

Raport științific

privind implementarea proiectului PN-III-P4-ID-PCE-2016-0122, cu titlul *Nanostructuri pentru calcul cuantic și plasmonic* în ianuarie – decembrie 2019

În cadrul proiectului, etapa aferentă anului 2019 s-a axat pe realizarea activităților

Act. 3.1 – Investigarea unor configurații noi de calcul cuantic folosind stări de vale; această activitate este continuarea Act. 2.4 din 2018

Act. 3.2 – Dezvoltarea unui algoritm de calcul pentru investigarea propagării undelor electromagnetice în ghiduri de undă plasmonice de tip fantă curbate și cu lățimi neuniforme

Act. 3.3 – Dezvoltarea și optimizarea unor circuite logice plasmonice în ghiduri de undă de tip fantă

Act. 3.4 – Investigarea unor circuite logice plasmonice controlate de poartă în ghiduri de undă de tip fantă

Act. 3.5 – Determinarea parametrilor optimi pentru fabricarea unor fante înguste prin nanolitografie cu oxidare localizată și/sau litografie cu fascicul de electroni

Act. 3.6 – Fabricarea și caracterizarea porților logice bazate pe ghiduri de undă de tip fantă

Rezultatele obținute în cadrul acestor activități sunt prezentate pe scurt în continuare.

Act. 3.1: Dezvoltarea unei corespondențe între stările cuantice de spini și de vale în vederea implementării unor configurații noi de calcul cuantic folosind stări de vale

Pe lângă spin, gradul de libertate de vale, deși mult mai puțin studiat, promite aplicații în implementarea de porți logice cu consum redus de energie. Avantajul îl constituie faptul că astfel de porți logice ar beneficia de un timp de coerență mai mare, deoarece gradul de libertate de vale este mai robust decât cel de spin la împrăștiere/ciocniri datorită separării mari în spațiul reciproc a celor două stări neechivalente. În cadrul acestui studiu a fost realizată o comparație/corespondență între gradele de libertate de spin și vale în vederea propunerii unor porți logice bazate pe stări de vale pornind de la configurații de circuite logice care folosesc qubiți de spin. Scopul investigației a fost acela de a adapta pentru stările de vale configurații de calcul cuantic dezvoltat în cadrul acestui proiect, în special în Act. 2.2, pentru stările cuantice de spin.

Pentru a fi relevantă pentru scopul declarat, corespondența stări de spin-stări de vale nu poate fi limitată la o identificare formală a celor două stări cu spin sus sau jos cu cele două stări de vale neechivalente, K și K' , cu atât mai mult cu cât controlul stărilor de vale este dependent de material, spre deosebire de stările de spin care pot fi manipulate cu ajutorul unui câmp magnetic, indiferent de material. Ca atare, studiul privind modul de excitare/detecție a stărilor de vale precum și a mecanismelor de manipulare a acestui grad de libertate trebuie făcut separat pe cele două tipuri de materiale în care gradul de libertate de vale a fost evidențiat teoretic și/sau experimental: grafena (incluzând grafene dublu strat – bilayer) și dicalcogenidele. În cadrul acestui studiu am luat în considerare doar acele caracteristici care permit

implementarea unor porți logice bazate pe interferența/propagarea stărilor de vale în structuri balistice, și nu pe stări de vale localizate (în gropi de potențial, de exemplu, ca în [1]).

Marea majoritate a studiilor efectuate până în prezent asupra stărilor de vale s-au concentrat pe excitarea diferențiată a acestora, pentru a induce o polarizare de vale și pentru a reproduce efecte de tip Zeeman [2] sau Hall [3] corespunzătoare stărilor de spin.

Polarizarea de vale se poate realiza în principal prin aplicarea stresului mecanic uniaxial într-un strat de grafenă cu masă (crescut pe substrat de SiC sau hBN [4]), prin utilizarea unor electrozi feromagnetici în cazul dicalcogenidelor [5], sau prin excitare optică cu câmp electromagnetic polarizat circular [6] sau eliptic [7]. Deși în cazul excitării optice polarizarea de vale poate fi controlată, ajungând la valori de peste 90%, o astfel de metodă este dificil de aplicat în cazul unor circuite integrate.

În ceea ce privește dicalcogenidele, sau TMD (transition metal dichalcogenides), acestea sunt materiale de tip MX_2 , unde M este un metal de tranziție (Mo, W, etc.) și X un calcogenid (S, Se sau Te). O caracteristică a acestor materiale, în special a straturilor de grosime atomică a acestora, este că stările de spin și vale sunt cuplate datorită ruperii simetriei la inversie cauzate de însăși structura lor cristalină și cuplajului spin-orbită mare. Acest lucru, împreună cu un drum liber mediu/mobilitate semnificativ mai redusă decât în grafenă, limitează folosirea TMD pentru implementarea qubiților de spin.

Pe de altă parte, în grafene cu bandă interzisă de lățime Δ în care purtătorii de sarcină cu impuls $\mathbf{p}$ au masă efectivă m , există mecanismul de interacțiune vale-orbită, descris de Hamiltonianul

$$H_{vo} = \tau \frac{\hbar}{4m\Delta} (\mathbf{p} \times \nabla V) \cdot \hat{\mathbf{z}} \quad (1)$$

unde τ este un index de vale care ia valori -1 pentru K și +1 pentru K' și V este energia potențială. Acest Hamiltonian este similar celui din cazul cuplajului spin-orbită asociat efectului Rashba,

$$H_{so} = \frac{\alpha}{\hbar} (\mathbf{p} \times \mathbf{E} / |\mathbf{E}|) \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad (2)$$

unde $\mathbf{E}$ este câmpul electric și α este coeficientul Rashba. Deși interacția vale-orbită are un potențial mai mare de tunabilitate în grafena dublu-strat în comparație cu grafena monostrat, aplicarea unor tensiuni de poartă în primul caz permițând controlul independent al nivelului Fermi și al benzii interzise [8], chiar și în cazul grafenei monostrat acest mecanism de interacție induce polarizare de vale prin aplicarea unui câmp electric cu ajutorul unei porți laterale [9]. În plus, în cazul grafenei monostrat, cele două stări de vale sunt mixate în proporție de 50:50 într-un strat îngust de tip armchair, starea rezultată putând fi folosită ca stare de plecare în algoritmi cuantici, fiind echivalentă cu cea obținută prin aplicare unei porți Hadamard.

Sumarizând, am ajuns la următoarele concluzii:

- ca material pentru porți logice cu stări de vale, cel mai potrivit din punctul de vedere al manipulării stărilor de vale și al drumului liber mediu mare este grafena dublu-strat, existând posibilitatea folosirii unei fâșii înguste de tip armchair din acest material ca stare de plecare pentru implementarea unor algoritmi cuantici.

- ca mecanism de manipulare a stărilor de vale, cel mai potrivit pentru implementarea porților logice prin interferență/propagare este interacția vale-orbită – mecanism specific grafenei, inclusiv a grafenei dublu strat, și care poate fi controlat prin aplicarea unor tensiuni de poartă.
- ca mecanism de excitație/detecție a stărilor de vale, cel mai potrivit pentru circuite logice integrate pe grafenă este folosirea fâșiilor înguste de tip armchair în conjuncție cu măsurători specifice ale stărilor Bell/separarea spațială a stărilor cu grad de libertate de vale diferit.
- ca și configurații ce pot implementa porți logice, cele mai promițătoare sunt similare cu cele propuse pentru porți logice cu spin în prezența efectului Rashba, prezentate în acest raport. Date fiind similitudinile între ecuațiile ce descriu interacțiunea vale-orbită și cuplajul spin-orbită (1) și (2), precum și studiul extensiv al configurațiilor ce permit implementarea porților logice cu ajutorul acestui ultim efect (vezi în special studiile raportate în A5), considerăm că porți logice pe baza interacțiunii spin-orbită se pot implementa în aceleași configurații ca cele studiate în A5, înlocuind 2DEG cu grafena dublu-strat și electrozii de poartă ce modulează coeficientul Rashba cu electrozi de poartă laterali ce modulează interacțiunea vale-orbită.

Act. 3.2: Modelarea propagării plasmonilor polaritoni de suprafață prin ghiduri de undă de tip fantă cu ajutorul analogiei cu liniile de transmisie în microunde

Această activitate a fost începută în 2018 și este motivată de faptul că circuitele integrate optice care folosesc plasmoni polaritoni de suprafață (pe scurt, plasmoni) au două avantaje majore: transmit informația cu viteza luminii și sunt foarte compacte. Din aceste motive studiul propagării undelor plasmonice prin diverse ghiduri de undă (nanofire metalice, ghiduri de tip V, ghiduri tip fantă, etc.) este de interes practice. În cadrul acestui proiect ne-am concentrate asupra propagării undelor plasmonice prin ghiduri de tip fantă datorită faptului că aceste ghiduri confinează cel mai bine radiația electromagnetică și pot fi fabricate relativ simplu. În urma consultării literaturii de specialitate am ajuns la concluzia că, spre deosebire de metode de rezolvare a ecuațiilor Maxwell consumatoare de timp și resurse, cum ar fi FDTD (finite difference time - domain), propagarea câmpului electromagnetic prin ghidurile de undă plasmonice de tip fantă poate fi descrisă relativ simplu, precis și rapid folosind analogia cu liniile de transmisie [10-12]. În plus, această metodă permite descrierea configurațiilor cu brațe/joncțiuni sub formă de cavități rezonante, cum sunt cele reprezentate în Fig. 1, atât timp cât lățimea ghidului și a cavității rezonante sunt mult mai mici decât lungimea de undă, condiție necesară ca un singur mod să se propage prin structură.

