

ANISOTROOPSETEL ÕHUKESKILELISTEL ABSORBERMATERJALIDEL PÕHINEVAD PÄIKESEPATAREID: DISAIN JA SÄÄSTLIKE TEHNOLOOGIATE ARENDUS

Ilona Oja Açık, Malle Krunk, Nicolae Spalatu, Atanas Katerski
(Tallinna Tehnikaülikool)

*Teaduspreemia tehnika ja tehnoloogia valdkonnas tööde tsükli
„Anisotroopsetel õhukeselekilelistel absorbermaterjalidel põhinevad
päikeseelementid: disain ja säästlike tehnoloogiate arendus“ eest*

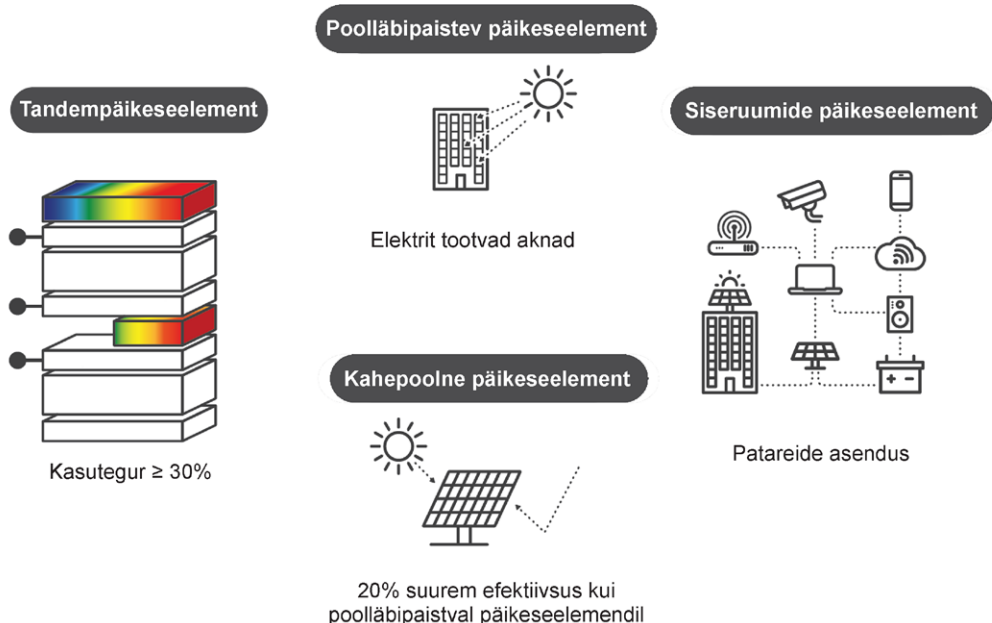
Taastuvenergia ja koos sellega ka päikeseenergia osakaal energiatootmises kasvab iga aastaga. 2024. aastal moodustas päikesepaneelide poolt toodetud elekter umbes 10% Euroopas toodetavast elektrienergiast. Päikesepaneel koosneb fotogalvaanilistest (ingl *photovoltaics*, PV) elementidest, mis neelavad päikese kiirgust ja muudavad selle elektrienergiaks. Erinevalt teistest taastuvenergia lahendustest on päikeseenergiale iseloomulik suur paindlikkus ja seda nii PV materjalide, tehnoloogiate kui rakenduste osas. Lisaks päikesepeakidele saab neid rakendada veel väga paljudes erinevates elektrienergia tootmise lahendustes.

Tänapäeval on enam kui 95% päikesepaneelidest toodetud ränist ja ränitehnoloogia jääb peamiseks päikesevalgusest elektri tootmise tööriistaks veel paljudeks aastateks. Samas on aastakümneid otsitud ja arendatud lahendusi, mis oleksid väiksema materjali- ja energiakuluga ning seega ka väiksema süsiniku jalajäljega kui Si-tehnoloogiad. Õhukeselekilelised PV tehnoloogiad on siin perspektiivne lahendus. Huvi anisotroopse struktuuriga absorbermaterjalidel põhinevate päikeseelementide vastu on stimuleerinud teiste õhukeselekileliste tehnoloogiate, nagu $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$ tüüpi materjalide toorme limiteeritus ja kulukus, CdTe pidamine keskkonnoahtlikuks Cd sisalduse tõttu, kesteriitsete $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ tüüpi materjalide koostise keerukus ja seadiste efektiivsuse stabiliseerumine keskpärasel tasemel. Perovskiitsed päikeseelementid on saavutanud suhteliselt lühiajalise arenduse tulemusena kõrge sünteesijärgse efektiivsuse umbes 25%, kuid nende põhiline puudus on seadiste lühike eluiga.

Sb- ja Bi-kalkogeniididel põhinevate materjalide esiletõus ja rakendusala

Sb- ja Bi-kalkogeniidide karakterseteks omadusteks ja eeliseks teiste PV materjalide ees on koostise lihtsus (binaarsed anorgaanilised ühendid), ühendite stabiilsus ja mürgiste elementide (Cd, Pb) puudumine koostises. Need ühendid omavad kõrget valguse neeldumisvõimet ($> 10^5 \text{ cm}^{-1}$), mis on üle 1000 korra suurem kui ränil. See võimaldab kasutada päikeseelemendi struktuuris üliõhukesi kihte ($< 100 \text{ nm}$), mis tagab lühema valmistamise aja ja väiksema materjalikulu. Sb- ja Bi-kalkogeniidid omavad ortorombilist struktuuri, kus metalli (Sb, Bi) aatomid on kovalentselt seotud S või Se aatomitega, moodustades [001] suunas orienteeritud (Sb_4S_6)_n nanoriba, nanoribad hoiavad koos Van der Waalsi jõud. Kristallide unikaalne ühedimensionaalne nanoribaline ehitus on põhjus, miks materjalidel on anisotroopsed omadused. Seadiste valmistamisel nendest materjalidest tuleb arvestada asjaoluga, et fotogenereeritud laengukandjate liikumine piki nanoriba on oluliselt lihtsam kui nanoribade vahel.

Sb- ja Bi-kalkogeniididel on otseste üleminekutega keelutsoon, mis on materjali koostise kaudu varieeritav vahemikus 1,1–1,8 eV ja on üks oluline parameeter, rakendamaks neid materjale erineva konfiguratsiooniga PV seadistes. Nende materjalide valmistamisel kasutatavad madalad sünteesitemperatuurid (nt $\text{Sb}_2\text{S}_3 < 300^\circ\text{C}$) võimaldavad valmistada päikeseelemente nii tavapärastele klaasalustele kui ka polümeersetele pindadele, et saada ülikergeid ja painduvaid päikeseplatereid. Madalad sadestustemperatuurid tagavad väiksema energia- kulu tootmisel ja vähendavad tootmise CO_2 jalajälge.



Joonis 1. Sb-kalkogeniid-päikeseelementide perspektiivsed kasutusala (952509-5GSOLAR pildikogu).

Sb-kalkogeniide peetakse üheks tõenäoliseks absorbermaterjaliks tuleviku õhukesekilelistes PV seadistes, mis annavad võimaluse päikeseelementide kasutamiseks valdkondades, kus Si-põhised patareid ei ole rakendatavad. Uudsete materjalide perspektiivsed kasutusala on erinevates ehitis- ja seadisintegreeritud lahendustes, tandempäikeseelementide struktuurides, poolläbipaistvates elektrit tootvates akendes, kahepoolsetes päikeseelementides, IoT seadiste energiavarustuses (joonis 1).

Uurimistöö antud materjalide vallas loob aluse PV tehnoloogia täiesti uue turusegimenti tekkele. Oluline on siinkohal märkida, et uued tehnoloogilised lahendused ei võistle olemasolevate tehnoloogiatega mitte niivõrd kasuteguri, kuivõrd igale uuele rakendusele optimeeritud väljundparameetrite osas. Uus tehnoloogia peab olema keskkonnasõbralikum ja lihtsalt masstootmisesse rakendatav, seadised peavad põhinema maakoos piisavalt leiduvatel elementidel ja olema ümbertöödeldavad.

Esimesed teadustööd Sb-kalkogeniidide õhukeste kilede kohta on tehtud juba eelmise sajandi lõpus, kuid päikeseelementide süsteemsemad uuringud algasid alles hiljuti, 10–15 aastat tagasi. Tänapäevaks on Sb-kalkogeniide uurivate ja rakendavate uurimisrühmade hulk kasvanud hüppeliselt ja uurimiskogukond suureneb pidevalt. Võrreldes ränil põhinevate päikesepaneelide (mida on järgipidevalt uuritud ja täiustatud juba viimased 75 aastat) väljaarendamisega, on Sb-kalkogeniid-päikeseelementide arendus alles väga varajases staadiumis.

