

TIIVISTELMÄRAPORTTI

PLASMONIST INFRAPUNAILMAISIMET

Kirsi Tappura
VTT, PL 1300, 33101 Tampere
kirsi.tappura@vtt.fi

Tiivistelmä

Infrapunailmaisimet ovat aktiivisessa käytössä erilaisissa puolustus- ja turvallisuusalan tehtävissä tyypillisinä sovellutusalueita kohteiden etsiminen tai tarkkailu olosuhteissa, joissa näkyvyys on huono, sekä kemiallisten aineiden/aseiden tunnistaminen. Huolimatta erilaisten infrapunailmaisimien laajasta kaupallisesta saatavuudesta hyvän suorituskyvyn (kuvantavat) infrapunailmaisimet ovat edelleen kalliita ja kookkaita johtuen muun muassa niiden vaatimasta jäähdytyksestä. Loppukäyttäjien toiveista huolimatta kohtuullinen hinta ja helppokäyttöisyys yhdistettynä hyvään suorituskykyyn eivät vielä toteudu nykyisissä infrapunailmaisimissa.

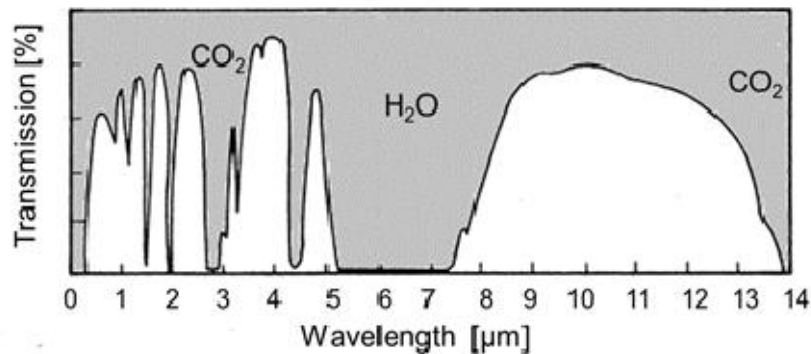
Hankkeessa tutkittiin uusien plasmonisten nanorakenteiden soveltuvuutta ja mahdollisuuksia infrapunailmaisimien suorituskyvyn ja toiminnallisuuden parantamiseen. Kaksivuotiseksi suunnitellun hankkeen ensimmäisenä vuonna (2015) keskityttiin sähkömagneettisen säteilyn absorptioon parantamiseen ilmaisimateriaaleissa plasmonisten rakenteiden sirontaominaisuuksien ja kentän vahvistamisen räätälöinnin keinoin.

Tehdyt teoreettiset simulaatiot osoittavat, että valittujen plasmonisten rakenteiden avulla sähkömagneettisen säteilyn absorptiota ilmaisimateriaaleissa voidaan parantaa erittäin merkittävästi verrattuna vastaaviin komponentteihin ilman plasmonisia rakenteita. Lyijysulfidi- ja elohopeakadmiumtelluridi-ilmaisimateriaaleissa saavutettiin yli kolminkertaiset parannukset valituilla aallonpituusalueilla ja yksikiteisessä piihohutkalvossa jopa useiden satojen prosenttien parannus tietyillä suhteellisen kapeilla aallonpituuskaistoilla lähi-infrapuna-alueella ja noin 40% parannus laajalla taajuuskaistalla. Tulokset ovat siis erittäin lupaavia ja osoittavat, että sähkömagneettisen aallon vuorovaikutusta ilmaisimateriaalin kanssa voidaan vahvistaa merkittävästi testatuissa esimerkkikomponenteissa ja että myös vahvistettavaa aallonpituusaluetta voidaan säätää plasmonisten rakenteiden ominaisuuksia muuttamalla. Löydetty suunnitteluperiaatteet pätevät myös muilla aallonpituusalueilla materiaaliparametrien ja detektorirakenteiden sallimissa rajoissa.

