



(12) CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: a 2015 00050

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

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

(71) Solicitant:
• 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 TĂNASE NR.3, BL.13, SC.3,
AP.70, SECTOR 4, BUCUREȘTI, B, RO

(54) STRUCTURĂ DE SUPERLENTILĂ ELECTROOPTICĂ
REALIZATĂ CU GHID PLASMONIC MICRO SAU
NANOSTRUCTURAT PENTRU IMAGISTICĂ CU REZOLUȚIE
SUB LIMITA DE DIFRAȚIE

(57) Rezumat:

Invenția se referă la o structură de superlentilă electro-optică având ghid de undă micro sau nanostructurat, pentru imagistică ce prezintă rezoluție sub limita de difracție, ce are o configurație construită pe un substrat (2) semiconductor, bazată pe un ghid de undă controlat electric, alcătuit dintr-un strat (1) de elemente metalice sub formă de H, niște straturi (3, 5) dielectrice intermediare și un strat (4) de suprafață de grafen.

Revendicări: 6
Figuri: 3

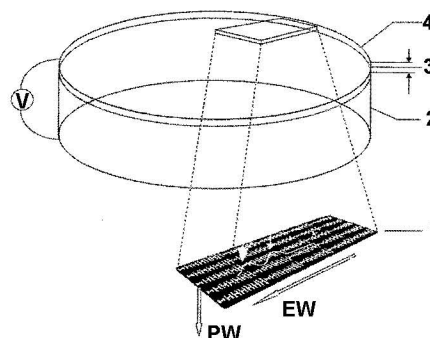


Fig. 1



Structură de superlentilă electrooptică realizată cu ghid plasmonic micro- sau nanostructurat pentru imagistica cu rezoluție sub limita de difracție

Descriere

DOMENIUL TEHNIC

Această invenție se referă la o structură de tip superlentilă electrooptică plană, ultrasubțire, fără aberații, controlată electric, capabilă să confere posibilitatea de a depăși rezoluția limitată 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) sau undele de suprafață (surface wave-SW).

Optica clasică nu poate exploata aceste informații, pentru că EW sau SW se atenuează rapid pe direcția de propagare perpendiculară pe suprafața optică. Superlentila propusă se încadrează în domeniul opticii de transformare, optică cu transformare arbitrară de coordonate, adică cu permittivitate electrică și permeabilitate magnetică neomogene și anizotrope. Această superlentilă reușește să convertească în anumite 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 afectează optica clasică: cromatică, de sfericitate și geometrică.

Structura optică propusă constituie un ghid plasmonic format dintr-un strat metalic micro- sau nanostructurat ca elemente plane sub forma 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.

Structura optică este utilă în realizarea de sisteme optice cu rezoluție sub lungimea de undă a radiației de lucru, infrarosu (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 sfert 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 retardoare, pentru obținerea și combinarea componentelor vectorului Stokes. Aceasta prelucrare duce la o altă dezvoltare și aplicație a prezentei inovații, când superlentila 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, capabilă de a adăuga detaliile din câmp apropiat la informațiile optice din câmp îndepărtat prin convertirea EW în PW, respectiv invers în cazul reorientării perioadei structurale a elementelor metalice sub forma de H din cadrul ghidului de undă.

Practic, noua structură de suprafață propusă pentru sistemul de obținere a imaginilor 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, pentru îmbunătățirea contrastului și formarea unei imagini de înaltă rezoluție.

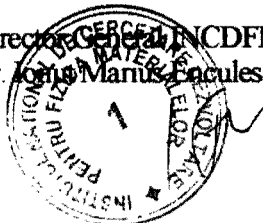
STADIUL TEHNICII

Observarea detaliilor cu dimensiuni sub lungimea de undă cu ajutorul microscopelor optice este dificilă datorită limitei de difracție Abbe. Lumina cu lungimea de undă λ , parcurgând un mediu cu indicele de refracție n și care converge într-un spot de unghi θ , va avea raza spotului dată de relația:

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

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 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 μ m), destul de mică comparativ cu majoritatea celulelor biologice (de la 1 μ m la 100 μ m), dar prea mare în comparație cu dimensiunea virusilor (100 nm), proteinelor (10 nm) și moleculelor mai puțin complexe (1 nm). Limita poate fi coborâtă, dacă se utilizează o lungime de undă mai scurtă sau un indice de refracție mai mare.

Pentru metalele (Au, Ag, Al, Cu, Cr, Ni) utilizate în fabricarea metamaterialelor (MTM) (Pendry J.B., *Metamaterials and the Control of Electromagnetic Fields*, Proceedings 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 reală mică și

