

MIINA HÄRMA GÜMNAASIUM

KAROLIN RUUMET

12. KLASS

PÄIKESEPATAREIDE PARAMEETRITE MÕÕTMINE TEHISVALGUSES $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn}_{1-x}\text{Ge}_x)\text{S}_4$ NÄITEL

JUHENDAJAD ÕP JÖRGEN METSIK, MARIT KAUK-KUUSIK (TALLINNA
TEHNIKAÜLIKOOL)

SISSEJUHATUS

Üha enam on kasutusele võetud seadmeid, mis on osa suuremast võrgustikust ja töötavad peamiselt siseruumides. Neid hõlmab termin asjade internet (IoT – *Internet of Things*) ehk nutistu. Selle hulka kuuluvad näiteks igasugused sensorid ja andurid, mis mõõdavad ruumi temperatuuri ning süsihappegaasi, vingugaasi ja õhuniiskuse taset. Samuti loetakse nutistu alla kantavaid nutiseadmeid, nagu näiteks nutikellasid ning aktiivsusmonitore, aga ka nutikodu (*smart home*) süsteemi osasid ehk nutitelefoniga sisse-välja lülitatavaid seadmeid ja kodumasinaid.

Nutistu hulka kuuluvate seadmete kasutusala laienemise pärast on tekkinud vajadus kindlate omadustega vooluallikate järele. Seejuures on oluline väiksemõõtmeliskus, efektiivsus, autonoomsus ja madal hind. Seni on lahenduseks olnud patareid, mis aga vajavad seadme pikaajaliseks tööshoidmiseks sagedast väljavahetamist. Samuti paiknevad seadmed sageli kättesaamatutes kohtades või siis on neid palju, mistõttu on tühjade patareide asendamine pikas perspektiivis nii raha kui ka aja poolest kulukas. Samuti pole patareid just kõige keskkonnasõbralikum valik. (Chen *et al.*, 2024)

Üheks lahenduseks oleksid päikesepatareid, mis toodaksid sisetingimustes lambivalguse käes väiksemõõtmelise tarviti jaoks elektrit, suutes niiviisi täita nutistu hulka kuuluvate seadmete energiavajadust.

Oluline on arvestada sellega, et päikesepatareide väljaarendamise käigus mõõdetakse nende omadusi standardtingimustes. Valgusallika ehk tingimuste muutmisel võivad märkimisväärselt muutuda ka päikesepatarei parameetrid, mille hulgast on tarbija vaatepunktist olulisim efektiivsus. Valgusallika ja efektiivsuse vaheline seos tähendab seda, et päikesevalguse käes teatud kasuteguriga töötav patarei võib sisetingimustes vajada sama taseme saavutamiseks

kordades intensiivsemat valgust. Tehisvalgus, erinevalt päikesevalgusest, on disainitud vastavalt inimsilma tundlikkusele, mistõttu on lampide spektrid kitsamad ja intensiivsused madalamad (Chen *et al.*, 2024).

Lühidalt öelduna pole välitingimusteks loodud päikesepatareid tingimata sisetingimusteks sobilikud, mistõttu on vajalik kas arendada uusi, tehisvalguses efektiivselt töötavaid päikesepatareisid või siis hinnata olemasolevate sobivust sisetingimustes töötamiseks. Eelkirjeldatu põhjal on olemas vajadus teemat uurida.

Uurimistöö eesmärk on analüüsida tehisvalguse mõju päikesepatareide kasuteguritele. Uurimisobjekt on kesteriidist $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn},\text{Ge})\text{S}_4$ valmistatud monoterakiht-päikesepatareide seeria, mille absorbermaterjal on muudetud Sn ja Ge suhet. Eesmärgi saavutamiseks mõõdetakse töö käigus päikesepatareide volt-amper karakteristikud päikesevalgust jäljendavates tingimustes (tähisega AM 3.0) ning erinevate LED-lampide (2700 K, 4000 K, 6500 K) valguses ehk tehistingimustes. Andmete põhjal saab arvutada või leida neli parameetrit (efektiivsus ehk kasutegur, täituvusaste, avatud ahela pinge, lühisvoolu tihedus), mis võimaldavad võrrelda erinevate valgusallikate mõju uuritavatele päikesepatareidele.

Uurimisküsimused on järgnevad:

1. millise uuritava päikesepatarei kasutegur päikesevalguses (AM 3.0) on kõige suurem;
2. millise uuritava päikesepatarei kasutegur tehisvalguses on kõige suurem ja kas vastus erineb eelneva uurimisküsimuse omast;
3. millises tehisvalguses on uuritavate päikesepatareide kasutegurid kõige suuremad?

Uurimistöö sooritamist raskendav asjaolu on tehisvalguses mõõtmise ning uurimisobjektide enda ebastandardsus. Monoterakiht-päikesepatareid kuuluvad uuema põlvkonna sekka, mistõttu on neid uuritud kordades vähem kui näiteks räni baasil päikesepatareisid. Seda peegeldab ka varasemate tööde suhteline vähesus. Sellest veelgi uuem on idee mõõta parameetreid tehisvalguses. Kuna päikesepatareisid mõõdetakse reeglina standardtingimustes (tähisega AM 1.5) ja selleks otstarbeks loodud seadmete abil, ei ole olemas normikohast ja levinud vahendit, mis oleks võimeline mõõtma tehisvalguses.

Uurimistöö autor soovib tänada oma juhendajaid Jörgen Metsikut ja professor Marit Kauk-Kuusikut abi eest uurimistöö tegemisel ning vormistamisel. Tänu avaldatakse ka TalTechi magistrant Joel Koklale, kes lõi parameetrite tehisvalguses mõõtmiseks vajamineva süsteemi ja aitas mõõtmiste läbiviimisega.

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	1
1. TEOREETILINE TAUST	4
1.1. Päikesepatareide teema sissejuhatus	4
1.2. Päikesepatareide tööpõhimõte	5
1.3. Päikesepatareide iseloomustamine	8
1.3.1. Mõõtmistingimused	8
1.3.2. Päikesepatarei parameetrid.....	11
1.3.3. Parameetrite mõõtmine	13
2. METOODIKA	15
3. TULEMUSED.....	17
3.1. Graafikute algandmed	17
3.2. Kasuteguri sõltuvus absorbermaterjali koostisest	19
3.3. Kasuteguri sõltuvus valgusallikast.....	20
3.4. Peamiste järelduste kokkuvõte.....	21
4. ARUTELU	22
4.1. Tulemuste tõlgendamine	22
4.2. Uurimistöö piirangud ja edasiarendused	23
KOKKUVÕTE	24
SUMMARY	25
KASUTATUD ALLIKAD	26
KASUTATUD JOONISED	27
LISAD	28
Lisa 1. Praktilise osa esimese etapi näidisarvutus.....	28
Lisa 2. Mõõteobjektide parameetrid (AM 3.0, 2700 K, 4000 K, 6500 K)	29

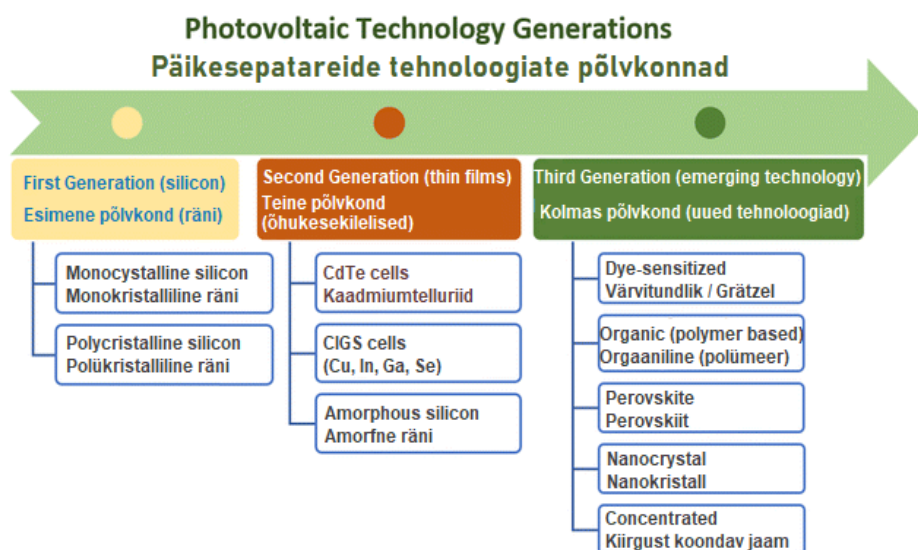
1. TEOREETILINE TAUST

1.1. Päikesepatareide teema sissejuhatus

Päikesepatarei on definitsiooni järgi kiirgust elektrienergiaks muundav seade, mis koosneb omavahel jadamisi ühendatud päikeseelementidest (Tarkpea ja Voolaid, 2002). Päikesepaneeliks nimetatakse omakorda päikesepatareide kogumit.

Kuigi kirjanduses ja argikeeles on kasutusel mitu varieeruva täpsusega terminit (päikesepaneel, päikeseelement, fotogalvaaniline element, fotoelement, fotorakk, *solar cell*, *photovoltaic cell*, *PV cell*), kasutab uurimistöö autor teksti mõistetavuse huvides läbivalt nimetust päikesepatarei. Samuti on terminid kasutegur ja efektiivsus erialases kontekstis samatähenduslikud ning edaspidiselt on kasutusel mõlemad.

Päikesepatareid on võimalik liigitada tootmistehnoloogia ja koostise põhjal kolme põlvkonda (vt joonis 1). Esimesse põlvkonda kuuluvad kristallilisest ränist päikesepatareid, mis on suure kasuteguri tõttu olnud siiani kõige laiemalt kasutusel. Nende tootmine on aga kulukas ning tänapäeval on võetud kasutusele ka odavamad, ent madalama efektiivsusega teise põlvkonna õhukesekilelised päikesepatareid (TFPV – *thin-film solar cell*), mille absorbermaterjaliks on näiteks amorfne räni (a-Si), vaskindiumgalliumseleniid (CIGS) või kaadmiumtelluriid (CdTe). Kolmas põlvkond koosneb erinevatest arendusjärgus päikesepatareidest, mille seast võib välja tuua näiteks orgaanilised (OSC) ja värvitundlikud (*Dye-sensitized solar cell* – DSSC) päikesepatareid.



Joonis 1. Päikesepatareide põlvkonnad (Solak, Irmak, 2023, uurimistöö otstarbel tõlgitud ja kohandatud)

Samas otsitakse jätkuvalt suurema kasuteguriga, odavamaid ning ohutumatest materjalidest alternatiive. Laborites üle maailma on käsil uute päikesepatareide ja pooljuhtmaterjalide uurimine ning arendamine.

