



Scurt raport al anului

2021

Promotor-PP:

Conform planului de lucru al proiectului ElastoMETA, PP trebuia să implementeze în 2021 următoarele activități: Activitatea A3.2 Optimizarea fabricării UV-NIL; A3.3 Caracterizarea structurală a metasuprafețelor optimizate UV-NIL; A3.4 Caracterizarea primei surse "UV-NIL" și a lentilelor pentru detecție; Act. 3.5 Documentație și procese de încorporare elastomerică.

Activitatea partenerului PP poate fi rezumată după cum urmează:

- PP a folosit diferite rețete pentru fabricarea UV-NIL și ștampile și au:

- participat la diverse webinarii și achiziționat două echipamente pentru a îmbunătăți procesul de UV-NIL;

- contactat EVG (vânzătorul echipamentului NIL) pentru a optimiza procesul de fabricație;

- făcut măsurători preliminare ale lentilelor și le-au trimis pe cele viabile partenerului P1 pentru o mai bună analiză;

- realizat multiple caracterizări SEM ale structurilor;

- efectuat măsurători FTIR, umectare, imagini optice și AFM ale lentilelor;

- studiat literatura de specialitate pentru cel mai bun elastomer pentru procesul de încorporare;

- făcut teste pentru încorporarea cu Sylgard 184.

Au fost achiziționate diferite imagini SEM pentru a descoperi diferențele dintre structurile simulate și fabricate.





Figura 1. Imagini SEM ale "paternilor" (modele) din componența metalentilelor febricate prin EBL și NIL

Dimensiunile "paternilor" care intră în componența unor metalentile cu eficienă măsurabilă măsurabile sunt indexate în tabelul următor.

Table 1: Dimensionile "paternilor"						
	Dimensiuni			Deviație față de referință		
Proba	Înălțime-l	h lățime-w	lungime-l	Înălțime	lățime	lungime
	(µm)	(nm)	(nm)	(%)	(%)	(%)
Referință	1200	230	354	-	-	-
Metalentile -EBL	1200	236.8	355.2	0	-2.96	-0.33
Masca 1	1083	224,2	340,4	9.75	2.52	3.84
Metalentila UV-NIL 1	842	235.9	312.6	29.83	-2.57	11.19
Metalentila UV-NIL 1	1066	210.3	302.6	11.16	8.56	14.52
Metalentila UV-NIL 1	1280	247.2	307	-6.66	-7.48	13.27

Calitatea măștilor a fost investigată și cu ajutorul microscopiei electronice de baleiaj.



Figura 2. Poze SEM ale măștii realizate din PDMS

Pentru masca (matriță-stamp) realizată prin iradiere UV succesivă, analiza SEM arată că polimerul UV-PDMS a fost parțial capabil să producă copia inversată a metalentilelor din masterul fabricat. Forma găurilor este mai mult ovală decât dreptunghiulară, probabil datorită faptului că timpul succesiv de întărire înainte de delaminarea de masterul de Si a fost prea scurt și astfel cavitățile au suferit deformații pe direcția de desprindere a ștampilei. Înălțimea găurilor măsurată după depunerea stratului subțire de aur a fost de 1.083 µm cu l = 340,4 nm și w = 224,2 nm. Astfel, abaterea de la dimensiunile masterului este de aproape 4,2% în lungime și 5,3% în lățime. Mai mult, în acest caz se pare că la detașarea ștampilei de master, din cauza forțelor de aderență dintre ele și din cauza geometriei paternilor se produce fractura și astfel unii paterni rămân în elastomerul ștampilei afectând astfel rezulatatelei procesului de nanoimprint, deși maestrul de Si a fost tratat cu ASL. În consecință, utilizarea maestrului pentru a fabrica alte ștampile este compromisă.

Imaginile optice și imaginile AFM scot în evidență distribuția paternilor și vederea de sus a lentilelor, așa cum se poate vedea în Figura 3.





Pentru partea de încorporare a paternilor în elastomer (Act A 3.5) unul dintre primele rezultate este exprimat sugestiv în Figura 4. Din păcate din cauza sensibilității elastomerului nu am putut face alte analize probei.



