnata keelutsooni laiust ilma eraldi optilise neeldumise mõõtmiseta.

1.5 Pingest ja lisavalgusest sõltuv kvantefektiivsus

Pingest sõltuv kvantefektiivsus $QE(V, \lambda)$ annab infot laengukandjate kogumise efektiivsuse kohta. Kui QE väärtus sõltub tugevalt pingest, viitab see suurenenud rekombinatsioonile või kitsale ruumlaengute piirkonnale absorbermaterjalis.

Valguse poolt genereeritud fotovoolu $J_L(V)$ pingesõltuvust saab iseloomustada vaadeldes erinevatel pingetel mõõdetud QE suhete sõltuvust lainepikkusest. Näiteks, joonisel 2 on näidatud nelja erineva keelutsooni laiusega Cu(InGa)Se_2 absorbermaterjaliga päikesepatarei $\text{QE}(-1\text{V})/\text{QE}(0\text{V})$ suhted. Kasvanud pingesõltuvus suurematel lainepikkustel näitab vähemuslaengukandjate nõrka kogumist absorbermaterjali põhiosast, mis muutub suurema keelutsooni laiusega materjalides olulisemaks.



Joonis 2. Nelja erineva keelutsooni laiusega Cu(InGa)Se_2 absorbermaterjaliga päikesepatarei -1V vastupinge QE suhted $\text{QE}(-1\text{V})/\text{QE}(0\text{V})$.

Kui QE pingesõltuvus on lainepikkusest sõltumatu, viitab see voolu kao mehhanismile, mis mõjutab kõiki laengukandjaid võrdselt, olenemata sellest, millises seadise piirkonnas need genereeriti. Heteroüleminekuga siiretes esineb kahte tüüpi voolu kao mehhanismi; rekombinatsioon kontaktpinnaolekul ja barjäär, mis on tingitud juhtivustsoonide sobimatuses. Kolmas mehhanism on seotud järjestiktakistuse ja tööpinge vastasmõjuga QE mõõtmise ajal.

Lisavalguse (bias light) kasutamine aitab stabiliseerida laengukandjate kontsentratsioone ja annab reaalsema pildi tegelikust töörežiimist. Sciencetech PTS-2-QE süsteem võimaldab neid mõjusid uurida automaatselt, mõõtes EQE nii pimedas kui ka valge lisavalguse korral.

Päikesepatareide I-V testimise standardtingimustes kasutatakse valgustust $\sim 100 \text{ mW/cm}^2$. Seevastu monokromaatne kiirgus QE mõõtmise korral on tavaliselt 3–4

suurusjärku nõrgem. Ideaalse päikesepatarei korral on see erinevus ebaoluline, kuna eeldatakse, et laengukandjate generatsioon on footonite vooga lineaarses seoses. Lisavalgusel on madala lõksutasemete kontsentratsiooniga pooljuhtmaterjalides tühine mõju, kuid mõnedel õhukesekilelistel päikesepatareidel on lõksutasemete ja fotojuhtivuse tõttu mittelineaarne väljund. Lisavalgus võib mõjutada ka polükristallse heteroüleminekuga õhukesekilelisi päikesepatareisisid, kuna fotojuhtiv CdS muudab absorbermaterjalis elektrivälja jaotust, mis omakorda mõjutab pingest sõltuvat laengukandjate kogumist. Lisavalguse efektid võivad olla veelgi suuremad QE mõõtmisel punase või sinise lisavalguse korral.

Üldiselt tuleks päikesepatarei kõige olulisemate optiliste ja laengukandjate kogumise efektide iseloomustamiseks QE-d mõõta valge lisavalgusega ja pimedas. Iga oluline erinevus nõuab pinge ja spektraalse sõltuvuse täiendavat uurimist.