În metoda folosită un ghid de undă plasmonic, format dintr-o regiune dielectrică, cu permitivitate ϵ_d și lățime w plasată între regiuni semiinfinite metalice cu permitivitate ϵ_m , este echivalată cu o impedanță caracteristică $Z_0 = k_{SPP}(w)w/\omega\epsilon_d$, unde $k_{SPP}(w)$ este constanta de propagare a plasmonilor în structură, care depinde de lățimea ghidului.

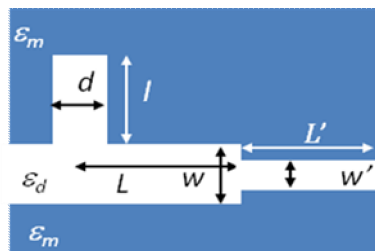


Fig. 1

Folosind analogia cu liniile de transmisie din microunde, o succesiune de regiuni cu lăţime neuniformă a dielectricului poate fi descrisă analitic prin intermediul matricii de transfer [11], fiecare secţiune de ghid de lungime L fiind caracterizată de o matrice de propagare

$$P(L) = \begin{pmatrix} \exp(-ik_{SPP}L) & 0 \\ 0 & \exp(ik_{SPP}L) \end{pmatrix} \quad (3)$$

fiecare braţ de lăţime d şi lungime l fiind descris prin matricea

$$S = \begin{pmatrix} 1 + Z_{st}/2Z_0 & -Z_{st}/2Z_0 \\ Z_{st}/2Z_0 & 1 - Z_{st}/2Z_0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

cu

$$Z_{st} = Z \frac{\sqrt{\varepsilon_d / \varepsilon_m} - i \tan \phi}{1 - i \sqrt{\varepsilon_d / \varepsilon_m} \tan \phi}$$

unde $Z = k_{SPP}(d)d / \omega \varepsilon_d$, $\phi = k_{SPP}(d)l$, şi $k_{SPP}(d)$ este constanta de propagare a plasmonului în ghidul de lăţime d (vezi Fig. 1).

În plus, trecerea dintr-un ghid de lăţime w într-unul de lăţime w' se poate trata, în mod asemănător, cu o matrice care descrie această joncţiune:

$$C = \begin{pmatrix} C_+ & C_- \\ C_- & C_+ \end{pmatrix} \quad C^\pm = (\sqrt{Z_0/Z'_0} \pm \sqrt{Z'_0/Z_0})/2 \quad (5)$$

unde Z_0 şi Z'_0 sunt impedanţele caracteristice ale ghidurilor de undă de lăţimi w şi w' .

O aplicaţie a acestei metode de modelare a propagării plasmonilor polaritoni de suprafaţă prin ghiduri de undă de tip fantă este modificarea formei unui puls de lumină. Modificarea formei pulsului transmis sau reflectat are aplicaţii în compresia pulsurilor de lumină, comunicaţii la viteze mari, microscopie, spectroscopie, etc. [13-15].

Principiul care stă la baza modificării formei pulsului este faptul că $t(\omega)$, coeficientul de transmisie complex, este diferit pentru diferitele componente spectrale

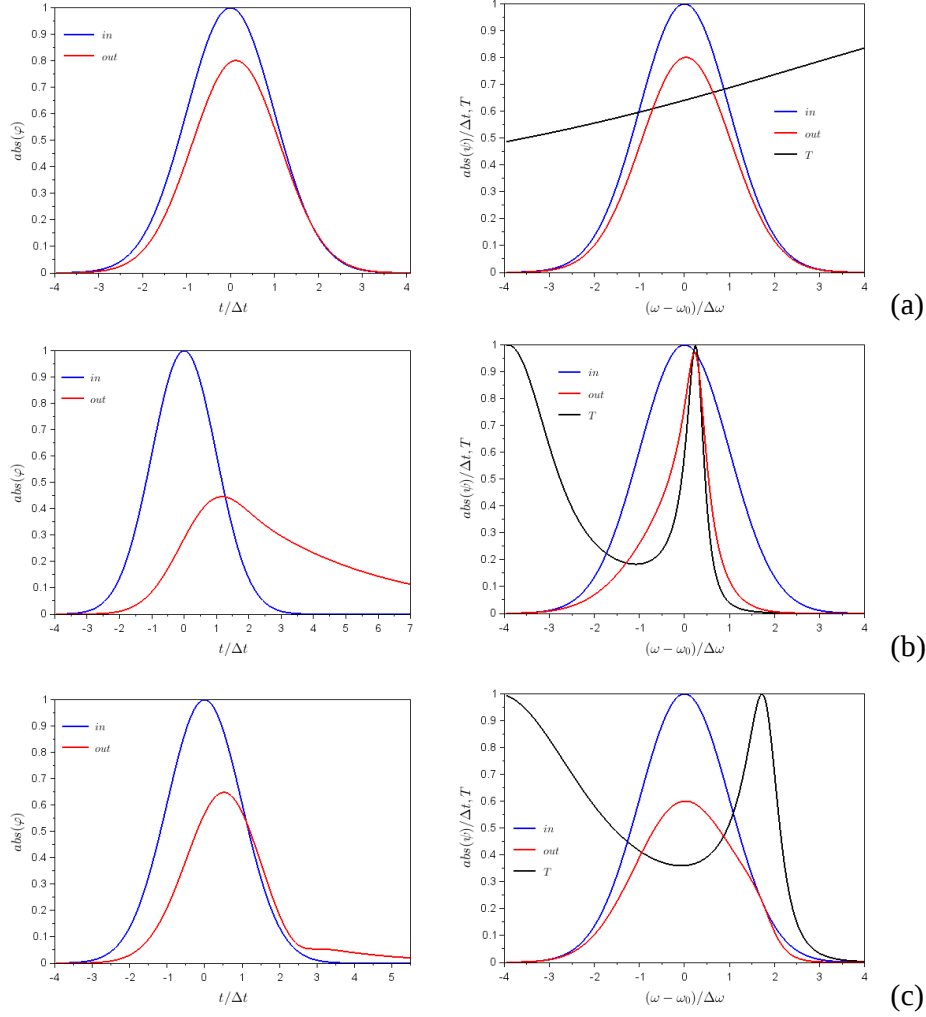
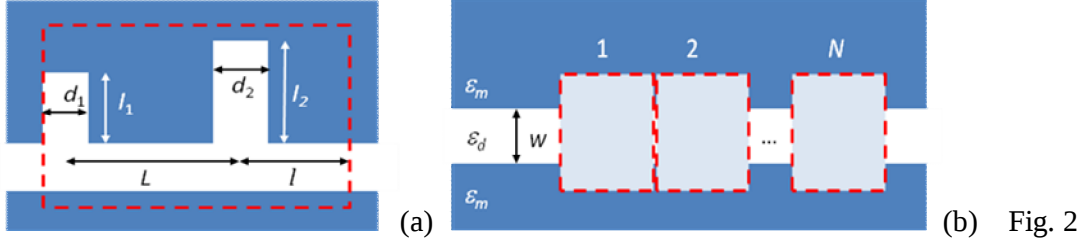
$$\psi_{in}(\omega) = (2\pi)^{-1/2} \int \varphi_{in}(t) \exp[i(\omega - \omega_0)t] dt, \quad (6)$$

ale unui puls incident $\varphi_{in}(t)$, cu frecvenţa centrală ω_0 .

Astfel, la ieşirea din sistemul optic (de exemplu, un ghid de undă tip fantă cu două braţe, ca cel din Fig. 2(a), sau o structură periodică din N elemente de tipul celui din Fig. 2(a) – vezi Fig. 2(b)), transformata Fourier a pulsului este $\psi_{out}(\omega) = t(\omega)\psi_{in}(\omega)$, iar pulsul devine

$$\varphi_{out}(\omega) = (2\pi)^{-1/2} \int t(\omega)\psi_{in}(\psi) \exp[-i(\omega - \omega_0)t] d\omega \quad (7)$$

Coeficientul de transmisie t este dat de inversul elementului (1,1) al matricii totale care, în cazul structurii din Fig. 2(b) este $[S_1P(L)S_2P(\Delta L)]^N$.