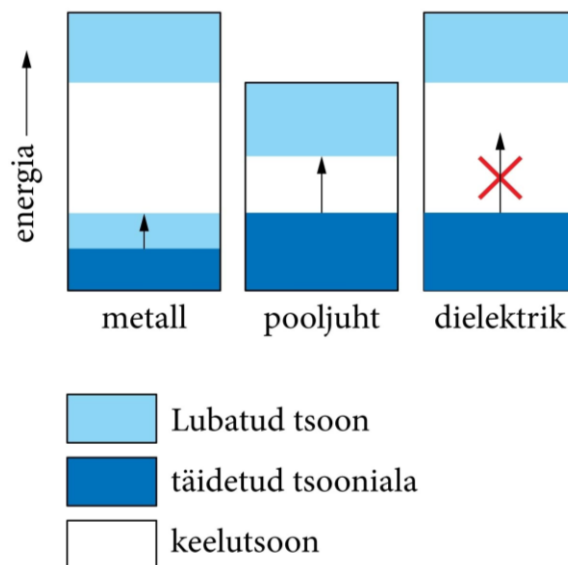
Siinse uurimistöö uurimisobjektiks olevad kesteriidist monoterakiht-päikesepatareid kuuluvad kolmandasse ehk uusimasse põlvkonda. Absorbermaterjal on nendes kesteriit, mis sisaldab looduses laialt levinud ja võrdlemisi odavaid elemente nagu vask, tsink, tina, väävel ja seleen. Monoterakiht-päikesepatarei puhul on kesteriidi valmistamiseks kasutatud uuenduslikku monoterapulbertehnoloogiat, mille eelis teiste tootmistehnoloogiate ees on odavus, sest selle tarbeks ei ole vaja kasutada kalleid seadmeid. Monoterapulbri eeliseks on selle mikrokristalliline, justkui üksikutest päikesepatareidest koosnev ehitus ning seega on monoterakiht-päikesepatarei kerge, painduv ning oluliselt vähem kulukam kui mitmed eelnevate põlvkondade päikesepatareid. (Vähi, 2019)

1.2. Päikesepatareide tööpõhimõte

Päikesepatareide tööpõhimõtte paremaks mõistmiseks on esmalt vaja teada kasutatavate erialaterminite tähendusi ning seda, kuidas päikesepatareide koostises olevates pooljuhtmaterjalides tekib valguse toimel elekter.

Aatomi väliskihi elektronide ehk valentselektronide energiatasemed jagunevad kristallilistes struktuurides energiatsoonideks. Keelutsooniks nimetatakse energia väärtuste piirkonda, kus ei teki stabiilseid elektronlaineid ehk kus elektron ei saa püsivalt asuda. Lubatud tsoone on kahte liiki: valentselektronidega täidetud valentstsoon ning juhtivustsoon ehk täitmata tsoon, mis on keelutsoonist kõrgema energiaga. (Tarkpea ja Voolaid, 2002)

Joonis 2 näitab eelmainitud tsoonide paiknemist kolmes eri tüüpi materjalis. Materjali elektrijuhtivus sõltub keelutsooni laiusest, näiteks põhjustavad metalli osaliselt täitunud valentstsoonis liikuma pääsevad elektronid elektrijuhtivuse, ent kuna dielektriku keelutsoon on lai, käitub see materjal isolaatorina. Pooljuhi valentstsoon on madalal temperatuuril elektronide poolt täielikult hõivatud, aga selle keelutsoon on oluliselt kitsam kui dielektrikus. Seetõttu suudavad elektronid minna väliskeskkonnast pärit energia arvelt juhtivustsooni, jättes endast maha täitmata elektronseisundi ehk augu. (Tarkpea ja Voolaid, 2002)



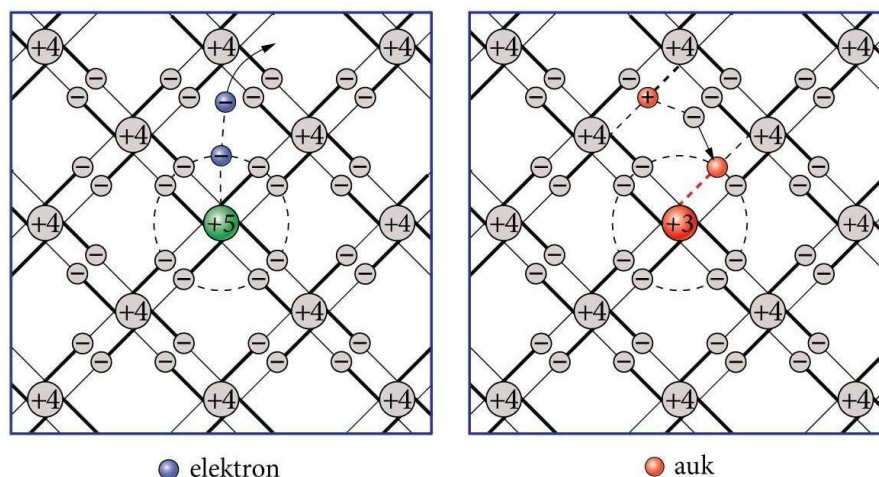
Joonis 2. Energiatsoonid metallis, pooljuhis, dielektrikus (Käämbre, 1998)

Kui elektron liigub juhtivustsooni pealelangeva valguse osakese ehk footoni energia arvelt, nimetatakse seda nähtust sisefotoefektiks. See füüsikaline nähtus – pooljuhi elektrijuhtivuse suurenemine valguse toimel – leiab rakendust päikesepatareides kiirgusenergia elektrienergiaks muundamisel.

Juhtivustsooni liikunud elektronidest maha jäänud auke täites pääsevad liikuma ka valentstsooni elektronid. Auk käitub positiivse laengukandjana ja triivib vooluallika negatiivse pooluse poole. (Käämbre, 1998)

Pooljuhti on võimalik ka legeerida ehk selle elektrijuhtivust suurendada, lisades teise aine aatomeid. Doonorlisandid loovutavad elektrone ning doonorlisandeid sisaldavat pooljuhti nimetatakse n -tüüpi pooljuhiks (n – negatiivne, viidates elektroni laengule). Aktseptorlisandid haaravad naabersidemetest elektrone ja tekitavad niiviisi auke ning neid sisaldavat pooljuhti nimetatakse p -tüüpi pooljuhiks (p – positiivne). N -tüüpi pooljuhis domineerib elektronjuhtivus ehk laengukandjaks on negatiivselt laetud elektron; p -tüüpi pooljuhis on domineerivaks aukjuhtivus ja laengukandja on positiivselt laetud auk. (Tarkpea ja Voolaid, 2002)

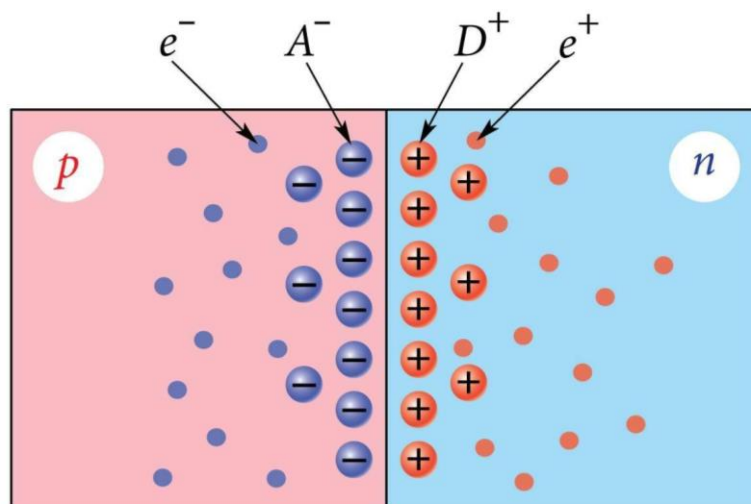
Joonisel 3 on kujutatud keset põhiaine aatomeid paiknevaid doonor- ja aktseptorlisandi aatomeid. Põhiaine on neljavalentne ehk nelja valentselektroniga, doonorlisand viievalentne ning aktseptorlisand kolmevalentne.



Joonis 3. n - ja p -tüüpi pooljuhtide võreskeemid (Käämbre, 1998)

Pooljuhi kihti, kus toimub üleminek kahe erinevalt legeeritud piirkonna vahel, nimetatakse pn -siirdeks. Mõlemas pooles on olemas enamusslaengukandjad (n -tüüpi osas elektronid, p -tüüpi osas augud), mis siirde alas omavahel ühinevad. Elektronid, mis pärinevad doonorlisandi aatomitest, täidavad ära augud, mis pärinevad aktseptorlisandi aatomitest. Alles jäävad positiivsed doonorlisandi ioonid ning negatiivsed aktseptorlisandi ioonid, mis moodustavad tõkkekihi. (Tarkpea ja Voolaid, 2002)

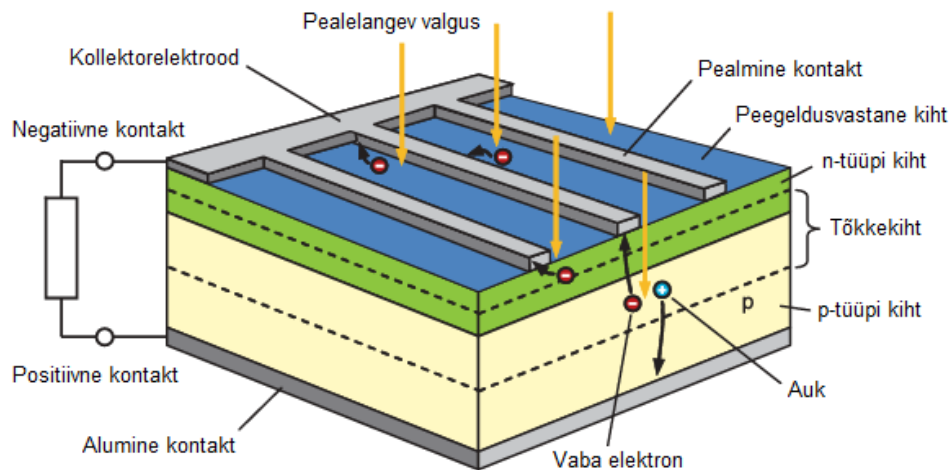
Eelkirjeldatud illustreerib joonis 4, kus e^- tähistab teise poolde jõudnud laengukandjat. Miinusmärgiga (e^-) on p -tüüpi piirkonda jõudnud elektron, plussmärgiga (e^+) n -tüüpi piirkonda jõudnud auk. A^- ja D^+ on vastavalt aktseptor- ja doonorlisandite ioonid. Pn -siiret võib nimetada päikesepatarei tööpõhimõtte aluseks.