2 PRAKTIINE OSA

2.1 Päikesepatareide struktuurid ja kontakteerimine

Kvantefektiivsuse mõõtmisel kasutatakse laboris erinevat tüüpi fotovolt seadiseid, mille struktuur ja valguse suund mõõtmisel võivad erineda. Kõige sagedamini uuritakse **monoterakiht-tüüpi** ja **õhukesekilelise** ehitusega päikesepatareisid. Nende eristamine on oluline, sest kontaktide ühendamine ja proovi paigutamine valguskiire suhtes sõltuvad seadise tüübist.

Monoterakiht-tüüpi fotovolt seadised

Monoterakiht-tehnoloogias kasutatakse absorbermaterjalina väikeseid mikrokristalle, mis on valmistatud näiteks ühenditest CIGS, CZTS või Cu_2GeS_3 . Need kristallid fikseeritakse üksteise kõrvale vaigu kihis, moodustades ühe-tera-paksuse-kihi ehk **monoterakihtmembraani** – pideva, kuid mikroskoopiliselt teralise struktuuri, mille igas kristallis toimub footonite neeldumine ja laengukandjate genereerimine.

Membraanile lisatakse seejärel vajalikud funktsionaalsed kihid ja kontaktid. Valmis monoterakiht-päikesepatarei võib põhimõtteliselt olla poolläbipaistev ja painduv, kus iga üksik kristall toimib töötava fotovolt seadise elemendina. Laboris kasutatavad struktuurid on reeglina kleebitud klaasalusele, mistõttu need ei ole painduvad, ning tagumise kontaktina kasutatakse grafiiti või metalli, mis muudab seadised valgust mitteläbilaskvaks. Selline struktuur kuulub **superstraadi-tüüpi** seadmete hulka, mille puhul **valgus siseneb läbi läbipaistva alusmaterjali ja esikontakti**. Tagakontakt on lisatud viimase kihina ega lase valgust läbi.

Mõõtmisel paigutatakse seadis seadmehoidjasse nii, et valgus langeb **klaasi ja läbipaistva elektroodi poolt**, tagakontakt ühendatakse positiivsele klemmile ning esikontakt negatiivsele klemmile. See ühenduse polaarsus tuleneb sellest, et absorbermaterjal on tavaliselt p-tüüpi, samas kui läbipaistev esikiht (nt TCO/CdS) moodustab n-tüüpi kontakti. Valguse poolt genereeritud elektronid liiguvad esikontakti ja augud tagakontakti suunas, mistõttu on tagakontakt positiivne ja esikontakt negatiivne.

