

Titlul proiectului de cercetare:

Dispozitive nanoelectronice avansate bazate pe heterostructuri grafena/feroelectric (GRAPHENEFERRO)

Codul proiectului: PN-III-P4-ID-PCCF-2016-0033

Contract nr. 7/2018

Etapă 3 2020 : Circuite nanoelectronice pentru detectia frecventelor inalte

CO : Institutul National Cercetare-Dezvoltare pentru Microtehnologie

Director de Proiect : cerc. st. I dr. Mircea Dragoman

Parteneri :

P1 Univ. Bucuresti, Fac. de Fizica

Responsabil de proiect: prof.dr. Daniela Dragoman

P2 Institutul National Cercetare-Dezvoltare pentru fizica materialelor (INCD-FM)

Responsabil de proiect: cerc.st.I dr. Magdalena Ciurea

P3 Institutul National de Cercetare-Dezvoltare pentru fizica laserilor plamei si radiatiei (INFLPR)

Responsabil de proiect: cerc.st.I dr. Maria Dinescu

Introducere

Circuitele de inalta frecventa si neuromorfice, sau pentru captarea termoelectronica a energiei, necesita functionalitati controlabile si reconfigurabile ale circuitelor nanoelectronice. Grafena este potrivita pentru aceste aplicatii datorita doparii electrostatice, care permite variatia densitatii purtatorilor cu o tensiune de poarta. Substraturile oxidice, inasa, limiteaza mobilitatea grafenei la cateva mii de cm^2/Vs . Pe de alta parte, mobilitatea in heterostructurile grafena/feroelectric (G/F) este cu 2-3 ordine de marime mai mare. Natura inovativa a proiectului se bazeaza pe posibilitatea de a creste semnificativ functionalitatea dispozitivelor nanoelectronice bazate pe grafena prin folosirea substraturilor ferroelectrice(F). Heterostructurile G/F permit: (i) obtinerea unor mobilitati foarte mari in tranzistorii cu efect de camp (FET) G/F, care deplaseaza regiunea de functionalitate ale tranzistoarelor cu efect de camp (FET-ului) spre banda THz , cu mult deasupra valorii de 20 GHz care se atinge in prezent (ii) fabricarea unor detectori la frecvente foarte inalte care nu necesita racire (iii) exploatarea comportarii histeretice a rezistentei structurilor G/F in aplicatii neuromorfice cum ar fi sinapsele artificiale, (iv) fabricarea unor circuite de microunde reconfigurabile, si (v) fabricarea unor dispozitive termoelectronice grafena avand un efect termoelectric foarte mare. Proiectul va consta in proiectarea, fabricarea si testarea unor dispozitive nanoelectronice inovative bazate pe proprietatile fizice de exceptie a heterostructurilor G/F, in particular dispozitive electronice ultrarapide, circuite neuromorfice, dispozitive reconfigurabile si de captare a energiei. Tehnicile de crestere a heterostructurilor G/F in proiect trebuie sa fie scalabile la nivel de placheta. Proiectul este implementat de un consorțiu din 3 institute nationale de cercetare-dezvoltare si cea mai importanta universitate din Romania, care au infrastructura moderna necesara.

Pentru anul 2020 ne-am propus, conform planului de realizare cateva obiective enumerate mai jos :

1.Proiectarea si simularea circuite nanoelectronice bazate pe heterostructuri grafena/feroelectrice pentru detectia frecventelor inalte

Proiectarea si simularea dispozitivelor nanoelectronice bazate pe heterostructuri grafena/feroelectric la frecvente inalte

Proiectarea si simularea dispozitivelor nanoelectronice bazate pe heterostructuri grafena/feroelectric nanopaternate

2.Fabricare demonstrator D1: circuit de inalta freceventa pentru detectia undelor electromagnetice la frecvente inalt

2.1 Fabricare si caracterizare placheta 4 inch HfO2 feroelectric/Si

2.2 Fabricare si caracterizare -placheta 4 inch PZT/Si

2.3 Fabricarea demonstratorului

2.4 Caracterizare in DC si la frecvente inalte.

3. Proiectarea si simularea circuitelor nanoelectronice bazate pe heterostructuri grafena/feroelectrici pentru circuite logice si neuromorfic

Remarcam ca toate obiectivele fazei a treia au fost atinse in conditii dificile de functionare in timpul pandemiei de corona virus.

Capitolul 1 Proiectarea si simularea circuite nanoelectronice bazate pe heterostructuri grafena/feroelectrici pentru detectia frecventelor inalte.

Proiectarea si simularea dispozitivelor nanoelectronice bazate pe heterostructuri grafena/feroelectric la frecvente inalte

Detectia frecventelor inalte folosind materiale 2D este o tema de cercetare importanta din cauza dezvoltarii explozive a sistemelor de comunicatii 5 G si 6G la nivelul anilor 2030 care implica comunicatii pe frecvente atingand 90 GHz in cazul 5G si 2 THz in cazul 6G [1]. Totusi, zona de frecvente de baza a comunicatiilor wireless ramane banda 1-10 GHz, stiind ca peste 6-7 GHz undele electromagnetice nu se mai propaga in interiorul cladirilor si in aceasta zona de frecventa am dezvoltat detectia folosind heterostructuri grafena/feroelectrici. Dupa cum se stie purtatorii din grafena au o mobilitate foarte mare in medie 8000-10000 cm^2/Vs si atribuind grafenei monolayer rolul de canal intr-un tranzistor FET ,s-a reusit detectia undelor electromagnetice pana la 1 THz [2], [3],[4]. Care sunt avantajele pe care le aduc heterostructurile grafena/feroelectric in detectia undelor electromagnetice? Asa cum am aratat in fazele anterioare feroelectricii bazati pe HfO_2 si dopati cu Zr au o rugozitate medie foarte mica de 0.2-0.3 nm. Grafena monolayer crescuta prin metoda CVD ia forma substratului pe care se transfera ,iar rugozitatea mica evita aglomerari de densitati de curent in zona neuniformitatii substratului ca in cazul SiO_2 , de aceea mobilitatea purtatatorilor scade foarte mult [5]. In al doilea rand, asa cum vom arata in capitolul urmator heterostructura grafena/ HfZrO deschide o banda interzisa de 0.2 eV , purtatorii au mobilitate foarte mare de 8000 cm^2/Vs comparabila cu a celor mai rapizi semiconductori ca GaAs sau InP ,iar caracteristicile curent-tensiune sunt neliniare ceea ce permite detectia eficienta a undelor electromagnetice [6]. Notam ca grafena monolayer nu are o banda interzisa ,iar tranzistoarele care utilizeaza grafena monolayer avand rol de canal au dependentele

curent-tensiune quasi- liniare si de aceea detectia undelor electromagnetice are eficienta scazuta.

Detectorul de unde electromagntice care reprezinta demonstratorul numarul 1 al proiectului , denumit mai departe demo1 este un tranzistor FET cu canal grafena monolayer transferata pe o structura HfZrO/Al₂O₃/ Si HR (siliciu de inalta rezistivitate). HfZrO are o grosime de 6 nm, Al₂O₃ are grosimea de 20 nm,iar HRSi 525 μm. Toate detectoarele sunt realizate pe o placheta de 4 inch HfZrO/Al₂O₃/ Si HR.

Configuratia detectorului –un tranzistor FET cu canal grafena monolayer transferat pe HfZrO/Al₂O₃/ Si HR este reprezentata in Fig. 1. 1 fiind format din urmatoarele elemente -doua contacte metalice in forma de antena tip “bow-tie”, cu lungime totala egala cu o lungime de unda ghidata λ_g a detectorului si avand rolul de poarta (G) si sursa (S) -linii subtiri (cu o latime de 40 μm) care conecteaza tranzistorul la poarta (G) (cu lungime egala cu cca. $7\lambda_g/4$), la D (cu lungime egala cu cca. $5\lambda_g/4$) si la S (cu lungime egala cu cca. λ_g ; in acest caz, sursa este conectata la masa).

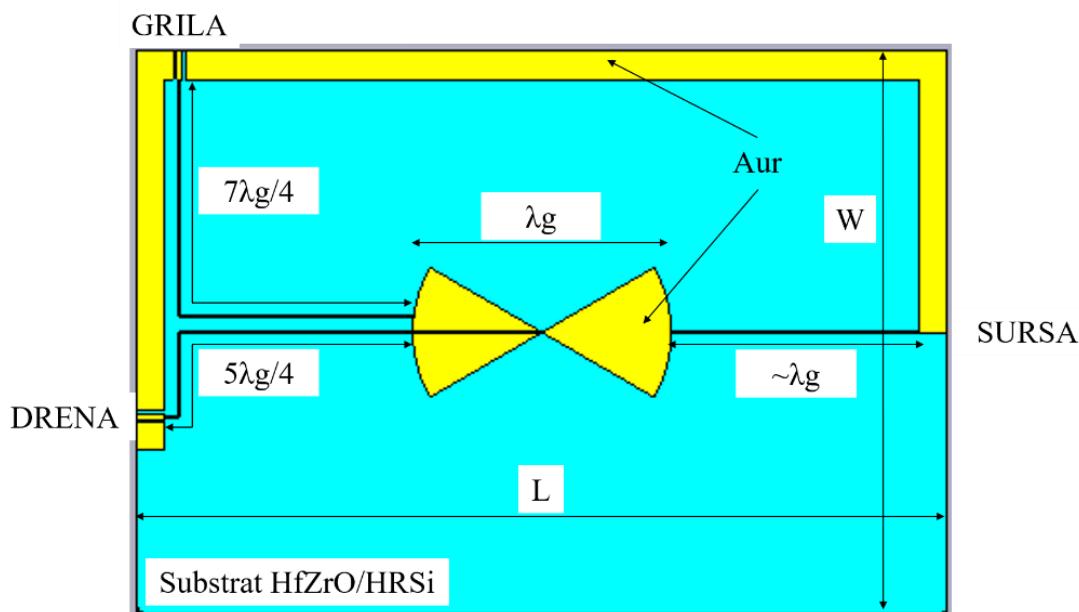


Fig. .1.1: Proiectul electromagnetic (CST Microwave Studio®) unui dispozitiv in care este integrat tranzistorul G-FET. Stratul de aur are o grosime de 300 nm.

Cele doua linii subtiri care conecteaza tranzistorul G-FET la grila si la drena au o lungime egala cu un multiplu impar al lungimii de unda ghidat λ_g , intrucat astfel este garantata izolarea semnalului in microunde de cel in curent continuu (CC).

Pentru a masura direct pe placheta (“on wafer”) prototipurile fabricate, a fost necesar ca porturile de polarizare a grilei si drenei sa fie proiectate in ghid de unda coplanar (CPW), cu dimensiuni interstitiu-linie-interstitiu de 60-100-60 μm . Astfel, se pot folosi capetele de masura standard (cu “pitch” – distanta intre punctul central al linii de semnal si planul de masa – de 150 μm), ceea ce asigura stabilitatea mecanica a punctelor de contact, conectarea potrivita la traseele metalice si reducerea drastica a interferentelor electromagnetice ce ar putea fi induse in sistemul de masura de mediul in care se fac masuratorile (sondele de test au o structura compacta, ecranata, si sunt conectate la echipamentele de masura prin cabluri coaxiale cu pierderi rezistive si radiative mici). S-au realizat mai multe tipuri de detectoare corespunzatoare anumitor benzi de frecventa asa cum se arata in tabelul 1.

Frecventa de lucru	λ_g	L	W
24 GHz	4,62 mm	14,5 mm	~10 mm
38 GHz	2,61 mm	8,7 mm	8,42 mm
60 GHz	1,76 mm	5 mm	4,64 mm

In mijlocul structurii este pozitionat monostratul de grafena depus pe stratul subtire de ferroelectric HfZrO, dupa cum se vede in schema din figura 1.2.

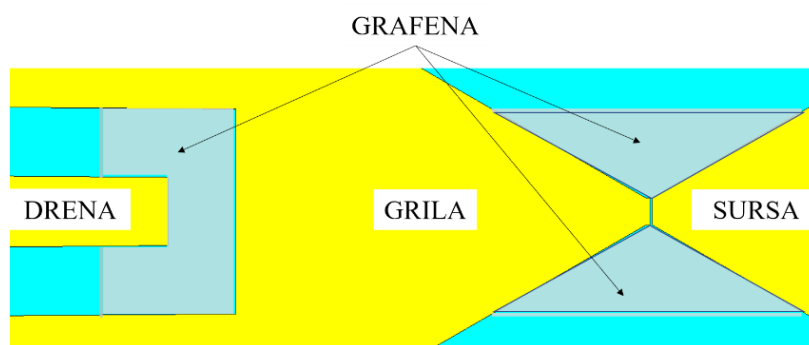
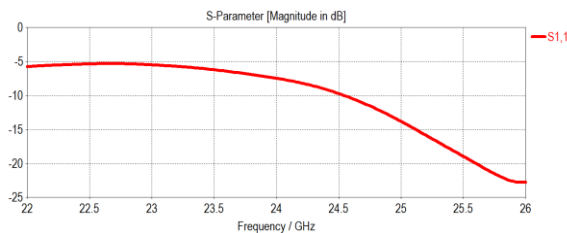


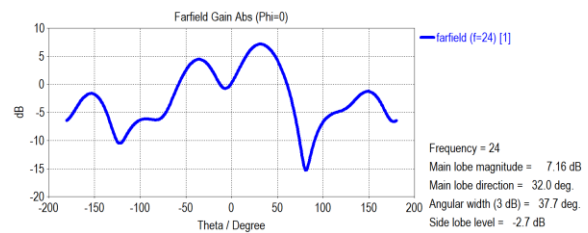
Fig. 1.2: Detaliu proiectului electromagnetic din figura 1, cu pozitia monostratului de grafena in mijlocul structurii.

Dat fiind faptul ca substratul de HRSi este subtire in raport cu lungimea de unda la frecventele de lucru, pentru a masura detectoarele in mod corect, fara fenomene nedorite de reflexie a undelor electromagnetice (care patrund in substratul de HRSi) din partea

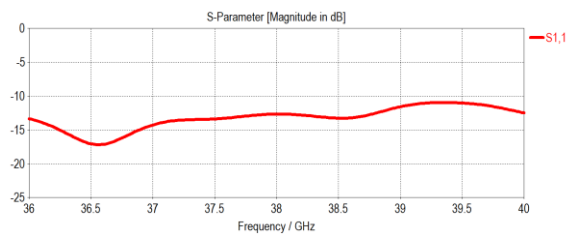
unui plan metalic (“reflector”) lipit direct pe spatele plachetei de HRSi, fiecare structura a fost simulata in conditiile plasarii unei bucati de dielectric de tip Plexiglas (cu o grosime de 4,5 mm) pe spatele substratului de HRSi; apoi, pe spatele Plexiglas-ului a fost pus reflectorul. Simularile electromagnetice pentru cele trei structuri, in termeni de pierdere la reflexie in dB ($|S_{11}|$ – valoarea absoluta a parametrului S_{11} la portul 1, care este portul de excitare a antenei, intre grila si sursa) si castigul antenei (in dB) in plan perpendicular pe antenna respectiva sunt aratate in Fig. 1.3a-f. Curbele pentru $|S_{11}|$ dovedesc ca pierderile la reflexie in toate cele 3 cazuri sunt mai bune decat -7,48 dB la frecventa de lucru, mai exact: -7,48 dB la 24 GHz (Fig.1. 3a), -12,7 dB la 38 GHz (Fig. 1.3c) si -20,78 dB la 60 GHz (Fig. 1.3e). Inclusive castigul antenei este foarte bun intre -45° si 45° (adica intr-un unghi care cuprinde unghiul de radiatie unei antene horn standard pentru masuratori in microunde), cu o valoare maxima de 7,16 dB la 24 GHz (Fig. 1.3b), 11,23 dB la 38 GHz (Fig. 1.3d) si 6,26 dB la 60 GHz (Fig. 1.3f). Eficienta de radiatie este de asemenea foarte buna: 91,6% la 24 GHz, 90,4% la 38 GHz si 83,95% la 60 GHz. Aceste valori sunt in concordanta cu valorile tipice privind eficienta de radiatie pentru antene bow-tie in microunde.



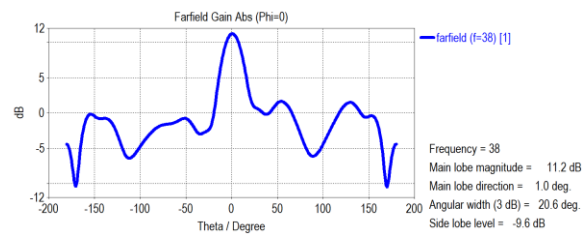
(a)



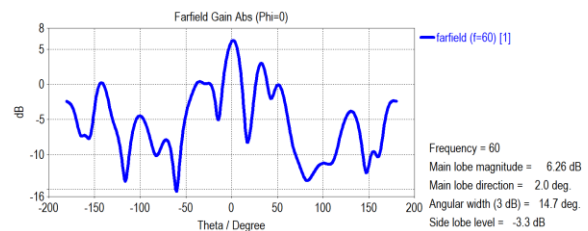
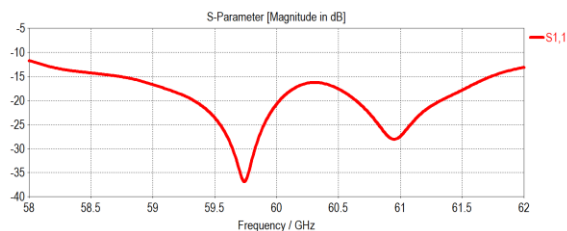
(b)



(c)



(d)



(e)

(f)

Fig. 1.3: Simularile electromagnetice (CST Microwave Studio®) ale antenelor bow-tie, în termeni de pierdere la reflexie și câștigul în planul perpendicular pe antena, pentru frecvențele 24 GHz (a)-(b), 38 GHz (c)-(d) și 60 GHz (e)-(f).

Avantajul principal al structurilor proiectate este faptul că acestea pot fi măsurate “on-wafer” folosind capetele pentru masuratori în ghid de undă coplanar, astfel permitând o caracterizare ușoară a dispozitivelor prin combinarea unei excitații în microunde cu o polarizare în curent continuu, cum se arată în paragrafele următoare.