Joonis 4. Tõkkekihi tekkimine pn -siirdes (Käämbre, 1998)

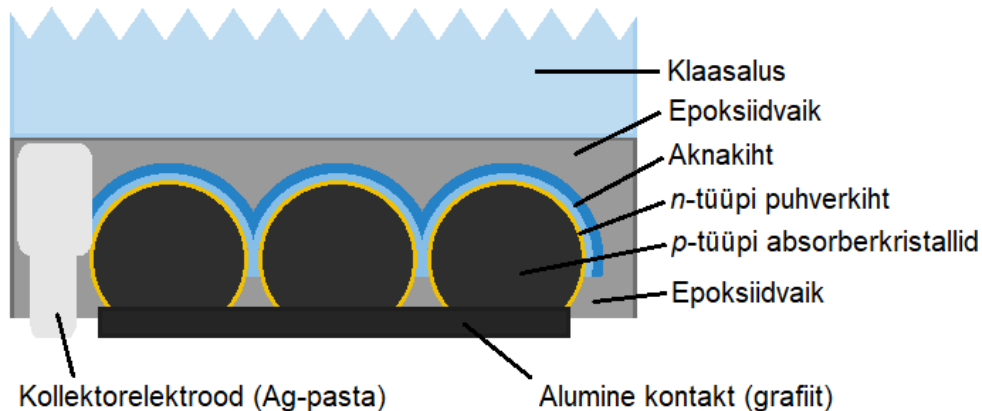
Joonisel 5 on näha tüüpilist esimese põlvkonna päikesepatareid. Selle põhiosa moodustab asümmeetriliselt legeeritud pooljuht. All paikneb p -tüüpi kiht ja selle peal on tugevalt legeeritud n -tüüpi kiht. Valguse pealelangemisel tekivad tõkkekihis fotoefekti käigus elektron-auk paarid, mis tõkkekihi elektriväljas lahknevad – augud suunduvad läbi p -tüüpi kihi alumise kontaktini, elektronid läbi n -tüüpi kihi pealmise kontaktini. Viimased neist on väikesed metallist liistud, mis

viivad elektronid edasi kollektorelektroodini. Päikesepatarei kontaktid tarbijaga ühendades tekib vooluring. (Mertens, 2014)



Joonis 5. Päikesepatarei ehitus (Mertens, 2014, uurimistöö otstarbel tõlgitud)

Siinse uurimistöö uurimisobjektiks olevad monoterakiht-päikesepatareid erinevad eelnevast näitest tootmistehnoloogia poolest, mistõttu on pulbriline (vt joonis 6) mitte kihiline, nagu nimi viitab. Tööpõhimõte on aga sama: fotoefekti toimel tekib elektron-auk paar, mille auk ja elektron liiguvad vastavalt alumise kontaktini ja kollektorelektroodini. Põhjus, miks kollektorelektrood on toodud alumise kontaktiga samale poolele, seisneb laboratoorsete mõõtmiste läbiviimise lihtsustamises, mida selgitatakse pikemalt järgmises peatükis.



Joonis 6. Monoterakiht-päikesepatarei ristlõike skeem

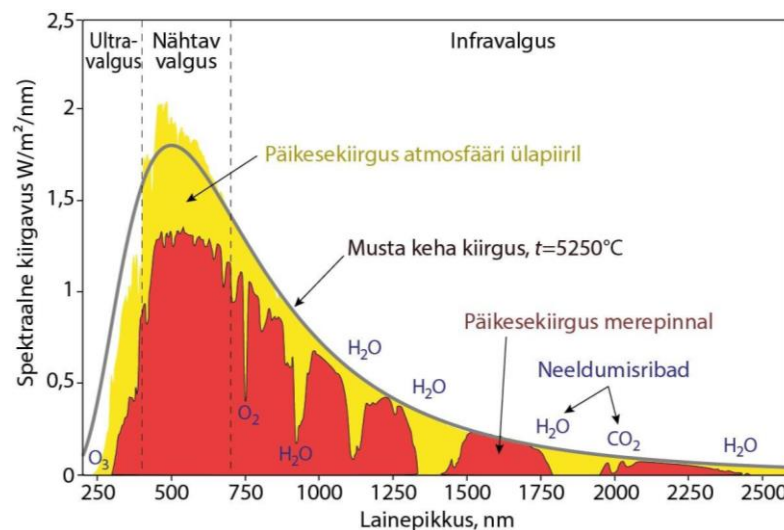
1.3. Päikesepatareide iseloomustamine

1.3.1. Mõõtmistingimused

Peale päikesepatarei koostise sõltuvad mõõtmistulemused ka pealelangevast valgusest. Selleks, et oleks võimalik erinevaid päikesepatareid võrrelda, mõõdetakse parameetreid standardtingimustes, mis on loodud jäljendama maapinnani jõudva päikesevalgust, eelkõige selle intensiivsust ja spektrit. (Mertens, 2014)

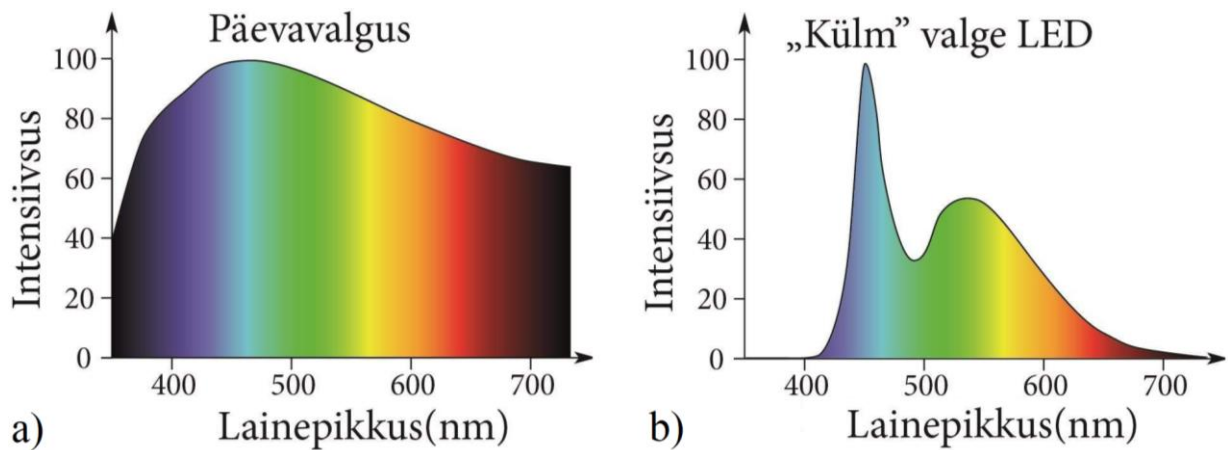
Intensiivsus, tavakeeles valguse tugevus, võrdub energiaga, mida valguslaine kannab ajaühikus läbi pinnaühiku. Teine valgust iseloomustav suurus on lainepikkus, mis määrab ära nähtava valguse värvi. Kaks suurust kokku moodustavad valguse spektri – kindla valgusallika valguse intensiivsuste jaotuse lainepikkuste järgi. (Tarkpea ja Voolaid, 2002)

Maapinnani jõudva valguse intensiivsust ja spektrit mõjutab mitu tegurit, millest peamine on valguse teekonna pikkus atmosfäärist maapinnani. Teatud lainepikkusega kiirgus neeldub atmosfääris sisalduvates molekulides ning mida pikema vahemaa valgus läbib, seda rohkem erineb maapinnani jõudnud valgus atmosfäärivälisest. Maapinnale jõudva päikesevalguse spektri määramiseks on leitud Päikese aastane keskmine kõrgus horisondist ning sellest arvutatud päikesevalguse läbitav teekond. (Mertens, 2014) Leitud standardse spektri tähiseks on AM 1.5 ja see on joonisel 7 tähistatud punaselt. Joonis näitab maapinnani jõudva valguse spektri (punane) erinevust atmosfäärivälisest päikesevalguse spektrist (kollane). Ka valguse intensiivsus väheneb atmosfääri läbimisel ning standardtingimustes on selle väärtus 1000 W/m^2 .



Joonis 7. Päikesevalguse spekter enne (kollane) ja pärast (punane) atmosfääri läbimist (Laan, 2020)

Tehisvalgus erineb päikesevalgusest nii intensiivsuse kui ka spektri poolest. Käesolevas uurimistöös kasutatakse terminit tehisvalgus, et eristada standardtingimusi lambivalgusest. Uurimistöös praktilises osas on tehisvalgustuse esindajateks LED-lambid ehk valgusdiodid (LED – *light emitting diode*). Nagu ka päikeseplatadeis, on valgusdiodi tööpõhimõtte aluseks *pn*-siire, ent protsess on vastupidine. Valgusdiod muundab *pn*-siirdel elektronide ja aukude rekombineeruva energia vahetult valguseks (Reemann, 2014). Päikesevalguse ja ühe LED-lambi näidise valguse spektrite erinevust näitavad vastavalt joonis 8a ja joonis 8b.

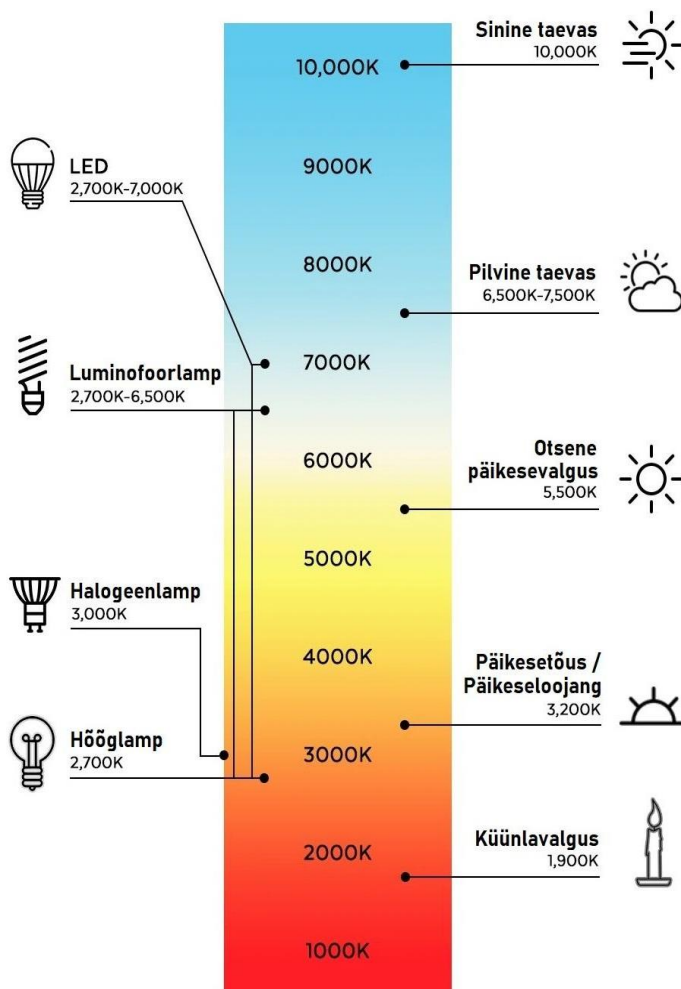


Joonis 8. Päikesevalguse (a) ja LED-lambi (b) spektrid (Tarkpea, Voolaid, 2019)

Üks suur erinevus kahe valgusallika vahel on nende spektrite kuju. Päikesevalguse kui soojusliku valgusallika spekter on pidev, sest see kiirgab peale nähtava valguse ka soojuskiirgust. Kõik kuumad kehad, sealhulgas tähed nagu Päike, kiirgavad endale omast musta keha kiirgust, mille värvus sõltub keha temperatuurist. LED-lambid kuuluvad aga külmade valgusallikate hulka, mille spektrites praktiliselt puudub soojuskiirguse ehk infrapunakiirguse spektriosa. Seetõttu muundub elektrienergia valdavalt valgusenergiaks. (Murulaid, 2021) LED-lampide kiirgus on tavaliselt ühevärviline (joonisel 8b vasakpoolne osa), ent valguse tooni on luminofooride ehk valgust kiirgavate ainete lisamisega võimalik muuta soojemaks (joonise 8b parempoolne osa). Sellegipoolest on LED-lambid külmad valgusallikad.

