

Metaoptiikan soveltaminen puolustusteolliseen optiikkaan

Toteuttajat: VTT
Rahoitus: 111 164€
Kaksivuotinen hanke 2025-2026, 1. vuosi

Aleksi Leinonen

20/11/2025 VTT – beyond the obvious



Projekti - yleisesti

- Ensimmäinen vuosi kaksivuotista projektia
 - Esitetään välivaiheen tulokset, pääosa työstä vasta alkamassa
- Projektissa tutkitaan simulaatioiden avulla mitkä puolustusteolliset käyttökohteet hyötyisivät eniten metaoptiikasta ja mitä realistisia etuja metaoptiikalla on mahdollista saavuttaa.
- Verrataan valmistuskustannuksia ja saavutettavia etuja nykyisiin optisiin ratkaisuihin
 - Valitaan yksi käyttökohde johon suunnitellaan metaoptiikka
 - Verrataan simuloitua metaoptista elementtiä vertailukelpoiseen lasioptiikkaan
- Tavoitteena on löytää hyviä sovelluskohteita rautatason proof-of-concept toteutukselle.



Tieteellinen ongelma ja potentiaali:

- Keskeinen tutkimuskysymys:
 - Kuinka metaoptiikka soveltuu puolustusteknisiin optisiin sensoreihin?
 - Onko metaoptisten sensoreiden valmistaminen realistista?
 - Hinta
 - Mekaaninen stabiilius
 - Lämpö- ja vikasieto
 - Valmistuskustannukset
- Voiko metaoptiikalla korvata suurempia optisia järjestelmiä ja saadaanko jotain uutta etua suorituskyvyssä tai mekaanisessa toteutuksessa?
 - Hinta vs suorituskyky
 - Mitä tapoja toteuttaa?

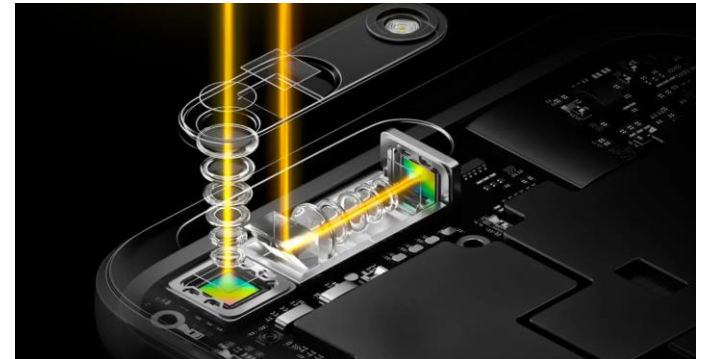


Optiikka yleisesti - ongelmat

- Optiikka perustuu valon vaiheen muuttamiseen
 - Toteutetaan yleensä lasista valmistetuilla linseillä tai peileillä.
 - Perustuu materiaalin paksuuteen ja muotoon.
 - Koostuu useista komponenteista jotka voivat olla tiukoilla toleransseilla suhteessa toisiinsa.
- Ongelmia:
 - Paksuus, muoto ja paino
 - Iso määrä optisia komponentteja pitää ahtaa pieneen tilaan.
 - Paikalla suuri merkitys
- Optiikan pienentäminen on vaikeaa koska väliaineen materiaali ja muoto määrää valon vaihe-eron
 - Nopeat muutokset vaikeita tavallisilla menetelmillä
 - Aliaallonpituksilla rakenteilla (metaoptiikka), on mahdollista.



Credit: NASA/Desiree Stover



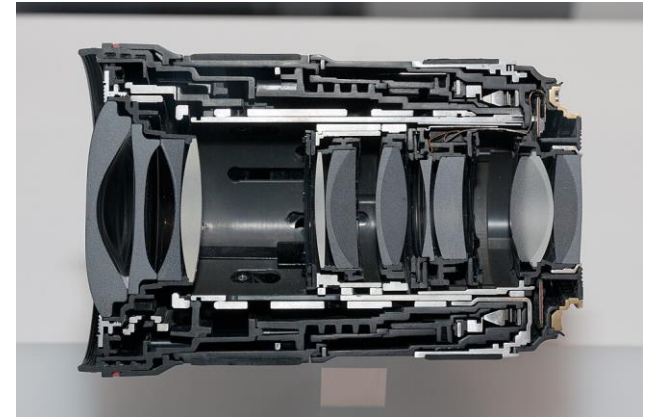
<https://petapixel.com/2017/02/27/oppo-reveals-periscope-inspired-5x-optical-zoom-system-smartphones/>