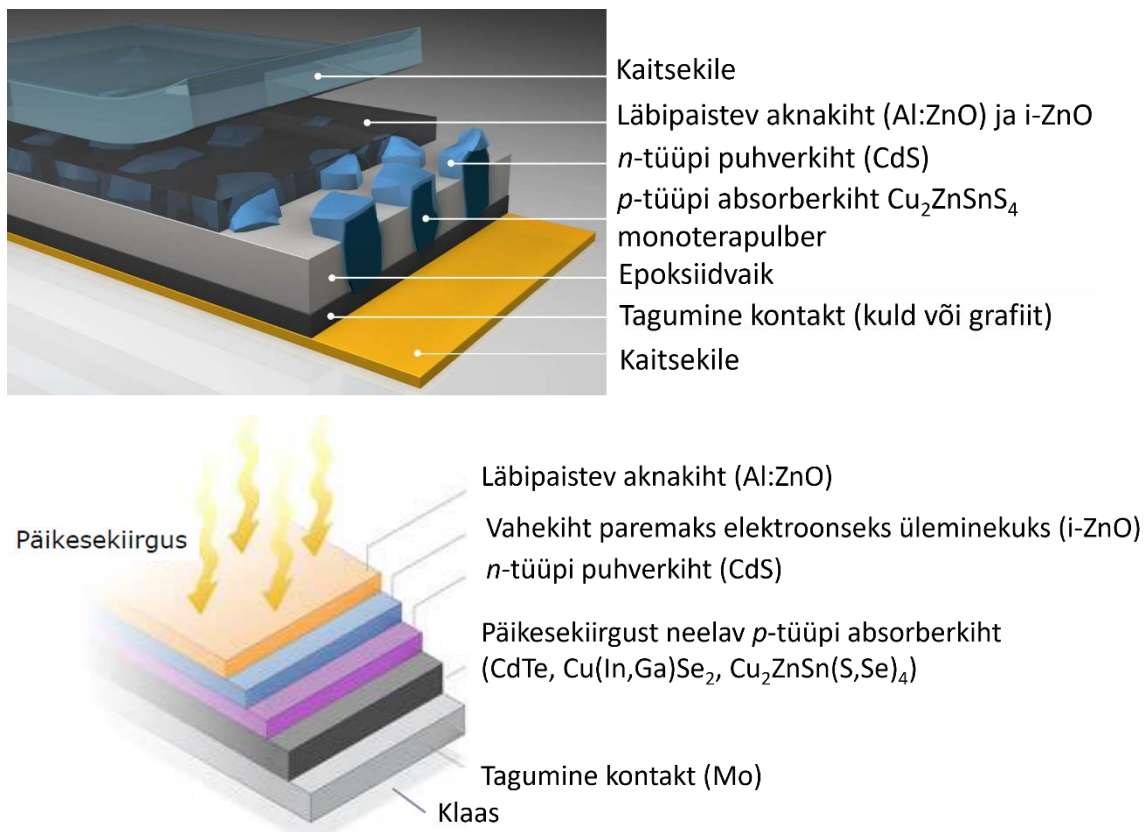
Õhukesekilelised fotovolt seadised

Õhukesekilelised fotovolt seadised (nt samuti CIGS, CZTS või Cu_2GeS_3 põhised) valmistatakse kandes absorbermaterjali õhukese pideva kilena aluspinnaile. Erinevalt monoterakihtmembraanist on siin absorber homogeenne ja pidev, ilma üksikute kristallide eristumiseta.

Sõltuvalt sellest, millise kihi valmistamist alustatakse, võivad õhukesekilelised seadised olla kahte põhitüüpi:

- **Superstraadi-tüüpi** – alustatakse läbipaistvast esikontaktist ja valgus siseneb seadmesse läbi klaasi või mõne muu läbipaistva alusmaterjali (nagu monoterakiht-tüüpi fotovolt seadise puhul).
- **Substraadi-tüüpi** – alustatakse metallilisest tagakontaktist ning läbipaistev elektrood lisatakse viimases etapis ülemisele küljele, nii et valgustus toimub samuti **läbi läbipaistva elektroodi**.

Mõlemal juhul peab valgus langema seadmisele **sellelt küljelt, kus paikneb läbipaistev elektrood**, sest metalliline kontakt ei lase kiirgust läbi. Kontakteerimine toimub samal põhimõttel: läbipaistev elektrood ühendatakse negatiivsele klemmidele ning tagumine metallkontakt positiivsele klemmidele. Joonisel 3 on näidatud monoterakiht- ja õhukesekilelise fotovolt seadise tüüpilised kihistruktuurid ning valguse langemise suund kvantefektiivsuse mõõtmisel.



Joonis 3 Monoterakiht- ja õhukesekilelise fotovolt seadise struktuur ja valguse suund kvantefektiivsuse mõõtmisel [6].

2.2 Kvantefektiivsuse mõõteseadmed

Kvantefektiivsuse mõõtmiseks kasutatakse laboris kahte erinevat süsteemi:

- **SPM-2 prisma-monokromaatoril põhinev süsteem,**
- **Sciencetech PTS-2-QE spektromeeter.**

