

Titlul proiectului de cercetare:

**Dispozitive nanoelectronice avansate bazate pe heterostructuri grafenă/feroelectric
(GRAPHENEFERRO)**

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

Contract nr. 7/2018

**Etape 4 2021: Circuite nanoelectronice bazate pe heterostructuri grafenă/feroelectrice
pentru circuite logice și neuromorfe**

CO: Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Microtehnologie

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

Parteneri :

P1 Universitatea din București, Facultatea de Fizică

Responsabil de proiect: prof.univ.dr. Daniela Dragoman

P2 Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizica Materialelor (INCDFM)

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

P3 Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizica Laserilor, Plasmei și Radiației (INFLPR)

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

Rezumat Circuitele de înaltă frecvență, digitale sau neuromorfe, sau pentru conversia termoelectrică a energiei, necesită funcționalități controlabile și reconfigurabile ale circuitelor nanoelectronice. Grafena este potrivită pentru aceste aplicații datorită dopării electrostatice, care permite variația densității purtătorilor cu o tensiune de poartă. Substraturile oxidice însă limitează mobilitatea grafenei la câteva mii de cm^2/Vs . Pe de altă parte, mobilitatea în heterostructurile grafenă/feroelectric (G/F) este cu 2-3 ordine de mărime mai mare. Natura inovativă a proiectului se bazează pe posibilitatea de a crește semnificativ funcționalitatea dispozitivelor nanoelectronice bazate pe grafenă prin folosirea substraturilor feroelectrice. Heterostructurile G/F permit:

- (i) obținerea unor mobilități foarte mari în tranzistorii cu efect de câmp (FET) G/F, care deplasează regiunea de funcționalitate a FET-ului spre frecvențe foarte înalte,
- (ii) fabricarea unor detectori la frecvențe foarte înalte, care nu necesită răcire,
- (iii) exploatarea comportării histeretice a rezistenței structurilor G/F în aplicații neuromorfe, cum ar fi circuitele digitale și sinapsele artificiale,
- (iv) fabricarea unor circuite de microunde reconfigurabile, și
- (v) fabricarea unor dispozitive termoelectrice, grafena având un efect termoelectric îmbunătățit.

Proiectul constă în proiectarea, fabricarea și testarea unor dispozitive nanoelectronice inovative bazate pe proprietățile fizice de excepție ale heterostructurilor G/F, în particular dispozitive electronice digitale, circuite neuromorfe, dispozitive reconfigurabile și de captare a energiei. Tehnicile de creștere a heterostructurilor G/F în proiect trebuie să fie scalabile la nivel de plachetă. Proiectul este implementat de un consorțiu din 3 institute naționale de cercetare-dezvoltare și cea mai importantă universitate din România, care au infrastructura modernă necesară.

Pentru anul 2021 ne-am propus, conform planului de realizare, obiectivele enumerate mai jos:

1. Creșterea de heterostructuri G/F
2. Fabricarea demonstratorului D2 (circuite logice bazat pe FET heterostructuri G/F) și D3 (circuit neuromorf bazat pe FET heterostructuri G/F)
3. Proiectarea unui circuit termoelectric pentru conversie termică în DC bazat pe heterostructuri G/F

Capitolul 1. Creșterea de heterostructuri grafenă/feroelectric

În această etapă metodele de creștere grafenă/feroelectric sunt puse la punct. Au rezultat două metode de creștere viabile, ambele bazate pe feroelectrici HfO_2 dopați. HfO_2 a fost preferat față de PZT din două motive: (a) feroelectricii bazati pe HfO_2 sunt singurii compatibili cu tehnologia CMOS și deci circuitele digitale și neuromorfe (obiectivul nostru principal din 2021) sunt la rândul lor compatibile cu tehnologia CMOS și se pot realiza pe plachete de 4 inch, și (b) feroelectricii bazati pe HfO_2 nu sunt toxici, spre deosebire de PZT care conține Pb. Însă PZT rămâne ca feroelectric de referință și poate fi utilizat în cazul în care există probleme de creștere a feroelectricilor bazati pe HfO_2 . Au rezultat astfel două categorii de feroelectrici:

1. Feroelectrici HfO_2 dopați cu Zr (HfZrO) și Al (HfAlO)

Așa cum am arătat în etapele anterioare, aceștia au fost depuși prin metoda ALD, având grosimea de 6 nm și rugozitate de 1-2 nm. Prezentăm mai jos sistemul de măsură Fig. 1(a) și curbele de polarizare funcție de câmp $P(E)$ (Fig. 1(b)). Se constată că atât HfZrO cât și HfAlO au o polarizare remanentă de $40 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ și un câmp coerciv de 3-4 MV/cm, perfect compatibile cu realizări similare pe plan internațional [1], [2].

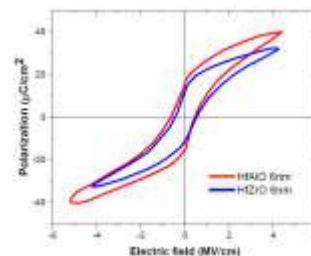


Fig. 1. (a) Sistemul de măsură Sawyer-Tower $P(E)$, și (b) $P(E)$ pentru HfZrO și HfAlO cu grosimea de 6 nm depuși direct pe Si dopat. Contacte: $150 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$ Cr (5 nm)/Au (200 nm)

2. Feroelectrici HfO_2 dopați cu Ge (HfGeO)

Doparea cu Ge a HfO_2 și existența unui feroelectric cu HfGeO este o noutate care aparține consorțiului nostru [3]. Acesta a fost studiat aprofundat în faza anterioară. În 2021 s-a continuat prepararea de structuri feroelectrice de tipul S1, S2, S3 și S4 cu 3 straturi și anume HfO_2 poartă/Ge- HfO_2 intermediar/ HfO_2 bottom/(100) Si. Structurile au fost depuse prin pulverizare cu magnetron pe substrat de p-Si, cu rezistivitatea $\rho = 7 - 14 \Omega\text{cm}$ și respectiv cu $\rho = 0.2 - 2 \Omega\text{cm}$. HfO_2 a fost depus în regim rf, iar Ge în regim dc, folosind ținte de HfO_2 (4N puritate) și respectiv de Ge (5N), iar ca gaz de lucru s-a folosit Ar (6N). După depunere, structurile amorfe au fost tratate termic (RTA) pentru nanostructurare la temperaturile de 550 și 600 °C. Configurația cu 3 straturi a probelor (Fig. 2) aleasă în etapele anterioare este favorabilă controlului proprietăților feroelectrice prin variația grosimii straturilor. Pentru aceasta, au fost fabricate 4 tipuri de structuri S1–S4 [3] după cum urmează:

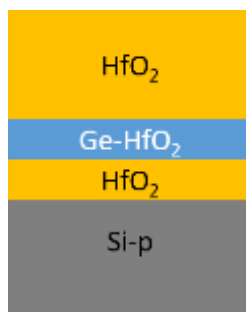


Fig. 2. Schema structurii cu 3 straturi

Condiții de depunere structuri S1, S2, S3 și S4:

- HfO_2 „buffer”: 40 W rf, grosime $d_{\text{bot}} = 10 \text{ nm}$
- Ge- HfO_2 intermediar: HfO_2 30 W rf, Ge 15 W dc, compoziție 70 vol.% Ge, grosimi $d_{\text{int}} = 10 \text{ nm}$ (S1), 20 nm (S2) 7,5 nm (S3), 15 nm (S4)
- HfO_2 poarta: 40 W rf, grosimi $d_{\text{top}} = 60 \text{ nm}$ (S1, S2), 24 nm (S3), 30 nm (S4)

Condiții de tratament RTA:

- flux N_2 100 sccm la presiune atmosferică
- $T = 550$ și $600 \text{ }^\circ\text{C}$; $t = 8 \text{ min}$

În Tabelul 1 sunt date grosimile celor 3 straturi componente ale structurilor S1–S4 tratate RTA, grosimile fiind evaluate pe baza imaginilor XTEM (Fig. 2). În Fig. 3 sunt prezentate imaginile TEM în secțiune transversală (XTEM) pentru toate cele 4 structuri.