Tieteellinen ongelma:

- Optiikan pienentäminen ja keventäminen
 - Optiikan pienentäminen hankalaa
 - Kaarevien pintojen mekaaninen kiinnitys voi olla haastavaa (esimerkkikuva oikealla)
- Optiikan pienentäminen ja keventäminen
 - On eri tapoja pienentää optiikkaa:
 - Asfäärit, free-form
 - Nokkelat peiliratkaisut,
 - Reunalaskennan lisääminen
 - Metaoptiikka
- Potentiaalia mekaniikan yksinkertaistamiselle
 - Kaarevien kappaleiden sijaan voidaan tehdä tasainen linssi
 - Parantaa mekaanista kestävyyttä ja häiriösietoa



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Canon_EF_600mm_F4_L_IS_II_USM_cutaway_2012_CP%2B.jpg

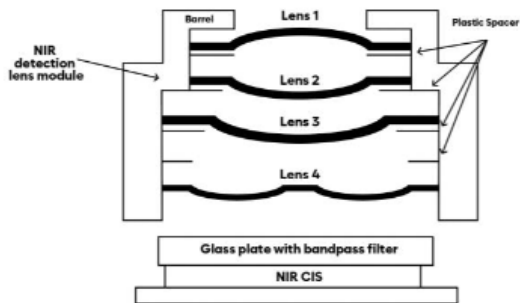


https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Canon_EF_16-35mm_F2.8L_III_USM_cutaway_2017_CP%2B.jpg

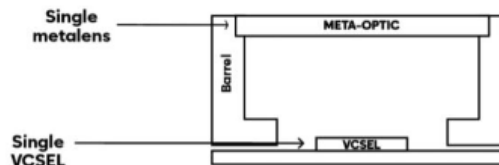
Miksi metaoptiikka

- Kaikki optiikka perustuu valon vaiheen ja amplitudin muutokseen.
- Lasioptiikassa vaihetta muokataan paksuilla kaarevilla lasirakenteilla.
- Metaoptiikassa puolestaan valon kulkua ohjataan hyvin ohuilla ja tasaisilla nanorakenteilla.
- Valmista kaupallista optiikkaa ei vielä ole saatavilla, mutta valmistajia löytyy (VTT, PiBond, NILT, Metalenz).