Valguse värvust kirjeldatakse selle näilise soojuse ehk värvitemperatuuri põhjal, mille ühikuks on kelvin. Joonis 9 näitab mitme tehisvalguse ja päikesevalguse tüübi paiknemist värvitemperatuuri skaalal. Nagu jooniselt näha, on otsese päikesevalguse ligikaudne värvitemperatuur 5500 K ning LED-lambid on vahemikus 2700–7000 K.

Värvitemperatuur Kelvini skaalal



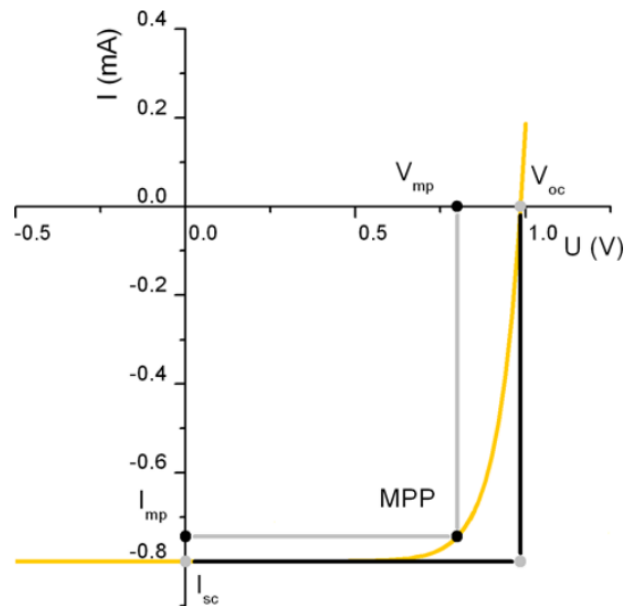
Joonis 9. Värvitemperatuuri skaala koos näidetega (DelMarFans, 2023, uurimistöö otstarbel tõlgitud)

Kahe valgusallika värvitemperatuuri erinevus võib tähendada erinevust päikeseplatari mõõtmistulemustes. Kui selle valguse intensiivsus, mis põhjustab sisefotoefekti, pole piisavalt tugev, võivad kasutegur ja muude parameetrite väärtused olla samuti väikesed.

1.3.2. Päikeseplatari parameetrid

Parameetrite (ptk 1.3.2.) ja nende mõõtmise (ptk 1.3.3.) kirjeldamisel on lähtutud Tallinna Tehnikaülikooli materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituudi praktikumi juhendist.

Päikeseplatari iseloomustamiseks mõõdetakse ära selle volt-ampere karakteristik ehk I - V kõver. Valgustatud oleku I - V kõveralt (vt joonis 10) on võimalik välja lugeda või välja arvutada neli olulist parameetrit (efektiivsus ehk kasutegur, täituvusaste, avatud ahela pinge, lühisvoolu tihedus), mis on aluseks erinevate päikeseplatari omavahelisele võrdlemisele.



Joonis 10. Valgustatud oleku I - V kõvera näide. Punktis MPP töötab patarei maksimaalse võimsuse režiimis. Selles punktis on voolu ja pinge väärtused vastavalt V_{mp} ja I_{mp} . V_{oc} on avatud ahela pinge ning I_{sc} on lühisvool (Tallinna Tehnikaülikool, 2019)

Graafiku lõikepunkti pinget teljega nimetatakse avatud ahela pingeks ja selle tähis on V_{oc} . Selles punktis on voolutugevus läbi päikesepatarei võrdne nulliga. Graafiku lõikepunkti voolutugevust teljega nimetatakse lühisvooluks ja selle tähis on I_{sc} . Analoogselt eelmise parameetriga on antud punktis pinge võrdne nulliga. Need kaks punkti näitavad päikesepatarei maksimaalset võimalikku pinget ja voolutugevust ning mida suuremad on nende väärtused, seda efektiivsem on päikesepatarei.

Igale graafiku punktile vastab genereeritud võimsus $P = I \cdot V$. Graafiku punkt, kus võimsus on maksimaalne, on tähisega MPP (*Maximum Power Point*) ning sellele vastavad väärtused V_{mp} ja I_{mp} . Mida lähemal on need väärtused vastavalt V_{oc} ja I_{sc} väärtustele, seda suurem on saavutatav võimsus. Reaalsel päikesepatareil esineb teatud võimsuse kadu ning seda näitab tegur, mida nimetatakse täituvusastmeks (tähisega FF – *Fill Factor*). Täituvusastet arvutatakse järgneva valemiga:

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \cdot 100\%,$$

kus FF – täituvusaste, %;

V_{mp} – MPP-le vastav pinge, V;

I_{mp} – MPP-le vastav voolutugevus, mA;

V_{oc} – avatud ahela pinge, V;

I_{sc} – lühisvool, mA.

Efektiivsus, mis on päikesepatarei kõige tähtsam parameeter, on maksimaalse genereeritava võimsuse ja pealelangeva valguse võimsuse suhe.

$$\eta = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{light} \cdot S} \cdot 100\%,$$

kus η – efektiivsus, %;

V_{mp} – MPP-le vastav pinge, V;

I_{mp} – MPP-le vastav voolutugevus, mA;

P_{light} – pealelangeva valguse intensiivsus ehk võimsus pindalaühiku kohta, mW/cm²;

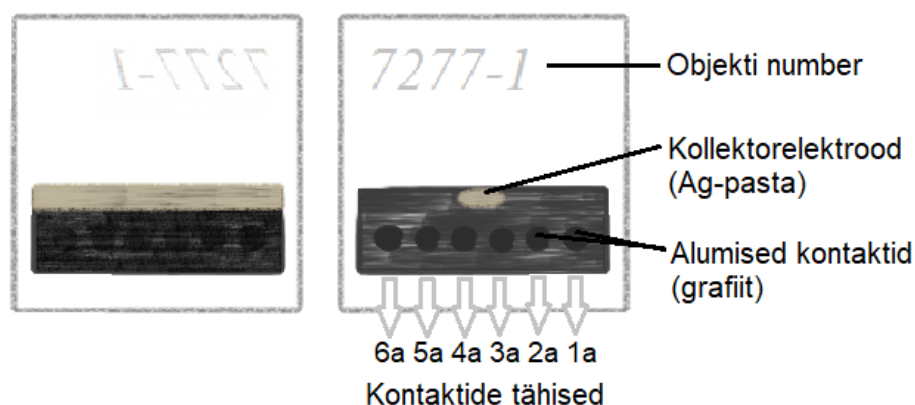
S – kontakti pindala, cm².

Lühisvoolu tihedus J_{sc} on lühisvoolu ja kontakti pindala jagatis ning selle ühik on mA/cm².

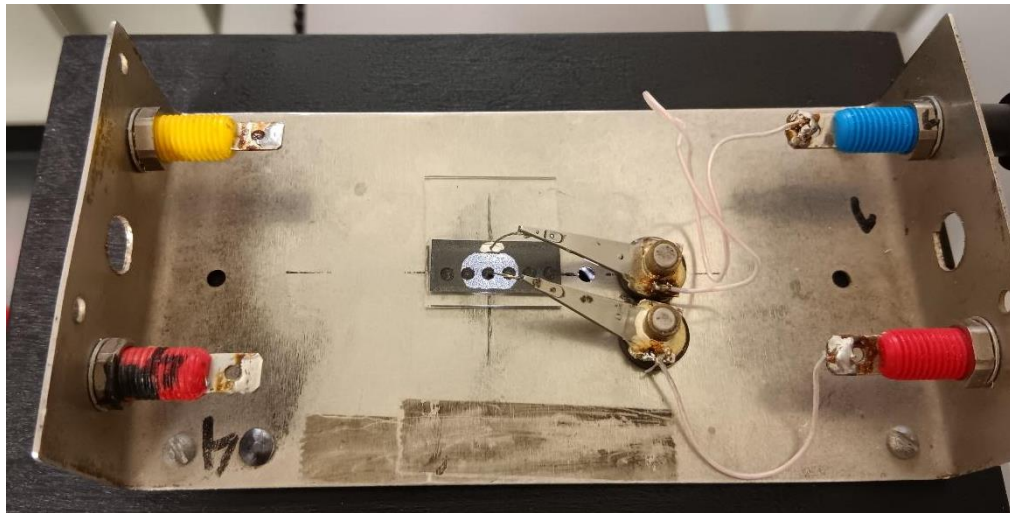
1.3.3. Parameetrite mõõtmine

I - V kõvera mõõtmine toimub arvutiga juhitava bipolaarse toiteallika abil, mis suudab toimida nii voolu allika kui ka neeluna. Toiteallika juhtimine toimub selleks määratud arvutiprogrammi abil. Standardtingimustes on I - V kõvera mõõtmisel valgusallikaks päikese simulaator spektriga AM 1.5 ja intensiivsusega 100 mW/cm² ehk 1000 W/m².

Mõõtmine algab objekti kontakteerimisega. Selleks ühendatakse päikesepatarei pealmine kontakt ehk kollektorelektrood vooluallika miinusega ning mõõdetav alumine kontakt ehk grafiitkontakt vooluallika plussiga. Nii pealmine kui ka alumine kontakt on päikesepatarei alumisel poolel, nagu kirjeldati peatükis „Päikesepatarei tööpõhimõte“. Päikesepatarei valgustamine toimub pealmiselt (vt joonis 11) poolt, mispärast tuleb objekti alus pärast kontakteerimist ümber pöörata. Valgustatakse läbi aluses oleva augu, mis on seatud mõõdetava grafiitkontaktiga kohakuti (vt joonis 12).