Muidugi saab iga järgmine põlvkond uue materjali ja seadise väljatöötamisel tugineda eelnevatele teadmistele ja seeläbi kiirendada innovatsiooni arengut. Samas pakub iga uus materjal uusi lahendamist vajavaid ülesandeid. Näiteks Sb-kalkogeniidide puhul on tänu materjali kõrgele neeldumistegurile ja eksperimentaalsete meetodite suurele varieeritavusele võimalik valmistada üliõhukestel poolläbipaistvatel kihtidel (alates 50 nm) põhinevaid päikeseelemente, kus materjali kogus võrreldes klassikaliste õhukesekileliste päikeseelementidega (CdTe päikeseelementis on kihi paksus umbes 2000 nm) on üliväike. Need omadused aga piiravad omakorda materjalide standardsete karakteriseerimismeetodite kasutamist ning viivad selleni, et samaaegselt materjalide eksperimentaalse väljatöötamisega toimub ka karakteriseerimismeetodite kohandamine uutele materjalidele. Ühelt poolt pärssib karakteriseerimismeetodite piiratus materjalide kiiret arengut, teisalt pakub uusi meetodikaid materjalide uurimiseks, mida iga järgnev teadlaste põlvkond saab rakendada ja edasi arendada.

Tallinna Tehnikaülikooli õhukesekileliste energiamaterjalide teaduslabori teadlastel on oskusteave ja pikaajaline kogemus uudsete tööstuses rakendatavate PV tehnoloogiate arendamisel, sh on väga oluline ka põlvest põlve edasikantud teave ja oskused. Uurimisrühm rakendab päikeseelementide struktuuri komponenti kihtide valmistamiseks peamiselt kahte tehnoloogilist-eksperimentaalset meetodit: keemilist ultraheli pihustuspürolüüsi (ingl *ultrasonic spray pyrolysis*, USP) meetodit ja füüsikalist lähidistantsilt sublimeerimise (ingl *close space sublimation*, CSS) meetodit. Mõlemad meetodid on jätkusuutlikud ja ressursisäästlikud tööstuslikud tehnoloogiad.

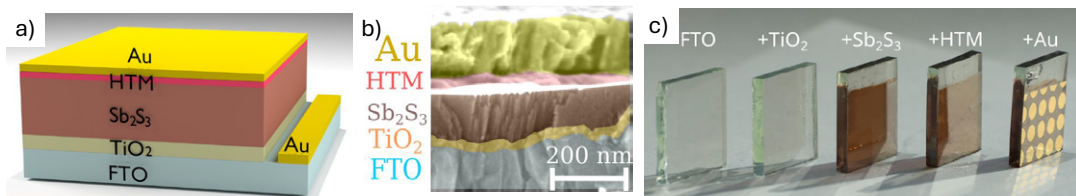
Pihustuspürolüüsi ja selle edasiarenduses ultrahelipihustuspürolüüsi meetod on uurimiserühmas kasutusel materjalide ja seadiste väljatöötamisel juba 30 aastat. Keemilise pihustuspürolüüsi meetodil sadestatakse lähteainete lahus kuumale aluspinnale, kus lähteainete lagunemise tulemusena moodustub õhuke kile. USP meetodi eelis teiste vedeliksadestuse keemiliste meetodite ees on sadestuskiirus ja võimalus katta suuri pindasid. Oluline aspekt selle meetodi juures on pihustuslahuses toimuvate protsesside keemia ja lähteainete termilise lagunemise tundmisel, et tagada seadiskõlbulike materjalide valmistamine. Siinkohal on kindlasti oluline ära märkida, et lisaks materjalide väljatöötamisele oleme paralleelselt arendanud ka meetodit ennast ja praegu saame uurimiserühmas kasutada seadiste väljaarendamisel antud materjalide süsteemile kohandatud automatiiseeritud aparatuuri, mis võimaldab katta aluspinna suurusga 20 cm × 20 cm.

Teine oluline eksperimentaalne meetod uurimiserühmas õhukesekilelise päikeselementide koostiskihtide valmistamisel on lähidistantsilt sublimeerimise (CSS) meetod. CSS meetod on füüsikaline sadestusmeetod, kus lähteaine ja aluspind, millele õhuke kile sadestatakse, paiknevad üksteisele väga lähedal (umbes 2 mm), protsess viiakse läbi vaakumkambris. Enamasti pulbri kujul olev lähteaine kantakse läbi aurufaasi aluspinnale, kus see kondenseerub ja moodustab õhukese kile. Selline konfiguratsioon annab CSS meetodile suure eelise, nimelt on CSS meetodil saavutatav õhukese kile kasvu kiirus umbes 1 µm/min, mis on ülikiire võrreldes teiste füüsikaliste aurufaasist sadestamise meetoditega. CSS meetodil õhukese kilede väljatöötamine uurimiserühmas sai alguse 2010. aastal. Esimesel kümnendil oli põhifookus CdTe õhukese kilede ja nendel põhinevate päikeseelementide väljaarendamisel. Alates 2019. aastast hakkasime uurimiserühmas välja arendama Sb-kalkogeniididel põhinevaid õhukesi kilesid ka füüsikalisel CSS meetodil.

Ultraheli pihustuspürolüüsi (USP) meetodil valmistatud Sb₂S₃ absorberkihil põhinevad päikeseelemendid

Päikeseelement on mitmekihiline struktuur, mille koostisosad on klaasalusele kantud valgust läbilaskev ja elektrit juhtiv metallioksiidi kiht (TCO), millele on sadestatud elektronide transportkiht (ETL), järgneb absorbermaterjali kiht ja aukude transportkiht (HTL), millele on omakorda kantud metallkontakt. Päikeseelemendi klaas/TCO/ETL/Sb₂S₃/HTM/Au struktuur, skaneeriva elektronmikroskoobi (SEM) ristlõike foto ja fotod päikeseelemendist erinevate tehnoloogiliste etappide järel on toodud joonisel 2.

ETL materjalina kasutame TiO₂ ja absorberina Sb₂S₃, mõlemad kihid valmistatakse USP meetodil paksusega vastavalt umbes 30 ja umbes 90 nm, HTL materjalina kasutatakse polütiofeeni (poly(3-hexylthiophene), P3HT) kihti. See varasemas uurimistöös tsüklis väljatöötatud tehnoloogia võimaldas valmistada päikeseelemente, mille valguse elektriks muundamise efektiivsus (PCE) oli 4,67% ja keskmine optiline läbipaistvus (AVT) 26% lainepikkuste vahemikus 400–800 nm (Eensalu jt, 2019).



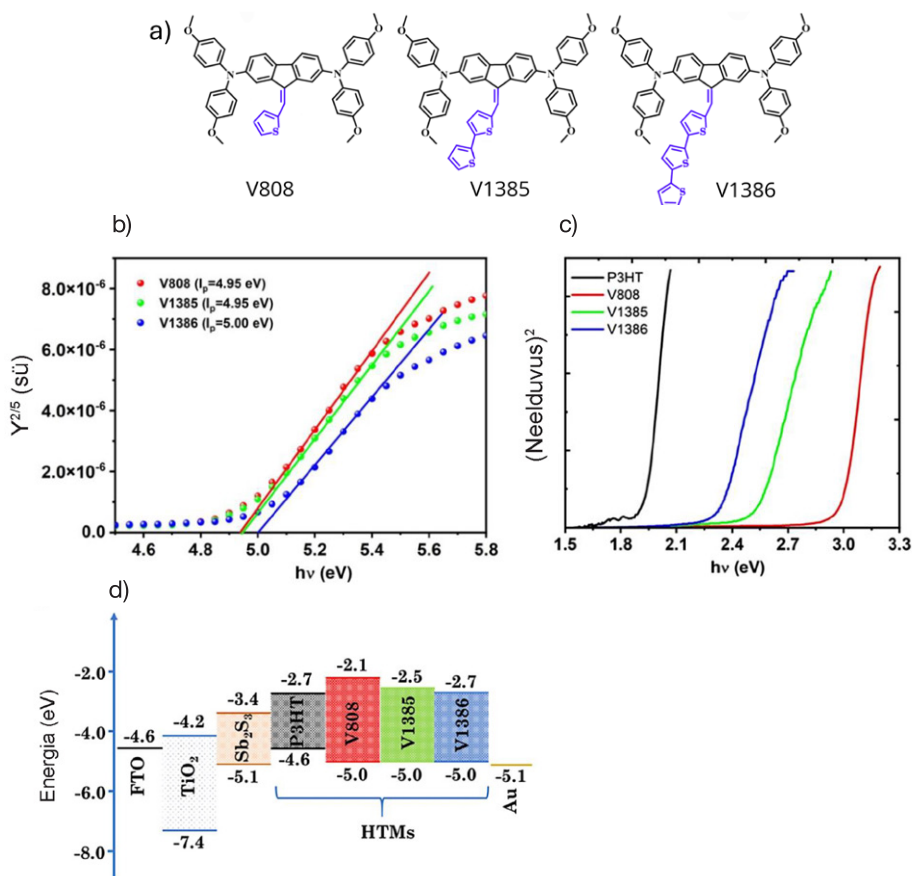
Joonis 2. a) Päikeseelemendi struktuuri skeem; b) päikeseelemendi ristlõike SEM pilt; c) fotod päikeseelemendi struktuurist erinevate tehnoloogiliste etappide järel.