Figura 4. Imaginea lentilei încastrată în elastomer - Sylgard 184

SINTEF- P1:

Conform planului de lucru din 2021, P1 a fost implicat în două activități: Act. 3.1: Un studiu teoretic al interacțiunii dintre celulele unitare de diferite geometrii sau rotații care își propune să ajute la proiectarea structurilor subunitare pentru metasuprafețe eficiente și Act 3.4: Caracterizarea sursei și a lentilelor realizate prin UV-NIL pentru detectarea senzorilor-ajutând partenerul CO.

Munca partenerului poate fi împărțită astfel:

Partea de simulare:

- Pentru structurile Bosch a fost testată ipoteza că rotunjirea în șanțuri duce la o scădere a eficienței polarizării încrucișate.

-Pentru probele NIL realizate de PP s-au efectuat simulări ale randamentului în funcție de dimensiunile paternului.

- De asemenea, simulări privind influența pereților conici asupra eficienței lentilelor.

- S-a simulat prin metoda Finited Difference Time Domain (FDTD) cazul în care în loc de forma dreptunghiulară paternii au formă ovală.

Partea de caracterizare optică:

- Au lucrat la dezvoltarea și îmbunătățirea aparatului de măsurare optică și au asistat promotorul proiectului în configurarea acestuia.
- Au efectuat măsurătorile optice pe metalentilele pe care le-a fabricat anul trecut pe plachete SOI de 4 inci și corodate de P2 și le-a comparat cu rezultatele obținute pe probele corodate prin metoda Bosch.
- Au efectuat micrografii SEM pe probelor SOI corodate de P2.
- Au măsurat din punct de vedere optic metalentilele fabricate de PP.





Pentru a explica eficiența scăzută pentru metalentilele NIL s-a simulat prin metoda Finited Difference Time Domain (FDTD) cazul în care în loc de o formă dreptunghiulară (Figura 5 – linie întreruptă) paternii au o formă ovală. Primii parametri de simulare pentru elipsă au fost pentru dimensiunea de referință (w = $2 \times a = 230$ nm; l = $2 \times b = 354$ nm) arătând că și în cazul în care secțiunea transversală a paternilor nu este perfect dreptunghiulară, eficiența ar trebui să aibă valori apopiate de cele teoretice (Figura 5- linie continuă neagră). Eficiența scăzută a metalentilelor UV-NIL este dată, conform simulărilor (Figura 5 – linie verde), de forma aproape rotundă a paternilor, care implică o scădere a eficienței de polarizare încrucișată.



Figura 5. Curbelor de simulare a elipsei, cu valori diferite pentru parametrii a și b bazate pe dimensiunile paternilor extrase din pozele SEM efectuate.

În cazul metalentilelor EBL, scăderea eficienței (de la 60% teoretic la 45%), poate fi dată de forma paternilor caracterizați prin: (i) o mică "pălărie" dreptunghiulară în vârf urmată de un gât scurt, care prezintă după colțuri rotunjite asemănătoare cu simularea evidențiată de linia continuă albastră (Figura 5) și (ii) profilul ușor conic. Conform simulărilor (vezi Figura 6), profilul conic poate induce o scădere suplimentară a transmisivității și, prin urmare, o scădere a eficienței lentilei. O modalitate de a îmbunătăți eficiența, atât a metalelor EBL, cât și a NIL, la o valoare peste 95% este schimbarea substratului de siliciu cu unul de cuarț.



Figura 6: Curbe de simulare considerând cazul când paternii prezintă profil drept (referința) sau conic.

În ceea ce privește măsurătorile optice rezultatele obținute sunt:

(A) Eficiența măsurată a lentilelor pentru dimensiunile rezultate ale Bosch 2 sunt prezentate în Figura 7b. Se adaugă o curbă de simulare pentru o structură dreptunghiulară cu modele de suprafață eliptice menite să imite structurile așa cum se văd în imaginile SEM. În timp ce lungimea de undă pentru maximul eficienței optice coincide bine cu măsurătorile, eficiența măsurată este oarecum mai mică decât cea prevăzută. Cu toate acestea, geometria paternului nu este ușor de simulat cu precizie.