În același timp, este de reținut că prezența tranzistorului pe baza de grafenă între grila și sursa (figura 1.2) schimbă proprietățile antenei la porturile respective, în termeni de pierdere la reflexie. Totuși, izolarea în microunde între punctul în care este plasat tranzistorul și fiecare dintre cele două porturi conectate la drenă și la grila este între 15 dB și 25 dB, ceea ce demonstrează că proiectarea fiecărei antene în microunde a urmărit optimizarea performanțelor la frecvența de lucru. Această valoare a izolării este foarte importantă în momentul în care se dorește decuplarea între semnalul în microunde (cules de către antena) și cel în curent continuu, pus în evidență cu un osciloscop conectat la portul de drenă.

Pentru a îmbunătăți neliniaritatea caracteristicilor curent-tensiune pe lângă faptul că heterostructura grafenă/HfZrO introduce o bandă interzisă, canalul de grafenă a fost perforat cu găuri de 30 nm și distanțe la 100 nm una de alta pentru a introduce o bandă interzisă suplimentară, lărgind banda interzisă la 0.3-0.4 eV [7].

Proiectarea și simularea dispozitivelor nanoelectronice bazate pe heterostructuri grafenă/feroelectric nanopaternate

Pentru a calcula structura de benzi într-o grafenă perforată (vezi Fig. 1.4 a) se utilizează hamiltonianul Dirac pentru grafenă în modelul continuu care include o variație spațială a unui termen de masă care are forma $\Delta(\mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{G}} \Delta_{\mathbf{G}} \exp(i\mathbf{G} \cdot \mathbf{r})$, unde $\mathbf{G}$ este vectorul reciproc al laticii așa cum se arată în [8]. Primele 10 benzi pentru energii pozitive în coordonate normalizate de energie $e = EL/hv_F$, unde E este energia purtătorilor, L este perioada structurii (100 nm), h constanta Planck, și v_F sunt prezentate în Fig. 1.4 b. Simularea s-a făcut la $\Delta_{\mathbf{G}}L/hv_F = 25$. Astfel banda interzisă E_g dintre prima bandă de

energie pozitiva si negativa este 0.2 V si poate fi marita la 0.3-0.4 eV lucrând cu diametre mai mici de gauri (10-30 nm) la aceiasi perioada de 100 nm.

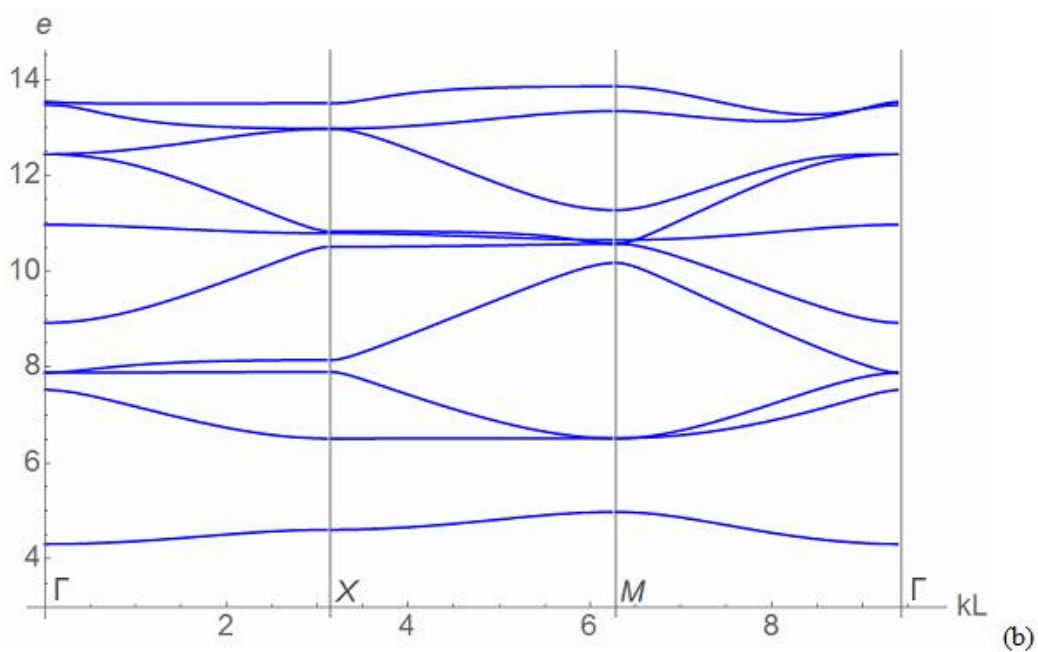
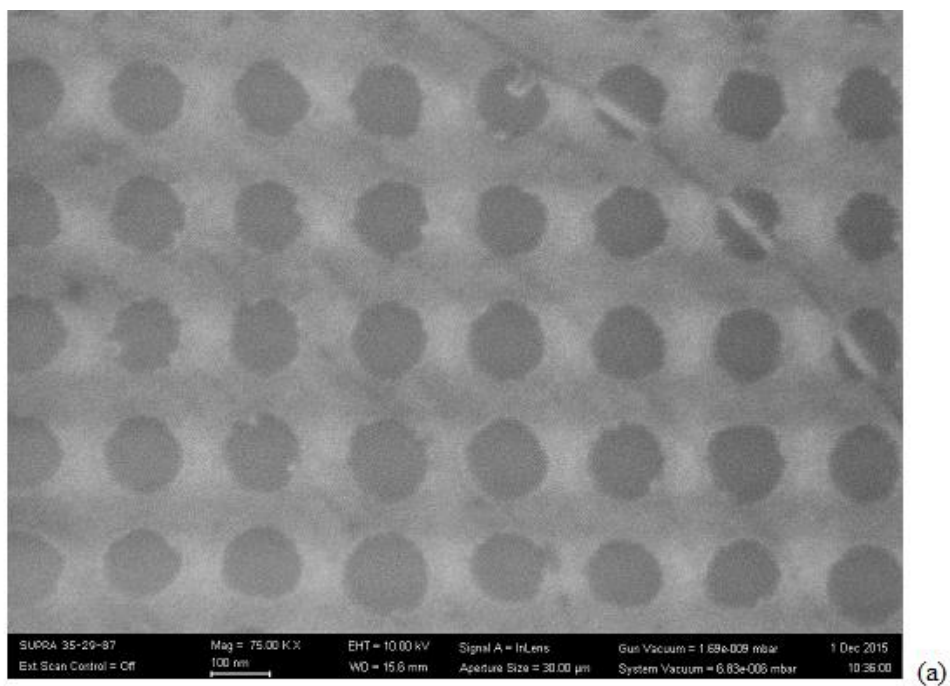


Fig. 1.4 (a) Grafena perforata –diametrul gaurilor 100 nm cu perioada 100 nm (b) benzile de energie ale grafenei perforate.

Asadar, efectele combinate ale transferului grafenei pe HfZrO si a perforarii ei introduc o banda interzisa , ceea ce permite ca dependenta curent tensiune sa fie neliniara- o conditie fara de care nu se poate obtine o detectie eficienta. Practic proiectarea facuta pentru FET ramane aceiasi, insa canalul detectoarelor va fi suplimentar nanopatrat.

2.Fabricare demonstrator D1: circuit de inalta frecventa pentru detectia undelor electromagnetice la frecvente inalt

2.1 Fabricare si caracterizare placheta 4 inch HfO₂ feroelectric/Si

Metoda ALD (atomic layer deposition)

Filme ultra-subtiri cu doua straturi **HfZrO** / **Al₂O₃** au fost preparate prin tehnica ALD (*Atomic Layer Deposition*), o metoda de obtinere si dopare a filmelor ultra-subtiri, cu un foarte bun control al procesului. Tehnica ALD este una dintre tehnicile cele mai adecvate pentru a creste filme ultra-subtiri, conforme, cu un riguros control al rugozitatii si grosimii filmului. Au fost obtinute filme ultra-subtiri cu doua straturi **HfZrO** / **Al₂O₃**, prin tehnica de depunere de straturi atomice, folosind un reactor ALD - OpAl / Oxford Instruments Plasma Technology. Reprezentarea schematica a filmelor ultra-subtiri cu strat dublu - 6 nm HfZrO / 20 nm Al₂O₃, crescute pe substrat de Si, este prezentata in Figura 2.1. 1.

Precursorii utilizati pentru procesele ALD sunt:

- *pentru Hf* - Tetrakis(dimethylamino)hafnium (TDMAH, 99.99+%-Hf, <0.2%-Zr, Puratrem, USA),
- *pentru Zr* - Tetrakis(dimethylamino)zirconium(IV) (TDMAZ, 99.99%-Zr, Puratrem, USA)
- *pentru Al* - Trimethylaluminum, (elec. gr., 99.999+%-Al, Puratrem, USA)
- apa ultra-pura a fost utilizata ca agent oxidant, iar azotul de puritate ultra-inalta (Azot 6.0, 99.9999 vol.%) a fost utilizat pentru purjare si gaz purtator.

Filmele ultra-subtiri cu doua straturi **HfZrO** / **Al₂O₃** au fost crescute prin tehnica ALD, pe plachete de Si (<100> cu grosimea de 525 μm) de 4 inch, dopate n - avand rezistivitatea de 1-10 Ωcm. Inaintea fiecarui proces ALD, plachetele de siliciu au fost

supuse unui tratament de curățare prin expunere la UV-ozon timp de 15 minute la 75° C, folosind un dispozitiv de curățare cu UV-ozon (Novascan Technologies, SUA).



Fig. 2.1.1 Reprezentarea schematica a filmelor ultra-subtiri cu strat dublu - 6 nm HfZrO / 20 nm Al₂O₃, crescute pe substrat de Si

Creșterea filmelor ultra-subtiri cu doua straturi **HfZrO** / **Al₂O₃** a fost facuta in cadrul unui singur macro-proces ALD, fara deschiderea camerei de reactie, furnizand astfel cea mai curata interfata dintre cele doua straturi componente – **HfZrO** si **Al₂O₃**.

Macro-procesul ALD este compus din doua procese ALD independente:

- i. Cresterea stratului de **Al₂O₃** pe substratul de siliciu
- ii. Cresterea stratului de **HfZrO** (*oxid de hafniu dopat cu zirconiu - film cu proprietati feroelectrice*) pe stratul de **Al₂O₃**.

Creșterea stratului de **Al₂O₃** a fost facuta direct pe placheta de **Si** la o temperatura de 200° C, cu o rata de crestere de ~1.7Å/ciclu ALD. Imediat dupa incheierea procesului ALD de crestere a oxidului de aluminiu a urmat, la aceeasi temperatura de 200°C, procesul ALD de crestere a stratului de **HfZrO**. Creșterea ALD a stratului de HfO₂ dopat cu zirconiu a fost facuta prin metoda de mixare secventiala pe suprafata, intr-o proportie variabila, a celor doi precursori (Hf si Zr) urmata de pasul de oxidare, acest concept conducand la producerea unui oxid binar omogen in volum, cu un continut scazut de Zr. Rata de crestere a stratului de HfO₂ dopat cu zirconiu a fost ~1 Å /ciclu ALD la temperatura de 200°C.

Topografia si rugozitatea suprafetei straturilor de Al₂O₃ si HfZrO au fost analizate folosind microscopia de forță atomică, cu un echipament AFM model NTEGRA Aura. Ariile de scanare investigate au fost 1x1 respectiv 2x2 microni, iar rugozitatea a fost

masurata pe aceste arii. Pentru obtinerea unor rezultate cat mai exacte ale rugozitatii suprafetei, imaginile AFM au fost obținute prin scanare în modul contact.

Imaginile AFM bi-dimensionale (2D) ale suprafetei straturilor de Al_2O_3 si HfZrO sunt prezentate in Figura 2.1.2. Din imaginile AFM ale straturilor crescute se remarca morfologii bine definite, dimensiunea granulelor si distributia acestora pe suprafata se modifica in functie de precursorul utilizat. Toate imaginile AFM achizitionate prezintă o suprafață continuă și omogenă, fără cavități. Pe baza rezultatelor analizei AFM, rugozitatea (Root Mean Square - RMS) masurata este sub 1 nm pentru ambele straturi dezvoltate (Tabel 1).

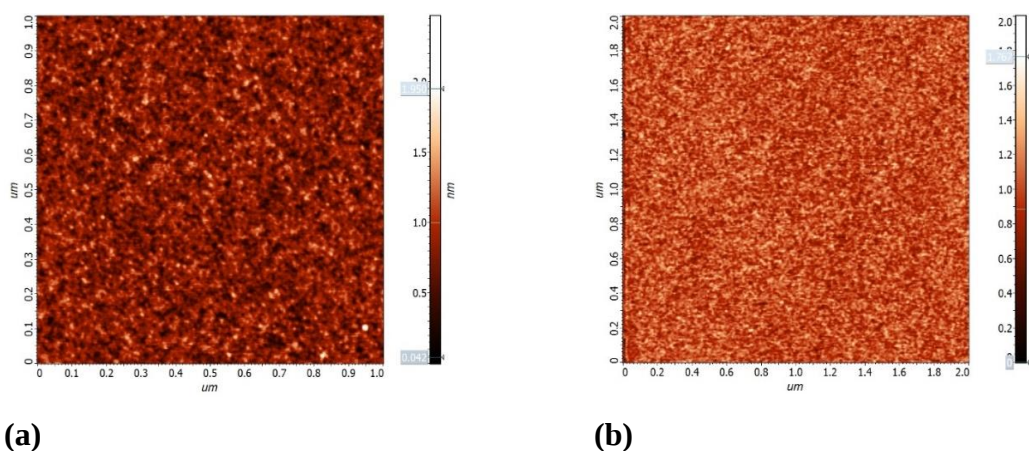


Fig. 2.1.2 Imagini AFM ale straturilor de Al_2O_3 (a) si HfZrO (b)

Topografia foarte uniformă și rugozitatea foarte mica a suprafeței oferă primele informații despre compoziția și structura filmului, care pot fi relativ constante în volum. Structura cristalografica, grosimea si densitatea straturilor de Al_2O_3 si HfZrO , au fost investigate cu un difractometru de inalta rezolutie Rigaku Smartlab. Structura filmelor de Al_2O_3 si HfZrO a fost elucidata folosindu-se metoda de difracție de raze X la incidenta razanta (GIXRD) la un unghi de incidență de 0.35° , utilizând un fascicul de raze X $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1.54\text{\AA}$) în configurație de fascicul paralel. Grosimea si densitatea au fost calculate din masuratorile de reflectivitate de raze X (XRR). Grosimea filmelor a fost calculata folosind perioada franjelor (Kiessig fringes) iar densitatea a fost data de unghiul critic pentru reflecție externă totală.

In Tabelul 1 sunt sumarizate valorile masurate sau calculate din XRR pentru grosimea si densitatea straturilor cat si rugozitatea (Root Mean Square - RMS) masurata folosind microscopia de forță atomică.

Tabel 1

Densitatea, grosimea si rugozitatea filmelor subtiri de Al_2O_3 si HfZrO

Nr. crt.	Strat	Grosime strat (nm)	Densitate (g/cm^3)	Rugozitate (nm)
1	Al_2O_3	20	3,50	0,24
2	HfZrO	6	9,005	0,18

Din masuratorile GIXRD – Figura 2.1. 3, asa cum era de asteptat, oxidul de aluminiu (Al_2O_3) nu prezinta cristalinitate (depunere amorfă). Necristalinitatea oxidului de aluminiu poate fi evidentiata si prin valoarea densitatii obtinuta din masuratori de reflectivitate de raze X (XRR) care este egala cu $3.5 \text{ g}/\text{cm}^3$, cu $0.45 \text{ g}/\text{cm}^3$ mai mica decat densitatea oxidului de aluminiu cu structura cristalina ($3.95 \text{ g}/\text{cm}^3$).

In ceea ce priveste stratul de HfZrO , acesta prezinta o structura relativ incipienta de policristal (*datorata in special grosimii foarte mici a stratului $\sim 6 \text{ nm}$*). Structura acestuia se fiteaza cel mai bine cu modelul de difracție al unei faze ortorombice non-centrosimetrice (*grup spațial $Pca2_1$*), prezentand cele mai mai intense si bine definite reflexii la $(111)_o$ si $(220)_o$.

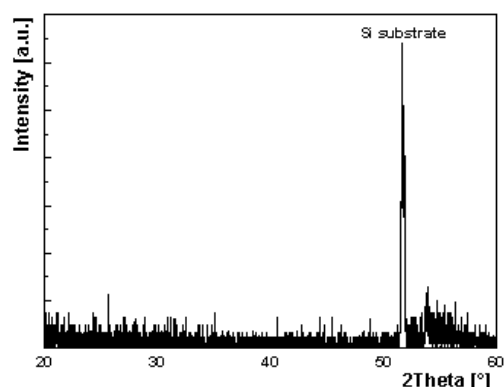
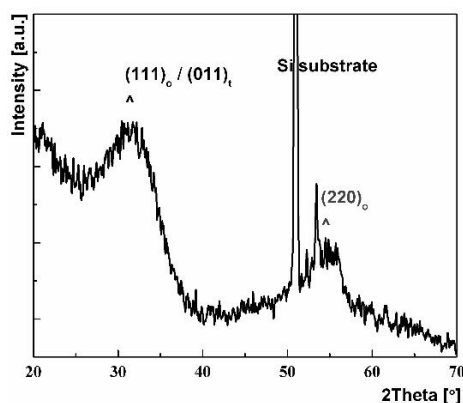
**(a)****(b)**

Fig. 2.1.3 Difractogramele GIXRD pentru Al_2O_3 (a) si HfZrO (b)

Formarea fazei ortorombice non-centrosimetrice (*grup spațial* $Pca2_1$) în straturile subțiri HfO_2 dopate cu zirconiu, este confirmată de prezența liniei de difracție intense de la $2\theta \sim 30.5^\circ$, secondată de linia de difracție mai puțin intensă de la $2\theta \sim 55^\circ$ (Figura 2.1.3(b)).