O modificare semnificativă a formei pulsului presupune un circuit optic cât mai dispersiv și un puls incident cât mai scurt; în prezent pulsuri de până la 50 fs pot fi generate cu surse laser comerciale. Ca exemplu, considerăm un ghid de undă de tip fantă, argint-aer-argint, ca cel din Fig. 2, cu $w = 70$ nm, pe care este incident un puls Gaussian $\varphi_{in}(t) = \exp(-t^2/2\Delta t^2)$ cu o frecvență centrală ω_0 corespunzând unei lungimi de undă de 800 nm.

Figurile 3(a)-(c) ilustrează, în coloana din stânga, valorile absolute ale pulsurilor incident și transmise prin circuitul din Fig. 2(b) cu valori diferite ale diversilor parametri, notate în legendă cu *in* și *out*, iar în coloana din dreapta valorile absolute ale transformatei Fourier ale

acestor pulsuri, ca și valoarea transmitanței $T = |t|^2$. Lățimea pulsului este notată cu Δt iar $\Delta\omega = 1/\Delta t$. Astfel, după cum rezultă din Fig. 3(a), atât timp cât transmitanța are o variație lentă cu frecvența pe domeniul spectral de interes, în care $\psi_{in}(\omega)$ ia valori semnificative, forma pulsului la ieșire este asemănătoare cu cea a pulsului incident. Pe de altă parte, forma pulsului se modifică dacă transmitanța are un maxim ascuțit pe un interval îngust de valori spectrale, așa cum se observă din Fig. 3(b). În acest caz pulsul de ieșire are un front față liniar și un front spate concav. Ultimul exemplu, în Fig. 3(c), ilustrează compresia pulsului incident, compresie posibilă atunci când transformata Fourier la ieșire are un spectru mai larg decât cea de la intrare, situație ce poate fi realizată când T are maxime relativ înguste de ambele părți ale lui ω_0 . Rezultatele acestor cercetări au fost diseminate la o conferință internațională (C1) și au fost trimise spre publicare la o revistă ISI (vezi A1).

Act. 3.3: Circuite logice circulare, cu mai multe porturi de intrare/ieșire

După studierea literaturii de specialitate, am identificat o posibilă configurație de interes bazată pe ghiduri plasmonice circulare, cu mai multe porturi de intrare/ieșire, a căror fabricare este relativ simplă și care pot fi tratate cu metoda analogiilor cu liniile de transmisie prezentată anterior, metodă validă dacă există un singur mod de propagare în ghid. În plus, au fost alese configurații simetrice pentru a putea beneficia de analiza modurilor pare-impare în circuitele conținând linii de transmisie.

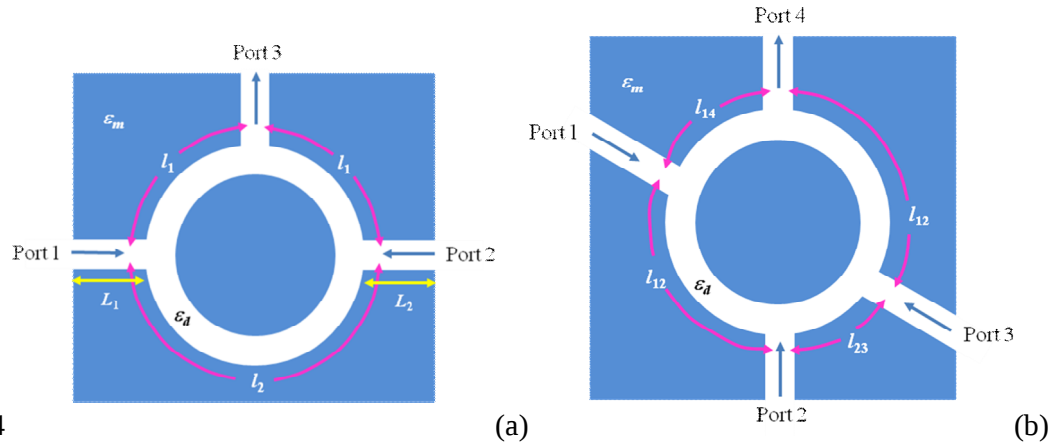


Fig. 4

(a)

(b)

Acest tip de configurație este compactă, versatilă, poate fi ușor combinată în cascadă pentru a implementa algoritmi de calcul complecși, stările logice de ieșire, codate în valoarea transmitanței într-un singur port, depinzând de geometrie și de faza câmpurilor electromagnetice incidente în celelalte porturi. În particular, au fost studiate configurații cu 3 (vezi Fig. 4(a)) și 4 porturi (ca în Fig. 4(b)), concluzionând că, odată cu creșterea numărului de porturi crește și complexitatea răspunsului. În toate situațiile lărgimea ghidului de undă $Ag/aer/Ag$ este $d = 50$ nm și lungimea de undă de excitare este $\lambda = 550$ nm.

În structuri simetrice, ca cele din Fig. 4, pentru care $l_2 = 2l_1 = 2l$ sau, respectiv, $l_{12}/2 = l_{14} = l_{23}/2 = l$, intensitatea la ieșire $T = |t|^2$, cu amplitudinea t , este periodică în l indiferent de valorile logice și faza relativă a semnalelor de intrare. Acest lucru se poate observa din Fig. 5(a), în care amplitudinile complexe ale semnalelor de intrare în configurația cu 4 porturi, notate a_1 , $a_2 \exp \phi_2$, și $a_3 \exp \phi_3$ (fazele semnalelor din porturile 2 și 3 sunt definite în funcție de faza semnalului din portul 1) codează valorile logice 0 dacă amplitudinile a_i au valoarea zero și valoarea logică 1 dacă acestea sunt diferite de 0. În cazul

Fig. 5(a), $\phi_2 = \phi_3 = \pi/3$, iar stările logice 1 corespund la $a_1 = 1$, $a_2 = 0.9$ și $a_3 = 1.2$ (vezi legenda).

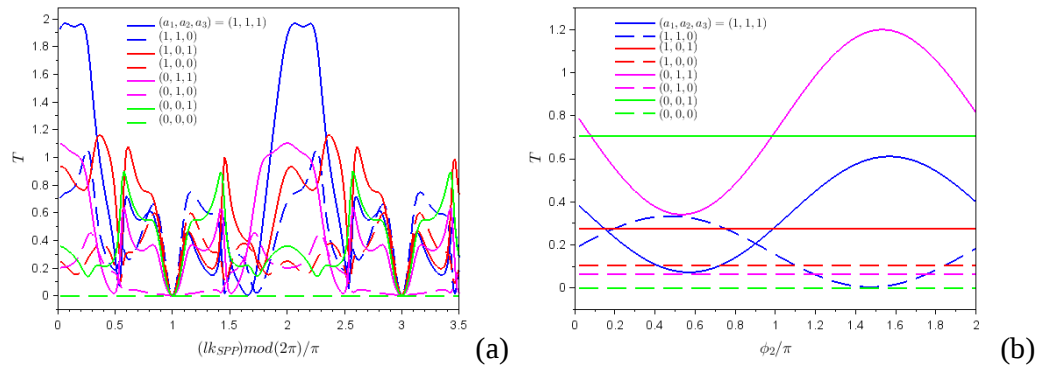


Fig. 5

Deși răspunsul este complex, pentru anumite valori ale parametrilor se pot implementa porți logice. Pentru exemplificare, în Fig. 5(b) am ilustrat răspunsul/valoarea transmitanței T pentru $(lk_{SPP}) \bmod(2\pi) = 0.55\pi$, $\phi_3 = \pi/3$ în cazul circuitului cu 4 porturi, pentru stări de intrare (și reprezentări grafice corespunzătoare) definite ca în Fig. 5(a). Acest răspuns optic este compatibil cu tabela de adevăr a porții CCNOT (care inversează starea logică a unui bit țintă dacă valoarea logică a doi biți de control este 1) dacă bitul țintă este ultimul (asociat intrării portului 3) iar biții de control sunt primii doi (semnalele la porturile 1 și 2), în condițiile în care ϕ_2 se află în intervalul cuprins între 0.3π și 0.8π , în particular pentru $\phi_2 = \pi/2$, și valoarea logică de ieșire 1 corespunde la $T > 0.2$ și este 0 în caz contrar. Într-adevăr, în această situație valoarea logică a bitului țintă se schimbă dacă ambii biți de control au valoarea 1.

Rezultatele obținute în modelarea circuitelor formate din ghiduri de undă de tip fantă cu mai multe porturi au fost publicate într-o revistă ISI (vezi **A2**), și au fost diseminate la o conferință internațională [16].

Act. 3.4: Circuite logice plasmonice reconfigurabile

Configurația propusă constă dintr-un ghid plasmonic de tip fantă, de lățime W , format dintr-un mediu dielectric (aer) cu permitivitate ϵ_a , înconjurat de un metal cu (de exemplu, argint), cu permitivitate ϵ_{Ag} . În acest ghid presupunem că există mai multe regiuni, cu lungimi L_i , ($i = 1, 2$ și 3 în Fig. 6(a)), care au permitivități ϵ_{gr} ce pot fi controlate prin aplicarea unor tensiuni.