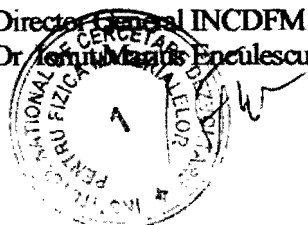


partea imaginara de 4-6 ori mai mare. Prin definitie MTM sunt o combinatie regulata de formatiuni metalice si mediu dielectric. Aceasta combinatie are proprietati fizice care provin mai ales de la structura lor (forma, geometrie, marime, orientare) si nu doar de la proprietatile intrinseci ale constituintilor de baza. Distributia si forma elementelor metalice structurate in mediul dielectric afecteaza propagarea radiatiei electromagnetice intr-o maniera care nu este observata in materialele naturale. Materialele cunoscute ca MTM cu indice de refractie negativ permit crearea de superlentile, care pot creste rezolutia optica dincolo de limita de refractie. Conceptul de superlentilă sau lentilă perfectă a fost introdus de Sir John Pendry si se refera la focalizarea fara aberatii a intregului spectru, atat a undelor de propagare, cat si celor evanescente (Pendry, J. B., "Negative refraction makes a perfect lens", Phys. Rev. Lett., 85 (18), 2000, 3966-9). Chiar daca teoria formulata initial de Pendry nu a fost tocmai corecta (Ziolkowski, R. W., Heyman, E. (2001), "Wave propagation in media having negative permittivity and permeability". Physical Review E, 64 (5): 056625), fiind valabila doar pentru un mediu particular fara pierderi, nedispersiv si cu parametrii definiti astfel incat sa duca la un indice de refractie negativ, totusi, rezultatul intuitiv final al acestei teorii, că atât undele de propagare, cat și cele evanescente sunt focalizate într-un punct focal în stratul metalic și un alt punct focal simetric in exteriorul stratului, s-a dovedit a fi corect.

Rezolutia superlentilelor este limitata doar de calitatea materialului. Ca exemplu, obtinerea de MTM pentru domeniul vizibil tine de rezolvarea urmatoarelor probleme:

1. Elementele conductive metalice constitutive precum fire, inele rezonatoare splitate sau de alte forme, trebuie fabricate la dimensiuni mai mici decat lungimea de unda (400÷700 nm);
2. Lungimile de unda scurte corespund frecventelor mai mari si la aceste frecvente metalele se comporta mai putin conductiv, astfel incat amortizeaza rezonantele la care ar trebui sa lucreze MTM. Totusi, un strat de metal foarte subtire, aproximativ de 40÷50 nm, poate actiona ca superlentila in vizibil, unde indicele de refractie n este negativ.

Rezonanța plasmonică de suprafață (surface plasmon resonance-SPR) (Roh S., Chung T., Lee B., Sensors, 11 (2011), 1565-1588) si cazul particular al acesteia: rezonanța plasmonică localizată de suprafață (LSPR) (Traci, R.J. et al., J. Phys. Chem. B 2000, 104, 10549-10556) joacă un rol esențial în îmbunătățirea EW la transmisia printr-un strat metalic subtire sau printr-o distributie de nanoparticule de Ag depusă pe o suprafață optică. Prezența unei arii de nanoparticule sau elemente metalice de Ag ca si nanostructură pe suprafața dielectrică este similară cu o retea metalică de difracție cu dimensiuni mai mici



decat lungimea de undă de lucru. Pe de alta parte, un strat subțire de Ag este recomandat in multe aplicatii de spectroscopie SPR in comparație cu oricare alt metal nobil (aurul este des utilizat), pentru că prezintă cea mai mică pierdere la rezonanță in domeniul frecvențelor optice. Un strat subțire de Ag depus pe un dielectric, cum ar fi BK7 pentru vizibil, poate sponi 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 prefera sa se lucreze cu grafen polarizat electric, din cauza ca acesta are o inductanta cinetica mai mare $[Im(\sigma)]$ decat grafenul nepolarizat (P. Tassin, T. Koschny, M. Kafesaki, C. M. Soukoulis, A comparison of graphene, superconductors and metals as conductors for metamaterials and plasmonics, Nature Photonics, 6, 2012, 259–264). Grafenul polarizat la maxim 30 V suporta unde plasmonice de suprafata (surface plasmon polaritons-SPPs) cu lungimea de unda mai mica decat lungimea de unda de propagare in spatiul liber. SPPs sunt unde electromagnetice (e.m.) de suprafata care rezulta din cuplarea campului e.m. cu oscilatiile colective (plasmoni) ale electronilor liberi din conductor.

La 30 THz, de exemplu, lungimea de unda a SPP este $0,2 \mu\text{m}$ ($\lambda_{SPP} = \lambda_{FS}/n$), fata de $10 \mu\text{m}$ corespunzatoare PW in spatiul liber (free space-FS). Suplimentar, aceste SPP sunt excelent confinate pe suprafata grafenului, prezentand lungimi de atenuare laterale submicrometrice. Deci, grafenul ar putea manipula SPP la scala submicrometrica la frecvente IR. Datorita capacitatii de a depasi limita de difracție a luminii, componentele care opereaza cu SPPs sunt considerate drept cei mai promitatori candidati pentru dispozitive nanofotonice (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 asemenea ca prin variatia potentialului chimic, utilizand campuri electrice sau magnetice pentru controlul acestuia, conductivitatea grafenului poate fi schimbata pe domeniul 10^4 -250 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 domeniul de operare al superlentilei printr-o alegere adecvată si a factorului de umplere a rețelei metalice formata din H-uri de metal (Ag sau Au) și selectarea mediilor dielectrice care formeaza ghidul de unda (S. Sun, Q. He, S. Xiao, Q. Xu, X. Li, L. Zhou, Gradient-index

