

TIIVISTELMÄRAPORTTI

Luonnonmateriaalin heijastusominaisuuksia vastaava häivepinnoite

Mika Valden, Tampereen yliopisto (mika.valden@tuni.fi, +358 40 849 0261)
Harri Ali-Löytty, Tampereen yliopisto,
Tuomas Tinus, Tampereen yliopisto

Tiivistelmä

Sensorijärjestelmien jatkuva kehittyminen on avannut uusia tutkimussuuntia niin häiveteknologian kuin myös naamioitumistekniikoiden aloilla. Kohteen spektraalin tunnistettavuuden hallittavuus (Signature Management) on muodostunut käsitteeksi, jolla kuvataan niitä toimenpiteitä, joilla saadaan kohde erottamattomaksi ympäristöstään. Tässä hankkeessa suunniteltiin ja valmistettiin Al_2O_3 - ja TiO_2 -ohutkalvoista kerrosmaisia pinnoitteita lasin, Si-kiekkon ja metallien päälle, joiden heijastavuus vastasi kaarnan ja kanervan heijastuspektrejä. Suunnittelu toteutettiin simuloimalla valmistettavien ohutkalvorakenteiden optiset ominaisuudet tavoitteita vastaaviksi. Tämän jälkeen ohutkalvorakenteet kasvatettiin käyttäen atomikerroskasvatus (ALD)- ja ionisputterointi (IBS)-menetelmiä. Valmistetut ohutkalvorakenteet toistivat erinomaisesti koko hyperspektrikuvantamisessa käyttävän spektrialueen 400 - 1800 nm lasi- ja Si-alustoilla. Metallialustoilla tarvitaan riittävän paksu välikerros ohutkalvorakenteen ja metallialustan väliin, jotta spektrivaste saadaan optimaaliseksi.

1. Johdanto

Kohteen spektraaliin tunnistettavuuteen voidaan vaikuttaa teknisin ratkaisuin riippuen sähkömagneettisen spektrin aallonpituuskaistasta, jolta halutaan suojautua. Esim. tietyillä aallonpituuskaistoilla tapahtuvalta tiedustelulta voidaan suojautua peittämällä kohde, jolloin kohteen suojattavuuteen vaikuttaa kohteen muoto. Optisen spektrikaistan kattavalta tiedustelulta suojautuminen edellyttää poikkeuksetta kohteen pintarakenteen optimointia. Samat fysikaaliset periaatteet ja menetelmät, joita sovelletaan heijastuksenestopinnoitteiden valmistamiseen pätevät optisiin pinnoitteisiin, joiden heijastusominaisuudet suunnitellaan vastaamaan kohteen ympäristöä [Rau2011].

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

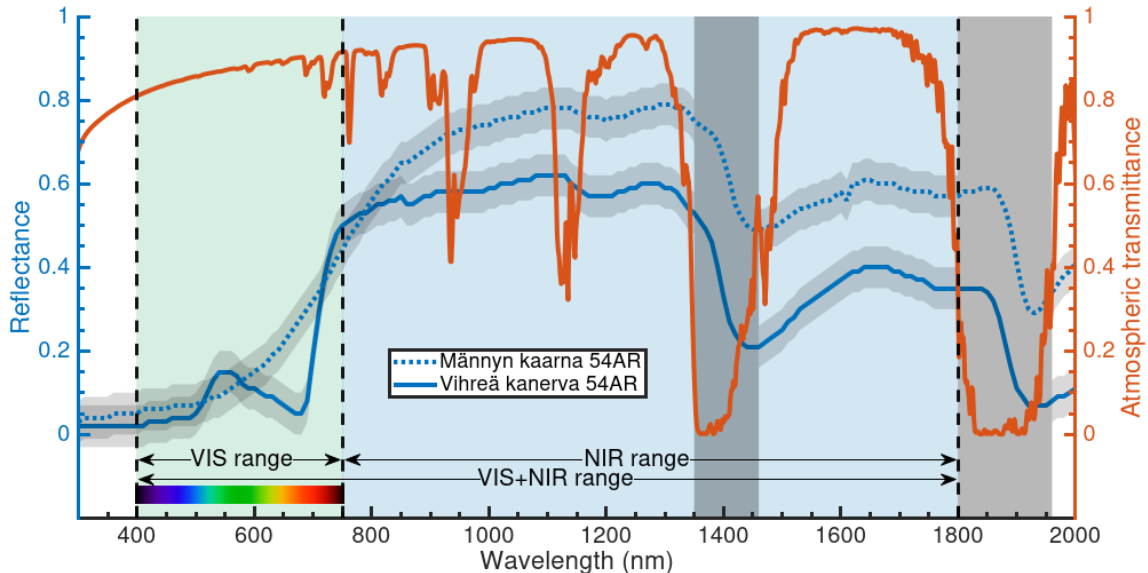
(Tutkimuskysymysten tarkempi erittely ja suunnitelma tutkimuksen toteutuksesta)