Uudsed orgaanilised aukjuhtmaterjalid poolläbipaistvate Sb_2S_3 päikeseelementide arenduseks

Kuna Sb_2S_3 keelutsooni laius on 1,7 eV ja kihi paksus seadises ≤ 100 nm, siis sellisel absorberkihil põhinev seadis on optiliselt poolläbipaistev, mis võimaldab seda kasutada elektrit tootvate akende valmistamiseks. Küll aga tuleb kriitiliselt suhtuda P3HT kasutamisse aukjuhi materjalina. Nimelt limiteerib P3HT keelutsooni laius 1,8 eV seadise optilist läbipaistvust, kihi valmistamise tehnoloogia on mitmeastmeline ja arvesse tuleb võtta ka materjali enda suhteliselt kõrget hinda (Juneja jt, 2022; Mandati jt, 2023).

Antud uurimistööde tsükliis uurisime võimalusi P3HT asendamiseks poolläbipaistvate seadiste jaoks sobivate materjalidega. Kaunase Tehnoloogiaülikooli teadlased töötasid välja suhteliselt lihtsa, seega ka odavama fluoreenipõhiste orgaaniliste ühendite sünteesi tehnoloogia, meie uurimisrühm katsetas uusi ühendeid esmakordselt Sb_2S_3 päikeseelemendi struktuurides (Juneja jt, 2022; Mandati jt, 2023; Juneja jt, 2024a,b). Sünteesiti kolme erinevat tüüpi fluoreenipõhiseid ühendeid – erineva pikkusega alifaatset ahelat sisaldavad (V1275, V1235, V1236, V1461), erinevat arvu tiofeenrühmi sisaldavad (V808, V1385, V1386) ja läbi tiofeenrühma sidestatud dimeerid (V1422, V1423, V1454, V1455) – ja karakteriseeriti nende füüsiko-keemilisi omadusi. Töötasime välja HTM kihi valmistamise tehnoloogia pindvurritamise meetodil uudsete fluoreenipõhiste ühendite kandmiseks õhukese pideva kihina absorberkihi pinnale ja uurisime valmistatud päikeseelementide füüsikalisi omadusi, hindamaks uudsete materjalide võimekust kasutamiseks poolläbipaistvates seadistes.

Esmalt hinnati fluoreenipõhiste materjalide sobivust päikeseelemendi struktuuri seadise tsoonidiagrammi alusel. Fotoelektronide saagise spektroskoopia (ingl *photoelectron yield spectroscopy*, PYS) meetodil mõõdeti päikeseelemendi kõigi komponentkihtide ionisatsioonipotentsiaal (I_p), et määrata anorgaaniliste ühendite valentstsooni lae (VBM) ja orgaaniliste ainete HOMO (ingl *highest occupied molecular orbital*) nivoo energiad. Materjalide optiliste neeldumisspektrite mõõtmistest arvutati keelutsooni laiused, mis võimaldas määrata vastavalt juhtivustsooni põhja (CBE), orgaanilistel ainetel LUMO (ingl *lowest unoccupied molecular orbital*) nivoo energiad. Joonisel 3 on toodud tiofeenrühmi sisaldavate

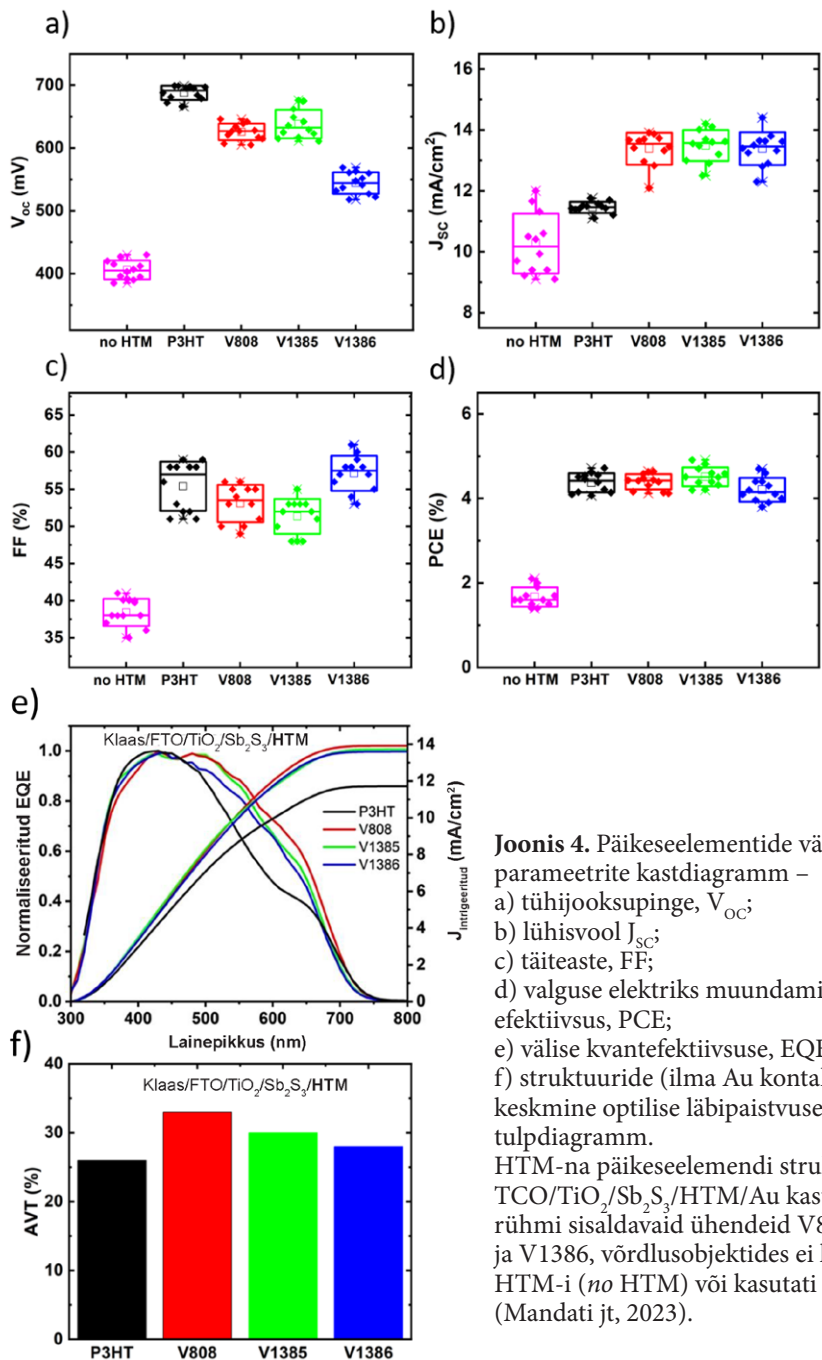


Joonis 3. a) Tiofeenrühmi sisaldavate fluoreenipõhiste molekulide struktuur; b) materjalide ionisatsioonipotentsiaali ja c) keelutsooni väärtuste määramine; d) päikeseelemendi tsoonidiagramm, kui HTM-na kasutatakse P3HT ja tiofeenrühmi sisaldavaid ühendeid V808, V1385, V1386 (Mandati jt, 2023).

molekulide struktuur, ionisatsioonipotentsiaali ja keelutsooni (E_g) määramise graafikud ja seadise tsoonidiagramm, kui HTM-na kasutatakse P3HT-d ja tiofeenrühmi sisaldavaid ühendeid – V808, V1385, V1386.

Mõõtmised näitasid, et nii alifaatseid ahelaid kui tiofeenrühmi sisaldavatel orgaanilistel ühenditel on HOMO nivoo umbes -5 eV juures (vaakumnivoo suhtes), mis võimaldab fotogenereeritud aukude liikumist Sb_2S_3 absorberkihist (VBM -5.1 eV) HTM kihti ja sealt välisele metallelektroodile. Kõigi alifaatset ahelat sisaldavate molekulide ja V808 keelutsooni väärtus on vahemikus 2.8 – 2.9 eV, seega LUMO nivoo on -2.1 eV juures ja fotogenereeritud elektronide liikumine Sb_2S_3 kihist (CBE -3.4 eV allpool vaakumnivood) HTM kihti on efektiivselt blokeeritud (Juneja jt, 2022; Juneja jt, 2024a; Mandati jt, 2023). Kui tiofeenrühmade arv molekulis suureneb ühest (V808) kolmeni (V1386),

väheneb keelutsooni laius ja vastavalt muutub ka LUMO nivoo asukoht -2.1 eV kuni -2.7 eV (joonis 3d), kuid on piisav, et blokeerida elektronide liikumist HTM kihti. Tsoonidiagrammide järgi sobivad kõik sünteesitud ained kasutamiseks aukjuhtkihina Sb_2S_3 absorberiga seadises (Juneja jt, 2022; Mandati jt, 2023; Juneja jt, 2024a,b).