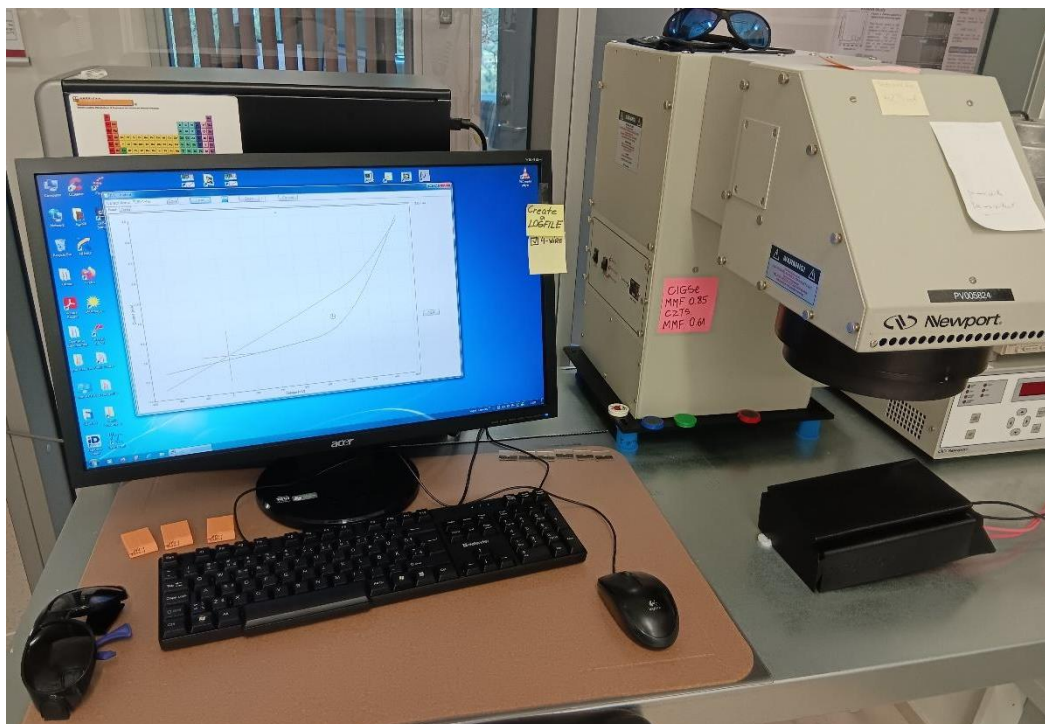


Joonis 11. Monoterakiht-päikesepatarei pealmise (vasak) ja alumise (parem) poole skeemid



Joonis 12. Mõõteobjekti alus, elektroodid, mõõteobjekt

Enne skaneerimist pannakse arvutiprogrammis paika mõõdetavad vahemikud ja samm. Ühe skaneerimisega mõõdetakse ära I - V kõver nii pimedas kui ka valgustatud olekus. Iga mõõtmise lõpus kuvab arvutiprogramm ekraanile I - V kõverad ning andmed salvestatakse tekstifailina, kus on olemas pinge väärtustele vastavad voolutugevuse väärtused. Tekstifaili pealkiri (nt 7277-1-1a) koosneb objekti numbrist (7277-1), mis viitab päikesepatarei koostisele, ning kontakti tähisest (1a), mis viitab mõõdetud alumisele kontaktile. Skaneerimist korratakse kõikidel grafiitkontaktidel. Joonisel 13 on näha tüüpilist töökeskkonda.



Joonis 13. Töölaud arvutiga, päikese simulaatoriga, kaetud mõõteobjektiga

2. METOODIKA

Siinses uurimistöös uuritakse päikesepatareide põhilisi parameetreid erinevates valgustuse tingimustes. Uurimisobjektiks oli Tallinna Tehnikaülikoolis päikeseenergeetika materjalide teaduslaboris valmistatud $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn}_{1-x}\text{Ge}_x)\text{S}_4$ baasil monoterakiht-päikesepatareide seeria, mille absorbermaterjali koostises varieerub väärtus x vahemikus 0 kuni 1 sammuga 0,2. Kokku oli 6 uurimisobjekti (päikesepatareid), millest igaühe kohta oli kuus mõõdetavat objekti (grafiitkontakti). Töö praktilise osa käigus mõõdeti iga objekti I - V kõverad ning arvutati andmete abil analüüsitavad parameetrid. Mõõtmisi tehti päikese simulaatori valguses (AM 3.0) ja LED-lampide valguses (2700 K, 4000 K, 6500 K). Mõõtmisi tehti Tallinna Tehnikaülikooli päikeseenergeetika materjalide teaduslaboris. Kasutatud toiteallikas oli Keithly 4000, kasutatud arvutiprogrammid olid IVC-Student ja I-V Software.

Uurimistöö praktilise osa esimeses etapis tuvastati, millised mõõdetavatest objektidest on sobivaimad. Kontaktide defektide ja vanuse tõttu võivad ühe ja sama koostisega kontaktide mõõtmistulemused suurel määral erineda, mistõttu mõõdeti eeltööna igal grafiitkontaktil I - V kõverad standardtingimustes, nagu on kirjeldatud eelnevas peatükis. Valguse intensiivsuseks oli 100 mW/cm^2 ja kontakti pindalaks $0,045 \text{ cm}^2$. Seejärel leiti vajalikud parameetrid (vt lisa 1) ning nende põhjal valiti iga päikesepatarei kohta välja kolm esinduslikumat grafiitkontakti, mille uurimist jätkata. Kokku tehti 36 mõõtmist, mis leidsid aset 23. augustil 2024.

Praktilise osa teise etapi jaoks oli vaja eraldi seadet, mille abil oleksid võimalikud mõõtmised nii päikese- kui ka tehisvalguses. Valmistatud süsteem (vt joonis 14) koosnes lambist, selle kohal olevast reguleeritava kõrgusega korpusest ja päikesepatarei alusest. Korpuse paigutus ja lisatud hajutavad filtrid olid iga nelja valgusallika puhul erinevad ning süsteem pandi paika nii, et luksmeetriga mõõdetud valgustustihedus ehk valgustatus päikesepatarei aluse juures oleks konstantne. Sel juhul on erinevates tingimustes mõõdetud tulemused võrreldavad. Siinse uurimistöö puhul kujunes valgustustiheduse väärtuseks 1000 luks.

Ühtse valgustustiheduseni jõudmiseks vajab päikese simulaatori valgus nõrgestavate filtrite lisamist, mille tagajärjel pole seda valgust enam spektri poolest võimalik nimetada standardtingimuseks, vaid korrektsem tähis on AM 3.0. Ka päikese simulaatori valguse intensiivsuse väärtus muutus ning see ja lampide intensiivsused on välja toodud lisas olevate tabelite juures. Kõigi nelja valgusallika intensiivsused eritingimustes olid eelnevalt leitud, kasutades teadaolevate parameetritega päikesepatareide tulemusi.

Kokku tehti 72 mõõtmist ehk mõõdeti kuue erineva päikesepatarei kolmel erineval kontaktil parameetreid nelja erineva valgusallika (2700 K, 4000 K, 6500 K, AM 3.0) valguses. Mõõtmised viidi läbi 27. septembril 2024.



Joonis 14. Süsteem eritingimustes mõõtmiseks. Vasakul: reguleeritava kõrgusega korpus, luksmeeter, mõõteobjekti alus elektroodidega. Paremalt: mõõtmine AM 3.0 tingimustes

Andmeid analüüsiti arvutiprogrammi Microsoft Exceliga koostatud graafikute abil. Kuigi uurimistöös tehakse järeldused vaid kasuteguri ehk efektiivsuse põhjal, on heaks tavaks leida kõigi nelja parameetri (kasutegur, täituvusaste, avatud ahela pinge, lühisvoolu tihedus) väärtused, mistõttu on need välja toodud uurimistöö lõpus (vt lisa 2).

3. TULEMUSED

Käesolevas peatükis vaadeldakse päikesepatareide kasuteguri väärtuse sõltuvust päikesepatarei koostisest ja valgusallikast. Vastust otsitakse sissejuhatuses püstitatud uurimisküsimustele, milleks olid:

1. millise uuritava päikesepatarei kasutegur standardtingimustes on kõige suurem;
2. millise uuritava päikesepatarei kasutegur tehisvalguses on kõige suurem ja kas vastus erineb eelneva uurimisküsimuse omast;
3. millises tehisvalguses on uuritavate päikesepatareide kasutegurid kõige suuremad?

3.1. Graafikute algandmed

Uurimisobjektiks on $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn}_{1-x}\text{Ge}_x)\text{S}_4$ koostisega päikesepatareide seeria, kus arv x on võrdne Ge aatomite moolsuhtega Sn ja Ge aatomite summasse, mida väljendatakse edaspidi kui suhe $\text{Ge}/(\text{Sn}+\text{Ge})$. Arvu x väärtus on vastavuses objekti nimetusse kuuluva neljakohalise numbriga, mis on välja toodud tabelis 1.

Tabel 1. Objekti koostises olev Ge ja Sn+Ge suhe

Objekt	7277	7278	7279	7280	7281	7282
$\text{Ge}/(\text{Sn}+\text{Ge})$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1

Nagu metoodikas välja toodud, tehakse järeldused efektiivsuse ehk kasuteguri põhjal. Graafikute koostamise aluseks on 72 mõõtmistulemust kajastav koondtabel (vt tabel 2), kus on kirjas iga päikesepatarei kolmel kontaktil mõõdetud kasutegurid sõltuvalt valgusallikast.

Iga päikesepatarei kolm kontakti valiti välja pärast päikesepatareide kuue kontakti mõõtmist standardtingimustes, nagu metoodikas kirjeldatud. Otsus tehti kasutegurite põhjal ning näidisarvutus on leitav lisadest (lisa 1).

Tabel 2. Päikesepatarei kasuteguri (η) sõltuvus valgusallikast, kolm mõõtmistulemust

Ge/(Sn+Ge)	Tähis	η (%) AM 3.0	η (%) 2700 K	η (%) 4000 K	η (%) 6500 K
0	7277-1-1a	3,38	2,07	1,78	1,72
	7277-1-4a	8,16	5,61	4,84	4,60
	7277-1-6a	8,48	6,64	5,75	5,61
0,2	7278-1-1a	8,31	6,43	5,93	5,88
	7278-1-2a	3,93	2,25	1,86	1,82
	7278-1-3a	8,35	6,72	6,17	6,20
0,4	7279-1-2a	2,93	2,28	2,18	2,25
	7279-1-4a	3,99	3,67	3,82	4,14
	7279-1-5a	3,99	3,56	3,76	4,11
0,6	7280-1-3a	1,57	1,37	1,59	1,86
	7280-1-4a	1,44	1,24	1,41	1,63
	7280-1-6a	1,58	1,32	1,55	1,81
0,8	7281-1-3a	0,68	0,45	0,60	0,76
	7281-1-4a	0,74	0,55	0,72	0,90
	7281-1-5a	0,70	0,48	0,63	0,80
1	7282-1-2a	0,40	0,21	0,34	0,50
	7282-1-3a	0,31	0,12	0,21	0,32
	7282-1-6a	0,13	0,05	0,08	0,13

Tabelis kajastatud kontaktid valiti välja uurimistöö praktilise osa esimese etapi käigus. Sellegipoolest näitavad tulemused, et üldjuhul on iga päikesepatarei puhul ühel kontaktil mõõdetud väärtused oluliselt madalamad kui teiste sama koostisega kontaktide omad (vt tabel 2, tähistatud oranžilt). Seetõttu pole kolme väärtuse keskmine usaldusväärne ning uurimistöö autor tegi otsuse kasutada graafikute koostamisel vaid iga päikesepatarei kõige efektiivsemal kontaktil mõõdetud väärtusi (vt tabel 2, tähistatud roheliselt). Madalamate

väärtuste põhjuseks on tõenäoliselt defektid materjalis, mitte mõõte- või arvutusvead, nagu meetoodikas selgitatud, ning seega on kõrgeim väärtus ühtlasi ka kõige täpsem.