Tässä hankkeessa tavoitteeksi asetettiin kehittää naamiointipinnoite, jolla pyritään luonnonmateriaalien heijastusominaisuuksiin. Pinnoite soveltuu kriittisiin kohteisiin, joiden maastouttamiseen naamioverkko ei sovellu (esim. liikkuvat kohteet, anturit ja antennit). Pinnoite perustuu optiseen suodatukseen dielektrisistä materiaaleista koostuvassa monikerrosohutkalvorakenteessa ja se toteutettiin kahdella eri ohutkalvokasvatusmenetelmällä; ionisputterointimalla (IBS) ja atomikerroskasvatuksella (ALD). Ohutkalvokasvatusmenetelmien käyttäminen mahdollistaa häivepinnoitteen optisten ominaisuuksien tarkan optimoinnin. Eriyisesti ALD-menetelmä soveltuu muodoltaan monimutkaisten kappaleiden pinnoittamiseen.

Luonnonmateriaaleiksi valittiin puolustusvoimien ehdotuksesta männyn kaarna ja vihreä kanerva, joiden heijastusspektrit on esitetty Kuvassa 1. Kuvaan on myös merkitty ilmakehän

Postiosoite	Käyntiosoite	Puhelin	s-posti, internet
Postadress	Besöksadress	Telefon	e-post, internet
Postal Address	Office	Telephone	e-mail, internet
MATINE/Puolustusministeriö	Eteläinen Makasiinikatu 8 A	Vaihde 295 160 01	MATINE.plm@gov.fi
PL 31	00130 Helsinki		www.defmin.fi/matine
FI-00131 Helsinki	Finland		
Finland			

läpäisy spektri sekä tutkimuksessa käytetyt aallonpituusalueet.



Kuva 1. Hankkeessa tutkittujen luonnonmateriaalien heijastusspektrit; männyn kaarna ja vihreä kanerva (siniset käyrät), ilmakehän läpäisy spektri (oranssikäyrä) sekä tutkimuksessa käytetyt aallonpituusalueet.

Kuvassa 2 on esitettyä kuvat männyn kaarnasta sekä vihreästä kaarnasta.



Kuva 2. Vasemmalla valokuva männyn kaarnasta ja oikealla vihreästä kaarnasta.

Hankkeessa validoitiin seuraavat tutkimuskysymykset:

1. Dielektristen ohutkalvorakenteiden heijastusominaisuudet voidaan optimoida laskennallisesti riittävällä tarkkuudella häivesovellusten kannalta huomioiden pinnoitettava alustamateriaali.
2. ALD-menetelmällä kasvatetun ohutkalvorakenteen optiset ominaisuudet vastaavat IBS-menetelmällä kasvatetun kalvon optisia ominaisuuksia, jolloin ohutkalvorakenteiden simulointi tarjoaa riittävät fysikaaliset perusteet kasvatettujen ohutkalvorakenteiden ominaisuuksille.
3. Yhdistämällä IBS- ja ALD-menetelmät monikerrosrakenteiden kasvattamisessa kyetään pinnoittamaan muodoiltaan monimutkaisia kappaleita sekä huomioimaan diffuusiheijastus niin, että heijastusominaisuudet vastaavat kohteen ympäristön mukaan mallinnettua heijastusspektriä riittävällä tarkkuudella.

3. Aineisto ja menetelmät

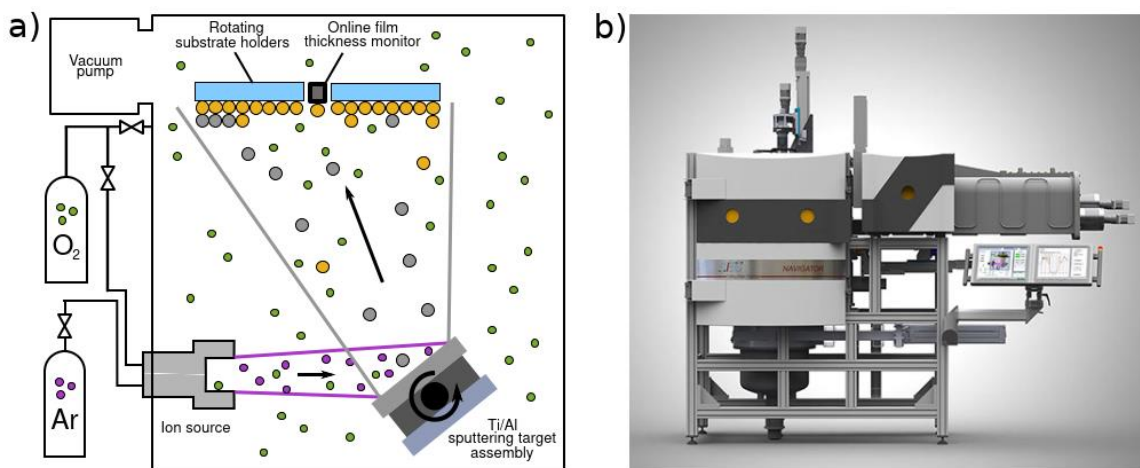
(Tutkimuksen teoreettisen viitekehyksen kuvaus, käytetty materiaali ja menetelmät)

