



### **Raport annual**

2020

### A2.1.1 Design-uri avansate de imagini reglabile prin utilizarea softurilor PWE, FDTD (SINTEF- P1)

Pentru a obține o distanță focală reglabilă a metalenselor, metastructura trebuie să fie încorporată în PDMS și ridicată de pe substratul Si. Prin întinderea metastructurii încorporate în PDMS, distanța focală a lentilei este modificată cu cantitatea  $\Delta f = \epsilon_s (2 + \epsilon_s) f$ , unde f este distanța focală neîntinsă și  $\epsilon_s = \Delta d/d$  este întinderea (adică : modificarea diametrului lentilei cu  $\Delta d$  în raport cu diametrul neîntins d). Au fost realizate design-uri noi de metasuprafețe pentru metastructuri încorporate în PDMS fără substrat, care au fost optimizate în funcție de variația periodicității în intervalul  $p \in [0.55\mu m, 0.85\mu m]$ . Exemple se regăsesc în Fig.1. La îndepărtarea substratului de Si, stratul PDMS acționează ca un strat de ghid de undă datorită faptului că are un indice mai mare decât aerul din jur și că grosimea sa este comparabilă cu lungimea de undă (Fig. 1b).



Fig 1: (a) Câmp trans-polarizat transmis la schimbarea periodicității rețelei. Aici structura oferă o transmisie ridicată și relativ plată, deoarece periodicitatea se schimbă între  $p \in [0.55 \mu m, 0.85 \mu m]$ . (b) Câmp trans-polarizat transmis pentru diferite lungimi de undă. Prezența rezonanțelor Fano este vizibilă.

P1 a <u>implementat o tehnică de proiectare a hologramei</u> folosind algoritmul Gerchberg Saxton în combinație cu propagarea fasciculului folosind reprezentarea spectrului unghiular al câmpurilor electromagnetice. În prezent, printre ideile de implementare testate, lentilele extensibile și configurația diafragmei este cea mai promițătoare pentru un SNR ridicat (Raportul semnal-zgomot).

Proiectarea sistemului de senzori. O configurație a lentilelor varifocale a fost proiectată și analizată analitic, mai mult a fost realizată și o verificare inițială folosind software-ul de simulare Zemax. S-au realizat schițele componentelor necesare pentru realizarea întinderii radiale a metalentilelor.

- .



### A 2.1.2: Design-uri avansate de imagini reglabile prin utilizarea softului COMSOL (P3-partner)

În 2020, P3 a arătat, folosind expresii analitice și simulări numerice în COMSOL, că metalensele care conferă o diferență de fază controlată între câmpurile circulare reflectate și transmise pot fi proiectate să acționeze și ca emițători termici. În special, emisivitatea termică a acestor dispozitive avansate de imagistică poate fi reglată prin selectarea geometriei adecvate a celulei unitare a metasuprafeței.

În marea majoritate a cazurilor, metasuprafețele sunt optimizate pentru o aplicație dorită: imagistica, focalizarea, generarea de fascicule de lumină răsucite etc.. Cu toate acestea, există metasuprafețe concepute pentru a îndeplini mai mult de o sarcină [1]. În special, P3 au demonstrat că metasuprafețele ar putea conferi o fază relativă controlabilă între cele două câmpuri ortogonale care formează baza polarizării circulare și pot fi astfel folosite pentru a focaliza un câmp electromagnetic incident, acționând în același timp ca un emițător termic în spectrul infraroșu apropiat, adică având o absorbție finită la lungimea de undă de lucru.

### Detalierea modului în care s-au realizat simulările:

- Au investigat două tipuri de metasuprafețe care cuplează câmpurile bazei de polarizare circulară, proprietatea lor definitorie fiind că pot fi caracterizate printr-un tensor local de polarizabilitate cu două componente ortogonale  $\alpha_x$  și  $\alpha_y$ . În acest caz, pot fi efectuate atât simulări analitice, cât și numerice, cu un acord remarcabil între ele.





