

TIIVISTELMÄRAPORTTI

PLASMONISET INFRAPUNAILMAISIMET

Kirsi Tappura, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
Tekniikankatu 1, PL1300, 33101 Tampere
kirsi.tappura@vtt.fi

Tiivistelmä: Hankkeessa tutkittiin uusien plasmonisten rakenteiden soveltuvuutta ja mahdollisuuksia infrapunailmaisimien suorituskyvyn ja toiminnallisuuden parantamiseen. Projektin ensimmäisessä vaiheessa (2015) on jo osoitettu laskennallisiin simulaatioihin perustuen, että infrapunailmaisimien hyötysuhdetta voidaan ilmaisinerakenteesta ja aallonpituuskaistasta riippuen parantaa 20 – 300 % (kapealla kaistalla enemmänkin). Kaksivuotisen hankkeen toisena vuonna, jota tämä raportti koskee, on keskitytty tutkimaan plasmonisten rakenteiden vaikutusta infrapunailmaisimien spektri-, signaali-kohina- ja pikseliominaisuuksiin. Plasmonisten rakenteiden lisäksi on varioitu ilmaisinerakenteita, mitä kautta on pyritty arvioimaan plasmonisten rakenteiden mahdollisia vaikutusmekanismeja mm. signaali-kohina (S/N) –suhteeseen. Nyt tutkitut ilmaisimet perustuvat PbS ja HgCdTe -materiaaleihin. Tulokset osoittavat, että hyvällä suunnittelulla S/N-suhdetta voidaan parantaa myös silloin, kun pienennetään ilmaisimen aktiivialuetta, koska plasmonisten rakenteiden ansiosta riittävä signaalitaso voidaan saada pienemmästäkin absorboivasta tilavuudesta. Tämä puolestaan tarjoaa entistä paremmat mahdollisuudet kasvattaa infrapunailmaisimien nopeutta ja pienentää tehonkulutusta sekä vähentää materiaali- ja valmistuskustannuksia. Toisaalta testatuissa tapauksissa paksumkin kaupallisen ilmaisimen päälle lisätyillä plasmonisilla rakenteilla voidaan laskujen mukaan päästä absorptiossa noin 30-35 % parannukseen. Parhaisiin tuloksiin kuitenkin päästään, jos jo ilmaisinerakenteen suunnitteluvaiheessa otetaan huomioon plasmoniikan mahdollisuudet, sillä kun sähkömagneettisen aallon vuorovaikutusta ilmaisinerakenteen kanssa vahvistetaan plasmoniikan keinoin, saadaan enemmän suunnitteluvapautta myös ilmaisinerakenteen ja sen ominaisuuksien optimoimiseksi.

1. Johdanto

Puolustus- ja turvallisuusalueilla infrapunailmaisimia (infrared, IR, detectors) on käytetty aktiivisesti jo useiden vuosikymmenien ajan. Tärkeimmät sovellukset liittyvä tilanteisiin, joissa kohteita pitää löytää tai tarkkailla esim. savun, sumun tai pimeyden läpi eli kun näkyvyys on jostakin syystä huono. Toinen tärkeä alue on kemiallisten aineiden ja aseiden tunnistaminen (kaukokartoitus ja paikallinen kemiallisten yhdisteiden tunnistus). Koska jokainen kappale, jonka lämpötila on absoluuttisen nollapisteen (0 K) yläpuolella, säteilee lämpösäteilyä, infrapunailmaisimilla voidaan havaita kohteita myös passiivisesti (ilman valaisua) mittaamalla ympäristön lämpötilaeroja. Erityisen kiinnostavat aallonpituudet löytyvät niin sanotuilta ilmakehän ikkuna-alueilta (3-5 μm ja 8-14 μm), jotka läpäisevät hyvin sähkömagneettista säteilyä. 37 °C:ssa oleva kohde, kuten ihminen, tuottaa lämpösäteilyä n. 10 μm aallonpituudella ja on siten havaittavissa passiivisesti tuolla toisella ikkuna-alueella. Pitkillä aallonpituuksilla toimivat ilmaisimet pystyvät erottamaan passiivisesti ympäristöään lämpimämmän kohteen, mutta eivät yleensä tunnistamaan sitä johtuen huonosta resoluutiosta ja suhteellisen pienestä dynaamisesta alueesta. Siksi on hyvä, että ikkuna-alueita löytyy myös lyhyemmiltä aallonpituuksilta, missä toimivia infrapunailmaisimia voidaan käyttää, kun halutaan myös tunnistaa kohde.