Dielektriohutkalvoista valmistetun häivepinnoitteen toiminta perustuu sähkömagneettisen säteilyn interferenssiin ohutkalvorakenteessa [Reu2016]. Optimoimalla monikerroskalvoraakenne, voidaan kalvon heijastusspektri muokata vastaamaan luonnon kohteen heijastusominaisuuksia. Häivepinnoite valmistettiin dielektrimateriaaleista, joilla on korkea ja matala taitekerroin, n . Valitsimme ohutkalvomateriaaleiksi TiO_2 ($n = 2.6$) ja Al_2O_3 ($n = 1.7$), koska näiden materiaalien molekulaarinen rakenne on riippumaton useimmista ympäristöllisistä olosuhdemuuttujista. Tämä takaa pinnoitteiden soveltuvuuden muuttuviin, vaativiin olosuhteisiin.

Tutkimus toteutettiin Tampereen yliopiston fotonikan laboratoriossa hyödyntäen pintatieteen tutkimusryhmän henkilöstöä ja osaamista. Hankeen toteutusta tuki fotonikan tutkimuksen ja innovaatioiden osaamiskeskittymä PREIN (<https://prein.fi/home>), joka kuuluu Suomen Akatemian Lippulaiva-ohjelmaan.

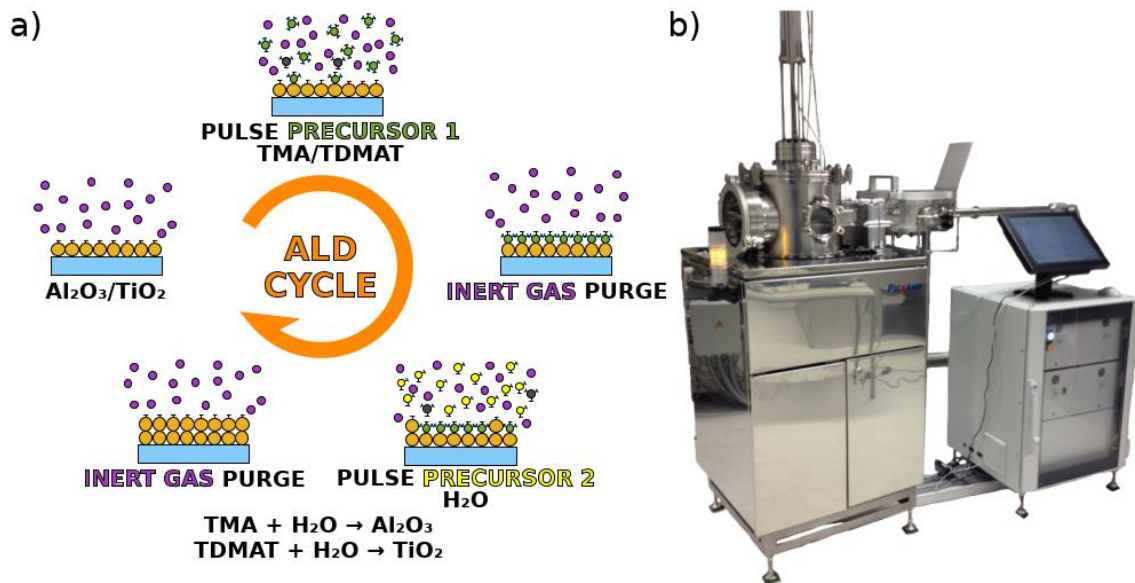
Ohutkalvorakenteiden heijastusvastetta simuloitiin käyttämällä Open Filters -ohjelmaa [Lar2008] hyödyntäen todellisista kalvorakenteista saatuja heijastusspektrejä.

Al_2O_3 - ja TiO_2 -ohutkalvorakenteita kasvatettiin Kuvassa 3 esitellyllä ionisputterointilaitteella.



Kuva 3. a) Ionisputterointideposition periaatekuva ja b) CEC Navigator IBS-laitteisto. [Star2017]

ALD:llä kasvatetuissa ohutkalvoissa käytettiin Kuvassa 4 havainnollistettua laitteistoa.



Kuva 4. a) ALD-kasvatuksen periaatekuva. b) Picosun Sunale ALD R200 Advanced Reactor-laitteisto.

