



(12)

## BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: **a 2015 00050**

(22) Data de depozit: **23/01/2015**

(45) Data publicării mențiunii acordării brevetului: **26/02/2021** BOPI nr. **2/2021**

(41) Data publicării cererii:  
**29/07/2016** BOPI nr. **7/2016**

(73) Titular:  
• **INSTITUTUL NAȚIONAL DE CERCETARE  
DEZVOLTARE PENTRU FIZICA  
MATERIALELOR, STR. ATOMIȘTILOR  
NR. 105 BIS, MĂGURELE, IF, RO**

(72) Inventatori:  
• **COTÎRLAN-SIMIONIUC COSTEL,  
CALEA FERENTARI NR. 72, BL.7C, SC. B,  
AP. 13, SECTOR 5, BUCUREȘTI, B, RO;**

• **MANEA ȘTEFAN ADRIAN,  
STR. CONSTANTIN TITEL PETRESCU  
NR. 9, BL. C 29, SC. A, AP. 50,  
BUCUREȘTI, B, RO;**  
• **LOGOFĂTU CONSTANTIN,  
STR. MARIA TÂNASE NR.3, BL.13, SC.3,  
AP.70, SECTOR 4, BUCUREȘTI, B, RO**

(56) Documente din stadiul tehnicii:  
**CN 104282999 A; CN 103543600 A**

(54) **STRUCTURĂ DE SUPERLENTILĂ ELECTROOPTICĂ  
PENTRU IMAGISTICĂ CU REZOLUȚIE SUB LIMITA  
DE DIFRAȚIE**



# RO 131292 B1

1           Invenția se referă la o structură de tip superlentilă electrooptică plană, ultrasubțire,  
fără aberații, controlată electric, capabilă să confere posibilitatea de a depăși rezoluția limi-  
3           tată de lungimea de undă a radiației utilizate (limita de difracție) prin utilizarea informațiilor  
optice de mare rezoluție spațială conținute în undele evanescente (evanescent wave-EW)  
5           sau undele de suprafață (surfoce wave-SW).

7           Optica clasică nu poate exploata aceste informații, pentru că EW sau SW se  
atenuează rapid pe direcția de propagare perpendiculară pe suprafața optică.

9           Superlentila propusă se încadrează în domeniul opticii de transformare, optică cu  
transformare arbitrară de coordonate, adică cu permitivitate electrică și permeabilitate mag-  
netică neomogene și anizotrope. Această superlentilă reușește să convertească în anumite  
11          condiții în proporție de 100% EW sau SW din câmpul apropiat în unde cu propagare liberă  
(PW) în câmp îndepărtat. Prin faptul că este plană nu prezintă principalele aberații care  
13          afectează optica clasică: cromatică, de sfericitate și geometrică.

15          Aplicațiile posibile ale superlentilei electrooptice propuse sunt în domeniul cuploane-  
lor optoelectronice cu plasmoni de suprafață și sisteme de imagistică/microscopie. Supri-  
marea completă a reflexiilor speculare prin conversia PW în SW este utilă în aplicații de  
17          invizibilitate (radar, IR sau în alt domeniu spectral). Pe de altă parte, conversia inversă, SW  
în PW, este utilă în sporirea vizibilității în condiții dificile de detecție.

19          Tehnologic, noua soluție constructivă permite fabricarea și implementarea rapidă a  
unui sistem optic de volum redus fără aberații, cu super rezoluție, în instrumente portabile,  
21          cu scopul de a reduce prețul prohibitiv al acestui gen de echipamente de imagistică.

23          Observarea detaliilor cu dimensiuni sub lungimea de undă cu ajutorul microscopelor  
optice este dificilă datorită limitei de difracție Abbe. Lumina cu lungimea de undă  $\lambda$ ,  
parcurend un mediu cu indicele de refracție  $n$  și care converge într-un spot de unghi  $\theta$ , va  
25          avea raza spotului dată de relația:

$$27 \quad d = \frac{\lambda}{2n \sin \theta} \quad (1)$$

29          unde: numitorul  $n \sin \theta$  este numit apertură numerică (NA) și poate fi 1,4...1;6 pentru optica  
actuală. Prin urmare limita Abbe poate fi minim  $d = \lambda / 3,2$ . Considerând că lumina verde  
31          are lungimea de undă în jur de 500 nm și cazul slab performant NA=1, limita Abbe  
este  $d = \lambda / 2 = 250$  nm (0,25  $\mu$ m) destul de mică comparativ cu majoritatea celulelor  
33          biologice (de la 1  $\mu$ m la 100  $\mu$ m), dar prea mare în comparație cu dimensiunea virușilor  
(100 nm), proteinelor (10 nm) și moleculelor mai puțin complexe (1 nm). Limita poate fi  
35          coborâtă dacă se utilizează o lungime de undă mai scurtă sau un indice de refracție mai  
mare.