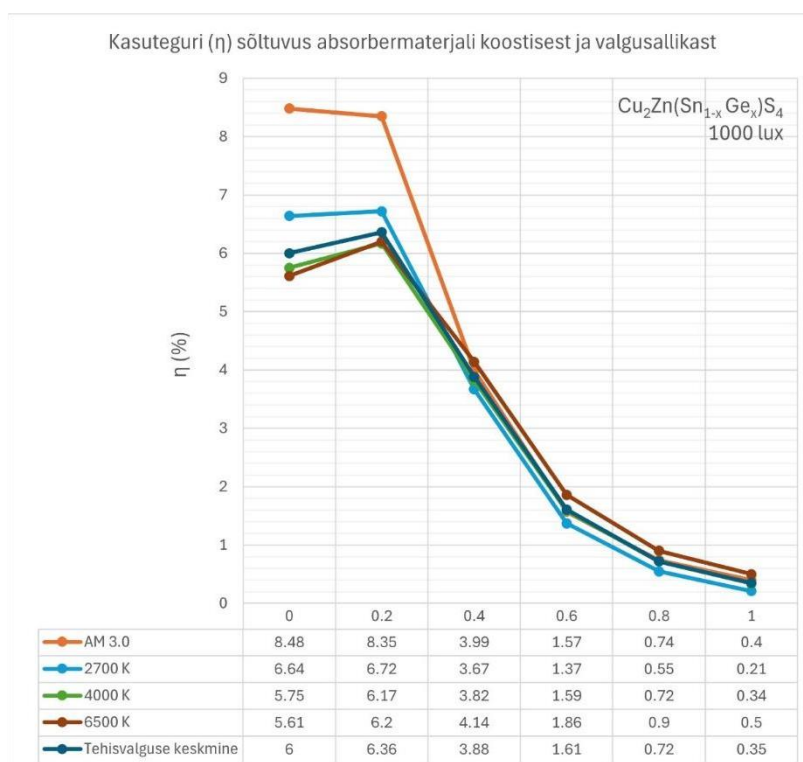
Graafikute koostamisel kasutatud andmed on välja toodud tabelis 3.

Tabel 3. Päikeseplatari kasuteguri (η) sõltuvus valgusallikast, parim mõõtmistulemus

Ge/(Sn+Ge)	Objekt	AM 3.0	2700 K	4000 K	6500 K
0	7277	8,48	6,64	5,75	5,61
0,2	7278	8,35	6,72	6,17	6,20
0,4	7279	3,99	3,67	3,82	4,14
0,6	7280	1,57	1,37	1,59	1,86
0,8	7281	0,74	0,55	0,72	0,90
1	7282	0,40	0,21	0,34	0,50

3.2. Kasuteguri sõltuvus absorbermaterjali koostisest

Kahele esimesele uurimisküsimusele leiab vastuse jooniselt 15, kus on kujutatud kasuteguri sõltuvust päikeseplatari absorbermaterjali koostisest iga valgusallika puhul.



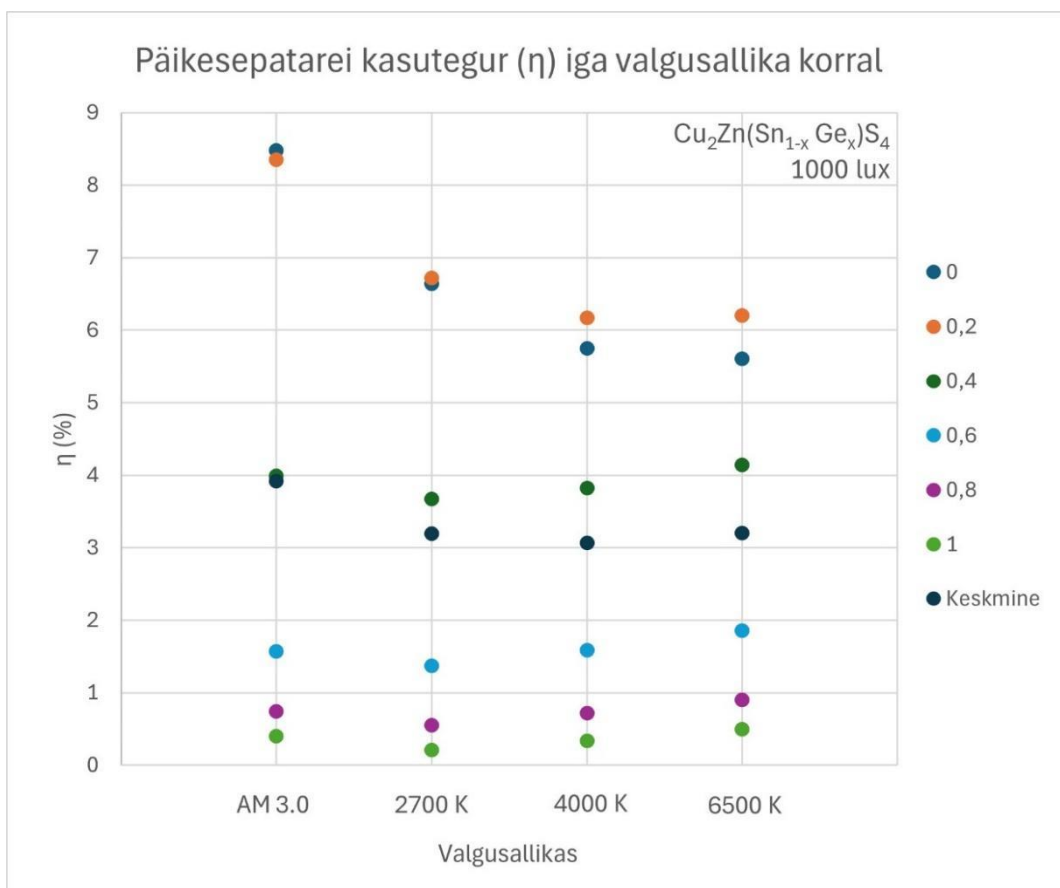
Joonis 15. Kasuteguri (η) sõltuvus absorbermaterjali koostisest ja valgusallikast

Joonise järgi töötavad päikesevalguses kõige efektiivsemalt seeria esimene ($x = 0$) ja teine ($x = 0,2$) päikeseplatari. Antud juhul on tegu väga väikese kasutegurite vahetega, mistõttu pole võimalik teha kindlat järeldust, kumma objekti tulemus suurem on. Täheldada võib aga Ge sisalduse kasvades järsku efektiivsuse langust. Seeria nelja viimase objekti puhul paikneb AM 3.0 graafik (oranž) 6500 K LED-lambi omast (punane) madalamal.

Keskmiselt kõige suurema kasuteguriga töötavad tehisvalguses seeria teine ($x = 0,2$) ja ka esimene ($x = 0$) päikeseplatari. Nagu päikesevalguse korral, on nende tulemused ligilähedased, mistõttu puudub ühene vastus uurimisküsimusele. Taaskord väheneb Sn sisalduse vähenedes ka kasutegur. Seeria kolme viimase objekti puhul kattub tehisvalguse keskmise graafik (tumesinine) standardtingimuste (oranž) ja 4000 K LED-lambi (roheline) omadega.

3.3. Kasuteguri sõltuvus valgusallikast

Kolmandale uurimisküsimusele vastamiseks tuleb analüüsida kasuteguri väärtusi nelja erineva valgusallika korral, mida kujutab joonis 16. Mustaga on tähistatud kuue mõõteobjekti tulemuste keskmine.



Joonis 16. Päikeseplatari kasutegur (η) iga valgusallika korral

Tehisvalguste seast töötavad mõõteobjektid keskmiselt kõige efektiivsemalt 6500 K LED-lambi valguses. Erinevus kahe teise lambiga ei ole aga märkimisväärselt suur.

Peale selle on jooniselt näha, et seeria nelja viimase objekti puhul ületavad 6500 K tulemused teiste valgusallikate tulemusi, sealhulgas ka päikesevalguse omi. Need neli objekti eristuvad selgelt kahest esimesest, mille kõige suuremad kasutegurid mõõdeti päikesevalguses ning 2700 K LED-lambi valguses. Erinevuseks on ka see, mis määral on tehisvalguste tulemused päikesevalguse omast väiksemad. Kahe esimese objekti puhul on vahe suur, ülejäänud nelja korral varieerub kasuteguri väärtus valgusallika vahetamisel kuni 0,5 protsendipunkti.

Lisaks eelkirjeldatule kujutab joonis 16 hästi eelmises alapeatükis välja toodud seeria kahe esimese objekti ($x = 0$; $x = 0,2$) tulemuste sarnasust ning ka valgusallika muutmisega kaasnevat päikeseplatade paremusjärjestuse muutust.

3.4. Peamiste järelduste kokkuvõte

Koostatud graafikute põhjal on võimalik vastata sissejuhatuses püstitatud uurimisküsimustele.

1. Päikesevalguses (AM 3.0) töötavad kõige efektiivsemalt seeria esimene ja teine päikeseplatadei, mille absorbermaterjali koostises on arvu x väärtus vastavalt 0 ja 0,2.
2. Tehisvalguses töötavad kõige efektiivsemalt seeria teine ja esimene päikeseplatadei, mille absorbermaterjali koostises on arvu x väärtus vastavalt 0,2 ja 0. Vastus sarnaneb eelmise uurimisküsimuse omale.
3. Enamik seeria päikeseplatadeisid töötavad kõige efektiivsemalt 6500 K LED-lambi valguses. Erandina saab välja tuua seeria kaks esimest objekti ($x = 0$; $x = 0,2$), mille kasutegurid on kõige suuremad 2700 K LED-lambi valguses.

4. ARUTELU

Uurimistöö sissejuhatuses püstitatud uurimisküsimustele oli võimalik leida vastused juba graafikute analüüsimise käigus. Need on välja toodud eelneva peatüki lõpus. Siinses peatükis keskendutakse teiste leidude tõlgendamisele ning uurimistöö piirangute ja edasiarenduste käsitlemisele.