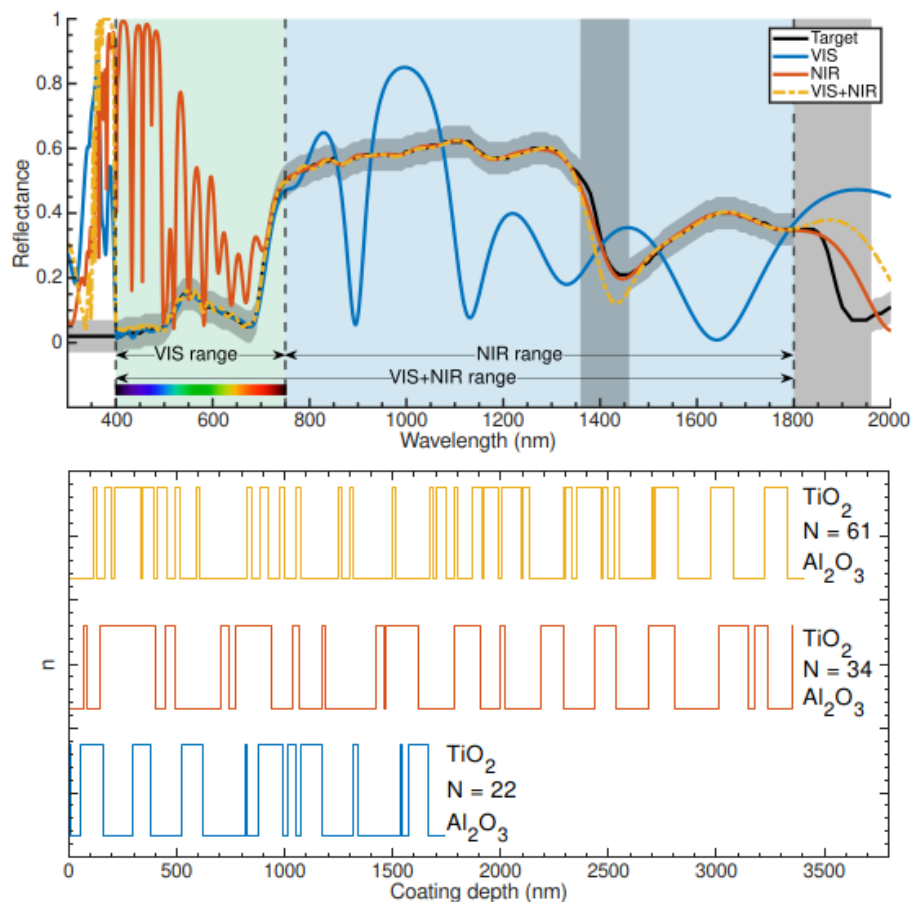
Lisäksi ohutkalvojen materiaaliominaisuuksia tutkittiin ellipsometrillä, pyyhkäiselektronimikroskoopilla sekä profilometrillä. Ohutkalvojen optisia ominaisuuksia tutkittiin puolestaan spektrofotometrillä sekä hyperkamerakuvauksella.

4. Tulokset ja pohdinta

Projektissa kehitettiin tapa valmistaa dielektriohutkalvopinnoite, jonka heijastusominaisuudet vastaavat valittua luonnonmateriaalia. Pinnoitteen toiminta perustuu valon interferenssiin ohutkalvorakenteessa. Menetelmässä ensin mallinnettiin pinnoitteen kerrosrakenne siten että sen heijastusspektri vastasi tavoitetta. Tämän jälkeen pinnoite kasvatettiin ohutkalvomenetelmällä. Tässä projektissa pinnoitteet toteutettiin IBS- ja ALD-menetelmillä. Perinteiseen IBS-menetelmään verrattuna ALD-menetelmä soveltuu myös muodoiltaan hankalien kolmiulotteisten kappaleiden pinnoittamiseen. Lopuksi pinnoitteen onnistuminen arvioitiin vertaamalla mitattua ja mallinnettua heijastusspektriä.

Ohutkalvorakenteen heijastusspektrin mallinnus toimi työn lähtökohtana. Ensiksi tutkittiin mallinnuksella menetelmän soveltuvuutta eri alustamateriaaleille ja eri aallonpituusalueille. Rajasimme tutkittavat aallonpituusalueet välille 400–1800 nm, joka vastaa modernien hyperspektrikameroiden mitta-alueita. Menetelmä on kuitenkin sovellettavissa myös valitun aallonpituusalueen ulkopuolelle. Valittujen pinnoitemateriaalien tulee olla läpinäkyviä koko aallonpituusalueella, joka asettaa TiO₂ tapauksessa kuvannettavan aallonpituusalueen alarajaksi 400 nm. Heijastusspektrin hallinta pitemmillä aallonpituuksilla edellyttää paksumpia pinnoitteita, joiden toteutuksen kannattavuus ohutkalvomenetelmillä on kyseenalainen. Rajasimme pinnoitteen paksuuden 10 µm, joka on vielä toteutettavissa IBS- ja ALD-menetelmillä. Vaikka pinnoitteen paksuudelle ei ole ylärajaa, on kalvon kasvatusaika suoraan verrannollinen kalvon paksuuteen, ja menetelmäkohtaiset kasvunopeudet ovat luokkaa 0.3 µm/h (IBS) ja 0.03 µm/h (ALD). Mallinnuksen tavoitteena oli saavuttaa riittävän hyvä spektrivaste, jolle asetettiin ehdoksi ±5 % poikkeama heijastuksessa. Mallinnus ei tuota yksikäsitteistä ratkaisua. Esimerkiksi yhden kerroksen lisäämisellä tai poistamisella kymmenistä kerroksista koostuvan pinnoitteen spektrivasteeseen on vain pieni vaikutus.