De asemenea, acești pilari nu au fost curățați corespunzător de resist sau de stratul de mascare folosit pentru corodare înainte de testarea optică, deși acest lucru este cel puțin parțial luat în considerare în simulare. În ciuda faptului că pot fi mai multe surse de eroare în cadrul simulărilor, o parte a discrepanței este posibil explicată prin efectele de rotunjire care are loc în timpul corodării, unde pare ca secțiunea transversală a paternului înceteză să mai fie dreptunghiulară și mai degrabă să începe să devină mai circulară. Secțiunile transversale circulare sunt incapabile de conversie între stările de polarizare circulară, reducând astfel eficiența metasuprafeței. În ciuda dezavantajelor structurilor rezultate din fabricația Bosch 2, este de remarcat faptul că performanța optică este comparabilă cu cea atinsă prin procesul Cryo (Figura 7a).



(b)

Figura 7. Curbele de simulare bazate pe dimensiunile găsite din imaginile SEM și punctele de date din măsurătorile de eficiență. (a) Rezultate pentru metasuprafața corodată criogenic. Folosind metoda de simulare Rigorously Coupled Wave Analysis (RCWA) pentru un patern sub formă de stâlp de dimensiuni h=770 nm, w=240 nm, l=363 nm și p=835 nm, rezultă o curbă de transmisie (curbă solidă) care se potrivește calitativ cu eficiența măsurată pentru metalentila corodată criogenic . Creșterea înălțimii în simulări la valoarea țintă de h=1200 nm dezvăluie că eficiența lentilelor este crescută la eficiența de proiectare a structurii țintă. Acest lucru indică faptul că o corodare mai lungă ar fi produs o eficiență mai mare. (b) Rezultatele celei de-a doua runde Bosch.

(B) Un număr de patru metalentile fabricate folosind atât EBL cât și NIL, respective, două pentru fiecare tehnică, au fost caracterizate optic, iar profilele lor focale sunt prezentate în Figura 8. Deoarece ambele tipuri de metalentile EBL și, respectiv, ambele metalentile UV-NIL au fost identice din punctul de vedere al punctului focal și al eficienței, am ales să reprezentăm doar unul pentru fiecare tip.



Figura 8. (a) Profilul intensității spotului focal al metalentilei realizate folosind EBL (albastru) și al unei metalentile realizate folosind NIL (portocaliu), comparativ cu profilul teoretic al eficienței pentru o lentilă (linia întreruptă) pentru lumina laser de 1550 nm. După cum s-a discutat eficiența mai mică decât unitatea este în mare măsură atribuită utilizării unui substrat de siliciu. (b) Imaginea punctului focal a lentilei EBL (c) Imaginea cu microscopul optic a lentilei EBL (d) Imaginea punctului focal al lentilei NIL, pentru lumină laser de 1550 nm. (e) Imaginea la microscop optic a lentilei NIL cu lungimi laterale de 1,5 mm. Rețineți că pentru măsurătorile punctului focal este plasată o deschidere circulară de 900 μm în fața lentilelor.



Profilele punctelor focale sunt comparate cu cele ale unei lentile asferice acoperite cu un strat de antireflexie, astfel eficiența este de 45% pentru metalentilele realizate direct folosind EBL și 6% pentru metalentilele realizate folosind NIL. Aceste valori pentru eficiență nu includ pierderea de reflexie de 31% din partea din spate a substratului de Si. După cum se poate vedea în Figura 8, toate lentilele au același spot limitat de difracție, care este rezultatul modelului fazei geometrice – faza luminii polarizate încrucișate fiind decisă de orientarea nanostructurii, care este reprodusă cu acuratețe atât în EBL, cât și în procesele NIL.