Joonis 4. Päikeseelementide väljundparameetrite kastdiagramm –

a) tühihooaksupinge, V_{oc} ;
b) lühisvool J_{sc} ;
c) täiteaste, FF;
d) valguse elektriks muundamise efektiivsus, PCE;
e) välise kvantefektiivsuse, EQE spekter ja
f) struktuuride (ilma Au kontaktita) keskmine optilise läbipaistvuse, AVT, tulpdiagramm.

HTM-na päikeseelemendi struktuuris $\text{TCO}/\text{TiO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3/\text{HTM}/\text{Au}$ kasutati tiofeenrühmi sisaldavaid ühendeid V808, V2385 ja V1386, võrdlusobjektides ei kasutatud HTM-i (no HTM) või kasutati P3HT-d (Mandati jt, 2023).

Joonisel 4 (a–d) on toodud tiofeenrühmi sisaldavate fluoreenipõhiste ühendite kasutamisel HTM-na valmistatud päikeseelementide väljundparameetrite (V_{oc} – tühijooksu pinge, J_{sc} – lühisvoolu tihedus, FF – täiteaste, PCE – valguse elektriks muundamise efektiivsus) kastdiagramm, kvantefektiivsuse (EQE) spektrid ja struktuuride (ilma Au kontaktita) keskmine optiline läbipaistvus (AVT) tulpdiagrammina (Mandati jt, 2023). Väljundparameetrite mõõtmised näitavad, et HTM kiht on nõutav struktuurielement üliõhukese absorberkihiga seadistes, sest vähendab oluliselt rekombinatsiooni tagakontaktil, vähendab šunte, tõstab V_{oc} väärtust umbes 400 mV-lt umbes 650–690 mV-ni ja kokkuvõttes PCE-d 2%-lt 4,9%-ni. Ühe või kahe tiofeenrühmaga molekulide (vastavalt V808 või V1385) kasutamisel HTM kihina saadi V_{oc} väärtused 640–680 mV, mis on lähedased P3HT-ga seadistes mõõdetud väärtusele umbes 690 mV. Küll aga võimaldab fluoreenipõhiste HTM kihtide kasutamine saada tunduvalt suuremaid J_{sc} väärtusi, kui saadakse P3HT-ga seadistes, 14 mA/cm² vs 11,5 mA/cm². P3HT ja fluoreenipõhiste HTM-de kasutamisel on seadiste PCE-d suhteliselt sarnased, jäädes vahemikku 4,7–4,9%. Küll aga mõõdeti alifaatset ahelat ja tiofeenrühma sisaldavate fluoreenipõhiste HTM kihtide puhul seadise AVT väärtuseks kuni 33% (joonis 4f), mis on umbes 20% kõrgem kui P3HT kasutamisel HTM-na. EQE mõõtmised kinnitasid parasitise absorptsiooni puudumist lainepikkustel 550–680 nm, kui HTM-dena kasutati P3HT (Eg 1,8 eV) asemel suurema keelutsooniga alifaatset ahelat sisaldavaid aineid (Eg umbes 2,9 eV) või tiofeenrühma sisaldavaid kihte (Eg 2,3 kuni 2,8 eV).

Alifaatset ahelat sisaldavate ühendite kasutamisel HTM-na olid V_{oc} väärtused vahemikus 560–570 mV (Juneja jt, 2022; Juneja jt, 2024a), mis on umbes 100 mV vähem kui seadistes, kus HTM-na kasutatakse tiofeenrühmi sisaldavaid materjale. Röntgenkiire fotoelektronspektroskoopia (ingl *X-ray photoelectron spectroscopy*, XPS) mõõtmised näitasid, et tiofeenrühma sisaldava HTM kihi sadestamisel Sb_2S_3 absorberi kihi pinnale toimub interaktsioon tiofeenrühma kuuluva S aatomi ja absorberi molekuli kuuluva Sb aatomi vahel (Juneja jt, 2024b). Selline interaktsioon võib kaasa aidata laengute ülekandmisele Sb_2S_3 absorberist HTM-i ja seekaudu seadise kõrgemate näitajate saavutamise võimalusele.

Näitasime, et HTM molekuli struktuur ja HTM kihi paksus omavad olulist mõju päikeseelementide efektiivsusele. Tõestasime, et fluoreenipõhised ühendid, mille struktuuris on alifaatsed ahelad (V1275, V1235, V1236 ja V1461) või tiofeenrühm (V808, V1385 ja V1386), on perspektiivsed.

Antimonetüülksandaat kui alternatiivne prekursoraine Sb_2S_3 kilede sadestamiseks: termilise lagunemise uurimine

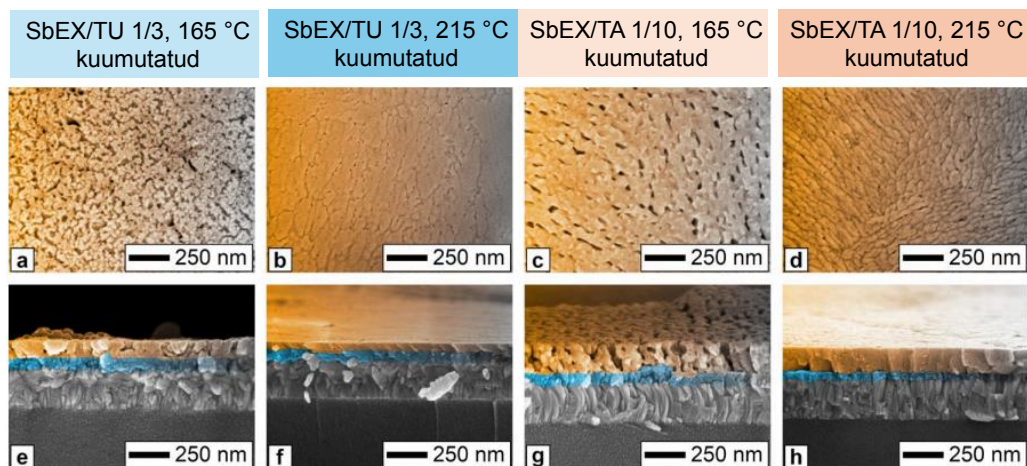
Sb_2S_3 absorberkihtide valmistamiseks USP meetodil on senini kasutatud $SbCl_3$ ja tiouureat moolsuhtes 1/3 sisaldavat lahust, mis võib viia Sb_2S_3 mustumisele kloori ioonidega. Viisime läbi antimonetüülksantaadi, $Sb(S_2COC_2H_5)_3$ (SbEX) termilise lagunemise uuringu TG/DTA-EGA-MS meetodil (Eensalu jt, 2021), hindamaks ühendi sobivust prekursoraineks. SbEX sulab 85 °C juures, terminine

lagunemine algab 120 °C juures, DTG piik on 135 °C juures, reaktsioon on endotermiline. Inertkeskkonnas saab eraldada temperatuuride vahemikus 90–800 °C kolme lagunemise etappi ning hapnikku sisaldavas keskkonnas neljaetapilist protsessi temperatuuride piirkonnas 90–950 °C. Amorfse Sb_2S_3 faas tekib SbEX lagunemise esimeses etapis 170 °C juures nii inertgaasis kui õhus. Peamised gaasilised laguproduktid EGA-MS analüüsi järgi on CS_2 , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, CO , CO_2 , COS , H_2O . Protsessi teine etapp toimub temperatuuridel 170–250 °C. Moodustub kristalliline Sb_2S_3 , õhus tekib lisaks Sb_2O_3 faas, kuid inertkeskkonnas on Sb_2S_3 faas stabiilne kuni sulamiseni 550 °C juures. Protsessi läbiviimisel õhus toimub Sb_2S_3 oksüdatsioon ning 590 °C juures on lõpp-produkt Sb_2O_4 . Termilise analüüsi tulemused näitasid, et põhimõtteliselt saab SbEX kasutada Sb_2S_3 lähteainena, protsessi läbiviimisel õhus tuleb rakendada meetmeid materjali oksüdatsiooni vältimiseks.