1. Johdanto

Infrapunailmaisimet ovat keskeisessä asemassa useissa puolustus- ja turvallisuusalan tehtävissä. Kohteiden etsiminen, seuraaminen tai tarkkailu olosuhteissa, joissa näkyvyys on huono (sumu, savu, pimeys), sekä kemiallisten aineiden ja aseiden tunnistaminen (sekä kaukokartoitus että paikallinen kemiallisten yhdisteiden tunnistus) ovat tyypillisiä sovelluskohteita. Koska jokainen kappale, jonka lämpötila on absoluuttisen nolapisteen (0 K) yläpuolella, säteilee lämpösäteilyä, infrapuna-alueella toimivilla ilmaisimilla voidaan havaita kohteita myös passiivisesti mittaamalla ympäristön lämpötilaeroja. Erityisen kiinnostavat aallonpituudet näihin sovelluksiin löytyvät niin sanotuilta ilmakehän ikkuna-

alueilta (Kuva 1), joissa ilmakehän kaasujen absorptio on pientä ja siten sähkömagneettisen säteilyn läpäisy suurinta. Näille aallonpituusalueille (n. 10 μm) osuu myös ihmisen (37°C:sen kohteen) tuottama lämpösäteily. Käyttökohteesta riippuen eri aallonpituuden ikkuna-alueet tarjoavat omat etunsa: esim. pidemmän aallonpituuden ilmaisimet pystyvät erottamaan passiivisesti (ilman valaisua) ympäristöään lämpimämmän kohteen, mutta eivät yleensä tunnistamaan sitä johtuen huonosta resoluutiosta ja suhteellisen pienestä dynaamisesta alueesta. Lyhyen aallonpituuden infrapunailmaisimilla taas yleensä pystytään myös tunnistamaan kohde.



Kuva 1. Ilmakehän ikkuna-alueet (läpäisy aallonpituuden funktiona), joissa ilmakehän kaasujen absorptio on pientä ja sähkömagneettisen säteilyn läpäisy suurta.

Infrapunailmaisimet voidaan jakaa karkeasti niiden toimintaperiaatteen mukaan fotonisiin (photovoltaic, photoconductive,...) ja termisiin (bolometers,...) ilmaisimiin. Termiset ilmaisimet perustuvat säteilyn aiheuttamaan ilmaisimateriaalin lämpenemiseen eikä niiden herkkyys riipu aallonpituudesta. Fotoniset ilmaisimet puolestaan perustuvat valokvanttien (fotonien) virittämien elektroni-aukkoparien syntymiseen ja ovat tyypillisesti suorituskyvyltään termisiä ilmaisimia parempia, herkempiä ja nopeampia omalla aallonpituusalueellaan, mutta niiden ilmaisukyky riippuu voimakkaasti aallonpituudesta. Hyvän suorituskyvyn fotoniset infrapunailmaisimet vaativat kuitenkin jäähdytyksen (tyypillisesti 77–200 K), poikkeuksena vain hyvin lyhyen aallonpituuden infrapuna-alueella toimivat detektorit. Vaikka suhteellisen halpoja infrapunailmaisimia on nykyisin kaupallisesti saatavilla hyvinkin monenlaisiin sovellutuksiin, hyvän suorituskyvyn (kuvantavat) infrapunailmaisimet ovat kuitenkin edelleen kalliita, kookkaita, painavia ja helposti särkyviä (vaativat jäähdytyksen).