De asemenea sunt prezente și caracteristici ale fazei tetragonale cu simetrie $P4_2/nmc$, prin reflexiile $(011)_t$ ce apar în jurul lui $2\theta \sim 30^\circ$. Prin doparea oxidului de hafniu cu zirconiu se poate spune, din punct de vedere structural, că are loc o inserare în faza $m\text{-HfO}_2$ a unor zone $t\text{-ZrO}_2$, aceasta putând fi văzută ca o mixare a simetriei $P2_1/c$ cu $P4_2/nmc$, ceea ce conduce către o tranziție de fază de la tetragonală la o fază ortorombică, indusă de o deplasare a ionilor de Zr în opoziție față de O_2 , formând astfel o fază non-centrosimetrică, fază ce induce apariția fenomenului de feroelectricitate.

O altă observație este faptul că densitățile calculate din măsurătorile XRR pentru straturile HfZrO , sunt apropiate de densitatea standard a HfO_2 care este 9.68g/cm^3 – concluzia fiind că prin tehnica ALD au fost depuse straturi de o bună calitate, dense, fără multe vacante de oxigen. Pentru evaluarea proprietăților feroelectrice au fost efectuate măsurători PFM pentru identificarea răspunsului piezoelectric local al straturilor HfZrO crescute prin tehnica ALD. Pentru aceasta s-a lucrat în modul contact, cu vârfuri din siliciu metalizat (NSC36 TiPt, Mikromasch – cantileverul A, având constanta elastică $\sim 1\text{ N/m}$). Probele au fost fixate pe suporturi metalice prin lipire cu pastă de argint. Astfel, se poate considera că substratul de siliciu, dopat (dopaj de tip n – electronii sunt purtători majoritari), are rol de electrod inferior. Electrocul superior este vârful AFM, metalizat. Prin intermediul unui lock-in extern (SR830, Stanford Research Systems) a fost aplicată tensiune AC pe vârful AFM și a fost demodulat semnalul oscilant indus în semnalul de deflexie al fotodetectorului.

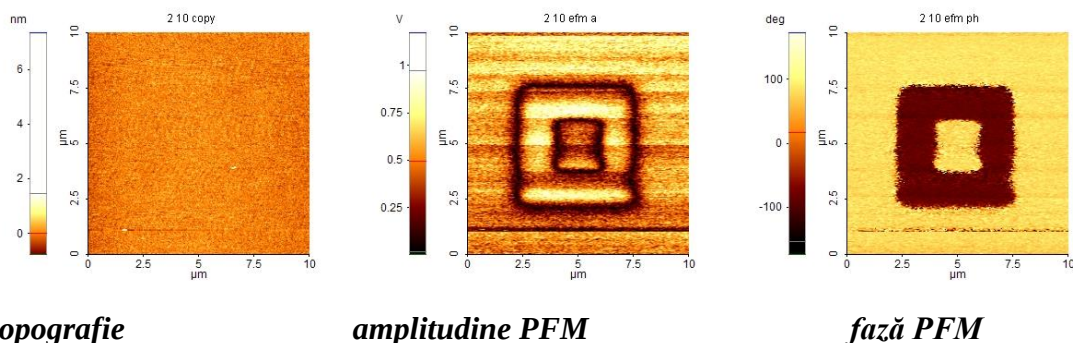


Fig. 2.1. 4 PFM pentru HfO_2 dopat cu Zr

*scriere pe $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$, 10V ; scriere pe $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$, -10V ;
citire pe $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$, 3V AC*

Pentru manipularea locală a domeniilor („scriere”), în timpul scanării vârful a fost menținut la 0V, iar pe electrodul inferior s-au aplicat diferite tensiuni DC, între -10V și +10V. Pentru determinarea răspunsului local al materialului („citire”), în timpul scanării electrodul inferior a fost menținut la 0V, iar pe vârful AFM a fost aplicată o tensiune AC de 3V la frecvența de 17kHz. Forța de apăsare dintre vârf și suprafață a fost menținută constantă, la 10 nN – valoare necalibrată.

În Figura 2.1. 4 sunt prezentate rezultatele măsurătorilor PFM pentru HfZrO. Au fost efectuate seturi de scanări pentru „scriere” și „citire” după cum urmează: Inițial a fost scanată o arie de $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$, pentru „scriere”, cu o tensiune pozitivă de 10V pe electrodul inferior. Ulterior a fost scanată o arie de $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$, în mijlocul ariei anterioare, tot pentru „scriere”, cu o tensiune negativă de -10V pe electrodul inferior. La final, pentru „citire”, a fost scanată o arie de $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ centrată pe primele două arii de „scriere”. În Figura 2.1.4 sunt prezentate imaginile construite pe baza semnalelor de amplitudine și fază de la lock-in. Acestea din urmă arată intensitatea răspunsului mecanic local la excitația electrică, respectiv defazajul dintre răspunsul mecanic și excitația electrică. Imaginile de amplitudine și fază nu au fost manipulate în niciun fel.

Se poate observa că răspunsul local diferă între ariile scrise în raport cu cele nescrise. De asemenea, suprafața inițială are un răspuns diferit de zero, cu o schimbare de fază similară zonei de $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ în care electrodul de jos a fost ținut la polarizare negativă. În imaginile cu amplitudine PFM, regiunile luminoase indică domenii cu polarizare puternică în afara planului, orientate fie în sus, fie în jos. Regiunile întunecate sunt observate la limitele domeniului, unde polarizarea în afara planului dispare.

În imaginile de fază PFM, regiunile luminoase corespund domeniilor cu polarizare ascendentă, iar regiunile întunecate reprezintă domenii cu polarizare descendentă. Diferența de defazaj între zonele scrise succesiv se saturează la o valoare apropiată de 180° . Din măsurătorile PFM se poate trage concluzia că straturile de HfZrO (*HfO₂ dopat cu zirconiu*) crescute prin tehnica ALD, prezintă o comutare ușoară a polarizării de-a

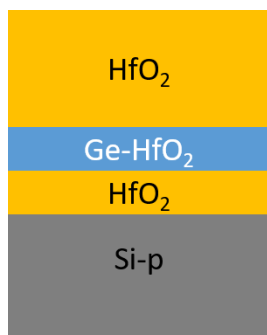
lungul direcției de polizare, cu limite clare între domeniile ascendente și descendente, acestea fiind observate în imaginile de fază și amplitudine.

Metoda Magnetron sputtering

A. Cresterea de filme feroelectrice de HfO_2 pe Si

În această etapă s-a continuat prepararea de structuri feroelectrice cu 3 straturi pe baza de Ge-HfO_2 , HfO_2 poarta/ Ge-HfO_2 intermediar/ HfO_2 buffer/(100)Si, prin pulverizare cu magnetron, având ca obiectiv optimizarea proprietăților feroelectrice. În acest scop s-au schimbat parametrii tehnologici de depunere și tratament termic rapid RTA și de asemenea dimensiunile relative ale straturilor în structură. Structurile au fost depuse pe substrat de Si de tip p, cu rezistivitatea de 7 – 14 Ωcm . HfO_2 a fost depus în regim rf, iar Ge în regim dc, folosind tinte de HfO_2 (4N puritate) și respectiv de Ge (5N), iar ca și gaz de lucru s-a folosit Ar (analog cu etapa precedentă).

Configurația cu 3 straturi a probelor a fost aleasă în etapele anterioare în ideea că variind dimensiunile straturilor se pot controla proprietățile feroelectrice și stabilitatea termodinamică ale structurilor. În Fig. 2.1,5 se prezintă schema structurii cu 3 straturi.



Condiții de depunere:

- HfO_2 buffer: 45 W rf, grosime $d = 10$ nm;
- Ge-HfO_2 intermediar: HfO_2 35 W rf, Ge 20 W dc, grosime $d = 10$ nm;
- HfO_2 poarta: 45 W rf, grosime $d = 20$ nm;

Condiții de tratament RTA:

- flux N_2 100 sccm la presiune atmosferică
- $T = 600$ $^{\circ}\text{C}$; $t = 3 - 12$ min

Fig. 2.1.5 Schema structurii cu 3 straturi

În Fig. 2.1.6 se prezintă difractogramele de raze X (în valoare absolută și normate la valoarea maximă) măsurate pe structurile tratate RTA la 600 $^{\circ}\text{C}$ pentru 3 și 8 min. Se observă prezența fazei ortorombice/tetragonale prin maximul principal poziționat la $2\theta = 30,4^{\circ}$. Ținând seama de pozițiile corespunzătoare fazei ortorombice feroelectrice, putem concluziona că faza feroelectrică are contribuție semnificativă în maximele evidențiate în difractograme. Deconvoluția difractogramelor (funcție Lorenz) arată că în structură

tratata RTA la 600 °C, timp de 3 min, raportul dintre intensitatea fazei ortorombice/tetragonale si faza monoclinica este de 0.93 (maximele pozitionate la $2\theta = 30,4^\circ$ si $2\theta = 31,6^\circ$), pe cand pentru structura tratata timp de 8 min, raportul este 0.87.

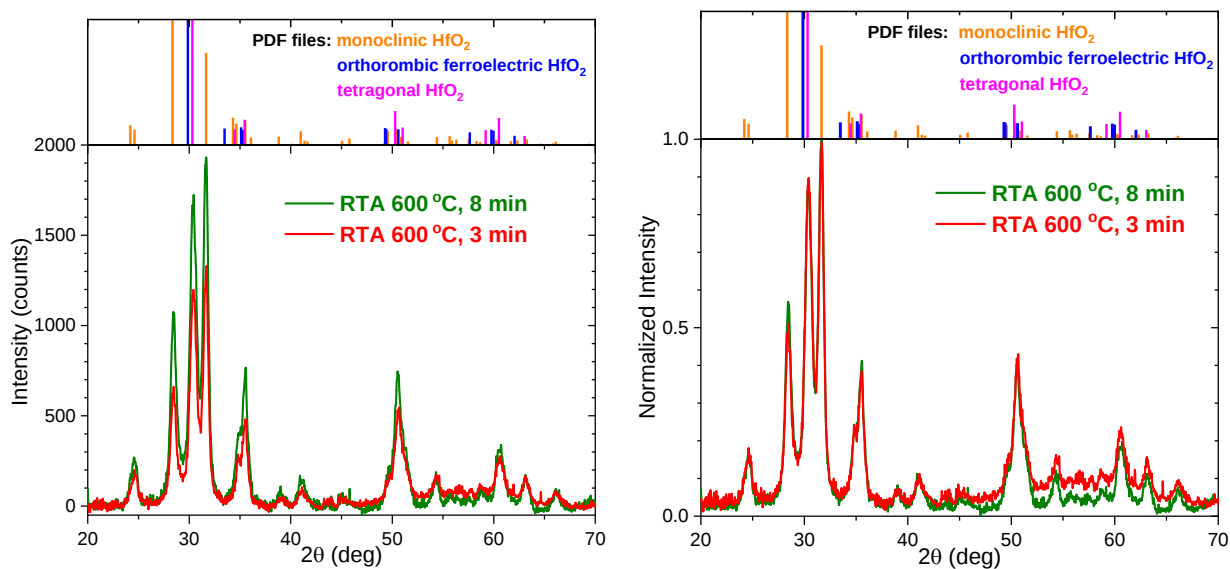


Fig. 2.1.6 Difractograme de raze X in valoare absoluta (stanga) si normate (dreapta)

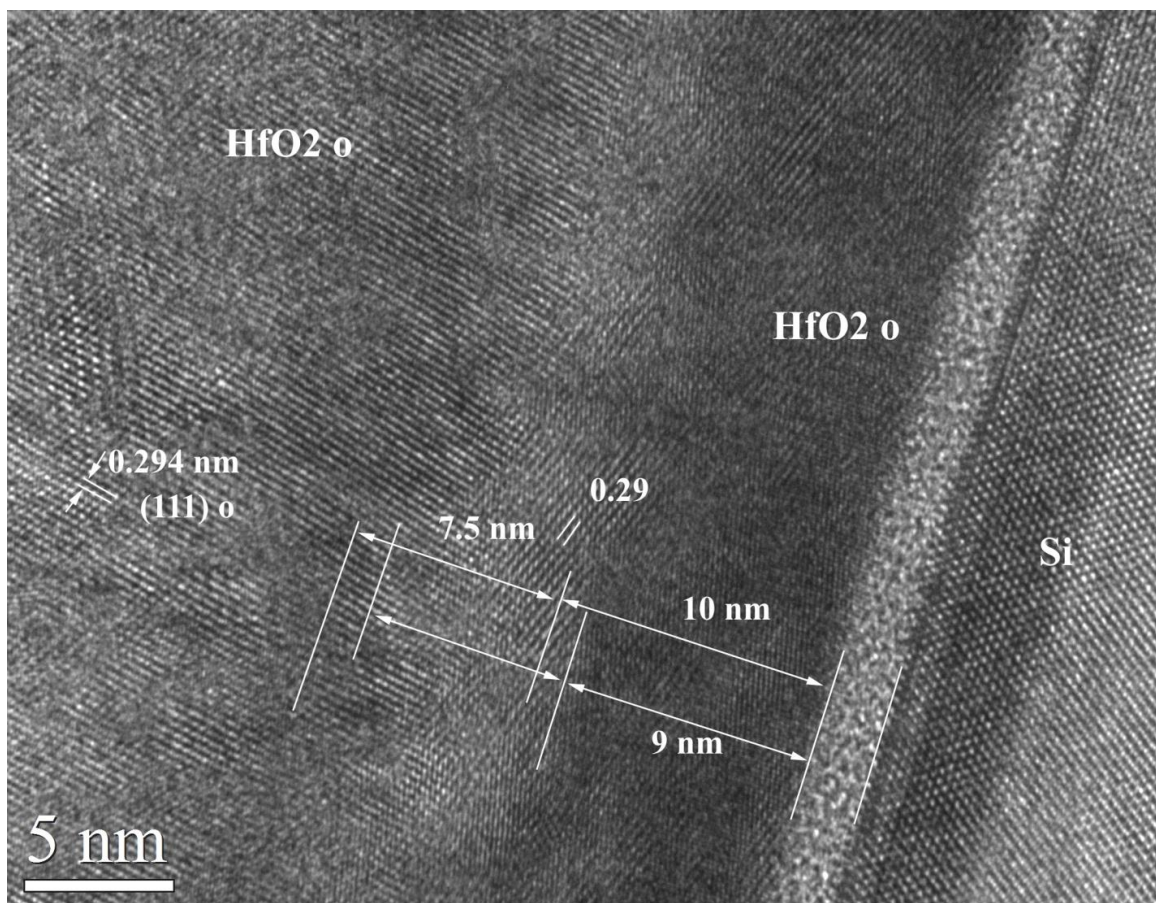


Fig. 2.1. 7 Imagine HRTEM masurata pe structura tratata RTA la 600 °C, timp de 3 min

Au fost efectuate masuratori HRTEM pe structura tratata RTA la 600 °C, timp de 3 min. In Fig. 2.1.7 se observa ca structura este cristalizata in totalitate, cu exceptia unor zone cu dimensiuni nanometrice din stratul intermediar. De asemenea se observa cristalizarea straturilor adiacente de HfO₂ cu coerente diferite in stratul HfO₂ poarta /cap si stratul HfO₂ buffer. Coerenta grauntilor de cristalizare se continua din ambele parti in stratul intermediar. Este de remarcat ca in aceasta figura se observa formarea structurii ortorombice in ambele straturi de HfO₂, care au continut important de Ge ca urmare a difuziei in timpul tratamentului termic. Coerenta diferita de cristalizare in straturile adiacente de HfO₂ arata ca procesul de cristalizare este initiat in aceste straturi. Cristalitele de HfO₂ continua sa creasca si in zona stratului intermediar cu includerea in retea a unei cantitati importante de Ge. Distanțele de 0.294 +/- 0.0015 nm (eroarea estimata de masurare a distantelor dintre franje este estimata la 0.5%), indica prezenta fazelor ortorombice de HfO₂. Ge in exces, care nu este inclus in rețeaua HfO₂ formeaza aglomerari nanometrice amorfe localizate la granitele dintre cristalitele de HfO₂ ce patrund (de sus si de jos) in stratul intermediar.

Au fost masurate caracteristicile de memorie pe structurile preparate pe care s-au depus electrozi de Al prin evaporare termica. In Fig. 2.1.8 se prezinta caracteristicile C –

V masurate la frecventa de 1 MHz pe structurile tratate RTA la 600 °C, timp de 3 min si respectiv de 8 min.

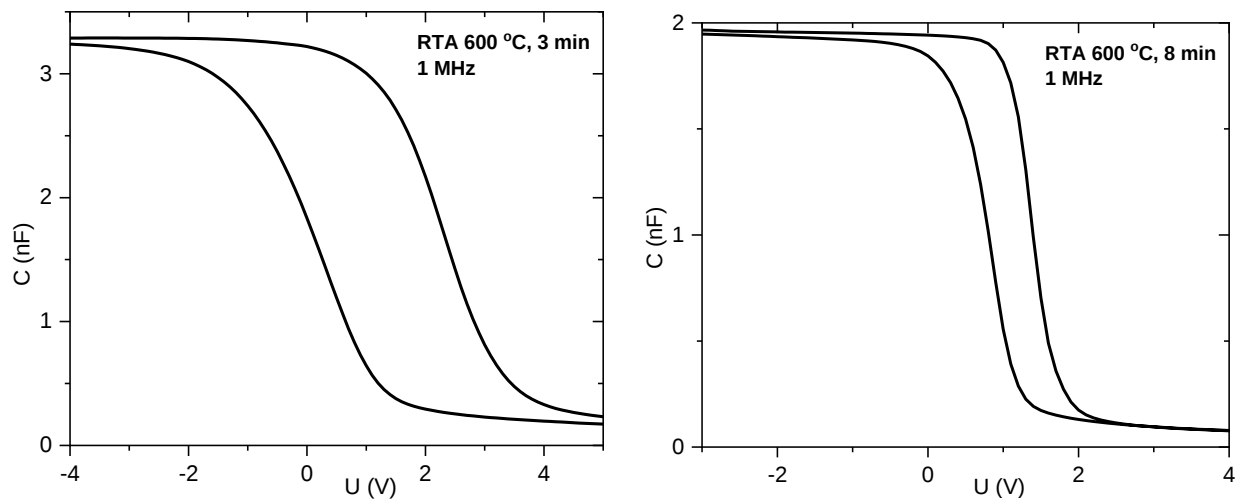


Fig. 2.1.8 Caracteristici $C - V$ obtinute la frecventa de 1 MHz pe structurile tratate RTA la 600 °C, timp de 3 min si respectiv de 8 min

Ambele curbe $C - V$ prezinta bucla de histerezis, avand fereastra de memorie $\Delta V = 2.1 - 2.2$ V pentru structura RTA 600 °C, 3 min si respectiv $\Delta V = 0.7 - 0.8$ V pentru structura RTA 600 °C, 8 min. Tinand seama de rezultatele XTEM (difuzia Ge din stratul intermediar in straturile adiacente de HfO_2 , iar Ge ramas in stratul interm formeaza nanoparticule amorfe), bucla de histerezis cu fereastra de memorie $\Delta V = 2.1 - 2.2$ V obtinuta pe structura RTA 600 °C, 3 min se explica prin contributia semnificativa a componentei HfO_2 feroelectric. Odata cu cresterea timpului de tratament RTA la 8 min, Ge se pierde prin difuzie din retea HfO_2 si in consecinta faza feroelectric (ortorombic feroelectric a HfO_2 se relaxeaza in faza monoclinica conducand la micșorarea ferestrei de memorie ($\Delta V = 0.7 - 0.8$ V)). In concluzie, in aceasta etapa am optimizat parametrii tehnologici de depunere si tratament RTA si dimensiunile relative ale straturilor in structura cu 3 straturi HfO_2 poarta/Ge- HfO_2 intermediar/ HfO_2 buffer/(100)Si. In structurile RTA 600 °C, 3 min am pus in evidenta faza ortorombica in masuratori XRD, in bun acord cu masuratorile HRTEM care arata ca straturile de HfO_2 de poarta/cap si HfO_2 buffer au structura ortorombica. De asemenea, contributia dominata a HfO_2 feroelectric s-a evidentiat in buclele de histerezis $C - V$.