Sb_2S_3 kiled USP meetodil antimonetüülksandaadist ja päikeseelement selle baasil

Toetudes termilise analüüsi tulemustele Sb_2S_3 moodustumise temperatuuri kohta ja vajadusele hoida ära oksüdatsiooni, uurisime kile kasvatamise temperatuuri mõju vahemikus 200–260 °C kile omadustele, kasutades lähtelahuses TU/SbEX moolsuhet 3 (Eensalu jt, 2023). Uurimistöö tulemused näitasid, et kilede kasvatamisel temperatuuridel 200–260 °C õhus saadakse Sb_2S_3 kristallilised kiled juba kasvatamise protsessis. Temperatuuri tõstmisel 200–260 °C muutub kile morfoloogia oluliselt – ühtlase sileda pinnaga kile transformeerub eraldiseisvatest 0,5–1,0 µm suurustest kristallidest koosnevaks kihiks. XRF andmed näitavad, et sadestatud kihtides on väevli defitsiit (S/Sb väärtus on umbes 1,3 sadestustemperatuurist olenemata) ja XPS analüüsi järgi sisaldavad kiled oksiidi faasi, kuigi XRD ei tuvasta kristallilise Sb_2O_3 faasi olemasolu. Päikeseelemendi V_{OC} on umbes 500 mV, olenemata kile kasvatamise temperatuurist, J_{SC} ja FF vähenevad temperatuuri tõustes, mis võib olla tingitud kihi teralisest struktuurist, ja PCE langeb 2,5%-lt 1,7%-le, kui kile kasvatamise temperatuur tõuseb 200–260 °C. Saadud tulemused näitavad, et üheetapiline sadestusprotsess õhus ei võimalda valmistada morfoloogia ja koostise seisukohast päikeseelemendiks sobilike omadustega absorberkihte.

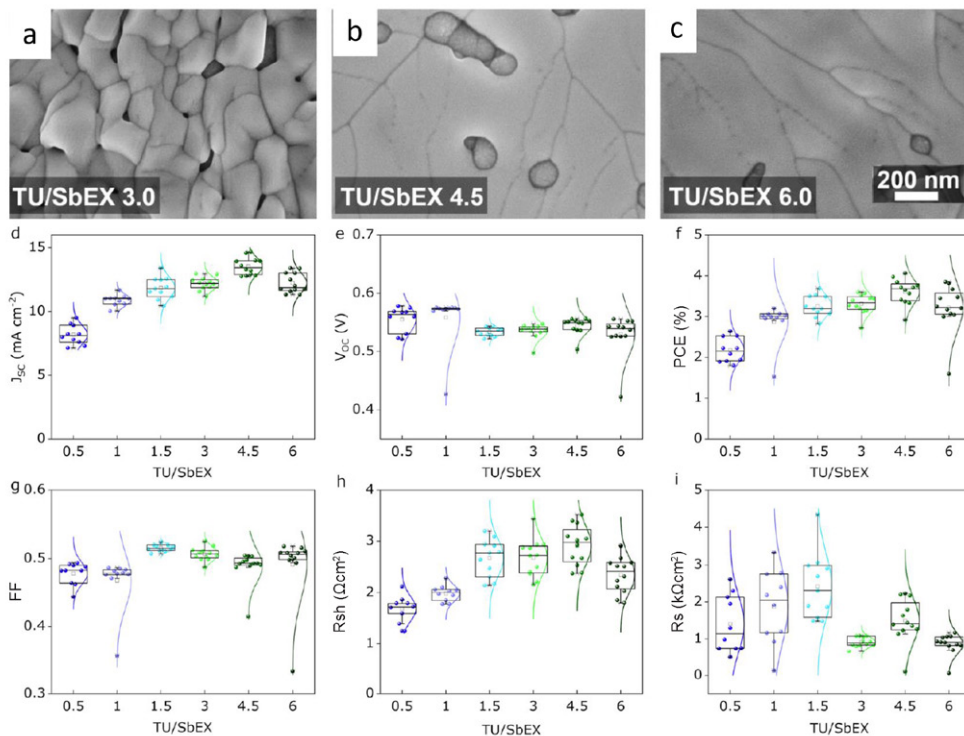
Järgnevalt rakendasime kristalliliste kilede saamiseks kaheastmelist protsessi, kus esmalt sadestati amorfseid Sb_2S_3 kiled õhus temperatuuril 165–215 °C, seejärel kiled kristalliseeriti, kuumutades temperatuuril 225 °C (Eensalu jt, 2022). Vastavalt SbEX termilise analüüsi tulemusele kasutasime Sb_2S_3 õhukeste kilede valmistamiseks lahuseid, millesse lisasime tioureat (TU) või tioatsetamiidi (TA) ülehulgas, *viz.* TU/SbEX ja TA/SbEX moolsuhteid vastavalt 3 ja 10. SEM analüüsi tulemuste kohaselt (joonis 5) saadakse tihedad ühtlased kiled juhul, kui kilede kasvatamise temperatuur on piisav lähteaine lagunemiseks. Kilede kristalliseerumiseks osutus sobivaks neid kuumutada vaakumis temperatuuril 225 °C. Kristalliseerunud Sb_2S_3 kiledele arvutati Eg väärtuseks 1,8 eV ja aatom-suhe S/Sb = 1,5 (TU-põhine) või S/Sb = 1,4 (TA-põhine). Saadud tulemus näitab,



Joonis 5. Skaneeriva elektronmikroskoobi (SEM) pildid Sb_2S_3 kilede pinnast ja rist-
lõikest. Sb_2S_3 kiled valmistati USP meetodil, pihustuslahuses SbEX/TU moolsuhe 1/3
ja SbEX/TA moolsuhe lahuses 1/10. Kiled sadestati temperatuuridel 165 °C (a, c, e, g)
ja 215 °C (b, d, f, h); kilede järelkuumutus viidi läbi 225 °C juures vaakumis
(2×10^{-1} Pa), kuumutamise aeg 30 min (Eensalu jt, 2022).

et Sb_2S_3 oksüdatsiooni ärahoidmiseks kilede kasvatamise protsessis USP meetodil
õhus on TU efektiivsem kui TA.

Toetudes (Eensalu jt, 2022) saadud tulemustele, jätkasime uuringuid, kasutades
TU oksüdeerimist pärssiva agendina, ja uurisime TU kontsentratsiooni mõju
SbEX lahuses (TU/SbEX = 0,5; 1; 3; 4,5; 6) Sb_2S_3 kilede koostisele ja seadise
omadustele. Kiled valmistati kaheastmelise tehnoloogia järgi, kus sadestamine
toimus 200 °C juures ja seejärel kristalliseerimine 260 °C juures lämmasti-
kus. Töös kasutasime kilede iseloomustamiseks XPS, XRF ja DLTS meetodeid
lisaks tavapärastele XRD, Raman, SEM, EDX, UV-Vis tehnikatele (Eensalu jt,
2023). XPS uuringud näitasid, et TU kontsentratsiooni tõustes pihustuslahuses
väheneb Sb-O hulk nii kile mahus kui pinnal. XRF analüüs näitas, et pärast
termilist töötlemist on kristallilised Sb_2S_3 kiled stõhhiomeetrilise koostisega, kui
TU/SbEX moolsuhe pihustuslahuses on 3 kuni 6. Seega tuleb faasipuhaste
stõhhiomeetrilise koostisega Sb_2S_3 absorberkihtide kasvatamiseks õhus USP
meetodil kasutada lahuseid, milles TU/SbEX > 3. SbEX prekursorainest valmis-
tatud Sb_2S_3 absorberkihi baasil valmistati päikeseelement, mille struktuur on
TCO/ TiO_2 / Sb_2S_3 /P3HT/Au. Seadise väljundparameetrite mõõtmised näitasid,
et J_{sc} kasvab 11 mA/cm² kuni 15 mA/cm² korreleeruvalt TU/SbEX moolsuhte
muutmisel 1 kuni 6 pihustuslahuses ja sellega kaasneva kile puhtuse tõusuga.
Samas V_{oc} ja FF praktiliselt ei sõltu kile kasvatamiseks kasutatud lahuse koos-
tistest ja nende väärtused jäävad vastavalt 560 mV ja 50% tasemele (joonis 6).



Joonis 6. Skaneeriva elektronmikroskoobi fotod Sb_2S_3 kile pinnast, kui kile on sadestatud lahusest, kus a) $\text{TU}/\text{SbEX} = 3.0$; b) $\text{TU}/\text{SbEX} = 4.5$, c) $\text{TU}/\text{SbEX} = 6.0$; d–i) päikeseelemendi TCO/ TiO_2 / Sb_2S_3 /P3HT/Au väljundparameetrite kastdiagrammid, Sb_2S_3 on valmistatud USP meetodil SbEX lahusest, milles TU/SbEX moolsuhe on 0.5 kuni 6.0 (Eensalu jt, 2023).