Conventional Imaging Optic



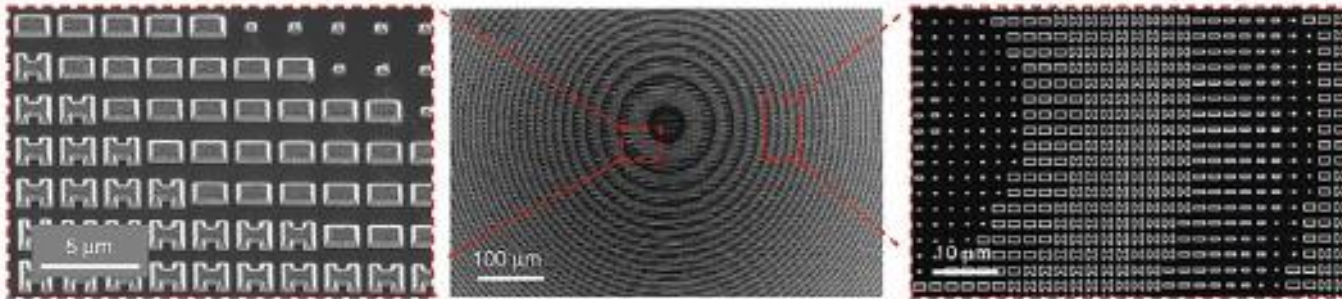
metalenz Metasurface Optic



<https://metalenz.com/our-technology/>

Metaoptiikka - Rakenne

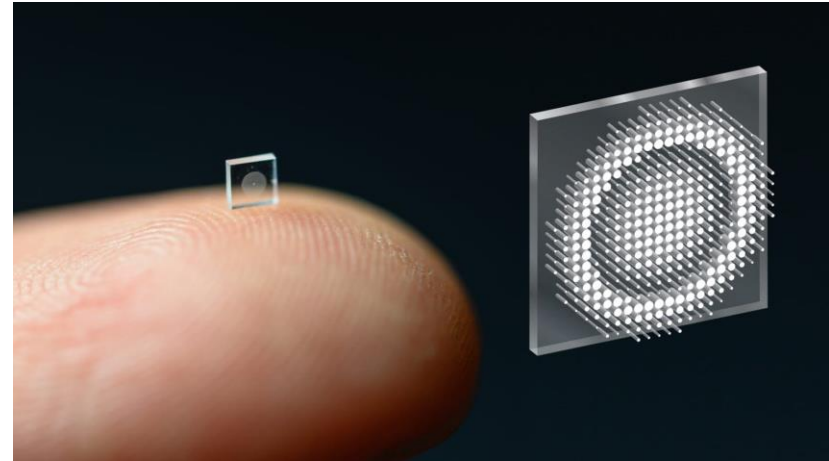
- Rakenne pohjautuu tuhansiin ns. meta-atomeihin
 - Meta-atomien koko riippuu valon aallonpituudesta, kuitenkin aina alle valon aallonpituuden
 - n. 5 nm - 10 μ m, riippuu aallonpituudesta.
 - Materiaaleina dielektri tai metalli, riippuen käyttökohteesta
 - Linssi koostuisi miljoonista pilareista
 - Valmistetaan litografisin menetelmin
- Valmistuksen rajoitteena litografisten menetelmien resoluutio ja toistettavuus
 - Materiaalien rajoitteet



L. Zhang, et al, Ultra-thin high-efficiency mid-infrared transmissive Huygens meta-optics, Nat. Com. 9, 1481 (2018).

Metaoptiikka - Edut

- Voidaan tehdä tasaista (flat) ja pientä optiikkaa
 - Tasaisuus helpottaa optomekaanista asennusta
 - Optiikan miniatyrisointi ja painon vähentäminen
- Optisen diffraktion tuomat mahdollisuudet
 - Hila ja linssi samassa rakenteessa
- Mahdollisuus käyttää valon polarisaatiota vapausasteena
 - Eri polarisaatiotilojen ohjaaminen, esim polarisaatiokamera
 - Säteen ohjaus polarisaation muutoksella
 - Linssin polttopisteen muutos polarisaatiolla
 - Optiset kulmamomenttisäteiden luonti



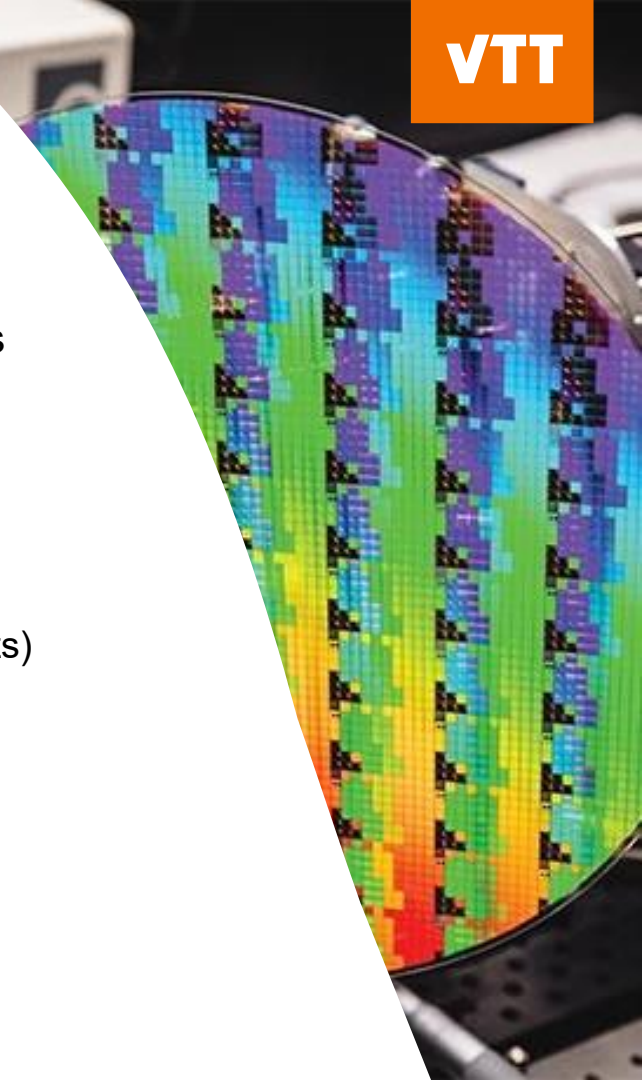
<https://engineering.princeton.edu/news/2021/11/29/researchers-shrink-camera-size-salt-grain>