2.2 Fabricare si caracterizare -placheta 4 inch PZT

Au fost depuse mai multe seturi de filme de PZT, in sistemul PLD clasic folosit pentru a obtine straturi subtiri pe arii mici (max. 4 cm^2) si in sistemul nou achizitionat in cadrul proiectului PCCF7(Fig.2.2.1). Acest ultim sistem permite obtinerea de straturi subtiri, depuse uniform, cu grosime controlata, pe plachete cu diametru max. de 8 cm. Exista in stadiul de realizare un adaptor pentru suportul substratului care sa permita atasarea de plachete cu diametrul de 10 cm.

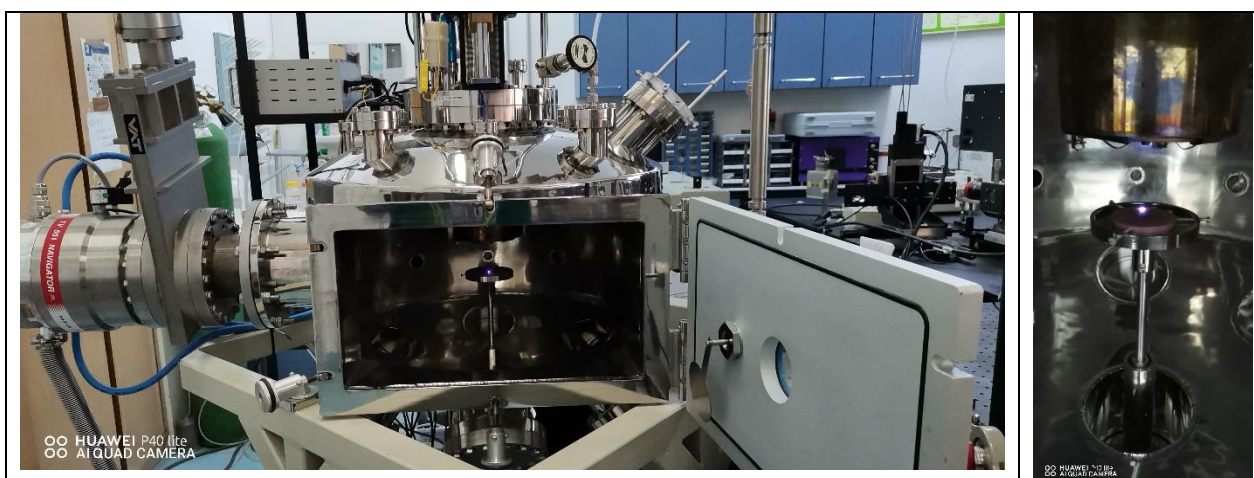


Figura 2.2.1. Sistem PLD pe arie mare (stanga) si tinta de PZT cu diametru 5 cm (dreapta)

Comportamentul piezoelectric al materialului depus sub forma de film subtire a fost testat prin determinari PFM.

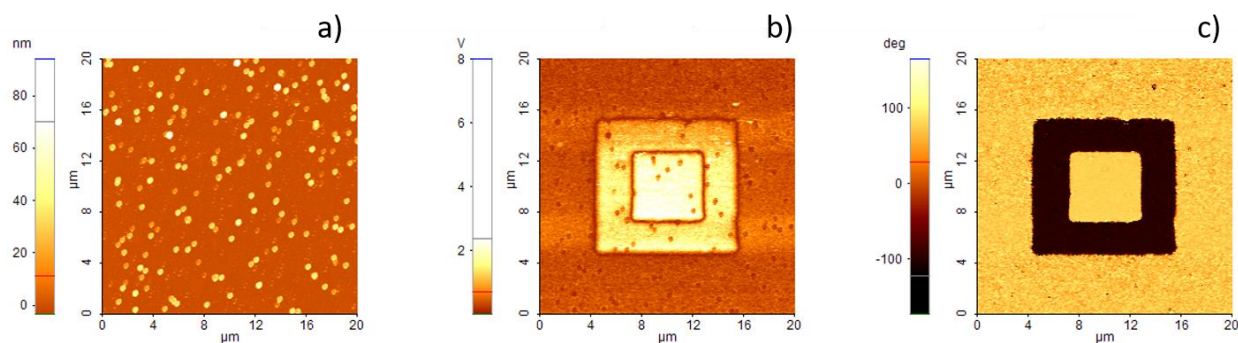


Figura 2. 2.,2 Imagini obtinute pe suprafata unui film subtiri de PZT depus prin PLD la $2,4\text{ J/cm}^2$ pe substrat de Si a) Topografia b) Amplitudine si c) Faza raspunsului piezoelectric

In fig. 2.2.2. se observa ca raspunsul piezoelectric (amplitudine – centru, faza – dreapta) este diferit pentru cele trei zone (patrat mare: +5V pe substrat; patrat mic: +5V urmat de -5V pe substrat; exterior: nemodificat). Amplitudinea raspunsului, pe ariile pe care a fost aplicata tensiune DC pe substrat, este sensibil mai mare fata de amplitudinea pe aria exterioara, nemodificata. De asemenea, in zonele care delimiteaza ariile

respective, amplitudinea are o scadere semnificativa, asemeni comportamentului granitelor de domenii feroelectrice. De asemenea, se observa si o diferenta de $\sim 180^\circ$ in faza raspunsului piezoelectric, la trecerea de la aria exterioara, nemodificata, la cea cu +5V si apoi la cea cu -5V tensiune aplicata pe substrat.

Spectrele de raze X confirma caracterul cristalin al unora dintre filmele subtiri depuse. Astfel, filmul depus la 193 nm apare ca amorf. Folosirea radiofrecventei conduce la formarea la unui film perovskitic orientat (111) cu o relativ buna distanta de coerenta cristalografica (largimea la semiinaltime a maximului de difractie este mica). Depunerea la 266 nm conduce la formarea unui film cu texturare tot (111) dar maximul este mai larg, deci distanta de coerenta cristalografica este mica. Adaugarea radiofrecventei nu imbunatateste cristalinitatea filmului : apare un maxim cu orientare (111) care este de mica intensitate si foarte larg.

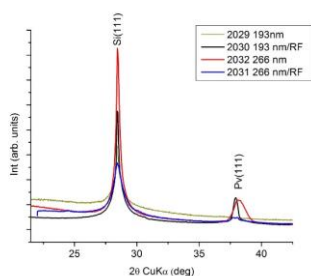
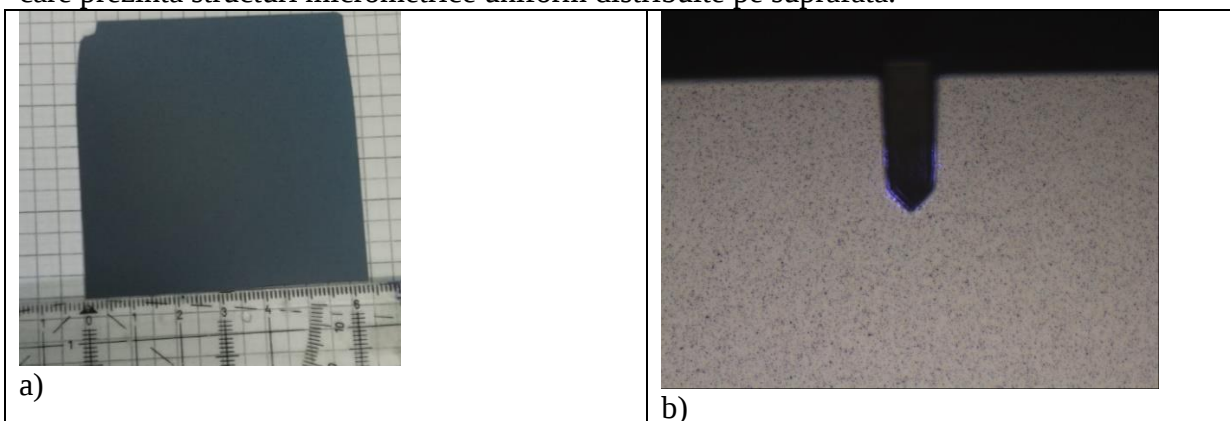
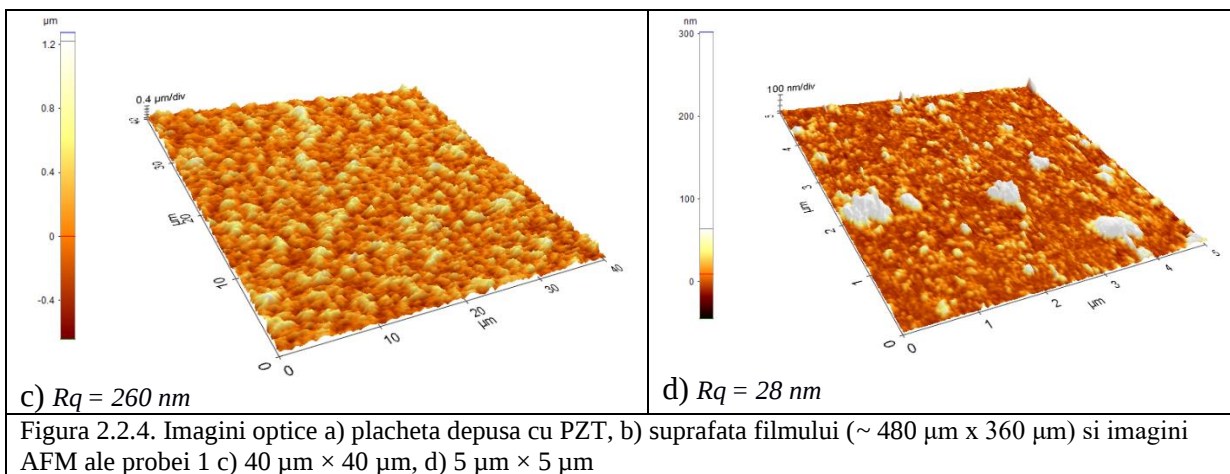


Figura 2.2.3 Spectre de raze X ale filmelor subtiri de PZT.

A fost instalat, aliniat si testat sistemul PLD pe arie mare. Placheta de Siliciu cu dimensiuni de 6,5 cm $\times$ 6,5 cm a fost acoperita complet de filmul de PZT, film uniform care prezinta structuri micrometrice uniform distribuite pe suprafata.





In concluzie, am obtinut pentru prima oara filme subtiri de PZT pe arie mare: sunt in curs experimente de optimizare a parametrilor de depunere pentru reproducerea pe arie mare a proprietatilor obtinute pentru straturile de PZT prezentate, realizate pe suprafete mici.

2.3 Fabricarea demonstratorului

Demonstratorul a fost fabricat in mai multe etape tehnologice folosind litografie optica si e-beam. In Fig. 2.3.1 prezentam realizarea demonstratorului pe placheta :

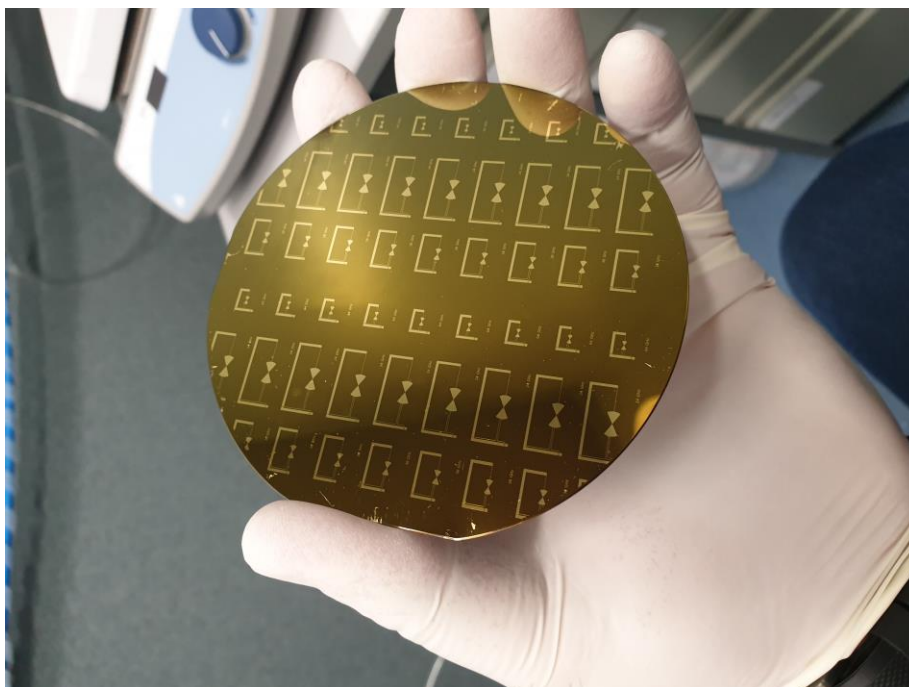


Fig. 2.3.1 Detectorul de camp electromagnetic la frecvente inalte realizat pe placheta $\text{HrZrO}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{HR Si}$ cu diametrul de 4 inch.

Realizarea demonstratorului implica mai multe etape, dupa cum urmeaza :

1. configurare canal grafena; in aceasta etapa se realizeza si markerele pentru litografie, se depune rezist pentru configurare. Canalul grafenic este format din doua dreptunghiuri unite de culoare inchise aflate in mijlocul imaginii optice. (Fig.2.3.2) Tot in aceasta etapa se perforeaza canalul grafenic pentru anumite FET-uri de pe placheta.

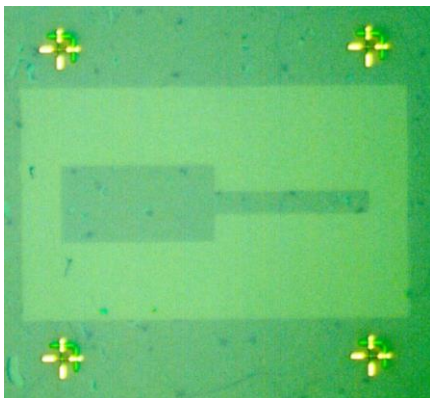


Fig. 2.3.2 Imagine optica - configurare canal de grafena

2. Configurarea sursei (S) si a drenei (D) si depunerea electrozilor.

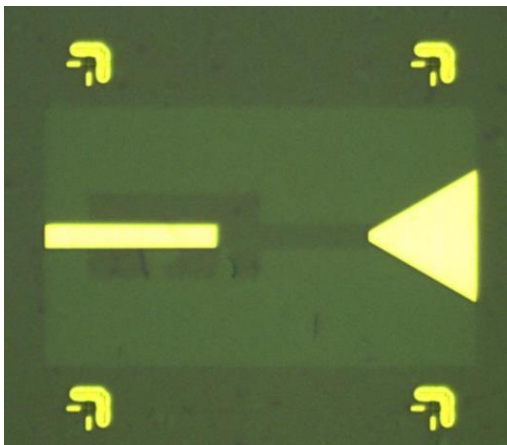


Fig. 2.3.3. Imaginea optica - configurarea sursei (S) si a drenei (D) si depunerea electrozilor.

3. configurare si depunere dielectric de poarta (HSQ) 40 nm grosime.

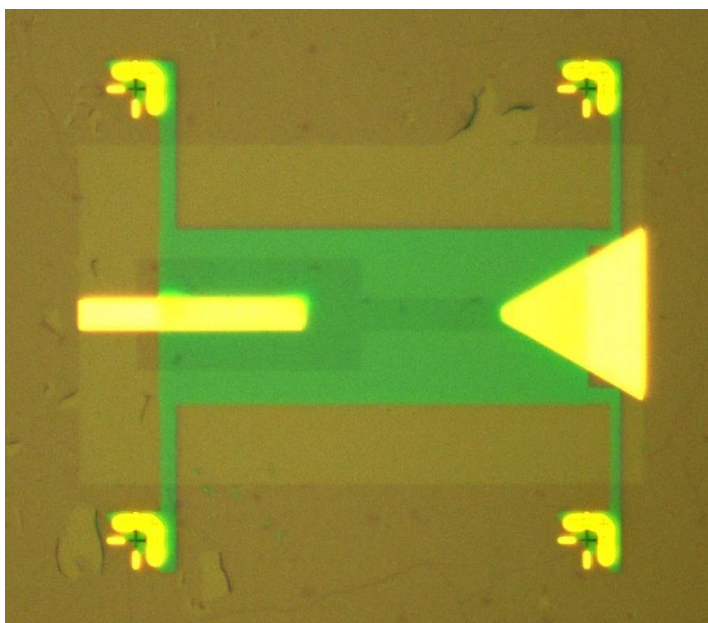


Fig. 2.3.4 Imagine optica –depunere dielectric de poarta.