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@defmin.fi
PL 31	00130 Helsinki		www.defmin.fi/matine
FI-00131 Helsinki	Finland		
Finland			

Infrapunailmaisimet voidaan jakaa karkeasti niiden toimintaperiaatteen mukaan fotonisiin ja termisiin ilmaisimiin. Termiset ilmaisimet perustuvat säteilyn aiheuttamaan ilmaisimateriaalin lämpenemiseen. Niiden herkkyys riippuu aallonpituudesta. Fotoniset ilmaisimet puolestaan perustuvat valokvanttien (fotonien) virittämien elektroni-aukkoparien syntymiseen ilmaisimateriaalissa ja ovat yleensä suorituskyvyltään termisiä ilmaisimia parempia, herkempiä ja nopeampia. Niiden ilmaisukyky kuitenkin riippuu voimakkaasti aallonpituudesta. Merkittävänä haittapuolena hyvän suorituskyvyn fotonisissa infrapunailmaisimissa on niiden vaatima jäähdytys (tyypillisesti 77–200 K). Vaikka suhteellisen halpoja infrapunailmaisimia on nykyisin kaupallisesti saatavilla hyvinkin monenlaisiin sovellutuksiin, hyvän suorituskyvyn (kuvantavat) infrapunailmaisimet ovat edelleen kalliita, kookkaita, painavia ja helposti särkyviä.

Metallin kaltaisissa materiaaleissa, joissa elektronien voidaan ajatella liikkuvan vapaana elektronikaasuna, esiintyy ns. plasmoneja eli vapaan elektronikaasun harmonisen värähtelyn kvanttieja, eräänlaisia kvasipartikkelia, joiden taajuus riippuu elektronitiheydestä. Kun sähkömagneettinen säteily kytkeytyy plasmoniin, syntyy hybridiviritys, plasmoni-polaritoni. Koska tällainen viritys tapahtuu metallin (tai metallin kaltaisen materiaalin) ja eristeen rajapinnassa, puhutaan yleensä pintaplasmonipolaritonista (surface plasmon-polariton, SPP) tai yksinkertaisesti pintaplasmonista. 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, jolloin sähkömagneettinen kenttä voi myös kytkeytyä aallonpituutta pienempiin rakenteisiin. Erityisesti ns. paikalliset pintaplasmonit tarjoavat useita potentiaalisia tapoja parantaa sähkömagneettisen kentän kytkeytymistä ilmaisimateriaaliin. Paikallisten pintaplasmonien resonanssitaajuutta voidaan säätää plasmonisten rakenteiden materiaalia, dimensioita ja muotoa sekä ympäristön ominaisuuksia (taitekerroin) säätämällä. Plasmonisten rakenteiden ominaisuuksia muuttamalla voidaan modifioida niiden efektiivistä vuorovaikutusalaa (absorptio, sironta) ja vahvistaa aallon vuorovaikutusta ilmaisimateriaalin kanssa halutuilla aallonpituusalueilla.

Tässä hankkeessa pyritään saamaan käsitys plasmonikan potentiaalista toisaalta parantaa nykyisten infrapunailmaisimien ominaisuuksia ja toisaalta tuoda niihin täysin uusia kustannustehokkaita pikselitason toiminnallisuuksia.

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, kuinka plasmonisia rakenteita voidaan hyödyntää infrapunailmaisimien ominaisuuksien parantamisessa, ja etsiä uusia plasmonikkaan perustuvia ratkaisuja ilmaisimien toiminnallisuuden ja suorituskyvyn kasvattamiseksi. Erityisesti pyrittiin löytämään pikselitasoisia kustannustehokkaita ratkaisuja.

Kaksivuotisen hankkeen tutkimustyön toteutus koostui seuraavista vaiheista ja osatavoitteista:

Vuosi 2015:

- Task 1: Tutkittavan ilmaisintyyppin/tyyppien valinta siten, että tulokset ovat mahdollisimman yleispäteviä.
- Task 2: Säteilyn absorption kasvattaminen ilmaisimessa plasmonisten rakenteiden luomilla suotuisia sirontamekanismeilla.
- Task 3: Säteilyn absorption kasvattaminen ilmaisimessa vahvistamalla kentänvoimakkuutta plasmonisten rakenteiden avulla.

Ensimmäisen vuoden (2015) tavoitteena oli löytää edellä listattuja valintoja ja menetelmiä (task 1-3) hyödyntämällä rakenne, jolle teoreettiset laskelmat osoittavat infrapunasäteilyn absorptio lisääntyvän vähintään kolminkertaisiksi plasmonisten rakenteiden ansiosta. Koska tavoite täyttyi, jatkettiin tutkimusta vaiheeseen 2 (vuosi 2016), jota tämä raportti koskee.