37          Pentru metalele (Au, Ag, Al, Cu, Cr, Ni) utilizate în fabricarea metamaterialelor (MTM)  
(Pendry J.B., **Metamaterials and the Control of Electromagnetic Fields, Proceedings**  
39          **of the Ninth Rochester Conference on Coherence and Quantum Optics, June 13 2007**  
**ISBN: 1 -55752-849-7, Page CMB2**) indicele de refracție este un număr complex cu partea  
41          reală mică și partea imaginară de 4-6 ori mai mare. Prin definiție MTM sunt o combinație  
regulată de formațiuni metalice și mediu dielectric. Această combinație are proprietăți fizice  
43          care provin mai ales de la structura lor (formă, geometrie, mărime, orientare) și nu doar de  
la proprietățile intrinseci ale constituenților de bază. Distribuția și forma elementelor metalice  
45          structurate în mediul dielectric afectează propagarea radiației electromagnetice într-o  
manieră care nu este observată în materialele naturale. Materialele cunoscute ca MTM cu  
47          indice de refiacție negativ permit crearea de superlentile, care pot crește rezoluția optică

dincolo de limita de refracție. Conceptul de superlente sau lentilă perfectă a fost introdus de Sir John Pendry și se referă la focalizarea fără aberații a întregului spectru, atât a undelor de propagare, cât și celor evanescente (Pendry, J. B., "Negative refraction makes a perfect lens", Phys. Rev Lett., 85 (18), 2000, 3966-9). Chiar dacă teoria formulată inițial de Pendry nu a fost tocmai corectă (Ziolkowski, R W., Heyman, E. (2001), "Wave propagation in media having negative permittivity and permeability". Physical Review E, 64 (5): 056625) fiind valabilă doar pentru un mediu particular fără pierderi, nedispersiv și cu parametri definiți astfel încât să ducă la un indice de refracție negativ, totuși rezultatul intuitiv final al acestei teorii, că atât undele de propagare, cât și cele evanescente sunt focalizate într-un punct focal în stratul metalic și un alt punct focal simetric în exteriorul stratului s-a dovedit a fi corect.

Rezoluția superlentelelor este limitată doar de calitatea materialului. Ca exemplu, obținerea de MTM pentru domeniul vizibil ține de rezolvarea următoarelor probleme:

- elementele conductive metalice constitutive precum fire, inele rezonatoare splitate sau de alte forme, trebuie fabricate la dimensiuni mai mici decât lungimea de undă (400÷700 nm);

- lungimile de undă scurte corespund frecvențelor mai mari și la aceste frecvențe metalele se comportă mai puțin conductiv, astfel încât amortizează rezonanțele la care ar trebui să lucreze MTM. Totuși, un strat de metal foarte subțire, aproximativ de 40÷50 nm, poate acționa ca superlentilă în vizibil, unde indicele de refracție  $n$  este negativ.

Rezonanța plasmonică de suprafață (surface plasmon resonance-SPR) (Roh S., Chung T., Lee B, Sensors, 11 (2011), 1565-1588) și cazul particular al acesteia: rezonanța plasmonică localizată de suprafață (LSPR) (Traci RJ et al., J. Phys. Chem. B 2000, 104, 10549-10556) joacă un rol esențial în îmbunătățirea EW la transmisia printr-un strat metalic subțire sau printr-o distribuție de nanoparticule de Ag depusă pe o suprafață optică. Prezența unei arii de nanoparticule sau elemente metalice de Ag ca și nanostructură pe suprafața dielectrică este similară cu o rețea metalică de difracție cu dimensiuni mai mici decât lungimea de undă de lucru. Pe de altă parte, un strat subțire de Ag este recomandat în multe aplicații de spectroscopie SPR în comparație cu oricare alt metal nobil (aurul este des utilizat), pentru că prezintă cea mai mică pierdere la rezonanță în domeniul frecvențelor optice. Un strat subțire de Ag depus pe un dielectric, cum ar fi BK7 pentru vizibil, poate spori EW prin transmisie la excitația cu o undă electromagnetică de polarizare  $p$ , undă care produce SPR la ambele interfețe (sticlă-metal, metal-aer).

Undele SPR de la cele două interfețe se pot cupla, dacă stratul metalic este suficient de subțire.

Foarte recent a fost introdus practic grafenul pentru excitarea SPR (Ju et al., Nature Nanotech 6, 2011, 630). Se preferă să se lucreze cu grafen polarizat electric, din cauză că acesta are o inductanță cinetică mai mare  $[Im(\sigma)]$  decât grafenul nepolarizat (P. Tassin, T. Koschny, M. Kafesaki, C. M Soukoulis, A companion of graphene, superconductors and metals as conductors for metamaterials and plasmonics, Nature Photonics, 6, 2012, 259-264). Grafenul polarizat la maximum 30 V suportă unde plasmonice de suprafață (surface plasmon polaritons-SPPs) cu lungimea de undă mai mică decât lungimea de undă de propagare în spațiul liber. SPPs sunt unde electromagnetice (e.m.) de suprafață care rezultă din cuplarea câmpului e.m. cu oscilațiile colective (plasmoni) ale electronilor liberi din conductor.