Celula unitară a metasuprafeței pe care o considerăm este reprezentată în Fig. 2(a) și 2(b). Aceasta este alcătuită dintr-un meta-atom metalic foarte anizotrop cu înălțimea, lățimea și lungimea notate cu h, w, l, plasate peste un substrat dielectric cu grosimea s (SiO<sub>2</sub>, cu indice de refracție = 1,447), care la rândul său este situat pe partea superioară a unui strat metalic continuu cu grosimea t mult mai mare decât adâncimea (t = 0 dacă stratul metalic inferior nu este prezent). Metalul este aur. Celulele unitare sunt dispuse într-o rețea pătrată cu perioada  $\Lambda$ , iar meta-atomul se poate roti în planul metasuprafeței, notat ca planul (x,y).

Având în vedere că structura echivalentă a metasuprafeței, ilustrată în Fig. 2(c), constă dintrun strat de acoperire cu indice de refracție  $n_c$  (aer, cu  $n_c = 1$ ), metasuprafața ultrasubțire (notată cu MS) cu un tensor local de polarizabilitate cu componente diagonale  $\alpha_x$  și  $\alpha_y$ , și un substrat cu indicele de refracție  $n_s$ , componentele câmpului electromagnetic transmis  $E_t$ , la incidență normală (în baza polarizării circulare), sunt legate de componentele respective ale câmpului de intrare,  $E_{in}$ , incidente pe suprafața MS. Liechtenstein Norway grants

$$\begin{pmatrix} E_{t,R} \\ E_{t,L} \end{pmatrix} = \frac{2n_c}{n^2 + (k_0\alpha_-)^2} \begin{pmatrix} n & ik_0\alpha_- \exp(-i2\theta) \\ ik_0\alpha_- \exp(i2\theta) & n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{in,R} \\ E_{in,L} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{in,R} \\ E_{in,L} \end{pmatrix}$$
(1)

În ecuația (1) indicii R și L sunt pentru polarizările circulare dreaptă și, respectiv, stângă  $k_0 = \omega/c = 2\pi/\lambda$ ,  $\alpha_{\pm} = (\alpha_x \pm \alpha_y)/2$ , și  $n = n_c + n_s - ik_0\alpha_+$ . Componentele câmpului reflectat pot fi găsite folosind condiția la limită  $E_{in} + E_r = E_t$ . Ecuația (1) indică faptul că între componentele polarizate încrucișat se dezvoltă o diferență de fază determinată doar de unghiul de rotație  $\theta$  al metaatomilor metalici, în timp ce unda copolarizată (transmisă sau reflectată) capătă o fază constantă,  $\theta$ -independentă.

### A. Metasuprafețe fără strat metalic în partea de jos

Structura din Fig. 1, pentru  $\Lambda$  = 450 nm, *h* = 30 nm, *w* = 80 nm, și *l* = 300 nm, iluminate cu lumină liniar polarizată de-a lungul axelor x și y, poate fi caracterizată prin componentele diagonale  $\alpha_x$  și  $\alpha_v$ , ale tensorului de polarizare a unei forme Lorentziene:

$$\alpha_{x,y} = \frac{cg_{x,y}\gamma_{x,y}}{\omega^2 - \omega_{x,y}^2 - i\omega_{x,y}\gamma_{x,y}}$$
(2)

cu *c* viteza luminii în vid și  $\omega_{x,y} = 2\pi c / \lambda_{x,y}$ . Într-adevăr, transmisia T, reflexia R și absorbția A simulate și prezentate în Fig. 3(a) și 3(b) sunt în acord cu polarizările lorentziane dacă sunt fitate cu parametrii  $g_x = 13$ ,  $g_y = 1.3$ ,  $\gamma_x = 6.8 \ 1013$ ,  $\gamma_y = 201012$ ,  $\lambda_x = 1.27 \ \mu\text{m}$ , și  $\lambda_y = 0.6 \ \mu\text{m}$ . Apoi, după cum se poate observa din Fig. 3(c), parametrii R, T și A obținuți din (1) cu aceste valori de fitare, sunt într-un bun acord cu cei simulați numeric de COMSOL pentru un câmp electric incident în infraroșu polarizat la stânga; în cele ce urmează, toate câmpurile incidente vor fi considerate polarizate circular la stânga.