Vuosi 2016 (nyt raportoitava vuosi):

- Task 4: Plasmonisen rakenteiden vaikutus IR-ilmaisimien S/N-, spektri- ja pikseliominaisuuksiin.

3. Aineisto ja menetelmät

Laskennalliset simulaatiot

Plasmonisten rakenteiden soveltuvuutta infrapunailmaisimien ominaisuuksien parantamiseen tutkittiin pääasiassa teoreettisesti/laskennallisesti pääfokuksessa fotoniset ilmaisimet. Tutkimuksiin valitut ilmaisimien perusrakenteet edustavat valodiodien ja valojohteiden käyttäytymistä plasmonivuorovaikutuksessa. Plasmonisten rakenteiden optimoinnissa fotonisiin ilmaisimiin on tärkeää maksimoida infrapunasäteilyn absorptio ilmaisimimateriaalissa ja minimoida se plasmonisissa rakenteissa itsessään. Ilmaisimimateriaaliin absorboituvaa fotonin generoi elektroni-aukko -parin, joka suotuisissa olosuhteissa saadaan kerättyä mitaussignaaliksi ennen varauksenkuljettajien rekombinoitumista. Sen sijaan plasmoniseen rakenteeseen absorboituvaa säteilyä muuttuu hukkalämmöksi ja huonontaa siten fotonisen ilmaisimen toimintaa.

Simulaatiot perustuvat kolmiulotteiseen malliin ilmaisimimateriaalin infrapunasäteilyn absorptiolle oleellisista osista. Mallissa on varsinaisen ilmaisimimateriaalin päällä ohut (30-100 nm) dielektrinen välikerros (piidioksidi lyijysulfidi-ilmaisimissa ja kadmiumtelluridi elohopeakadmiumtelluridi-ilmaisimissa), jonka päällä puolestaan ovat tukittavat plasmoniset rakenteet. Vertailuilmaisimet ovat muuten identtisiä, mutta plasmoniset rakenteet puuttuvat. Käytetyt numeeriset menetelmät perustuvat kolmeulotteisten Maxwellin yhtälöiden ratkaisemiseen ns. elementtimenetelmällä (finite element method, FEM). Laskentakopin päättyvillä reunoihin asetettiin ns. "perfectly matched layer" (PML) -reunaehto artefaktien minimoimiseksi, kun taas periodisten reunaehtojen avulla generoitiin plasmonisista rakenteista erilaisia kaksiulotteisia hiloja. Ilmasta ilmaisimen pintaa kohti saapuvaa infrapunasäteilyä mallinnettiin tasoaallolla.

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

Plasmoniikan vaikutusta eri infrapuna-alueilla toimiviin ilmaisintyyppisiin tutkittiin seuraavasti:

- Lyijysulfidi, PbS, lyhytaaltainen infrapuna ($E_g \sim 0.37\text{eV}$, aallonpituusalue $n. \leq 3.35 \mu\text{m}$)
- Elohopeakadmiumtelluridi, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, $x = 0.2$ keskipitkä- ja pitkäaaltoinen infrapuna ($E_g \sim 0.083\text{eV}$ (77 K), aallonpituusalue $n. \leq 15 \mu\text{m}$)

Tutkitut plasmoniset materiaalit:

- Metallit: Cu, Ag, Au
- Puoli-johteet: Al-seostettu ZnO eli Al:ZnO (HgCdTe:lle)

Koska kuparin ja kullan dielektriset funktiot ovat lähellä toisiaan, myös niiden antamat tu-

lokset ovat lähellä toisiaan. Kalliin kullan sijasta voidaan siten käyttää halvempaa kuparia, joskin käytännössä kuparin oksidoitumisen vaikutukset pitää vielä tutkia tai oksidoituminen estää suojakerroksella. Kaikissa tarkasteluissa keskeisessä asemassa on simulaatioissa käytettyjen materiaaliparametrien oikeellisuus (mm. dielektristen funktioiden aallonpituusriippuvuus). Erityisesti HgCdTe:n kirjallisuusarvoissa on suhteellisen paljon vaihtelua johdun oletettavasti materiaalille tyypillisestä laatuvaihtelusta. Metalleille puolestaan löytyy kirjallisuudesta suhteellisen hyvin mittaustuloksia, mutta Al:ZnO:lle permittiivisyys laskettiin hyödyntäen Druden mallia.