Tabel 1. Structuri preparate

Structura	ρ_{Si} [Ωcm]	T_{RTA} [$^{\circ}\text{C}$]	Notatie	d_{top} [nm]	d_{int} [nm]	d_{bot} [nm]	d_{int}/d_{top} [%]
S1	7 – 14	550	S1-550	57	10	11	17.5
		600	S1-600	57	8	11	14.0
S2	7 – 14	550	S2-550	57	22	13	38.6
		600	S2-600	65	19	13	29.2
S3	7 – 14	600	S3-600	25	6.5	9.5	26.0
S4	0.2 – 2.0	600	S4-600	23.5	15.5	12.5	66.0

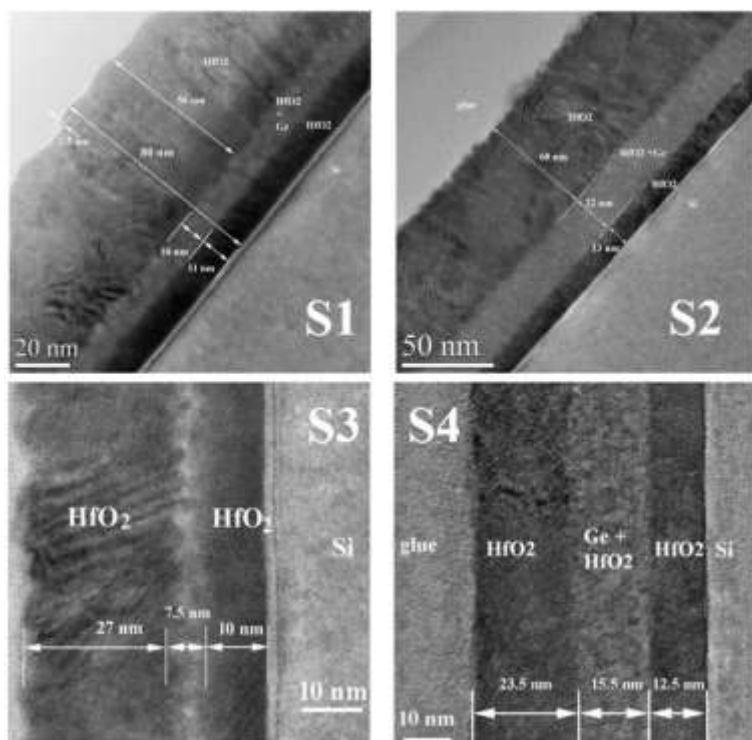


Fig. 3. Imagini XTEM la mărire joasă ale structurilor S1-550, S2-550, S3-600 și S4-600.

În Etapa 3 (2020) s-a pus în evidență faptul că în timpul tratamentului RTA are loc difuzia laterală a atomilor de Ge din stratul intermediar în cele 2 straturi adiacente de HfO_2 , obținându-se astfel un dopaj semnificativ de Ge în rețeaua cristalină a HfO_2 . Stratul intermediar este format din cristalite de HfO_2 cu structură ortorombică și din nanoparticule amorfe de Ge. Cristalitele de HfO_2 din stratul intermediar au dimensiuni de ≈ 10 nm sau mai mici, pe când în straturile adiacente (de poartă și „bottom”), ele sunt mai mari (30 – 40 nm), fiind extinse în planul filmului. Rețeaua de HfO_2 se stabilizează în monoclinic în zona nedopată și rămâne în fază ortorombică în zona dopată cu Ge, în cadrul aceluiași grăunte cristalin. Aceasta duce la formarea de tensiuni interne (“strain”) în rețeaua cristalină, care deformează atât faza ortorombică cât și cea monoclinică.

Rezultatele TEM sunt în bun acord cu simulările atomistice de structură și de stabilitate a fazei ortorombice pentru HfO_2 dopat cu Ge și cu rezultatele obținute din măsurări XRD. Astfel, folosind teoria funcționalei de densitate (DFT) au fost efectuate calcule *ab initio* pentru a evidenția efectul introducerii Ge în rețeaua HfO_2 (de volum) în fazele M-monoclinic cu simetrie $P2_1/c$, O-ortorombic cu simetrie $Pca2_1$ și T-tetragonal cu simetrie $P4_2/nmc$ (folosind pachetul

Quantum Espresso). S-a observat că energia relativă de formare a fazei O este redusă prin substituția atomilor de Hf cu Ge (în raport cu faza M). Pentru a cuantifica feroelectricitatea sistemului $\text{Hf}_{1-x}\text{Ge}_x\text{O}_2$, s-a calculat polarizarea prin metoda „Berry phase” pentru faza O și polarizarea corespunzătoare HfO_2 pur cu structura M și T. Pentru HfO_2 pur în fazele M și T au fost găsite valori neglijabile ale polarizării, în timp ce pentru faza O necentrosimetrică polarizarea este nenulă (P_y). Polarizarea este semnificativ crescută cu un factor de până la ≈ 11 pentru faza O prin substituția atomilor de Hf cu 12.5 at.% Ge [4]. S-a calculat polarizarea fazei O pentru HfO_2 pur, obținând valoarea de $49.3 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, în bun acord cu rezultatele teoretice raportate, i.e. $49 - 56 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ [5], [6]. În concluzie, substituția atomilor de Hf cu Ge conduce atât la stabilizarea fazei O cât și la creșterea polarizării pentru sistemele $\text{Hf}_{1-x}\text{Ge}_x\text{O}_2$.

În Fig. 4 se prezintă difractograme de raze X măsurate pe structurile S1–S4 tratate RTA la 600°C . Se evidențiază prezența fazei ortorombice feroelectrice O prin maximul principal poziționat la $2\theta = 30.4^\circ - 30.6^\circ$ și prezența fazei M a HfO_2 prin maximele de la $2\theta = 24.5^\circ, 28.4^\circ, 31.6^\circ$ și 41° . Maximele de la $2\theta = 35^\circ$ și 50° pot fi atribuite fazei O cu contribuția fazei M.

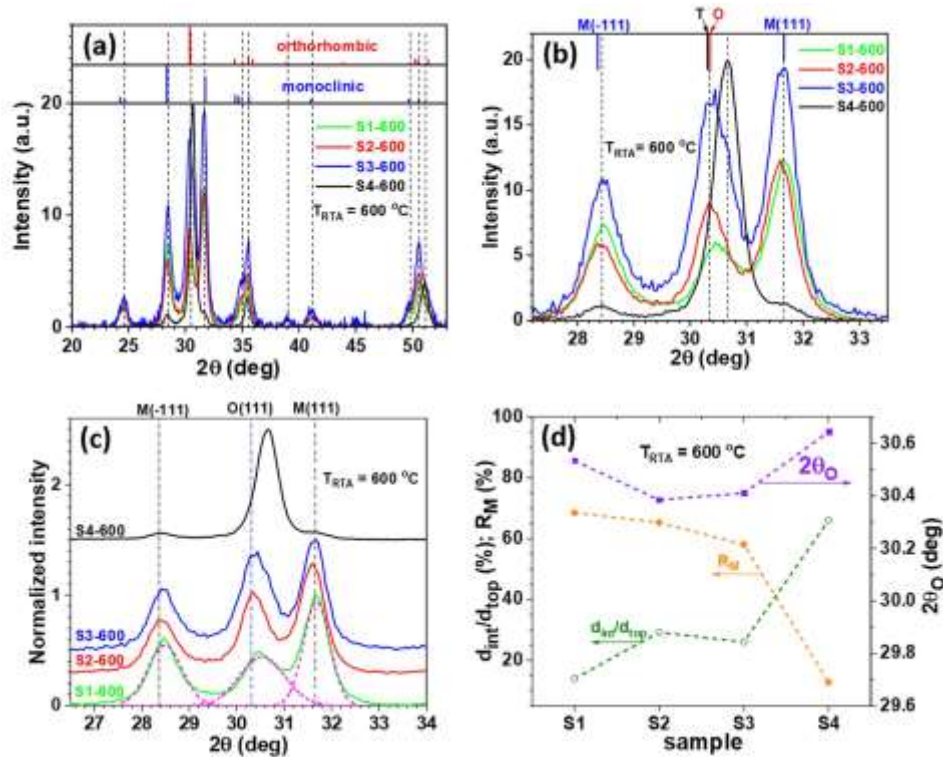


Fig. 4. Structuri S1–S4 tratate la 600°C : (a) și (b) difractograme de raze X în valoare absolută în regiunea $2\theta = 20^\circ - 50^\circ$ și respectiv $2\theta = 27^\circ - 34^\circ$, măsurate la unghiul de incidență de 2° ; (c) curbe normate la valoarea maximă în regiunea $2\theta = 26.5^\circ - 34^\circ$ și deconvoluția difractogramei pentru S1-600 în 3 maxime Lorentz; (d) ponderea R_M corespunzătoare fazei monoclinice și poziția $2\theta_O$ a maximului (111)O comparate cu raportul de grosimi $d_{\text{int}}/d_{\text{top}}$ din Tabelul 1.