Fig. 3

# Iceland Liechtenstein



Rezumând, metasuprafața controlează diferența de fază dintre câmpurile încrucișate și copolarizate prin unghiul de înclinare al meta-atomului, asigurând o absorbanță finită la lungimea de undă rezonantă în infraroșu apropiat. Lungimea de undă rezonantă a metasuprafeței, precum și absorbanța, reflectanța (linii întrerupte) și transmitanța (linii continue) ale câmpurilor polarizate încrucișate (subscript cross) variază fără probleme cu parametrii structurii, așa cum se poate vedea din Fig. 4(a) și, respectiv, 4(b). Valoarea maximă a absorbanței crește (și câmpurile polarizate încrucișate scad) pe măsură ce densitatea de umplere/împachetare a celulei unitare scade (pe măsură ce w, l și h scad în raport cu structura cu h = 30 nm, w = 80 nm și l = 300 nm); aceste rezultate sunt în concordanță cu constatările din [4]. Lungimile de undă rezonante se schimbă la valori mai mici cu creșterea h și w și la valori mai mari pe măsură ce l crește. Cu toate acestea, deși gama de parametri a fost destul de largă, am constatat că atât câmpurile polarizate încrucișate, cât și absorbanța rămân destul de mici. Prin urmare, am investigat în secțiunea următoare structurile având strat metallic în partea de joc, așteptând ca, în special absorbanța, să crească.



Fig. 4

### B. Metasuprafețe cu strat metallic în partea de jos

Simulări similare au fost efectuate pentru metasuprafețe având un strat metalic în partea de jos pentru care simulările COMSOL pentru  $\theta = 0$  și pentru iluminarea cu lumină polarizată liniar dea lungul axelor x și y au scos la iveală rezonanțe cu forme complexe, care nu au putut fi fitate cu ajutorul componentelelor  $\alpha_x$  și  $\alpha_y$  ale unui singur tensor de polarizare Lorentzian. Cu toate acestea, simetria meta-atomilor asigură ca tensorul de polarizabilitate local să aibă două componente ortogonale/diagonale  $\alpha_x$  și  $\alpha_y$ , astfel încât forma lui (1) să rămână neschimbată.



Fig. 5

Această afirmație este confirmată de Fig. 5, 6 și 7, care ilustrează rezultatele simulării numerice pentru structuri similare ca în secțiunea anterioară (h = 30 nm, w = 80 nm și l = 300 nm) și



grosimi ale stratului dielectric de 200 nm, 150 nm și 100 nm , respectiv. În acest caz nu există lumină transmisă și, în comparație cu metasuprafețele fără strat metalic în partea de jos, în apropierea lungimilor de undă rezonante din regiunea infraroșu apropiat absorbanța, precum și reflectanța polarizată încrucișat sunt mai mari; absorbanța în toate cazurile este de aproximativ 20%, în timp ce puterea în lumina polarizată încrucișată este de aproximativ 80% față de cea incidentă la lungime de undă de rezonanță la care reflectanța copolarizată este foarte mică. Astfel, stratul inferior metalic acționează ca și un catalizator pentru cuplarea puterii la câmpul polarizată este de două ori mai mare decât unghiul de înclinare  $\theta$  al meta-atomului.



Din nou, variind parametrii geometrici ai meta-atomului, am investigat variația absorbanței (linia continuă), a reflectanței luminii polarizate încrucișate (linia întreruptă) și a lungimilor de undă rezonante (Fig. 8) pentru structura cu s = 200 nm. Comportarea acestor mărimi diferă de cea din structurile fără strat metalic studiate anterior, diferența cea mai evidentă fiind modificarea semnificativă a formei curbelor de reflectanță polarizate încrucișat în intervalul parametrilor luați în considerare.





Fig. 9

Valoarea maximă A crește pe măsură ce l scade, iar h și w cresc, în timp ce lungimile de undă rezonante se deplasează la valori mai mici, dezvoltând în același timp o rezonanță mai accentuată odată cu creșterea h și w și la valori mai mari precum și curbe mai largi pe măsură ce l crește. Comportamente similare au fost obținute pentru celelalte structuri cu strat metalic în partea de jos.



Câmpul electric este localizat în spațiile dintre meta-atomii metalici, în regiunea superioară a dielectricului, și este concentrat la marginile meta-atomilor. Într-un fel, câmpul electric poate fi considerat ghidat/localizat, astfel încât să se aplice formula pentru lungimea de undă rezonantă din [5]. Lățimea ghidului de undă este de aproximativ 300 nm într-o direcție și de aproximativ 350 nm în cealaltă direcție, ceea ce justifică valoarea lui  $w_{eff}$  aleasă mai sus. Faptul că lungimea de undă rezonantă estimată pentru s = 200 nm este în acord mai slab cu cea rezultată din Fig. 5 poate fi înțeles și din Fig. 9, care arată neuniformitatea câmpului electric răspândit în stratul dielectric, astfel încât pentru straturi dielectrice mai groase dimensiunea efectivă a ghidului de undă este mai mică decât s.