# RO 131292 B1

1           La 30 THz, de exemplu, lungimea de undă a SPP este  $0,2 \mu\text{m}$  ( $\lambda_{SPP} \equiv \lambda_{FS} / n$ ),  
față de  $10 \mu\text{m}$  corespunzătoare PW în spațiul liber (free space-FS). Suplimentar, aceste SPP  
3 sunt excelent confinate pe suprafața grafenului, prezentând lungimi de atenuare laterale  
submicrometrice. Deci, grafenul ar putea manipula SPP la scală submicrometrică la frec-  
5 vențe IR. Datorită capacității de a depăși limita de difracție a luminii, componentele care ope-  
rează cu SPPs sunt considerate drept cei mai promițători candidați pentru dispozitive nano-  
7 fotonice (**G. Wang, X Liu, H. Lu, C. Zeng, Graphene plasmonic lens for manipulating  
energy flow, Scientific Reports, 4, 4073, DOI: 10.1038/srep04073**). S-a probat de  
9 asemenea că prin variația potențialului chimic, utilizând câmpuri electrice sau magnetice  
pentru controlul acestuia, conductivitatea grafenului poate fi schimbată pe domeniul  $10^4$ - $250$   
11 THz (PW:  $1,2 + 30 \mu\text{m}$ ) (A Vakil, N. Engheta, One-Atom-Thick IR Metamaterials and  
Transformation Optics Using Graphene, Science, 332,2011,1291). Se poate selecta  
13 domeniul de operare al superlentilei printr-o alegere adecvată și a factorului de umplere a  
rețelei metalice formată din H-uri de metal (Ag sau Au) și selectarea mediilor dielectrice care  
15 formează ghidul de undă (S. Sun, Q. He, S. Xiao, Q. Xu, X. Li, L. Zhou, Gradient-index  
meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves, Nature Materials,  
17 11. (2012). 426-431). Tot în ultima referință se precizează condițiile de cuplare PW - SW.  
Pentru orice PW se poate proiecta o metasuprafață (MTS) cu indice de refracție variabil  
19 (gradat), astfel încât să se obțină transformarea de 100% a PW în SW, pentru o componentă  
adecvată a vectorului de undă pe direcția de propagare a SW și un anumit domeniu de valori  
21 pentru unghiul de incidență. Unghiul de incidență trebuie să fie mai mare decât o valoare  
critică. Tot S. Sun et al. au arătat în articolul citat că SW generată pe MTS poate fi  
23 într-adevăr ghidată pentru a se propaga ca SPP pe o altă suprafață vecină acoperită cu o  
structură de microarii metalice dreptunghiulare. Cuplarea SW-SPP nu este supusă unei  
25 condiții de adaptare, pentru că  $\lambda_{SW} = \lambda_{SPP}$ . Confinarea SW este realizată pe MTS prin  
distribuția elementelor H ca în fig.1, cu elementele H de dimensiuni mai mari spre periferia  
27 opticii. Prin urmare, un astfel de sistem reprezintă puntea de legătură dintre PW și SW cu  
doi parametri cruciali care controlează cuplajul celor două tipuri de unde. Un asemenea  
29 fenomen de conversie este realizat prin arii cu reflectanta, respectiv transmitanta, modulată  
în domeniul ales pentru frecvențele de lucru. Pentru conversia inversă, SW în PW, aceeași  
31 parametri, vector de undă și unghi de emergentă, trebuie să îndeplinească condițiile  
menționate mai sus, iar elementele metalice sub formă de H vor fi distribuite conform fig. 2,  
33 cu elementele mai mici la periferie. Toate undele PW și EW sau SW provenind de la sursa  
de radiații sunt prezente în planul focal al undelor PW (**Lee, H et al., Solid State  
35 Communications 146 (2008), 202-207**). Prin introducerea structurii de superlentilă propusă  
în tehnicile de imagistică de înaltă rezoluție este cu puțință să se cumuleze contribuțiile  
37 diferitelor unde purtătoare de informații.

Menționăm ca elemente de dificultate:

- 39           - obținerea de elemente metalice incluse în dielectric pe suprafețe plane extinse de  
ordinul  $\text{cm}^2$ ;
- 41           - este dificil de efectuat transferul unui strat de grafen de arie mare de pe un substrat  
catalitic de Cu, Ni, Pd, Ru sau Pt, unde este crescut în mod normal prin depunere chimică  
43 din faza de vapori (chemical vapor deposition-CVD), pe suprafața superlentilei;

