

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 2 2019 : Heterostructuri grafena/feroelectrice

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

1. Introducere

Circuitele de inalta frecventa si neuromorfe, 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. 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 neuromorfe 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 neuromorfe, 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 consortiu din 3 institute nationale de cercetare-dezvoltare si cea mai importanta universitate din Romania, care au infrastructura moderna necesara.

Pentru anul 2019 ne-am propus, conform planului de realizare cateva obiective enumerate mai jos care au fost atinse si anume :

1. Cresterea heterostructurilor grafena/feroelectric

1.1 Cresterea feroelectricilor (HfO_2) prin metoda ALD la nivel de placheta si caracterizari morfologice si structurale

1.2 Cresterea feroelectricilor (HfO_2) prin metoda magnetron sputtering la nivel de placheta si caracterzari morfologice si structurale

1.3 Cresterea feroelectricilor (PZT) prin metoda PLD la nivel de placheta (max.) 2 inch si caracterizari morfologice si tructurale

1.4 Transfer grafena pe feroelectrici

1.5 Caracterizari ale heterostructurilor grafena/feroelectrici

2. Proiectarea si simularea dispozitivelor nanoelectronice bazate pe heterostructuri grafena/feroelectric

2.1 Simulari atomistice ale heterostructuri grafena/feroelectrici

2.2 Simulari privind detectia frecventelor foarte inalte bazate pe antene si tranzistoare FET grafena/feroelectric

1. Cresterea heterostructurilor grafena/ferroelectric

1.1 Cresterea feroelectricilor (HfO₂) prin metoda ALD la nivel de placheta si caracterizari morfologice si structural.

HfO₂ este un dielectric aflat in aparatura pe care o utilizam zilnic fiind dielectricul de poarta al tranzistoarelor FET utilizate in calculatoare, laptopuri , telefoane mobile. Pentru a micsora dimensiunile circuitelor nanoelectronice HfO₂ a fost dopat cu diversi dopanti pentru a-i creste permitivitatea dielectrica [1]-[3]. Doparea HfO₂ implica insa transformari structurale : faza monoclinica se transforma in faza ortorombica care confera ii feroelectricitatea si apoi faza tetragonala .Initial, HfO₂ este cunoscut în mod obisnuit ca fiind centrosimetric si, prin urmare, structura este una nepolara. Asadar, originea proprietatilor feroelectrice în filmele subtiri de HfO₂ dopat este considerată a fi formarea fazei ortorombică non-centrosimetrică (grup spatial Pca2₁) [4]. In Fig. 1.1.1 se prezinta transformarile structurii cristaline a HfO₂ prin dopaj.

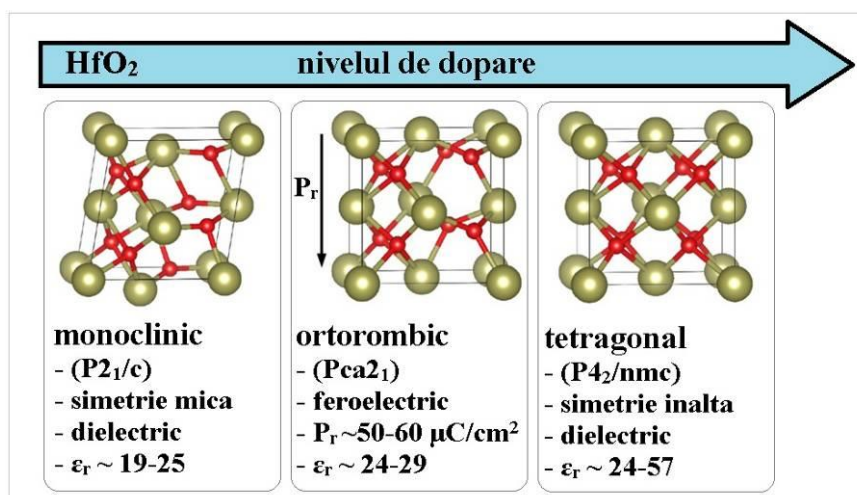


Fig. 1.1. 1 Secventa tranziilor de fază si a structurilor cristaline ale HfO₂

Aparitia HfO₂ feroelectric are implicatii mari deoarece este singurul feroelectric care este compatibil cu tehnologia CMOS putand fi crescut pe pachete de 12 inch [5] . Noi am deschis perspectiva utilizari HfO₂ feroelectric in domniul frecventelor foarte inalte , pentru tunabilitatea si reconfigurabilitatea circuitelor , domeniu de cercetare abandonat deoarece necesita tensiuni DC de zeci de V, in timp ce in cazul HfO₂ feroelectric cu grosime 5-6 nm , tensiunile sunt de ordinul 1-3 V care pot fi obtinute dintr-o baterie [6]. Noi am reusit sa realizam HfO₂ feroelectric dopat cu Zr denumit in continuare HfZrO, cu performante foarte bune.

Pentru HfZrO la aceasta etapa nu am facut decat sa repetam procesul de depunere ALD(atomic layer deposition) la o scara mai mare si anume pe pachete de 4 inch.

Mai jos indicam pe scurt tehnologia ALD folosita:

Depunerea HfO₂ feroelectric s-a realizat pe un reactor ALD - OpAl / Oxford Instruments Plasma Technology.

Filmele de **HfO₂ feroelectric** au fost crescute prin **doparea HfO₂ cu Zr** sau cu **Al**.

Precursorii ALD utilizati 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-pură a fost utilizata ca agent oxidant, iar azotul de puritate ultra-înaltă (Azot 6.0, 99.9999 vol.%) a fost utilizat pentru purjare si gaz purtator.

Filmele de HfO₂ feroelectric au fost crescute prin tehnica ALD, pe plachete de Si(100) de 4 inch, dopate *p* sau *n* - avand rezistivitatea de 1-10 Ωcm precum si pe plachete de Si de inalta rezistivitate (HRSi, cu grosimea de 525 μm). **Cresterea filmelor de HfO₂ feroelectric a fost făcută în două moduri :**

- **1-secventiala**-cei doi precursori au fost mixati secvential pe suprafata intr-o proportie variabila (1:1, 2:1, 20:1) si apoi oxidati, pentru a produce un oxid binar omogen in volum, cu un continut scazut de Zr sau Al. Filmele de oxid binar crescute in acest mod a fost indexate: **HfZrO₂ (mixat) ; Al:HfO₂ (mixat)**.

- **2- laminara**-oxidul binar a fost crescut intr-un mod laminar, prin alternarea intr-o secventialitate de 4:1 a ciclurilor ALD de HfO₂ si ZrO₂ sau Al₂O₃. Acest al doilea mod a permis cresterea unui oxid binar cu un continut mai ridicat de Zr sau Al, fiind indexate: **HfZrO (laminat) ; HfAlO (laminat)**. Rata de crestere pentru filmele simple, la temperatura de 200 °C, este de ~1.1 Å pentru HfO₂, ~0.9 Å pentru ZrO₂ si ~1 Å pentru Al₂O₃.

Pentru filme subtiri de 6 nm HfO₂ s-au facut multiple caracterizari in faza anteriora si nu mai revenim asupra lor. Acestea se gasesc in articolului nostru [7]. De remarcata ca in [7] am extras pentru prima data permitivitatea dielectrica a HfZrO in domeniul microundelor reproducata in Fig. 1.1.2.

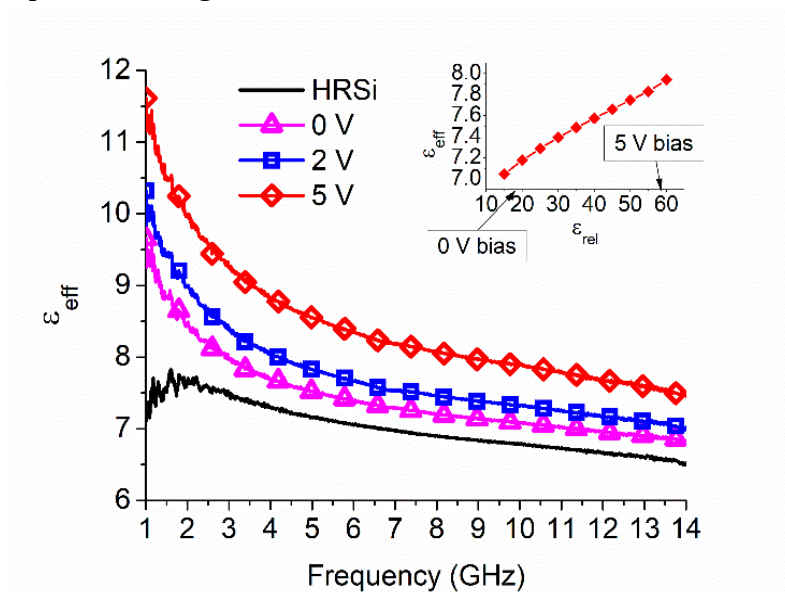


Fig. 1.1.2 Permitivitatea HfZrO in domeniul microundelor [7].

In continuare dupa ce am depus HfZrO si l-am caracterizat am depus HfZrO pe plachete pe 4 inch pe care am transferat grafena. Pentru depunerea grafenei am adoptat doua strategii :

-pentru plachete de 4 inch am transferat grafena in mod industrial la firma Grafenea , Spania.

-pentru dimensiuni ale cipurilor de HfZrO mai mici (2x2 cm) am realizat transferul in IMT asa cum vom arata la paragraful 1.4.

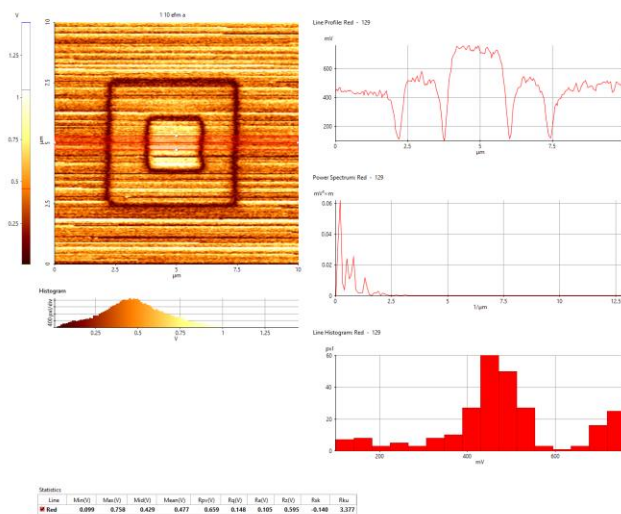
Inainte si dupa ce s-a transferat grafena s-au facut teste PFM pentru a verifica (a) existenta starii de feroelectricitate (b) existenta starii de feroelectricitate pentru a verifica daca transferul grafenei nu a afectat starea de feroelectricitate a HfZrO.

In Fig. 1.1 .3 prezentam plachetele de 4 inch Si/SiO₂ pe care s-a depus HfZrO (grosime 6 nm) si pe care s-a transferat grafena monolayer.

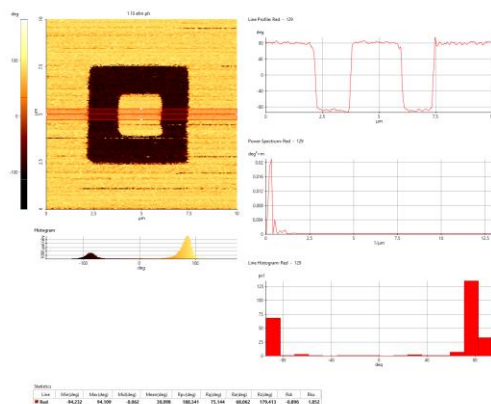


Fig. 1.1.3 plachetele de 4 inch Si/SiO₂ cu HfZrO grosime 6 nm pe care s-a transferat grafena monolayer.

Analiza PFM s-a facut conform descrierii din faza anterioara. Pe scurt, s-au realizat determinări prin microscopie de forta atomica pentru identificarea unui eventual răspuns piezoelectric local al materialului. De aceea , s-a lucrat în modul contact, cu varfuri din siliciu metalizat (NSC36 TiPt, Mikromasch – cantileverul A, având constanta elastică ~ 1 N/m declarată de producător).. Prin intermediul unui lock-in extern (SR830, Stanford Research Systems) a fost aplicată tensiune AC pe vârful AFM si a fost demodulat semnalul oscilant indus în semnalul de deflexie al fotodetectorului. Pentru manipularea locala a eventualelor domenii („scriere”), în timpul scanării varful a fost mentinut la 0V, iar pe electrodul inferior s-au aplicat diferite tensiuni DC, in intervalul -10V si +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 frecventa de 17 kHz. Forța de apăsare dintre vârful și suprafața a fost menținută constantă, la 10 nN . Pentru plachetele de mai sus prezntam mai jos cateva rezulate in Fig.1.1. 4.



(a)



(b)

Fig.1.1.4 Profil faza si amplitudine

Figurile de mai sus arata intensitatea raspunsului mecanic local la excitatia electrică, si defazajul dintre raspunsul mecanic si excitatia electrica. Profilele prezentate sub

imaginile de amplitudine și fază sunt produse din medierea profilelor orizontale cuprinse în banda roșie și este evidențiată în fiecare imagine. Se observă că diferența de defazaj între zonele scrise succesiv se saturează la o valoare apropiată de 180° care este semnatura feroelectricității. S-a efectuat analiza Raman în diferite puncte folosind un spectrometru Raman Labram Hr800 Raman, laserul având cu lungimea laser wavelength de 633 nm. S-a relevat că există benzile G ($1584 - 1592 \text{ cm}^{-1}$) și 2D ($2621 - 2641 \text{ cm}^{-1}$) ale grafenei cu raport de 1.8 ceea ce indică că grafena este monolayer, dar s-au relevat și zone de defecte, urme de polimer PMMA în urma transferului. Cu toate acestea, tranzistoarele cu efect de câmp realizate pe aceste plăchete au avut o rată de 70% de funcționare și având performanțe deosebite (paragraful 1.5).