Y


meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves, Nature Materials, 11, (2012), 426-431). Tot in ultima referinta se precizeaza conditiile de cuplare PW - SW. Pentru orice PW se poate proiecta o metasuprafata (MTS) cu indice de refractie variabil (gradat), astfel incat sa se obtina transformarea de 100% a PW in SW, pentru o componenta adecvata a vectorului de unda pe directia de propagare a SW si un anumit domeniu de valori pentru unghiul de incidenta. Unghiul de incidenta trebuie sa fie mai mare decat o valoare critica. Tot S. Sun *et al.* au aratat in articolul citat ca SW generata pe MTS poate fi intr-adevar ghidata pentru a se propaga ca SPP pe o alta suprafata vecina acoperita cu o structura de microarii metalice dreptunghiulare. Cuplarea SW-SPP nu este supusa unei conditii de adaptare, pentru ca $\lambda_{SW} = \lambda_{SPP}$. Confinarea SW este realizata pe MTS prin distributia elementele H ca in Fig.1, cu elementele H de dimensiuni mai mari spre periferia opticii. Prin urmare, un astfel de sistem reprezinta puntea de legatura dintre PW si SW cu doi parametri cruciali care controleaza cuplajul celor doua tipuri de unde. Un asemenea fenomen de conversie este realizat prin arii cu reflectanta, respectiv transmitanta, modulata in domeniul ales pentru frecventele de lucru. Pentru conversia inversa, SW in PW, aceiasi parametri, vector de unda si unghi de emergenta, trebuie sa indeplineasca conditiile mentionate mai sus, iar elementele metalice sub forma de H vor fi distribuite conform Fig. 2, cu elementele mai mici la periferie. Toate undele PW si EW sau SW provenind de la sursa de radiatii sunt prezente in planul focal al undelor PW (Lee, H. et al., Solid State Communications 146 (2008), 202-207). Prin introducerea structurii de superlentila propusa in tehnicile de imagistica de inalta rezolutie este cu putinta sa se cumuleze contributiile diferitelor unde purtatoare de informatii.

Elementele de dificultate in fabricatia si experimentarea superlentei electrooptice pentru imagistica cu rezolutie sub limita de difractie

Mentionam ca elemente de dificultate:

- obtinerea de elemente metalice incluse in dielectric pe suprafete plane extinse de ordinul cm^2 ;
- 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 in mod normal prin depunere chimica din faza de vapori (chemical vapor deposition-CVD), pe suprafata superlentei;

Director General INCDFM
Dr. Ionut Marius Enculescu



Dr. Costel Cotirlan-Simioniuc



- cuplarea cu precizie nanometrica 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.

Pentru obținerea de structuri metalice pe arii extinse se pot utiliza metode litografice. Litografia optica (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 metoda de fabricație simplă la scala nanometrică, de cost scăzut, cu productivitate ridicată și rezoluție înaltă. NIL presupune deformarea mecanică cu o matrită a unui rezist vascos pentru imprimarea tiparelor și apoi solidificarea acestor tipare prin tratament termic sau iradierea cu UV. Este cea mai potrivită metoda 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 metritele pentru NIL. De asemenea, se pot realiza măști de litografie din PMMA, care pot fi îndepărtate după depunerea metalului nobil cu solvenți precum acetona.

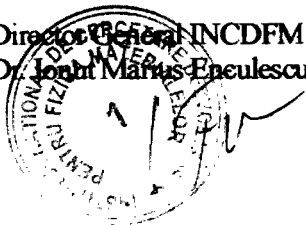
Straturile de oxizi pot fi crescute termic pe substratul semiconductor, iar depunerea straturilor de dielectric peste elementele metalice de suprafața se poate realiza prin acoperire centrifugala (spin coating) sau pulverizare (sputtering).

Pentru cuplarea cu precizie nanometrică a superlentilei în câmpul EW se poate utiliza un scanner cu acționare piezoelectrică.

Limitele abordărilor actuale în domeniul de aplicare a inovației

Mentionăm doar următoarele limitări:

- 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);
- obținerea de grafen pe suprafețe optice mari este dificilă și prohibitivă;



- conversia dintre SW si PW sau PW si SW se realizeaza cu randament maxim doar in anumite conditii de incidenta a radiatiei si pe o anumita banda de frecvente. Aceasta banda de frecvente poate fi largita, daca sunt utilizate materiale nerezonante cu indice mare de refractie.

EXPUNEREA INVENTIEI

Prezenta inventie utilizează o structură de ghid de unda plasată între un strat de grafen si un substrat semiconductor adecvat pentru domeniul spectral de operare.

În Fig.1, 2 si 3 este prezentată structura ghidului de unda. Ghidul este alcatuit din elemente metalice (1) sub forma de H care acopera toata suprafata oxidului (3) crescut termic pe substratul semiconductor (2) al superlentilei. Aceste elemente sunt aranjate intr-o ordine descrescatoare pornind de la periferie, pentru conversia PW in SW, cu perioada de 7 elemente pe directia razei suprafetei superlentilei, ca in detaliul din Fig.1.