# RO 131292 B1

- cuplarea cu precizie nanometrică a suprafeței superlentilei la suprafața obiectului în câmpul EW pentru asigurarea detecției și conversiei în PW în câmpul îndepărtat, în câmp îndepărtat fiind plasat detectorul sau observatorul.	1
Pentru obținerea de structuri metalice pe arii extinse se pot utiliza metode litografice. Litografia optică (optical lithography-OL) s-a perfecționat ca parte a tehnologiei pentru obținerea de microcircuite pe siliciu (Si) iar mai recent litografia nanoimprint (nanoimprint lithography-NIL) s-a impus ca o metodă de fabricație simplă la scală nanometrică, de cost scăzut, cu productivitate ridicată și rezoluție înaltă. NIL presupune deformarea mecanică cu o matriță a unui rezist vâscos pentru imprimarea tiparelor și apoi solidificarea acestor tipare prin tratament termic sau iradierea cu UV. Este cea mai potrivită metodă pentru fabricarea metasuprafețelor pe arii extinse cu detalii nanometrice. Litografia cu fascicul de electroni (electron beam lithography-EBL) sau cu fascicul focalizat de ioni (focused ion beam-FIB) sunt adecvate pentru arii restrânse cum sunt matrițele pentru NIL. De asemenea, se pot realiza măști de litografie din PMMA, care pot fi îndepărtate după depunerea metalului nobil cu solvenți precum acetona.	3
Straturile de oxizi pot fi crescute termic pe substratul semiconductor, iar depunerea straturilor de dielectric peste elementele metalice de suprafață se poate realiza prin acoperire centrifugală (spin coating) sau pulverizare (sputtering).	5
Pentru cuplarea cu precizie nanometrică a superlentilei în câmpul EW se poate utiliza un scanner cu acționare piezoelectrică.	7
Menționăm doar următoarele limitări:	9
- noua structură permite preluarea și conversia EW în câmp îndepărtat prin introducerea suprafeței superlentilei în regiunea de penetrare limitată a EW. Adâncimea de penetrare detectabilă este de $150\div 200 \text{ \AA}$ în aer și este funcție de unghiul de incidență pe suprafața optică (M. Kramer, "Evanescent waves in microscopy", Photonik, 2,2004,42);	11
- obținerea de grafen pe suprafețe optice mari este dificilă și prohibitivă;	13
- conversia dintre SW și PW sau PW și SW se realizează cu randament maxim doar în anumite condiții de incidență a radiației și pe o anumită bandă de frecvențe. Această bandă de frecvențe poate fi lărgită, dacă sunt utilizate materiale nerezonante cu indice mare de refracție.	15
Problema tehnică obiectivă pe care o rezolvă invenția constă în obținerea unei imagini de înaltă rezoluție sub limita de difracție.	17
Structura optică propusă constituie un ghid plasmonic format dintr-un strat metalic micro- sau nanostructurat ca elemente plane sub formă de H, interfațat cu materiale dielectrice: un strat de oxid și un strat de polimer transparent în domeniul spectral de operare. Se poate opta ca polimerul să fie înlocuit cu același oxid pentru omogenitate. Tensiunea electrică, care este aplicată între substratul semiconductor și stratul de grafen perfect conductor depus pe suprafață, controlează densitatea de purtători din substratul semiconductor și astfel controlează implicit indicele de refracție al substratului optic între anumite valori.	19
Structura optică este utilă în realizarea de sisteme optice cu rezoluție sub lungimea de undă a radiației de lucru, infraroșu (infrared-IR) în cazul semiconductorilor uzuali, în microscopie termică și sisteme optoelectronice de imagistică pentru condiții dificile de vizibilitate. În sistemele optoelectronice imaginea obținută poate fi îmbunătățită prin efectul de modulare a reflectivității suprafețelor optice sau prin selectarea polarizării radiației transmise prin adăugarea unor lamele retardoare în sferă de undă, care constituie împreună cu ghidul plasmonic un analizor de stări de polarizare. Însă, analizorul de stări de polarizare presupune prelucrarea imaginilor achiziționate în patru poziții relative diferite ale superlentilei și lamelei	21

# RO 131292 B1

1     retardoare, pentru obținerea și combinarea componentelor vectorului Stokes. Această  
prelucrare duce la o altă dezvoltare și aplicație a prezentei inovații, când superlentila  
3     electrooptică are rol de polarizor. Invenția noastră se limitează acum la o configurație  
specifică a superlentilei pentru obținerea imaginilor cu rezoluție sub limita de difracție,  
5     capabilă de a adăuga detaliile din câmp apropiat la informațiile optice din câmp îndepărtat  
prin convertirea EW în FW, respectiv invers în cazul reorientării perioadei structurale a  
7     elementelor metalice sub formă de H din cadrul ghidului de undă.

Practic, noua structură de suprafață propusă pentru sistemul de obținere a imaginilor  
9     cu rezoluție sub limita de difracție permite exploatarea unei noi direcții de dezvoltare,  
utilizând cuplarea ordinelor de difracție superioare la imaginea obținută în câmp îndepărtat,  
11    pentru îmbunătățirea controlului și formarea unei imagini de înaltă rezoluție.