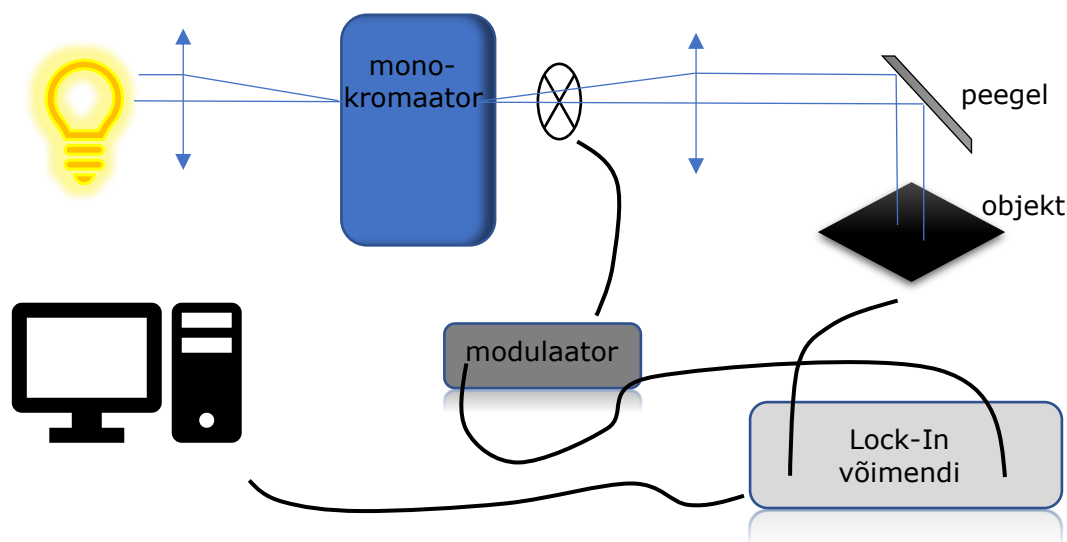
SPM-2 süsteem (ruumis U06-143)

SPM-2 süsteemis saadakse monokromaatne valgus halogeenlambist, mille spekter eraldatakse prismamonokromaatori abil. Kiirgus moduleeritakse mehaanilise katkestiga ning suunatakse peeglite abil proovile.

Proov asetatakse hoidjasse nii, et valgustatakse läbipaistva elektroodi poolt. Fotovoolu mõõdetakse kas otse Lock-In võimendi voolu sisendiga või läbi **AUTOLAB PGSTAT30** mõõteseadme, mille väljundpinge juhitakse Lock-In'i sisendisse.

Signaali töötlemisel kasutatakse referentsignaalina modulatsioonirütmi, et eristada mõõtesignaali taustmürast. Voolusignaali tugevus on proportsionaalne kvantefektiivsusele antud lainepikkusel.

Mõõtmise lõppedes korrigeeritakse saadud kõver valguse intensiivsuse spektri järgi, et saada **suhteline EQE spekter** [7].



Joonis 4. Välise kvantefektiivsuse põhimõtteline mõõtmise skeem.

Sciencetech PTS-2-QE süsteem [8] (ruumis U06-248)

PTS-2-QE spektromeeter töötab samal põhimõttel, kuid on integreeritud süsteem, mis sisaldab valgusallikaid (halogeen ja ksenoonlampi), monokromaatorit, Keithley voolu- pinget mõõteseadet ja Lock-In võimendit.

Seadme eelis on võimalus mõõta **absoluutset EQE ja IQE**, kasutades eelnevalt kalibreeritud valgusvoo andmeid. Mõõtmise käigus võtab tarkvara arvesse valgusallika kalibreeritud spektraaljaotuse ning korrigeerib saadud mõõtesignaali vastavalt sellele.

Sarnaselt SPM-2 süsteemile saab PTS-2-QE seadmega mõõta pingest sõltuvat kvantefektiivsust. Lisaks võimaldab seade kasutada **lisavalgust (*Bias Light*)**, mille spektrit saab muuta filtritega (nt punane või sinine valgus), et uurida laengukandjate kogumise efektiivsust erinevates töörežiimides.

2.3 Mõõtmise tööjärjekord

1. Proovi ettevalmistamine

- Kontrolli, et proov on puhas ja kontaktid on terved.
- Ühenda kontaktid korrektselt vastavalt seadise tüübile (õhukesekileline või monoterakiht).
- Määra, kummalt poolt proovi valgustatakse.