4. Metalizarea portii

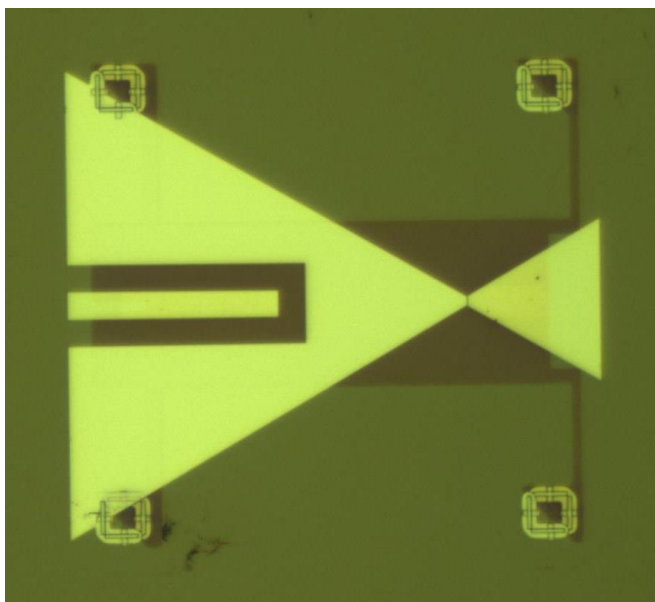


Fig. 2.3.5 Imagine optica –metalizarea portii.

Prezentam mai jos imaginea optica a tranzistorului obtinut, unde se vede poarta in configuratie “splitting gate”, si canalul grafenic plasat intre sursa si drena.

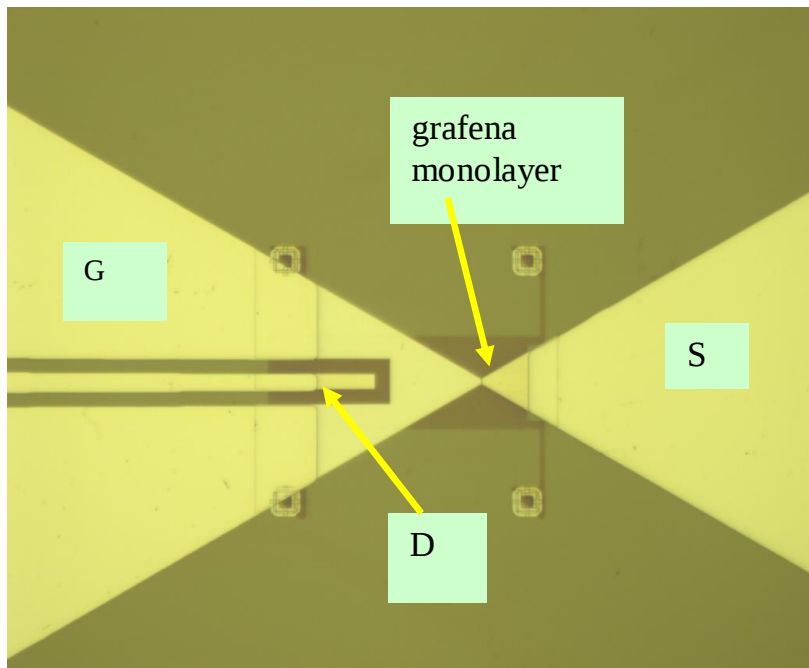
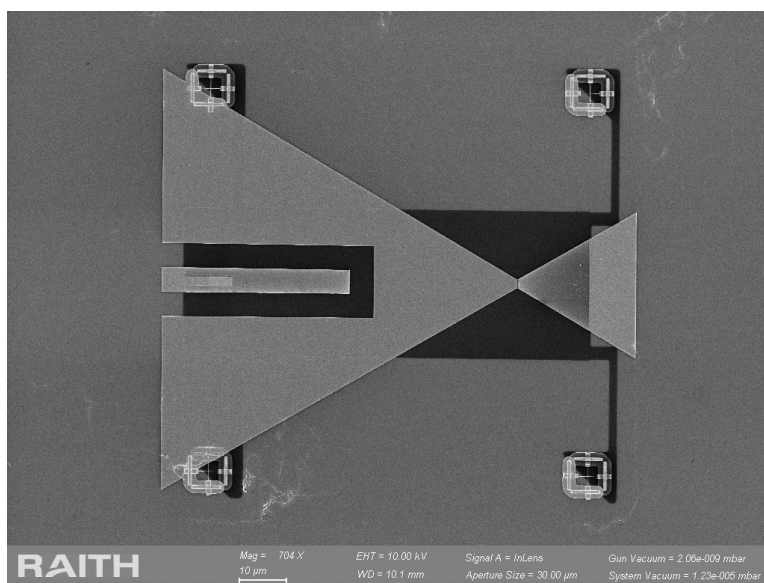
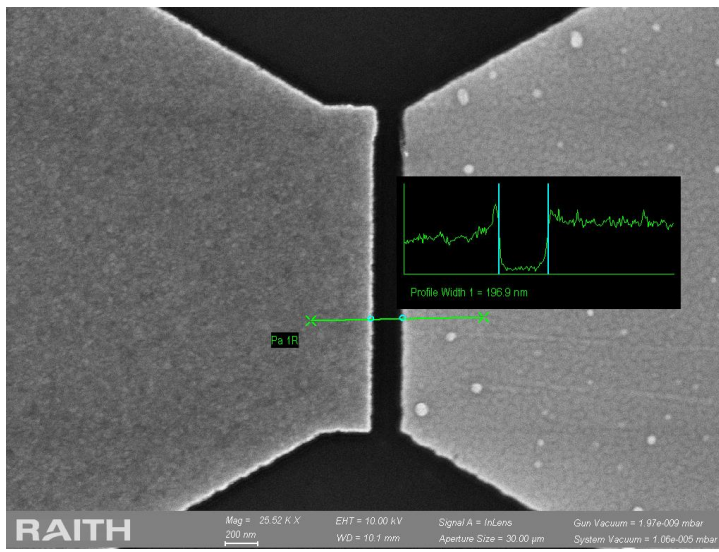


Fig.2.3.6 Imaginea detectorului FET bazat pe heterostructura grafena monolayer/HfZrO

In Fig. 2.3.7 a si b prezentam imaginile SEM din zona portii (a) si canalul dintre sursa si drena (b) . Lungimea canalului FET este de 200 nm si latimea 3 μm .



(a)



(b)

Fig. 2.3.7 Imaginile SEM (a) din zona portii (b) canalul dintre sursa si drena

2.4 Caracterizare in DC si la frecvente inalte.

In primul rand tranzistoarele de pe placheta au fost masurate cu sistemul Keithley 4200 pentru a determina caracteristicile in DC si anume $I_D - V_D$ (curent de drena –tensiune de drena la diferite valori ale tensiunii de poarta V_G) (Fig. 2.4.1) si $I_D - V_G$, la diferite tensiuni V_D (Fig. 2.4.2). In caracteristica $I_D - V_D$ observam ca este neliniara si ca tranzistorul FET se inchide la o tensiune de poarta de 3V. Este o demonstratie evidenta ca o banda interzisa s-a indus in tranzistor datorita efectului combinat al substratului feroelectric si al perforatiilor . Insa caracteristica care dicteaza neliniaritatea detectorului si care permite extragerea benzii interzise si a mobilitatii este caracteristica $I_D - V_G$. Observam mai intai ca aceasta caracteristica este neliniara si are histerezis , caracteristica specifica tranzistoarelor FET feroelectrice care sunt tranzistoare cu memorie.

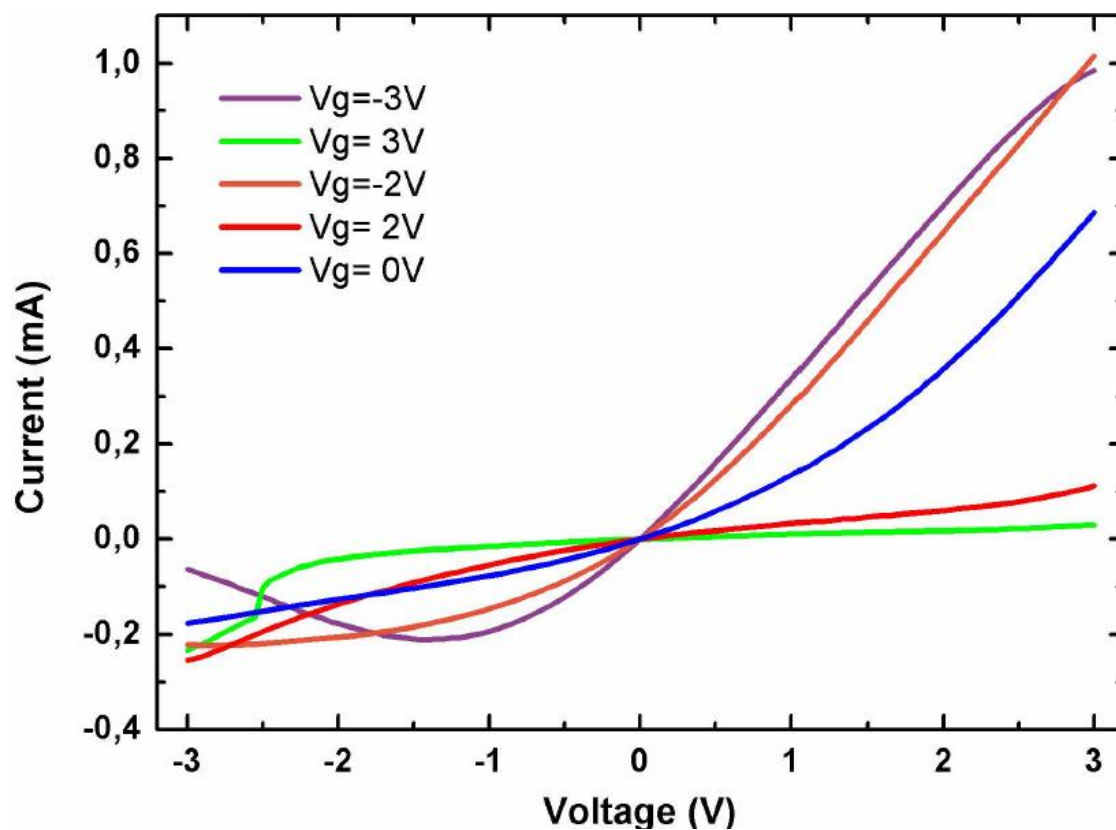


Fig. 2.4.1 Característica $I_D - V_D$.

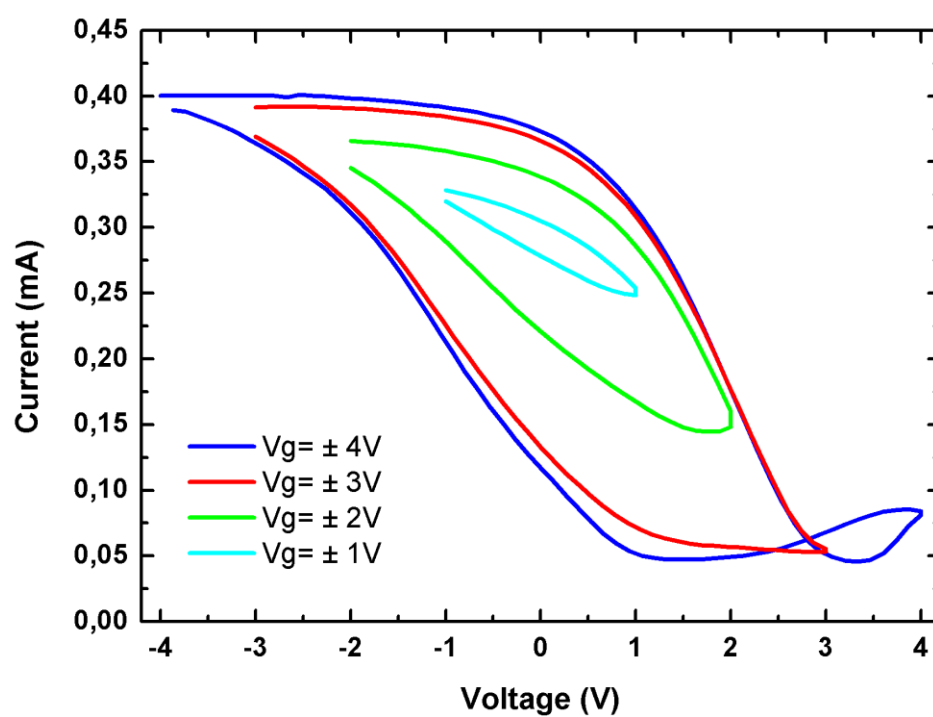


Fig. 2.4.2 Caracteristica $I_D - V_G$.

Observam ca dependenta $I_D - V_G$ este neliniara si din formula $I_{D,on} / I_{D,off} \propto \exp(E_g / k_B T)$ putem extrage E_g care este de 0.3 eV unde curentul on si off s-au extras la o tensiune de 0.2 V raportul lor fiind 10^3 . Transconductanta $g_m = \partial I_D / \partial V_G |_{V_D = const}$ este 1 mS la o tensiune de 1 V si mobilitatea tranzistorului definita ca $\mu = g_m L / W C_g |V_D|$ unde $C_g = \epsilon_0 \epsilon_r / t$, cu t grosimea stratului de grafena monolayer a rezultat ca $8900 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Din cele 46 detectoare FET 35 au aratat caracteristici asemanatoare, celelalte nu au functionat datorita metalizarii nesatisfacatoare.

Pentru testarea in microunde a structurilor in ghid de unda coplanar a detectoarelor FET in grafena s-au folosit unele structuri dintre cele de tip antena bow-tie cu frecventa de lucru la 38 GHz. Sistemul de masura Fig. 2.4.3 este alcatuit din:

- O antena horn la emisie (model SGH-22), cu banda de frecvente intre 33 si 50 GHz, si castig de 21 dBi;
- Un generator in microunde (model Agilent E8257D PSG Analog Signal Generator 250kHz–50GHz), conectat la antena horn, cu un nivel de putere la iesirea generatorului de pana la 16 dBm;
- Placheta cu antenele bow-tie, pusa pe o ambaza de Plexiglas (cu o grosime de 4,5 mm) cu un plan de metal (reflector) plasat pe spatele ambazei;
- Capetele de test in ghid de unda coplanar, conectate la porturile de drena si de grila ale dispozitivului;
- Un osciloscop (model Tektronix DPO 2024 Digital Oscilloscope), la carui intrare (unde este conectata si o sarcina de 100 k Ω) se aduce prin cablu coaxial semnalul detectat de catre GFET-ul integrat cu antena bow-tie respectiva;
- O sursa DC (model Agilent E3631A) pentru a polariza grila si / sau drena tranzistorului GFET.

In figura 2.4.4. aratam un detaliu al sistemului de masura, cu capetele pozitionate pe drena (sonda din stanga) si grila (sonda de sus).

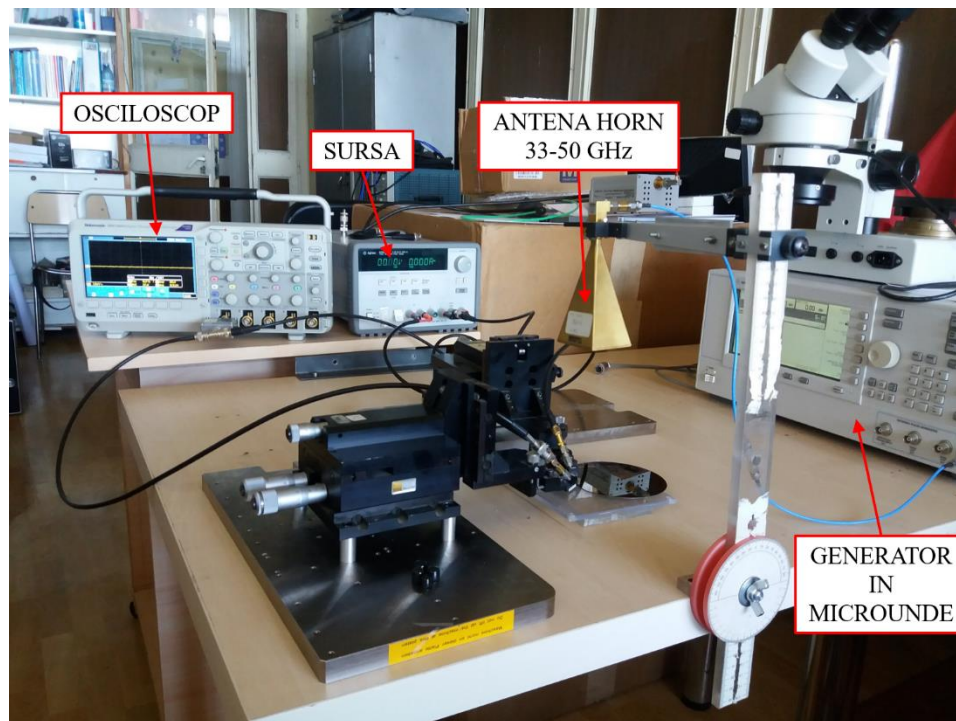


Fig. 2.4.3 : Sistemul de masura pentru antene bow-tie (cu frecventa de lucru la 38 GHz) integrate cu tranzistoare GFET.

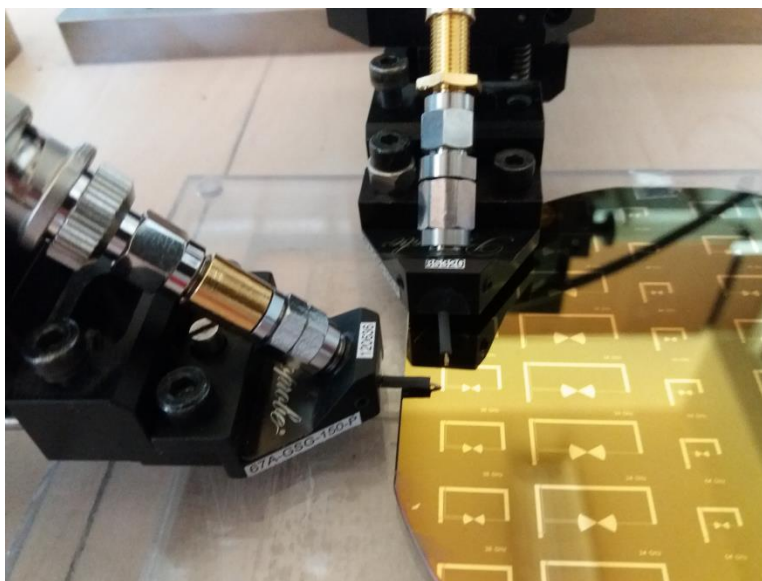


Fig. 2.4.4 : Detaliu al montajului de masura.