Kokeellisen työn lähtökohta

Vaikka rajallinen budjetti ei mahdollistanut plasmonisten IR-detektorien valmistusta hankkeessa tai räätälöityjen ilmaisimien tilaamista alihankintana, hankkeessa kuitenkin pyrittiin mahdollisuuksien mukaan tutkimaan plasmonisten rakenteiden vaikutuksia myös kokeellisesti hyödyntäen kaupallisia ilmaisinerakenteita. Pitkähköjen keskustelujen jälkeen eräs valmistaja lupautui toimittamaan HgCdTe-ilmaisinsirujaan ilman perinteistä paketoitua, tasisella alustalla, joka voisi sallia jatko-prosessoinnin. Kaupallisten ilmaisimen hyödyntäminen sirutasolla asettaa kuitenkin suuria rajoitteita jo ilmaisinerakenteen itsensä suhteen, mutta erityisesti sen jatko-prosessoitavuudelle (näytteen koko, lämpötilakestävyys, käsiteltävyys), verrattuna tilanteeseen, jossa plasmonisten rakenteiden valmistus olisi integroitu yhdeksi detektorien kiekko-tason litografiavaiheeksi. Lisäksi käytettävissä olevien näytteiden (eli ostettujen ilmaisinsirujen) lukumäärä, joka jouduttiin nyt rajoittamaan vain kolmeen kappaleeseen rajallisen budjetin vuoksi, ei juurikaan anna liikkumavaraa näyteriippuvaisten prosessointiparametrien optimoinnille.

Kokeellisen työn riskit lopulta myös realisoituivat eikä projektin aikana käytettävissä olevan rahoituksen puitteissa ehditty löytää kaupallisilla ilmaisinsiruilla toimivia prosessointiparametreja, vaikka ilmeisen lähelle jo päästiin. Joten tämä jo alun perin vain varovaiseksi optioksi suunniteltu kirjoitettu mahdollinen kokeellinen demonstraatio jäi tällä kertaa vielä toteutumatta.

4. Tulokset ja pohdinta

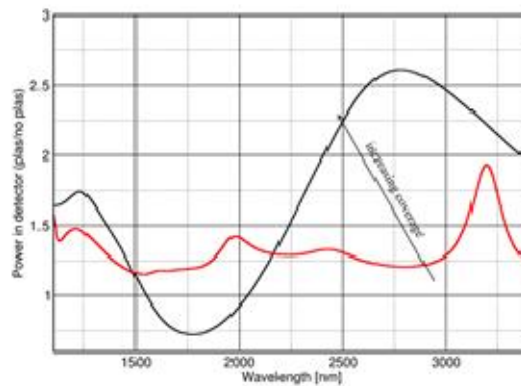
Laskennalliset simulaatiot

Tutkitut plasmoniset rakenteet muodostuivat erilaisista, pääsääntöisesti melko yksinkertaisista periodisista aallonpituutta pienemmistä alueista, joiden korkeutta, muotoa, lateraalidimensioita ja periodia varioitiin. Tavoitteena oli tutkia eri parametrien vaikutusmahdollisuuksia halutun absorptiovahvistuksen saamiseksi tietyillä leveämmillä tai kapeammilla aallonpituusalueilla. Projektin aikana testattiin suuri määrä erilaisia variaatioita, joiden tuloksista tähän raporttiin on poimittu muutamia havainnollistavia esimerkkejä kuvaamaan menetelmän mahdollisuuksia.

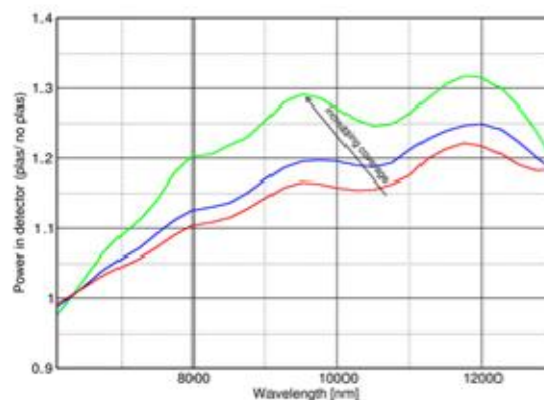
Tuloksia tarkasteltaessa tulee muistaa, että varsinaisten plasmonisten rakenteiden lisäksi tuloksiin vaikuttaa aina voimakkaasti myös ilmaisimen oma rakenne (materiaali, kerros-paksuudet, rajapinnat jne.). Tulosten tulokinnassa myös oletettiin yksinkertaistetusti, että jokainen absorboitunut fotoni tuottaa yhden elektroni-aukkoparin. Todellisuudessa (epäoptimaalisessa) detektorirakenteessa osa varauksenkuljettajista rekombinoituu ennen niiden keräämistä signaalivirraksi (tai ilmaisimien voi sisältää vahvistuksen). Yksinkertaistettu oletus antaa kuitenkin realistisen kuvan plasmoniikan mahdollisuuksista. Toisaalta plasmoniikan avulla myös vähemmän optimaaliseksi suunniteltu ilmaisimien voidaan saada toimimaan optimaalisemmin esimerkiksi vahvistamalla säteilyn absorptiota rakenteen sisällä kohdissa, josta varauksenkuljettajat pystytään tehokkaimmin keräämään.