Metallin kaltaisissa materiaaleissa, joissa elektronien voidaan ajatella liikkuvan vapaana elektronikaasuna, esiintyy ns. plasmonia eli vapaan elektronikaasun harmonisen värähtelyn kvanttia, eräänlaisia kvasipartikkelia, joiden taajuus riippuu elektronitiheydestä. Kun sähkömagneettinen (smg) säteily kytkeytyy plasmoniin, syntyy hybridivirtaus, plasmoni-polaritoni. Koska tällainen viritus tapahtuu metallin (tai metallin kaltaisen materiaalin) ja eristeen rajapinnassa, puhutaan yleensä pinta-plasmoni-polaritonista (surface plasmon-polariton, SPP) tai yksinkertaisesti vain pintaplasmonista (surface plasmons). Lisäksi voidaan puhua etenevästä (PSPP, propagating SPP) tai paikallisesta (LSPP, localized SPP) pintaplasmonista riippuen siitä, onko sen sähkömagneettinen kenttä rajoittunut yhdessä tai kahdessa dimensiossa (PSPP) vai kaikissa kolmessa dimensiossa (LSPP). Kun sähkömagneettinen kenttä on resonanssissa plasmonin kanssa muodostaen pintaplasmoni-polaritonin, fotonien elinikä pitenee, mistä johtuen sähkömagneettisen kentän paikallinen amplitudi kasvaa merkittävästi, jopa useita

kertaluokkia. Tämä on yksi ilmaisinsovellusten kannalta erityisen houkutteleva ominaisuus. Toinen mielenkiinnon kohde liittyy siihen, että pintaplasmonin aallonpituus on pienempi kuin siihen kytkeytyvän fotonin aallonpituus. Pintaplasmonien kautta smg-kenttä voi myös kytkeytyä aallonpituutta pienempiin rakenteisiin, jolloin on mahdollista päästä diffraktiorajan alapuolelle. Erityisesti paikalliset, nanorakenteissa syntyvät LSPP:t tarjoavat useita potentiaalisia tapoja parantaa smg-kentän kytkeytymistä ilmaisimateriaaliin erilaisten pintaplasmoniviritysten kautta. LSPP:n resonanssitaajuutta voidaan säätää nanorakenteiden materiaalia, dimensioita ja muotoa sekä ympäristön ominaisuuksia (taitekerroin) säätämällä. Plasmonisten rakenteiden ominaisuuksia muuttamalla voidaan modifioida niiden efektiivistä vuorovaikutusalaa (absorptio/sironta) ja vahvistaa smg-aallon vuorovaikutusta (absorptiota) ilmaisimateriaalin kanssa halutuilla aallon pituusalueilla.

Tässä hankkeessa tutkitaan plasmoniikan mahdollisuuksia parantaa nykyisten infrapunailmaisimien ominaisuuksia ja toiminnallisuutta. Kaksivuotiseksi suunnitellun hankkeen ensimmäisenä vuonna, jota tämä raportti koskee, keskityttiin tutkimaan mahdollisuuksia parantaa sähkömagneettisen säteilyn absorptiota ilmaisimateriaaleissa plasmonisten rakenteiden sirontaominaisuuksien ja kentän vahvistamisen räätälöinnin keinoin.

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää uusien plasmonisten nanorakenteiden soveltuvuutta infrapunailmaisimien ominaisuuksien parantamiseen ja etsiä uusia plasmoniikkaan perustuvia ratkaisuja niiden käytettävyyden ja toiminnallisuuden kasvattamiseksi. Hankkeessa pyritään parantamaan infrapunailmaisimien suorituskykyä pikselitasoisilla kustannustehokkailla ratkaisuilla. Tavoitteena on saada käsitys plasmoniikan potentiaalista toisaalta parantaa nykyisten infrapunailmaisimien ominaisuuksia (herkkyys, resoluutio, koko/pikselitiheys) ja toisaalta tuoda niihin täysin uusia pikselitason toiminnallisuuksia (aallonpituuserottelu, polarisaatio- tai vaiheselektiivisyys).

Tutkimuksen etenemissuunnitelma on jaettu kahteen vaiheeseen ja neljään osatehtävään (Vaihe 1: Task 1-3; Vaihe 2 Task 4), joista nyt raportoitavan vuoden aikana toteutettiin vaihe 1: tutkittavien ilmaisintyyppien valinta siten, että tulokset ovat mahdollisimman yleispäteviä (Task 1), säteilyn absorption parantaminen ilmaisimissa hyödyntämällä plasmonisten rakenteiden suotuisia sirontaominaisuuksia (Task 2) ja niiden aiheuttamaa kentänvoimakkuuden vahvistamista (Task 3).