După cum se sugerează în Fig. 6(b), aceste regiuni pot fi acoperite cu un strat de grafenă, a cărei permitivitate poate fi modificată de o tensiune de poartă aplicată chiar pe metal [17]. Notăm cu $\epsilon_{gr} = \epsilon_0$ și $\epsilon_{gr} = \epsilon_1$ valorile permitivității corespunzătoare stărilor logice 0 și, respectiv, 1, valorile tensiunii de poartă corespunzătoare fiind notate V_0 și V_1 .

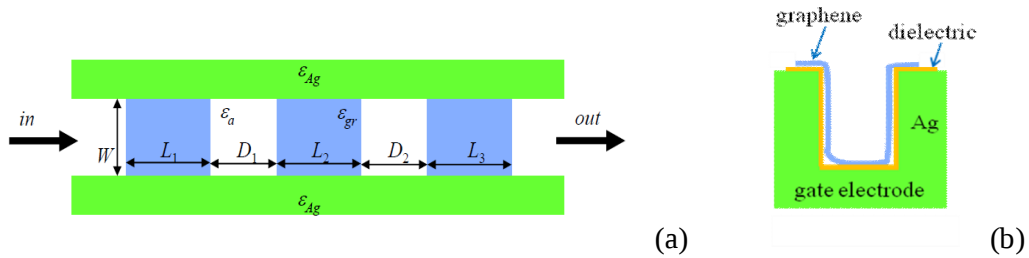


Fig. 6

Această configurație poate implementa porți logice plasmonice cu un, doi sau trei biți prin codarea stărilor logice în valorile permitivității tunabile/tensiunilor aplicate pe regiunile acoperite, minimizând astfel probleme legate de excitarea plasmonilor și transmisia acestora de-a lungul circuitului. Valorile coeficientului de transmisie/transmitanței T permit citirea stării logice la ieșire. Funcționarea acestui circuit, bazat pe modificarea rezultatului interferenței luminii prin modularea permitivității regiunilor acoperite, poate fi modelată cu ajutorul analogiei cu liniile de transmisie dacă dimensiunile și permitivitățile sunt alese astfel încât un singur mod se propagă în ghidul de undă. Pentru o lungime de undă de operare de $1.55 \mu\text{m}$, această restricție impune ca $W = 40 \text{ nm}$.

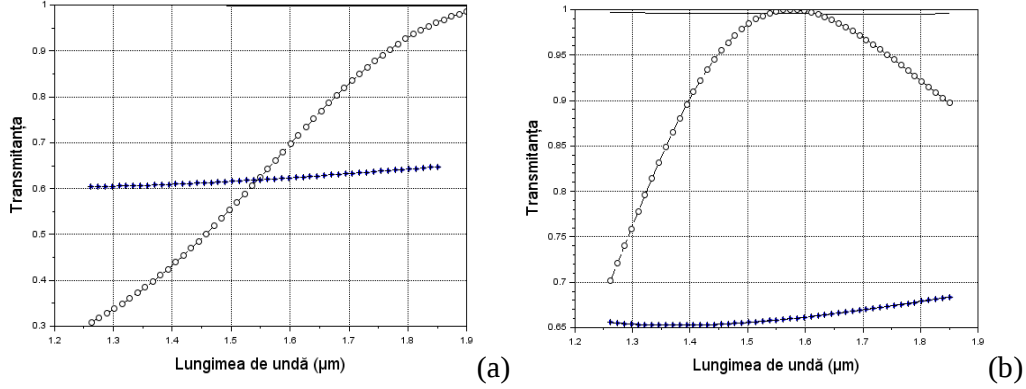


Fig. 7

Pentru a ilustra funcționarea acestui circuit logic, considerăm ghidul de undă de tip fantă acoperit cu două regiuni de grafenă de lungimi L_1 și L_2 , separate de distanța D_1 , ce pot fi controlate independent prin tensiuni de poartă, se pot implementa operații logice care implică doi biți. În exemplul din Fig. 7(a), în care $L_1 = L_2 = D_1 = 100 \text{ nm}$, $\varepsilon_0 = 1.2$ și $\varepsilon_1 = 4.75$, s-au reprezentat dependențele spectrale ale transmitanței pentru stările de intrare 00 (linie continuă), 01 (linie întreruptă), 10 (linie punctată) și 11 (linie punctată și întreruptă); notația pentru stările de intrare, XY ($X = 0,1$, $Y = 0,1$), arată că tensiunea aplicată pe prima regiune de grafenă este V_X iar pe a doua regiune este V_Y . Din Fig. 7(a), în care curbele pentru 01 și 10 se suprapun, iar curba pentru 00 are T aproape 1 pe întregul interval spectral, se observă că la $1.55 \mu\text{m}$ transmitanța este fie aproape 1 (mare) sau 0.65 (mică). Dacă valori mari ale T se asociază stării logice 0 și valorile mici stării logice 1, configurația propusă implementează poarta OR, în timp ce o asociere inversă a stărilor logice de intrare (1 pentru permitivitate ε_0 /tensiune V_0 și 0 pentru ε_1/V_1) și a celor de ieșire (1 pentru T mare, 0 pentru T mici) permite implementarea cu același ghid de undă a porții logice AND.

Aceeași configurație cu două regiuni acoperite cu grafenă, dar pentru care $L_1 = L_2 = 100 \text{ nm}$, $D_1 = 45 \text{ nm}$, $\varepsilon_0 = 1.2$ și $\varepsilon_1 = 4.5$ permite implementarea porții reversibile CNOT la $1.55 \mu\text{m}$ dacă stările de intrare 0 și 1 corespund la V_0 și, respectiv, V_1 , după cum se observă din Fig. 7(b) care reprezintă dependența spectrală a T pentru stările de intrare 00, 01, 10 și 11 cu același tip de linii ca și în exemplul de mai sus; din nou, curbele pentru 01 și 10 se suprapun. În acest caz însă starea logică de ieșire 0 este identificată cu o valoare mare a T și starea 1 cu o valoare mică a T , bitul asupra căruia acționează poarta fiind codat de prima regiune acoperită cu grafenă, iar bitul de control de cea de-a doua regiune.

Rezultatele obținute referitor la simularea acestei configurații plasmonice reconfigurabile cu una, două sau trei regiuni acoperite a fost publicată într-o revistă ISI [18].

Act. 3.5: Optimizarea parametrilor de fabricație ai unor fante înguste prin nanolitografie cu oxidare localizată și/sau litografie cu fascicul de electroni

Metoda de modelare a propagării undelor plasmonice prin ghiduri de undă de tip fantă cu ajutorul analogiei cu liniile de transmisie în microunde permite determinarea dimensiunii ghidului pentru implementarea unei anumite funcționalități. Totuși, această metodă nu ia în considerare adâncimea ghidului de undă, fiind în concordanță cu experimentul doar pentru ghiduri de undă suficient de adânci. De aceea, activitatea noastră s-a axat pe două direcții: identificarea metodei potrivite pentru fabricarea ghidului de undă (nanolitografie cu oxidare localizată sau litografie cu fascicul de electroni) și optimizarea rețelei de difracție care să permit excitarea plasmonilor polaritoni de suprafață cu eficiență cât mai mare.

Metode de fabricare a ghidului de undă plasmonic de tip fantă

Cele două metode de fabricare a ghidului plasmonic investigate în acest proiect sunt litografia secvențială/nanoindentarea (scratching/zgâriere), în care se produc șanțuri la suprafața materialului (vezi partea stângă a Fig. 8), și litografia prin oxidare anodică localizată, care produce șanțuri acoperite cu oxidul materialului (vezi partea dreapta a Fig. 8). Ambele metode folosesc AFM-ul dar utilizează vârfuluri cu proprietăți specifice.