Structura de superlentilă electrooptică propusă în fig. 1÷3 introduce posibilitatea  
13    conversiei PW în SW sau invers, pentru valori ale unghiului de incidență (respectiv  
emergentă) mai mari decât unghiul critic pentru interfața optică plană pe un anumit domeniu  
15    spectral. Se pot studia conversia PW în EW (și respectiv reciprocă) la variația unghiului de  
incidență, pe anumite benzi spectrale în care substratul este transparent și are indicele de  
17    refracție modulabil electric. Se pot studia, de asemenea, contribuțiile diferitelor fenomene  
fizice de la interfață (difracție, amplificarea locală a rezonanțelor plasmonice, amplificarea  
19    EW sau SW în mediile cu  $n$  negativ,  $\Delta n$  cu tensiunea electrică) la modularea reflectivității,  
la îmbunătățirea rezoluției și contrastului unei imagini în IR sau chiar în vizibil. Dacă se  
21    introduce un substrat dielectric transparent în vizibil și o suprafață metalică depusă suficient  
de subțire pentru a fi transparentă în vizibil, necesară pentru aplicarea tensiunii electrice, cu  
23    indicele de refracție al substratului modulabil prin efect electro-optic liniar (efect Pockels) sau  
prin efect electro-optic pătratic (birefringență electrică sau efect Kerr), atunci se pot  
25    îmbunătăți rezoluția și contrastul în vizibil. În mod curent, pentru a realiza celule Pockels, se  
folosesc cristalele:  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  (ADP),  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (KDP),  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiTaO}_3$  și CdTe. Dezavantajul  
27    major al structurii pentru vizibil este că necesită tensiuni aplicate mari, de ordinul 10 kV,  
pentru a se obține modificări maxime de același ordin cu minimumul din cazul semiconduc-  
29    torilor,  $\delta n = 10^{-5}$ . Practic nu există pierderi optice datorate stratului de grafen, pentru că  
acesta este constituit de un strat monoatomic de carbon. Avantajul major al configurației  
31    introduse este că pentru variația unghiului de incidență a radiației pe suprafață pierderile la  
cuplare sunt diminuate. Optimizarea structurii de superlentilă electrooptică se face prin  
33    micșorarea pierderilor de informație intrinsecă din câmpul EW. Adâncimea de penetrare  
pana la care EW este detectabilă în aer poate fi ajustată și prin variația puterii radiației.

35    Prezenta invenție poate fi înțeleasă din lectura modului detaliat de realizare  
descries mai jos cu titlu informativ, dar nelimitativ, și prin referire la desenele anexate:

37    - fig. 1, ilustrează structura de superlentilă electrooptică realizată cu ghid plasmonic  
nanostructurat pentru conversia EW în PW;

39    - fig. 2, ilustrează structura de superlentilă electrooptică realizată cu ghid plasmonic  
nanostructurat pentru conversia PW în EW;

41    - fig. 3, ilustrează distribuția elementelor metalice sub forma de H în ghidul de undă  
din structură de superlentilă electrooptică.

43    În fig. 1...3 este prezentată structura ghidului de undă. Ghidul este alcătuit din  
elemente 1 metalice sub formă de H care acoperă toată suprafața oxidului 3 crescut termic  
45    pe substratul 2 semiconductor al superlentilei. Aceste elemente sunt aranjate într-o ordine  
descrescătoare pornind de la periferie, pentru conversia PW în SW, cu perioada de 7  
47    elemente pe direcția razei suprafeței superlentilei, ca în detaliul din fig 1.

# RO 131292 B1

Pentru conversia SW în PW, elementele dintr-o perioadă sunt aranjate în ordine inversă, cu elementele H mai mici la periferie, ca în detaliul din fig. 2. Elementele metalice de aceeași mărime dintr-o perioadă radială se regăsesc pe același cerc. După formarea elementelor H pe suprafața oxidului se depun: un strat de dielectric polimeric (PMMA, PDMS, DVC-MMA, COUM/PMMA, poliimida) și un strat de grafen. Stratul de oxid de sub elementele metalice și stratul de polimer asigură izolarea electrică a elementelor metalice față de straturile puse sub tensiune. Substratul semiconductor și stratul de grafen sunt contactate ohmic și conectate electric la o sursă de tensiune continuă. Doparea substratului poate merge de la  $10^{13}$ - $10^{16}$   $\text{cm}^{-3}$  (rezistivitate mare) până la  $10^{20}$   $\text{cm}^{-3}$  (rezistivitate mică) (Widmann. D "Technology of Integrated Circuits", Springer, 2000,39).

Variația indicelui de refracție este în intervalul  $4 \times 10^{-5}$  -  $10^{-2}$  pentru variația concentrației purtătorilor de sarcină în intervalul  $10^{16}$ - $10^{19}$   $\text{cm}^{-3}$  (**Massood Tabib-Azar. "Integrated Optics, Microstructures, and Sensors"**, Springer, 1995, 167).

Adâncimea de penetrare  $\delta_{EW}$  în mediul cu indicele de refracție  $n_2$  (când stratul polimeric are un indice de refracție mai mic decât al oxidului crescut termic) este:

$$\delta_{EW} = \frac{\lambda_0}{4\pi n_2} \frac{1}{\sqrt{(\sin \alpha_1 / \sin \alpha_c)^2 - 1}} \quad (2)$$