Mai departe, s-au analizat filmele HfO_2 dopate cu Al sau HfAlO . Rezultatele sunt prezentate extensiv în articolul nostru [8]. Probele utilizate sunt cele raportate la faza 1. Structurile sunt cele arătate în Fig. 1.1.5

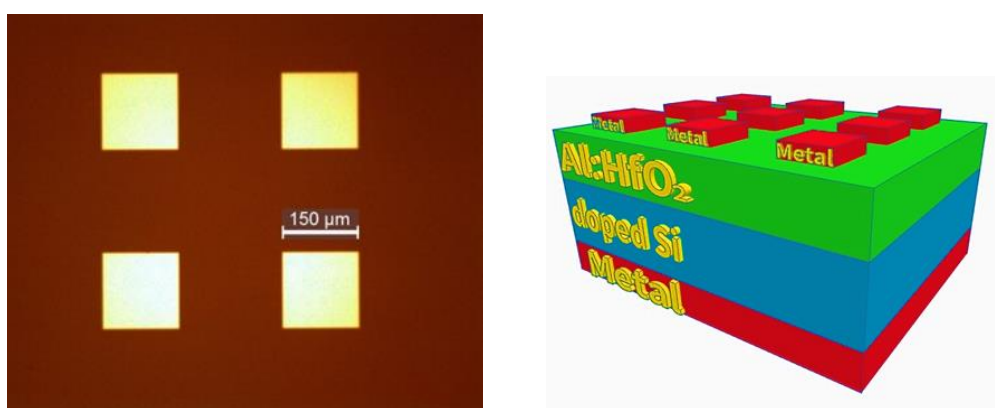


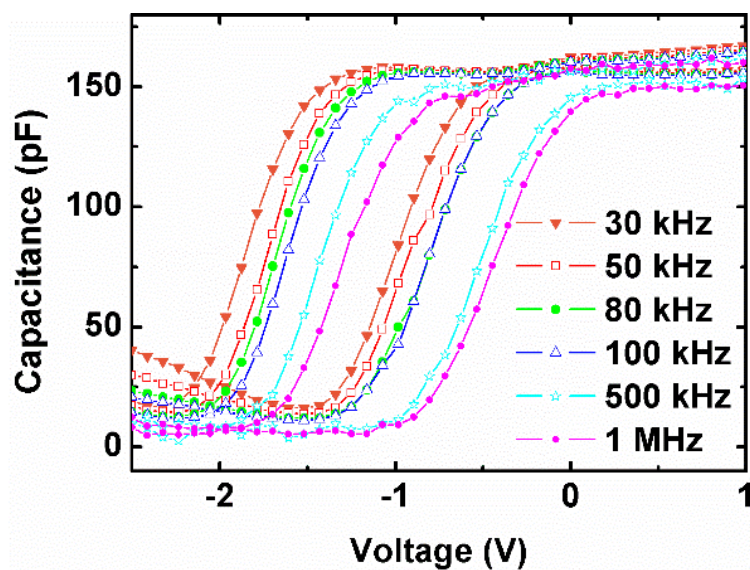
Fig. 1.1.5 Structuri HfAlO (a) vedere de sus (capacitate), (b) structura transversală.

Filmele HfAlO au fost crescute la 200°C cu o rată de creștere de $1.05 \text{ \AA}$ pentru HfO_2 și $\sim 1.1 \text{ \AA}$ pentru Al_2O_3 . Au fost efectuate 60 de cicluri de depunere conferind o grosime de aproximativ 7 nm. Rugozitatea filmelor HfAlO este determinată prin AFM și este mai mică de 0.21 nm.

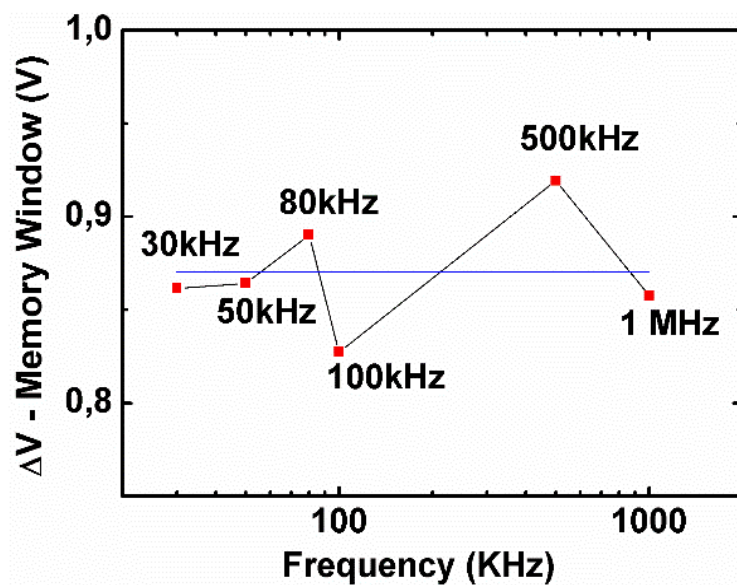
Electrozii de sus sunt Cr (5 nm)/Au (100 nm) cu dimensiunile de $150 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$ au fost depuși utilizând Temescal FC200 e-beam evaporation. Un electrod de jos de Al, cu grosimea de 100 nm, a fost depus pe întregul cip.

S-au efectuat analize PFM, XRD și XPS și măsurători electrice pe care nu le mai reproducem aici aflându-se în articolul [8]. Toate aceste rezultate au condus la ideea că HfAlO este un feroelectric cu un câmp coercitiv de 1.3 MV/cm. Măsurătorile capacității funcție de tensiune pe un spectru larg de frecvențe între 30 kHz și 1 MHz este reprodus în Fig. 1.1.6 din [8]. S-a extras parametrul memory window (fereastră de memorie), valoarea în [V] a lățimii histerezisului capacității la $\frac{1}{2}$ din valoarea sa maximă. Comportarea capacității este tipică pentru o structură MFS (metal-feroelectric-metal), dar demonstrarea naturii feroelectrice este dată de histerezisul capacității, dar numai atunci când memory-window nu variază mult funcție de frecvență ceea ce este cazul în cazul Fig. 1.1.6 b. S-a constatat că memory window este 0.4 V prin prima metodă depunere cu ALD (secvențială) și 0.8 V prin a doua metodă (laminară). Aceleași concluzii au fost făcute și în cazul HfZrO . Pe scurt, în dezvoltările ulterioare vom utiliza metoda laminară,

desi si prin metoda secventiala se obtine starea feroelectrică in HfO_2 dopat fie cu Zr sau Al, insa prin metoda laminara se obtin performante mai bune.



(a)



(b)

Fig. 1.1.6 (a) Dependenta capacitate-tensiune la diferite frecvente (b) dependenta memory window la diverse frecvente.

1.2 Cresterea feroelectricilor (HfO_2) prin metoda magnetron sputtering la nivel de placheta si caracterzari morfologice si structurale

Tinand seama de cele mai bune rezultate obtinute in Etapa 1/2018, adica de parametrii tehnologici corespunzatori celor mai bune probe, in aceasta etapa am realizat filme de HfO_2 cu proprietati feroelectrice utilizand metoda magnetron sputtering (MS). Am preparat filme de HfO_2 feroelectric in structuri cu configuratie cu 3 straturi, variind dimensiunile structurii. Acestea au fost depuse prin pulverizare cu magnetron (MS) urmata de tratament termic rapid (RTA) si ulterior au fost caracterizate din punct de vedere al morfologiei si al proprietatilor feroelectrice. Structurile au dimensiunea 3×3 cm. Au fost preparate doua tipuri de structuri HfO_2 poarta/ Ge-HfO_2 intermediar/ HfO_2 tunel/ $(100)\text{Si} - p$ care difera intre ele prin dimensiunile straturilor. Ambele structuri au fost depuse folosind aceiasi parametri tehnologici. HfO_2 a fost depus in regim rf (tinta HfO_2), iar Ge in regim dc. Pentru depunerea straturilor de HfO_2 de poarta si tunel s-a folosit puterea de 40 W rf, iar pentru depunerea HfO_2 in stratul intermediar (co-depunere HfO_2 si Ge) s-a folosit puterea de 30 W rf. Pe tinta de Ge s-a aplicat 15 W dc. Dupa depunerea structurilor prin MS, acestea au fost tratate termic RTA la temperatura de $600 - 620^\circ\text{C}$ pentru nanostructurare adica pentru formarea NCs HfO_2 si NCs Ge.

Structura de tip A, HfO_2 poarta / Ge-HfO_2 intermediar / HfO_2 tunel / $(100)\text{Si} - p$

Dimensiunile straturilor in aceasta structura sunt urmatoarele: **20 nm HfO_2 poarta, 10 nm Ge-HfO_2 intermediar si 10 nm HfO_2 tunel.** Au fost efectuate masurari de morfologie si structura, iar imaginea HRTEM este prezentata in Fig. 1.2.1. Se evidentiaza formarea fazei ortorombice / tetragonale a HfO_2 (interfranjele 0,292 nm si 0,297 nm) atat in stratul intermediar de Ge-HfO_2 cat si in straturile adiacente la interfata cu stratul intermediar.

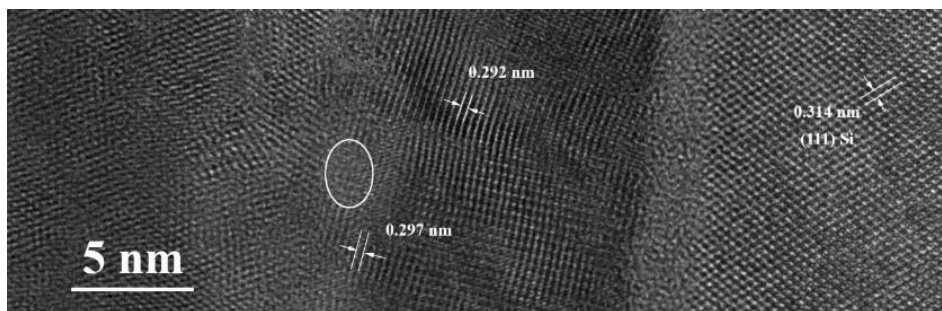


Fig. 1.2.1 Imagine HRTEM obtinuta pe structura de tip A: evidentiarea fazei ortorombice / tetragonale a HfO_2

Au fost efectuate masurari de polarizare electrica folosind un microscop de raspuns piezo (PFM) la Partenerul P3, INFLPR. De asemenea, am masurat caracteristicile polarizare-tensiune, $P - V$, folosind un montaj Sawyer-Tower (generator de semnal, osciloscop) si dependenta capacitate-tensiune, $C - V$, folosind o punte RLC Agilent E4980A, prevazuta cu o sursa interna de tensiune de 40 V.

In Fig. 1.2.2 se prezinta imaginile PFM corespunzatoare intensitatii polarizarii (a) si fazei (b), care arata comportarea feroelectrica a HfO_2 in aceasta configuratie, analog filmelor obtinute prin ALD din Ref. [8].

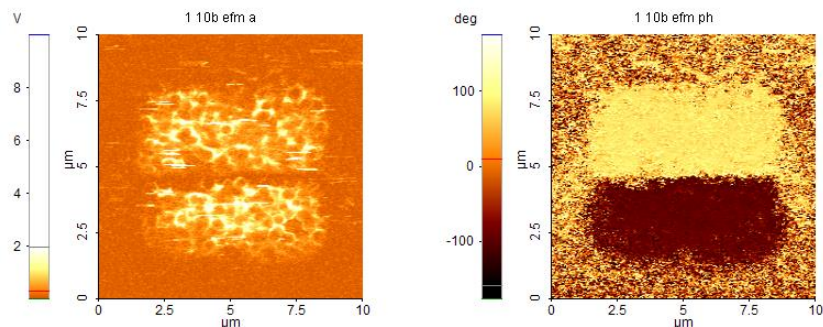


Fig. 1.2. 2 Imagini PFM corespunzatoare intensitatii polarizarii (a) si fazei (b) obtinute pe structura de tip A.

In Fig. 1.2.3 este prezentata o familie de caracteristici $P - V$ masurate la frecvente intre 10 si 100 Hz care demonstreaza caracterul ferroelectric al HfO_2 . Curbele prezinta bucla de histeresis a carei largime este dependenta de frecventa, adica largimea buclei scade cu cresterea frecventei in intervalul 10 – 100 Hz.

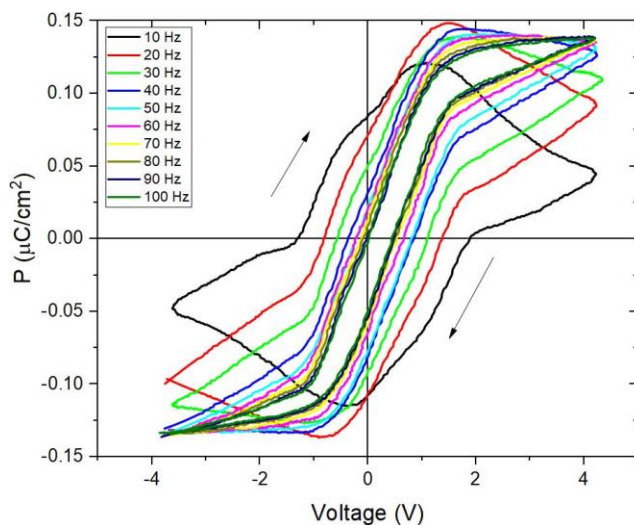


Fig. 1.2.3 Familia de caracteristici $P - V$ masurate la diferite frecvente intre 10 Hz si 100 Hz pe structura de tip A.

Caracteristicile $C - V$ masurate pe aceste structuri la frecventa de 1 MHz sunt prezentate in Fig. 1.2.4 pentru diferiti timpi de polarizare la capetele buclelor de histeresis, adica la +4 V si respectiv la -4 V. Se observa ca fereastra de histeresis ΔV creste cu cresterea timpului de polarizare, astfel incat pentru 10 min fereastra de histeresis atinge o valoare foarte mare de $\Delta V \approx 5$ V. Aceasta valoare sugereaza faptul ca efectul de memorie se datoreaza contributiei cumulative a stratului de HfO_2 ferroelectric cu structura ortorombica (faza metastabila datorata strainului indus atat de prezenta NCs Ge la intersectia dintre granitele NCs HfO_2 cat si de prezenta Ge pe marginea NCs HfO_2 [9, 10].