4.1. Tulemuste tõlgendamine

Peale uurimisküsimustele vastamise saab tulemuste põhjal, lähtuvalt sissejuhatuses püstitatud eesmärgile, hinnata uuritavate päikesepatareide kasutusvõimalust sisetingimustes. Selleks tuleb uurida põhjalikumalt alapeatükis 3.3 kirjeldatud tähelepanekut, mis jagab uuritava seeria objektid kahte rühma. Seeria esimesed kaks päikesepatareid ($x = 0$; $x = 0,2$) töötavad selgelt kõige efektiivsemalt päikesevalguses, samas kui ülejäänud nelja objekti kasutegurid on suurimad 6500 K LED-lambi valguses. Selle jagunemise üks põhjuseid on päikesepatarei absorbermaterjali keelutsooni laiuse sobivus valgusallikaga.

Varasemad uuringud on näidanud, et sisetingimustes kasutamiseks on kõige sobivamad pooljuhtmaterjalid, mille keelutsooni laius jääb vahemikku 1,8 kuni 2,0 elektronvolti (Mengü *et al.*, 2024). Päikesevalguses (AM 1.5) aga on optimaalne kitsam, umbes 1,34 eV laiune keelutsoon (Chen *et al.*, 2024). Keelutsooni laiuse määramine polnud osa uurimistööst, ent varasema uuringu põhjal (vt tabel 4; Mengü *et al.*, 2024) on teada, et uuritavas kesteriidis $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn}_{1-x}\text{Ge}_x)\text{S}_4$ suureneb Ge lisamisel ühtlasi ka materjali keelutsooni laius.

Tabel 4. Keelutsooni sõltuvus Ge ja Sn+Ge suhtest (Mengü *et al.*, 2024 põhjal)

Ge/(Sn+Ge)	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Keelutsoon (eV)	1,50	1,61	1,72	1,88	2,06	2,25

Tabeli andmed näitavad, et neljanda ($x = 0,6$) ja viienda ($x = 0,8$) objekti keelutsooni laiused paiknevad tehisvalguse optimaalses vahemikus. Järelikult on teoreetilised teadmised keelutsoonidest ja päikesepatareide kasutegurite mõõtmistulemused omavahel kooskõlas. Seetõttu leidis uurimistöö käigus kinnitust varasemates teadustöödes esitatud teadmine, et päikesepatareid, mis on loodud välistingimustes efektiivselt töötama, võivad olla sisetingimustes kasutamiseks ebasobivad.

4.2. Uurimistöö piirangud ja edasiarendused

Uurimistöö läbiviimisel oli suurim takistus uurimisobjektide ning mõõtmistingimuste ebastandardsus. Üksnes tehisvalguses mõõtmine raskendas nii teoreetilise osa kirjutamist, praktilise osa läbiviimist kui ka andmete analüüsimist. Tehisvalguses mõõtmise idee uudsuse tõttu oli keeruline leida varasemaid uurimis- ja teadustöid, mis käsitleksid samaaegselt parameetrite LED-lampide valguses mõõtmist ja kesteriiti $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn},\text{Ge})\text{S}_4$.

Varasemate uurimuste vähesus tähendab ka seda, et tehisvalguses mõõdetud tulemusi ei saanud võrrelda varasemate tulemustega. Samuti pole olemas levinud ja standardiseeritud süsteemi päikesepatareide parameetrite mõõtmiseks muudes tingimustes peale standardtingimuste. Tulemuste võrdluse puudumist arvestades pole välistatud, et eritingimustes mõõtmiseks loodud süsteemi ebatäpsused oleks tulemusi mõjutanud.

Uurimistöö vormistamist raskendas eelkõige loodusteaduslike õpilasuurimuste ehk sobivate näidistööde puudus, mistõttu on uurimistöö kirjutamisel lähtutud suures osas Tallinna Tehnikaülikooli üliõpilaste lõputöödest ja ingliskeelsetest teadusartiklitest. Selle tagajärjena vajab eraldi tähelepanu uurimistöö sisu arusaadavus erialaste teadmisteta lugejale, mistõttu moodustab suure osa tervikust teoreetiline taust.

Enne praktilise osa läbiviimist oli teada, et materjalis olevate defektide tõttu tuleb eeltööna tuvastada edasisteks mõõtmisteks ebasobivad kontaktid. Sellest hoolimata selgus graafikute koostamisel, et mitu väljavalitud kontakti annab oodatust madalamaid väärtusi, mistõttu oleks ühe päikesepatarei kolme tulemuse aritmeetilise keskmise kasutamine olnud ebatäpne, kahe parima tulemuse keskmine aga ebamõistlik. Sellel põhjusel kajastatakse graafikutes vaid kõrgeimaid tulemusi. Ideaalis oleks olnud võimalik esitada andmed kastidiagrammidena, mis väljendaksid ka ühe päikesepatarei väärtuste hajuvust.

Kuna tegemist on gümnaasiumiastme uurimistööga, piirduti andmete analüüsimisel neljast parameetrist ühega, neist kõige lihtsamini mõistetavaga. Tulevastes uurimistöödes saaks tõlgendada ka ülejäänud kolme parameetri tulemusi. Nagu varasemalt rõhutatud, on kõik uurimistöö andmed hea tava järgimise nimel esitatud lisan.

Edasi saaks uurida enamlevinud (näiteks räni või CdTe baasil) päikesepatareide efektiivsust tehisvalguses. Nende tootmistehnoloogiad on kesteriitsete omadega võrreldes levinumad ja juba väljakujunenud, mistõttu leiaksid sellise uurimistöö tulemused kergemini rakendust. Samuti oleks sellise uurimisobjekti valiku eeliseks võrreldavate andmete parem leitavus.

KOKKUVÕTE

Uurimistöö teemaks oli päikesepatareide parameetrite mõõtmine tehisvalguses $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn}_{1-x}\text{Ge}_x)\text{S}_4$ näitel. Töö eesmärk oli analüüsida tehisvalguse mõju kesteriitsete päikesepatareide kasuteguritele.

Sisetingimustes kasutatavad väiksemõõtmelised seadmed, nagu näiteks sensorid või kantavad nutiseadmed, vajavad kindlate omadustega vooluallikat, milleks võiks olla päikesepatarei. Neid on aga seni arendatud välja vastavalt päikesevalguse omadustele. Seetõttu pole välitingimusteks loodud päikesepatareid tingimata sisetingimusteks sobilikud ja seepärast on tarvis seda teemat uurida.

Eesmärgi saavutamiseks mõõdeti $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn}_{1-x}\text{Ge}_x)\text{S}_4$ seeriasse kuuluvate päikesepatareide volt-amper karakteristikud päikesevalguses (AM 3.0) ja erinevate LED-lampide (2700 K, 4000 K, 6500 K) valguses. Andmete põhjal arvutati välja mõõteobjektide kasutegurid, mille alusel võrreldi erinevate valgusallikate mõju uuritavatele päikesepatareidele.

Uurimistöö käigus saadi teada, et nii päikesevalguses kui ka tehisvalguses töötavad kõige efektiivsemalt seeria kaks esimest päikesepatareid ($x = 0$; $x = 0,2$), mille absorbermaterjalide koostised on vastavalt $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ja $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn}_{0,8}\text{Ge}_{0,2})\text{S}_4$. Tehisvalgus, mille tingimustes on mõõdetavatel päikesepatareidel kõige kõrgem kasutegur, on 6500 K LED-lambi valgus.

Peale eelnimetatu selgus, et madala Ge sisaldusega päikesepatareide kasutegurid on kõige suuremad päikesevalguses, kõrgema Ge sisalduse korral see nii pole. Andmete põhjal leidsid kinnitust teadmised, et päikesepatarei kasutegur sõltub materjali keelutsooni laiuse sobivusest valgusallikaga ning et päikesevalguses efektiivselt töötav päikesepatarei ei pruugi sobida sisetingimustes kasutamiseks.

SUMMARY

MEASURING SOLAR CELL PROPERTIES UNDER INDOOR ILLUMINATION:

A CASE STUDY OF $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn}_{1-x}\text{Ge}_x)\text{S}_4$

The aim of the research paper is to investigate how indoor illumination influences the efficiency of kesterite $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn},\text{Ge})\text{S}_4$ monograin layer solar cells. To conduct the study, three research questions were formulated:

1. Which one of the measured solar cells has the highest efficiency under solar simulation?
2. Which one of the measured solar cells has the highest efficiency under indoor illumination and does the answer differ from that of the previous question?
3. Which one of the sources of indoor illumination resulted in the highest efficiencies of the measured solar cells?

Solar cells show promise as an energy source for small devices used indoors, such as sensors, wearable electronics and other “smart home” components. So far, solar cells have been developed in accordance with the properties of standard conditions that are similar to sunlight. As such, existing solar cells are considered not to necessarily be appropriate for indoor use.

To reach the aims of the paper, the author measured the I-V characteristics of solar cells with the composition of $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn}_{1-x}\text{Ge}_x)\text{S}_4$, where the value x was varied from 0 to 1 with a step of 0.2. The measurements were carried out under solar simulation (AM 3.0) and under the illumination of LEDs (2700 K, 4000 K, 6500 K). The data was used to calculate the efficiency of every measured solar cell in order to analyse the influence of the light source on the measured solar cells.

The results of this study show that under solar simulation as well as under indoor illumination, the efficiency was the highest in the case of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, or at $x = 0$, and in the case of $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn}_{0.8}\text{Ge}_{0.2})\text{S}_4$, or at $x = 0.2$. The artificial light source, under which the efficiency of most of the measured solar cells was the highest, was found out to be the 6500 K LED.

In addition to the main findings, the results indicated that low percentage of Ge in a solar cell led to the highest efficiency being reached under solar simulation. This was not the case for solar cells with a higher percentage of Ge. This serves to confirm that a solar cell's efficiency depends on how well the material's bandgap fits together with the source of illumination, and that a solar cell developed to operate outdoors may not be suitable for indoor use.

KASUTATUD ALLIKAD

Chen, X., Hu, H., Jiacheng, Z., Li, Y., Wan, L., Cheng, Z., Chen, J., Xu, J., Zhou, R. 2024. Indoor photovoltaic materials and devices for self-powered internet of things applications. *Materials Today Energy*, 44. Kättesaadav: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2468606924001333> (15.08.2024).

Käämbre, H. (1998). Füüsika XII klassile. Aatom, molekul, kristall. Tallinn: Koolibri.

Mengü, I., Muska, K., Pilvet, M., Mikli, V., Dudutiene, E., Kondrotas, R., Krustok, J., Kauk-Kuusik, M., Grossberg-Kuusk, M. 2024. Comprehensive study of photoluminescence and device properties in $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn}_{1-x}\text{Ge}_x)\text{S}_4$ monograins and monograin layer solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 277. Kättesaadav:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927024824004367> (03.01.2025).