unde:  $\lambda_0$  este lungimea de undă incidentă,  $\alpha_c$  este valoarea critică a unghiului de incidență când apare fenomenul de reflexie internă totală, iar  $\alpha_1$  este unghiul de incident mai mare decât  $\alpha_c$  în mediul cu un indice de refracție  $n_1$ . Adâncimea de penetrare depinde de polarizarea luminii incidente și scade odată cu creșterea unghiului. Atunci când  $\alpha_1$  atinge valoarea minimă corespunzătoare unghiului critic  $\alpha_c$ , adâncimea de penetrare a EW tinde către infinit. Dar, prin definiție, la unghiul critic este luată în considerare valoarea adâncimii corespunzătoare scăderii intensității EW la  $1/e$  (37%) din intensitatea maximă la interfață. Practic, se poate lucra până la un prag de detecție aflat la distanță egală cu o lungime de undă de la interfață. Modificarea reflectivității suprafețelor prin depunerea de filme subțiri antireflex din ZnS, ZnS și criolit (substanțe cancerigene) pentru domeniul  $8 \div 12$   $\mu\text{m}$  de operare pentru optica din Ge este destul de problematică. Confinarea undelor electromagnetice pe suprafața superlentei prin aplicarea unei tensiuni electrice modulează și reflectivitatea suprafețelor într-un domeniu de valori care rămâne să fie determinat. Fig. 3 prezintă evoluția amplitudinii EW (sau SW) pe parcursul perioadelor de elemente metalice atât în direcția de conversie D1, cât și în direcția de conversie D2. Dacă în cadrul unei perioade este o evoluție gradată a indicelui de refracție și a fazei reflexiei, totuși la trecerea de la o perioadă la altă fază suferă un salt de la  $180^\circ$  la  $-180^\circ$  (**S. Sun, Q. He, S. Xiao, Q. Xu, X. Li, L. Zhou, Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves, Nature Materials, 11, 2012, 426-431**). Când PW este convertită total în SW, atunci unda electromagnetică nu mai poate scăpa de pe suprafața superlentei. În situația inversă, când SW este convertită total în PW, unda nu mai este deloc confinată pe suprafață și suferă o reflexie. Profilul grosimii elementelor metalice H în cadrul unei perioade din fig. 3 este marcat cu linie verde discontinuă pentru un profil constant și cu linie roșie discontinuă pentru un profil exponențial. Variația exponențială a profilului grosimii elementelor ar putea compensa o eventuală deplasare spectrală spre roșu (aberație cromatică) care ar putea să crească cu reducerea distanței dintre elementele metalice (**Roh S., Chung T., Lee B, Sensors, 11 (2011), 1565-1588**). Acordabilitatea rezonanțelor plasmonice la suprafața grafenului poate fi realizată de asemenea prin cuplarea electromagnetică puternică între

# RO 131292 B1

1 elementele metalice și statul de grafen. Trebuie studiată și deplasarea acestor frecvențe de  
rezonanță cu grosimea stratului de dielectric depus între elementele metalice și grafen,  
3 ținând cont de faptul că structura este un modulator de fază cu indice de refracție controlabil.

Pentru conversia PW în EW sau SW, lentila va trebui plasată cu substratul spre  
5 obiect în câmpul îndepărtat față de acesta și cu stratul de grafen spre detectorul de radiație  
electromagnetică, astfel încât suprafața detectorului să fie în câmpul apropiat față de  
7 suprafața acoperită de elementele metalice. O picătură dintr-un mediu lichid cu indice de  
refracție mai mic decât al dielectricului depus pe elementele metalice H (1) va fi depusă între  
9 superlentilă și suprafața de intrare a detectorului, pentru a se asigura adaptarea de indice  
de refracție dintre mediul extern, superlentilă și detector.

11 Straturile ghidului de undă: grafen, dielectric depus, elemente metalice și oxid crescut  
termic pe semiconductor sunt suficient de subțiri pentru a nu atenua considerabil radiația  
13 electromagnetică. Apoi, unda evanescentă EW sau SW este amplificată atât de rezonanțele  
plasmonice localizate pe rețeaua elementelor metalice, cât și datorită indicelui de refracție  
15 negativ al structurii de MTM a ghidului de undă (**J.B. Pendry, D.R. Smith, „Superfens”,  
Scientific American, 295(1 X 2006, 61-67)**). Superlentila electrooptică acționează astfel  
17 încât o undă de propagare (PW) la unghi de incidență mai mare decât un unghi critic, și cu  
vector de undă într-un domeniu selectat, să fie total captată, atunci când atinge suprafața  
19 superlentilei, în funcție de cum este controlată electric cuplarea electromagnetică în ghidul  
de undă de sub stratul de grafen.

21 Fasciculul de radiație va aborda structura dinspre stratul de grafen.

O picătură dintr-un mediu lichid cu indice de refracție mai mic decât al dielectricului  
23 depus pe elementele metalice H (1) va fi depusă pe obiect, pentru a se asigura adaptarea  
de indice de refracție dintre obiect, mediul extern și superlentilă. EW se propagă pe stratul  
25 de grafen de la suprafață și ghidul de undă, prezentând o atenuare exponențială cu distanța  
parcursă pe suprafețe și va suferi conversia în PW, care se propagă în adâncime, spre  
27 substratul semiconductor și spre detectorul plasat în apropierea superlentilei, evadând în  
câmp îndepărtat față de ghidul de undă. EW sau SW conține detaliile mai fine decât  
29 lungimea de undă a radiației de lucru. EW, respectiv SW, va fi preluată prin aducerea  
superlentilei în câmpul apropiat al obiectului, astfel încât stratul de elemente metalice 1 să  
31 fie la o distanță mai mică de o lungime de undă față de obiect. Lungimile de undă de lucru  
vor fi alese în funcție de caracteristicile optice ale substratului 2 și ghidului de undă format  
33 din oxid 3, elemente 1 metalice, dielectric 5, grafen 4. Prin variația tensiunii electrice pe  
structură este modificat indicele de refracție al substratului semiconductor și astfel este  
35 modulată corespunzător reflectivitatea suprafeței superlentilei, ceea ce duce la reglarea  
contrastului imaginii termale obținute.