Raportoitavan vuoden tavoitteena oli saavuttaa laskennallisesti vähintään kolminkertainen parannus ilmaisimateriaalin absorptiossa edellä mainituilla keinoilla (Task 2-3). Jos tämä tavoite täyttyy (toteutui), voidaan suunnitelman mukaan jatkaa tutkimusta vaiheeseen 2 (Task 4: plasmonisen detektorin kohina-, spektri- ja pikseliominaisuudet).

Tavoitteena oli lähestyä ongelmaa lähinnä laskennallisilla keinoilla, koska rajallinen budjetti ei mahdollistanut plasmonisten IR detektorien puhdistilavalmistusta hankkeessa. Teoriaa tukevaa kokeellistakin vertailudataa kuitenkin saatiin lähi-infrapuna-alueelle aiemmin toisessa projektissa valmistuttujen rakenteiden avulla.

3. Aineisto ja menetelmät

Plasmonisten nanorakenteiden soveltuvuutta infrapunailmaisimien ominaisuuksien parantamiseen tutkittiin valtaosin teoreettisesti/laskennallisesti pääfokuksessa fotoniset ilmaisimet. Simulaatiot perustuvat kolmiulotteiseen malliin detektorirakenteen smg-säteilyn absorptiolle oleellisista osista. Mallissa on varsinaisen ilmaisimateriaalin päällä ohut (30-50 nm) dielektrinen välikerros (piidioksidi pii- ja lyijysulfidi-ilmaisimissa ja cadmiumtelluridi

elohopeacadmiumtelluridi-ilmaisimissa), jonka päällä puolestaan ovat tukittavat plasmoniset rakenteet. Vertailuilmaisimet ovat muuten identtisiä, mutta plasmoniset rakenteet puuttuivat. Ilmaisimelle tulevaa smg-sätelyä simuloitiin ilmasta pintaa vastaan kohtisuoraan tulevalla tasoallolla, jonka taajuutta (aallonpituutta) pyyhkäistiin kulloinkin kiinnostavan kaistan yli. Maxwellin yhtälöiden ja ratkaisualueen reunoilla vaadittujen reunaehtojen muodostama yhtälöryhmä ratkaistiin numeerisesti erilaisille geometriolle ja materiaaliparametreille. Pääasiallisena laskentamenetelmänä käytettiin elementtimenetelmää (Finite Element Method eli FEM).

Tutkitut plasmoniset rakenteet koostuivat erilaisista periodisista aallonpituutta pienemmistä hyvin johtavista metallisista tai lähes metallisista alueista, joiden korkeutta, periodia ja lateraalidimensioita varioitiin halutun absorptiovahvistuksen saamiseksi tietyillä leveämmillä tai kapeammilla aallonpituusalueilla.

Plasmoniikan vaikutusta eri infrapuna-alueilla toimiviin ilmaisintyyppeihin tutkittiin seuraavasti:

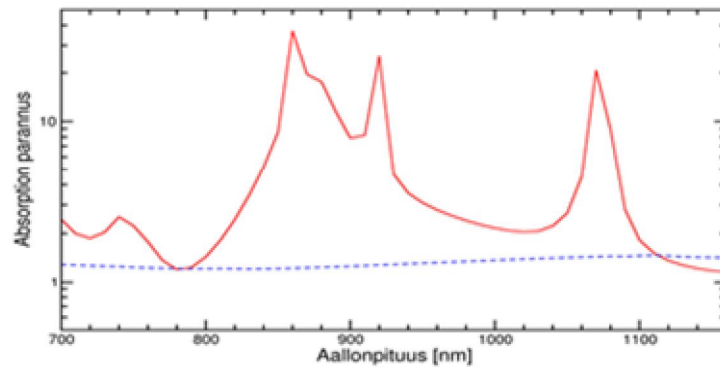
- Pii, Si, lähi-infrapuna-alue (energia-aukko: $E_g \sim 1.1$ eV, aallonpituusalue $n. \leq 1.13$ μm)
- Lyjysulfidi, PbS, lyhytaaltainen infrapuna ($E_g \sim 0.37$ eV, aallonpituusalue $n. \leq 3.35$ μm)
- Elohopeacadmiumtelluridi, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, $x = 0.2$ keskipitkä- ja pitkäaaltoinen infrapuna ($E_g \sim 0.083$ eV (77 K), aallonpituusalue $n. \leq 15$ μm)