#### - Metalentile multifuncționale avansate:

După cum s-a discutat anterior, atât simulările analitice, cât și cele numerice sugerează că metasuprafața din Fig. 2, pentru care diferența de fază dintre câmpurile polarizate încrucișate este controlată de  $\theta$ , poate fi utilizată pentru a implementa o lentilă cu distanța focală f, care ar trebui să confere ( ideal) o fază variabilă spațial la un câmp optic incident polarizat circular  $\Delta \varphi_{id} = \varphi(x, y; \lambda) - \varphi(0,0; \lambda) = 2\pi (f - \sqrt{x^2 + y^2 + f^2})/\lambda$ . În acest scop, trebuie împărțit frontul de undă în pași – ca părți, fiecare dintre ele trecând printr-o metasuprafață constând din celule unitare în care meta-atomii au unghiul de rotație adecvat  $\theta$  și să se observe componenta polarizată încrucișată de la ieșire. De exemplu, Fig. 10(a) ilustrează distribuția ideală de fază a unei lentile cu o distanță focală de 10 mm (linie neagră), precum și aproximările în pași, când diferența de fază dată de rotația meta-atomilor între regiunile adiacente (conținând celule unitare cu același  $\theta$ ) este 15° (linia albastră) și, respectiv, 5° (linia roșie).

În primul caz, sunt necesare 24 de regiuni, de lățimi diferite (conținând un număr diferit de celule unitare ca cel din Fig. 2) pentru a acoperi întregul interval de  $2\pi$ , în timp ce în al doilea caz sunt necesare 72 de regiuni. Pentru a estima eroarea în implementarea fazei introdusă de aproximarea în trepte, se poate calcula distanța normalizată dintre curbele ideală și cea în trepte ca  $\sqrt{\sum_{i} (\Delta \varphi_{id} - \Delta \varphi_{step})^2 / \sum_{i} \Delta \varphi_{id}^2}$ , unde suma este preluată peste toate marginile tuturor celor 361 de celule unitare care formează metalentilele cu diametrul de 300 µm; r în Fig. 10(a) denotă





coordonatele radiale. Valoarea obținută este de aproximativ 3% pentru metastructura cu pas de 15° în unghiul de rotație și de numai 1% pentru cea cu pas de 5°. Rețineți totuși că  $\theta$  poate fi rotit continuu între celulele unitare adiacente, astfel încât eroarea ar putea deveni chiar mai mică decât această valoare. În plus, pentru a nu distorsiona frontul de undă incident, transmisia/reflectanța metasuprafețelor trebuie să fie aceeași pe întregul diametru al lentilei, condiție care s-a dovedit a fi îndeplinită atât de structurile investigate cu strat metalic jos, cât și de cele fără strat metalic.



Fig.10

### Reglarea lungimii de undă rezonante în infraroșu și a absorbanței metalenselor multifuncționale

S-au realizat simulări ale diferitelor reflectanțe încrucișate și copolarizate (indicii cr și co), ale reflexiei totale (notate cu R) și ale absorbanței A a diferitelor configurații, investigate în vederea identificării celei optime în termeni de A mare și îngustă și Rcr. În acest raport se va prezenta doar o parte.

Deoarece structura din Fig. 2, cu meta-atomi metalici, conduce la curbe de absorbanță destul de largi, indiferent de parametrii geometrici și de material aleși , au fost investigate în continuare structuri similare cu strat metalic, dar cu meta-atomi dielectrici, din Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, de aceeași formă. (Fig. 13(a), stânga), inspirate de rezultatele din [12].