37 Structura funcțională este detaliată în fig. 1...3. Procedura tehnologică de realizare  
a micro- sau nanostructurii pe suprafața activă este:

39 - substratul, care poate fi o plachetă de Si, Ge, GaAs, GaSb, GaP, ZnSe, CdTe sau  
alți semiconductori transparentți în domeniul spectral infraroșu mediu (MWIR) și infraroșu de  
41 lungimi de undă mari (LWIR), se degrează în alcool etilic absolut (puritate peste 99,2%)  
și apoi e corodat chimic rapid în HF 10%, pentru îndepărtarea oxidilor nativi. Apoi este supus  
43 tratamentului termic la 250÷500°C de la 15 min până la 9 h, în funcție de grosimea stratului  
de oxid care se dorește a fi obținută. Pentru timpul de 9 h grosimea oxidului ajunge la maxi-  
45 mum 3 nm. Pentru comparație, adâncimea de patrundere a EW cu  $\lambda = 560$  nm din BK7 în  
aer este 115 nm (**C. Cotirlan-Simioniuc, R. V. Ghita, C. C. Negrilă C. Logofatu, „The  
47 evanescent-wave cavity ring-down spectroscopy technique applied to the  
investigation of thermally grown oxides on Si(100)”, Appl. Phys. A, 117 (3)  
49 2014,1359-1365**);



# RO 131292 B1

- prin pulverizare catodică în sistem magnetron (RF sputtering) sau evaporare cu fascicul de electroni (ebeam) sau evaporare termică în vid (TVE) sau depunere cu laser pulsant (PLD) se poate realiza un strat subțire de 2 nm de Ni ca strat de nucleație-umectare-adeziune-netezire pe întreaga suprafață plană a substratului. Acest strat de Ni duce la obținerea unei suprafețe netede pentru stratul de Ag depus în următoarea fază. Proprietățile plasmomice ale stratului de elemente metalice sunt de asemenea îmbunătățite de stratul intermediar de Ni (**Liu, H et al., AcsNano 4(6), 2010, 3139-3146**). Apoi prin aceleași metode se depune stratul de 35+50 nm de Ag. Pe stratul de Ag se depune un fotorezist sensibil la radiație UV și o mască cu negativul tiparului metalic pe care îl dorim inscripționat pe stratul de oxid. După iradierea UV, tiparul final se obține prin corodarea chimică a fotorezistului nesolidificat și a metalului aflat sub acesta. Pentru tipar cu H-uri din Au se utilizează Ti pentru stratul intermediar. 1
- doar pentru domeniul vizibil elementele metalice H au detalii nanometrice. În acest caz, pentru obținerea lor pe suprafața plană a oxidului crescut termic este recomandată litografia nanoimprint (NIL) aplicată în conformitate cu descrierea din referință (**Torres C.M.S., „Nanoimprint lithography: an alternative nanofabrication approach”, Materials Science and Engineering: C, 23 (1 -2), 2003.23-31**). 3
- Pentru domeniul IR dimensiunile elementelor metalice sunt mai mari, de ordinul  $\lambda/10$ . La această scală micrometrică se poate aplica litografia optică convențională, care a fost perfecționată pentru industria microelectronică pe Si sau Ge; 5
- stratul de polimer se depune prin spin coating sau pulverizare (sputtering). Polimerul poate fi înlocuit pentru domeniul MWIR de un strat de SiO<sub>2</sub> depus prin CVD; 7
- urmează transferul stratului de grafen de pe substratul de Cu, Ni, Pd, Ru sau Pt, unde a fost crescut prin CVD, pe stratul de dielectric. Acest transfer se poate face acum și fără corodare chimică (**P.J. Ko et al, “Simple method to transfer graphene from metallic catalytic substrates to flexible surfaces without chemical etching”, The Irago Conference 2012, Journal of Physics: Conference Series 433, 2013, 012002**). Corodarea chimică induce deplasări Raman semnificative; 9
- se realizează contactele electrice ohmice pe stratul semiconductor și pe stratul de grafen; 11
- sistemul poate fi testat optic cu o cameră de termoviziune pentru MWIR sau LWIR. 13

# RO 131292 B1

## Revendicări

1

3

1. Structură de superlentică electrooptică realizată cu ghid plasmonic micro- sau nanostructurat pentru imagistică cu rezoluție sub limita de difracție, **caracterizată prin aceea că** are o configurație construită pe un substrat (2) semiconductor, bazată pe un ghid de undă controlat electric alcatuit dintr-un strat (1) de elemente metalice sub forma de H, niște straturi (3,5) dielectrice intermediare, și un strat (4) de suprafață de grafen.