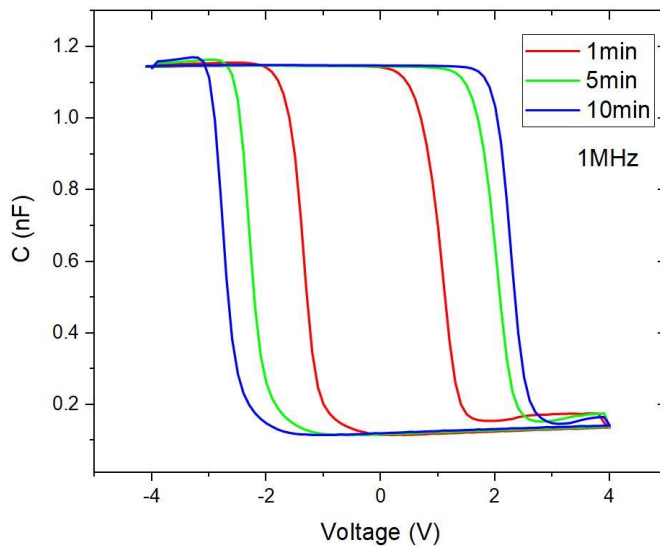


Fig. 1.2.4 Caracteristici $C - V$ masurate la frecventa de 1 MHz, pentru diferiti timpi de polarizare la +4 V si -4 V pe structura de tip A.

Structura de tip B, HfO_2 poarta/Ge- HfO_2 intermediar/ HfO_2 tunel/ (100)Si – p
Dimensiunile straturilor in structura sunt urmatoarele: 30 nm HfO_2 poarta, 20 nm Ge- HfO_2 intermediar si 10 nm HfO_2 tunel.

Fig. 1.2.5 si 1.2.6 obtinute pe structura de tip B sunt similare cu Fig.1.2.2 si 1.2.3 obtinute pe structura de tip A. Se observa ca structura de tip B este comparabila din punct de vedere al proprietatilor feroelectrice. De asemenea, caracteristica $P - V$ masurata la 200 kHz evidentiaza scaderea semnificativa a polarizarii.

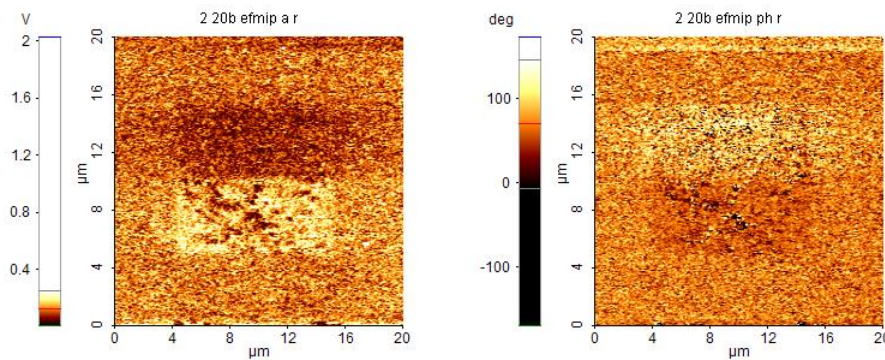


Fig. 1.2.5 Imagini PFM corespunzatoare intensitatii polarizarii (a) si fazei (b) obtinute pe structura de tip B.

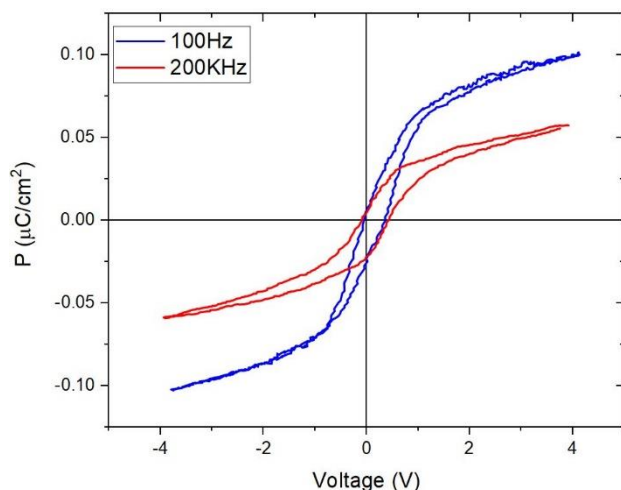


Fig. 1.2.6 Caracteristici $P - V$ masurate la 100 Hz si 200 kHz pe structura de tip B.

Caracteristicile $C - V$ din Fig.1.2. 7(a), masurate la 1 MHz, pentru diferiti timpi de polarizare la +4 V si -4 V prezinta bucla de histerzis, iar fereastra de memorie ΔV creste cu cresterea timpului de polarizare, atingand valoarea maxima de $\Delta V \approx 5,5$ V pentru 30 s. Caracteristicile $C - V$ din Fig. 1.2.7(b) sunt masurate la frecventele de 1 MHz si 500 kHz pentru 30 s timp de polarizare la +4 V si -4 V.

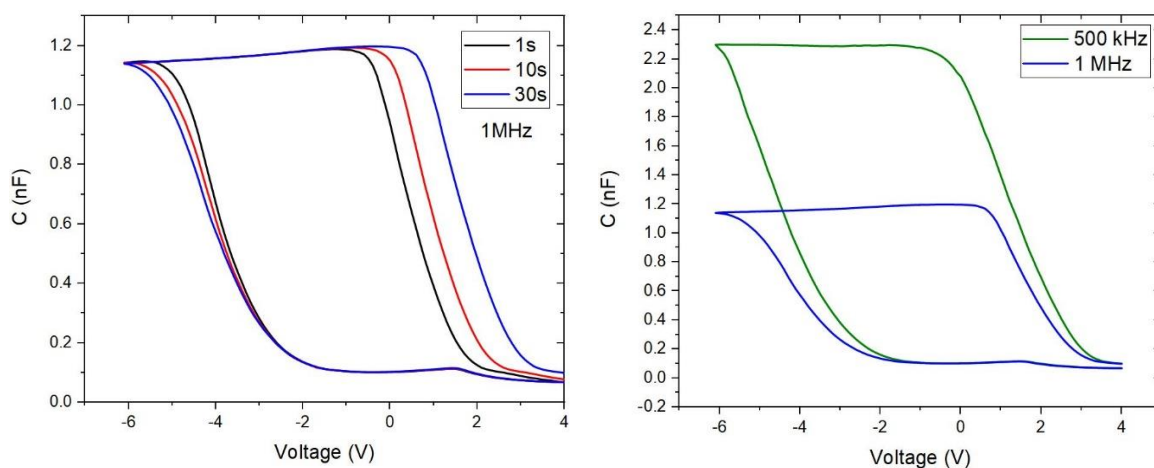


Fig. 1.2.7 Caracteristici $C - V$ masurate pe structura de tip B:

(a) la frecventa de 1 MHz, pentru diferiti timpi de polarizare la +4 V si -4 V;

(b) la 1 MHz si 500 kHz pentru timpi de polarizare la capete de 30 s.

1.3 Cresterea feroelectricilor (PZT) prin metoda PLD la nivel de placheta (max.) 2 inch si caracterizari morfologice sis structurale

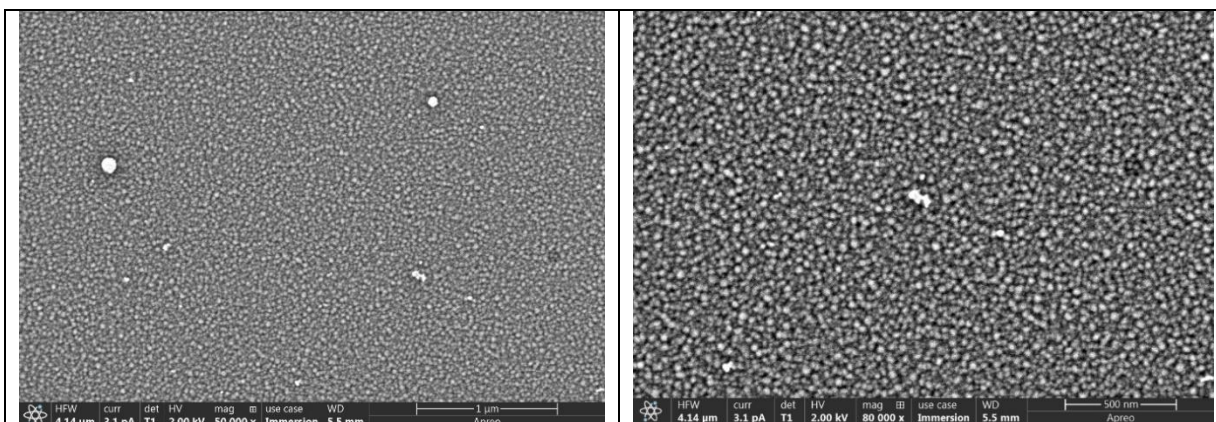
Filmele subtiri de PZT au fost crescute pe doua tipuri de substraturi de siliciu (siliciu cu rezistivitate ridicata si siliciu de tip n), cu ajutorul tehnicii de depunere cu laser pulsant (PLD). Doua tipuri de lasere au fost folosite pentru prepararea probelor: un laser excimer de tip ArF cu emisie la 193 nm si un laser cu corp solid, avand ca mediu activ un cristal de Nd:YAG (Ytriu Aluminiu Garnet dopat cu Neodim: $\text{Nd:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$), ce emite la lungimea de unda 266 nm. Toate probele au fost obtinute intr-o incinta de otel inox dotata cu un sistem de pompe de vid si de masurare a presiunii. Substraturile au fost introduse in interiorul incintei de depunere paralel cu tinta ceramica de PZT, tinta ce a avut un exces de plumb ($\text{Pb}_{1.1}\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}$). Excesul atomilor de Pb din tinta are rolul de a asigura stoichiometria filmului de PZT, ca urmare a volatilizarii acestuia la temperaturile ridicate la care se obtin straturile subtiri prin PLD. Inainte de inceperea procesului de depunere, presiunea din interiorul incintei de reactie a fost scazuta pana la $\sim 10^{-5}$ mbar, pentru a elimina pe cat se poate contaminantii ce ar putea afecta procesul intr-un mod negativ. Dupa aceea, in incinta s-a introdus oxigen, presiunea de lucru in functie de proba variind, in intervalul $5 \times 10^{-2} - 10$ mbari. Substratul a fost incalzit pe tot parcursul depunerii la temperatura de 600°C , incalzirea facandu-se cu 20°C/min . La finalul procesului, proba a fost racita cu 20°C/min . Fluenta laser a fost 1.6 J/cm^2 in cazul utilizarii laserului cu emisie la 266 nm si de 2.4 J/cm^2 pentru cel cu emisie la 193 nm. Distanta dintre tinta si substratul colector a fost 4 cm pentru toate probele. Numarul de pulsuri a variat de la 1000 de pulsuri pentru filmele mai subtiri, ajungand pana la 54.000 pentru cele mai groase, frecventa laser fiind de 10 si , respectiv 2 Hz. De asemenea, unele probe au fost obtinute in prezenta unei descarcari de radio frecventa (RF), dupa cum se poate observa in Tabelul 1. Conditiiile experimentale pentru depunerea straturilor subtiri de PZT pe substraturi de Si sunt detaliate in tabelul 1.3.1.

Probele obtinute au fost caracterizate prin microscopie electronica de baleiaj (SEM), microscopie de forta atomica (AFM), raspuns piezoelectric local (PFM), difractie de raze X si spectroelipsometrie. Cateva dintre cele mai semnificative rezultate sunt sumarizate in continuare.

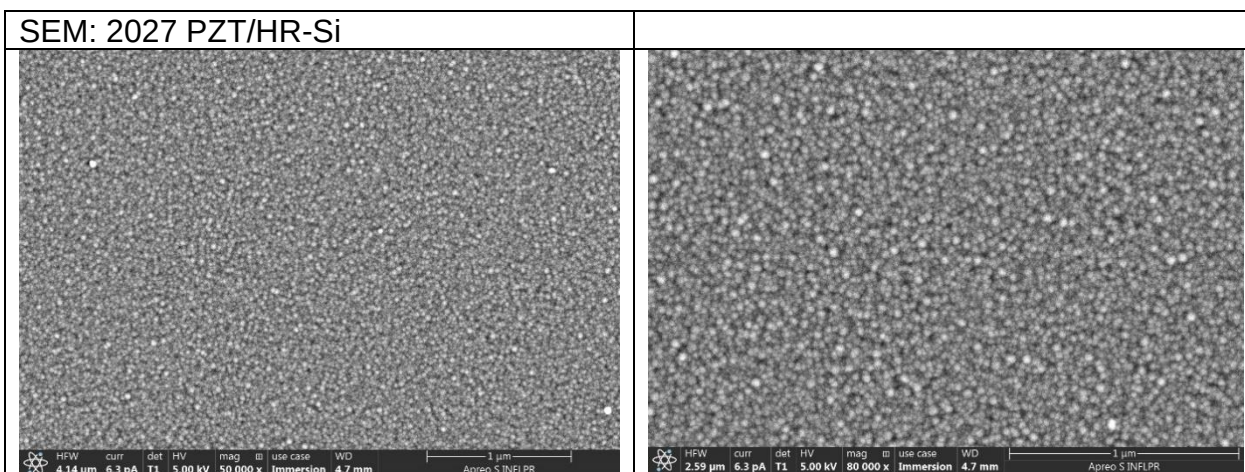
Tabelul 1.3.1 Probe PZT/Si obtinute prin ablatie laser.