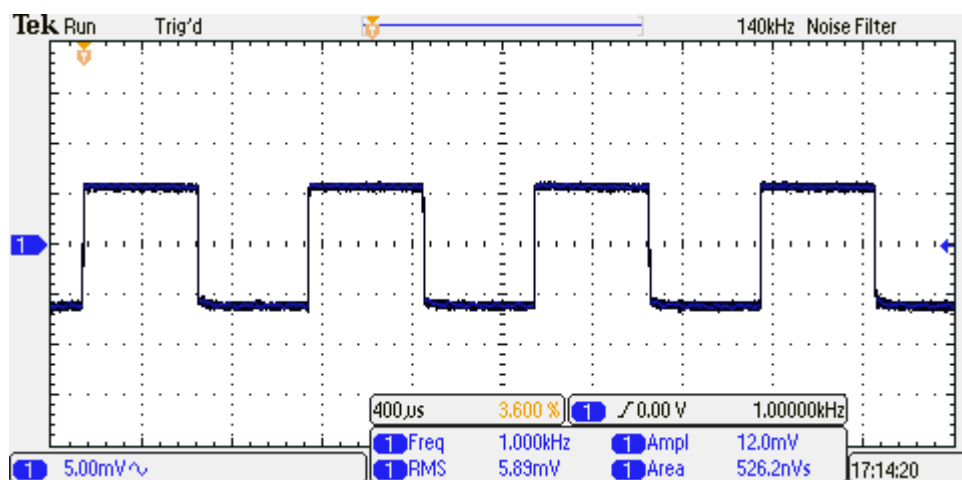
Odata ce sistemul a fost bine pus la punct, s-a procedat la caracterizarea in microunde a sistemelor integrate antena-GFET. Masuratorile au aratat ca detectarea

semnalului trimis de catre antenna horn nu este posibila in aceste conditii, situatie ce se datoreaza urmatoarelor motive:

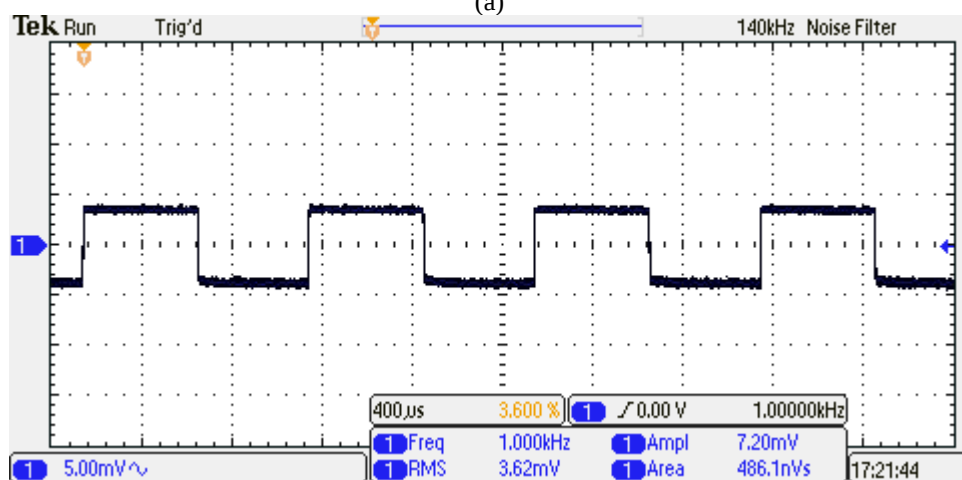
- La frecventa de 38 GHz, lungimea de unda in spatiul liber este de cca. 8 mm, ceea ce inseamna ca antenna horn trebuie plasata la cel putin 8 cm distanta fata de antenna bow-tie integrata cu GFET, astfel respectand conditiile de camp indepartat pentru o determinare riguroasa a caracteristicilor de radiatie ale antenei test (bow-tie);
- Atenuarea in spatiu liber la 38 GHz si la 8 cm distanta este de cca. 42 dB;
- Tinand cont de puterea la iesirea generatorului (16 dBm este valoarea maxima atunci cand se transmite un semnal modulat) si de castigul antenei horn, puterea emisa de catre antenna horn este sub 37 dBm (deoarece trebuie tinut cont inclusiv de atenuarea cablurilor care conecteaza generatorul in microunde cu antenna horn). Asta inseamna ca puterea care ajunge la detector este (mult) sub 0 dBm (estimam cel mult -12 dBm).

Tinand cont de motivele mentionate, pentru a demonstra faptul ca tranzistorul GFET poate functiona ca detector intr-o banda larga de frecvente, s-a modificat montajul de test conectand direct generatorul in microunde la portul de grila si citind pe osciloscop semnalul de iesire la portul de drena.

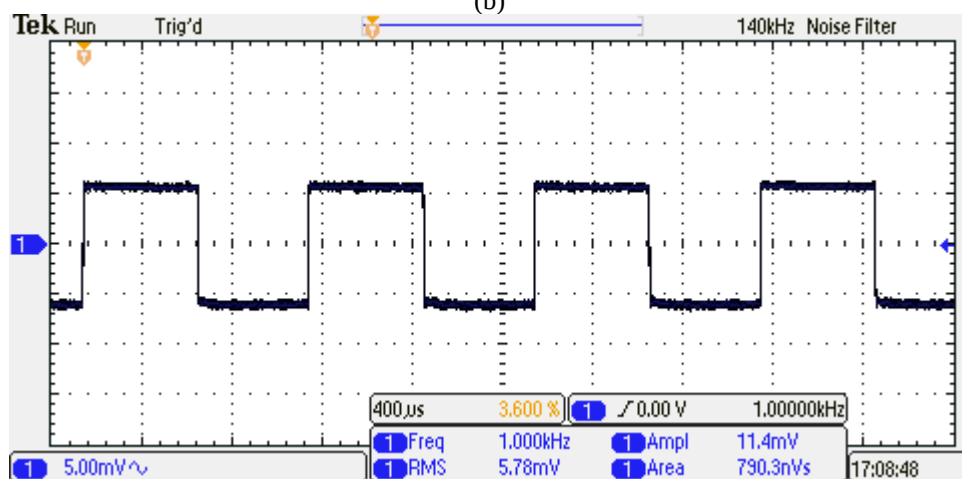
In detaliu, poarta a fost polarizata intre 0 V si ± 3 V, iar drena a fost polarizata intre $\pm 0,02$ V si $\pm 1,02$ V. Semnalul in microunde injectat prin poarta este o purtatoare modulata in amplitudine cu o secventa de pulsuri rectangulare si frecventa de modulare de 1 kHz. Masuratorile au dovedit ca tranzistorul GFET functioneaza ca detector intre 2 GHz si 12 GHz, cu cele mai bune performante la 4 GHz, dupa cum se vede din figurile 2.4.5 e-f la diferite frecvente. Tabelul 2 reprezinta o sinteza a performantelor detectorului, functie de frecventa, tensiune de poarta si tensiune de drena. In cazul figurilor 2.4. 5 a-d, este evident ca forma pulsurilor detectate este foarte bine definita si cu zgomot redus, pe cand la 6 GHz (figura 2.4.5 e) si la 12 GHz (figura 2.4.5 f) semnalul detectat, desi cu forma clara, este puternic atenuat si zgomotos.



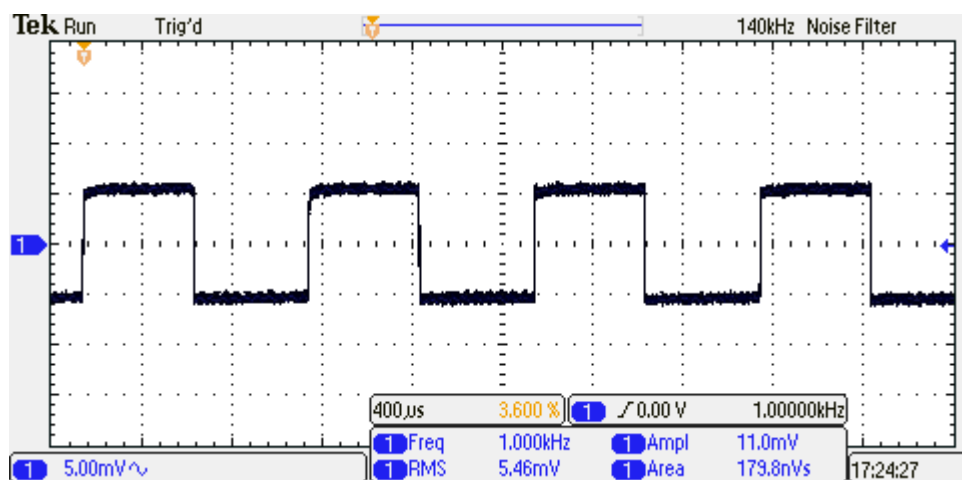
(a)



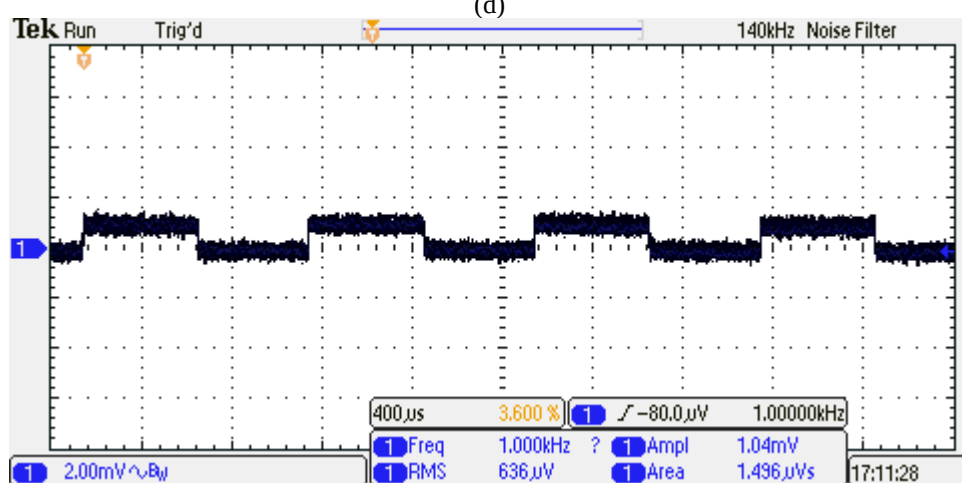
(b)



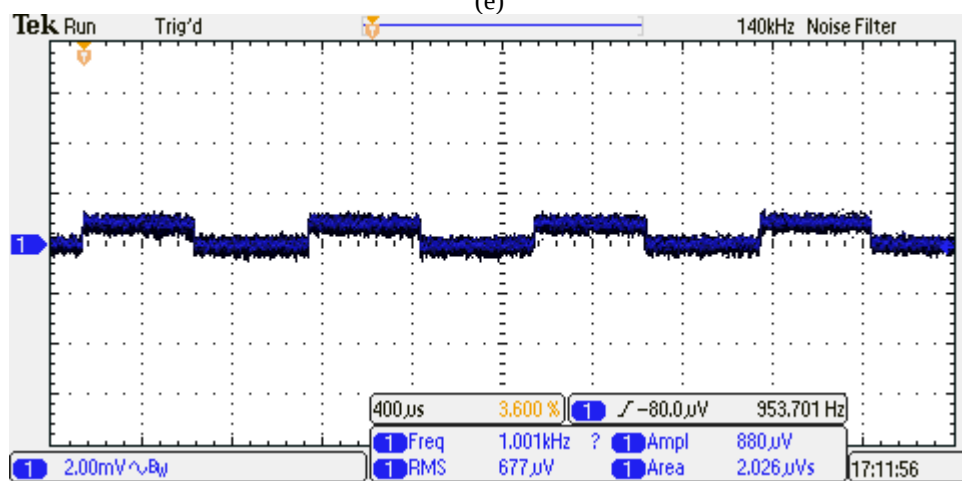
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 2..4.5 . : Capturile de ecran ale semnalului detectat cu osciloscop la iesirea drenei.

Tabel 2 Performantele detectorului FET grafena/HfZrO

Figura	Frecventa	Vg	Vd	Tensiune detectata
7a	4 GHz	0 V	+0,02 V	12 mV
7b	4 GHz	0 V	-0,02 V	7,2 mV
7c	4 GHz	+2 V	+1,02 V	11,4 mV
7d	4 GHz	-2 V	-1,02 V	11 mV
7e	6 GHz	+2 V	+1,02 V	1,04 mV
7f	12 GHz	+2 V	+1,02 V	0,88 mV

Rezultatele anterioare, in principal in legatura cu semnalul detectat la 6 GHz si la 12 GHz se pot explica prin faptul ca linia grilei are o latime de 40 μm si o lungime de 5,73 mm, ceea ce corespunde unei inductante de cca. 7,06 nH. Aceasta inseamna ca la frecvente de ordinul GHz se poate ajunge la o reactanta de ordinul k Ω (figura 2.4.6.); cum a fost explicat mai sus, scopul proiectarii detectorului a fost acel de a folosi linii subtiri pentru grila si drena, care sa asigure izolarea in microunde. Aceasta reactanta introduce o atenuare suplimentara pentru semnalul in microunde (figura 2.4.7), ceea ce justifica valorile mici ale tensiunii detectate prin drena.

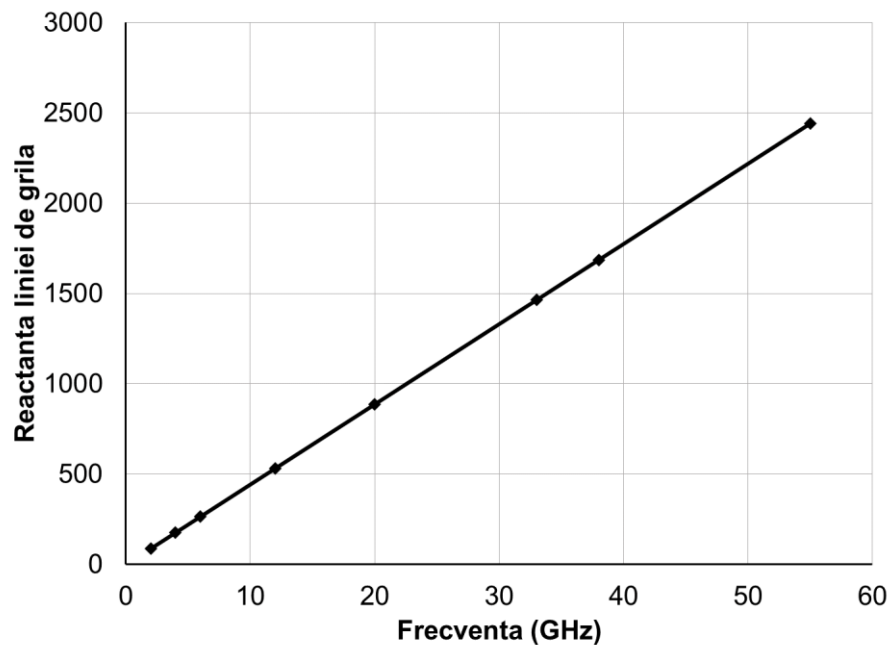


Fig. 2.4.6 Reactanta liniei de poarta functie de frecventa.

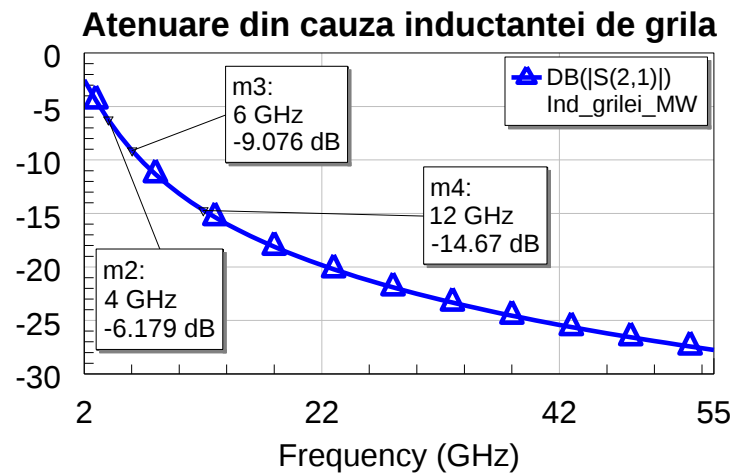


Fig. 2.4. 7: Atenuarea in frecventa introdusa de linia subtire care conecteaza poarta la tranzistorul GFET.

Cu aceasta ocazie, am determinat tendinta variatiei tensiunii de drena V_d functie de tensiunea de poarta V_g (Fig.2.4.8), cand nu se aplica tensiune de polarizare pe drena. Comportamentul este clar aproximativ linear intre 0,5 V si 1 V. Valorile tensiunii de drena ating cel mult 8 mV.