Rezultatele corespunzătoare pentru  $\Lambda$  = 1000 nm, w = 350 nm, l = 800 nm, h = 950 nm, a = 200 nm, b = 100 nm, t = 1200 nm sunt ilustrate în Fig. 13(a), dreapta. Deși A și Rcr au ambele valori mari în lățimi de bandă foarte înguste (și multiple), parametrii structurii, în special h și t, ar trebui diminuați din considerente tehnologice. Prin urmare, am investigat diferite structuri. Rezultatele pentru metasuprafețe cu  $\Lambda$  = 1000 nm, l = 600 nm, h = 100 nm și (i) w = 300 nm, a = 250 nm, b = 150 nm, t = 1200 nm și (ii) w = 200 nm, a = 300 nm, b = 100 nm, t = 500 nm sunt prezentate în Fig. 11(b) și, respectiv, (c). În toate cazurile putem obține metalentile infraroșii (cu faze controlate de rotația meta-atomilor), care pot în același timp îmbunătății considerabil coerența radiațiilor termice deoarece A este înaltă și foarte îngust ca spectru.



Indiferent dacă rezultatele de mai sus sunt satisfăcătoare pentru obiectivul acestui studiu, un absorbant extrem de îngust din punct de vedere spectral și metalentila vor acționa numai pe o parte îngustă corespunzătoare a spectrului luminii incidente. Prin urmare, în ultima parte a investigației am simulat configurații dielectrice multistratificate cu strat metalic în partea de jos și cu meta-atomi metalici. Intenția este de a găsi numărul optim de straturi/perioade astfel încât atât A cât și Rcr să aibă valori ridicate cu forme rezonabil de înguste. Datorită interfețelor bune și ușurinței creșterii lor prin depunerea de strature atomice, ne-am concentrat pe structurile formate din straturi alternative de HfO<sub>2</sub> și Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Pentru configurația descrisă în insertul din Fig. 12(b), cu  $\Lambda$  = 400 nm, w = 100 nm, l = 250 nm, h = 30 nm, h1 = 50 nm, h2 = 40 nm, rezultatele sunt prezentate în Fig. 12(a), Fig. 12(b) care se referă la o structură care conține 3 perioade de HfO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> în loc de două. Simulările pentru configurația cu 2 perioade arată o îngustare spectrală îmbunătățită atât a A cât și a Rcr în raport cu metasuprafața având SiO<sub>2</sub> ca dielectric, avantaj care dispare dacă numărul de perioade scade, după cum se vede în Fig. 12(b).

În concluzie, prin modificarea dimensiunilor geometrice și a materialelor constitutive ale meta-atomilor puternic anizotropi, se pot implementa metalentile care controlează faza câmpului polarizat încrucișat, coeficientul de reflexie al acestuia și absorbanța totală, acționând astfel și ca amplificator de coerență pentru emițătorii termici în domeniul infraroșu apropiat. Configurația specifică de interes depinde de aplicație și de sursa de lumină disponibilă.

### Act2.2 Optimizarea proceselor de EBL și DRIE (Partener P2-IMT):

Prima activitate legată de partenerul P2 este optimizarea procesului de litografie cu fascicul de electroni care, conform calendarului proiectului nostru, trebuie să fie realizat din ianuarie până în mai. Partenerul a atins obiectivul și livrabilul a fost dat la timp. La această etapă, continuând





munca din anul incendiilor, s-a pus accentul pe optimizarea procesului de corodare a metasuprafețelor.

Pentru a coroda metasuprafețele de Si, s-a utilizat un PlasmaLab100 (Oxford Instruments, Marea Britanie) echipat cu o butelie de azot lichid, permițând astfel procese de corodare criogenică la temperaturi de până la -120°C.

#### Tabel 1: Parametrii procesului criogenic

Dutana ICD	Dutana DE	Durations			Taura anatana ana anto ini
Putere ICP	Putere RF	Presiune	FIUX SF6	FIUX O <sub>2</sub>	Temperatura suportului
1200 W	3 W	7,5 mTorr	60 sccm	8 sccm	-115 °C

**Optimizarea procesului** sa concentrat pe două aspecte: (a) profilul vertical al nanostâlpilor și (b) stratul de mascare. Pentru optimizarea profilului vertical al stâlpilor, debitul de  $O_2$  a fost ajustat pentru a permite profiluri aproape verticale. În timpul investigațiilor noastre experimentale, am concluzionat că debitul optim de  $O_2$  este de 8 sccm. Parametrii de plasmă utilizați pentru procesul criogenic sunt prezentați în tabelul 1. Rata de corodare a acestui proces este de aproximativ 28 nm/s. În Fig.13 sunt prezentate secțiunile transversale ale stâlpilor corodați cu debit optim și deficitar de  $O_2$ , rezultând un profil conic.