Päikeseelemendi kõrgeim PCE 4,1% saadi, kui absorberkihi kasvatamiseks kasutati lahust, milles TU/SbEX moolsuhe oli 4.5. Kokkuvõtlikult tõestasime, et SbEX on perspektiivne kloorivaba lähteaine Sb_2S_3 absorberkihtide valmistamiseks USP meetodil õhus, kui rakendada kaheastmelist tehnoloogiat ja kasutada modifitseeritud koostisega pihustuslahust.

NiO õhukesed kiled pihustussadestuse meetodil kui tuleviku aukjuhid päikeseelementides

Sb-kalkogeniidi õhukese absorberkihiga päikeseelementides kasutatakse praegusel ajal HTM-na peamiselt orgaanilisi ühendeid. Pikemas perspektiivis on anorgaanilised p-tüüpi juhtivusega metalli oksiidide kihid (NiO , MoO_3 , V_2O_5 jt) siiski jätkusuutlikumad tänu nende suuremale stabiilsusele, laiemale keelutsoonile, suuremale elektronide väljumistööle ja parematele laengukandjate transportomadustele, võrreldes orgaaniliste HTM-dega. Uurimisgrupp uuris õhukeste p-tüüpi juhtivusega NiO kilede sadestamise võimalusi pihustussadestuse meetoditel.

NiO õhukesed kiled valmistati pneumaatilise pihustuspürolüüsi meetodiga temperatuuridel 300–420 °C, kasutades lähteainena nikkelatsetaati ning erinevaid lahusteid (vesi, alkohol). NiO moodustumist kinnitasid XRD ja Ramani meetodid; kilede puhtust uuriti FTIR ja XPS meetoditel. Leiti, et sadestustemperatuur ja lahusti tüüp mõjutavad pihustatud NiO kilede struktuurseid ja optilisi omadusi ning kilede keemilist koostist (Chen jt, 2021). Vesilahusest valmistatud NiO kiled on polükristalsed, kristalliidi suurusega 4–10 nm, samas kui alkoholilahusest sadestatud kiled on amorfseid. Vesi- ja alkoholilahustest valmistatud NiO kilede keelutsooni laius on vastavalt 3,4 eV ja 4,0 eV, sõltumata sadestustemperatuurist. XPS ja FTIR analüüsi tulemused näitavad, et sadestustemperatuur on peamine tehnoloogiline parameeter, mis kontrollib OH⁻, C-O ning O-C = O funktsionaalsete rühmade sisaldust kiledes. NiO kihi O1s elektronorbitaali mõõtmistest saadud OH⁻/NiO suhe väheneb umbes 10 korda (1,35st 0,13-le), kui kile kasvatamise temperatuuri tõsta 300–420 °C.

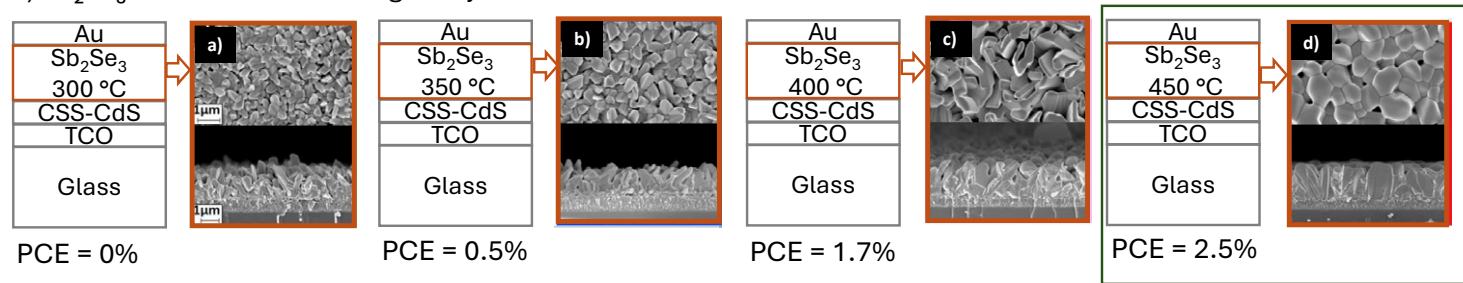
Kasutades lähteainena nikkelatsetüülatsetonaaati ja lahustajana etanooli, valmistati USP meetodil polükristallilised NiO kiled, mille E_g on 3,7 eV, kilede paksus on 30–70 nm sõltuvalt sadestustemperatuurist vahemikus 350–500 °C (Chen jt, 2022). Kelvini sondi mõõtmistest määrati Fermi nivoo energia 4,70 eV ja PYS mõõtmistest ionisatsiooni energia 5,41 eV. Kuna keelutsooni laius on 3,70 eV, siis Fermi nivoo asub 0,71 eV valentssooni põhjast ülevalpool, mis kinnitab, et USP meetodil sadestatud NiO kile on p-tüüpi pooljuht.

Saadud tulemused näitavad, et pihustusmeetodil on võimalik valmistada erinevatest lähteainetest optiliselt läbipaistvaid p-tüüpi juhtivusega NiO kilesid kui potentsiaalseid HTM kihte. Samas tuleb arvestada, et kasutatud lähteainete puhul tuleb saasteainetest vabade NiO kilede saamiseks sadestuse protsess viia läbi 400 °C kõrgematel temperatuuridel.

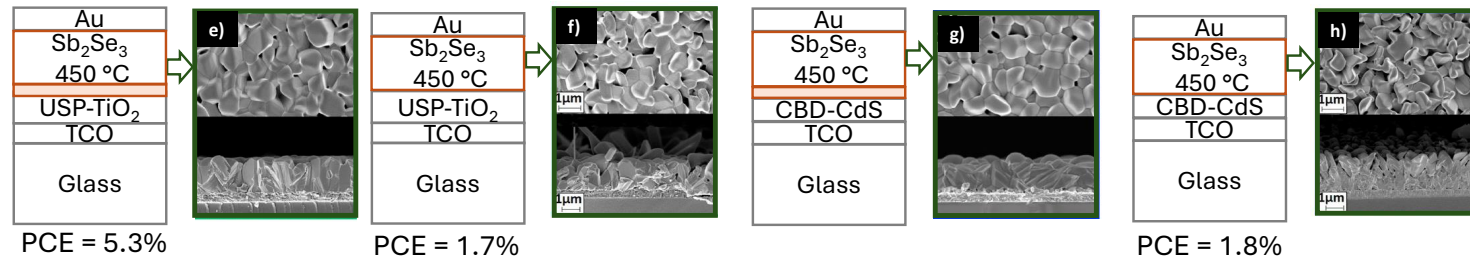
Lähidistantsilt sublimatsiooni (CSS) meetodil valmistatud Sb₂Se₃ absorberkihil põhinevad päikeseelemendid

CSS meetodil õhukesekilise materjali sadestamisel on oluline lähteaine sulamistemperatuur ja aur rõhk. Sb₂Se₃ sulamistemperatuur 608 °C ja kõrge aur rõhk (~1200 Pa 550 °C juures) teevad Sb₂Se₃ sobilikuks kongruentseks sublimatsiooniks CSS meetodil. CSS meetodil valmistatud Sb₂Se₃ päikeseelement koosneb järgmistest kihtidest: klaasalusele kantud valgust läbilaskev ja elektrit juhtiv metallioksiidi kiht (TCO), elektronide transportkiht (ETL), absorbermaterjali kiht ja metallkontakt. Päikeseelemendi klaas/TCO/ETL/Sb₂Se₃/Au struktuur on toodud joonisel 7. Uuringutes kasutasime kolme erinevat ETL kihti: CSS meetodil sadestatud CdS (CSS-CdS), keemiliselt lahusest sadestatud CdS (CBD-CdS) ja keemilise pihustuspürolüüsi meetodil sadestatud TiO₂ (USP-TiO₂). Väga olulise osa Sb₂Se₃ väljaarendustööst moodustas sadestusparameetrite optimeerimine, erinevate elektrontransportkihtide testimine, Sb₂Se₃ defektide ja seadises domineerivate rekombinatsioonimehhanismide analüüs (Spalatu jt, 2021; Krautmann jt, 2021; Koltsov jt, 2022; Gopi jt, 2023).

a) Sb_2Se_3 sadestamise strateegia väljatöötamine



b) Elektrontransportkihi ja idukihi mõju Sb_2Se_3 kasvule



Joonis 7. Sb_2Se_3 õhukese kile ja päikeseelemendi väljaarendus CSS meetodil, sõltuvalt a) Sb_2Se_3 sadestustemperatuurist, b) elektrontransportkihist ja Sb_2Se_3 idukihist (Spalatu jt, 2021).