Pentru conversia SW in PW, elementele dintr-o perioada sunt aranjate in ordine inversa, cu elementele H mai mici la periferie, ca in detaliul din Fig. 2. Elementele metalice de aceeasi marime dintr-o perioada radiala se regasesc pe acelasi cerc. Dupa formarea elementelor H pe suprafata oxidului se depun: un strat de dielectric polimeric (PMMA, PDMS, DVC-MMA, COUM/PMMA, poliimida) si un strat de grafen. Stratul de oxid de sub elementele metalice si stratul de polimer asigura izolarea electrica a elementelor metalice fata de straturile puse sub tensiune. Substratul semiconductor si stratul de grafen sunt contactate ohmic si conectate electric la o sursa de tensiune continua. Doparea substratului poate merge de la 10^{13} - 10^{16} cm^{-3} (rezistivitate mare) pana la 10^{20} cm^{-3} (rezistivitate mica) (Widmann, D., "Technology of Integrated Circuits", Springer, 2000, 39).

Variatia indicelui de refractie este in intervalul 4×10^{-5} ÷ 10^{-2} pentru variatia concentratiei purtatorilor de sarcina in intervalul 10^{16} - 10^{19} cm^{-3} (Massood Tabib-Azar, "Integrated Optics, Microstructures, and Sensors", Springer, 1995, 167).

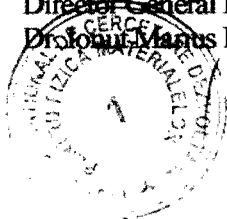
Adâncimea de penetrare δ_{EW} în mediul cu indicele de refracție n_2 (cand stratul polimeric are un indice de refractie mai mic decat al oxidului crescut termic) este:

Director General INCDFM
Dr. Ionuț Marină Enculescu

Dr. Costel Cotirlan-Simioniuc

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

unde: λ_0 este lungimea de undă incidentă, α_c este valoarea critică a unghiului de incidentă când apare fenomenul de reflexie internă totală, iar α_1 este unghiul de incidență mai mare decât α_c în mediul cu un indicele de refracție n_1 . Adâncimea de penetrare depinde de polarizarea luminii incidente și scade odată cu creșterea unghiului α_1 . Atunci când α_1 atinge valoarea minimă corespunzătoare unghiului critic α_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 $8-12 \mu\text{m}$ de operare pentru optica din Ge este destul de problematică. Confinarea undelor electromagnetice pe suprafața superlentilei 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 alta faza suferă un salt de la 180° la -180° (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 superlentilei. În situația inversă, când SW este convertită total în PW, unda nu mai este deloc confinată pe suprafața 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 electromagnetica puternica intre elementele metalice si stratul de grafen. Trebuie studiata si deplasarea acestor frecvente de rezonanta cu grosimea stratului de dielectric depus intre elementele metalice si grafen, tinand cont de faptul ca structura este un modulator de faza cu indice de refractie controlabil.

Conversia PW in SW pentru aplicatii in imagistica termica

Pentru conversia PW in EW sau SW, lentila va trebui plasata cu substratul spre obiect in campul indepartat fata de acesta si cu stratul de grafen spre detectorul de radiatie electromagnetica, astfel incat suprafata detectorului sa fie in campul apropiat fata de suprafata acoperita de elementele metalice. O picatura dintr-un mediu lichid cu indice de refractie mai mic decat al dielectricului depus pe elementele metalice H (1) va fi depusa intre superlentila si suprafata de intrare a detectorului, pentru a se asigura adaptarea de indice de refractie dintre mediul extern, superlentila si detector.

Straturile ghidului de unda: grafen, dielectric depus, elemente metalice si oxid crescut termic pe semiconductor sunt suficient de subtiri pentru a nu atenua considerabil radiatia electromagnetica. Apoi, unda evanescentă EW sau SW este amplificata atat de rezonantele plasmonice localizate pe retea elementelor metalice, cat si datorita indicelui de refractie negativ al structurii de MTM a ghidului de unda (J.B. Pendry, D.R. Smith, „Superlens”, Scientific American, 295(1), 2006, 61-67). Superlentila electrooptica actioneaza astfel incat o unda de propagare (PW) la unghi de incidenta mai mare decat un unghi critic, si cu vector de unda intr-un domeniu selectat, sa fie total captata, atunci cand atinge suprafata superlentei, in functie de cum este controlata electric cuplarea electromagnetica in ghidul de unda de sub stratul de grafen.

Conversia SW in PW pentru aplicatii in microscopie

Fasciculul de radiatie va aborda structura dinspre stratul de grafen.

O picatura dintr-un mediu lichid cu indice de refractie mai mic decat al dielectricului depus pe elementele metalice H (1) va fi depusa pe obiect, pentru a se asigura adaptarea de indice de refractie dintre obiect, mediul extern si superlentila. EW se propaga pe stratul de grafen de la suprafata si ghidul de unda, prezentand o atenuare exponentiala cu distanta parcursa pe suprafata si va suferi conversia in PW, care se propaga in adancime, spre substratul semiconductor si spre detectorul plasat in apropierea

9

Director General INCDFM
Dr. Ionut Mihai Enculescu



Dr. Costel Cotirlan-Simioniuc

superlentilei, evadand în camp indepartat fata de ghidul de unda. EW sau SW contine detaliile mai fine decat lungimea de unda a radiatiei de lucru. EW, respectiv SW, va fi preluata prin aducerea superlentilei in campul apropiat al obiectului, astfel incat stratul de elemente metalice (1) sa fie la o distanta mai mica de o lungime de unda fata de obiect. Lungimile de undă de lucru vor fi alese în funcție de caracteristicile optice ale substratului (2) si ghidului de unda format din oxid (3), elemente metalice (1), dielectric (5), grafen (4). Prin variatia tensiunii electrice pe structura este modificat indicele de refractie al substratului semiconductor si astfel este modulata corespunzator reflectivitatea suprafetei superlentilei, ceea ce duce la reglarea contrastului imaginii termale obtinute.