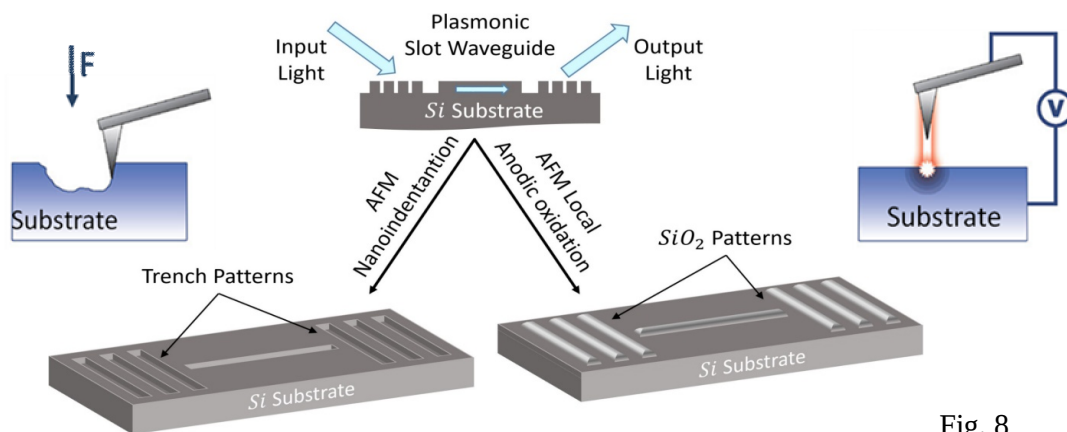


Fig. 8

După cum se observă din Fig. 9(a), încercări preliminare de indentare a unui film subțire de Au depus pe un substrat de Si duce la formarea unui șanț/ghid de undă plasmonic cu o înălțime de până la zeci de micrometri, pe când oxidarea localizată, deși preferabilă experimental, produce în silicu pur șanțuri acoperite cu un strat de oxid cu înălțimea mai mică de 4 nm (vezi Fig. 9(b)). S-a constatat că înălțimea stratului de oxid și deci a șanțului săpat crește cu tensiunea de anodizare (de 10 V în Fig. 9(b)). Toate testele au fost făcute la umiditatea ambiantă de ~33%. Într-adevăr, în cazul structurilor fabricate prin oxidare localizată, tensiunea de anodizare influențează semnificativ adâncimea șanțurilor, după cum se poate observa și din Fig. 10(a), în care tensiunea de anodizare folosită a fost de 10 V, 8 V și 6 V (de sus în jos), în timp ce viteza de scriere are o influență redusă. Acest lucru se observă din Fig. 10(b) în care structurile au fost fabricate la o viteză de scriere de 1000 nm/s, 800 nm/s, 600 nm/s și 400 nm/s (de la stânga la dreapta) și la tensiuni de anodizare de 10 V, 8 V și 6 V (pe coloane, de sus în jos)

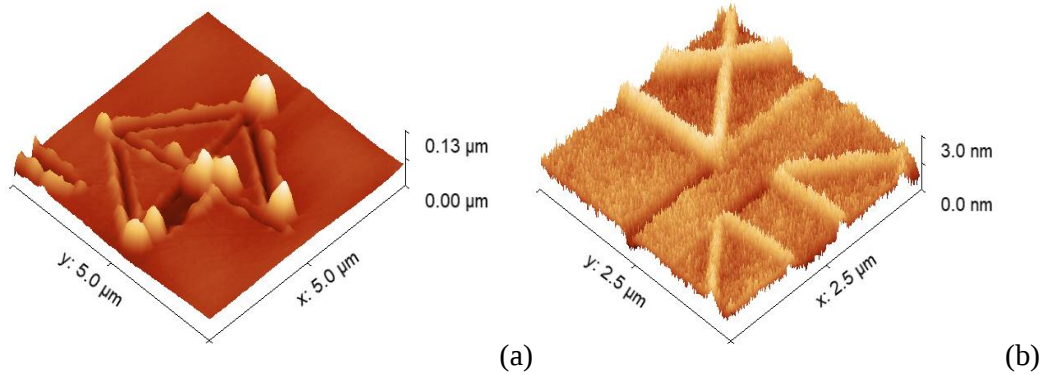


Fig. 9

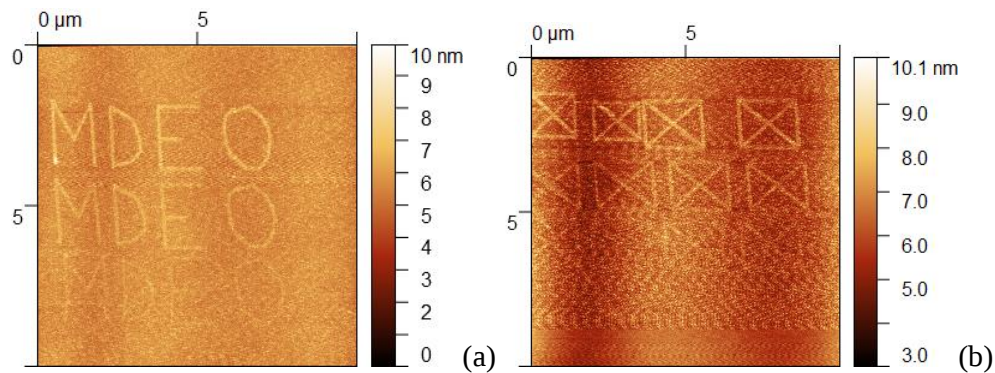


Fig. 10

După etapa de optimizare a metodelor de nanolitografie, au fost fabricate structuri de ghiduri de undă care încorporează rețele de difracție la ambele capete, pentru excitarea plasmonilor și, respectiv, extragerea semnalului din circuitul optic. Dintre diversele metode de excitare ale plasmonilor [19], rețelele de difracție sunt cele mai potrivite pentru circuite integrate optice [20-22]. În Fig. 11 este reprezentat un astfel de ghid de undă fabricat prin nanoindentare într-un film subțire de Au depus prin pulverizare magnetron pe substrat de Si. În modul contact, pentru o forță de apăsare de 30 μN au fost fabricate ghiduri și linii făcând parte din rețeaua de difracție de 3.5 μm lungime și 80 nm lățime, periodicitatea rețelei fiind de 550 nm. Adâncimea medie a acestor indentații este însă destul de mică, de 7 nm, ceea ce indică faptul că este necesară aplicarea unei forțe mai mari în procesul de scriere în vederea obținerii unor ghiduri de undă performante.

Pe de altă parte, prin oxidarea localizată a unui strat de Si s-au obținut linii de oxid cu lungime de 3 μm , lățime de 150 nm și înălțime medie de 3 nm, perioada rețelei de difracție necesară cuplării și decuplării luminii în ghid fiind de 380 nm, după cum se poate observa din Fig. 12. Siliciul puternic dopat poate fi folosit în circuite plasmonice ca și metal. Înălțimea liniei de oxid crește cu umiditatea relativă, valoarea indicată anterior fiind obținută pentru o umiditate de 35%, și depinde de materialul oxidat. În cazul unui film de Al, prin oxidare anodică se obține un film de Al_2O_3 , neporos și cu rugozitate foarte mică ($\text{RMS} = 1.6 \text{ nm}$), ideal pentru fabricarea de ghiduri și circuite plasmonice. O imagine SEM a filmului de Al și a filmului oxidat este prezentată în Fig. 13.

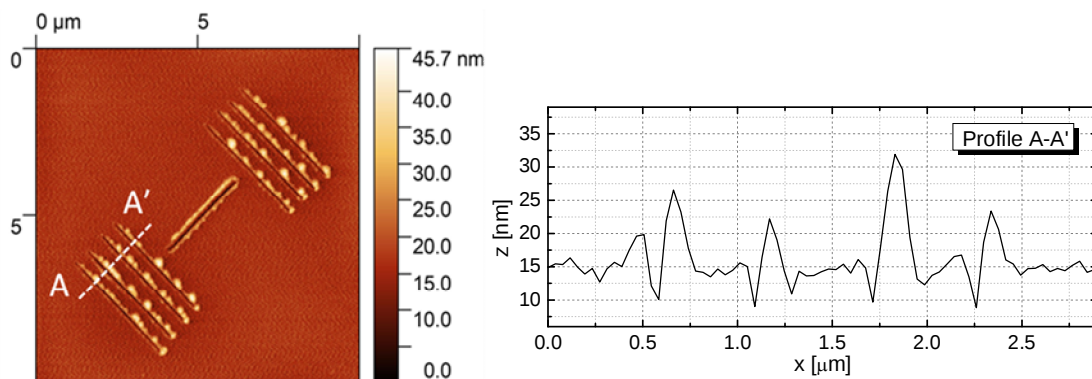


Fig. 11

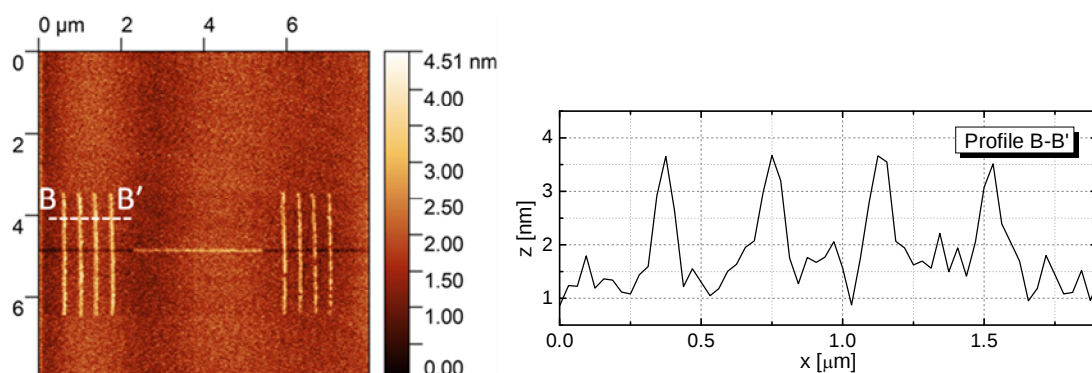


Fig. 12

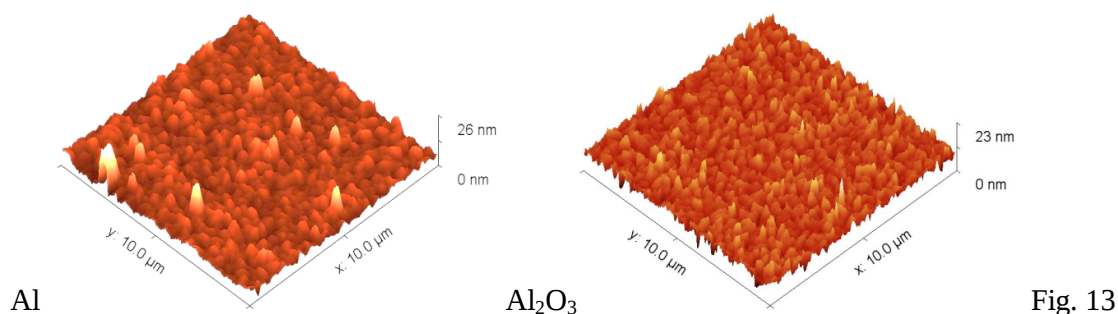


Fig. 13

Aceste rezultate preliminare indică faptul că metoda de fabricare prin nanoindentare este mai potrivită pentru producerea de circuite plasmonice cu ghiduri de undă de tip fantă pentru că adâncimea șanțurilor produse este mai mare. Acesta este un parametru esențial pentru excitarea eficientă a plasmonilor.