Între timp, eficiența focalizării depinde de lungimea și lățimea nanostructurilor (a se vedea tabelul 1). La atingerea dimensiunilor țintă, ne-am aștepta la o eficiență de ordinul a 60% conform simulărilor. Cu toate acestea, lentilele analizate fabricate folosind NIL, au dimensiuni apropiate cu cele ale stucturii de referință, dar defectele date de rotunjimea paternilor si cele de suprafață vizibile optic duc la o eficiență scăzută de polarizare încrucișată. Prin urmare procesul de fabricație trebuie optimizat pentru o mai bună uniformitate a structurii, precum și pentru obținerea unor dimensiuni finale mai apropiate de cele țintă – de exemplu, prin luarea în considerare a erorilor sistematice de fabricare.

IMT-P2:

Conform planului de lucru din 2021, P2 a fost implicat în două activități experimentale: Act. 3.2 și Act. 3.5 - Corodarea uscată a structurilor obținute prin UV-NIL.

Rezumând P2:

- Au realizat optimizarea suplimentară a proceselor EBL și DRIE.

- Au efectuat îndepărtarea stratului rezidual și procesul de corodare uscată.

- Au achiziționat imagini optice și SEM în timpul etapelor de fabricație.

- Au furnizat master-urile pentru PP pentru partea experimentală de încorporare a paternilor în matrice elastomerică.

În paragrafele următoare se vor prezenta pe scurt principalele rezultate obținute pentru fiecare activitate.

(a) Primele procese de corodare au fost efectuate pe plachete SOI (Siliciu pe izolator) de 4 inch, având următoarele specificații: metoda de creștere CZ; grosimea stratului de oxid îngropat de 0,5 μm;
30 μm grosime plachetă de manipulare; tip N (fosfor); orientare <100>; grosime 430 μm.

(b) By using this substrate, the lens' layout (presented in the previous report: rectangular pillars with width × length of 235 × 355 nm, the target wavelength λ =1.55 µm) was transferred onto the SOI wafers by both EBL and UV-NIL patterning methods. The EBL patterning was performed at IMT-Bucharest, by P2, while the UV-NIL process was done at SINTEF MiNaLab, by P1. The wafers patterned by EBL used a thin film of 20 nm of Ti as masking layer for the following etching process, while the UV-NIL patterned wafers had a mr-NIL 210 resist with a thickness of 150 nm. Prin utilizarea acestui substrat, aspectul lentilei (prezentat în raportul anterior: stâlpi dreptunghiulari cu lățime × lungime de 235 × 355 nm) a fost transferat pe plachetele SOI. Paternarea EBL a fost efectuată la IMT-București, de către P2, în timp ce procesul UV-NIL a fost realizat la SINTEF MiNaLab, de către P1. Plachetele scrise prin EBL au folosit un strat subțire de 20 nm de Ti ca strat de mascare pentru următorul proces de corodare, în timp ce plachetele folosite pentru metoda UV-NIL au fost acoperite cu un fotorezist UV-NIL (mr-NIL 210) de grosime 150 nm.





Figure 9. Secțiune transversală a siliciului nanopaternat prin tehnica EBL după procesul de corodare.

Au fost observați pereți laterali verticali, suprafață netedă și înălțimi de aproximativ 1200 nm. Pentru a transfera modelul de la rezistul mr-NIL210-200 nm (modelat de UV-NIL) pe placheta de siliciu, a fost mai întâi necesar să se îndepărteze stratul rezidual (RL - rezistul format între stâlpii imprimați). Acest proces a fost realizat cu plasmă de oxigen, folosind un sistem RIE (Etchlab SI 220-Sentech Instruments, Berlin, Germania). Datorită neuniformității grosimii stratului rezidual dintre plachete, corodarea cu oxigen a fost efectuată în etapele, efectuându-se investigații optice între ele (Figura 10), ceea ce a permis să evaluăm timpul total de corodare necesar.



Figura 10. Imagine optică a metalentrilei după 30s de tartare în plasmă de oxygen (în timpul eliminării stratului rezidual)

Corodarea ulterioară a plachetelor de siliciu a fost efectuată folosind același proces criogenic ca și în cazul metalentilelor obținute prin tehnica EBL. Figura 11 prezintă stâlpii de siliciu obținuți folosind o durată de 50 de sec. pentru procesul de îndepărtare a stratului rezidual (procesul cu plasmă O₂-RIE) și un proces de 43 sec. procedeu pentru corodarea siliciului DRIE (procesul Cryogenic DRIE).