Fig. 13. Siliciu paternat după procesele criogenice utilizând (a) Al și (b) Ti ca straturi de mascare

Pentru a obține o adâncime de corodare de 1200 nm, diferite filme subțiri au fost testate ca <u>măști pentru proces</u>. În acest caz, ne uităm la selectivitatea procesului de corodare, precum și la transferul fiabil al paternilor proiectați la scară nanometrică de la mască la structurile corodate. Măștile de resist au fost excluse din cauza contracției cauzate de temperaturile scăzute ale substratului care au ca rezultat paterni distorsionați.

(i) Una dintre cele mai utilizate măști de corodare utilizate în procesele de corodare criogenică este SiO<sub>2</sub>-ul termic. În acest scop, un strat subțire de 100 nm de SiO<sub>2</sub> a fost crescut pe suprafața unei plachete de Si folosind un cuptor de oxidare termică. Concluzia a fost că procesul nu este potrivit pentru aplicații optice, deoarece procesul RIE utilizat pentru corodarea SiO<sub>2</sub>-ului are ca rezultat o rugozitate crescută a suprafeței, care este accentuată și mai mult în timpul procesului criogenic. Ca urmare, decizia a fost de a folosi straturi metalice de mascare obținute printr-un proces de lift-off.

(ii) Prima mască metalică testată a fost un strat subțire de 50 nm de Al. Aluminiul a fost ales deoarece contaminarea potențială a camerei reactorului este scăzută din cauza pulverizării produselor. După paternarea (modelarea) stratului de mascare de Al și corodarea substratului de Si, am constatat că structurile au un model neregulat, cel mai probabil din cauza mărimii mari a granulației metalului, care împiedică transferul precis al modelelor folosind un proces de lift-off.



Fig 14. E-beam rectangular nanostructures patterned in the: (a) Al and (b) Ti films

(iii) Prin înlocuirea stratului de mascare Al cu un strat subțire de 30 nm de Ti, forma paternilor corodați s-a fost îmbunătățit semnificativ, rezultând margini mai fine. În Fig.14 sunt imaginile SEM comparative cu vedere de sus ale paternilor transferați în Al și Ti folosind un proces de lift-off.

### Act 2.3 – Caracterizare structurală (INCDFM-Promotor proiect)

Analize complementare ale metasuprafețelor EBL fabricate de IMT au fost realizate de echipa promotoare a proiectului. Analizele constau în: microscopie electronică de baleiaj, microscopie de forță atomică, UV-Vis, măsurători de raze X și măsurători de unghi de contact.





Act. 2.4 Montaj de caracterizare optică a metalentilelor (Promotor proiect –partener P1) - componentele finale au fost achizitionate si cu ajutorul întâlnirilor Skype s-a realizat montajul atât la promotor cât și la partenerul P1.



Fig.18 Poza montaj de caracterizare realizat la Promotorul Proiectului și la partenerul P1

Act. 2.5 Caracterizarea lentilelor și emițătorilor direcționali obținuți prin metoda EBL, (Promotorul proiectului și partenerul P1)-



Fig.19. Poză a punctului focal obținută cu ajutorul montajului realizat de Promotor

Au fost efectuate lucrări ample pentru dezvoltarea în continuare a configurației de caracterizare optică la partenerul norvegian P1. S-a lucrat în special la verificarea măsurătorilor de eficiență ale metalentilelor fabricate de P1 pentru publicația Optics Express din mai 2020. Ulterior, partenerul norvegian P1 a dezvoltat o caracterizare bazată pe surse termice și filtre pentru a colecta mai multe puncte de date privind lungimea de undă. Atunci când au fost utilizate pentru caracterizarea metalentilelor fabricate de partenerul IMT P2, s-a observat o bună consistență calitativă între acestea și simulări. Folosirea sursei termice arată în plus că este posibil să se utilizeze metasuprafețele care surse direcționale. S-a descoperit că o anumită eroare în măsurare pare să apară pentru lungimi de undă de aproximativ 1,31 µm. Acest lucru se poate explica prin faptul că senzorul camerei este mai sensibil în această regiune decât sugerează fișa de date, precum și alți factori.