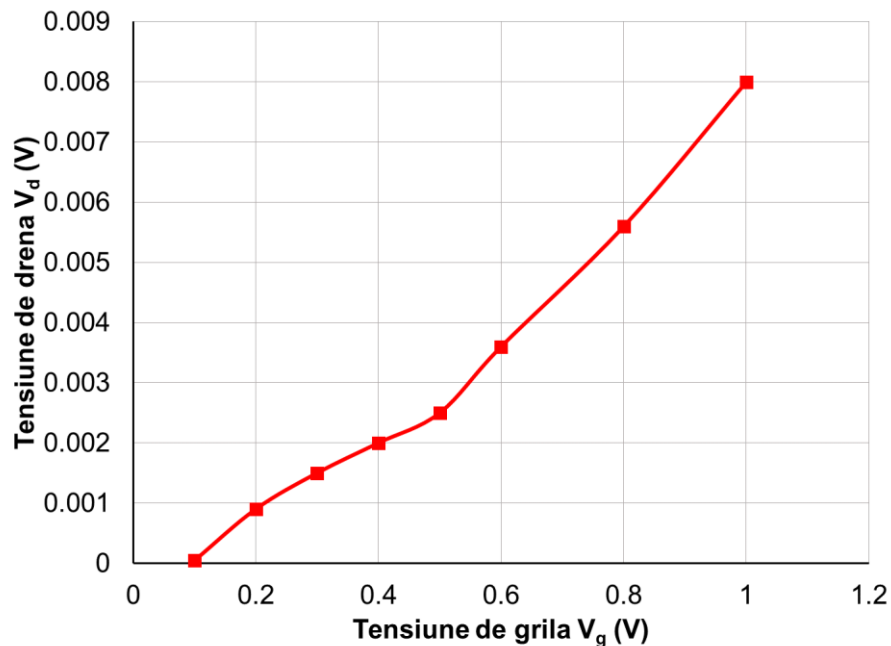


Fig. 2.4.8 : Tensiunea de drena functie de tensiunea de poarta.

Detectorul FET grafena/feroelectric functioneaza satisfactor intr-o banda larga de frecventa unde au loc majoritatea comunicatiilor 5G sau 6 G. Daca dorim ca banda de frecventa sa creasca, liniile subtiri utilizate pentru demonstrarea detectiei undelor electromagnetice la frecvente inalte utilizand FET grafena/ HfZrO trebuie inlocuite integral cu linii de tip ghid CPW pentru a avea o atenuare constanta a reactantei portii de maxim -5 dB intre 2 si 60 GHz.

3. Proiectarea si simularea circuitelor nanoelectronice bazate pe heterostructuri grafena/feroelectrice pentru circuite logice si neuromorfic

Memristorul este o memorie rezistiva cu doua terminale care are o caracteristica curent-tensiune de tip histerezis [9] ;dupa terminarea unei curbe de histerezis tensiunea este scanata din nou pe un interval de timp fixat si curentul creste sau scade asa cum se arata in Fig. 3.1, ceea ce rata ca conductanata creste sau scade in timp –comportare analoaga cu o sinapsa neuronală. Cei mai cunoscuti memristori sunt cei din oxizi de forma MO_x , unde M este un metal iar x concentratia de oxigen. Efectul de memorie apare datorita dinamicii filamentelor conductive date de vacantele de oxigen [9]. In figura 3.1 este prezentat un astfel de memristor si dependenta curent-tensiune.

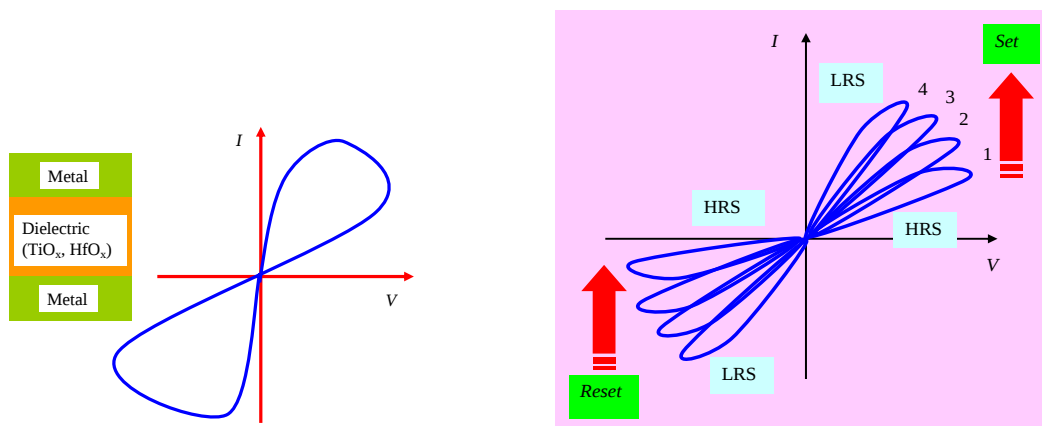


Fig. 3.1. Memristorul cu doua terminale.

In ultimii ani au aparut insa memtranzistoare – de fapt memristoare cu trei terminale. Primele bazate pe FET-uri unde bucati de MoS_2 multilayer formeaza canalul si

care produc efecte memristive la tensiuni de drena de 80 V ,tensiuni prea mari pentru a putea fi utilizati in electronica [10], [11], [12].

Descoperirea importanta pe care am facut-o este ca un memtranzistor se comporta si ca un circuit logic ,si ca un memristor functie de parametrul de control tensiunea de poarta V_{TG} -top gate si/sau V_{BG} -backgate sau tensiunea de drena V_D [13]

Astfel intr-un memtranzistor feroelectric dependenta curent de drena I_D functie de V_D la diferite tensiuni de poarta este utilizata pentru functia memristiva in timp ce dependenta $I_D - V_{TG}, V_{BG}$ descrie mai multe stari logice (diferite valori ale rezistentei functie de tensiunea de poarta).Acest ultim aspect l-am vazut in capitolul 2 la curbele $I_D - V_{TG}$ formate din mai multe curbe de tip histerezis ale FET detector de frecvente inalte unde in Fig. 2.4.2 $I_D - V_{TG}$ se disting 4 niveluri de rezistente de la valori mici numite R_{ON} pana la mari denumite R_{OFF} fiecarui nivel putand sa ii atribuim valorile 0 si respectiv 1. Prima configuratie de memtranzistor feroelectric este cea din Fig. 3.2. [13]

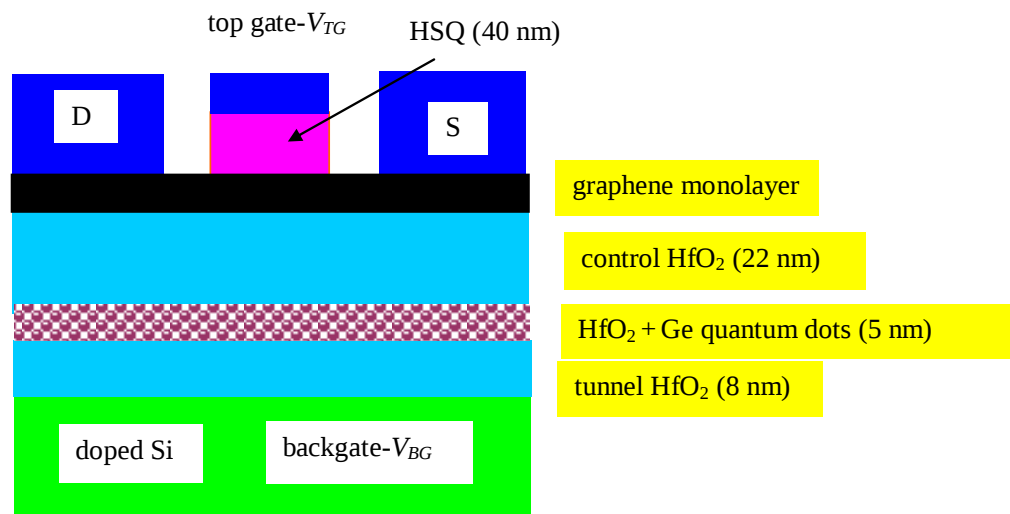


Fig. 3.2 Memstranzistor feroelectric [13].

Demonstrarea experimentală a fenomenelor revine fazei următoare , ceea ce putem spune este ca un astfel de memtranzistor are tensiunea de poarta modificata datorita polarizarii feroelectrice astfel :

$$V_{G,eff} = V_G - V_D + P^{\pm}(V_G)/C_G \quad (3.1)$$

unde C_G este capacitatea portii ,si :

$$P^{\pm}(E) = \varepsilon_0 \varepsilon_r + P_s / 2[\tanh(E + E_C) / \delta + \tanh(E - E_C) / \delta] \quad (3.2)$$

unde δ este un parametru de material, iar indicii s si c se refera la campurile electrice corespinzatoare zoenei de saturatie si coercitive. Rezulta astfel ca rezistenta de drena este data de :

$$R_T = R_C + [\mu e(n_0^2 + n(V_{eff,G}))]^{-1} \quad (3.3)$$

Tinand cont ca $I_D = V_D / R_T$ rezulta ca polarizarea feroelectrică c produce R_{ON} si R_{OFF} carora li se poate atribui starile logice de 1 si 0. Asa cum vom arata la faza ulterioara e nevoie de 1 singur FET feroelectric pentru a produce functii logice prin comandare cu pulsuri a V_{TG}, V_{BG} [14] . Ne-am impus sa lucram la tensiuni de drena intre - 2-2 V si tensiuni de poarta pana la 10 V. In acest caz primul memtranzistor feroelectric are dimensiunile aratate in Fig. 3.3 si anume latimea portii 250 nm lungimea portii de 500 nm si grosimea dielectricului (HSQ) de 40 nm.

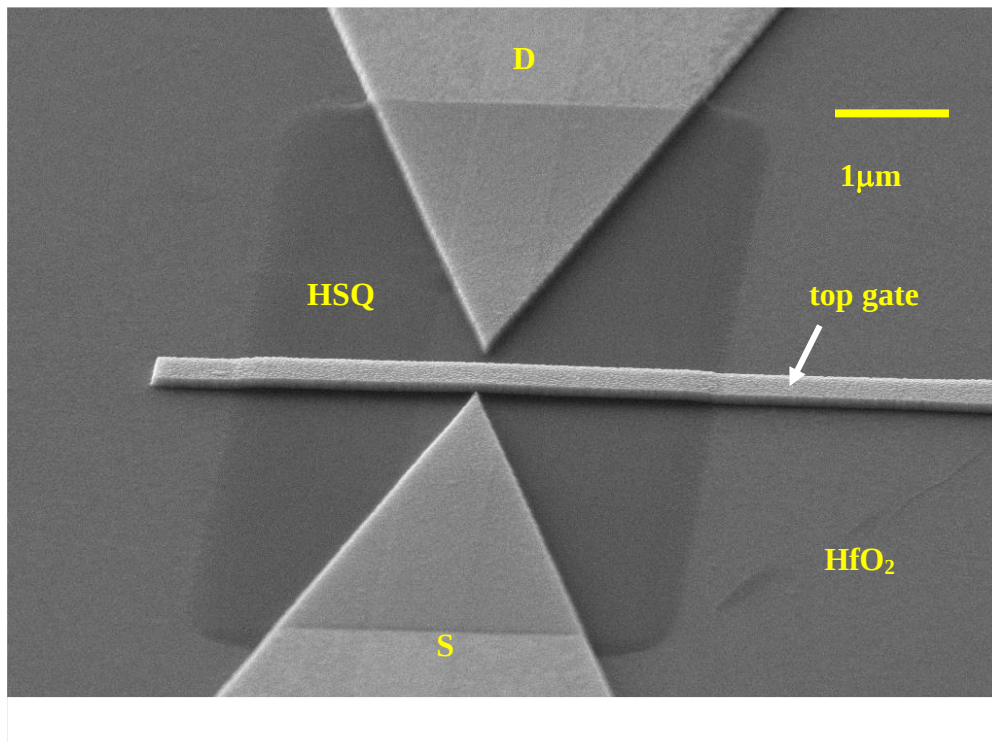


Fig. 3.3 Memtranzistor cu feroelctric HfO₂ dopat cu Ge (quantum dots).

Un model de memristor se poate construi folosind formula :

$$i(t) = \frac{v(t)}{R_{ON}\gamma(t) + R_{OFF}[1 - \gamma(t)]} \quad (3.4)$$

unde $\gamma(t)$ este fracțiunea spinilor în starea jos(down) [15].

Prezentăm mai jos evoluția în timp a curentului la diverse tensiuni

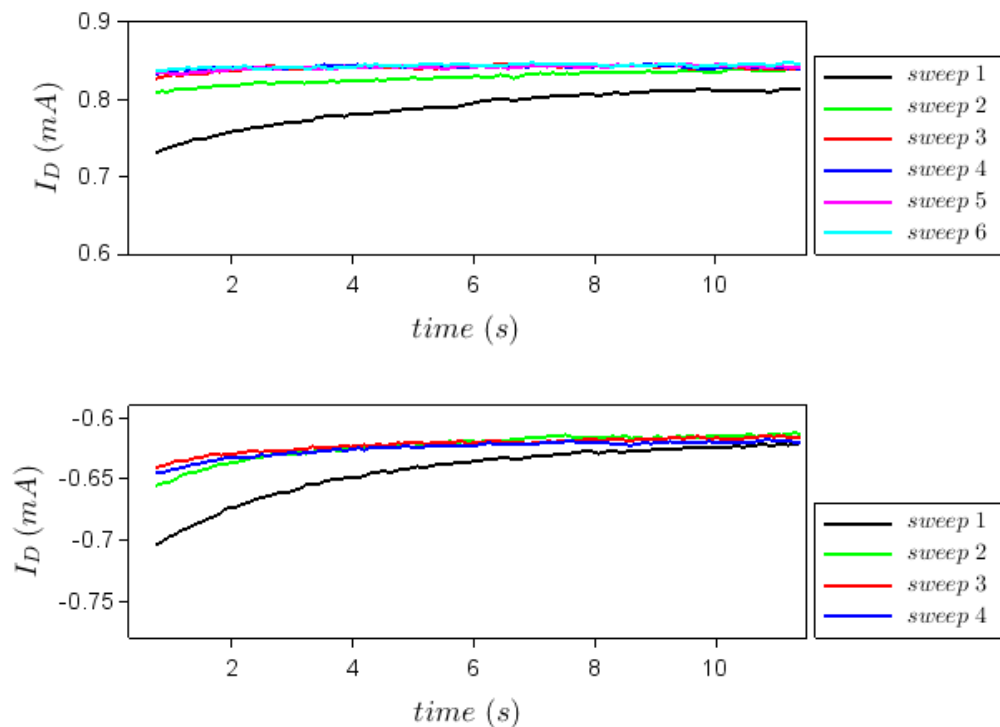


Fig . 4.4 Curent de drena la tensiune de drena +2 V (sus) si -2 V (jos).

Se observa efectul de memorie al memristorului la masuratori succesive in timp.

Modelarea se poate realiza folosind calcule atomistice , si analizam al doilea tip de memristor feroelectric realizat prin perforari de gauri de dimesniuni 20 nm pe toata lungimea canaluli grafenic transferat pe HfZrO [7].

Dispozitivul de tip memristor este un sistem cu doua terminale, in care elementul activ este o nanopanglica de grafena (Fig. 3.5), avand delimitat un segment in care se constituie o zona de trapare de sarcina, ca efect al inducerii defectelor controlate (nanopatterning). Terminalul de poarta stabileste, prin intermediul stratului feroelectric, bariera de potential intre terminalele sursa si drena. Prin aplicarea potentialului de poarta V_G , pozitiv sau negativ in raport cu masa (e.g. contactul sursa), se realizeaza acumulari de sarcina, respectiv golirea acestora, in/din stratul activ.

Pentru a pune in evidenta efectul RS se au in vedere doua tipuri de experimente:

- a). Se baleiaza tensiunea sursa-drena in intervalul $(0, V_{D,max})$ pastrand constant potentialul de poarta V_G ;
- b). Se baleiaza potentialul de poarta V_G , pentru un potential de drena, V_D , fixat;

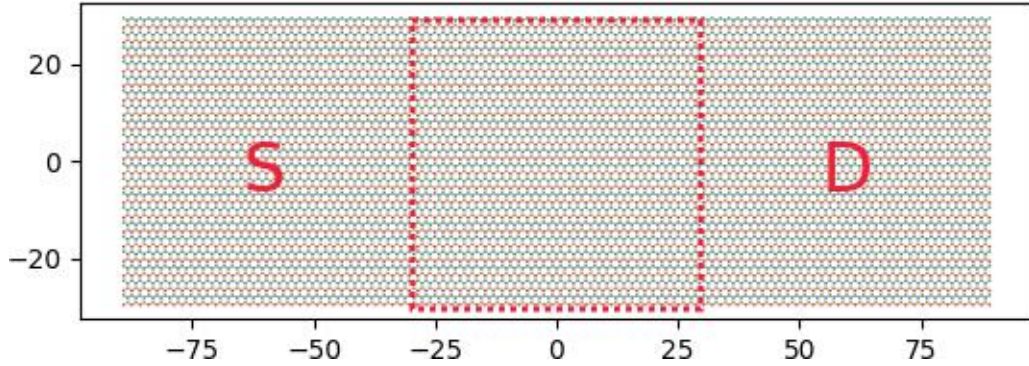


Fig. 3.5 Elementul activ al dispozitivului de tip memristor: nanopanglica de grafena (40-GNR) in care este delimitata o regiune patrata 60×60 nanostructurata (unitate $a = 1.42$ Å), unde are loc preponderent traparea de sarcina (regiunea nanostructurata).

Traparea sarcinilor produce o bariera de potential care influenteaza curentul de drena. Intr-o prima aproximatie, traparea sarcinilor este modelata utilizand un potential de tipul:

$$V_{\text{trap}}(V_G) = V_{\text{FE}}(V_G) \times \tanh(t/\tau) \quad (3.5)$$

ceea ce presupune o saturatie a nivelelor de trapare si un timp caracteristic, care, in general, poate depinde si de tensiunea aplicata. In Eq. (3.5), V_{FE} este potentialul la suprafata feroelectricului, iar τ este timpul caracteristic de relaxare.

Efectul histeretic (E,P) generat de stratul feroelectric pentru V_G baleiat in intervalul $(-V_{G0}, +V_{G0})$, este modelat prin relatia:

$$V_{\text{FE}}(V_G) = V_{G0} \times \tanh[\alpha(V_G - \Delta V_{G0})] \quad (3.6)$$

in care V_{G0} este potentialul de poarta initial, $\alpha = 0.025$ este o constanta, iar $\Delta V_{G0} = V_{G0}/2$. Astfel este descrisa o curba tipica de histerezis.