O mai bună comparație a cristalizării structurilor S1–S4 privitor la fazele M și O se face prin analiza difractogramelor în zona $2\theta = 27^\circ - 34^\circ$ corespunzătoare celor mai intense maxime (-111)M, (111)O și (111)M (Fig. 4(b)). Observăm că maximul (111)O este dominant în structura S4-600, iar intensitatea maximului (111)O crește de 2 – 3 ori de la structura S1-600 la structura S4-600. Evoluția intensităților diferitelor maxime ((-111)M și (111)M față de (111)O) de la o structură la alta este mai bine evidențiată în difractogramele normate la valoarea maxima, Fig. 4(c). În această figură se prezintă deconvoluția difractogramei structurii S1-600 în zona $26.5^\circ - 34^\circ$, în 3 maxime Lorentz care descriu maximele (-111)M, (111)O și (111)M. Se știe din literatură [7] că ponderea R_M a fazei M definită ca $R_M = (A_{M(-111)} + A_{M(111)})/(A_{M(-111)} + A_{M(111)} +$

$A_{O(111)}$ (A – aria fiecărui maxim) se corelează cu polarizarea feroelectrică a filmelor de HfO_2 dopat cu diferite elemente (Ge, Si, Y, Sc, Al, N) sau a celor de HfO_2 nedopat tratate termic post-depunere cu scopul de a controla vacanțele. În Fig. 4(d) se observă că R_M scade de la structura S1 la S4 și că acest parametru se corelează cu parametrul de „dopaj” definit în ca raportul $d_{\text{int}}/d_{\text{top}}$ dintre grosimea stratului intermediar de HfO_2 bogat în Ge și cea a stratului de HfO_2 de poartă (Tabel 1). Corelarea dintre ponderea R_M și polarizare în structurile noastre cu 3 straturi cu dopaj neuniform diferă de cea raportată în literatură – dopaj uniform [7]. S-a observat și că structurile tratate RTA la 550 și 600 °C nu diferă din punct de vedere structural și morfologic, ponderea R_M păstrându-și practic valoarea. Structura S4-600 prezintă cea mai mică pondere a fazei monoclinice $R_M \approx 20\%$, drastic redusă față de structurile S1-S2 ($R_M > 67\%$), după cum se observă din Fig. 5, care prezintă rezultate obținute la incidență razantă.

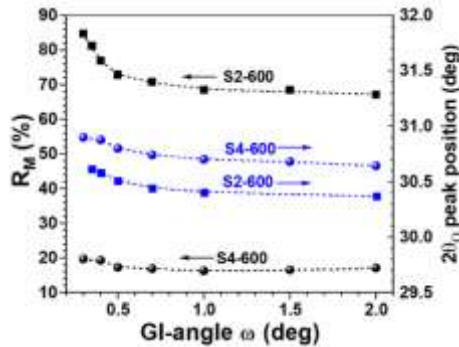


Fig. 5. Ponderea fazei monoclinice R_M și poziția $2\theta_O$ a maximului O(111) în funcție de unghiul de incidență razantă ω pentru structurile S4-600 și S2-600.

Această valoare mică a ponderii R_M (faza M minoritară, faza O majoritară) în structura S4-600 se datorează preparării unui strat de “cap” mai subțire ($d_{\text{top}} \approx 25$ nm) față de structura S2 în care $d_{\text{top}} \approx 60$ nm (Tabel I), astfel încât faza M este prezentă în principal în regiunea de sus a stratului de “cap”. În ceea ce privește poziția $2\theta_O$ a maximului O(111), observăm (Fig. 5) că $2\theta_O$ crește la unghiuri ω mici datorită relaxării tensiunilor de compresie sau/și datorită scăderii dopajului de Ge către suprafața liberă a filmului.

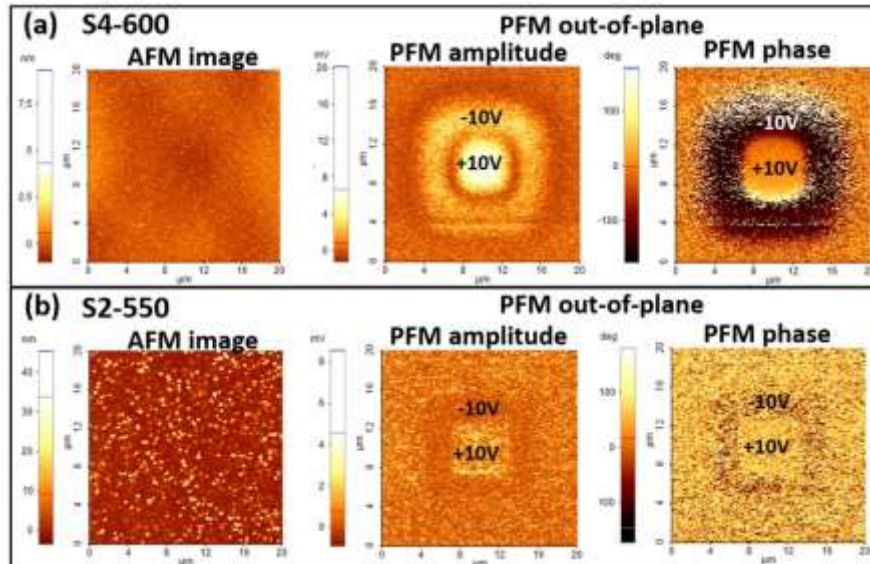


Fig. 6. Imagini AFM (stânga) și PFM corespunzătoare intensității polarizării (mijloc) și fazei (dreapta) obținute pe structurile S4-600 (a) și S2-550 (b).

În Fig. 6 sunt prezentate imagini PFM corespunzătoare intensității polarizării și fazei pentru probele S4-600 și S2-550, care arată comportarea feroelectrică a HfO_2 în structurile cu 3

straturi. Faza semnalului PFM se schimbă cu 180° prin schimbarea semnelui tensiunii dc aplicate pe substrat (scriere ± 10 V), ceea ce corespunde unei comutări a direcției vectorului polarizare internă, de la orientare în jos la orientare în sus (inversarea polarizării), acest fapt indicând prezența fazei feroelectrice [8]. Structura S4-600 prezintă cel mai bun semnal PFM, în acord cu faptul că această structură prezintă și cea mai mică pondere a fazei monoclinice $R_M \approx 20\%$. În plus, structura S4-600 este preparată pe substrat de Si cu rezistivitate mai joasă decât S2-550, benefică pentru comutarea polarizării prin asigurarea unui câmp suficient de mare în HfO_2 feroelectric [9]. Deși structura S2-550 are o pondere R_M mare ($> 72\%$) și este depusă pe substrat de Si cu rezistivitate mai mare, detectăm semnal PFM datorită grosimii mari a regiunii dopate cu Ge cu structură cristalină O feroelectrică, grosime cu valori similare cu cea pentru S4-600.