AVANTAJELE INVENTIEI

Structura de superlentila electrooptica propusa în Fig.1=3 introduce posibilitatea conversiei PW in SW sau invers, pentru valori ale unghiului de incidență (respectiv emergenta) mai mari decat unghiul critic pentru interfata optica plană pe un anumit domeniu spectral. Se pot studia conversia PW in EW (si respectiv reciproca) la variatia unghiului de incidență, pe anumite benzi spectrale in care substratul este transparent si are indicele de refractie modulabil electric. Se pot studia, de asemenea, contribuțiile diferitelor fenomene fizice de la interfață (difracție, amplificarea locala a rezonantelor plasmonice, amplificarea EW sau SW in mediile cu n negativ, Δn cu tensiunea electrica) la modularea reflectivitatii, la imbunatatirea rezolutiei si contrastului unei imaginii in IR sau chiar in vizibil. Daca se introduce un substrat dielectric transparent in vizibil si o suprafata metalica depusa suficient de subtire pentru a fi transparenta in vizibil, necesara pentru aplicarea tensiunii electrice, cu indicele de refractie al substratului modulabil prin efect electro-optic liniar (efect Pockels) sau prin efect electro-optic pătratic (birefringenta electrica sau efect Kerr), atunci se pot imbunatati rezolutia si contrastul in vizibil. In mod curent, pentru a realiza celule Pockels, se folosesc cristalele: $NH_4H_2PO_4$ (ADP), KH_2PO_4 (KDP), $LiNbO_3$. $LiTaO_3$ si CdTe. Dezavantajul major al structurii pentru vizibil este ca necesita tensiuni aplicate mari, de ordinul 10 kV, pentru a se obtine modificari maxime de acelasi ordin cu minimul din cazul semiconductorilor, $\delta n = 10^{-5}$. Practic nu există pierderi optice datorate stratului de grafen, pentru că acesta este constituit de un strat monoatomic de carbon. Avantajul major al configurației introduse este că pentru variația

unghiului de incidență a radiației pe suprafața pierderile la cuplare sunt diminuate. Optimizarea structurii de superlentilă electrooptică se face prin micșorarea pierderilor de informație intrinsecă din câmpul EW. Adâncimea de penetrare până la care EW este detectabilă în aer poate fi ajustată și prin variația puterii radiației.

PREZENTAREA SUMARA A FIGURILOR

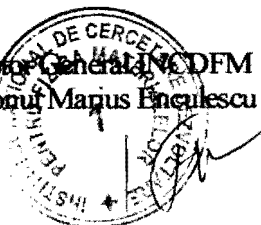
Prezenta invenție poate fi înțeleasă din lecturarea modului detaliat de realizare descris mai jos cu titlu informativ, dar nelimitativ, și prin referire la desenele anexate:

- Fig. 1 ilustrează structura de superlentilă electrooptică realizată cu ghid plasmonic nanostructurat pentru conversia EW în PW;
- Fig. 2 ilustrează structura de superlentilă electrooptică realizată cu ghid plasmonic nanostructurat pentru conversia PW în EW;
- Fig. 3 ilustrează distribuția elementelor metalice sub forma de H în ghidul de undă din structura de superlentilă electrooptică

PREZENTAREA IN DETALIU A UNUI MOD DE REALIZARE A INVENTIEI

Structura funcțională este detaliată în Fig. 1, Fig. 2 și Fig. 3. Procedura tehnologică de realizare a micro- sau nanostructurii pe suprafața activă este:

- substratul, care poate fi o placheta de Si, Ge, GaAs, GaSb, GaP, ZnSe, CdTe sau alți semiconductori transparenti în domeniul spectral infraroșu mediu (MWIR) și infraroșu de lungimi de undă mari (LWIR), se degresează în alcool etilic absolut (puritate peste 99.2 %) și apoi e corodat chimic rapid în HF 10 %, pentru îndepărtarea oxizilor nativi. Apoi este supus tratamentului termic la 250÷500°C de la 15 minute până la 9 ore, în funcție de grosimea stratului de oxid care se dorește a fi obținută. Pentru timpul de 9 ore grosimea oxidului ajunge la maxim 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. Negrița, C. Logofatu, „The evanescent-wave cavity ring-down spectroscopy technique applied to the investigation of thermally grown oxides on Si(100)”, Appl. Phys. A, 117 (3), 2014, 1359-1365);