Rezultatele legate de fabricarea unor ghiduri de undă de tip fantă au fost diseminate la trei conferințe internaționale (vezi [23-24], C2).

Optimizarea dimensiunilor și profilului rețelei de difracție

Metoda folosită pentru modelarea circuitelor de undă plasmonice nu are în vedere modul de excitare al plasmonilor polaritoni de suprafață, respectiv dimensiunile și profilul rețelei de difracție utilizate în acest scop.

Pentru a găsi periodicitatea rețelei Λ se folosește relația cunoscută

$$k_{\text{SPP}} = (\omega/c)\sqrt{\varepsilon_d} \sin \theta_0 \pm m2\pi/\Lambda \quad (8)$$

unde ω și θ_0 sunt frecvența și respectiv unghiul de incidență al radiației incidente iar m este un întreg. Pentru o mai bună discriminare a radiației ce se propagă prin ghidul de undă plasmonic, am ales o configurație de excitare “înapoi”/backexcitation, reprezentată în Fig. 14, în care direcțiile de propagare ale undei incidente și a celei plasmonice sunt ilustrate cu săgeți roșii. Constanta de propagare a undelor plasmonice k_{SPP} în (8) este diferită în cazul structurilor nanoindentate în care interfața este metal-aer față de cele fabricate prin oxidare localizată în care interfața este metal-oxid-aer în regiunea în care sunt scrise liniile.

De exemplu, pentru o radiație incidentă cu lungimea de undă de 640 nm și un ghid de undă de tip fantă în aur fabricat prin nanoindentare, condiția de excitare a undelor plasmonice corespunde (pentru $m = 1$) la $\Lambda = 400$ nm și un unghi de incidență de 39° . O astfel de rețea de difracție constând din 4 perioade, are o eficiența de cuplaj estimată de doar 11% pentru o adâncime a șanțurilor de 30 nm. Calcule numerice au arătat că eficiența de cuplaj poate crește până la 20% pentru adâncimi optime ale șanțurilor de 46 nm.

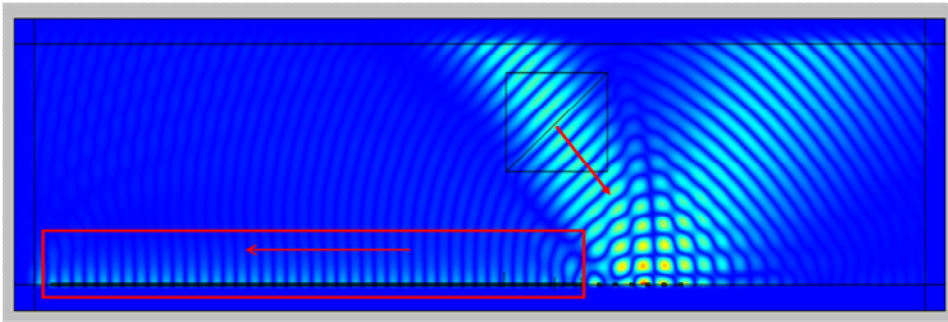


Fig. 14

Eficiența excitării undelor plasmonice fiind mică, următorul pas este optimizarea profilului rețelei de difracție. În cazul particular al ghidurilor de undă de tip fantă în argint, am investigat optimizarea excitării plasmonilor în cele două cazuri asociate celor două metode de fabricare: cel în care dielectricul este aer (metoda nanoindentării/scrtaching) și cel în care dielectricul este oxid de argint 20 nm și aer (metoda oxidării localizate). Pentru oxidul de argint s-a folosit indicele de refracție 2 atât pentru 640 nm cât și 980 nm, iar pentru Ag indicele de refracție considerat a fost de $0.0546 - 4.332i$ la 640 nm și $0.04 - 6.962i$ la 980 nm. S-a optat pentru optimizarea topologică pentru 640 și 980 nm pentru același unghi de incidență de 45° (pentru ambele lungimi de undă), reușindu-se obținerea unui profil adecvat pentru rețeaua de difracție. Optimizarea topologică este o unealtă computațională care optimizează distribuția materialului dint-un domeniu, pentru o funcție obiectiv dată, cu constrângeri geometrice sau fizice. Implementarea optimizării topologice în două dimensiuni este bazată pe metoda elementului finit.

În modelul computațional s-a considerat unda incidentă ca având profil Gaussian, cu un waist/dimensiune transversală minimă de 1 μm . Eficiența de cuplaj a fost estimată calculând raportul dintre fluxul de putere pe o linie monitor așezată la o distanță de 2 μm de rețeaua de difracție și cel incident.

Scopul optimizării a fost acela de a crește eficiența de cuplaj. Variabila de optimizat este densitatea relativă de material $\rho \in [0; 1]$, unde $\rho = 0$ corespunde argintului, iar $\rho = 1$, oxidului de argint. Principala dificultate în optimizarea topologică constă în alegerea corectă a funcției de interpolare a materialelor, care în cazul prezentat a fost

$$\varepsilon_{avg}(\rho) = [n_{Ag} + \rho(n_{ox} - n_{Ag}) - i(k_{Ag} + \rho(k_{ox} - k_{Ag}))]^2 \quad (9)$$

unde n și k reprezintă indicii de refracție, respectiv coeficienții de extincție ai celor două materiale (Ag și oxid), diferențiați prin indicii corespunzători. Prin variația continuă a acestor parametri între valorile argintului (în regiunile dintre liniile scrise ale rețelei de difracție) și cele ale oxidului de argint (prezent acolo unde sunt scrise liniile rețelei de difracție), distribuția materialului din domeniul de optimizare redă forma/profilul rețelei de difracție.

Rezultatele optimizării, și anume distribuția câmpului magnetic și forma rețelei de difracție pentru configurația argint-aer pentru lungimile de undă de 640 și respectiv 980 nm sunt reprezentate în Fig. 15(a) și 15(b) iar pentru configurația argint-oxid de argint 20 nm-aer la aceleași lungimi de undă în Fig. 15(c) și 15(d), unde culoarea neagră reprezintă argintul, iar albul oxid de argint/aer. În cazul Fig. 15(a)-(d) perioadele rețelei optimizate sunt: 370 nm, 590 nm, 340 nm și, respectiv, 580 nm. Structura optimizată are un element în plus în cazul din Fig. 15(c).

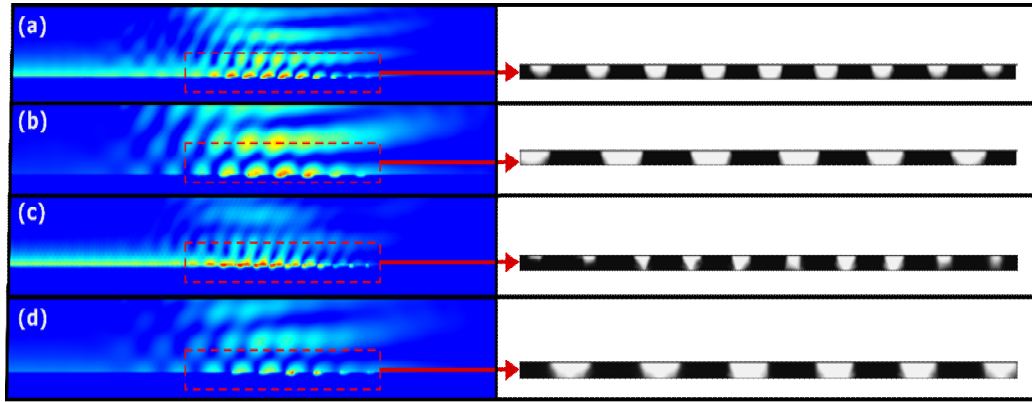


Fig. 15

Rezultatele estimate pentru eficiența de cuplaj sunt: 32 %, respectiv 6 % pentru argint-aer la 640 și 980 nm, și 44 %, respectiv 14% pentru argint-oxid de argint-aer la 640 și 980 nm. Se poate deci observa că adăugând un strat de 20 nm de oxid de argint/folosind metoda fabricării prin oxidare localizată, eficiența de cuplaj este îmbunătățită.