Proba	$\lambda(\text{nm})/\nu(\text{Hz})$	Nr pulsuri	Fluenta	Presiune depunere (mbar)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	RF	OBS
2019 PZT/HR-Si	266/10	40.000	1.6	0.1	600	NU	
2020 PZT/HR-Si	266/10	3000	1.6	0.1	600	NU	
2021 PZT/HR-Si	266/10	1000	1.6	0.1	600	NU	
2022 PZT/HR-Si	193/10	3000	2.4	5×10^{-2}	600	NU	
2023 PZT/HR-Si	193/10	40.000	2.4	5×10^{-2}	600	NU	
2024 PZT/HR-Si	193/10	1000	2.4	5×10^{-2}	600	NU	
2025 PZT/HR-Si	193/10	3000	2.4	$7.2-7.38 \times 10^{-2}$	600	DA	
2026 PZT/HR-Si	193/10	1000	2.4	$7.1-7.3 \times 10^{-2}$	600	DA	
2027 PZT/HR-Si	266/10	3000	1.6	0.1	600	DA	
2028 PZT/HR-Si	266/10	1000	1.6	0.1	600	DA	
2029 PZT/HR-Si	193/2	1000	2.4	10	600	NU	
2030 PZT/HR-Si	193/2	1000	2.4	10	600	DA	
2031 PZT/HR-Si	266/10	1000	1.6	10	600	DA	
2032 PZT/HR-Si	266/10	1000	1.6	10	600	NU	
2051 PZT/HR-Si	193/10	3000	2.4	5×10^{-2}	600	NU	
2052 PZT/HR-Si	193/10	3000	2.4	5×10^{-2}	600	NU	
2053 PZT/HR-Si	193/10	3000	2.4	5×10^{-1}	600	NU	
2054 PZT/Si de tip n	193/10	3000	2.4	5×10^{-1}	600	NU	
2055 PZT/Si de tip n	193/10	54.000	2.4	5×10^{-1}	600	NU	

Pentru probele depuse cu laserul functionand la lungimea de undă de 266nm, ca rezultat al actiunii a 3000 pulsuri, 2020 fără RF si 2027 cu RF se constata urmatoarele:



Pentru proba 2020 imaginile SEM pun in evidenta formarea unui strat fara crapaturi si care acopera uniform suprafata substratului. Morfologia de suprafata este formata din cristalite bine definite, de forma granulara, mici, a caror dimensiune variaza intre 10nm si 20nm.



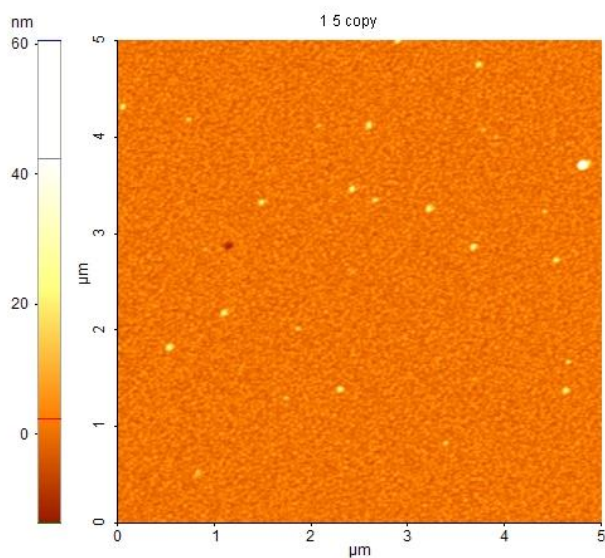
Imaginile SEM (2027) pun in evidenta formarea unui strat fara crapaturi si care acopera uniform suprafata substratului. Imagistica de inalta rezolutie evidentiaza o morfologie de suprafata formata din cristalite bine definite, de forma granulara, mici, a caror dimensiune variaza intre 10nm si 20nm, similare cu cele observate la proba 2020.

Studiile de microscopie de forta atomica (AFM) si de piezoraspuns local (PFM) confirma rezultatele SEM. Astfel adugarea descărcării în RF nu deteriorează morfologia suprafetelor: dimpotriva numărul particulelor de tip grăunte scade. Rugozitatea RMS scade, de asemenea. Răspunsul piezoelectric nu se deteriorează semnificativ. Zonele

adiacente (zona initiala / zonele expuse la camp electric orientat vertical) sunt bine delimitate pentru ambele probe.

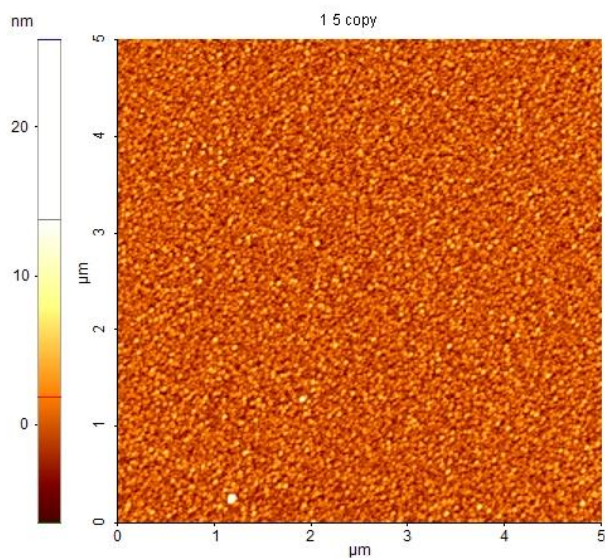
AFM

Fără RF: 2020



RMS: 2.4nm

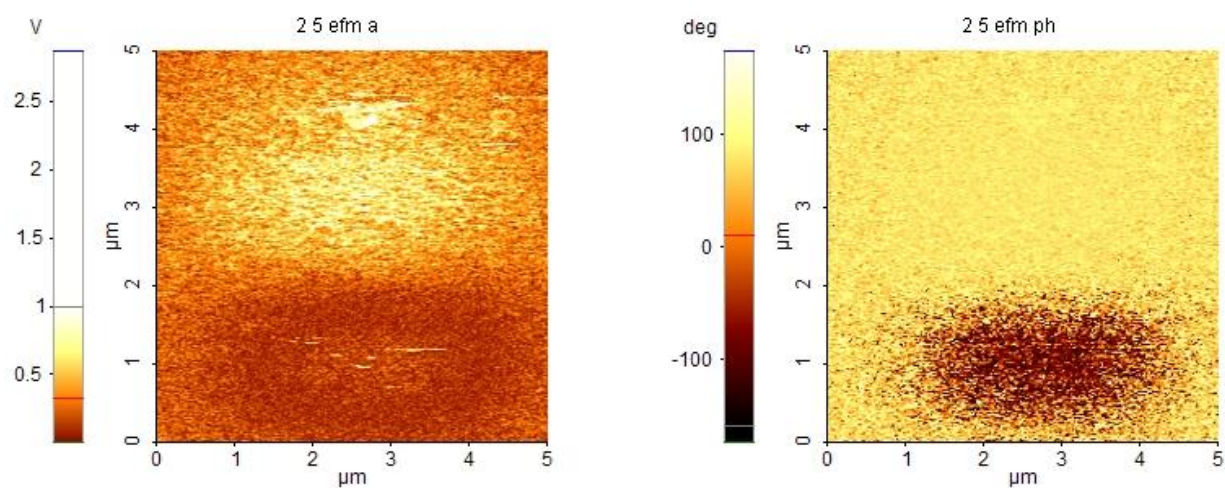
Cu RF: 2027



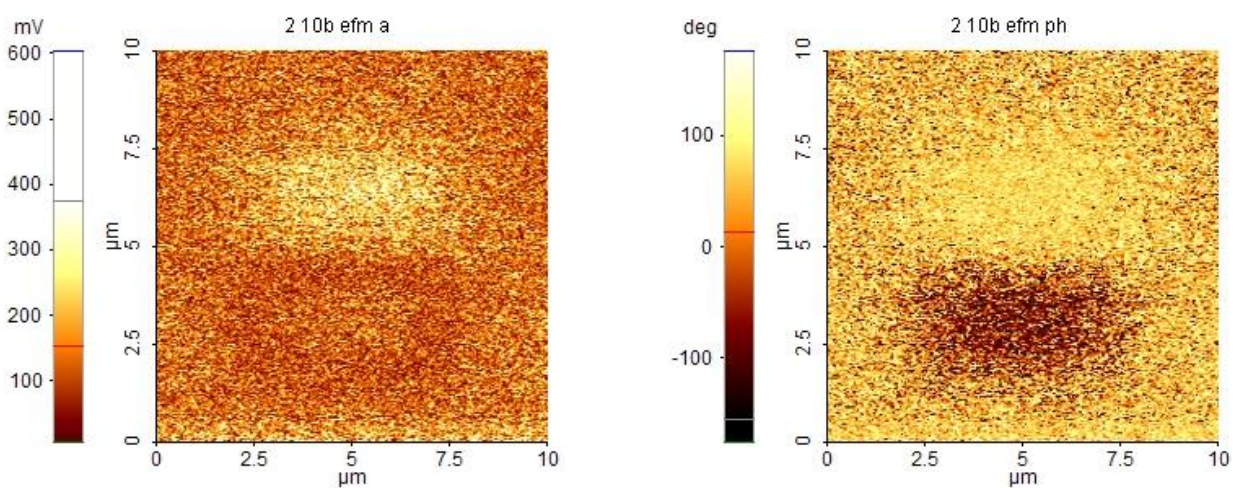
RMS: 2.0nm

PFM

Fără RF: 2020



Cu RF: 2027



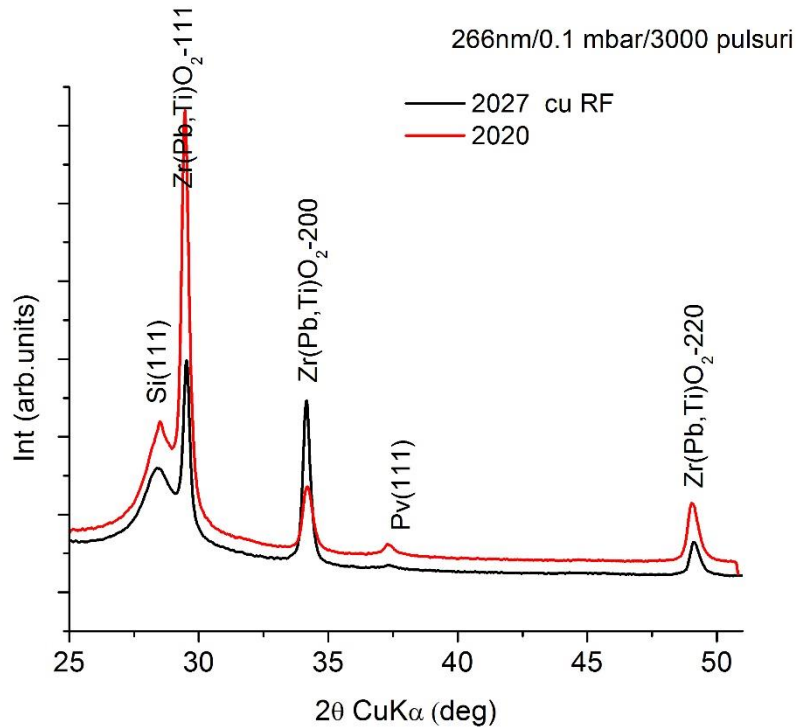


Fig. 1.3.1 Spectrul de difracție PZT/ Si.

Spectrele de difracție de raze X din Fi. 1.3.1. confirmă prezenta unei faze perovskitice a PZT, mai pronunțate în cazul probelor obținute în absența descărcării de radiofrecvență. După transferul grafenei pe PZT, am realizat pe structurile grafena/ PZT/Si capacități cu aceleași dimensiuni ca în cazul HfZrO/Si, variația capacității cu tensiunea la frecvența 40 kHz este reprezentată în Fig. 1.3.2 și parametrul memory window în Fig. 1.3. 3. Și măsurătorile electrice confirmă feroelectricitatea PZT, histerezisul capacității este în sensul acelor de ceasornic.

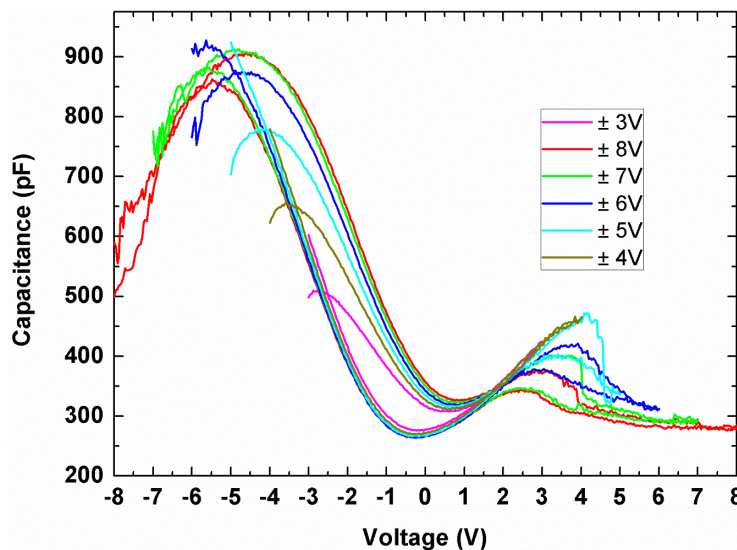


Fig. 1.3. 1. C-V PZT la frecvența 40 kHz.

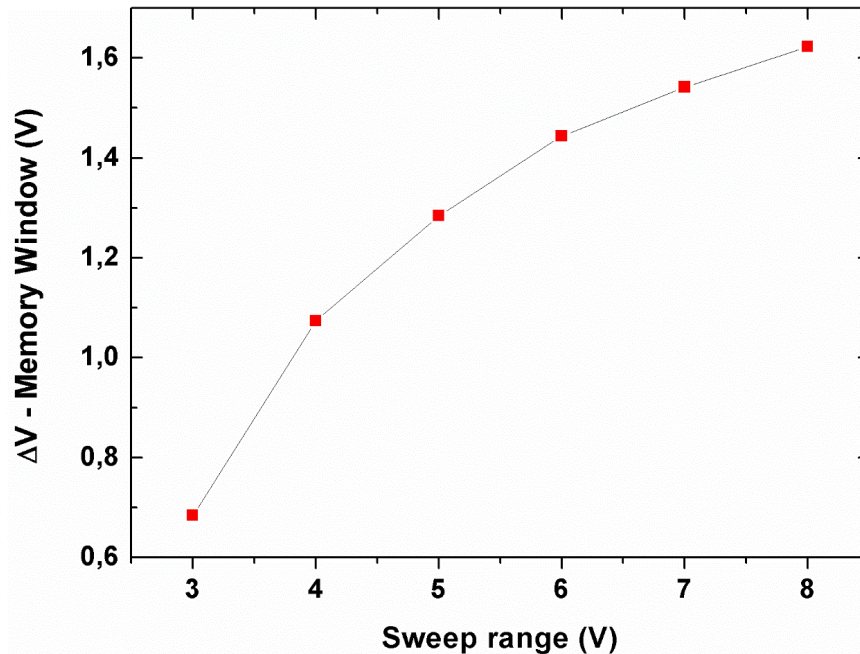


Fig. 1.3. 2 MW la structura grafena/PZT/Si.