Figura 11. Secțiune transversal a nanopaternilor de siliciu după 50 sec. corodare în plasma de O₂ plasma-RIE și 43 sec. process de corodare criogenică

Se poate observa că adâncimea de corodare obținută a fost în jur de 800 nm, suprafața corodată obținută este rugoasă și stâlpii de siliciu erau supracorodați în partea de jos. Aceste caracteristici pot fi explicate prin faptul că după cele 50 de sec. a procesului cu plasmă O₂-RIE, a rămas o peliculă subțire de strat rezidual care a acționat ca un strat de mascare pentru procesul de corodare DRIE. Prin urmare, adâncimea de corodare a fost de numai 800 nm, în loc de 1200 nm.

Încă trei plachete au fost prelucrate utilizând un proces mai lung de plasmă O_2 -RIE: două cu 60 de secunde și una cu 70 de secunde. Figura 12 prezintă metalentilele obținute după 60 de sec. de





corodare în plasmă de oxigen și 43 sec. de proces criogenic DRIE. După efectuarea procesului de îndepărtare a stratului rezidual cu plasmă O₂, au apărut mai multe bule, iar după efectuarea procesului criogenic au devenit mai pronunțate.



Figura 12. Metalentile paternate: (a) Imagini de microscopie optică ale structurii după 60 sec. corodare în plasma de oxygen și (b) imagini SEM ale nanopaternilor de siliciu după 43 sec.de proces ce corodare criogenică – DRIE.

Adâncimea de corodare obținută a fost de aproximativ 1200 nm, totuși procesul de corodare a fost neuniform din cauza bulelor apărute pe suprafață. Ultimele două plachete au fost prelucrate folosind timpi mai scurti pentru procesul de îndepărtare a stratului rezidual: 30 sec. și, respectiv, 35 sec. Corodarea stâlpilor de Si a fost efectuată prin corodare criogenică timp de 43 sec. Probele rezultate au fost tăiate pe dimensiuni și trimise partenerului P1 pentru a măsura eficiența lentilelor fabricate. Imaginile SEM ale siliciului cu nanopaternii obținuți, se pot observa în Figura 13. Înălțimea acestora fiind de apoximativ 800 nm.



Figura 13. Secțiune transversal a nanopaternilor de siliciu după procesul de corodare criogenică (imagini achiziționate prin microscopie electronicp la un unghi de înclinare de 45°) – (a) fidelitatea structurilor (b) înălțimile corespunzătoare acestora.

UB-P3:

Conform planului de lucru al proiectului ElastoMETA, P3 trebuia să implementeze în 2021 următoarea activitate: Act. 3.1: Un studiu teoretic al interacțiunii dintre celulele unitare de diferite geometrii sau rotații cu scopul de a ajuta la proiectarea subunităților structural pentru metasuprafețe eficiente.

Prin urmare, munca a fost împărțită atât în simulări teoretice, cât și numerice pornind de la premisa că există mai multe tipuri de aberații semnificative pentru funcționarea metalentilelor, cele mai frecvent întâlnite fiind aberațiile cromatice, sferice și de comă. Totuși, întrucât o metalentilă discretizează întotdeauna faza transmisă/reflectată, fiind compusă dintr-un anumit număr de metaatomi, trebuie luate în considerare și aberațiile induse de discretizarea de fază. Această ultimă sursă de aberații a fost neglijată până acum. Deoarece în aplicațiile obișnuite sursele de lumină sunt de bandă îngustă, nu am luat în considerare aberațiile cromatice; oricum, sunt cunoscute mai multe metode de minimizare a acestora, cum ar fi, de exemplu, utilizarea dubletelor de metalentile [1,2], metasuprafețe multistrat [3] sau meta-atomi foarte anizotropi [4,5]. În acest context, trebuie menționat și faptul că aberațiile sferice și de comă ale metalenselor pot fi corectate prin metasuprafețe aplanice [6] sau cu doublet de metalentile bine proiectate [1].