Esimerkki A

Ilmaisimen spektrivastetta voidaan säätää varioimalla plasmonisten rakenteiden pintatiheyttä. Kuvissa 1 ja 2 on esitetty plasmonisten rakenteiden aikaansaama suhteellinen absorptio parannus muutamassa lasketussa esimerkkitapauksessa. Kuvien pystyakselin (y) arvo yksi tarkoittaa, että plasmonisilla rakenteilla ei ole saatu aikaan parannusta, mutta ei olla huononnettukaan tilannetta. Kun $y > 1$, plasmoniset rakenteet parantavat absorptiota ilmaisimateriaaliin suhteessa saman detektorin absorptioon ilman plasmonisia rakenteita. Aallonpituusalueilla, joilla $y < 1$, plasmoniset rakenteet puolestaan vähentävät absorptiota. Kuva 1 ei osoita vain, että vahvistettavaa aallonpituuskaistaa ja vahvistuksen suuruutta voidaan säätää (detektorirakenteen asettamissa rajoissa) muuttamalla plasmonisten rakenteiden pintatiheyttä, vaan myös sen, että tiettyjä kaistoja voidaan tehdä epäherkemmiksi halutuissa pikseleissä. Tämä mahdollistaa periaatteessa "moniväri"-ilmaisimatriisin valmistamisen ilman, että eri pikselien perusdetektorirakenteet eroavat toisistaan, tai että systeemiin pitää lisätä erillisiä suodattimia.



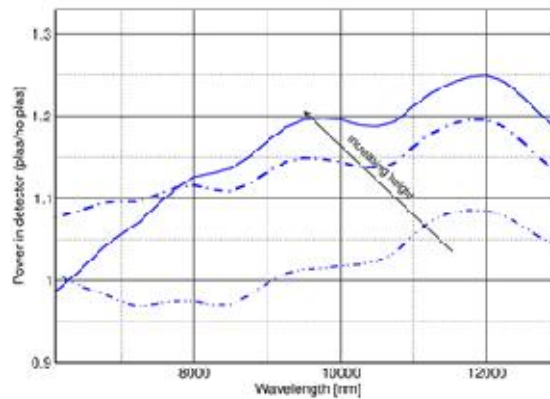
Kuva 1. Absorption parannus ohueen lyijysulfidi-ilmaisimeen aallonpituuden funktiona laskettuna erilaisille plasmonisten rakenteiden pintatiheyksille (peitto n. 5 %:sta 50 %:een) suhteessa vastaavan ilmaisimateriaalin absorptioon ilman plasmonisia rakenteita.



Kuva 2. Absorption parannus paksuun HgCdTe-ilmaisimeen aallonpituuden funktiona laskettuna erilaisille plasmonisten rakenteiden pintatiheyksille (peitto vaihtelee n. 9%:sta lähes 20 %:a) suhteessa vastaavan ilmaisimateriaalin absorptioon ilman plasmonisia rakenteita.

Esimerkki B

Ilmaisimen spektrivastetta voidaan säätää varioimalla plasmonisten rakenteiden korkeutta. Kuvassa 3 on esimerkki paksusta HgCdTe-ilmaisimesta, jonka päällä olevien plasmonisten rakenteiden korkeutta on varioitu. Muut dimensiot on pidetty vakiona. Alimman ja ylimmän käyrin välillä varioitu korkeusero on n . kaksi ja puoli kertainen. Jälleen nähdään, että absorption parantamisen lisäksi, sitä voidaan myös heikentää tietyllä aallonpituuskaistalla. Vertaamalla kuvaa 2 kuvaan 3 ja tiedostamalla, että kuvan 3 ylin käyrä ja kuvan 2 keskimäinen käyrä ovat samasta simulaatiosta, nähdään, että kasvattamalla sopivasti plasmonisten rakenteiden tiheyttä korkeuden lisäksi päästään tässä tapauksessa parhaimpiin tuloksiin. Se, miten käytännön toteutuksissa (suunnilleen) haluttu spektrivaste kannattaa toteuttaa, riippuu paljon valmistusteknisistä rajoituksista ja valituista valmistusmenetelmistä.