- prin pulverizare catodică în sistem magnetron (RF sputtering) sau evaporare cu fascicul de electroni (ebeam) sau evaporare termică in vid (TVE) sau depunere cu laser pulsant (PLD) se poate realiza un strat subtire de 2 nm de Ni ca strat de nucleatie-umectare-adeziune-netezire pe întreaga suprafață plană a substratului. Acest strat de Ni duce la obtinerea unei suprafețe netede pentru stratul de Ag depus in urmatoarea faza. Proprietățile plasmonice 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 aceleasi metode se depune stratul de 35÷50 nm de Ag. Pe stratul de Ag se depune un fotorezist sensibil la radiatie UV si o masca cu negativul tiparului metalic pe care il dorim inscriptionat pe stratul de oxid. Dupa iradierea UV, tiparul final se obtine prin corodarea chimica a fotorezistului nesolidificat si a metalului aflat sub acesta. Pentru tipar cu H-uri din Au se utilizeaza Ti pentru stratul intermediar;

- doar pentru domeniul vizibil elementele metalice H au detalii nanometrice. In acest caz, pentru obtinerea lor pe suprafata plană a oxidului crescut termic este recomandata litografia nanoimprint (NIL) aplicată în conformitate cu descrierea din referinta (Torres C.M.S., „Nanoimprint lithography: an alternative nanofabrication approach”, *Materials Science and Engineering: C*, 23(1-2), 2003, 23-31).

Pentru domeniul IR dimensiunile elementelor metalice sunt mai mari, de ordinul $\lambda/10$. La aceasta scala micrometrica se poate aplica litografia optica conventionala, care a fost perfectionata pentru industria microelectronica pe Si sau Ge;

- stratul de polimer se depune prin spin coating sau pulverizare (sputtering). Polimerul poate fi inlocuit pentru domeniul MWIR de un strat de SiO_2 depus prin CVD;

- urmeaza 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 si fara corodare chimica (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 chimica induce deplasari Raman semnificative;

- se realizeaza contactele electrice ohmice pe stratul semiconductor si pe stratul de grafen;

- sistemul poate fi testat optic cu o camera de termoviziune pentru MWIR sau LWIR.

MODUL IN CARE INVENTIA POATE FI APLICATA INDUSTRIAL

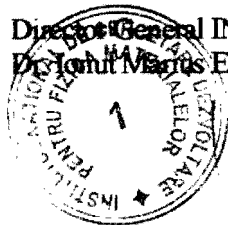
Aplicațiile posibile ale superlentilei electrooptice propuse sunt în domeniul cuploarelor optoelectronice cu plasmoni de suprafață și sisteme de imagistică/microscopie. Suprimarea completă a reflexiilor speculare prin conversia PW în SW este utilă în aplicații de invizibilitate (radar, IR sau în alt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

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

Revendicări

1. Structură de superlentilă electrooptică realizată cu ghid plasmonic micro- sau nanostructurat pentru imagistică cu rezoluție sub limita de difracție, caracterizată prin faptul că are o configurație construită pe un substrat semiconductor (2) și se bazează pe un ghid de undă controlat electric alcătuit dintr-un strat (1) de elemente metalice sub formă de H, straturi dielectrice intermediare (3), respectiv (5), și un strat de suprafață de grafen (4).
2. Structură de superlentilă electrooptică realizată cu ghid plasmonic micro- sau nanostructurat pentru imagistică cu rezoluție sub limita de difracție conform revendicării 1, caracterizată prin faptul că permite conversia optimă, fără aberații optice, pe un domeniu specific de lungimi de undă și unghiuri de incidență a undelor de propagare în unde de suprafață sau conversia în sens revers, în cazul inversării ordinii elementelor metalice în structura ghidului de undă.
3. Structură de superlentilă electrooptică realizată cu ghid plasmonic micro- sau nanostructurat pentru imagistică cu rezoluție sub limita de difracție conform revendicării 1, caracterizată prin faptul că realizează confinarea stransă a undelor de suprafață prin utilizarea grafenului și aplicarea unei tensiuni electrice pe structură, obținându-se astfel modularea reflectivității în IR a suprafeței superlentilei.
4. Structură de superlentilă electrooptică realizată cu ghid plasmonic micro- sau nanostructurat pentru imagistică cu rezoluție sub limita de difracție conform revendicării 1, caracterizată prin faptul că prin tensiunea electrică aplicată induce variația indicelui de refracție al substratului semiconductor pe o gamă largă, făcând posibilă optimizarea contrastului imaginilor obținute în câmp îndepărtat.
5. Structură de superlentilă electrooptică realizată cu ghid plasmonic micro- sau nanostructurat pentru imagistică cu rezoluție sub limita de difracție conform revendicării 1, caracterizată prin faptul că permite amplificarea undelor de suprafață, acestea adăugând imaginii finale detalii mai fine decât lungimea de undă a radiației utilizate.
6. Structură de superlentilă electrooptică realizată cu ghid plasmonic micro- sau nanostructurat pentru imagistică cu rezoluție sub limita de difracție conform revendicării 1, caracterizată prin faptul că îmbunătățește câmpul electromagnetic local și convertind undele de suprafață în unde de propagare sporește amplitudinea semnalului detectat în câmp îndepărtat.