În timp ce, în general, estimarea aberațiilor se realizează folosind trasarea razelor geometrice [7-9], atribuind tipuri specifice de aberații diferitelor polinoame Zernike [10] sau presupunând o anumită expresie a distribuției de fază transmisă de metalentilă pe un câmp optic de intrare [11,12], efectul lor este de a modifica forma fasciculului în planul focal al metalentilei. Astfel, este necesară o abordare ondulatorie pentru a descrie influența aberațiilor, indiferent de tipul lor, asupra performanței metalentilelor. Analiza noastră sa bazat pe faptul că forma distribuțiilor de intensitate cu un singur vârf I(x, z) poate fi caracterizată cantitativ prin momente definite de intensitate care determină

- poziția medie a distribuției intensității de-a lungul axelor transversale x și longitudinale z, definite ca

$$\xi_{av} = \langle \xi \rangle = \int \xi I(\xi) d\xi / \int I(\xi) d\xi, \quad \xi = x, z$$

 - extinderea spațială a distribuției intensității de-a lungul axelor x și z, definită prin momentul de ordinul doi al intensității ca [13]

$$\Delta \xi = 4\sqrt{\langle \xi^2 \rangle} = 4\sqrt{\int (\xi - \xi_{av})^2 I(\xi) d\xi} / \int I(\xi) d\xi, \quad \xi = x, z$$

- forma distribuției intensității de-a lungul axelor x și z, parametrizată prin coeficienții de asimetrie S și kurtosis K definiți ca:

$$S_{\xi} = \langle \xi^3 \rangle / \langle \xi^2 \rangle^{3/2}, \qquad K_{\xi} = \langle \xi^4 \rangle / \langle \xi^2 \rangle^2, \quad \xi = x, z$$

cu $\langle \xi^{m} \rangle = \int (\xi - \xi_{av})^{m} I(\xi) d\xi / \int I(\xi) d\xi$, m = 3, 4. Asimetria cuantifică (lipsa) simetriei unei distribuții, valorile negative (pozitive) S indicând distribuțiile cu un singur vârf care au o coadă mai lungă în stânga (dreapta), în timp ce S = 0 corespunde unei distribuții simetrice la stânga și la dreapta. Kurtosis K evaluează dimensiunea relativă a coziilor unei distribuții cu un singur vârf în raport cu o funcție Gaussiană normală, pentru care K = 3 (și S = 0). Astfel, valorile K mai mari (mai mici) decât 3 indică distribuții care au cozi grele (ușoare) față de o Gaussiană. Parametrii S și K sunt folosiți pentru a distinge forma distribuțiilor statistice în domenii largi de cercetare: în imagistica medicală [14,15], știința materialelor [16], cosmologie observațională [17], optică [18,19] etc. Indiferent dacă sunt definiți pentru distribuțiile cu un singur vârf, atunci când sunt definiți în mod corespunzător, parametrii definiți mai sus pot fi utilizați și pentru a caracteriza forma câmpurilor optice difractate cu mai multe vârfuri/ondulate care au maxime dominante pronunțate atât pe direcțiile transversale, cât și longitudinale. În special, acești parametri pot descrie câmpul optic în planul focal al unei metalentile și efectul aberațiilor asociate asupra performanțelor de focalizare.

În cele ce urmează ne menținem analiza generală, în sensul că nu ne referim la o metalentilă anume, ci luăm în considerare o suprafață de difracție arbitrară constând dintr-un număr discret N de meta-atomi cu dimensiunea Λ de-a lungul axei x care conferă o fază controlabilă $\phi_m(x)$ pe un câmp de lumină incidentă, astfel încât metalentila aproximează într-un mod rezonabil distribuția ideală, continuă a fazei hiperbolice $\phi_{id}(x) = (2\pi/\lambda)[f - \sqrt{x^2 + f^2}]$ a unui element de focalizare cu distanța focală f; pentru un profil de fază hiperbolic nu există aberații sferice pentru câmpurile incidente axial. Rețineți că, pentru simplitate, am considerat un profil de intensitate bidimensional I(x, z), care poate reprezenta fie distribuția intensității luminii a unei metalentile simetrică radial într-un plan longitudinal, fie a unei metalentile cilindrice. De asemenea, presupunem că coeficientul de transmisie al metalentilei este același pe suprafața sa. Metalentila a fost studiată sub iluminare axială și în afara iluminării, condiții în care pot apărea numai aberațiile de discretizare și, respectiv, aberațiile sferice, comă și de discretizare.