1.4 Transfer grafena pe feroelectrici

Grafena pe plachete de Si de 4 inch a fost transferata industrial de Grafenea, in timp ce grafena cu dimensiuni mai mici 2x2 cm a fost realizat in IMT proces descris mai jos.

Sistemul de contactare a electrozilor utilizati in procesul de transfer numit delaminare electrochimica este realizat in IMT, iar celula electrochimica cuprinde doi electrozi: PMMA/GR/Cu drept catod, iar anodul este grafitul. Cei doi electrozi sunt conectati la o sursa electrica. Electrolitul utilizat a fost o solutie diluata de $K_2S_2O_8$. Montajul experimental este prezentat in Figura 1.4.1. Principiul pe care se bazeaza delaminarea electrochimica consta in degajarea hidrogenului la interfata catodului ceea ce conduce la detasarea PMMA/GR de metal. Delaminarea electrochimica consta in 4 etape: a) Depunere strat de polimer suport peste esantionul de GR/Cu, polimetilmetacrilat (950 PMMA A4 Microchem) prin spin-coating la 2000 rpm/60s; b) Aplicare diferenta de potential (40 V; 1 mA; 10 minute). Spalare in cicluri repetate cu H_2O_{DI} ; c) Transfer pe substratul de interes (film HfO_2 , 6.84 nm). Eliminarea apei incapsulate, $T=60\text{ }^{\circ}C$, $t=1\text{ h}$; d) Dizolvare PMMA in acetona.

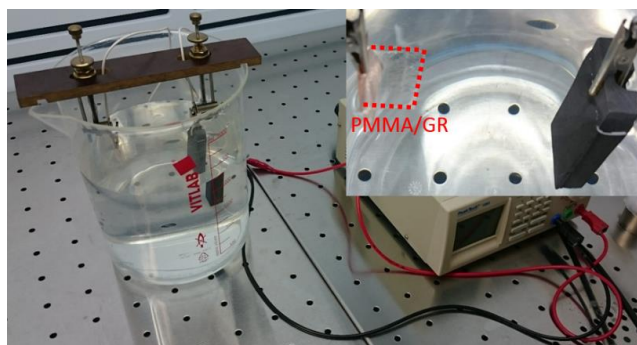
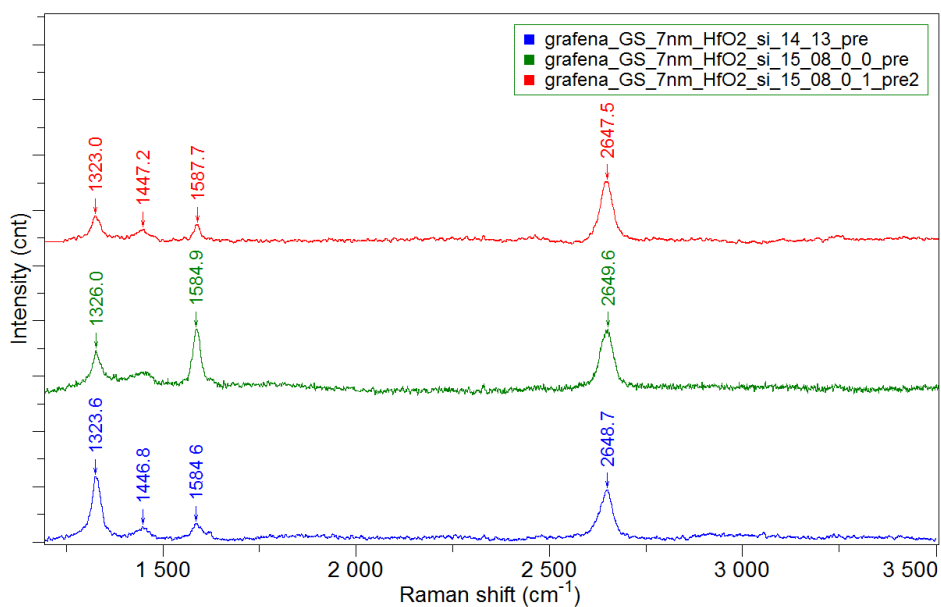
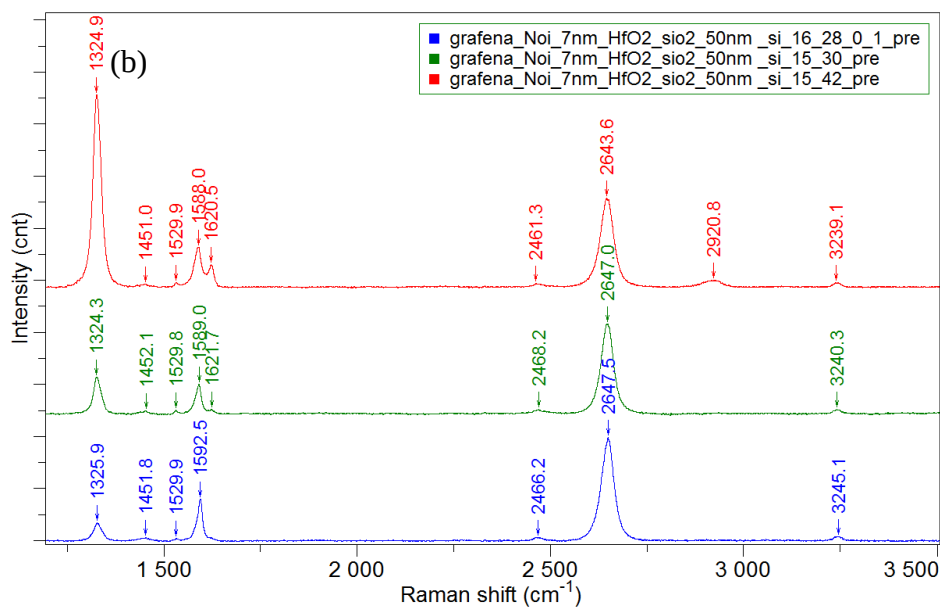


Fig. 1.4.1 Montaj experimental: Celula electrochimica. In insert, PMMA/GR detasata de pe Cu in timpul procesului de transfer.

In Figura 1.4.2 sunt prezentate spectrele Raman achizitionate cu laserul de 633 nm pe GR comerciala si pe GR crescuta in IMT transferata pe HfZrO.



a



b

Fig. 1.4. 2 (a) Spectre Raman achizitionate pe grafena transferata pe HfO₂: (a)comerciala, Graphene Supermarket si (b)grafena crescuta in IMT

In Tabelul 1.4.1 si 1.4.2 sunt prezentati parametrii caracteristici benzilor Raman extrasi din spectrele achizitionate pe GR comerciala.

Tabel 1.4.1. Parametri caracteristici benzilor Raman extrasi din spectrele achizitionate pe grafena comerciala transferata pe HfZrO

Spectru	FWHM(G)	FWHM(2D)	I _D /I _G	I _{2D} /I _G
14_13	30,22	33,48	3,52	2,81
15_08_0_0 s1	22	32,22	0,65	1,01
15_08_0_1 s2	17,11	37,77	1,53	3,56
15_08_1_0 s3	11,78	35,77	0,53	4,56
15_08_1_1 s4	27,11	33,77	4,29	2,42

Se observa benzile Raman D, G, 2D caracteristice grafenei precum si o banda Raman situata la 1446.8 cm⁻¹ specifica PMMA cea ce ne indica prezenta unor reziduuri de PMMA pe suprafata grafenei. Parametrul I_D/I_G prezinta valori care variaza intre 0.53 – 0.65 si in unele cazuri valori cuprinse intre 1.53 – 4.29 comparativ cu 0.2 valoarea standard, cea ce indica in unele cazuri o densitate mare de defecte rezultata cel mai probabil in urma transferului. Largimea la semnaltime aferenta benzii G prezinta

deplasari cuprinse intre 11.78 – 17.11 si deplasari in intervalul 22 – 30.22 mari fata de pozitia standard (15 cm^{-1});

Tabel 1.4.2. Parametri caracteristici benzilor Raman extrasi din spectrele achizitionate pe GR crescuta in IMT transferata pe HfO_2

Spectru	FWHM(G)	FWHM(2D)	I_D/I_G	I_{2D}/I_G
15_30	14	33,55	1,24	3,05
15_42	18,44	36,88	4,85	2,23
16_28_0_0	14,89	36	0,64	2,9
16_28_0_1 s2	12,67	36	0,43	2,48
16_28_1_1 s4	13,33	32,66	1,12	2,91

In Figura 1.4.2 (b) sunt prezentate spectre Raman achizitionate pe GR IMT transferata pe HfO_2 . Se observa benzile Raman D, G, 2D, D', 2D' caracteristice grafenei, precum si benzi Raman caracteristice PMMA (1446.8 cm^{-1} , 1529.9 cm^{-1} , 2920.8 cm^{-1}) care ne indica prezenta unor reziduuri de PMMA pe suprafata GR. Parametrul I_D/I_G prezinta valori in regiunea 0.43 - 0.64 si respectiv 1.12 - 4.85 comparativ cu valoarea standard de 0.2 cea ce indica o densitate mare de defecte in unele cazuri, rezultata in urma transferului. Largimea la semnaltime aferenta benzii G se afla in apropiere de pozitia standard, 15 cm^{-1} si anume 12.67 – 18.44. Indicatorul de calitate I_{2D}/I_G ia valori in intervalul 2.23 – 3.05 cea ce indica transferul grafenei monolayer de HfZrO . In cazul in care raportul e mai mic de 1.3-1.4 avem cazul mai multor straturi de grafena transferate. In concluzie :

- A fost transferata prin delaminare electrochimica grafena (GR) comerciala, Graphene Supermarket si GR crescuta in IMT pe film de HfO_2 depus prin ALD cu grosimea de 6.84 nm;
- In timpul procesului de transfer PMMA/GR crescuta in IMT s-a detasat de pe Cu mai greu si intr-un timp mai lung ($\sim 30\text{ min}$) comparativ cu GR comerciala ($\sim 10\text{ min}$).
- In urma analizei SEM, s-a constatat un grad de acoperire mare cu GR pe suprafata HfZrO in ambele cazuri. Pe suprafata GR IMT exista mai multe straturi discontinue decat pe suprafata GR comerciala; Pe suprafata GR comerciala apar niste conglomerari de culoare alba;
- In urma analizei EDX pe suprafata conglomerarilor aparute pe suprafata GR comerciala, au aparut reziduuri de Cu sau Cu_2O in proportie de 0.93 at. %;
- In cazul analizei Raman, in cazul GR comerciala se observa prezenta benzilor Raman D, G, 2D caracteristice GR precum si o banda Raman situata la 1446.8 cm^{-1} specifica PMMA. In cazul GR IMT transferata pe HfO_2 au fost evidentiata benzile Raman D, G, 2D, D', 2D' caracteristice GR, precum si benzi Raman caracteristice PMMA (1446.8 cm^{-1} , 1529.9 cm^{-1} , 2920.8 cm^{-1}) care ne indica prezenta unor reziduuri de PMMA pe suprafata GR.

1.5 Caracterizari ale heterostructurilor grafena/feroelectrici

Pentru a caracteriza structura grafena/feroelectric (HfZrO) am realizat tranzistoare FET pe cipuri taiate din plachetele de 4 inch grafena/Si. Grafena joaca rolul de canal al tranzistorului ,iar stratul dopat de Si are rol de poarta (back-gate) (Fig. 1.5.1). Am

constatat ca FET-ul este reconfigurabil in sensul ca la tensiuni de poarta negative transportul este orizontal adica de la sursa la drena poarta moduland densitatea de electronic din canal. Cand sensul polarizarii se schimba, transportul de vine vertical ,iar rolul electrozilor se schimba asa cum este aratat 1.5.1 b , in paranteze. Rezultatele sunt prezentate in articolul nostru [11] si aici redam principalele concluzii.