Director General INCDFM
Dr. Ionuț Marin Enculescu



JK

Dr. Costel Cotirlan-Simioniuc

Costel Cotirlan-Simioniuc

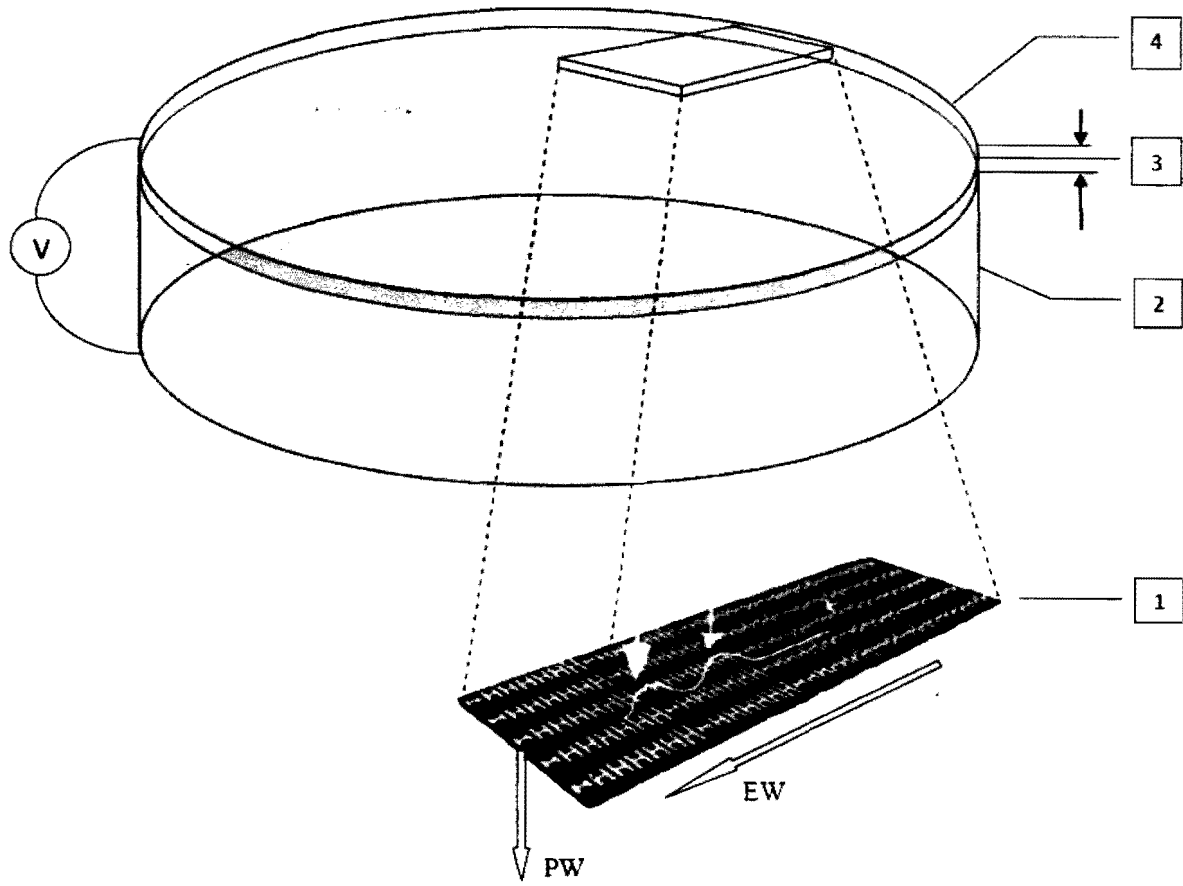
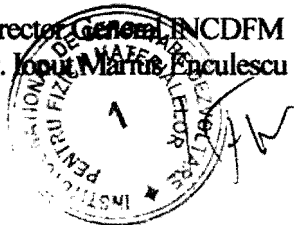