În Fig. 7 se prezintă bucle de histerezis remanent a polarizării funcție de tensiune măsurate pe structura S4-600 pentru diferite tensiuni pe puls ($U_{\max} = 7$ V, 8 V și respectiv 9 V /5 s). Polarizarea remanentă totală (la 0 V) $2P_r$ atinge $6.5 \pm 0.2 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ pentru pulsuri de ± 10 V/5 s (Fig. 7(b) și insert), câmpul coercitiv atingând valoarea 8.6 ± 0.5 V (câmp mediu 1.6 ± 0.1 MV/cm). Valoarea de $2P_r = 6.5 \pm 0.2 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ este apropiată de valorile raportate în literatură [10,11]. Valori mai mari de $10 - 40 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ au fost raportate pentru straturi subțiri de HfO_2 cu grosime ≈ 10 nm sau în structuri cu straturi de „cap” și/sau „buffer” optimizate [7,8,9]. În cazul nostru, regiunile cu cristalite de HfO_2 cu structura M (din partea de sus a stratului „cap”) joacă un rol important în obținerea unei polarizări remanente mai mici. Totuși, structura cu 3 straturi are avantajul de a putea fi folosită în memorii cu poartă flotantă care beneficiază de injecția de sarcină și de contribuția cumulativă a stratului de HfO_2 feroelectric la efectul de memorie.

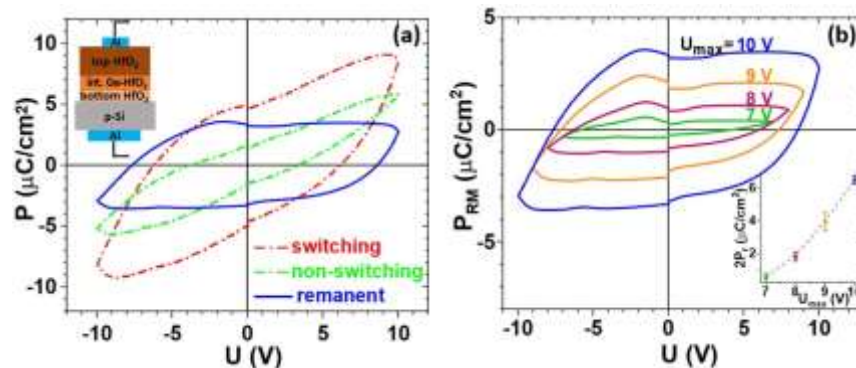


Fig. 7. Bucle de histerezis remanent a polarizării funcție de tensiune măsurate pe structura S4-600: (a) pulsuri de ± 9 V/5 s; (b) pentru diferite tensiuni pe puls ($U_{\max} = 7$ V, 8 V și 9 V /5 s). Insertul din (b) arată dependența de tensiunea pe puls a polarizării remanente totale $2P_r$ (la 0 V).

3. Filme subțiri de PZT

În această etapă experimentală au fost depuse mai multe seturi de filme de PZT cu ajutorul sistemului PLD (vezi Fig. 8(a)) achiziționat în cadrul proiectului PCCF7. Noul sistem PLD facilitează obținerea de straturi subțiri cu o grosime precis controlată și cu un diametru maxim al probei de 8 cm (vezi Fig. 8(b)). Însă, așa cum am precizat în anterioara raportare, acum am realizat un adaptor ce permite depunerea unui film subțire de PZT pe un substrat cu un diametru de aproximativ 10 cm (4 inch). Acest adaptor pentru probe este prezentat în Fig. 8(c).

Pe adaptorul din Fig. 8(c) a fost plasat un substrat de Siliciu (vezi Fig. 9(a)) cu un diametru de 4 inch. Filmele subțiri de PZT au fost crescute pe trei tipuri de substraturi: Siliciu (cu rezistivitate ridicată și siliciu de tip p), pe Si acoperit cu SiO_2 (Dioxid de Siliciu) și respectiv pe Platină (Pt). Substraturile au fost plasate în interiorul incintei PLD, paralel față de ținta ceramică de PZT. Pentru experimente a fost utilizată o țintă de PZT cu compoziția chimică $\text{Pb}_{1.1}\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}$. La temperaturi ridicate Plumbul (Pb) devine volatil; astfel, excesul de Plumb din PZT are rolul de a compensa posibila volatilizare a acestuia. Distanța țintă-substrat a fost fixată la

6.8 cm. Înaintea începerii procesului de depunere, gazul din incinta PLD a fost evacuat până la o presiune de aproximativ $5 \cdot 10^{-5}$ mbar. Acest pas este urmat de încălzirea substraturilor până la temperatura de lucru 550°C, respectiv 650°C. Substratul a fost încălzit cu o rată de 20°C/min și menținut la temperatura de lucru pe toată durata depunerii. Odata ce sistemul a ajuns la temperatura de lucru, un flux de 40 SCCM de oxigen O_2 este introdus în incinta PLD și presiunea de lucru este fixată la 1 mbar.

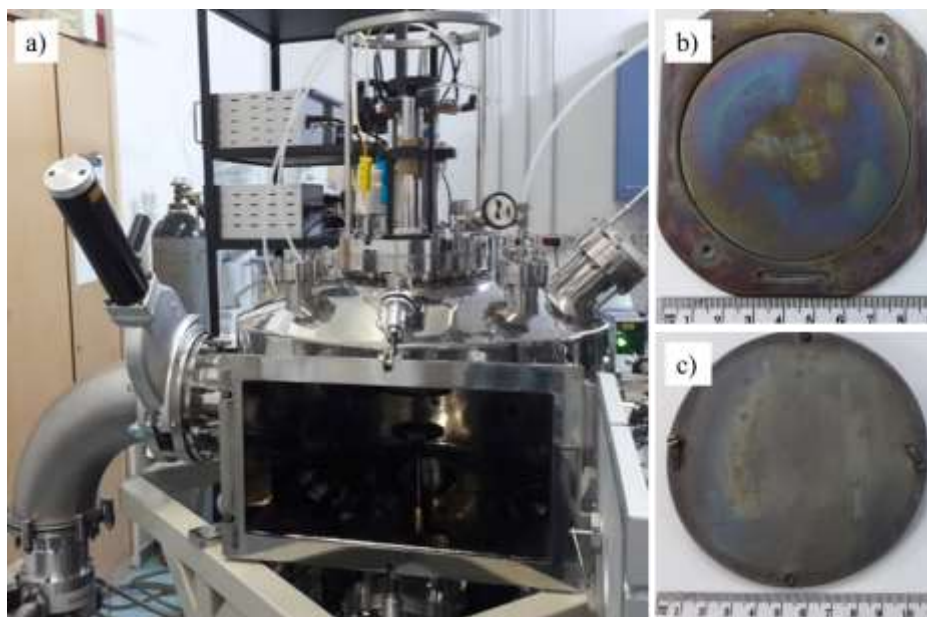


Fig. 8. a) Sistem PLD pe arie mare. b) Suport cu un diametru al probei de maxim 8 cm. c) Adaptor pentru probe cu un diametru de aproximativ 10 cm (4 inch).

Pentru depunerea filmului subțire de PZT a fost folosit un laser cu corp solid cu mediu activ Nd:YAG (Ytriu Aluminu Garnet dopat cu Neodim: $Nd:Y_3Al_5O_{12}$) care emite la lungimea de undă 266 nm (4 ω). Laserul a fost operat la o frecvență de 10 Hz iar fluența a fost fixată la 2.4 J/cm². Pentru a obține un film de PZT cu o grosime de aproximativ 50 nm au fost folosite un număr de 20000 pulsuri laser. După depunere, filmele subțiri de PZT au fost răcite până la temperatura camerei cu o rată de 10°C/min. Răcirea a fost efectuată în atmosfera de O_2 la o presiune de 1 mbar și un flux de 40 SCCM. În Tabelul 2 sunt prezentate câteva exemple de caracteristici experimentale utilizate în obținerea filmelor de PZT prin PLD.