Un alt parametru care a necesitat optimizare este adâncimea șanțurilor produse prin nanolitografie. Pentru o excitare eficientă a plasmonilor, fanta trebuie să aibă o adâncime cât mai mare (40-50 nm cel puțin, după cum sugerează simulările efectuate). În acest scop a fost studiată posibilitatea unei apăsări/treceri multiple a vârfului în timpul scrierii, corelată cu alegerea unei periodicități adecvate pentru rețelele de difracție astfel încât profilul șanțurilor adiacente să nu se suprapună. Au fost fabricate ghiduri de undă de tip fantă cu o lungime de 10 μm , având la capete rețele de difracție cu o lățime de 5 μm .

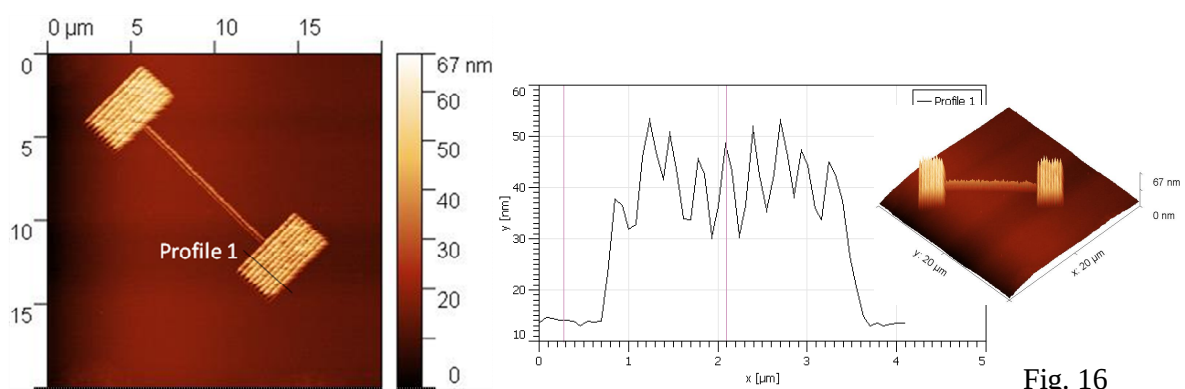


Fig. 16

În Fig. 16 este ilustrată structura obținută pentru o forță de apăsare de $40 \mu\text{N}$ în cazul în care scrierea s-a făcut într-o singură direcție/trecere. Imaginea topografică obținută sugerează că distanța aleasă între fantele rețelei de difracție, de 200 nm , este prea mică pentru a distinge individual fantele/fantele se suprapun și materialul deplasat în timpul zgârierii împiedică vârful să intre în interiorul fantei. Înălțimea medie a fantelor față de materialul de bază este $\sim 35 \text{ nm}$, dar înălțimea medie între fante este de 15 nm .

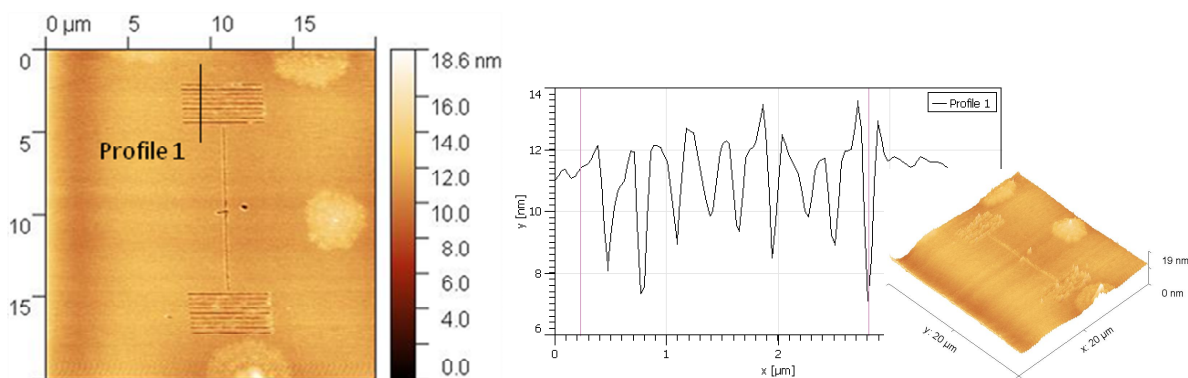


Fig. 17

Păstrând aceeași periodicitate a fantelor rețelei, s-a modificat forța de apăsare la valori de $20 \mu\text{N}$ și, respectiv, 30 mN , rezultatele fiind prezentate în Fig. 17. Deși fantele rețelei de difracție se suprapun mai puțin ca în cazul apăsării cu o forță mai mare, adâncimea medie a fantelor este mică, de 4 , respectiv 6 nm .

Act. 3.6: Fabricarea porților logice bazate pe ghiduri de undă de tip fantă

Această activitate se bazează atât pe rezultate obținute în cadrul activității 3.5, în care au fost fabricate ghiduri de undă de tip fantă și a fost estimată periodicitatea rețelei de difracție care asigură excitarea unei plasmonice, respective citirea semnalului propagat, cât și pe configurațiile propuse pentru calcul logic în cadrul proiectului, în special în Act. 3.3.

În particular, am fabricat circuitul a cărui funcționalitate am studiat-o în A2, și care poate implementa, în funcție de condițiile de excitare, diverse porți logice. O reprezentare schematică a acestei configurații este ilustrată în Fig. 22(a) și reprezintă o variantă mai ușor controlabilă decât configurația din Fig. 22(b), a cărei funcționalitate, similară, depinde critic de distanța dintre ghidurile de undă cuplate.

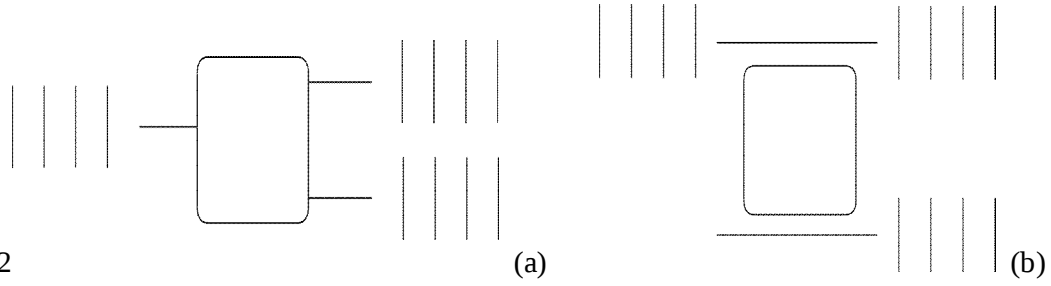


Fig. 22

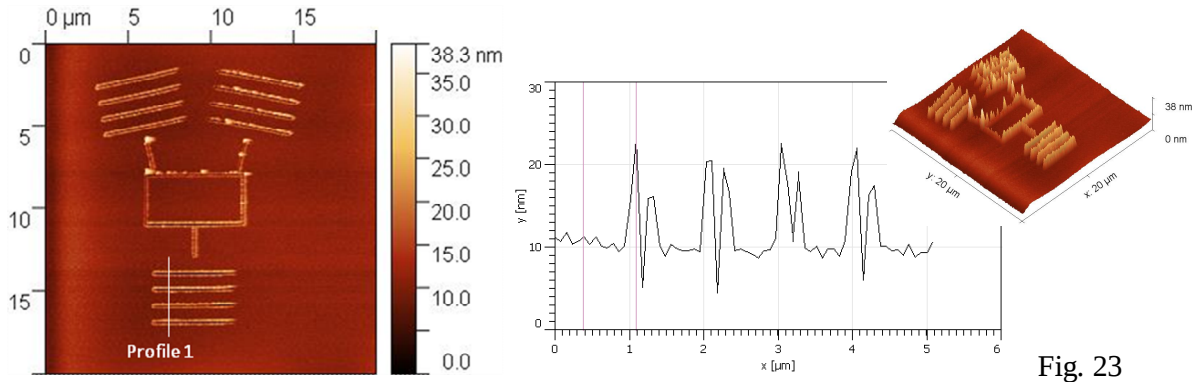


Fig. 23

Structura reprezentată în Fig. 22(a) a fost scrisă într-o singură trecere, cu o forță de apăsare de $40 \mu\text{N}$. Caracterizările topografice corespunzătoare reprezentate în Fig. 23 arată obținerea unor linii/fante înguste cu o adâncime medie de 11.