Tutkitut plasmoniset materiaalit:

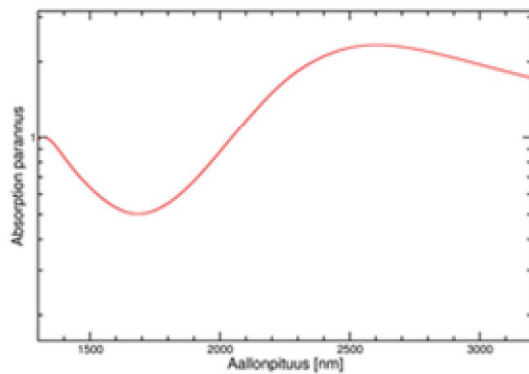
- Metallit: Cu (PbS:lle), Ag (piille), Au (piille)
- Puolijohteet: n-Si, Al-seostettu ZnO eli Al:ZnO (HgCdTe:lle)

4. Tulokset ja pohdinta

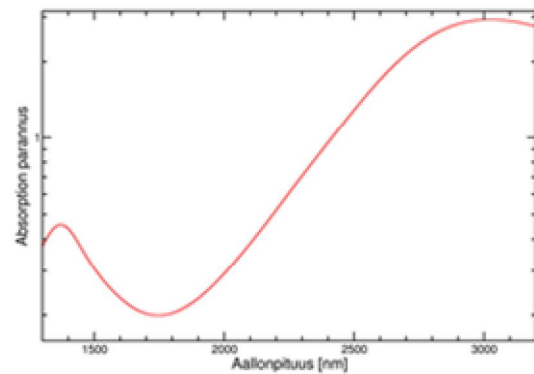
Ensimmäiseksi tutkimuskohteeksi valittiin 700–3200 nm:n aallonpituusalue ja detektorimateriaaleiksi pii (Si) ja lyjysulfidi (PbS). Kuvassa 2 nähdään joitakin simulaatiotuloksia ilmaisimateriaalissa tapahtuvasta absorptio parannuksesta plasmonisten rakenteiden lisäämisen vaikutuksesta aallonpituuden funktiona (absorptio parannuksessa arvo 1 tarkoittaa "ei muutosta"; arvo 2, että absorptio ilmaisimissa, jossa on plasmonisia rakenteita, on kaksinkertainen verrattuna absorptioon vastaavassa ilmaisimissa ilman plasmonisia rakenteita jne.) Kuvista nähdään, että pii-ilmaisimissa absorptio parannus tietyillä kaistoilla on esimerkkitapauksessa käytetyillä plasmonisilla rakenteilla jopa 30-40-kertainen ja PbS-ilmaisimissakin kolminkertainen. Myös vahvistuskaistan muotoa ja aallonpituusaluetta pystyttiin säätämään plasmonisten rakenteiden yksityiskohtia (tässä tapauksessa kokoa) varioimalla (vrt. kuvat 2b ja 2c).



(a)