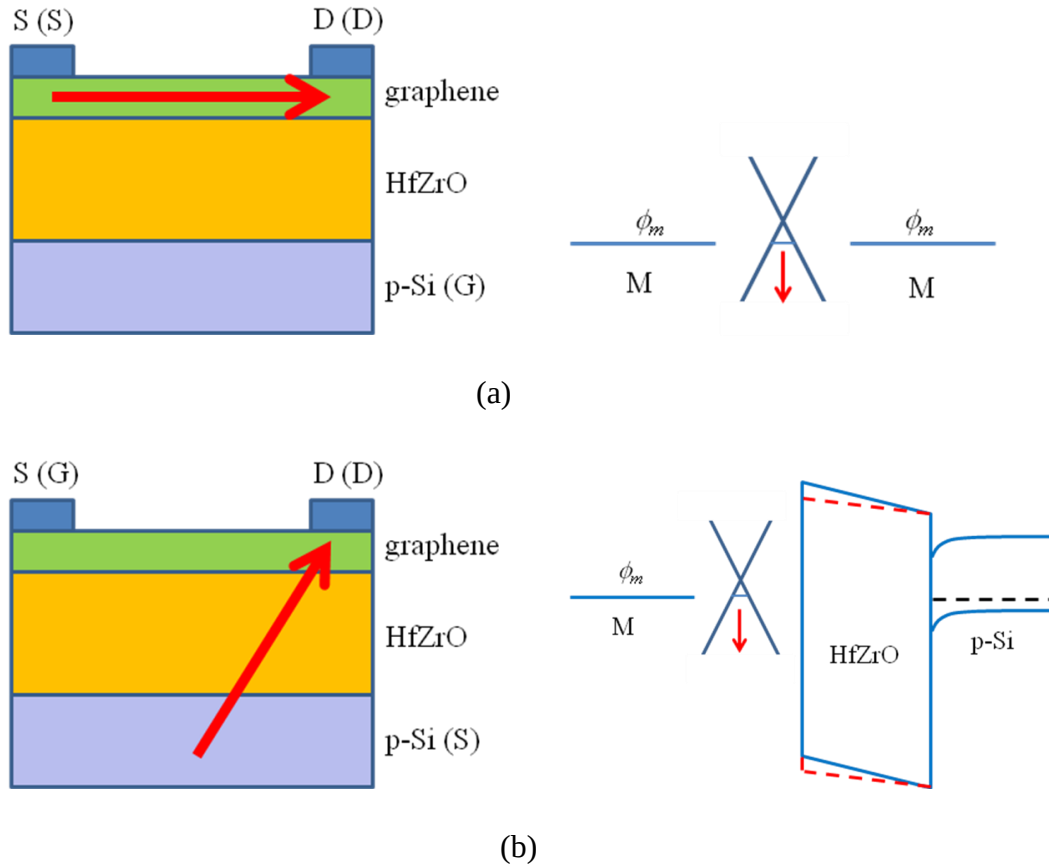
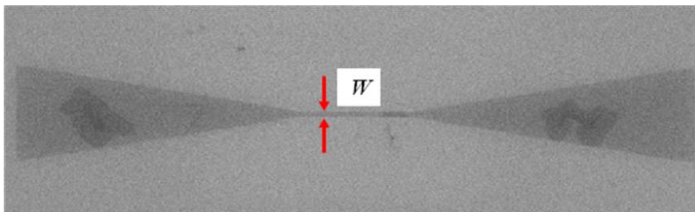
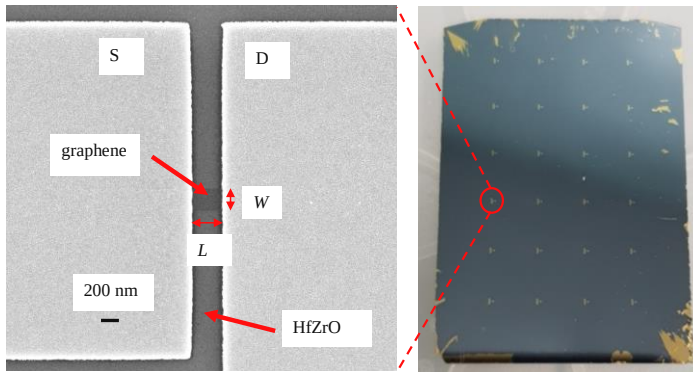


Fig. 1.5.1 FET grafena/HfZrO [11]

In Fig. 1.5.2 a este reprezentata imaginea SEM a canalului grafenic iar in Fig. 1.5.2 b este prezentata imaginea SEM a FET grafena/HfZrO si imaginea optica a cipului.



(a)



(b)

Fig.1.5.2 (a) canalul grafenic (b) imagine SEM a FET grafena/HfZrO ($L=400$ nm, $W=300$ nm) (c) imaginea optica a cipului [11].

Am lucrat cu doua tipuri de contacte, Cr (5 nm)/Au (100 nm) si Ti (5 nm)/Au (100 nm) depuse prin e-beam, cu dimensiunile $150 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$, si in ambele cazuri am constatat ca la tensiuni de poarta mici mecanismul de conductie space-charge (sarcina spatiala) (SC) ,iar la tensiuni mari este Schottky.

Dependenta curentului de drena cu tensiunea de poarta este prezentata in Fig. 1.5.3 in transport vertical.

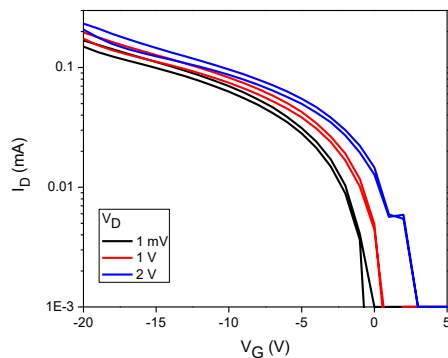
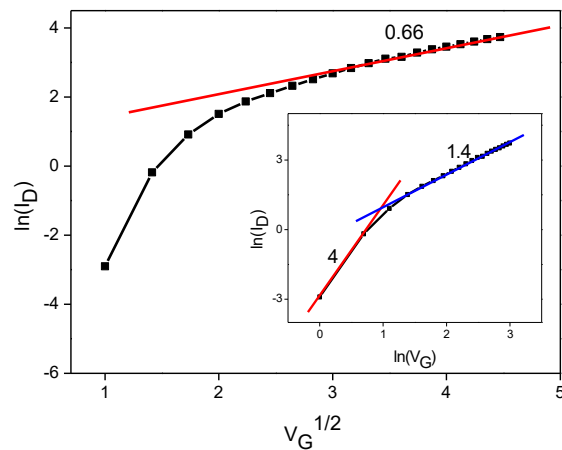
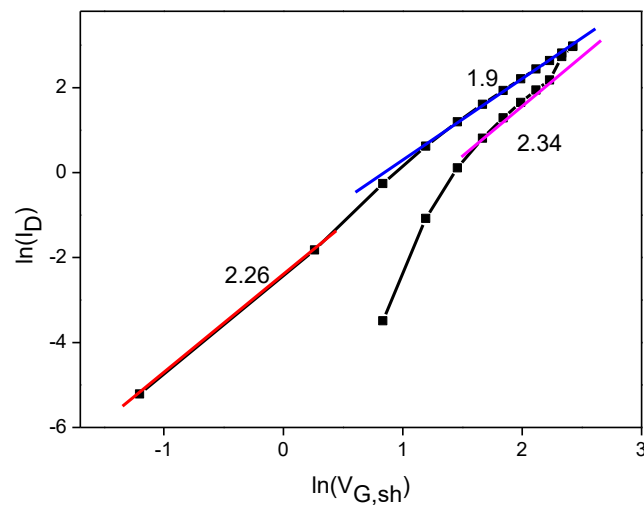


Fig. 1.5.3 Dependenta curent drena-tensiune de poarta .

Identificarea mecanismelor de conductie in cazul contactelor Ti/Au este prezntata in Fig.1.5.4 similar se obtin rezultate si pentru Cr/Au. Fitarea s-a facut cu curba $I_D = V_G^\alpha$. Avem $\alpha = 4$ (mecanismul SC datorat defectelor de interfata) pentru tensiuni mici de poarta si $\alpha = 1.4$ pentru tensiuni mari de poarta. Panta este 0.66 din care am determinat permitivitatea dielectrica a HfZrO egala cu 28 ,valoare apropiata cu masuratorile.



(a)



(b)

Fig. 1.5.4 Mecanismele de conductie in cazul (a) $V_D=0V$ si (b) $V_D=6V$ pentru contacte Ti/Au [11].

Se constata ca raportul on-off din Fig.1.5.3 este 10^3 , ceea ce nu este specific unui FET pe grafena monolayer, deoarece grafena monolayer nu are banda interzisa. Am calculat banda interzisa si am vazut ca are valoarea de 180 meV, cu valoare apropiata de valoarea prezisa de simularea atomistica facuta in consortiu (250 meV) si este indusa de HfZrO [12].

In continuare, am realizat un FET grafena/HfZrO identic cu cel de mai sus, de data inasa HfZrO a fost depus pe un strat de 90 nm SiO_2 crescut peste Si de inalta rezistivitate, pentru a evita transferul sarcinilor din Si in ferroelectric si invers.

Performantele obtinute au fost remarcabile : mobilitatea purtatorilor $7900 \text{ cm}^2/Vs$ la temperatura camerei comparabila cu a celor mai buni semiconductori si transconductanta de 1 mS comparabila cu tranzistorilor CMOS.

2. Proiectarea si simularea dispozitivelor nanoelectronice bazate pe heterostructuri grafena/feroelectric

2.1 Simulari atomistice ale heterostructuri grafena/feroelectrici

In etapa anterioara a fost investigata structura electronica in sistemul de tip interfata grafena- HfO_2 , utilizand calcule *ab initio* in cadrul teoriei functionalei de densitate (DFT), implementate cu ajutorul pachetului SIESTA. Pornind de la calcule de calibrare ale sistemelor feroelectrice de tip *bulk* HfO_2 si HfZrO_2 , cu structura grupului spatial Pca2_1 , au fost analizate sisteme de tip *slab* cu diferite terminatii in contact cu monostratul de grafena.

Rezultatele preliminare au evidentiat faptul ca substratul feroelectric de HfO_2 induce un gap energetic in grafena, iar magnitudinea acestuia depinde de natura terminatiei (Hf sau O) [12], validare experimentală [11] si paragraful 1.5. Aparitia gap-ului se datoreaza deformarii locale a stratului de grafena si a hibridizarii orbitalilor. Acest aspect a fost confirmat ulterior de analiza densitatii de stari detaliata pe atomii localizati la interfata.

Considerand straturi de HfO_2 , pornind de la o celula unitate $1 \times 5 \times 5$ sunt asamblate structuri cu cele doua tipuri terminatii, denumite in continuare G@Hf-O si G@O-Hf , care sunt ilustrate in Fig. 2.1.1.

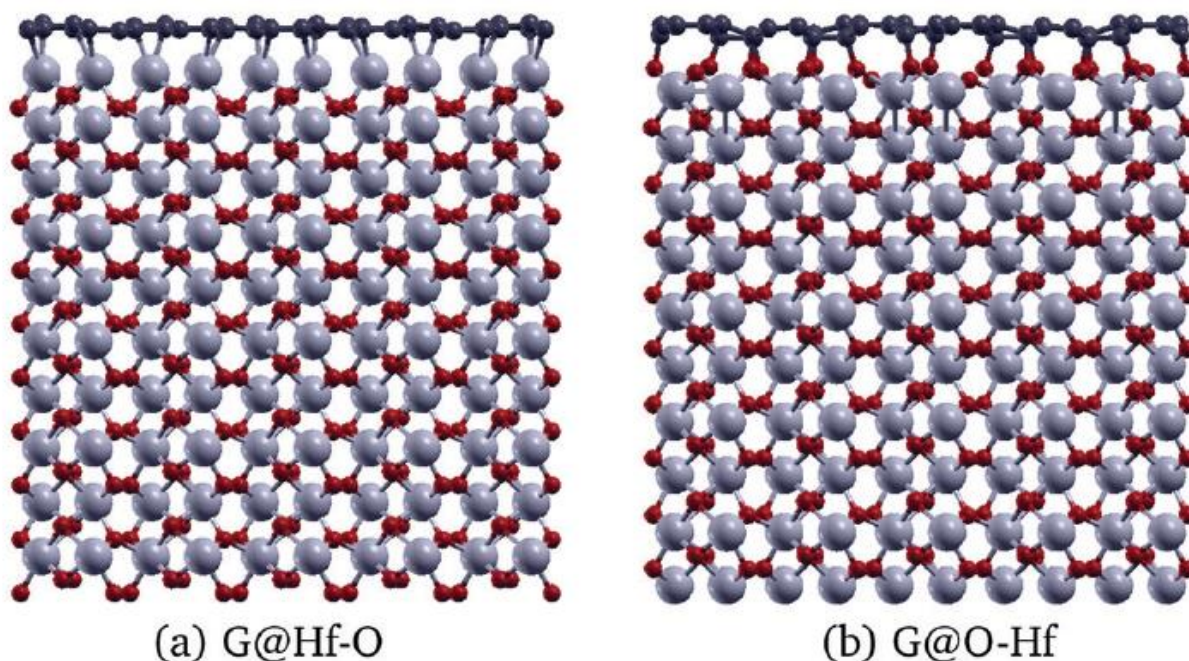


Fig. 2.1.1. Structuri de tip grafena pe substrat de HfO_2 , cu terminatii de Hf si O.

Contributia la densitatea de stari corespunzatoare stratului de grafena, precum si a atomilor de Hf si O localizati la interfata (stratul superior L5) sunt indicate in Fig. 2.1.2. In cazul sistemului G@Hf-O , se constata ca limita superioara a benzii de valenta este alcatuita din orbitali ai oxigenului, in timp ce banda de conductie contine orbitali ai atomilor de Hf (preponderent orbitali p si d), similar cu cazul bulk. Totusi, in cazul

sistemului G@Hf-O, limita inferioara a benzii de conductie este deplasata, prin introducerea unor stari de interfata pozitionate in gap-ul oxidului de hafniu, denumite in continuare stari *in-gap*.

Se observa contributii semnificative la starile *in-gap* corespunzatoare atomilor de carbon din grafena si a atomilor de Hf de la interfata, care sunt corelate, ceea ce indica un proces de hibridizare. Un fenomen similar a fost observat in literatura pentru sistemul cubic de oxid de hafniu. Gap-ul aparent in cazul sistemului G@Hf-O este ~ 0.25 eV.

In cazul sistemului G@O-Hf limita inferioara a benzii de conductie in stratul L5 al slabului de HfO₂ este alcatuita preponderent din orbitalii atomilor de oxigen plasati la interfata. In acest caz, gap-ul aparent este semnificativ mai mare, ~ 1.8 eV, rezultat prin introducerea starilor de interfata care reduc gap-ul corespunzator sistemului HfO₂ *bulk* de ~ 5 eV.