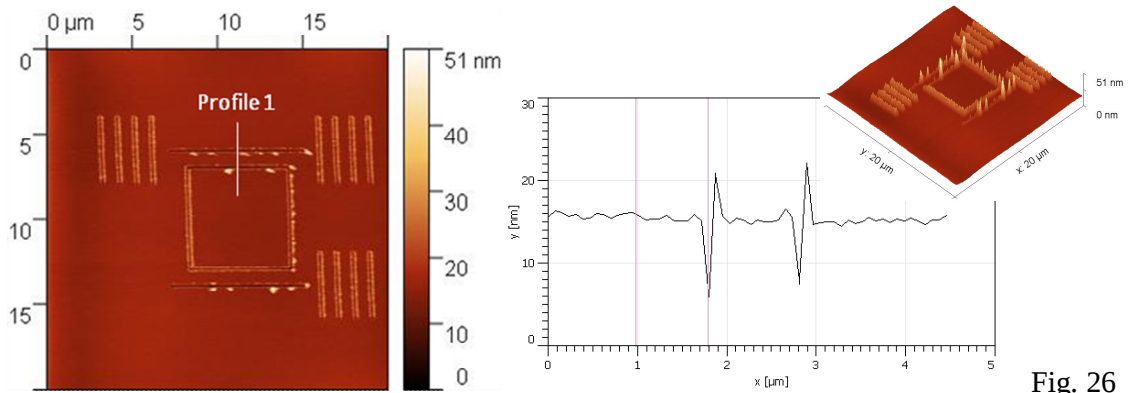


Fig. 26

În ceea ce privește structura din Fig. 22(b), și aceasta a fost scrisă în același mod ca și configurația precedentă, rezultatul caracterizărilor topografice fiind reprezentat în Fig. 26. Adâncimile medii ale liniilor/fantelor obținute sunt similare celor din cazul structurii din Fig. 22(a).

Cu toate acestea, dacă în configurația din Fig. 22(a) semnalul/semnalele incident(e) este(sunt) transmis direct porturilor/portului de ieșire prin intermediul regiunii (cvasi)dreptunghiulare, care determină rezultatul interferenței undelor plasmonice în structură, în cazul configurației din Fig. 22(b) portul de intrare trebuie să asigure cuplarea plasmonilor în regiunea (cvasi) dreptunghiulară prin controlul strict al distanței dintre port și regiunea dreptunghiulară, o astfel de cerință fiind impusă și portului de ieșire. Pe lângă faptul că acest cuplaj este mai mic

decât în cazul unei structuri fără discontinuități (cea din Fig. 22(a)), este și foarte sensibil la distanța porturi-regiune (cvasi)dreptunghiulară, în special la distribuția indicelui de refracție efectiv în această regiune de cuplaj. Dacă distanța poate fi controlată prin scriere, dizlocarea materialului este mai puțin controlabilă (acest lucru este evident din toate imaginile topografice 3D), ceea ce sugerează că structura din Fig. 22(a), al cărei mod de funcționare/de implementare a porților logice a fost discutat în **A2**, poate fi fabricată într-un mod mai fiabil decât configurația din Fig. 22(b).

Rezultatele obținute privind fabricarea unor circuite logice plasmonice, care cuprind atât simulările numerice cât și structurile obținute experimental, sunt în curs de prelucrare pentru a fi trimise la publicare în reviste ISI.

Referințe

- [1] G. Y. Wu, N.-Y. Lue, L. Chang, Phys. Rev. B 84, 195463 (2011).
- [2] A. Srivastava, M. Sidler, A. V. Allain, D. S. Lembke, A. Kis, A. Imamoglu, Nature Phys. 11, 141-147 (2015).
- [3] K. Komatsu, Y. Morita, E. Watanabe, D. Tsuya, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Moriyama, Sci. Adv. 4, eaaq0194 (2018)
- [4] M. M. Grujić, M. Ž. Tadić, F. M. Peeters, Phys. Rev. Lett. **113**, 046601 (2014).
- [5] O. L. Sanchez, D. Ovchinnikov, S. Misra, A. Allain, A. Kis, Nano Lett. 16, 5792-5797 (2016).
- [6] K. F. Mak, K. He, J. Shan, T. F. Heinz, Nature Nanotechnol. 7, 494-498 (2012).
- [7] Z. Song, R. Quhe, S. Liu, Y. Li, J. Feng, Y. Yang, J. Lu, J. Yang, Sci. Rep. 5, 13906 (2015).
- [8] Y. Shimazaki, M. Yamamoto, I. V. Borzenets, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Tarucha, Nature Phys. 11, 1032-1036 (2015).
- [9] M.-K. Lee, N.-Y. Lue, C.-K. Wen, G. Y. Wu, Phys. Rev. B 86, 165411 (2012).
- [10] Ş.E. Kocabaş, G. Veronis, D.A.B. Miller, S. Fan, IEEE J. Selected Topics Q. Electron. 14, 1462-1472, 2008
- [11] A. Pannipitiya, I.D. Rukhlenko, M. Premaratne, IEEE Photonics J. 3, 220-233, 2011
- [12] H. Nejati, A. Beirami, Opt. Lett. 37, 1050-1052, 2012
- [13] A.M. Weiner, Opt. Commun. 284, 3669-3692, 2011
- [14] M. Dantus, *Femtosecond Laser Shaping. From Laboratory to Industry*, CRC Press, Boca Raton, U.S.A., 2018
- [15] Y. Rodriguez, F. Frei, A. Cannizzo, T. Feurer, J. Chem. Phys. 142, 212451, 2015
- [16] D. Dragoman, E. Vladescu, 18th International Balkan Workshop on Applied Physics and Materials Science (IBWAP 2018), 10-13, July, 2018, Constanța, România
- [17] F. Xu, S. Das, Y. Gong, Q. Liu, H.-C. Chien, H.-Y. Chiu, J. Wu, R. Hui, Appl. Phys. Lett. 106, 031109, 2015
- [18] E. Vladescu, D. Dragoman, Plasmonics 13, 2189-2195, 2018
- [19] M. Dragoman, D. Dragoman, Prog. Quantum Electron. 32, 1-41, 2008.
- [20] Y. Fu, X. Hu, C. Lu, S. Yue, H. Yang, Nano Letters 12, 5784-5790, 2012

- [21] C. Lu, X. Hu, H. Yang, Q. Gong, Scientific Reports 4, 3869, 2014
- [22] F. Wang, Z. Gong, X. Hu, X. Yang, Q. Gong, Scientific Reports 6, 24433, 2016
- [23] V.-A. Antohe, S. Iftimie, A. Radu, L. Ion, D. Dragoman, 18th International Balkan Workshop on Applied Physics and Materials Science (IBWAP 2018), 10-13, July, 2018, Constanța, România
- [24] S. Iftimie, A. Radu, V.-A. Antohe, L. Ion, D. Dragoman, 22-28 Sept. 2018, Heraklion, Greece

Articole publicate/ trimise spre publicare în reviste cotate ISI în 2019

- A1:** Elena Vlădescu, Daniela Dragoman – Plasmonic slot waveguide circuits for pulse shaping, trimis spre publicare la revista Physica Scripta
- A2:** D. Dragoman, E. Vladescu – Ring-shaped plasmonic logic gates, Plasmonics 14, 71-78, 2019
- A3:** A. Radu, S. Iftimie, D. Dragoman – Ballistic 3-port interferometric logic gates in the quantum Hall regime, Physica E 109, 144-151, 2019
- A4:** G.A. Nemnes, D. Dragoman – Reconfigurable quantum logic gates using Rashba controlled spin polarized currents, Physica E 111, 13-19, 2019
- A5:** S. Iftimie, A. Radu, D. Dragoman – Reconfigurable quantum logic gates with gate-controlled Rashba spin-orbit coupling, trimis spre publicare la revista Physica E

Contribuții la conferințe internaționale în 2019

- C1:** D. Dragoman, E. Vladescu – Plasmonic pulse shaping in slot waveguides, 19th International Balkan Workshop on Applied Physics and Materials Science (IBWAP 2019), 16-19 July 2019, Constanța, Romania
- C2:** V.-A. Antohe, S. Iftimie, A. Radu, L. Ion, D. Dragoman – On the characterization of optical slot waveguides fabricated by AFM nano-indentation lithography, 19th International Balkan Workshop on Applied Physics and Materials Science (IBWAP 2019), 16-19 July 2019, Constanța, Romania
- C3:** A. Radu, S. Iftimie, L. Ion, D. Dragoman – Ballistic 3-port interferometric logic gates in the quantum Hall regime, 19th International Balkan Workshop on Applied Physics and Materials Science (IBWAP 2019), 16-19 July 2019, Constanța, Romania
- C4:** G.A. Nemnes, D. Dragoman – Reconfigurable quantum logic gates using Rashba spin-orbit interaction, TIM 19 Physics Conf., 29-31 May 2019, Timisoara, Romania
- C5:** G.A. Nemnes, D. Dragoman – Reconfigurable quantum logic gates for neuromorphic computing, EMRS Fall Meeting 2019, 16-19 September 2019, Warsaw, Poland

Director proiect,
Prof.univ.dr. Daniela Dragoman