Kuvassa 5 on esitetty mallinnustulokset $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ -pinnoitteiden ohutkalvorakenteista, jotka tuottavat Vihreää kanervaa vastaavan heijastusspektrin eri aallonpituusalueilla (VIS, NIR, VIS+NIR) lasialustalla. Mallinnus tuotti hyvän spektrivasteen valitulla aallonpituusalueella ja alueen ulkopuolella havaittiin voimakas interferenssikuvio. Pinnoitetta kuvaa sen kokonaispaksuus ja $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ -kerrosten lukumäärä. Pinnoitteen paksuus riippuu aallonpituusalueesta. Näkyvän valon (VIS, 400–700 nm) alueelle rajoittuva pinnoite oli ohuempi (1,7 μm), kun taas lähi-infrapuna-alueelle (NIR, 700–1800 nm) tarvittiin paksumpi (3,4 μm) pinnoite. Molemmat alueet (VIS+NIR, 400–1800 nm) kattava pinnoite ei ollut paksumpi kuin NIR-pinnoite, mutta koostui useammasta kerroksesta (61 vs. 31). Voidaankin todeta, että pinnoitteen paksuus riippuu tavoitteeksi asetetun aallonpituusalueen ylärajasta, kun taas kerrosten lukumäärää kasvattamalla saadaan aikaiseksi tarkempi spektrivaste.



Kuva 5. $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ -pinnoitteen ohutkalvorakenteen mallinnus lasialustalle Vihreän kanervan heijastusspektrin (=Target) mukaan VIS-, NIR- ja VIS+NIR-aallonpituusalueille. Mallinnusta vastaavat $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ -kerrosrakenteet on esitetty alakuvassa.

Pinnoitteen heijastusspektri riippuu valittujen kalvomateriaalien taitekertoimien lisäksi alustan taitekertoimesta, mistä johtuen pinnoitteen rakenne on alustakohtainen. Valitsimme tutkittaviksi alustamateriaaleiksi lasin, piin, teräksen ja alumiinin. Taulukossa 1 on esitetty menetelmän soveltuvuus eri tapauksissa, kun pinnoitteen maksimipaksuus on rajattu 10 μm . Lasin (kvartsi) pinnoittaminen häivepinnoitteella onnistui koko aallonpituusalueella (VIS–NIR, 400–1800 nm). Piipinnalle voitiin toteuttaa häivepinnoite vain VIS-alueella. Teräs- ja alumiinipinnoille menetelmä ei soveltunut sellaisenaan. Alustakohtaiset erot johtuvat niiden taitekertoimista. Lasin taitekerroin ei juuri muutu VIS–NIR -alueella, joka on optimaalinen lähtökohta häivepinnoitteelle. Pii ei ole läpinäkyvä VIS-alueella, mikä pienentää

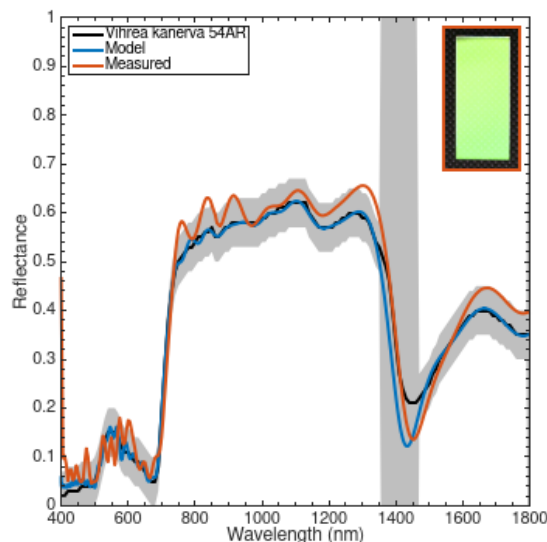
valon takaisinheijastusta ja täten pinnoitteen kompleksisuutta. Pii muuttuu kuitenkin läpinäkyväksi >1100 nm aallonpituuksilla, mistä johtuen valon takaisinheijastus voimistuu, eikä <10 µm pinnoitteella enää saavuteta hyvää spektrivastetta. Alumiini ja teräs ovat metalleja ja molempien taitekertoimet muuttuvat VIS–NIR-alueella voimakkaasti, mistä johtuen <10 µm häivepinnoitteella ei saatu tuotettua tavoiteltua spektrivastetta. Riittävän paksun välikerroksen avulla, esimerkiksi 5 µm piikalvo, onnistuttiin kuitenkin mallintamaan häivepinnoite myös alumiini- ja teräspinnalle VIS-alueella. Välikerroksen avulla menetelmä onkin sovellettavissa myös optisesti haastaville alustamateriaaleille.

Taulukko 1. Esimerkki alustamateriaalin, aallonpituusalueen ja tavoitespektrin vaikutuksesta tarvittavan TiO₂-Al₂O₃ pinnoitteen kerrosten lukumäärään ja paksuuteen.

Kalvon paksuus (kerrosten lkm)	Männyn kaarna VIS	Vihreä kanerva VIS	Vihreä kanerva NIR	Vihreä kanerva VIS+NIR
Lasi	840 nm (17)	1350 nm (24)	3360 nm (34)	3400 nm (61)
Pii	450 nm (10)	1040 nm (16)	>10000 nm	
Teräs*	>10000 nm			
Alumiini*	>10000 nm			

*Riittävän paksun välikerroksen, esim. 5 µm piikalvo, avulla käyttyy kuten välikerrosmateriaali.