2. Seadme ettevalmistamine

- Lülita sisse valgusallikas ja lase tal stabiliseeruda vähemalt 5 minutit.
- Määra mõõtepiirkond ja samm: vali monokromaatori mõõtmise algus- ja lõpp-lainepikkus vastavalt proovi materjali keelutsoonile (nt 350–1200 nm) ning sea lainepikkuse samm (tüüpiliselt 10 nm).
- Kontrolli, et Lock-In võimendi referentssignaali on sünkroonis katkestiga (SPM-2 puhul).

3. Mõõtmine

- **SPM-2** süsteemi puhul alusta mõõtmist lühemalt lainepikkustelt (nt 350 nm) ja liigu pikemate lainepikkuste suunas. Mõõda igal lainepikkusel fotovool. Valguse intensiivsuse eelnevat mõõtmist ei toimu, sest kasutusel on juba eelnevalt määratud korrigeerimistegur, mis vastab antud halogeenlampi spektraalsele jaotusele. See tagab, et mõõtmise tulemused on võrreldavad varasemate andmetega.
- **Sciencetech PTS-2-QE** süsteemi puhul mõõda esmalt valgusallika kalibratsioonikõver, kasutades kalibreeritud detektorit. Seejärel mõõda

uuritava proovi fotovool sõltuvalt lainepikkusest, kasutades sama mõõteala ja seadistust. Mõlemad mõõtmised teostatakse automaatselt seadme tarkvaras.

4. Andmete salvestamine ja töötlemine

Mõõtmise järel salvestab tarkvara andmed automaatselt.

- **PTS-2-QE** süsteem kirjutab ühte faili kõik mõõteandmed, sealhulgas lainepikkuse (esimene tulp), mõõdetud signaali, korrigeeritud signaali, kvantefektiivsuse (EQE), spektraalse tundlikkuse ning mitmesugused mõõtetetingimuste parameetrid.
- **SPM-2** süsteem genereerib kaks eraldi faili:
 - **.dat** laiendiga fail sisaldab parandamata mõõtmistulemust,
 - **.dat.eV** laiendiga fail sisaldab valguse intensiivsuse järgi korrigeeritud tulemust energiaskaalas (eV).

Kuigi arvutused tehakse automaatselt, on oluline mõista, millist tehet tarkvara kasutab kvantefektiivsuse leidmisel. Kvantefektiivsus arvutatakse valemi järgi:

$$QE = \frac{I_{ph}/e}{P_{opt}/(h\nu)},$$

kus I_{ph} on mõõdetud fotovool, e elektroni elementaarlaeng, P_{opt} optiline võimsus antud lainepikkusel, h Plancki konstant ja ν vastava kiirguse sagedus.

Kui kasutatakse ainult suhtelist EQE kõverat, korrigeeritakse see valguse spektraalse jaotuse järgi. Kalibreeritud mõõteseadme korral kasutatakse vastavat kalibratsioonifaili absoluutväärtuste määramiseks.

2.4 Tulemuste analüüs

- Joonista saadud **EQE spektraalne kõver** nii lainepikkuste (nm) kui ka energiaskaala (eV) järgi ning määra selle maksimum ning pikemate lainepikkuste lõikepunkt.
- Määra **efektiivne keelutsooni laius** E_g^* graafilise meetodi abil (vt peatükk 1.4).
- Võrdle saadud kõveraid eri proovide või pingestamise tingimuste korral ning tõlgenda erinevusi optiliste ja elektroonsete kadude seisukohalt.

- Kui mõõdeti lisavalgusega või pingest sõltuvalt, analüüsi, kuidas see mõjutab QE väärtusi ja millest see võib tuleneda.