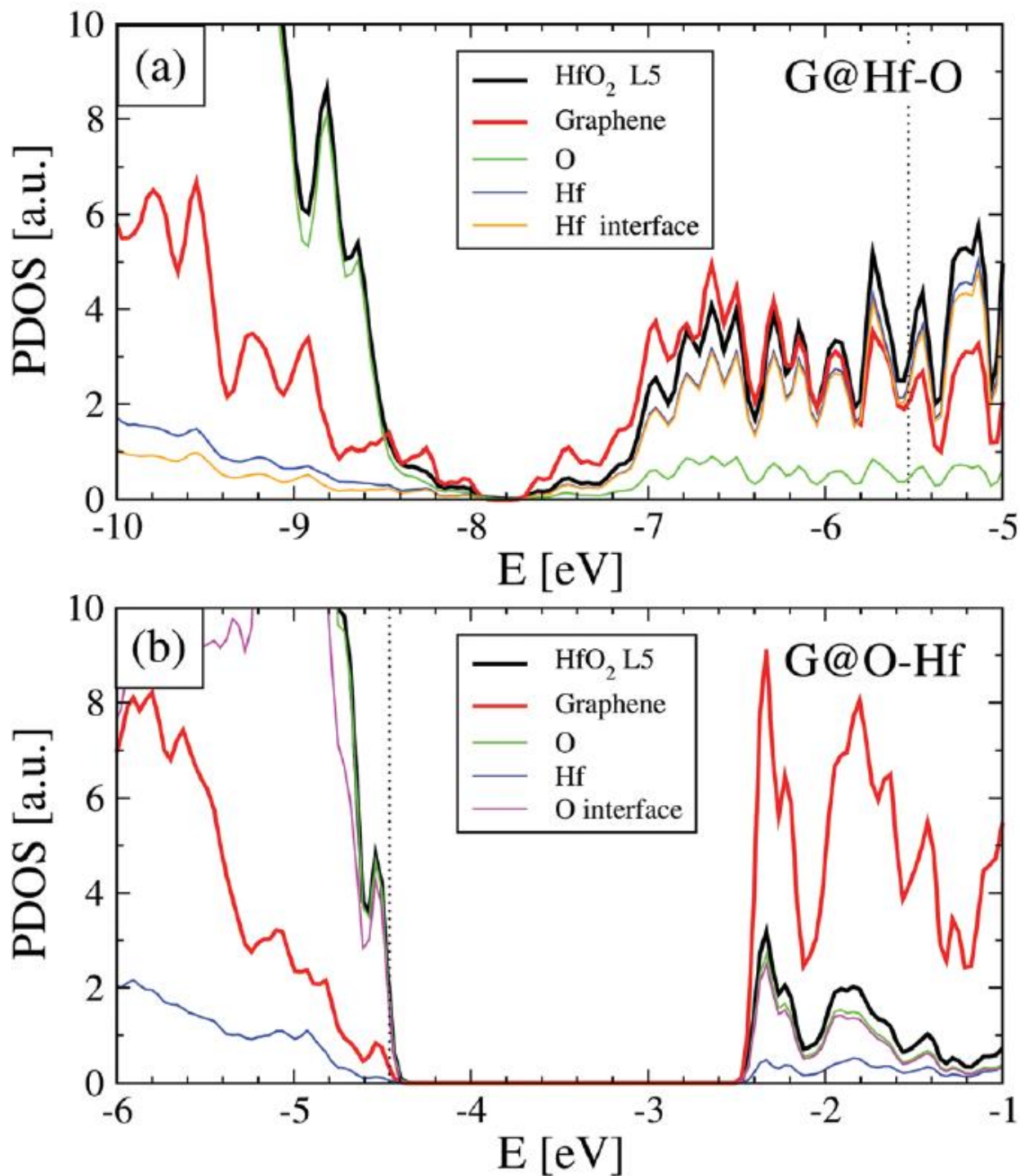


Fig. 2.1.2 Contributii pariale la densitatea de stari (PDOS) pentru sistemele $G@Hf-O$ (a) si $G@O-Hf$ (b), corespunzatoare stratului de interfata HfO_2 L5 si monostratului de grafena. Sunt indicate contributii individuale ale atomilor de Hf si O in stratul de HfO_2 L5 . Nivelurile Fermi sunt indicate prin linii verticale punctate. Se observa contributiile dominante ale atomilor de Hf (a) si O (b) localizati la interfete.

În continuare sunt analizate proprietățile de transport în structuri de tip tranzistor având la baza sistemele $G@Hf-O$ și $G@O-Hf$, indicate în Fig.2.1.3, urmărind efectele introduse de substratul ferroelectric.

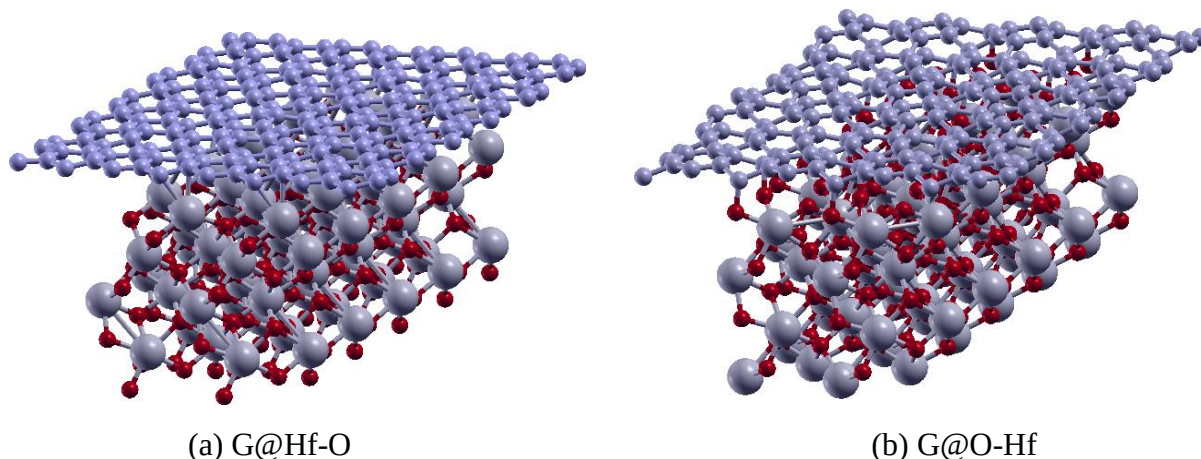


Fig. 2.1.3. Structuri de tip tranzistor pentru studiul conductiei prin stratul de grafena.

Având structurile $G@Hf-O$ și $G@O-Hf$ relaxate, se izolează un segment finit de HfO_2 în lungul direcției de transport, în timp ce perpendicular pe aceasta sistemul își menține periodicitatea. Cele două contacte corespund unor panglici de grafena semi-infinite. Astfel, se realizează partajarea în electrozi și regiunea de împrăștiere.

Transportul de sarcină este analizat utilizând formalism funcțiilor Green de ne-echilibru (NEGF) implementat în TranSiesta. Funcțiile de transmisie sunt indicate în Fig. 2.1.4, pentru structurile $G@Hf-O$ și $G@O-Hf$. Sunt analizate următoarele situații: câmp electric aplicat nul și câmp electric perpendicular pe interfata de $+3V/nm$ și $-3V/nm$. Cele două sisteme indică un răspuns electric diferit, în concordanță cu mărimea gap-ului observat. Structura de tip $G@Hf-O$ prezintă un coeficient de transmisie relativ ridicat, de ordinul unității, pe întregul interval energetic considerat $[-3, +3]$ eV. De asemenea, există o foarte mică variație a funcției de transmisie în condițiile unui câmp electric aplicat de $\pm 3 V/nm$. Aceste observații sunt consistente cu mărimea gap-ului energetic indus în grafena de ~ 0.25 eV. Astfel, prin introducerea unui segment finit de HfO_2 cu terminatia Hf, stratul de grafena prezintă proprietăți de conducție relativ bune, în timp ce efectul de câmp este relativ redus.

În contrast cu această situație, în cazul sistemului $G@O-Hf$ se observă o diminuare semnificativă a transmisiei la energii mici, în jurul nivelului Fermi. După cum a fost indicat anterior, gap-ul indus în sistemul infinit este mai mare (~ 1.8 eV) ceea ce induce efecte vizibile în comportamentul funcției de transmisie, care prezintă o variație de cel puțin două ordine de mărime. De această dată, efectul de câmp este observabil. Pentru cele două valori ale câmpului electric aplicat, $+3V/nm$ și $-3V/nm$, se obțin valori distincte față de funcția de transmisie obținută fără câmp electric aplicat.

Prin comparație, transmisia prin panglicile de grafena fără substrat HfO_2 prezintă o caracteristică tipică în trepte, valorile fiind semnificativ mai mari.

Aceste rezultate preliminare indica faptul ca terminatia de tip O induce efecte semnificative in conductia monostratului de grafena, comparativ cu terminatia de tip Hf. De aceea, controlul conditiilor de crestere a stratului de HfO_2 este esential pentru a obtine efectul de camp necesar in aplicatii de tip tranzistor. Astfel, rezultatele obtinute sugereaza ca un tratament termic in oxigen este benefic, accentuand conditiile realizarii efectului de camp, prin inducerea unui gap semnificativ in monostratul de grafena.

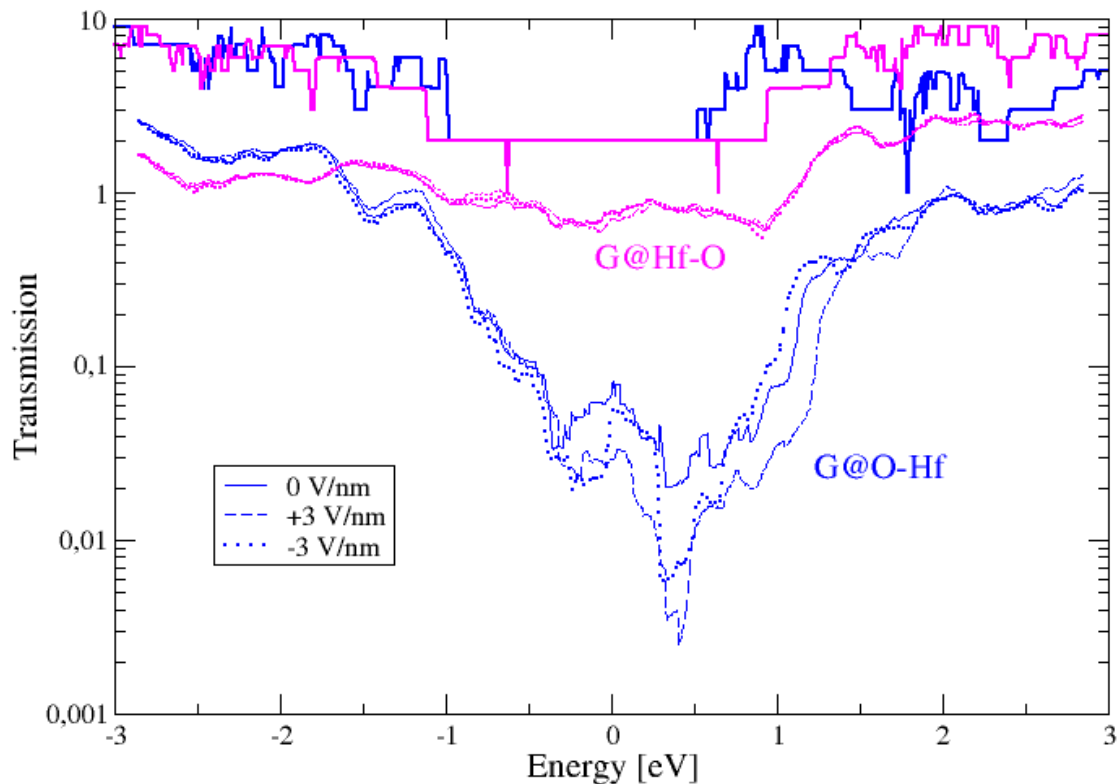


Fig.2.1 .4. Functii de transmisie corespunzatoare structurilor G@Hf-O si G@O-Hf , fara camp electric aplicat (linii continue/subtiri) si in conditiile unui camp electric perpendicular pe interfata de $+3\text{V/nm}$ (linii intrerupte) si -3V/nm (linii punctate). Nivelul Fermi corespunde energiei $E=0\text{eV}$. Liniile continue ingrosate corespund transmisiei ideale (fara substrat HfO_2).

2.2 Simulari privind detectia frecventelor foarte inalte bazate pe antene si tranzistoare FET grafena/feroelectric.

Simularile sunt facute pentru realizarea demonstratorului 1 al proiectului dedicat detectiei frecventelor inalte folosind structuri HfZrO bazat pe parametrii fizici determinati pana acum.

Demonstratorul consta intr-un dispozitiv nanoelectronic compus dintr-o antena (bow-tie) intre bratele ei plasand un element de detectie : fie o dioda self-switching (SSD)-o dioda care rectifica numai prin forma sa si nu prin jonctiuni dopate (vezi lucrarea noastra [13] si referintele care o insotesc)-vezi Fig. 2.2.1 , fie un tranzistor in care poarta si drena sunt bratele antenei.

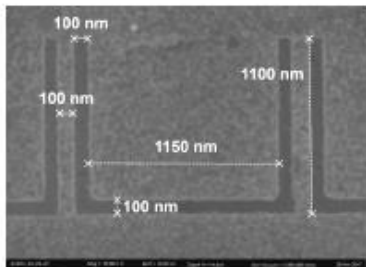


Fig. 2.2.1 Dioda SSD in grafena la 28 GHz. SSD este formata in grafena prin realizarea de santuri cu e-beam ; sunt necesare zeci de perioade pentru o structura eficienta [13].

Substratul pe care se va realiza demonstratorul 1 :

Substratul de referinta este alcatuit de: 525 micrometri de siliciu de inalta rezistivitate (HRSi) si 6 nanometri de oxid de hafniu ferroelectric (HfZrO).

Metalizarea antenei este un strat subtire de aur cu o grosime intre 300 si 500 nanometri.

Antena bow-tie este o geometrie planara simpla care garanteaza o eficienta de radiatie mare si o impedanta pana la 300 Ohmi, o valoare mai mare decat cea a dipolilor traditionali.