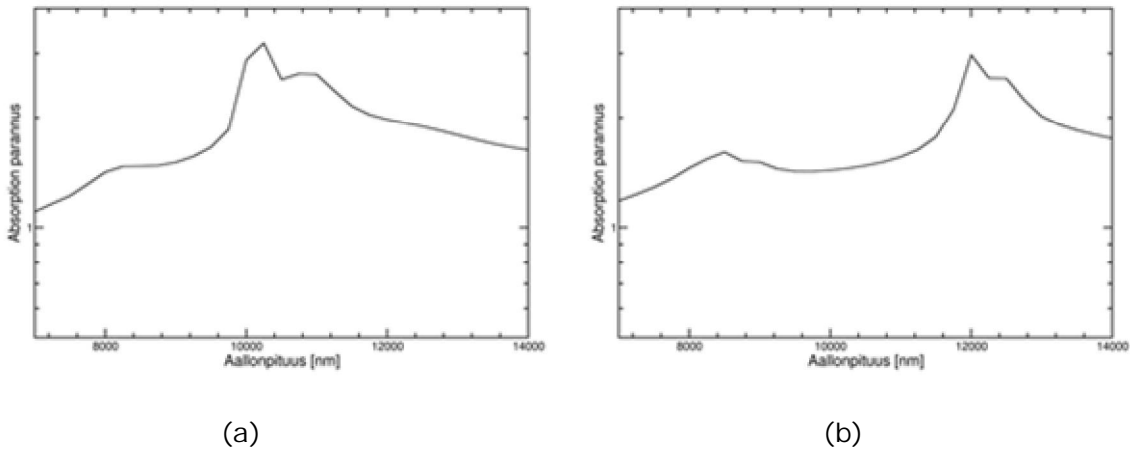
(b)



(c)

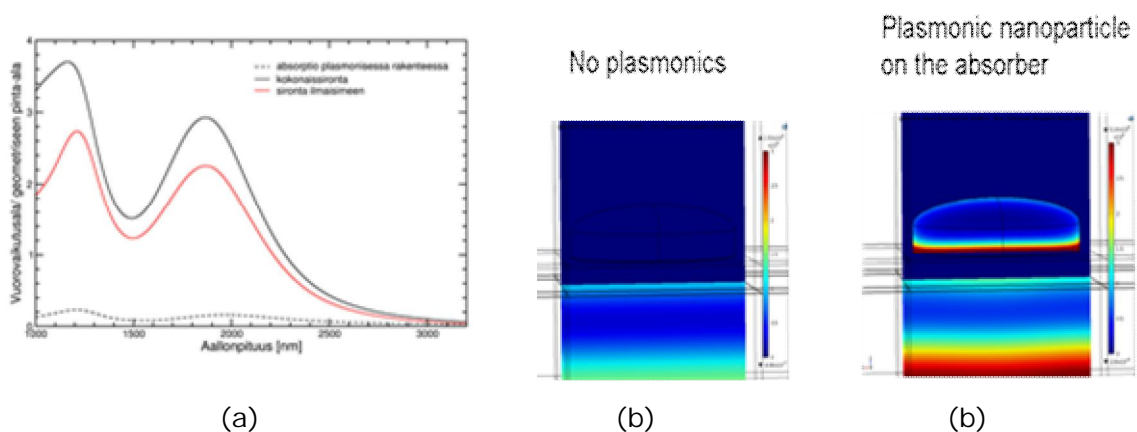
Kuva 2. ilmaisimateriaaleissa tapahtuva absorption parannus plasmonisten rakenteiden lisäämisen vaikutuksesta: Absorption parannus = ilmaisimateriaaliin absorboitunut teho, kun mukana plasmoniset rakenteet/ilmaisimateriaaliin absorboitunut teho ilman plasmonisia rakenteita. (a) Pii-ilmaisimen päällä plasmoniset hopeanorakenteet. (b-c) PbS-ilmaisimen päällä kuparirakenteet kokoa 400 nm (b) ja 450 nm (c). Huomaa, että kuvissa on logaritminen asteikko.