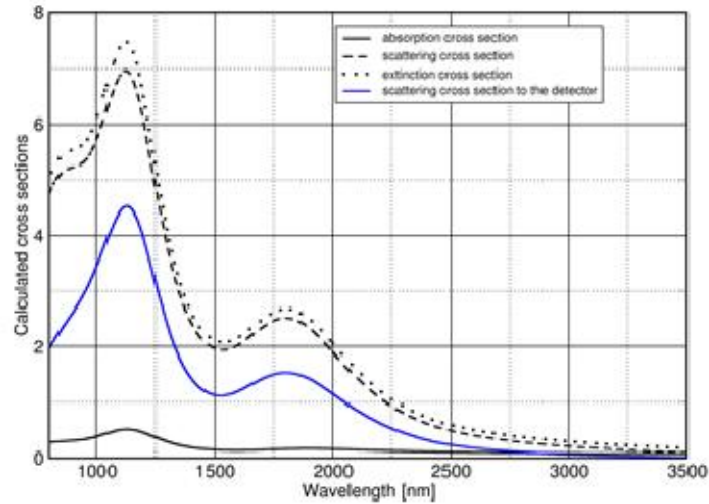


Kuva 3. Absorption parannus paksuun HgCdTe-ilmaisimeen aallonpituuden funktiona laskettuna eri korkuisille plasmonisille rakenteille suhteessa vastaavan ilmaisinarakenteen absorptioon ilman plasmonisia rakenteita.

Esimerkki C

Kuvassa 4 on laskettu erään yksittäisen plasmonisen partikkelin efektiivisiä vuorovaikutusaloja suhteessa partikkelin geometrisen projektion pinta-alaan. Partikkeli on PbS-ilmaisimen pinnalla ja vuorovaikuttaa ilmasta saapuvan infrapunasäteilyn kanssa. Käyristä nähdään, että vain hyvin pieni osa säteilystä absorboituu itse partikkeliin (musta yhtenäinen käyrä) ja valtaosa siroaa detektorimateriaaliin (sininen käyrä), kuten on tarkoitus. Merkittävä määrä säteilystä kuitenkin siroaa myös ilmaisimesta pois päin, joten parantamisen varaakin vielä olisi tässä esimerkissä.

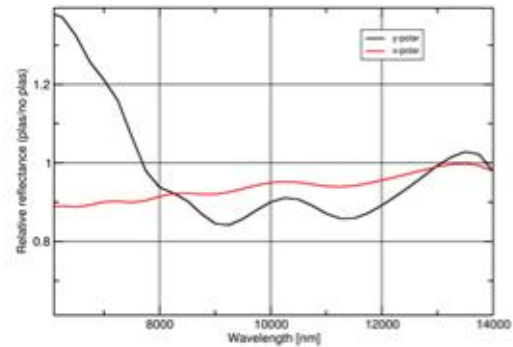
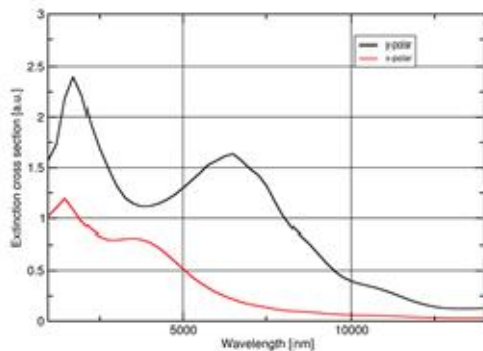
Kuvasta 4 myös nähdään, että partikkelin efektiivinen vuorovaikutusala voi olla merkittävästi suurempi kuin partikkelin geometrisen projektion pinta-ala. Tämä osaltaan selittää sitä, miksi plasmonisten rakenteiden avulla voidaan päästä aiempaa pienempiin pikselikokoihin.



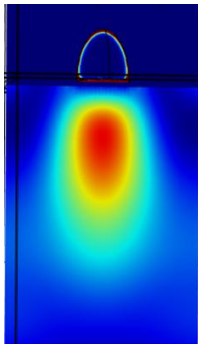
Kuva 4. PbS-ilmaisimen pinnalla olevan yksittäisen plasmonisen partikkelin laskettuja vuorovaikutusaloja suhteessa partikkelin geometrisen projektion pinta-alaan.