Mertens, K. 2014. Photovoltaics: fundamentals, technology and practice. John Wiley & Sons, Incorporated.

Murulaid, R. 2021. Elektromagnetism. Õpik gümnaasiumile. Tallinn: Maurus.

Reemann, M. 2014. *Energia. Füüsika õpik gümnaasiumile*. Tallinn: Maurus.

Tallinna Tehnikaülikool 2019. Päikesepatarei volt-amper karakteristikku mõõtmine. Praktikum juhend. Kättesaadav:

https://staff.ttu.ee/~juri.krustok/Course/PDF/IV_juhend.pdf (20.10.2024).

Tarkpea, K., Voolaid, H. 2002. Füüsika käsiraamat. Tallinn: Koolibri.

Vähi, K. 2019. TalTechi materjaliteadlased parandasid järgmise põlvkonna päikesepaneelide tööefektiivsust hõbeda lisamisega absorbermaterjali. Kättesaadav:

<https://taltech.ee/uudised/taltech-materjaliteadlased-parandasid-jargmise-polvkonna-paikesepaneelide-tooefektiivsust> (27.10.2024).

KASUTATUD JOONISED

Joonis 1: Solak, E., Irmak, E. 2023. Three generations of PV cells. Kättesaadav: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2023/ra/d3ra01454a> (26.10.2024).

Joonis 2: Käämbre, H. 1998. Energiatsoonid metallis, pooljuhis, dielektrikus. Kättesaadav: <https://opik.fysika.ee/index.php/book/view/3#/section/1526> (20.08.2024).

Joonis 3: Käämbre, H. 1998. n- ja p-pooljuhi võrepilt. Kättesaadav: <https://opik.fysika.ee/index.php/book/view/3#/section/1529> (20.08.2024).

Joonis 4: Käämbre, H. 1998. Potentsiaaliastangu (tõkkekihi)kujunemine pn-siirdel. Kättesaadav: <https://opik.fysika.ee/index.php/book/view/3#/section/1530> (20.08.2024).

Joonis 5: Mertens, K. 2014. Typical silicon solar cell. Kättesaadav: <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/87792/3/Photovoltaics%20Fundamental%20and.pdf> (21.08.2024).

Joonis 7: Laan, M. 2020. Päikese spekter. Kättesaadav: <https://opik.fysika.ee/index.php/book/view/90#/section/40356> (10.09.2024).

Joonis 8: Tarkpea, K. Voolaid, H. 2019. Päikese valguse spekter... LED-lambi spekter... Kättesaadav: <https://opik.fysika.ee/index.php/book/view/15#/section/1501> (26.10.2024).

Joonis 9: DelMarFans 2023. Kelvin Color Temperature Scale Chart. Kättesaadav: <https://www.delmarfans.com/educate/correlated-color-temperature-kelvin-application-in-home-decor> (26.10.2024).

Joonis 10: Tallinna Tehnikaülikool. 2019. Päikeseplatari IV-kõver valgustatud olekus. Kättesaadav: https://staff.ttu.ee/~juri.krustok/Course/PDF/IV_juhend.pdf (20.10.2024).

Tabel 4: Mengü, İ., Muska, K., Pilvet, M., Mikli, V., Dudutiene, E., Kondrotas, R., Krustok, J., Kauk-Kuusik, M., Grossberg-Kuusk, M. 2024. Comprehensive study of photoluminescence and device properties in $\text{Cu}_2\text{Zn}(\text{Sn}_{1-x}\text{Ge}_x)\text{S}_4$ monograins and monograin layer solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 277. Kättesaadav:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927024824004367> (03.01.2025).

LISAD

Lisa 1. Praktilise osa esimese etapi nädisarvutus

Tabel 5. Ühe kontakti mõõteandmed standardtingimustes (AM 1.5)

	V_{OC} (V)	I_{SC} (A)	V_{mp} (V)	I_{mp} (A)	S (cm ²)	P (W/cm ²)
7277-1-1a	0,71	$5,17 \cdot 10^{-4}$	0,54	$3,98 \cdot 10^{-4}$	0,045	0,1

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \cdot 100\% = \frac{0,54 \text{ V} \cdot 0,000398 \text{ A}}{0,71 \text{ V} \cdot 0,000517 \text{ A}} \cdot 100\% \approx 58,55\%$$

$$\eta = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{light} \cdot S} \cdot 100\% = \frac{0,54 \text{ V} \cdot 0,000398 \text{ A}}{0,1 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2} \cdot 0,045 \text{ cm}^2} \cdot 100\% \approx 4,78\%$$

$$J_{SC} = \frac{I_{SC}}{S} = \frac{0,000517 \text{ A}}{0,045 \text{ cm}^2} \approx 1,15 \cdot 10^{-2} \text{ A/cm}^2$$

Lisa 2. Mõõteobjektide parameetrid (AM 3.0, 2700 K, 4000 K, 6500 K)Tabel 6. Mõõteobjektide kasutegur, täituvusaste, avatud ahela pinge ja lühisvoolu tihedus päikesevalguses (AM 3.0, 1000 lux, $P = 0,688 \text{ mW/cm}^2$)

Ge/(Sn+Ge)	Kontakt	η (%)	FF (%)	V_{OC} (mV)	J_{SC} (mA/cm ²)
0	7277-1-1a	3,38	37,3	340,3	0,18
	7277-1-4a	8,16	53,2	545,7	0,19
	7277-1-6a	8,48	56,4	566,5	0,18
0,2	7278-1-1a	8,31	55,2	615,1	0,17
	7278-1-2a	3,93	34,6	460,7	0,17
	7278-1-3a	8,35	55,4	623,3	0,17
0,4	7279-1-2a	2,93	40,3	473,2	0,11
	7279-1-4a	3,99	48,5	567,6	0,10
	7279-1-5a	3,99	48,5	568,1	0,10
0,6	7280-1-3a	1,57	31,7	562,5	0,06
	7280-1-4a	1,44	33,2	503,5	0,06
	7280-1-6a	1,58	31,1	561,6	0,06
0,8	7281-1-3a	0,68	30,7	502,3	0,03
	7281-1-4a	0,74	32,9	525,7	0,03
	7281-1-5a	0,70	31,8	499,1	0,03
1	7282-1-2a	0,40	35,7	578,5	0,01
	7282-1-3a	0,31	31,9	469,7	0,01
	7282-1-6a	0,13	33,4	221,0	0,01

Tabel 7. Mõõteobjektide kasutegur, täituvusaste, avatud ahela pinge ja lühisvoolu tihedus 2700 K LED-lambi valguses (1000 lux, $P = 0,383 \text{ mW/cm}^2$)

Ge/(Sn+Ge)	Kontakt	η (%)	FF (%)	V_{OC} (mV)	J_{SC} (mA/cm ²)
0	7277-1-1a	2,07	36,2	242,1	0,09
	7277-1-4a	5,61	49,4	494,8	0,09
	7277-1-6a	6,64	54,9	537,8	0,09
0,2	7278-1-1a	6,43	51,2	563,6	0,09
	7278-1-2a	2,25	30,6	326,1	0,09
	7278-1-3a	6,72	51,8	588,9	0,08
0,4	7279-1-2a	2,28	37,2	392,2	0,06
	7279-1-4a	3,67	44,2	535,1	0,06
	7279-1-5a	3,56	44,6	539,1	0,06
0,6	7280-1-3a	1,37	29,4	521,2	0,03
	7280-1-4a	1,24	31,7	440,5	0,03
	7280-1-6a	1,32	28,3	514,7	0,03
0,8	7281-1-3a	0,45	29,5	420,9	0,01
	7281-1-4a	0,55	31,6	471,9	0,01
	7281-1-5a	0,48	31,2	419,2	0,01
1	7282-1-2a	0,21	36,7	487,3	0,00
	7282-1-3a	0,12	30,5	317,2	0,00
	7282-1-6a	0,05	31,8	126,1	0,00

Tabel 8. Mõõteobjektide kasutegur, täituvusaste, avatud ahela pinge ja lühisvoolu tihedus 4000 K LED-lambi valguses (1000 lux, $P = 0,338 \text{ mW/cm}^2$)

Ge/(Sn+Ge)	Kontakt	η (%)	FF (%)	V_{OC} (mV)	J_{SC} (mA/cm ²)
0	7277-1-1a	1,78	36,8	217,5	0,08
	7277-1-4a	4,84	47,9	469,8	0,07
	7277-1-6a	5,75	52,8	517,7	0,07
0,2	7278-1-1a	5,93	50,1	560,1	0,07
	7278-1-2a	1,86	30,2	288,4	0,07
	7278-1-3a	6,17	51,1	574,8	0,07
0,4	7279-1-2a	2,18	36,1	391,8	0,05
	7279-1-4a	3,82	46,6	532,2	0,05
	7279-1-5a	3,76	47,6	534,4	0,05
0,6	7280-1-3a	1,59	31,1	524,4	0,03
	7280-1-4a	1,41	33,0	445,0	0,03
	7280-1-6a	1,55	30,4	516,3	0,03
0,8	7281-1-3a	0,60	30,6	436,8	0,02
	7281-1-4a	0,72	32,8	481,0	0,02
	7281-1-5a	0,63	32,0	433,3	0,02
1	7282-1-2a	0,34	36,9	527,9	0,01
	7282-1-3a	0,21	31,6	356,1	0,01
	7282-1-6a	0,08	33,1	147,6	0,01

Tabel 9. Mõõteobjektide kasutegur, täituvusaste, avatud ahela pinge ja lühisvoolu tihedus 6500 K LED-lambi valguses (1000 lux, $P = 0,305 \text{ mW/cm}^2$)

Ge((Sn+Ge)	Kontakt	η (%)	FF (%)	V_{OC} (mV)	J_{SC} (mA/cm ²)
0	7277-1-1a	1,72	36,7	207,2	0,07
	7277-1-4a	4,60	46,8	457,0	0,07
	7277-1-6a	5,61	52,5	504,5	0,06
0,2	7278-1-1a	5,88	49,7	553,9	0,07
	7278-1-2a	1,82	29,4	285,9	0,07
	7278-1-3a	6,20	51,0	568,2	0,07
0,4	7279-1-2a	2,25	35,8	390,5	0,05
	7279-1-4a	4,14	48,2	531,7	0,05
	7279-1-5a	4,11	49,4	532,9	0,05
0,6	7280-1-3a	1,86	32,6	527,3	0,03
	7280-1-4a	1,63	34,0	448,0	0,03
	7280-1-6a	1,81	31,2	521,3	0,03
0,8	7281-1-3a	0,76	30,6	452,7	0,02
	7281-1-4a	0,90	33,2	489,1	0,02
	7281-1-5a	0,80	32,2	444,9	0,02
1	7282-1-2a	0,50	36,6	546,2	0,01
	7282-1-3a	0,32	31,5	388,5	0,01
	7282-1-6a	0,13	32,3	168,5	0,01