Tabel 2. Condiții de depunere folosite pentru filme de PZT obținute prin PLD

Proba	Ținta	Substrat	P _{oxigen} (mbar)	d _{t-c} (cm)	T _s (°C)	N _{Pulse}	Φ_{laser} (J/cm ²)	λ (nm)
48 Si	PZT	Si (100)	1	6.8	550	20.000	2.4	266
48 SiO ₂	PZT	SiO ₂ /Si (100)	1	6.8	550	20.000	2.4	266
48 Pt	PZT	Pt (111)/Si	1	6.8	550	20.000	2.4	266
59 Si	PZT	Si (100)	1	6.8	650	20.000	2.4	266
59 SiO ₂	PZT	SiO ₂ /Si (100)	1	6.8	650	20.000	2.4	266
59 Pt	PZT	Pt (111)/Si	1	6.8	650	20.000	2.4	266

Rezultatul procesului de depunere a filmelor subțiri de PZT pe arie mare (4 inch), prin tehnica PLD, este prezentat în Fig. 9(b). În aceasta etapă au fost experimentate diferite procedee de a îmbunătăți omogenitatea grosimii filmelor de PZT. Din Fig. 9(b) se observă că filmele subțiri de PZT depuse pe Si (4 inch) au o distribuție uniformă a grosimii, în special în partea centrală a substratului (aproximativ 3 inch). Grosimea mai redusă a filmului de PZT pe marginea

substratului se datorează limitărilor de nivel tehnic în procesul de depunere. Datorită modului de baleiere (scanare) a fascicului laser pe suprafața țintei în timpul procesului de ablație, cantitatea de material depus este mai mare în centrul substratului raportat la zona exterioară. Soluția tehnică pentru a remedia acest inconvenient constă în a schimba modul de baleiere a fascicului laser pe suprafața țintei. La momentul prezentei raportări se afla în curs de implementare un sistem de baleiaj optic în care fasciculul laser ”va petrece mai mult timp” în zona exterioară a țintei și mai puțin în centrul acesteia.

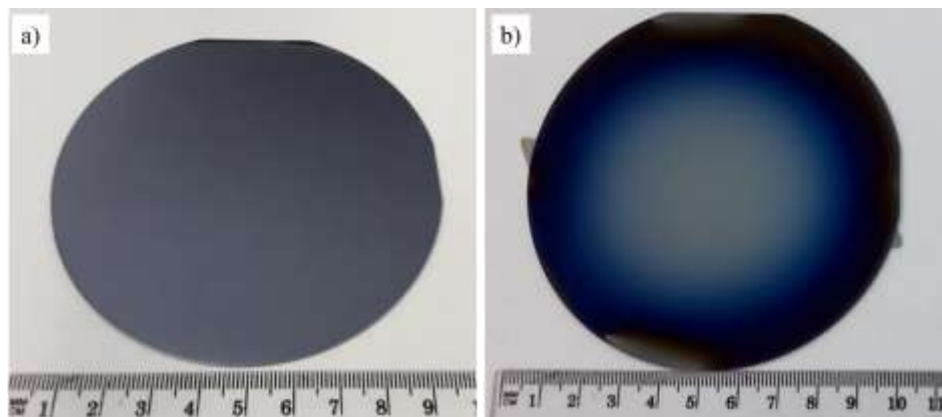


Fig. 9. a) Substrat de Si (4 inch). b) Substrat de Si (4 inch) acoperit cu un film subțire de PZT.

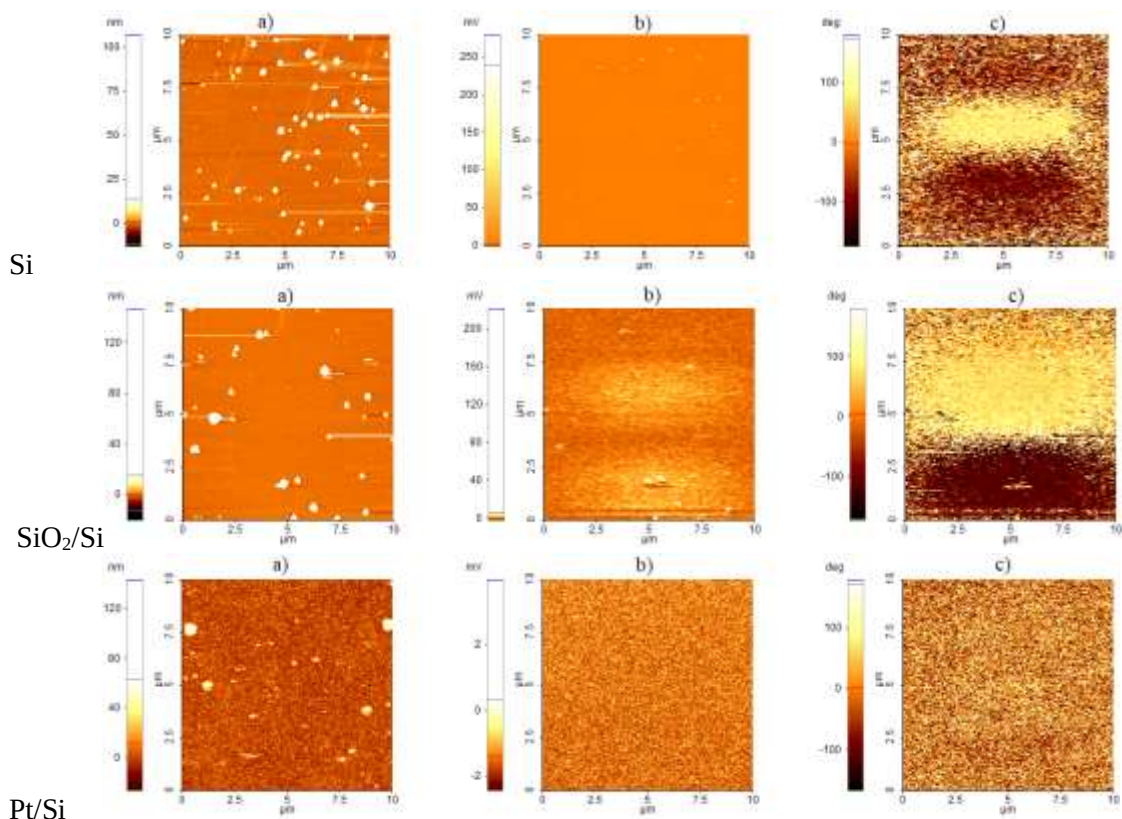


Fig. 10. Comportamentul piezoelectric al probei 48. Imagini de pe suprafața unui film de PZT depus prin PLD la 550°C pe substrat de HR-Si, SiO₂/Si și Pt/Si. a) Topografie, b) Amplitudine, și c) Faza răspunsului.

Determinarea răspunsului piezoelectric local al materialului s-a efectuat prin Piezo-response Force Microscopy (PFM), folosind microscopul de forță atomică. În modul de lucru PFM se masoară deformarea locală a materialului la aplicarea unui câmp electric local între vârful conductor și substrat. Se poate modifica controlat polarizarea electrică locală a materialului prin aplicarea unui câmp electric local suficient de puternic. În cazul măsurătorilor făcute de noi, pentru scrierea domeniilor se aplică pe substrat 10 V, pe jumătatea de jos a zonei, și -5 V/-10 V pe jumătatea de sus; vârful este la 0 V.

Comportamentul piezoelectric este caracterizat de o schimbare în amplitudinea răspunsului pe ariile pe care a fost aplicată tensiune DC pe substrat. Mai mult, se observă și o diferență de $\sim 180^\circ$ în faza răspunsului piezoelectric la trecerea pe zona în care a fost aplicat câmpul electric. În Fig. 10 se observă că, în funcție de substratul utilizat, răspunsul piezoelectric (amplitudine – centru, fază – dreapta) este diferit pentru proba 48. Filmele subțiri de PZT depuse pe un substrat de Si și SiO_2 prezintă un răspuns piezoelectric, în timp ce filmul depus pe substrat de Pt nu prezintă răspuns piezoelectric. Când depunerea filmului subțire are loc la o temperatură mai ridicată (650°C vs. 550°C) comportamentul piezoelectric se schimbă (vezi și Fig. 11): doar filmul subțire de PZT depus pe Pt prezintă răspuns piezoelectric.