Metaoptiikka - Heikkoudet

- Metaoptiikka luodaan diffraktiivisilla elementeillä mikä synnyttää vahvan aallonpituusriippuvuuden
 - Huono läpäisytehokkuus laajakaistaiselle optiikalle
 - Erityinen ongelma näkyvän alueen valolle (liittyy rakenteiden kokoon)
 - Aktiivinen tutkimusalue
- Rakenteiden suunnittelussa käytetään aaltosimulaatioita sädesimulaatioiden sijaan.
 - Laskennallisesti hyvin raskasta
 - Eri laskentatapoja olemassa
- Litografinen valmistustapa
 - Rajoittaa mahdollisia valmistajia
 - Litografiset prosessit enimmäkseen hitaita ja kalliita
 - Nanoimprinting litografia ratkaisuna toistaiseksi

Metaoptiikka edut vs heikkoudet

- Metaoptiikalla mahdolliset edut selviä, käytännön toteutus voi olla vaikeaa ja kallista suhteessa lasioptiikkaan.
 - Klassisella optiikalla tulee jatkossakin olemaan rooli.
- Miten edut ja haitat suhteutuvat keskenään?
 - Tehdään kustannusarvio
 - SWOT-analyysi (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats)
 - Toteutetaan vuoden 2026 aikana.
- Vertailukohtana käytetään kaupallisesti saatavilla olevaa lasioptiikkaa.



Käyttökohteiden selvitys

- Aloitettu määrittämällä mielenkiintoiset alueet
 - LWIR (lämpökuvaus) alueen optiikka
 - Okuläärioptiikka (esim. kiikaritähtäimet)
 - Sensorien tehokkuuden parantaminen
 - Optinen kommunikaatio
- Potentiaaliset aiheet
 - Valon keräyskyvyn parantaminen kuvantavassa optiikassa, voiko aukkolukua pienentää metaoptiikan avulla?
 - Sensorien herkkyyden parantaminen
 - Polttovälin ja optiikan koon pienentäminen
 - Hybridirakenteiden mahdollisuudet?
 - Kohteiden tunnistus polarisaatio-ominaisuuksien pohjalta
 - Esim lämpösäteilyn heijastus

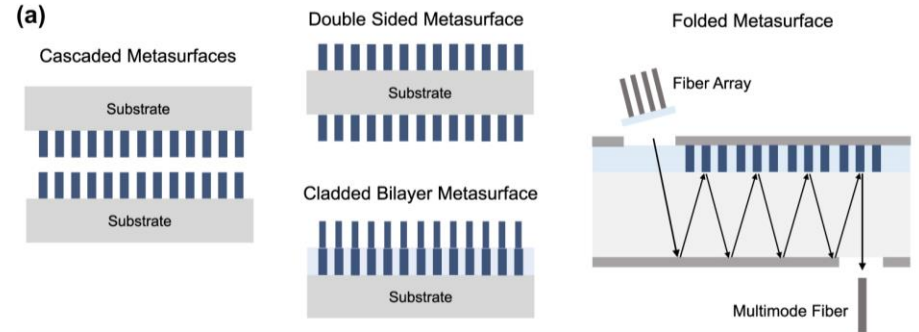
Tunnistetut käyttötavat

■ Metalinssi

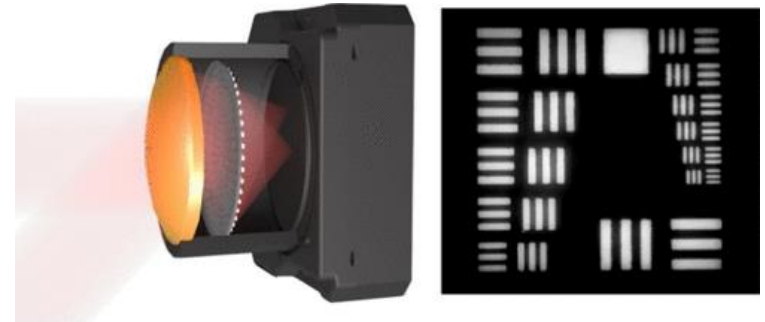
- Monikromaattinen toteutus usealla metalinssillä eri aallonpituuksille
- Usean metalinssin yhdistelmä