# Act. 2.6- Fabricarea măștii pentru UV-NIL – partener P2 (IMT)

Fabricarea master-elor pentru UV-NIL a fost realizată pe plachete de siliciu de tip p de 4 inchi (100 mm), cu o rezistivitate de 5-10  $\Omega$ ·cm și 525 µm grosime, achiziționate de la Siegert Wafer. Șirurile periodice de metasuprafețe nanostructurate au fost realizate folosind atât litografie cu fascicul electronic, cât și procese de corodare criogenică-deep reactive-ion (DRIE). Abordarea de jos în sus care utilizează evaporarea filmului metalic, urmată de procesul de lift-off a fost utilizată pentru a construi structurile la scară nanometrică.



# Act.2.7 – Fabricarea metasuprafețelor prin UV-NIL– Promotor Proiect

Tehnica de nanoimprimare prin radiație UV este o tehnică care utilizează măști transparente dure sau moi. Astfel, trebuie să realizăm o copie negativă a masterului furnizat de partenerul P2 pe un suport de sticlă. După o documentare solidă au fost aleși doi polimeri-rășini, pentru a fi utilizați pentru fabricarea așa-numitelor "ștampile". Au fost fabricate două tipuri de ștampile, folosind doi polimeri diferiți: Ormo-Stamp și noul OEM: Shin-Etsu UV-PDMS (KER-4690) ambele de la Micro Resist Technology.





Fig.22 Diferite "stampile" realizate din PDMS prin dropcast, (a) prima încercare cu cel de-al doilea master; (b) stampilă optimizată utilizând cel de-al doilea master; (c)-(d) detalii SEM ale copiei negative a masterului imprimate în polimer

Fabricarea metasuprafețelor prin UV-NIL poate fi împărțită în 2 etape majore, după cum urmează: (1) procesul de nanoimprimare UV care constă în presarea copiei negative a masterului într-un resist (polimer sensibil la lumina UV) și (2) procesul criogenic-DRIE care dă forma finală a metasuprafeței, prin corodarea plachetei de siliciu. Pentru procesul UV-NIL s-au folosit același tip de plachete de siliciu, ca și în cazul masterului. Nanoprintul a fost realizat cu un aparat EVG 620.



Etapa finală a fabricării metalentilelor folosind UV-NIL implică îndepărtarea stratului rezidual și procesul de corodare uscată. Aceste lucrări sunt realizate de Partenerul P2, conform activității lor la T3.1 (Act 2.7). Îndepărtarea stratului rezidual mr-NIL-210 a fost efectuată utilizând un proces de corodare cu ioni reactivi (RIE) în Etchlab SI 220 (Sentech Instruments, Germania). Valorile





parametrilor acestei rețete au inclus o presiune de 150 mTorr, o setare de putere ICP de 200 W și 50 sccm debit O<sub>2</sub>. Timpul optim pentru îndepărtarea stratului rezidual a fost de 50 de secunde

Tabel 2: Parametrii procesului criogenic									
Puterea ICP	Puterea RF	Presiune	Debit SF <sub>6</sub>	Debit O <sub>2</sub>	Temperatura				
					suportului				
1200 W	3 W	7,5 mTorr	60 sccm	8 sccm	-115 °C				



Fig.24 Imagini SEM după îndepărtarea stratului rezidual

Transferul paternilor din rezistul mr-NIL210 în siliciu a fost realizat prin utilizarea procesului de corodare criogenică.



# Act. 2.8: Caracterizarea structurală a metalentilelor realizate prin UV-NIL (Promotor Proiect)

Analize complementare ale metasuprafețelor EBL fabricate de IMT au fost realizate de echipa promotoare a proiectului. Analizele constau în: microscopie electronică de baleiaj, microscopie de forță atomică, UV-Vis, măsurători de raze X și măsurători de unghi de contact.



Liechtenstein Norway grants

Executive Agency for Higher Education, Research, Developmen



Paternii realizați prin UV-NIL sunt mai subțiri comparativ cu cei realizați prin EBL, diferența se vede mai ușor în Fig.27, unde sunt prezentate o metalentilă realizată prin EBL și una realizată prin NIL la aceeași mărire. Forma dreptunghiulară se pastrează mai bine în matasuprafețele EBL decât în cele NIL, poate datorită faptului că ștampila folosită mai prezintă unele imperfecțiuni.