Pitempiaaltoisen infrapunasäteilyn ilmaisimateriaaliksi tutkimuksiin valittiin $\text{HgCd}_{0.2}\text{Te}_{0.8}$ johtuen sen – yhä edelleen - hallitsevasta asemasta ko. markkinoilla. Kun Cd-pitoisuus on tuo valittu 20%, pystytään ilmaisinta (perinteisesti jäähdytettynä 80 K:iin) käyttämään noin 15 μm asti. Kuvassa 3 on kaksi 7-15 μm aallonpituusalueen esimerkkiä simulaatiotuloksista, joissa on saavutettu plasmonisilla, noin kokoluokkaa 2 μm olevilla, rakenteilla yli kolminkertainen absorption parannus HgCdTe :ssa. Toisessa plasmoniset rakenteet ovat Al:ZnO:a ja toisessa n-tyyppistä piitä. Plasmoniviritysten aikaansaamiseksi seostustasot ovat molemmissa korkeat (reilusti yli 10^{20} cm^{-3}). Metallirakenteista poiketen puolijohteisiin perustuvissa plasmonisissa rakenteissa materiaalin plasmataajuutta voidaan siis säätää myös seostustasoa (vapaiden varauksenkuljettajien määrää) muuttamalla. Myös näissä esimerkeissä nähdään plasmonisten rakenteiden ominaisuuksia muuttamalla aikaansaatu suurimman vahvistuksen alueen siirtyminen, nyt 10 μm aallonpituuden tuntumasta 12 μm :n alueelle, sekä muutoksia käyrän muodoissa.



Kuva 3. HgCdTe-ilmaisimateriaalissa tapahtuva absorptio parannus plasmonisten rakenteiden lisäämisen vaikutuksesta. Plasmonisina materiaaleina Al: ZnO (a) ja n-tyyppinen Si (b).

Tehdyt teoreettiset simulaatiot osoittavat, että valittujen plasmonisten nanorakenteiden avulla ilmaisimateriaalien absorptiota voidaan parantaa erittäin merkittävästi verrattuna vastaaviin komponentteihin ilman plasmonisia rakenteita ja että myös vahvistettavaa aallonpituusalueutta voidaan säätää. Lopullinen absorptio parannuksen suuruus riippuu aina varsinaisten plasmonisten rakenteiden lisäksi niiden vuorovaikutuksesta ympäröivien ilmaisimateriaalien ja -rakenteiden kanssa. Sopivilla yhdistelmillä voidaan saada aikaan toisaalta sgm-säteilyn siroaminen voimakkaasti ilmaisimateriaalin suuntaan (kuva 4a, vrt. ero perinteisiin heijastuksenestokerroksiin) ja toisaalta smg-kentän vahvistumista ilmaisimateriaalissa (kuvat 4b ja 4c) ja siten absorptio merkittävä paraneminen halutuissa ilmaisimen osissa, jolloin myös ilmaisimen tuottama signaali (valovirta) kasvaa. Löydetty suunnitteluperiaatteet pätevät myös muilla aallonpituusalueilla materiaaliparametrien ja detektorirakenteiden sallimissa rajoissa.



Kuva 4. (a) Yksittäiselle nanorakenteelle (partikkelille) laskettu sironta- ja absorptiovuorovaikutusala suhteessa partikkelin geometrisen projektion pinta-alaan (Cu-partikkeli PbS:n päällä). (b-c) Tehon absorptio (smg-kentän) voimakkuus PbS-ilmaisimessa (b) ilman plasmonisia rakenteita ja, kun (c) ilmaisimateriaalin päällä on plasmoninen partikkeli.

Vaikka rajallinen budjetti ei sallinut tutkittujen ilmaisinerakenteiden puhdistilavalmistusta, teoriaa tukevaa kokeellistakin vertailudataa kuitenkin saatiin lähi-infrapuna-alueelle aiemmin toisessa projektissa valmistuttujen pii-ilmaisimien avulla. Kokeellisista rakenteista mitattu valovirran vahvistus korreloi hyvin laskettujen absorptio parannusten kanssa eroten merkittävästi lähinnä vain korkeimpien kapeakaistaisten piikkien korkeudessa, mikä voidaan selittää kokeellisten näytteiden ja mittausmenetelmien epäideaalisuudella. Näiden tarkastelujen perusteella plasmonisten infrapunailmaisimien suunnittelu käytetyillä teoreettisilla menetelmillä näyttäisi antavan luotettavia tuloksia ja olevan toteutuskelpoinen tapa lähestyä ongelmaa myös muilla aallonpituusalueilla.