Dimensiunea metaentilei $D = N\Lambda$ este considerată a fi definită de o apertură opacă si de metaatomii presupuși anizotropi, astfel încât se pot roti cu un unghi azimutal α în planul metalentilei (vezi inserția din Fig. 14). Presupunem că α nu se modifică continuu de la o celulă unitară la alta, acesta modificându-se în pași de $\Delta \alpha$, faza corespunzătoare conferită de celulele unitare fiind lăsată să varieze



în trepte de $\Delta \phi_m$. Valorile lui $\Delta \alpha$ (și prin urmare ale lui $\Delta \phi_m$) sunt alese după design; pentru valori mai mici ale acestui parametru, profilul de fază ideal este reprodus mai bine, dar complexitatea în fabricarea metalentilelor este crescută. Figura 14 reprezintă aproximațiile ideale (linia neagră) și în trepte ale distribuției de fază a unei lentile cu o distanță focală de f = 10 mm când $\Delta \phi_m$ este 10° (linia roșie) și 20° (linia albastră), dacă $\lambda = 1.3 \mu m$, $\Lambda = 450$ nm și N/2 = 400; o parte a figurii este mărită pentru o mai bună vizualizare a tuturor curbelor. Aceste valori pentru f, λ și Λ vor fi utilizate pe tot parcursul acestui studiu.



Dacă metalentila este iluminată de o lumină colimată normalizată $E_0 = 1$, incidentă la un unghi θ față de axa z, câmpul imediat după metalentilă, situat la z = 0, este, presupunând ca transmitanța este egală cu 1. Distribuțiile spațiale ale valorii absolute a câmpurilor electrice după metalentilă pentru cazurile normale/axiale, adică $\theta = 0$, și cazurile de incidență înclinată sunt ilustrate în Fig. 15(a) și, respectiv, Fig. 15(b). Toate coordonatele spațiale sunt normalizate la distanța focală f a metalentilelor. Am calculat profilul câmpului electric pentru z > 0 aplicând integrala de difracție din aproximarea Fresnel a câmpului optic discontinuu E(x, z = 0).

Aceste figuri arată că distribuțiile câmpului nu sunt cu un singur vârf. În special, în cazul iluminării axiale, distribuțiile câmpului spațial de-a lungul axei z longitudinale (pentru x = 0), precum și de-a lungul direcției transversale la punctul focal (distribuția x a intensității la coordonata z la care valoarea absolută a câmpului dependent de z este maximă) reprezentată în Figurile 15(c) și respectiv 15(d), deși afișează un maxim dominant în apropierea punctului focal al lentilei perfecte, prezintă o structură multimodală, cu ondulații pronunțate de-a lungul x. Aceste ondulații afectează în special valorile S și K (și nu atât pozițiile medii și întinderile spațiale), astfel încât, pentru a obține momente bazate pe intensitate aparținând doar vârfului principal al distribuției câmpului de-a lungul x, am determinat mai întâi x_{av} și Δx luând în considerare valorile absolute ale câmpului electric mai mari de 1/40 din valoarea de vârf, iar apoi am calculat S și K considerând doar câmpurile electrice cu valori absolute într-un interval de 5 Δx centrat în jurul x_{av} . După cum se poate vedea din inserția din Fig. 15(c), unde regiunea relevantă pentru N/2 = 600 (curba roșie) este evidențiată de două linii verticale (de asemenea) rosii, acest interval este suficient de larg pentru a explica coada intensității câmpului. Nu au fost necesare astfel de precauții pentru calcularea momentelor bazate pe intensitate de-a lungul axei z, deoarece distribuția câmpului este semnificativ mai puțin ondulată, dar în acest caz a trebuit să scădem fondalul (egal cu 1) din valorile absolute ale câmpului electric pentru a putea obțineți rezultate semnificative (vezi Fig. 15(d)).