Sb_2Se_3 õhukesekilelise absorbermaterjali ja päikeseelementide arendamise alfaasis keskendusime CSS sadestusstrateegia väljatöötamisele. Eesmärk oli leida optimaalsed sadestustingimused õhukeste konformsete kilede kasvuks ja mõista nende seost päikeseelemendi väljundparameetritega. Sadestusprotsessi optimeerimisel valisime Sb_2Se_3 lähteaine temperatuuriks 490 °C ja alustemperatuuri varieerisime vahemikus 300–450 °C. Temperatuurid olid valitud nii, et tagada õhukese kile kasvukiirus 1 µm/min. Tulemused näitavad (joonis 7), et saadud Sb_2Se_3 kile morfoloogia sõltub valitud sadestustemperatuurist. Kui 300–350 °C juures sadestatud Sb_2Se_3 kiledes on terad väiksemad ja nende paigutus pigem ebakorrapärane, siis 450 °C juures kasvatatud kiledes olid terad suuremad, ühtlasema suurusega ja kasvanud kolumnaarselt. Ühtlasem kile kasv väljendus ka päikeseelemendi kasuteguris, mis 450 °C juures sadestatud Sb_2Se_3 korral oli 2,5%. Järgmises etapis võrdlesime erinevate elektrontransportkihtide mõju 450 °C juures sadestatud Sb_2Se_3 kasvule ja leidsime, et USP- TiO_2 ja CBD- CdS ETL kihid ei taganud korrapärase mikrostruktuuriga Sb_2Se_3 moodustumist ja päikeseelemendi kasutegur jäi kõigest 2% juurde. Järgmises etapis kasutasime idukihi strateegiat, kus Sb_2Se_3 idukiht sadestati ETL kihile enne Sb_2Se_3 põhikihi sadestamist. ETL TiO_2 korral saavutasime kõrgeima kasuteguri 5,3%, mis tugines Sb_2Se_3 tihedale mikrostruktuurile. Lisaks sellele näitasid tagasihajuvate elektronide difraktsioon- ja röntgendifraktsioonanalüüsid, et Sb_2Se_3 kolumnaarsed kristalliterad joonduvad püstisemalt, kui materjalikiht sadestatakse eelnevalt valmistatud idukihi peale (Krautmann jt, 2021). TiO_2 kasutamine ETL kihina tagas ka kõrgema kvantefektiivsuse, mis on tingitud TiO_2 suuremast keelutsooni laiusest (3.2 eV) võrreldes CdS (2.4 eV) ETL-ga. Lisaks eeltoodule pärssis CdS kasutamist ETL-na päikeseelemendis veel Cd ja Se difundeerimine vastavalt CdS ja Sb_2Se_3 kihtidest, moodustades ETL ja absorberkihi piirpinnale CdSe vahekihi, mis oluliselt vähendab päikeseelemendi kasutegurit võrreldes TiO_2 kasutamisega.

Sb-kalkogeniididel põhinevatel materjalidel on keeruline defektstruktuur. Materjalis olevaid sügavaid defekte analüüsisime temperatuurist sõltuva kompleksjuhtivusspektroskoopia (TAS) meetodil ning mahtuvus-pinge mõõtmiste abil. TAS analüüsi tulemusena tuvastasime Sb_2Se_3 päikeseelemendis kolm aktivatsioonienergiat, mis on 0,4 eV, 0,5 eV ja 0,6–0,7 eV valentssooni maksimumi suhtes, kus madalamat energianivood seostasime sügavate aktseptordefektidega, nagu V_{Sb} või Se_{Sb} defekt. Mahtuvus-pinge mõõtmised Sb_2Se_3 seadistele viitavad defektide suurele tihedusele suurusjärgus 10^{17}cm^{-3} , samas kui vabade laengukandjate tihedus Sb_2Se_3 on umbes 10^{14}cm^{-3} . I-V kõverate temperatuursõltuvuse analüüsist leiti, et peamiseks rekombinatsioonimehhanismiks päikeseelemendis on piirpinna rekombinatsioon.

Lisaks töötasime välja kasvuprotokollid ka Sb_2S_3 , Bi_2S_3 kilede sadestamiseks lähidistantsilt sublimatsiooni (CSS) meetodil ja tuvastasime materjalide ja nendel põhinevate seadiste kitsaskohad, uurides nii 1D kristalliterade kasvu kui ka materjalide defektstruktuure (Krautmann jt, 2023; Koltsov jt, 2023).

Edasine uurimistöö Sb-kalkogeniidide õhukesekileliste päikeseelementide valas on suunatud materjali ja seadiste optimeerimisele, sealhulgas piirpindade optimeerimisele. Eesmärk on vähendada absorberkihis olevaid defekte erinevate järeltöötluste ja/või legeerimise kaudu ja seadise piirpindadel olevat laengu kandjate rekombinatsiooni, rakendades päikeseelementi struktuuris erinevaid vahekihte. Uurimistöö jätkub päikeseelementide rakendamise osas kahes peamises valdkonnas – poolläbipaistvad elektrit tootvad pinnad ja siseruumides tehisvalguses elektrit tootvad elemendid näiteks IoT seadiste toiteks.

Tänuõnad

Meie suurim tänu kuulub uurimisrühma endistele ja praegustele liikmetele ning Eesti ja rahvusvahelistele koostööpartneritele. Uurimistööd on finantseerinud EMP ETAG21014 „Poolläbipaistvate kahepoolsete õhukesekileliste päikeseplatade arendus uuenduslikeks rakendusteks“ S-BMT-21-1(LT08-2-LMT-K-01-003); ETAG PRG627 „Antimon-kalkogeniid õhukesed kiled järgmise põlvkonna pool-läbipaistvatele päikeseelementidele kasutamiseks elektrit tootvates akendes“; ETAG PSG689 „Õhukesekilelised vismutkalkogeniidid murrangulisele tulevase põlvkonna päikeseenergiatehnoloogiale“; teaduse tippkeskuse projektid TAR16016EK „Uudsed materjalid ja kõrgtehnoloogilised seadmed energia salvestamise ja muundamise süsteemidele“, TK210/TK210U8 „Jätkusuutliku rohevesiniku ja energiatehnoloogia tippkeskus“. Teadustööd on toetanud 952509-5GSOLAR ja CA21148-RENEW-PV.

VIITED

Chen, Z., Dedova, T., Oja Acik, I., Danilson, M., Krunk, M. 2021. Nickel oxide films by chemical spray: Effect of deposition temperature and solvent type on structural, optical, and surface properties. *Applied Surface Science*, 548, 1–9, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.149118>

Chen, Z., Dedova, T., Spalatu, N., Maticiuc, N., Rusu, M., Katerski, A., Oja Acik, I., Unold, T., Krunk, M. 2022. ZnO/NiO heterostructures with enhanced photocatalytic activity obtained by ultrasonic spraying of a NiO shell onto ZnO nanorods. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 648, 129366, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129366>

Eensalu, J. S., Katerski, A., Kärber, E., Weinhardt, L., Blum, M., Heske, C., Yang, W., Oja Acik, I., Krunk, M. 2019. Semitransparent Sb₂S₃ thin film solar cells by ultrasonic spray pyrolysis for use in solar windows. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 10, 2396–2409. DOI: 10.3762/bjnano.10.230

Eensalu, J. S., Mandati, S., Don, C., Finch, H., Dhanak, V., Major, J., Grzibovskis, R., Tamm, A., Ritslaid, P., Josepson, R., Käämbre, T., Vembris, A., Spalatu, N., Krunk, M., Oja Acik, I. 2023. Sb₂S₃ thin film solar cells fabricated

from an antimony ethyl xanthate based precursor in air. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15 (36), 42622–42636, <https://doi.org/10.1021/acsami.3c08547>

Eensalu, J. S., Tõnsuaadu, K., Adamson, J., Oja Acik, I., Krunks, M. 2022. Thermal decomposition of tris(O-ethylthiocarbonato)-antimony(III) – a single source precursor for antimony sulfide thin films. *J. Thermal Analysis and Calorimetry*, 147 (8), 4899–4913, <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10885-1>

Eensalu, J. S., Tõnsuaadu, K., Oja Acik, I., Krunks, M. 2022. Sb₂S₃ thin films by ultrasonic spray pyrolysis of antimony ethyl xanthate. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 137, 106209, <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.106209>

Gopi, S. V., Spalatu, N., Basnayaka, M., Krautmann, R., Katerski, A., Josepson, R., Grzibovskis, R., Vembris, A., Krunks, M., Oja Acik, I. 2023. Post deposition annealing effect on properties of CdS films and its impact on CdS/Sb₂Se₃ solar cells performance. *Frontiers in Energy Research*, 11, 1162576, <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1162576>

Juneja, N., Daskeviciute-Geguziene, S., Spalatu, N., Mandati, S., Katerski, A., Grzibovskis, R., Vembris, A., Karazhanov, S., Getautis, V., Krunks, M., Oja Acik, I. 2024, a. Employment of dopant-free fluorene-based enamines as innovative hole transport materials to boost the transparency and performance of Sb₂S₃ based solar cells. *Materials Science in Semiconductor Processing* 169, 107934, <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2023.107934>