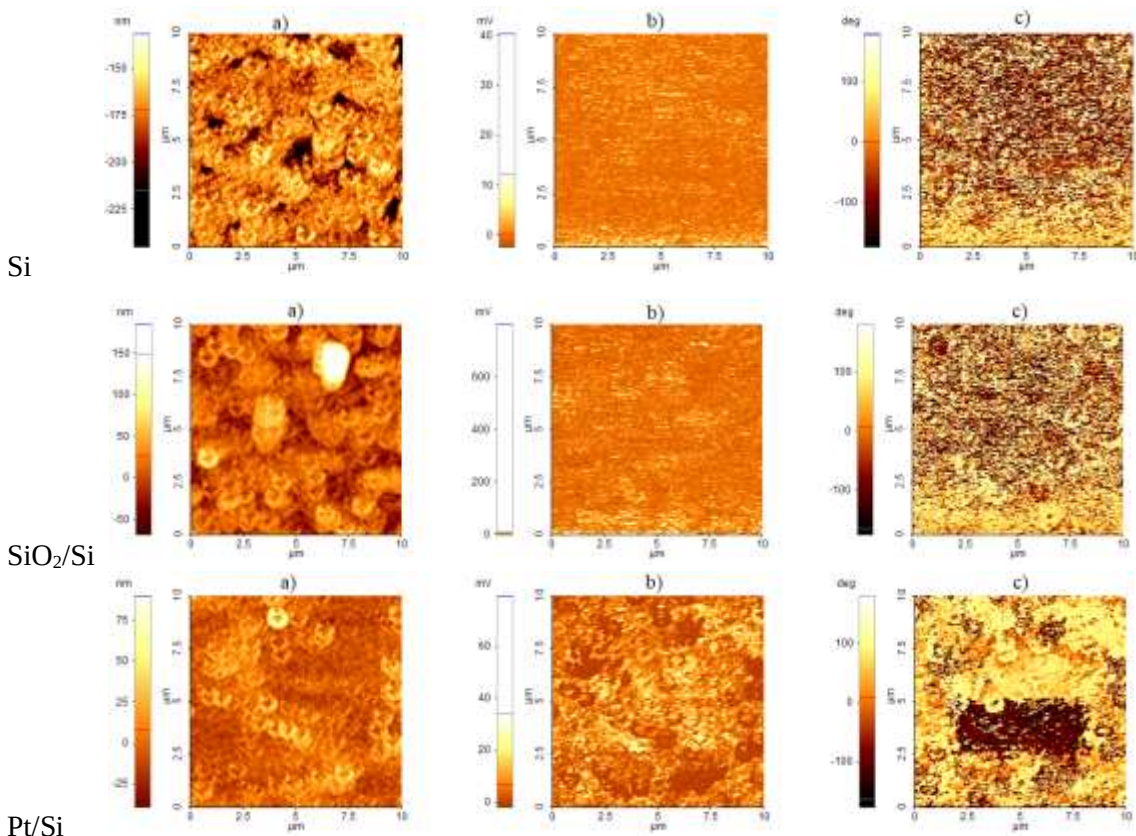


Fig. 11. Comportamentul piezoelectric al probei 59. Imagini de pe suprafața unui film de PZT depus prin PLD la 650°C pe substrat de Si-HR, SiO_2/Si și Pt/Si. a) Topografie, b) Amplitudine și c) Faza răspunsului.

În cazul probei 59 depuse pe un substrat de Pt/Si, răspunsul piezoelectric este mult mai bine definit (Fig. 11). Acest comportament poate fi explicat și prin analizarea spectrelor de raze X. De exemplu, pentru proba 59, filmele subțiri depuse pe Si dar și pe SiO_2 au un caracter ce poate fi asociat prezenței unor faze cristaline de $\text{Pb}_2\text{Ti}_2\text{O}_6$, compus identificat prin prezența unui maxim la $2\theta = 28.58$ și care explică lipsa comportamentului piezoelectric. În schimb, în cazul filmelor subțiri depuse pe Pt, spectrul de raze X confirmă prezența PZT-ului cu orientare cristalografică de perovskit [001]. Calitatea cristalografică bună este dovedită de dimensiunea

cristalitelor de PZT de aproximativ 21 nm, însoțită de o deformare redusă a rețelei cristaline ($\approx 0.3\%$). Dimensiunea cristalitelor și gradul de deformare a rețelei cristaline au fost calculate prin metoda Williamson-Hall; Fig. 12 arată spectrele de raze X pentru proba 59.

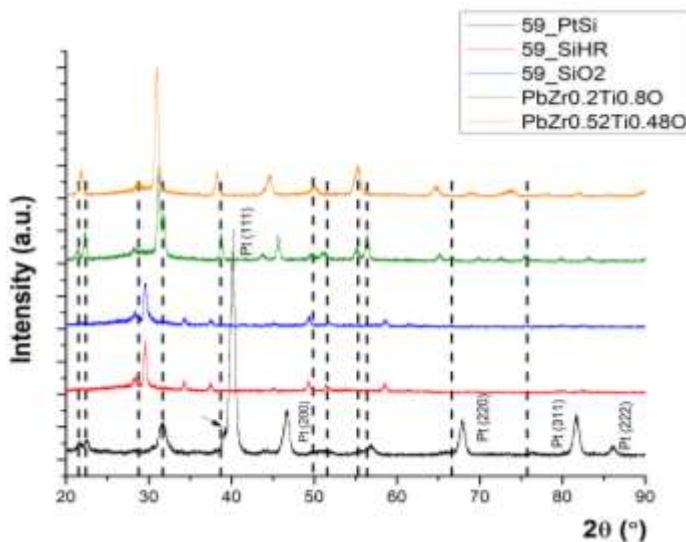


Fig. 12. Spectre de raze X ale filmelor subțiri de PZT (proba 59) și a tintelor de PZT cu o diferită compozitie chimică.

În concluzie, prin exemplele prezentate am dovedit capacitatea sistemului PLD de a obține filme subțiri de PZT cu calitate cristalografică bună și proprietăți optice similare cu cele din literatura de specialitate. În etapa următoare a proiectului PCCF7 dorim să îmbunătățim omogenitatea filmelor de PZT pe substraturi de 4 inch prin implementarea unui nou sistem de baleiere optica.

Capitolul 2. Fabricarea și caracterizarea demonstratorului D2 - circuite logice bazate pe tranzistoare cu heterostructuri grafenă/feroelectrice

Demonstratorul D2 a folosit ca feroelectric HfGeO descris anterior peste care s-a transferat grafena monolayer pe un cip cu dimensiunile de $3 \times 3 \text{ cm}^2$. Demonstratorul 2 este un memtransistor, adică un FET cu două porți deasupra canalului grafenic (top gates) și una formată de substratul de Si dopat (bottom gate). Memtransistoarele, adică FET-uri în care caracteristicile curent de drenă I_D – tensiune de drenă V_D la diferite tensiuni de poarta V_G și I_D – V_G la diverse tensiuni V_D au histerezis și sunt tranzistoare cu memorie nevolatilă. Până în prezent acestea s-au realizat folosind MoS_2 și este prima dată când un memtransistor este realizat la nivel de plachetă folosind feroelectrice [10-12] și arii de memtransistori de dimensiunea 10×10 [13], [14].