Fig.1

Director General INCDFM
Dr. Ioan Marius Enculescu



Dr. Costel Cotirlan-Simioniu

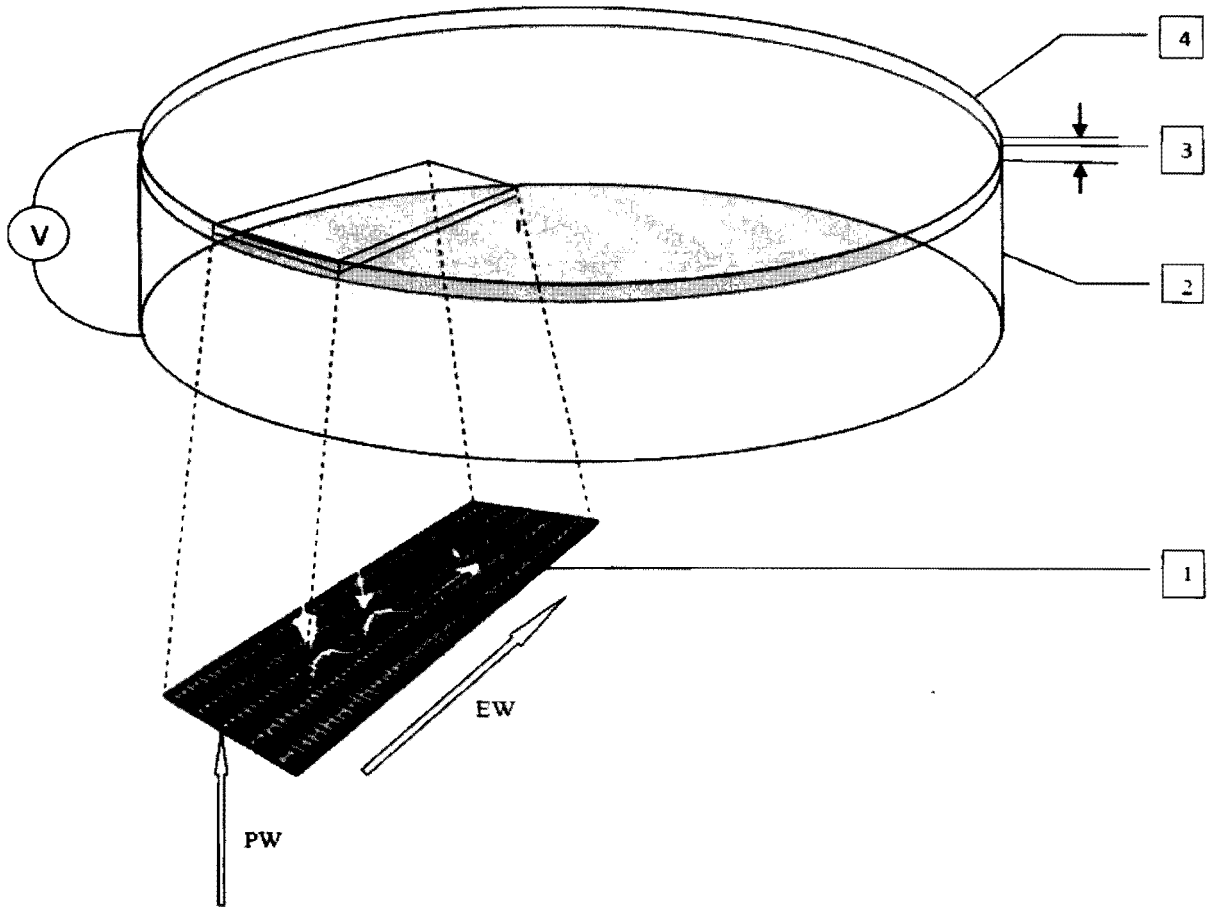


Fig.2

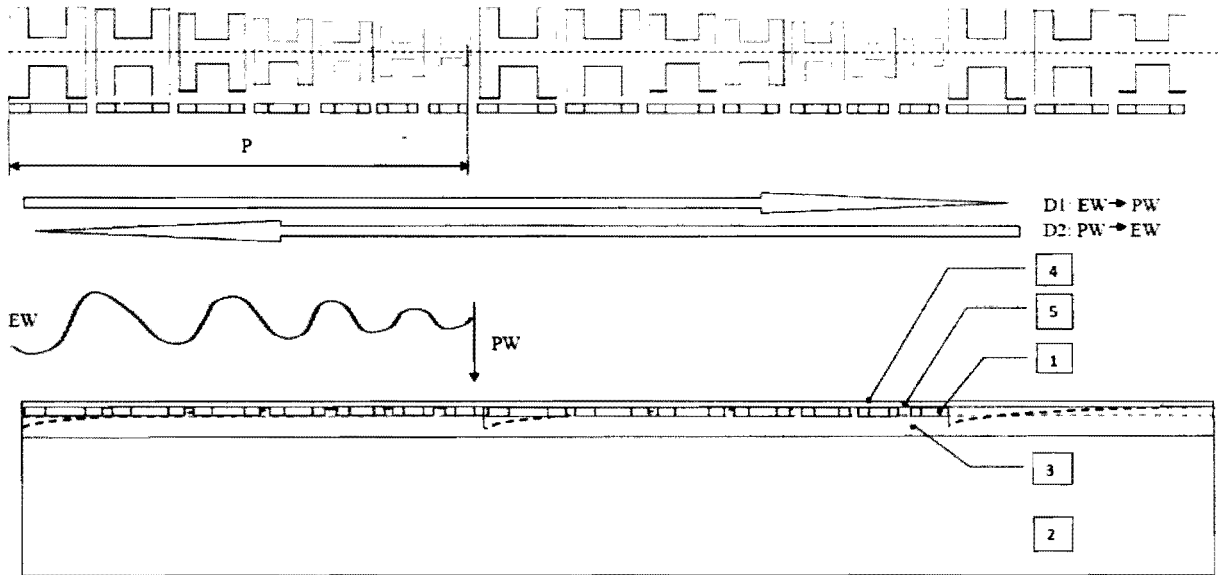
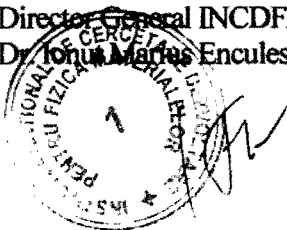


Fig.3

Director General INCDFM
Dr. Ionuț Marius Enculescu



Dr. Costel Cotirlan-Simioniuc