Esimerkki D

Kuvassa 5 on esitetty puolikkaan ellipsoidin muotoisen partikkelin efektiivinen vuorovaikutusala ja näiden partikkelien matriisista heijastuneen säteilyn suhteellinen määrä (vertailukohteena vastaava ilmaisin ilman plasmonisia rakenteita) kahdelle ortogonaaliselle eri polariteettia olevalle virittävälle kentälle. Kuvassa on myös esitetty partikkeli-ilmaisinsysteemiin absorboituneen tehon määrä katsottuna kahdesta eri suunnasta. Merkittävä polarisaatioriippuvuus on nähtävissä jokaisessa kuvassa.

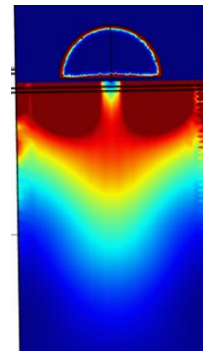


(a)



(c)

(b)



(d)

Kuva 5. Puolikkaan ellipsoidin muotoisen partikkelin (a) efektiivinen vuorovaikutusala ja (b) partikkelien muodostamasta matriisista heijastuneen säteilyn suhteellinen määrä (vertailukohteena vastaava ilmaisin ilman plasmonisia rakenteita) kahdelle eri polariteetia olevalle virittävälle z-suuntaan etenevälle kentälle. Polarisaatio x-suuntaan: punainen käyrä; y-suuntaan: musta käyrä. Ilmaisimeen absorboituneen tehon suuruus $6 \mu\text{m}$ aallonpituudella y-suuntaiselle kentälle katsottuna (c) xz-poikkileikkauksena ja (d) yz-poikkileikkauksena. Absorboitunut teho kasvaa kuvissa c ja d mentäessä sinisestä alueesta punaiseen.

Signaali-kohina -suhde, ilmaisimen nopeus ja tehonkulutus

Plasmonisten rakenteiden avulla voidaan parantaa infrapunailmaisimen signaali-kohina -suhdetta (S/N) tai vaihtoehtoisesti vähentää ilmaisimen tarvitsemää jäähdytystä. Tämä voidaan päätellä jo edellisten esimerkkien tuloksista, jos voidaan olettaa, että plasmonisten rakenteiden valmistus ei generoi uusia kohinamekanismeja tai vahvasta vanhoja. Koska plasmoniset rakenteet suunniteltiin valmistettavaksi erilleen ilmaisimen aktiivialueesta ja dielektrisen kerroksen erottamaksi, onnistuneessa prosessissa oletus on realistinen. Jos oletetaan, että jokainen foton generoi yhden elektroni-aukko -parin, jotka kaikki saadaan kerättyä signaalivirraksi, signaali kasvaa suoraan verrannollisesti absorboituneen infrapunasäteilyn määrään, jonka taas edellisissä esimerkeissä osoitettiin voivan kasvaa merkittävästi plasmonisten rakenteiden ansiosta (valituilla aallonpituusalueilla).

Yleisesti ottaen pienikokoinen ilmaisin on toivottava, jotta se olisi mahdollisimman nopea ja tehonkulutus ja kohina pienentä. Perinteisissä ilmaisimissa koon pienentämistä rajoittaa kuitenkin toisaalta puolijohteiden absorptiosyvyys ja toisaalta lateraalisuunnassa diffraktioraja. Jos ilmaisimen pinta-alaa pienennetään eikä tulevaa säteilyä voida konsentroida (fokusoida) ilmaisimelle, yleensä myös S/N-suhde pienenee, koska signaali pienenee suorassa suhteessa pinta-alaan ja kohina taas on verrannollinen pinta-alan neliöjuureen. Näitä

rajoja voidaan kuitenkin siirtää plasmoniikan keinoin, koska pienellekin detektorille voidaan kerätä suuri signaali konsentroidusti sekä lateraali- että syvyys suunnassa. Esimerkiksi: jos plasmoninen rakenne pystyy parantamaan ilmaisimen absorptiota 30 %, voidaan ilmaisimen pinta-ala pienentää 60 %:iin alkuperäisestä ja silti ylläpitää alkuperäinen S/N-suhde. Jos taas pinta-ala pienennetään vain 80%:iin alkuperäisestä, S/N kasvaa n. 16 %.