KOKKUVÕTE

Praktikumi eesmärk oli määrata päikeseplatari kvantefektiivsus ja analüüsida selle sõltuvust kiirguse lainepikkusest. Mõõtmiste käigus koostati fotovolt seadise spektraalne EQE kõver ning hinnati optiliste ja elektroonsete kadude mõju seadise üldisele efektiivsusele.

Graafilise meetodi abil määrati absorbermaterjali efektiivne keelutsooni laius E_g^* , mis võimaldab hinnata valguse neeldumise piiri ja materjali sobivust päikeseenergia muundamiseks. Tulemuste võrdlemine erinevate proovide või pingestamise tingimuste korral andis ülevaate, kuidas materjali omadused, struktuur ja pingestatus mõjutavad laengukandjate eraldumist ja rekombinatsiooni.

Praktikumi tulemusel omandas tudeng oskuse hinnata fotovolt seadise optilisi ja elektroonseid omadusi kvantefektiivsuse kõvera põhjal ning mõista, kuidas need omadused määravad seadise tööparameetrid ja kasuteguri.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] McMahon, W. E., et al. "The interpretation of quantum efficiency measurements in solar cells." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 12(3), 235–248 (2004).
- [2] Nelson, J. *The Physics of Solar Cells*. Imperial College Press, London, 2003.
- [3] Wallace, S. K., Mitzi, D. B., & Walsh, A. "The steady rise of kesterite solar cells." *ACS Energy Letters*, 2(4), 776–779 (2017).
- [4] Shin, B., Gunawan, O., Zhu, Y., Bojarczuk, N. A., & Deline, V. R. "Thin film solar cell with controlled composition gradients." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(1), 72–80 (2013).
- [5] Wolden, C. A., et al. "Photovoltaic device physics of kesterite solar cells." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19(6), 757–761 (2011).
- [6] Rau, U., & Schock, H. W. *Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells*. Elsevier, 2011.
- [7] Jäger, K. "Õhukesekileliste ja monoterakiht-päikesepatareide struktuurid." Magistritöö, Tallinna Tehnikaülikool, 2023. (*joonised 1.2 ja 1.3*)
- [8] Danilson, M., Nasyori, A. jt. *TalTech Solar Energy Materials Laboratory internal notes on EQE measurements*, 2024.
- [9] *Sciencetech PTS-2-QE Quantum Efficiency System – User Manual*, Sciencetech Inc., 2022.

Lisa 1. Aruande vorm

Aruande koostamine: 3–5 lehekülge (koos jooniste ja graafikutega). Võib ka olla ainult Excel fail.

Aruande soovituslik struktuur:

1. Eesmärk

- Lühidalt kirjelda praktikumi eesmärki: milliseid nähtusi uuriti ja mida püüti määrata (nt EQE, IQE, keelutsooni laius).

2. Eksperimentaalne osa

- Kasutatud mõõteseade (SPM-2 või Sciencetech PTS-2-QE).
- Uuritava päikesepatarei tüüp (monoterakiht või õhukesekileline).
- Mõõteseaded ja pingestuse tingimused.

3. Tulemused

- Graafikud EQE vs λ (nm) ja EQE vs E (eV).
- Märgi kõvera maksimum ja pikema lainepikkuse lõikepunkt.
- Lisa arvutatud efektiivne keelutsooni laius E_g^* .
- Kui mõõdeti lisavalgusega või sõltuvalt pingest, esita ka vastavad kõverad ja võrdlus.

4. Arutelu

- Võrdle tulemusi erinevate proovide või pingestuse korral.
- Selgita, millest võivad tuleneda optilised ja elektroonsed kaod.
- Kui kõver on madal või nihkunud, põhjenda võimalikud põhjused (nt defektid, peegeldus, rekombinatsioon).

5. Kokkuvõte

- Korda lühidalt peamised tähelepanekud: mis määrati, milline oli E_g^* , kuidas mõjutas tulemust lisavalgus või pingest sõltuvus.

6. Kasutatud kirjandus

- Esita aruandes kasutatud viited nummerdatud kujul.