5. Loppupäätelmät

Hankkeen ensimmäiselle vuodelle (2015) asetetut tavoitteet saavutettiin kaikilla tutkituilla ilmaisintyypeillä. Saavutetut tulokset osoittavat, että plasmonisten rakenteiden avulla on mahdollista saavuttaa merkittäviä parannuksia sähkömagneettisen aallon absorptiossa ilmaisimateriaalikerroksiin infrapuna-alueella - tehden hyvinkin ohuista ilmaisimista tehokkaita - sekä säätää ilmaisimen herkkyyksikaistaa kasvattamalla absorptiota halutuilla alueilla ja/tai vähentämällä sitä toisaalla. Tämä tarjoaa mahdollisuuden ilmaisimien signaali-kohinasuhteen parantamiseen halutuilla alueilla. Plasmoniikan avulla sähkömagneettinen aalto saatiin kytkeytymään aallonpituutta pienempiin rakenteisiin, joiden avulla voitiin vahvistaa aallon vuorovaikutusta ilmaisimateriaalin kanssa. Oleellista plasmonisten rakenteiden hyödyntämisessä oli sopivien plasmonisten materiaalien ja nano/mikrogeometrioiden löytäminen sekä (puolijohteissa) materiaalin ominaisuuksien säätäminen halutun vuorovaikutuksen aikaansaamiseksi. Lähi-infrapuna-alueelle pystyttiin saamaan myös teoreettisia tuloksia tukevaa kokeellista dataa aiemmin toisessa projektissa valmistuttujen rakenteiden avulla.

Jo tässä projektin ensimmäisessä vaiheessa osoitettiin sähkömagneettisen aalloin kytkeytyvän aallonpituutta pienempiin rakenteisiin. Plasmonisen rakenteen efektiivinen vuorovaikutusala sähkömagneettisen kentän kanssa saatiin merkittävästi suuremmaksi kuin rakenteen geometrinen pinta-ala. Muun muassa tätä ominaisuutta on tarkoitus tutkia tarkemmin hankkeen toisessa vaiheessa tavoitteena selvittää mahdollisuuksia pienentää ilmaisimien pikselikokoa ja myös tätä kautta parantaa signaali-kohinasuhdetta. Tämä ja jo saavutetut tulokset tarjoavat mahdollisuuksia valmistaa hyvän suorituskyvyn infrapunailmaisimia, jotka vaativat entistä vähemmän jäähtytystä. Kiinnostavia tulevaisuuden tutkimuskohteita ovat myös plasmoniikkaan perustuvat ratkaisut, joilla voidaan tuoda infrapunailmaisimiin myös uusia pikselitason toiminnallisuuksia, kuten polarisaatioselektiivisyyttä.

Plasmoniikan soveltaminen infrapuna-alueen ilmaisimiin on teknologisesti mahdollista jo tänään. Tarvittavien rakenteiden lisääminen infrapunailmaisimien tai -kameran valmistusprosessiin vaatii parhaimmillaan vain yhden uuden litografiavaiheen lisäämistä standardiprosessiin. Suuren kapasiteetin ja korkean resoluution nanokuvointimenetelmät (esim. nanoimprint) ovat viime vuosina kehittyneet niin nopeasti, että niiden soveltaminen myös keskihintaisiin tuotteisiin tulee pian mahdolliseksi. Toisaalta liikuttaessa infrapuna-alueella valmistukselliset resoluutiovaatimukset ovat merkittävästi pienemmät kuin näkyvän valon aallonpituuksilla. Tämän antaa plasmonisille infrapunailmaisimille merkittävän valmistus- ja kustannusteknisen edun verrattuna näkyvän valon ilmaisimiin.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Hankkeen aikana ei syntynyt muita raportteja. Tavoitteena on tulevan vuoden aikana valmistella tieteellistä julkaisua kansainväliseen vertaisarvioituun aiheeseen soveltuvaan julkaisusarjaan hankkeen aikana saavutetuista tuloksista mahdollisuuksien mukaan yhdistettynä tuleviin tuloksiin.