5. Loppupäätelmät

Hankkeessa saatiin lupaavia tuloksia plasmonisten rakenteiden hyödyistä infrapunailmaisimien ominaisuuksien parantamiseksi. Jo projektin ensimmäisessä vaiheessa osoitettiin laskennallisesti, että infrapunasäteilyn absorptio voidaan ainakin noin kolminkertaistaa esimerkkitapauksissa valituissa ilmaisinerakenteissa suhteellisen leveällä aallonpituuskaisalla 3 μm (PbS-ilmaisimien) ja 8-12 μm (HgCdTe-ilmaisimien) aallonpituuksien läheisyydessä.

Tässä raportoitavassa projektin toisessa vaiheessa löydettiin useita tehokkaita menetelmiä säätää plasmonisen rakenteen ja ilmaisinerakenteen vuorovaikutusta ja sitä kautta ilmaisimen (pikselitason) spektriominaisuuksia. Saatujen tulosten pohjalta pystytään jatkossa kohtuullisella työmäärällä räätälöimään toivottuja ominaisuuksia erilaisille ilmaisinerakenteille ja erilaisiin tarpeisiin. Toisaalta parametriavaruuden suuruus jättää edelleen paljon tutkittavaa myös tulevaisuuteen. Laskennallisten tulosten avulla myös osoitettiin, että paksum, jo hyvin absorboivan, kaupallisen detektorisirun absorptiotakin voidaan vielä parantaa noin 30-35% verrattuna vastaavaan siruun ilman plasmonisia rakenteita.

Koska absorptioiden parantaminen tarkoittaa suurempaa ilmaisimesta saatavaa signaalia, voidaan myös S/N -suhdetta parantaa tai, jos tyydytään entiseen S/N-suhteeseen, voidaan vastaavasti vähentää ilmaisimen jäähtymistä, mikä on erityisen tavoiteltavaa, kun pyritään entistä helpokäyttöisempiin hyvän suorituskyvyn systeemeihin. Edelleen simulaatioihin perustuen hankkeessa osoitettiin, että plasmoniset rakenteet mahdollistavat ilmaisimen (pikselin) koon pienentämisen ilman, että S/N-suhde huononee tai jopa sallii sen kasvattamisen, vaikka pikselikoko pienenee. Tämä taas helpottaa entistä nopeampien ja tehonkulutukseltaan pienempien ilmaisimien valmistamisen tulevaisuudessa.

Plasmoniikan soveltaminen infrapuna-alueen ilmaisimiin on teknologisesti mahdollista jo tänään. Tarvitaan periaatteessa vain yksi uusi litografianvaihe tarvittavien rakenteiden lisäämiseksi infrapunailmaisimen tai -kameran valmistusprosessiin. Liikuttaessa infrapuna-alueella valmistukselliset resoluutiovaatimukset ovat merkittävästi pienemmät kuin näkyvän valon aallonpituuksilla, mikä voi antaa plasmonisille infrapunailmaisimille merkittävän valmistus- ja kustannusteknisen edun verrattuna näkyvän valon plasmonisiin ilmaisimiin. Toisaalta tiettyjen rakenteiden suuremmat dimensiot myös vertikaalisesti voivat tuoda uusia haasteita kustannustehokkaiden valmistusmenetelmien löytämiselle.

Hankkeessa keskityttiin suunnitelman mukaisesti tutkimaan lähinnä laskennallisesti plasmoniikan mahdollisuuksia fotonisissa ilmaisimissa (valodiodit, valojohteet) ja asetetut tavoitteet saavutettiin hyvin. Koska optimaalinen plasmoninen rakenne kuitenkin riippuu aina myös ilmaisimen rakenteen yksityiskohdista ja, toisaalta, plasmoniikalla voidaan tuoda lisävapauksia ilmaisinerakenteen suunnitteluun, jatkossa olisikin kiinnostavaa optimoida plasmoninen infrapunailmaisimien tiettyyn sovellukseen valmistajan antamien valmistuksellisten reunaehtojen mukaisesti, jolloin päästäisiin lähemmäksi tutkimuksen todellista hyödyntämistä. Toinen nykypäivän teknologisen kehityksen kannalta erityisen kiinnostava tutkimuskohde jatkossa olisi plasmoniikan soveltaminen termisiin detektoreihin, bolometreihin, joissa on omat haasteensa ja suunnittelusääntönsä.



6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Hankkeen aikana ei syntynyt muita raportteja. Tutkimuksen tuloksiin perustuen on valmistella käsikirjoitus, joka on tullaan lähettämään aiheeseen soveltuvaan kansainväliseen vertaisarvioituun julkaisusarjaan.