# Act. 2.9 Optimizarea procesului de fabricare prin "UV-NIL" (PP și P2).

Concluziile după procesele efectuate de Promotor și de partenerul P2 sunt:

(i) Filmele de rezist nu sunt uniforme – viteza de spinare trebuie crescută, ambele diluții de rezist pot funcționa;

(ii) Înălțimea paternilor din "master" trebuie să fie mai mică de 1,2 $\mu$ m, mai exact între 800-500 nm;

(iii) Presiunea de contact aplicată trebuie să fie peste 100 mbar pentru a avea aceeași înălțime pentru paterni;

(iv) Stratul rezidual poate fi îndepărtat complet folosind RIE;

(v) S-au obținut structuri cu adâncime de corodare diferită (începând de la 800 până la 1,2  $\mu m).$ 

Pornind de la concluzii – promotorul proiectului oferă deja partenerului P2 probe realizate prin depunerea rezistului la viteză de spinare mai mare și presiune mai mare. S-a încercat să se realizeze ștampila pozitivă pornind de la master, dar rezultatele nu au fost cele așteptate din cauza faptului că PDMS-ul după 24 de ore nu a funcționat așa cum ar trebui să acționeze conform vânzătorului. Partenerul P2 a furnizat deja master-uri optimizate cu o înălțime de 800 nm.

### Diseminarea rezultatelor

O parte din rezultatele prezentate în acest raport au fost publicate în lucrarea Phase-controlling infrared thermal emitting metasurfaces, by D. Dragoman, S. Iftimie, A. Radu, in Journal of Optics, <u>https://doi.org/10.1088/2040-8986/abcfd4</u>. Altele fac obiectul unor lucrări publicate în 2021, așa cum





se va vedea în secțiunea "Publicații" a site-ului, acesta fiind unul dintre motivele pentru care raportul 2020 a fost făcut public la începutul anului 2022.

### References

[1] S. Tang, T. Cai, H.-X. Xu, Q. He, S. Sun, L. Zhou, Multifunctional metasurfaces based on the "merging" concept and anisotropic single-structure meta-atoms, Appl. Sci. 8, 555, 2018

[2] P.B. Johnson, R.W. Christy, Optical constants of the noble metals, Phys. Rev. B 6, 4370-4379, 1972

[3] W. Ye, Q. Guo, Y. Xiang, D. Fan, S. Zhang, Phenomenological modeling of geometric metasurfaces, Optics Express 24, 7120-7132, 2016

[4] J. Li, B. Yu, S. Shen, Scale law of far-field thermal radiation from plasmonic metasurfaces, Phys. Rev. Lett. 124, 137401, 2020

[5] C. Koechlin, P. Bouchon, F. Pardo, J.-L. Pelouard, R. Haïdar, Analtical description of subwavelength plasmonic MIM resonators and of their combination, Opt. Express 21, 7025-7032, 2013

[6] X. Liu, J. Deng, K. F. Li, Y. Tang, M. Jin, J. Zhou, X. Cheng, W. Liu, G. Li, Optical metasurfaces for designing planar Cassegrain-Schwarzschild objectives, Phys. Rev. Appl. 11, 054055, 2019

[7] X. Chen, M. Chen, M.Q. Mehmood, D. Wen, F. Yue, C.-W. Qiu, S. Zhang, Longitudinal multifoci metalens for circularly polarized light, Adv. Optical Mater. 3, 1201-1206, 2015

[8] J.-J. Greffet, M. Nieto-Vesperinas, Field theory for generalized bidirectional reflectivity: derivation of Helmholtz's reciprocity principle and Kirchhoff's law, J. Opt. Soc. Am. A 15, 2735-2744, 1998

[9] D.A.B. Miller, L. Zhu, S. Fan, Universal modal radiation laws for all thermal emitters, PNAS 114, 4336-4341, 2017

[10] D.G. Baranov, Y. Xiao, I.A. Nechepurenko, A. Krasnok, A. Alù, M.A. Kats, Nanophotonic engineering of far-field thermal emitters, Nature Mater. 18, 920-930, 2019

[11] E. Wolf, *Introduction to the Theory of Coherence and Polarization of Light*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K., 2007

[12] Y.-L. Liao, Y. Zhao, Ultra-narrowband dielectric metamaterial absorber for sensing based on cavity-coupled phase resonance, Results Phys. 17, 103072 (2020)

[13] Z.-Y. Yang et al., Narrowband Wavelength Selective Thermal Emitters by Confined Tamm Plasmon Polaritons, ACS Photonics 9, 2212–2219 (2017)