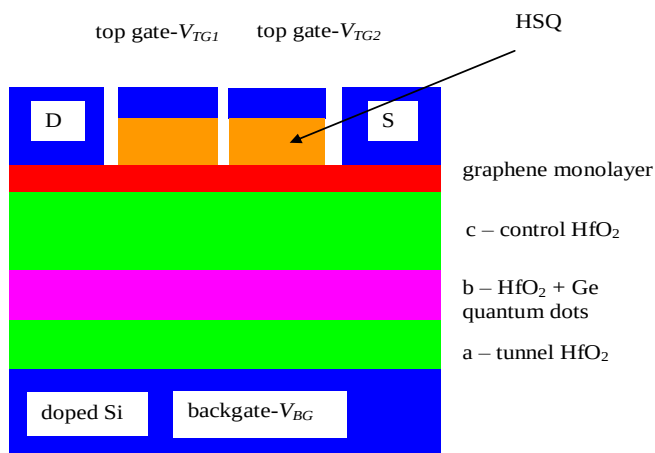


Fig. 13. Memtransistor cu trei porți pentru circuite logice

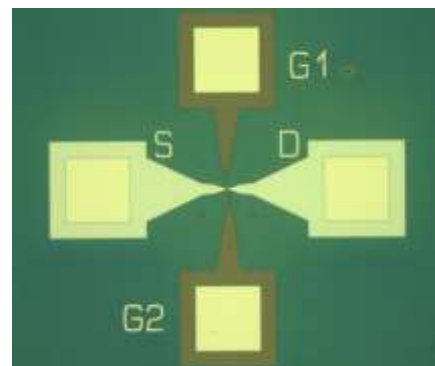


Fig. 14. Imaginea optică a unui memtransistor grafenă/HfGeO cu trei porți pentru circuite logice (back-gate-ul nu se vede în imaginea optica).

Folosind feroelectricul HfGeO am realizat o arie crossbar de 15×15 grafenă/HfGeO FETs. Memtranzistorul grafenă/HfGeO lucrează la tensiuni mici de drenă, -2 V la $+2$ V, specific aplicațiilor circuitelor digitale, în timp ce cele bazate pe MoS_2 au tensiuni mult mai ridicate de lucru. Un memtranzistor cu 3 porți pentru aplicații logice este prezentat schematic în Fig. 13 și imaginea sa optică în Fig. 14. Ținta noastră este să realizăm un **singur memtranzistor care, funcție de tensiunile aplicate pe porți, să genereze mai multe funcții logice**, adică circuite logice reconfigurabile [15-17] știind că funcțiile logice de bază în tehnologia CMOS, ca de exemplu OR, AND etc., sunt realizate cu minim doi tranzistori. Avantajul este mare, în sensul că aria pe cip pentru funcții logice se micșorează și datorită HfGeO, care joacă rolul de poartă flotantă feroelectrică; aceste funcții logice sunt și memorate, operațiile logice făcându-se în același loc și nu în locuri distincte ale cipului, cum se întâmplă în mod obișnuit în tehnologia CMOS a circuitelor digitale.

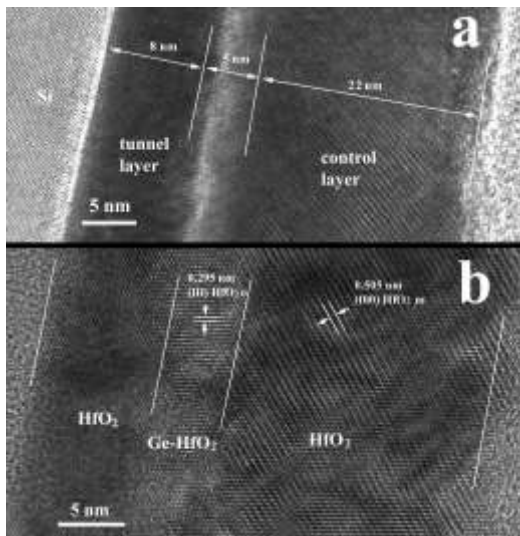
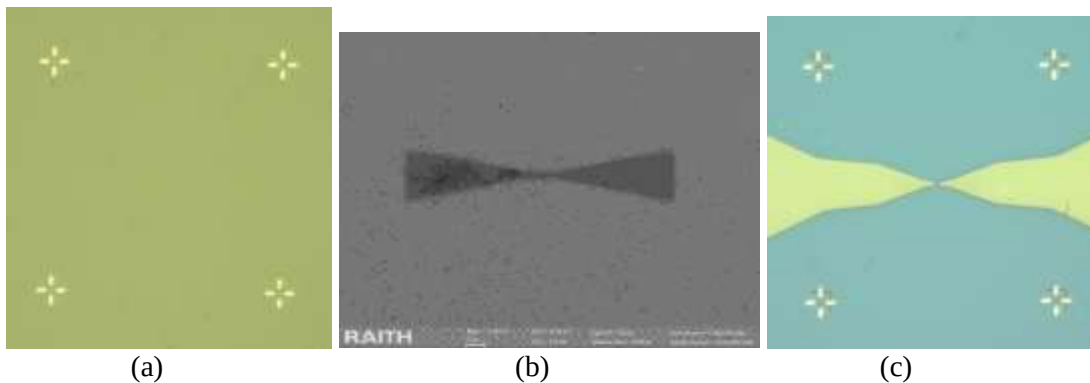


Fig. 15. HRTEM: (a) imagine pentru relevarea zonei de nanoparticule de Ge. (b) imaginea heterostructurii trilayer

Realizarea memtranzistorului cu trei porți și a unei arii de 225 de memtranzistoare comportă mai multe etape de creștere, caracterizare și măsurători, după cum urmează:

1. Pe un substrat de Si dopat se crește heterostructura: 22 nm control HfO_2 /5 nm Ge-HfO_2 feroelectric /8 nm tunel HfO_2 / p -Si ($7-14 \Omega\text{cm}$) a cărei imagine HRTEM este arătată în Fig. 15.
2. Pe această heterostructură cu dimensiunile $3 \times 3 \text{ cm}^2$ se transferă grafena monolayer (Graphenea și IMT).
3. Se realizează semnele de aliniere pe structura din Fig. 16(a).
4. Se realizează canalul de grafenă al FET-ului, care implică definirea geometrică a canalului prin litografie rezist cu fascicol de electroni: PMMA 950k A2, Raith e_Line, 10kV și tăierea canalului prin RIE în plasma O_2 (vezi Fig. 16(b)).



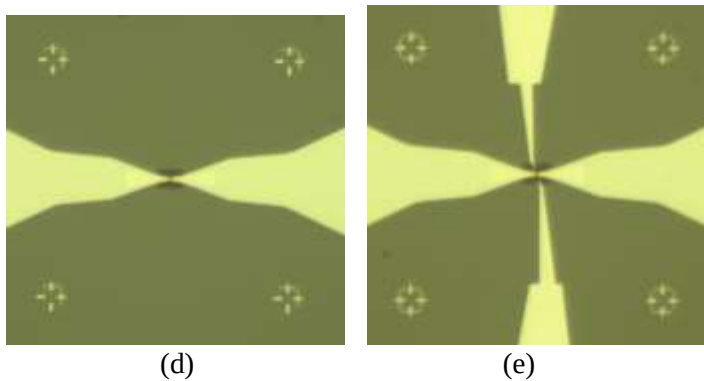


Fig. 16. Etape de fabricare ale FET-ului

5. Depunerea contactelor metalice sursă (S) și drenă (D), care implică definirea geometrică prin litografie electronică și depunere prin e-beam a 5 nm Ti/35 nm Au și lift-off – Fig. 16(c).
6. Depunerea dielectricului de poartă HSQ cu 40 nm grosime – Fig. 16(d).
7. Depunerea de electrozi de poartă și electrozii S și D pentru măsurarea FET

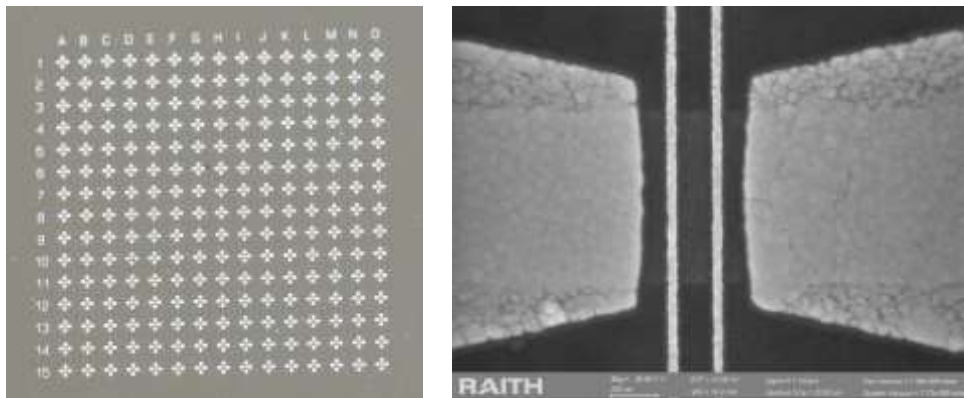


Fig. 17. Arie de FET-uri (stânga) și imagine SEM a unui FET (dreapta)

S-a realizat astfel aria de 225 de tranzistoare din Fig. 17 stânga, un tranzistor FET având lungimea canalului de 450 nm, lățimea de 800 nm și distanța între porți de 150 nm, așa cum este arătat în imaginea SEM din Fig. 17, dreapta.