Rezultatele simulărilor numerice

Pentru a înțelege de ce comportamentul tuturor momentelor bazate pe intensitate la un unghi mare de înclinare se modifică dramatic, în special pentru dimensiuni mai mari ale deschiderii, am trasat distribuția spațială a valorilor absolute ale câmpului în acest caz (a se vedea Fig. 16 (a)) și am descoperit că, pe lângă direcția de propagare impusă de unghiul de înclinare, apar interferențe constructive pe alte direcții, astfel încât să nu mai avem un fascicul de propagare, ci mai multe. Figurile 16(b) și 16(c) prezintă distribuția transversală și, respectiv longitudinală, în acest caz pentru $\Delta \phi_m = 30^\circ$ and N/2 = 400(black line), 600 (red line) and 800 (blue line). Un al doilea vârf transversal este clar vizibil în acest caz pentru cea mai mare dimensiune a aperturii. Distribuția z a câmpului nu mai are un maxim evident pentru aperturi mai mari, ci mai multe, în acord cu simulările din Fig. 16(a). Din nou, schimbarea formei fasciculului, semnificativă, în special, la unghiuri mari de înclinare și aperturi mari, este bine descrisă de S_x , K_x , S_z și K_z , în timp ce apariția unor fascicule suplimentare care se propagă la alte unghiuri are un efect pronunțat și asupra extinderii spațiale și asupra valorilor medii ale poziției atât de-a lungul x cât și de-a lungul zului. Rețineți că, cel puțin pentru unghiurile de iluminare înclinate sub 5°, valorile parametrilor de asimetrie și curtoză sunt comparabile cu valorile pentru iluminarea axială, ceea ce arată că aberațiile induse de discretizarea de fază sunt încă cauza predominantă a modificărilor formei fasciculului/performanțelor scăzute ale metalentilelor.





References

 C. Kim, S.-J. Kim, B. Lee, Opt. Express 28, 18059-18076, 2020;
B. Groever, W.T. Chen, F. Capasso, Nano Lett. 17, 4902-4907, 2017;
Y. Zhou, I.I. Kravchenko, H. Wang, J.R. Nolen, G. Gu, J. Valentine, Nano Lett. 18, 7529-7537, 2018;
W.T. Chen, A.Y. Zhu, V. Sanjeev, M. Khorasaninejad, Z. Shi, E. Lee, F. Capasso, Nat. Nanotechnol. 13, 220-226, 2018;
W.T. Chen, A.Y. Zhu, J. Sisler, Z. Bharwani, F. Capasso, Nat. Commun. 10, 355, 2019;
F. Aieta, P. Genevet, M. Kats, F. Capasso, Opt. Express 21, 31530-31539, 2013;
P.D. Lin, R.B. Johnson, Opt. Express 27, 19712-19725, 2019;
R.G. Gonzalez-Acuña, M. Avendaño-Alejo, J.C. Gutiérrez-Vega, J. Opt. Soc. Am. A 36, 925-929, 2019;
J. Sasian, Appl. Opt. 59, G24-G32, 2020;
Z. Wang, O. Baladron-Zorita, C. Hellmann, F. Wyrowski, Opt. Express 28, 24459-24470, 2020;
S.-W. Moon, Y. Kim, G. Yoon, J. Rho, iScience 23, 101877, 2020;
H. Liang, A. Martins, B.-H.V. Borges, J. Zhou, E.R. Martins, J. Li, T.F. Krauss, Optica 6, 1461-1470, 2019;
M.A. Porras, R. Medina, Appl. Opt. 34, 8247-8251, 1995;
A. Anand, I. Moon, B. Javidi, Proc. IEEE 105, 924-946, 2017;
B. Javidi, A. Mark, Opt. Express 26, 13614-13627, 2018;
T.R. Thomas, Precision Eng. 3, 97-104, 1981;
A. Ben-David, S. von Hausegger, A.D. Jackson, J. Cosmol. Astropart. Phys. 11, 019, 2015;
D. Dragoman, R. Tudor, J. Mod. Opt. 64, 2328-2335, 2017;19. D. Dragoman, Prog. Opt. 37, 1-56, 1997.