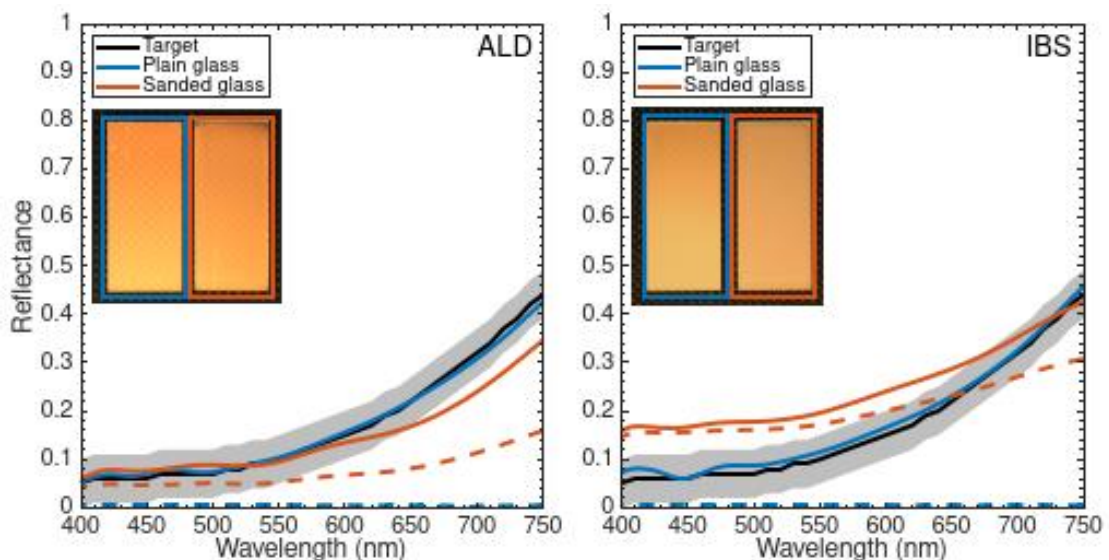
Menetelmän toimivuutta tutkittiin kasvattamalla häivepinnoitteita lasialustoille. Kuvassa 6 on esitetty vertailu IBS-menetelmällä kasvatetun ja mallinnetun kerrosrakenteen spekulaariheijastusspektrien välillä Vihreän kanervan tapauksessa laajimmalla VIS–NIR-aallonpituusalueella (400–1800 nm). Muiden aallonpituusalueiden (VIS, NIR) ja kohteiden (Männyn kaarna) tulokset olivat vastaavanlaiset. Kuvassa havaitaan pinnoitteen toistavan hyvin kohteen spektrin pääpiirteet: vihreälle värille tyypillisen piikin kohdassa 550 nm sekä niin kutsutun NIR-tasanteen välillä 750–1300 nm. Pinnoitteen heijastusspektrissä havaittava mallinnuksesta poikkeava interferenssikuvio (aaltokuvio) syntyy pienistä poikkeamista pinnoitteen kerrosrakenteen ja mallinnuksen välillä.



Kuva 6. IBS menetelmällä lasialustalle kasvatettu Vihreän kanervan heijastusspektriä vastaava häivepinnoite. TiO₂-Al₂O₃ pinnoitteen paksuus on 3400 nm ja siinä on 61 kerrosta. Heijastuskulma on 8°. Sisäkuvassa näkyy valokuva näytteestä (1 mm × 15 mm × 35 mm lasilevy).

Ohutkalvopinnoitteiden haasteena on heijastusspektrin kulmariippuvuus ja korkea kiilto. Käytännössä pinnoite näyttää eri suunnista katsottuna eri väriseltä. Heijastusspektrin kulmariippuvuuteen voidaan vaikuttaa alustan pintarakenteella. Kuvassa 7 on esitetty lasilevyn

hionnan vaikutus häivepinnoitteen heijastusspektriin ALD- ja IBS-menetelmien tapauksessa. Molemmilla ohutkalvomenetelmillä saavutettiin odotetusti erinomainen spektrivaste *kokonaisheijastuksen* tapauksessa, kun alustana oli läpinäkyvä lasilevy. *Diffuusiheijastusspektri* on vastaavissa tapauksessa lähellä nollaa, sillä käsittelemätön läpinäkyvä lasilevy ei sirota valoa. Mattapintaiseksi hiotun lasilevyn tapauksessa ei saavutettu yhtä hyvää spektrivastetta kokonaisheijastuksen tapauksessa, mutta hionnalla saatiin merkittävästi vaikutettua näytteen diffuusiin heijastukseen. ALD-menetelmällä saavutettiin hieman IBS-menetelmää parempi spektrivaste hiotun lasilevyn tapauksessa. Ohutkalvorakenne oli molemmissa tapauksissa mallinnettu spekulaariheijastuksen (heijastuskulma 0°) mukaan, eikä pintarakenteen optimointiin kiinnitetty tässä projektissa huomiota. Todettakoon, että diffuusiin heijastukseen pystytään tehokkaasti vaikuttamaan erilaisten pintarakenteiden avulla ja pintarakenteen optimoinnin avulla voidaan merkittävästi pienentää ohutkalvohäivepinnoitteen heijastusspektrin kulmariippuvuutta.