Antena pentru D1 cu SSD este prezentat in Fig. 2.2.2:

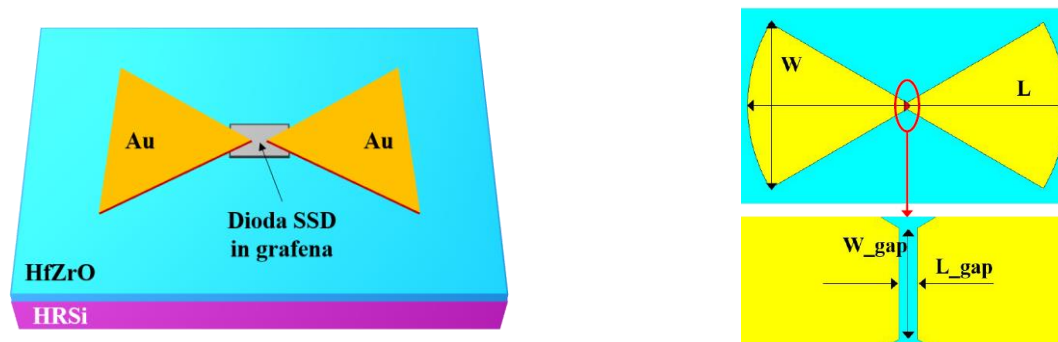


Fig.2. 2.2 Antena bow-tie pentru D1 cu SSD

Vom alege o antena cu margini rotunjite pentru a creste banda antenei.

Din simularile cu CST au rezultat urmatoarele dimensiuni la trei frecvente de lucru din Fig. 2.2.2.

	W	L	W_gap	L_gap
24GHz	~2.3mm	~4.5mm	100 μ m	16 μ m
38GHz	~1.3mm	~2.5mm	100 μ m	16 μ m
60GHz	~1.1mm	~2mm	100 μ m	16 μ m

Din simularea parametrilor S , se poate observa cum fiecare antenna rezonaza la frecventa potrivita, cu o valoare de coeficient de reflectie aproape de -40dB (Fig. 2.2.3). Figura 2.2.4 arata diagrama de radiatie tipic pentru acest tip de antene, cu doi lobi perpendiculari fata de axa antenei si o eficienta de radiatie de peste 90%. Castigul antenei este intre 5.2dB si 5.9dB.

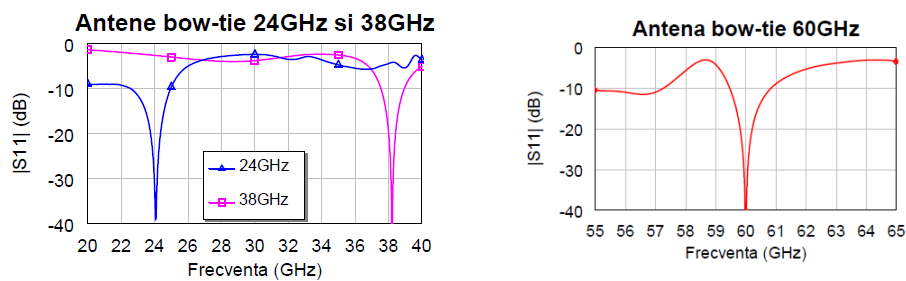


Fig. 2.2.3 Parametrul S_{11} al antenei la diverse frecvente.

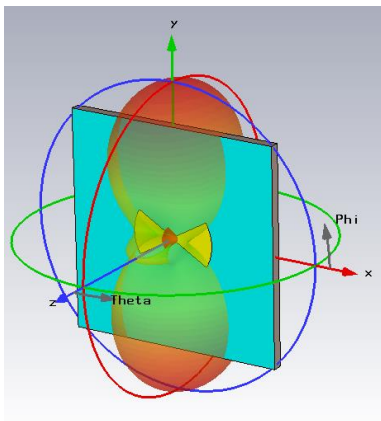


Fig. 2.2.4 Caracteristica de radiatie a antenei bow-tie.

In cazul demonstratorului cu bow-tie si FET, structura de analizat este in reprezentata in Fig. 2.2.5

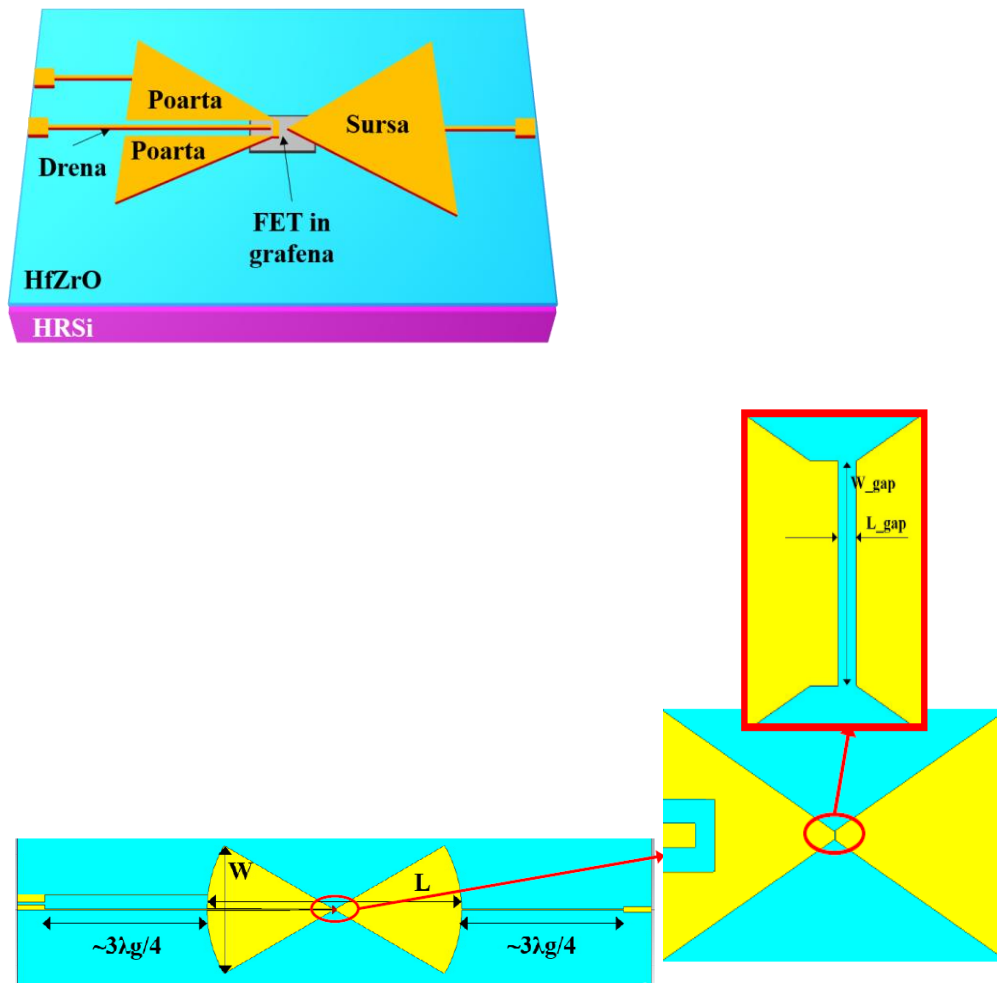


Fig. 2.2.5 Demonstratorul 1 cu antena bow-tie si FET .

Lungimea liniilor catre pad-urile pentru aplicarea/detectarea tensiunilor de poarta, drena si sursa au o lungime de $\sim 3\lambda/4$ pentru decuplarea intre semnalul de frecventa inalta si semnalele in curent continuu.

Valorile diverselor marimi in figura de mai sus sunt exprimate in tabelul de mai jos in urma simularii cu CST :

	W	L	W_gap	L_gap
24GHz	$\sim 2.3\text{mm}$	$\sim 4.6\text{mm}$	$2\mu\text{m}$	200nm
38GHz	$\sim 1.3\text{mm}$	$\sim 2.6\text{mm}$	$2\mu\text{m}$	200nm
60GHz	$\sim 0.9\text{mm}$	$\sim 1.8\text{mm}$	$2\mu\text{m}$	200nm

Caracteristica de radiatie la 60 GHz este prezentata in Fig. 2.2.6 si este :

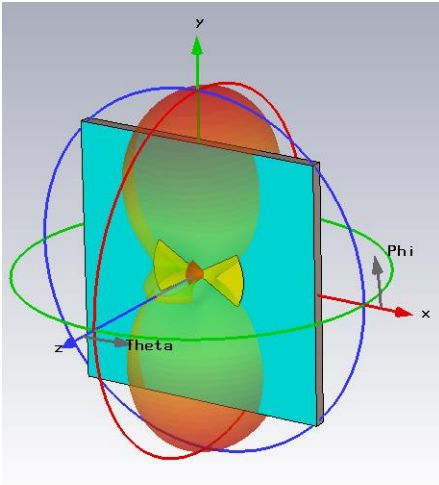


Fig. 2.2.6 Caracteristica de radiatie la 60 GHz demonstrator bow-tie FET.

Parametrul S11 este prezentat in Fig.2.2.7 la 60 GHz.

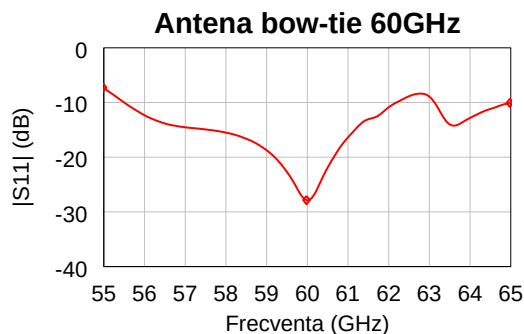


Fig. 2.2.7 Parametrul S11 la 60 GHz demonstrator bow-tie FET

3. Concluzii

Faza 2 si-a atins obiectivele pe care si le-a propus, s-au publicat articole ISI in numar destul de mare, bibliografie fazei fiind in special bazata ele, s-a participat la conferinte nationale si internationale, pe scurt trecem la executia fazei 3 care este constituita in special de fabricarea si caracterizarea demonstratorului 1.

Initial, proiectul si-a propus crearea feroelectricilor bazati pe HfO₂ prin doua metode (ALD, manetron sputtering) si a unui feroelectric cunoscut PZT pentru a fi folosit in cazul in care feroelectricii bazati pe HfO₂ nu puteau fi realizati. Este clar ca acum am realizat plachete grafena/HfZrO/Si pe plachete de 4 inch ,am realizat dispozitive electronice cu ajutorul lor si vom continua sa realizam demonstratoare pe grafena/HfZrO/Si ,deoarece acestea sunt compatibile CMOS.

Referinte

- [1] K. Kyuno, and A. Toriumi, Permittivity increase of yttrium-doped Hf O₂ through structural phase transformation, Appl.Phys. Lett 86, 102906 (2005).
- [2]M. Modreanu, J. Sancho-Parramon , O. Durand , B. Servet , M. Stchakovsky , C. Eypert, C. Naudin , A. Knowles , F. Bridou , M.-F. Ravet, Investigation of thermal annealing effects on microstructural and optical properties of HfO₂ thin films, Applied Surface Science 253 328(2006).
- [3]R. Chalker, , M. Werner, S. Romani, R. J. Potter, K. Black, H. C. Aspinall, A. C. Jones, C. Z. Zhao, S. Taylor, and P. N. Heys, Permittivity enhancement of hafnium dioxide high- films by cerium doping, Appl. Phys. Lett. **93**, 182911 (2008).
- [4] T. S. Böske, J. Müller, D. Bräuhäus, U. Schroeder and U. Böttger, Appl. Phys. Lett., , 99, 102903 (2011).
- [5] J. Müller, T.S. Böske, U. Schröder, S. Mueller, D. Bräuhäus, U. Böttger, L. Frey, and T. Mikolajick, Ferroelectricity in simple binary ZrO₂ and HfO₂, Nano Lett. 12, 4318–4323 (2012).
- [6] M. Dragoman, M. Aldrigo, M. Modreanu, D. Dragoman, Extraordinary tunability of high-frequency devices using Hf_{0.3}Zr_{0.7}O₂ ferroelectric at very low applied voltages, Appl. Phys. Lett. **110**, 103104 (2017)
- [7] M. Aldrigo, M.Dragoman, S. Iordanescu, F.Nastase, S. Vulpe, A.Dinescu, and D.Vasilache, Low-voltage permittivity control of coplanar lines based on hafnium oxide ferroelectrics grown on silicon, IEEE Access 7, 136686-136686-136693 (2019).
- [8] S. Vulpe, F. Nastase, M. Dragoman, A. Dinescu, C. Romanitan, S. Iftimie, Antoniu Moldovan, N. Apostol, Physical properties of the ferroelectric capacitors based on Al-doped HfO₂ grown via Atomic Layer Deposition on Si, Applied Surface Science 483, 324-333 (2019)
- [9] A.M. Lepadatu, C. Palade, A. Slav, A.V. Maraloiu, S. Lazanu, T. Stoica, C. Logofatu, V.S. Teodorescu, M.L. Ciurea, „Single layer of Ge quantum dots in HfO₂ for floating gate memory capacitors”, *Nanotechnology* **28**, 175707 (2017)
- [10] C. Palade, A. Slav, A.M. Lepadatu, I. Stavarache, I. Dascalescu, V.A. Maraloiu, C.C. Negrila, C. Logofatu, T. Stoica, V. Teodorescu, M.L. Ciurea, S. Lazanu, „Orthorhombic HfO₂ with embedded Ge nanoparticles in nonvolatile memories used for the detection of ionizing radiation”, *Nanotechnology* **30**, 365604 (2019)
- [11] M. Dragoman, M. Modreanu, I. M. Povey, A. Dinescu, D. Dragoman, Reconfigurable horizontal/vertical carrier transport in graphene/HfZrO field-effect transistors, *Nanotechnology* 31,025203 (2019).
- [12] G.A. Nemnes, D.Dragoman and M.Dragoman, Graphene bandgap induced by ferroelectric Pca21 HfO₂substrate: a first-principles study, Phys. Chem. Chem. Phys. **21**, 15001-15006 (2019).
- [13] M. Yasir, M. Aldrigo, M. Dragoman , A. Dinescu ,M. Bozzi , S. Iordanescu , D. Vasilache, Integration of antenna array and self-switching graphene diode for detection at 28 GHz, IEEE Electron Dev. Lett., 40 , 628-630 (2019).