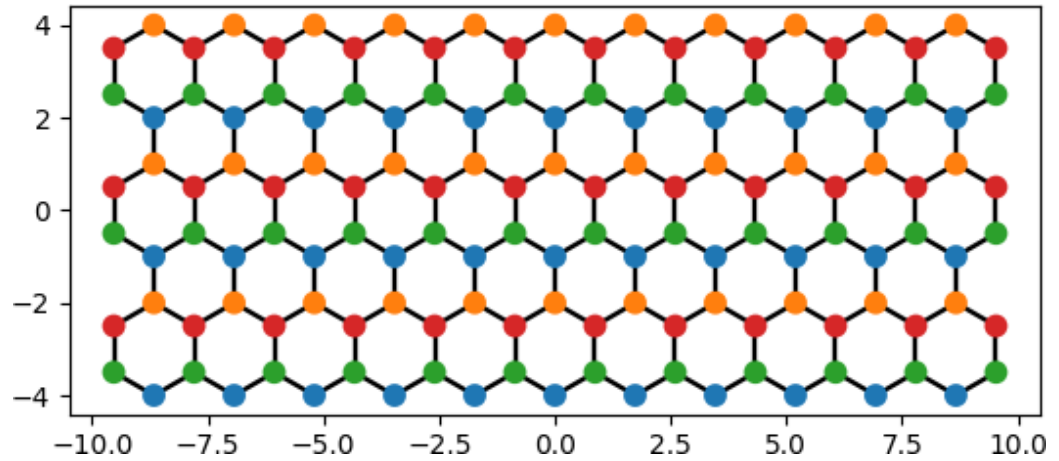
Transportul de sarcina este influentat de potentialul generat de sarcina trapata. Caracteristicile I-V sunt calculate utilizand un model de tip *tight-binding*, care este fezabil pentru sisteme cu un numar relativ mare de site-uri, in comparatie cu o abordare

de tip NEGF-DFT. Pentru a calcula curentul de drena, in regim de transport coerent, este utilizata relatia Landauer-Buttiker:

$$I_D = \frac{2e}{h} \int dE T(E) [f_{FD}(E, \mu_S) - f_{FD}(E, \mu_D)] \quad (3.7)$$

Potentialele *on-site* includ potentialul generat de sarcinile trapate, care depinde de potentialul de poarta V_G , intr-o prima aproximatie, pentru a modela defectele structurale. Prin analiza caracteristicilor I-V de tipul $I_D(V_D)$ pastrand V_G constant si $I_D(V_G)$ la V_D fixat se pun in evidenta proprietatile caracteristice ale unui dispozitiv de tip memristor.

Pentru calibrarea modelului de tip tight-binding sunt efectuate calcule preliminare pentru panglica de grafena ideala, de tip 6GNR indicata in Fig. 4.6



(a)

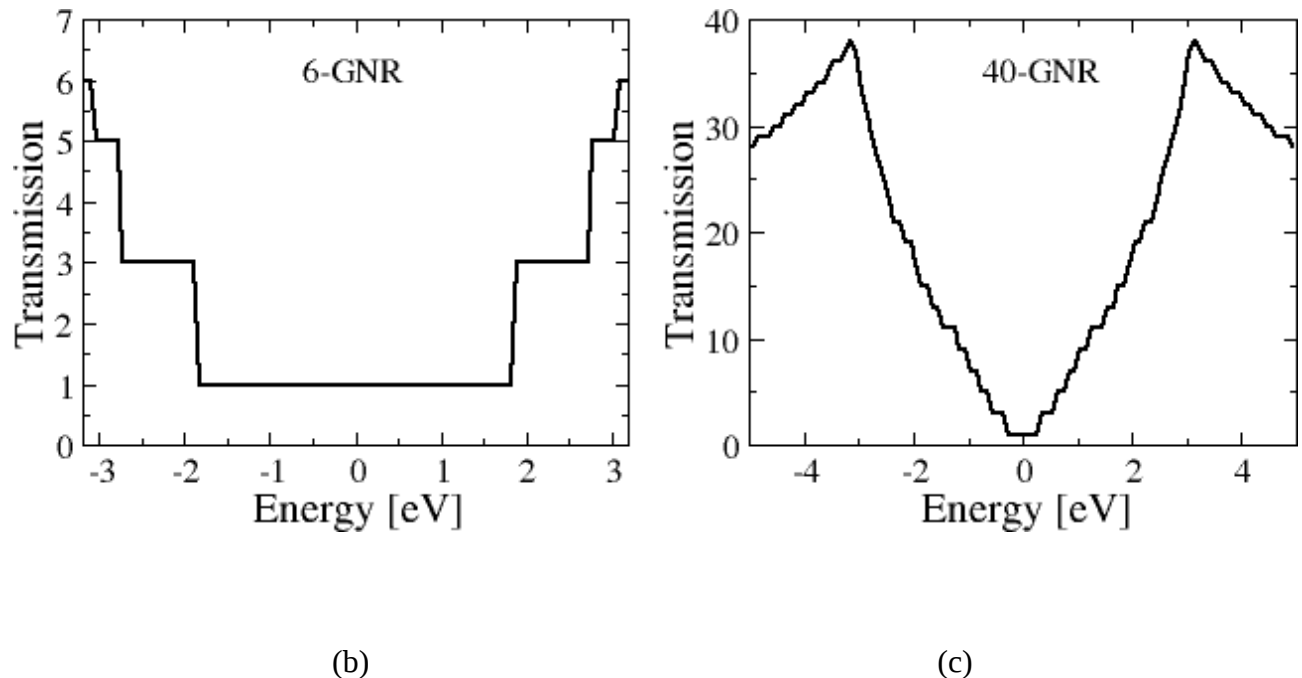


Fig.4.6. (a) Nanopanglica de grafena ideala 6-GNR. Functii de transmisie pentru sisteme ideale 6-GNR (b) si 40-GNR (c).

Funcțiile de transmisie obținute pentru sistemul 6-GNR corelate cu rezultatele obținute în Ref. [2]. Pentru această lățime a nanopanglicii, efectele de confinare sunt vizibile în caracteristica în trepte a funcției de transmisie [Fig. 4.6 (b)]. Totuși, pentru o mai bună corelație cu dispozitivul experimental, considerăm o nanopanglica mai largă, 40-GNR, pentru care funcția de transmisie se apropie de limita sistemului larg, indicată în Fig. 4.6 (c).

Aplicând tensiunea $V_G = 0.3V$ pe electrodul de poartă, se urmărește caracteristica I_D-V_D efectuând un număr de 10 cicluri în intervalul $[0, V_{D,max}]$. Potențialul de drenă este variat cu o rată constantă, atingând valoarea maximă $V_D = 0.45 V$. În Fig. 3.7 (a) se observă o variație importantă la primul ciclu de scanare, între caracteristica *forward* $[0, V_D]$ și caracteristica de *reverse* $[V_D, 0]$. Această variație se datorează sarcinilor trapate care induc o barieră de potențial. Totuși, odată cu saturarea nivelelor, se ajunge la o plafonare, ceea ce conduce la o diminuare a efectului $I-V$ histeretic și în, în final, la apariția unei caracteristici staționare. Prin contrast, un potențial negativ pe poartă, $V_G = -0.3V$, induce un proces de epuizare a sarcinilor trapate, care poate conduce la o creștere la curentului de drenă, prin diminuarea barierei de potențial creată de acestea, așa cum este

indicat in Fig. 3.7.(b). In mod similar se atinge caracteristica stationara, dupa un numar de cicluri, dar pentru o valoare mult mai ridicata a curentului de drena fata de situatia anterioara.

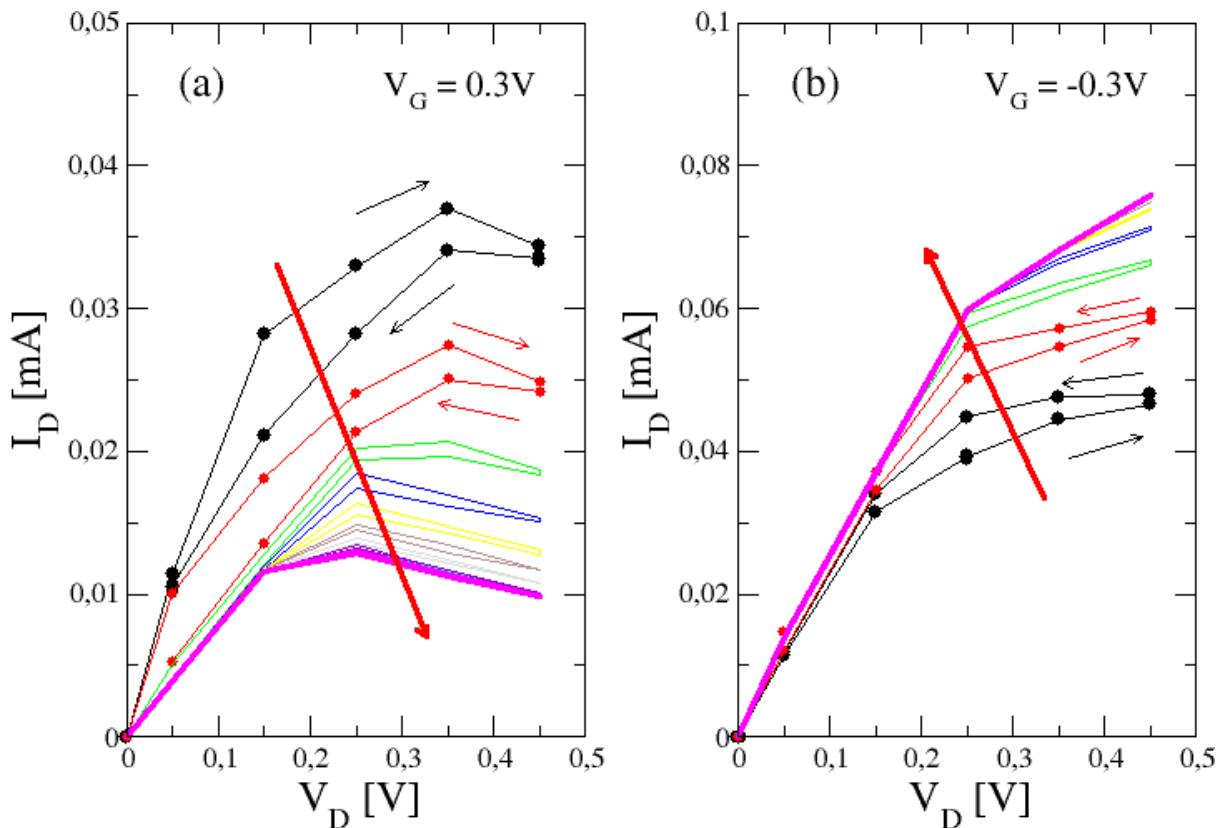


Fig. 3.7 . Caracteristici I_D - V_D pentru potientiale de poarta (a) $V_G=0.3V$ si (b) $V_G= -0.3V$. Ordinea parcurgerii ciclurilor este indicata prin sagetile rosii ingrosate.

In continuare, sunt analizate modificarile induse de variatia potentialului de poarta, V_G , mentinand constant potentialul de drena, V_D . In aceasta situatie se pune direct in evidenta efectul histeretic produs de polarizarea stratului feroelectric. Potentialele on-site sunt ajustate prin intermediul potentialului de poarta si a polarizarii feroelectrice, ceea ce se evidentiaza prin caracteristicile I_D - V_G in Fig. 3.8 . Curentul de drena reflecta astfel modificarea polarizarii feroelectrice, si nu in mod direct a tensiunii de poarta.

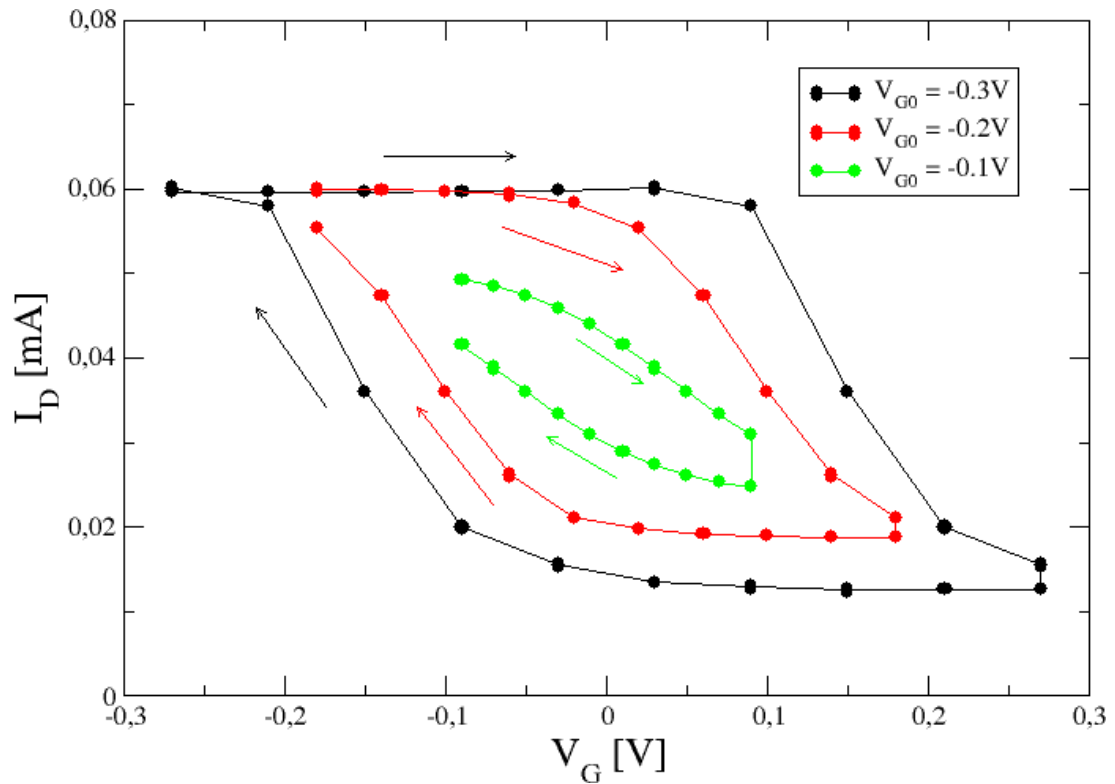


Fig. 3.8 Caracteristici I_D - V_G

Concluzii

Ne-am atins obiectivele fazei din 2020 in conditii extrem de dificile. S-au publicat 6 articole ISI si s-a participat on-line la o conferinta IEEE MTS de foarte mare prestigiu, lucrarea avand statut de lucrare invitata.

Referinte

- [1] S.Dang , O.Amin , B. Shihada and M-S Alouini, What should 6G be? Nature Electronics 3, 20-29 (2020).
- [2] R A Lewis, A review of terahertz detectors, J.Phys. D52 433001(2019)
- [3] L. Vicarelli., M.S. Vitiello, D. Coquillat, A. Lombardo, A.C. Ferrari, W. Knap, M. Polini, V. Pellegrini, and A. Tredicucci, Graphene field-effect transistors as room-temperature terahertz detectors, Nature Materials 11, 865-871 (2012).
- [4] A Zak, M. A. Andersson, M. Bauer, J. Matukas, A Lisauskas, H. G. Roskos, and J. Stake, Antenna-integrated 0.6 THz FET direct detectors based on CVD graphene, Nano Lett. 14, 5834-5838 (2014).

- [5] Y. Zhang, V. W. Brar, C. Girit, A. Zettl, M. F. Crommie Origin of spatial charge inhomogeneity in graphene, *Nature Physics* 5, 722–726 (2009).
- [6] M. Dragoman, A. Dinescu, F. Nastase, A. Moldovan, D. Dragoman, Graphene bandgap induced by ferroelectric HfO₂ doped with Zr (HfZrO), *Nanotechnology* **31** 275202(2020).
- [7] M. Dragoman, A. Dinescu, F. Nastase, D. Dragoman, Memtransistors based on nanopatterned graphene ferroelectric field-effect transistors, *Nanomaterials* 10, 1404 (2020).
- [8] S.J. Brun, M.R. Thomsen, and T.G. Pedersen, Electronic and optical properties of graphene antidote lattices: comparison of Dirac and tight-binding models, *J. Phys.: Cond. Matter* 26, 265301 (2014).
- [9] L Chua, If it's pinched it's a memristor, in *Memristors and Memristive Systems*, Tetzlaff R (Ed). Springer:17-90 (2014).
- [10] V. K. [Sangwan](#), H.-S. [Lee](#), H. Bergeron, I. [Balla](#), M. E. Beck, K.-S. Chen, M. C. Hersam, Multi-terminal memtransistors from polycrystalline monolayer molybdenum disulfide, **2018**, *Nature* 554, 500.
- [11] L. Wang, W. Liao, S. L. Wong, Z. G. Yu, S. Li, Y.-F. Lim, X. Feng, W. C. Tan, X. Huang, L. Chen, L. Liu, J. Chen, X. Gong, C. Zhu, X. Liu, Y.-W. Zhang, D. Chi, K.-W. Ang, Artificial synapses based on multiterminal memtransistors for neuromorphic application, *Advanced Functional Materials* **2019**, 29, 1901106.
- [12] J. Jadwiszczak, D. Keane, P. Maguire, C. P. Cullen, Y. Zhou, H. Song, C. Downing, D. Fox, N. McEvoy, R. Zhu, J. Xu, G. S. Duesberg, Z.-M. Liao, J. J. Boland, H. Zhang, MoS₂ memtransistors fabricated by localized helium ion beam irradiation, **2019**, *ACS Nano* 13, 14262-14273
- [13] M. Dragoman, A. Dinescu, D. Dragoman, C. Palade, A. Moldovan, M. Dinescu, V.S. Teodorescu, M.L. Ciurea, Wafer-Scale graphene-ferroelectric HfO₂/Ge-HfO₂/ HfO₂ transistors acting as three-terminal memristors, *Nanotechnology*, 2020, 31 495207

- [14] C. Liu , H. Chen , X. Hou , H. Zhang , Jun Han , Yu-Gang Jiang , X. Zeng , D. Wei Zhang , P. Zhou , Small footprint transistor architecture for photoswitching logic and in situ memory , 2019, *Nature Nanotechnology* 14, 662.
- [15] A. Chanthbouala, V. Garcia, R. O. Cherifi, K. Bouzehouane, S. Fusil, X. Moya, S. Xavier, H. Yamada, C. Deranlot, N. D. Mathur, M. Bibes, A. Barthélémy, and Julie Grollier, A ferroelectric memristor, *Nature Mat.* 11, 860-864 (2012).