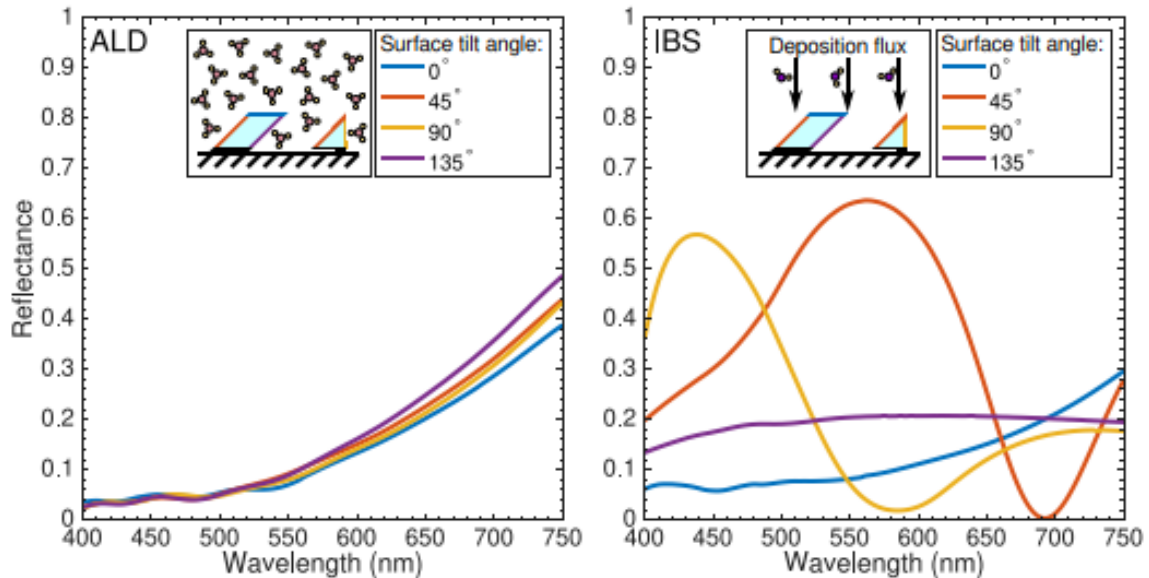


Kuva 7. ALD- (vasen kuva) ja IBS- (oikea kuva) menetelmillä lasialustoille kasvatetut Mänyn kaaran heijastusspektriä vastaavat häivepinnoitteet. Toinen lasialustoista on hiottu mattapintaiseksi (oranssi kehys) ja toinen on läpinäkyvä (sininen kehys). Kokonaisheijastus on merkitty yhtenäisellä viivalla ja diffuusiheijastus katkoviivalla. Sisäkuvina on valokuvat näytteistä (1 mm × 15 mm × 35 mm lasilevyt).

ALD- ja IBS-menetelmien fysikaaliset toimintaperiaatteet poikkeavat toisistaan. IBS on fyysikaalinen kaasufaasikasvatusmenetelmä, jota kuvaa kalvon kasvu kondensaation kautta paikkaan, jonka kaasuvuo kohtaa. Näin ollen kalvo kasvaa vain kaasulähdettä kohden oleville tasoille. Tasapaksuisen kalvon kasvatus edellyttää kappaleelta pyörähdyssymmetriaa ja pyöritystä kasvatuksen aikana. ALD on pintaohjattu kemiallinen kaasufaasikasvatusmenetelmä, jolla kalvo kasvaa prekursorikaasumolekyylien adsorption rajoittamien pintareaktioiden kautta. Kasvu tapahtuu tasaisesti kappaleen kaikilla pinnoille, jotka kasvatuksessa käytettävät prekursorikaasut tavoittavat. ALD mahdollistaakin häivepinnoitteen valmistamisen muodoiltaan hankalien kolmiulotteisten tai huokoisten alustojen pinnalle.

Kuvassa 8 on havainnollistettu eroa ALD- ja IBS-menetelmien välillä kasvattamalla häivepinnoite lasisen prisman päälle. ALD-menetelmän tapauksessa prisman eri tasoilta mitatut heijastusspektrit vastasivat hyvin toisiaan ja tavoitetta. IBS-menetelmä tuotti tavoitetta vastaava heijastusspektrin vain sputterointilähdettä kohden olevalla tasolla (0°). Muihin suuntiin kallistetuilta tasoilta mitatut heijastusspektrit poikkesivat merkittävästi tavoitteesta ja toisistaan. IBS-menetelmä tuottaa kallistetulle tasolle ohuemman pinnoitteen, joka muut-

taa heijastusspektrin. ALD-menetelmällä pinnoite kasvaa myös kulman takana sijaitsevalle tasolle (135°), joka säilyy IBS-menetelmällä paljaana.