Juneja, N., Jegorove, A., Grzibovskis, R., Katerski, A., Daskeviciene, M., Malinauskas, T., Vembris, A., Karazhanov, S., Spalatu, N., Getautis, V., Krunks, M., Oja Acik, I. 2024, b. Dopant-free fluorene based dimers linked with thiophene units as prospective hole transport materials for Sb₂S₃ solar cells. *Sustainable Energy & Fuels*, 8 (18), 4324–4334, DOI: 10.1039/d4se00472h

Juneja, N., Mandati, S., Katerski, A., Spalatu, N., Daskeviciute, S., Vembris, A., Karazhanov, S., Getautis, V., Krunks, M., Oja Acik, I. 2022. Sb₂S₃ solar cells with cost-effective and dopant-free fluorene-based enamine as hole transport material. *Sustainable Energy & Fuels*, 6, 3220–3229, DOI: 10.1039/d2se00356b

Koltsov, M., Gopi, S. V., Raadik, T., Krustok, J., Josepson, R., Grzibovskis, R., Vembris, A., Spalatu, N. 2023 Development of Bi₂S₃ thin film solar cells by close-spaced sublimation and analysis of absorber bulk defects via in-depth photoluminescence analysis. *Solar Energy Materials& Solar Cells*, 254, 112292, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112292>

Koltsov, M., Krautmann, R., Katerski, A., Maticiu, N., Krunks, M., Oja Acik, I., Spalatu, N. 2022. A post-deposition annealing approach for organic residues control in TiO₂ and its impact on Sb₂Se₃/TiO₂ device performance. *Faraday Discussions*, 239, 273–286, <https://doi.org/10.1039/D2FD00064D>

Krautmann, R., Josepson, R., Nedzinskas, R., Kondrotas, R., Gržibovskis, R., Vembris, A., Krunks, M., Oja Acik, I., Spalatu, N. 2023. Low processing temperatures explored in Sb_2S_3 solar cells by close-spaced sublimation and analysis of bulk and interface related defects. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 251, 112139, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.112139>

Krautmann, R., Spalatu, N., Gunder, R., Abou-Ras, D., Unold, T., Schorr, S., Krunks, M., Oja Acik, I. 2021. Analysis of grain orientation and defects in Sb_2Se_3 solar cells fabricated by close-spaced sublimation. *Solar Energy*, 225, 494–500, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.022>

Mandati, S., Juneja, N., Katerski, A., Jegorove, A., Grzibovskis, R., Vembris, A., Getautis, V., Dedova, T., Magomedov, A., Spalatu, N., Karazhanov, S., Krunks, M., Oja Acik, I. 2023. 4.9 % efficient Sb_2S_3 solar cells from semi-transparent absorbers with fluorene-based thiophene terminated hole conductors. *ACS Applied Energy Materials*, 6 (7), 3822–3933, <https://doi.org/10.1021/acsaem.2c04097>

Spalatu, N., Krautmann, R., Katerski, A., Kärber, E., Josepson, R., Hiie, J., Oja Acik, I., Krunks, M. 2021. Screening and optimization of processing temperature for Sb_2Se_3 thin film growth protocol: Interrelation between grain structure, interface intermixing and solar cell performance. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 225, 111045, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111045>



Vasakult: Nicolae Spalatu, Malle Krunks, Ilona Oja Açıık ja Atanas Katerski.
Foto: Arno Mikkor

Ilona Oja Açıık

Sündinud 17. novembril 1977

2001 Tallinna Tehnikaülikool, keemia- ja materjalitehnoloogia (BSc)

2003 Tallinna Tehnikaülikool, keemia- ja materjalitehnoloogia (MSc)

2007 Tallinna Tehnikaülikool, keemia- ja materjalitehnoloogia (PhD)

Töötanud Tallinna Tehnikaülikoolis alates 2002. aastast. Rahvusvaheline teadustöö kogemus mitmetes Euroopa ülikoolides ja uurimisasutustes. Teadustöö on suunatud uute materjalide väljatöötamisele, rakendades keemilisi sadestusmeetodeid, materjalide omaduste kujundamisele ning protsessi keemia uuringutele, sh termoaanalüütika valdkonnas, ning õhukeste kilede rakendamisele päikeseelementides.

Malle Krunks

Sündinud 23. mail 1949 Tallinnas

1967 Tallinna Reaalkool

1972 Tallinna Polütehniline Instituut, diplomeeritud elektroonikainsener

1985 Uurali Polütehniline Instituut, teaduste kandidaat, füüsikaline keemia

Töötanud Tallinna Tehnikaülikoolis aastast 1972, olnud kõigil ametipostidel insenerist juhtivteaduri ja tennuuri täisprofessorini, 2006–2008 Eesti Teaduste Akadeemia uurija-professor. Töötanud külalisteadurina Helsingi tehnikaülikoolis, Hannoveri päikeseenergeetika instituudis ja Kieli tehnikaülikoolis. Keemiliste kiletehnoloogiate uurimisgrupi asutaja ja uurimissuuna algataja Eestis, töötanud dekaani ja instituudi direktorina. Riigi teaduspreemiad tehnikateadustes 1985, 1998, 2009, Tallinna Tehnikaülikooli teenetemärk 2018, Valgetähe IV klassi teenetemärk 2018.

Praegune uurimisvaldkond hõlmab uudsete absorbermaterjalide õhukeste kilede tehnoloogiate ja seadiste struktuuri arendust poolläbipaistvate ja madalatel valguse intensiivsustel töötavate päikesepatareide loomiseks. Uurimistöö fookuses on materjalide sünteesi keemia teaduslikult põhjendatud sünteesiprotokollide koostamiseks, seadise koostekihtide füüsiko-keemiliste omaduste analüüs, orgaaniliste ja anorgaaniliste aukjuhtkihtidega päikesepatareide arendus ja omaduste analüüs.

Atanas Parashkevov Katerski

Sündinud 18. veebruaril 1969 Sofias

1987 Sofia Vasil Levski nimeline Keskkool

1994 Keemilise Tehnoloogia ja Metallurgia Ülikool, keemia tehnoloogia ja mikroelektroonika materjalid (Msc)

2011 Tallinna Tehnikaülikool, keemia ja materjalitehnoloogia (PhD)

Töötanud Tallinna Tehnikaülikoolis alates 2003. aastast teadurina, 2023. aastast vanemteadurina. Aastatel 1994–2003 töötas Bulgaaria Teaduste Akadeemia üldise ja anorgaanilise keemia instituudis keemikuna. Täiendanud ennast MaxLabis Lundis ja Vilniuse Ülikoolis.

Viimaste aastate uurimistöö hõlmab uudsete absorbermaterjalide õhukeste kilede sadestamise keemiliste tehnoloogiate (ultraheli pihustamine, keemiline

sadestamine lahusest, pindvurritamine, hüdrotarmaalne sadestamine) arendust efektiivsete poolläbipaistvate päikeseelementide jaoks, elektron- ja aukjuhtkihtide valmistamise ja pooljuhtkilede kiire kristalliseerimise tehnoloogiate väljatöötamist. Ta on oluliselt panustanud ultrahelipihustuse unikaalse seadmepargi konstrueerimisse ja automatiseerimisse, et tagada tehnoloogiliste protsesside korratavus ja edasine skaleeritavus.

Nicolae Spalatu

Sündinud 26. veebruaril 1986 Chişinăus

2008 Moldaavia Riiklik Ülikool, pooljuhtide füüsika (*Licentiate*)

2010 Moldaavia Riiklik Ülikool, teoreetiline füüsika (Msc)

2017 Tallinna Tehnikaülikool, keemia ja materjalitehnoloogia (PhD)

Töötanud Tallinna Tehnikaülikoolis alates 2014. aastast nooremteaduri ja teadurina, 2021. aastast vanemteaduri ja 2024. aastast nooremprofessori ametikohal. 2009–2013 töötas Moldaavia Riikliku Ülikooli füüsika ja tehnikateaduste fakultedis nooremteadurina.

2017. aastal III preemia üliõpilaste teadustööde riiklikul konkursil loodusteaduste ja tehnika valdkonnas, Taltech'i 2019. aasta arendustöö konkursil II koht. COST Renew-PV võrgustiku koordinaator ja mitmete rahvusvaheliste T&A projektide juht.

Viimaste aastate peamine uurimissuund on olnud lähidistantsilt sublimeerimise (CSS) tehnoloogia väljaarendamine ja optimeerimine Sb_2S_3 ja Sb_2Se_3 , Bi_2S_3 õhukesekileliste absorbermaterjalide sadestamiseks ja nende baasil päikeseelementide valmistamiseks. Uurimistöö hõlmab materjalide ja seadiste füüsiko-keemiliste omaduste, piirpindadel toimuvate protsesside ja defektstruktuuri uuringuid, tulemuste analüüsi ning seadiste väljundparameetrite interpretatsiooni.