5

7

9

2. Structură conform revendicării 1, **caracterizată prin aceea că**, în cazul inversării ordinii elementelor metalice din stratul (1) în structura ghidului de undă se obține conversia în sens revers.

11

13

3. Structură conform revendicării 1, **caracterizată prin aceea că**, stratul (4) de grafen realizează confinanța strânsă a undelor de suprafață și modularea reflectivității în IR la aplicarea unei tensiuni electrice pe structură.

15

4. Structură conform revendicării 1, **caracterizată prin aceea că**, pe substratul (2) semiconductor se aplică o tensiune electrică ce induce variația indicelui de refracție a acestuia îmbunătățind contrastul imaginilor obținute în câmp îndepărtat.

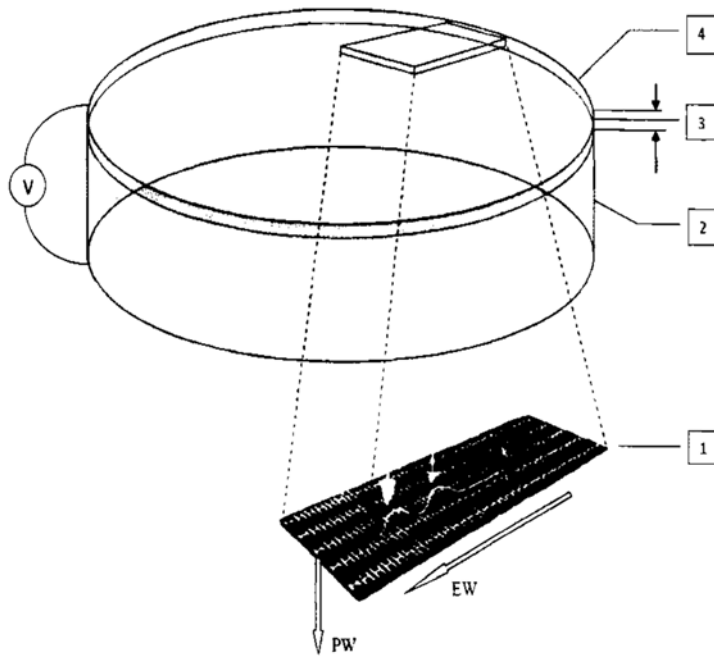


Fig. 1

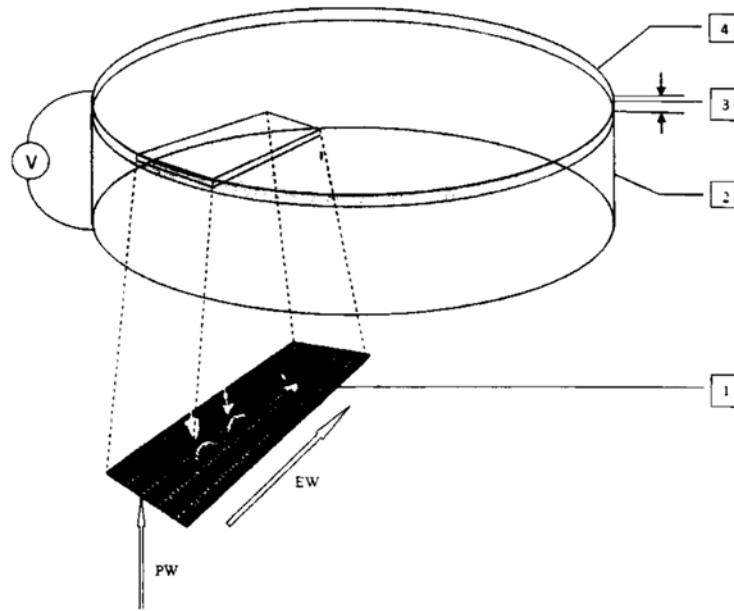


Fig. 2

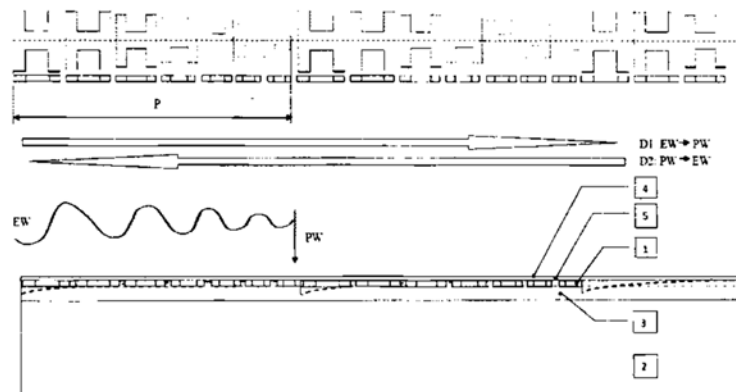


Fig. 3