Kuva 8. ALD- (vasen kuva) ja IBS- (oikea kuva) menetelmillä lasisen prisman päälle kasvatetut Männyn kaarnan heijastusspektriä vastaavat häivepinnoitteet. Prisman eri tasoilta mitatut heijastusspektrit on indeksoitu tason kallistuskulman mukaan. Tavoitespektri on sama kuin kuvassa 7 ja se on jätetty selkeyden vuoksi pois.

5. Loppupäätelmät

Hyperspektrikameroiden kehittyminen ja yleistyminen tiedustelussa on asettanut aiempaa tiukemmat vaatimukset kohteen naamiomiselle. Projektin tavoitteena oli kehittää tapa valmistaa optiseen suodatukseen perustuva häivepinnoite, jonka heijastusominaisuudet vastaavat valittua luonnonmateriaalia ja osoittaa menetelmän toimivuus kasvattamalla pinnoitteita IBS- ja ALD-menetelmillä. Projektissa kehitetty menetelmä tuotti häivepinnoitteen, jonka heijastusspektri vastasi tarkasti valittua luonnonmateriaalia modernien hyperspektrikameroiden mittausalueella (VIS-NIR, 400–1800 nm).

Häivepinnoite on alustakohtainen ja optisesti haastavien materiaalien tapauksessa kappale tarvitsee välikerroksen. Häivepinnoitteen heijastusspektri on lisäksi kulmariippuva, joka on huomioitavissa alustan pintarakenteen muokkauksella. Projektissa osoitettiin ALD-menetelmän mahdollistavan häivepinnoitteen valmistamisen muodoiltaan hankalien kolmiulotteisten kappaleiden tai epätasaisten pintojen tapauksessa, joiden pinnoittaminen perinteisellä IBS-menetelmällä ei ole mahdollista tai tuottaa epätasaisen kalvorakenteen. Yhdistämällä kappaleen esipinnoitus, pintarakenteen muokkaus ja ALD-menetelmällä valmistettu dielektriohukalvorakenne, onkin olemassa hyvät teoreettiset lähtökohdat jatkokehittää häivepinnoite, jonka heijastusspektri ei riipu alustamateriaalista eikä ole kulmariippuva.

Kehitetty häivepinnoite soveltuu parhaiten naamiomaan kohteet, joiden ympäristö ei muutu, kuten paikallaan olevat kohteet maassa tai liikkuvat kohteet taivaalla. Lisäksi häivepinnoitteen sovelluskohteisiin vaikuttavat kustannustekijät, valmistusaika ja pinnoitettavan kappaleen koko. Vaikka esitetyt pinnoitteet on valmistettu edullisista materiaaleista (TiO_2 ,

Al₂O₃) on IBS- ja ALD-menetelmien edellyttämät puhtaat lähtöaineet arvokkaita. Raaka-ainekustannuksia suurempana rajoittavana tekijänä pidetään kuitenkin usein ohutkalvokenteiden kasvatukseen kuluva-aikaa. NIR-alueen kattavan häivepinnoitteen valmistus perinteisellä ALD-menetelmällä, jossa reaktiokammio huuhdellaan inertillä kaasulla prekursoripulssien välillä, kestää noin viikon. Perinteisesti ALD-ohutkalvoja on sovellettu korkeintaan muutamien kymmenien nanometriä paksuisten kalvojen valmistamiseen esimerkiksi puolijohdoteollisuuden tarpeisiin. Suurimmat kaupalliset ALD-laitteistot soveltuvat 1,3 m × 2,4 m (levymäisten) kappaleiden pinnoittamiseen. Lisäksi on kehitetty menetelmiä kasvattaa ALD-kalvo rullalta-rullalle. Suurempaan volyyymiin soveltuvia ALD-laitteistoja onkin kehitetty teollisuuden tarpeiden mukaan ja uudet sovellukset, kuten tässä projektissa esitetty häivepinnoite, nopeuttavat myös laitteistojen kehitystyötä.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Hankkeen tutkimustuloksia esiteltiin MATINE-vuosiseminaareissa. Lisäksi hankkeesta valmistui Tuomas Tinuksen diplomityö: "Multilayer thin film-based hyperspectral camouflage coatings", 2022.

Lähdeluettelo:

[Rau2011] H.K. Raut, V.A. Ganesh, A.S. Nair, S. Ramakrishna, Antireflective coatings: A critical, in-depth review, *Energy Environ. Sci.* 4 (2011) 3779–3804. doi:10.1039/C1EE01297E.

[Reu2016] J. Reuna, Antireflective Coatings for Multi-junction Solar Cells, MSc Thesis, Tampere University of Technology, 2016.

[Star2017] <http://dspace.cc.tut.fi/dpub/handle/123456789/24495> (accessed June 1, 2017). Starke, D. K. Technology - Cutting Edge Coatings. URL: <https://cutting-edge-coatings.com/technology-ion-beam-sputtering-deposition.html> (visited on 04/26/2022).

[Lar2008] Larouche, S. and Martinu, L. OpenFilters: open-source software for the design, optimization, and synthesis of optical filters. *Applied Optics* 47.13 (May 1, 2008). Number: 13, p. C219. DOI: 10.1364/AO.47.00C219.