■ Hybridi

- Metalinssin kanssa käytetään lasioptiikkaa
- Lasioptiikalla voitaisiin mm. korjata värvirheet (eri fokuspiste)
- Metaoptiikka voisi myös olla ohut kalvo linssin päälle painettuna jolla korjataan aberraatioita



Dorrah, Ahmed H.. "Compound meta-optics: there is plenty of room at the top" *Nanophotonics*, vol. 14, no. 23, 2025, pp. 3835-3849.



Mingze Liu, Weixing Zhao, Yilin Wang, Pengcheng Huo, Hui Zhang, Yan-qing Lu, and Ting Xu, *Nano Letters* **2024** 24 (25), 7609-7615

Käyttökohteiden selvitys - referenssoptiikka

- Valittu käyttökohteeksi kuvantava optiikka
 - Ei näkyvä aallonpituus
- Selvityksessä hyödynnetään kaupallisia objektiiveja referensseinä
 - Haluttava suoritus kyky otetaan niistä
 - Verrataan projektin loppupuoolella
 - Esimerkkinä alla okulääri (kiikari) ja LWIR optiikka (lämpökamera)

Ultralight Eyepiece Assembly



Product Specifications

RPO Part Number:	5A0574
Eye Relief:	25mm +0/-0.2mm
Weight:	<= 24 grams
EFL:	27.03 +/- 0.5mm
Flange Focal Distance:	10mm + 0.28mm/-0.42mm
Exit Pupil Diameter:	>=14mm on axis
Field of View:	40.0° +/- 1° for a 18mm image format
Diopter Focus:	+2 to -6 diopters at 25mm eye relief*
Transmission:	>=85% weighted avg. from 400-680nm
Distortion:	-8%, +/- 0.5% at semi-field angle of 20°
Immersion:	20 meters for not less than 2 hours

<https://www.rpoptics.com/nv-opt-assemblies>

SuplIR 75 mm f/1.2 Manual Focus LWIR XGA Imaging Lenses

[PRODUCTS](#) [HFOV \(DEG\)](#) [FEATURES](#) [RESOURCES](#) [CONTACT US](#)

The SuplIR 75mm f/1.2 manual focus LWIR imaging lens has a 75.0 mm focal length with an f-number of 1.2. This single field of view lens (1-FOV) is designed for 1024x768 XGA format uncooled LWIR cameras.

- Advanced technologies for the highest performance long wave focal planes
- LWIR Hard-carbon AR coating for 8-12 μm
- Passive athermalization with the highest imaging performance from -30 to +70°C
- Compatible with 12 μm pixel pitch, 1024x768 XGA format LWIR cameras
- Providing superior performance from 400 m out to infinity
- Cost-effective solution for high-resolution thermal imaging and sensing

[See All Features](#)



<https://www.ophiropt.com/en/f/manual-75mm-f-1.2-lwir-hd-imaging-lens>

Mitä seuraavaksi

- Valittu sovelluskohteeksi kuvantava lämpökameran linssi
 - Käytetään referenssinä kaupallisia linssejä joista tiedot saatavilla



<https://www.ophiropt.com/en/f/manual-75mm-f-1.2-lwir-hd-imaging-lens>

- Metaoptiikan suunnittelu linssille aloitettu 11/2025,
 - Optinen suunnittelu tehdään talven 2025-2026 aikana.

Jatkokäyttö ja hyödyntäminen

- Projektin lopussa:
 - Projektin tuloksena syntyy pohja proof-of-concept jatkoprojektille
 - Tavoitteena pienikokoinen kuvantava kamerasensori joka olisi integroitavissa pienikokoiseen autonomiseen ajoneuvoon (esimerkiksi drone)
 - Raportti metaoptiikan eduista ja hyödyistä teollisessa käytössä, sekä tapoja hyödyntää niitä soveltaviin puolustusteollisiin ratkaisuihin.
 - Keskustelemme kotimaisten toimijoiden kanssa jotta voi syntyä uusia kotimaisia sensortechnologioita.

bey⁰nd

the obvious

Kiitos!

Aleksi Leinonen
aleksi.leinonen@vtt.fi
+358 50 472 0905

vttresearch.com