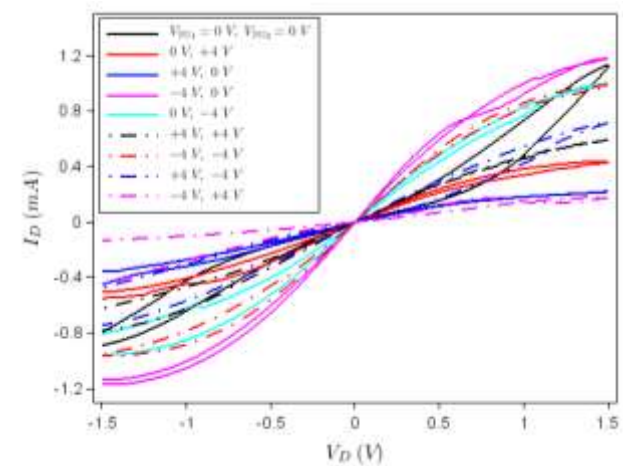


Fig. 18. I_D - V_D funcție de V_{G1} și V_{G2} ; V_{BG} nu este conectată.

Tranzistorii au fost măsurați folosind stația Keithley SCS 4200, probele și placheta fiind plasate într-o cușcă Faraday conectată la stație cu amplificatoare de semnal mic. Stația a fost calibrată. S-au măsurat curentul de drenă I_D funcție de tensiunea de V_D variind tensiunile de poartă (top)

denumite V_{G1} și V_{G2} , în timp ce poarta de spate (cu tensiune V_{BG}) este deconectată. Rezultatul este prezentat în Fig. 18.

Intrare (V_{G1} , V_{G2} în [V])/ valori logice	Ieșire I_D (logic 1 peste 0.5 mA, 0 altfel)
(0,0) / (0,0)	0
(0,-4)/(0,1)	1
(-4,0)/(1,0)	1
(-4,-4)/(1,1)	1

Intrare (V_{G1} , V_{G2} în [V])/ valori logice	Ieșire I_D (logic 1 peste 20 μ A, 0 altfel)
(-4,4)/(0,0)	0
(0,-4)/(0,1)	1
(-4,0)/(1,0)	1
(-4,-4)/(1,1)	0

Fig. 19. Tabele de adevăr pentru funcționarea FET-ului ca OR (stânga) și NAND (dreapta)

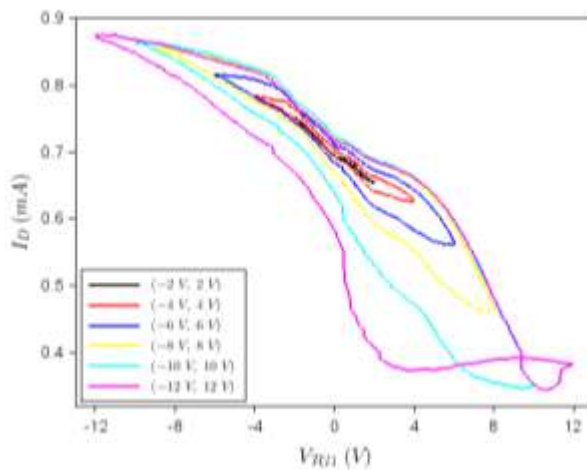


Fig. 20. Caracteristica I_D - V_{G1} .

Porțile sunt programate a avea valorile -4 V, 4 V și 0 V. Valoarea logică 0 de intrare este asociată cazului în care porțile au valoarea 0 V, și este 1 în orice altă situație. Ieșirea este curentul de drenă, care are valoarea 0 logic sub o anumită valoare de prag, în acest caz 0.5 mA, și 1 în caz contrar. Rezultă astfel că tranzistorul este o poartă OR, a cărei tabelă de adevăr este dată în Fig. 19, stânga. Dacă programăm printr-o arie de diode în paralel cu tranzistorul ca nivelul de 0 logic să fie curentul de drenă rezultat la combinația de porți (-4 V, -4 V) pentru $V_D = 1$ V, adică starea OFF a tranzistorului, atunci realizăm o poartă NAND, care este universală în sensul că orice funcție logică se poate implementa folosind numai poarta NAND (vezi Fig. 19, dreapta).

Am obținut rezultate similare folosind o poartă top și poarta de spate. Deci, se poate genera orice funcție logică programând tensiunea porților și programând printr-o arie de diode nivelul logic zero al curentului de drenă la tensiunea de drenă de 1 V. Se poate obține și logica trivalentă folosind ca intrare valorile celor două porți top și cea de backgate.

Caracteristica I_D - V_{G1} este reprezentată în Fig. 20 la $V_D = 1$ V. Se constată histeresisul pronunțat provenit din feroelectricul HfGeO și care conferă caracterul de memorie al FET-urilor. Astfel, operațiile logice sunt memorate până când o altă tensiune de poartă șterge valoarea memorată. Valoarea curentului de drenă măsurat este menținut până la 5000 secunde.

Capitolul 3. Circuit neuromorfic bazat pe FET pe heterostructuri grafenă/feroelectrice

Un memtranzistor care funcționează ca o sinapsă artificială este demonstratorul care ilustrează un circuit neuromorfic cu rolul de a imita operații pe care le face creierul. Acest memtranzistor, diferit de cel descris mai sus, este capabil de operații elementare de învățare neasociativă. Condițiile care trebuie îndeplinite simultan pentru ca un FET să fie sinapsă artificială sunt: (i) raport on/off foarte mare, (ii) caracteristicile I_D - V_D și I_D - V_G să aibă memorie nevolatilă și (iii) conductanța transistorului să crească și să scadă în mod controlat în timp la aplicarea unei tensiuni

pozitive sau negative [18]. Sinapsa artificială (Fig. 21) a fost realizată folosind heterostructura grafenă/ HfO_2 / HfGeO / HfO_2 /Si dopat, așa cum se arată în Fig. 22.

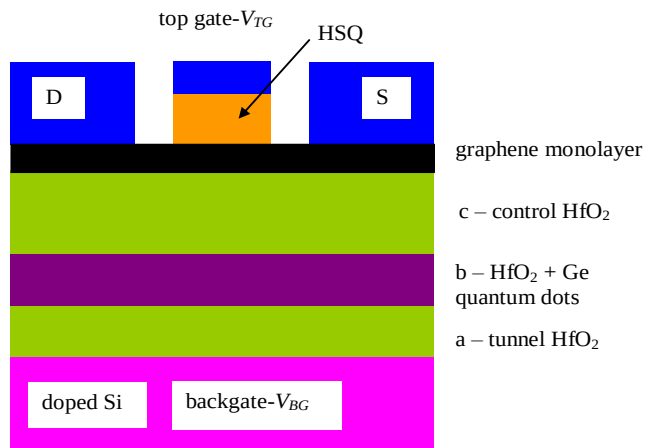


Fig. 21. Structura memtranzistor – sinapsa artificiala

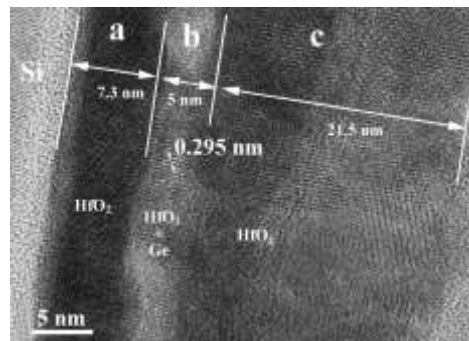


Fig. 22. TEM heterostructura HfO_2 / HfGeO / HfO_2 /Si.

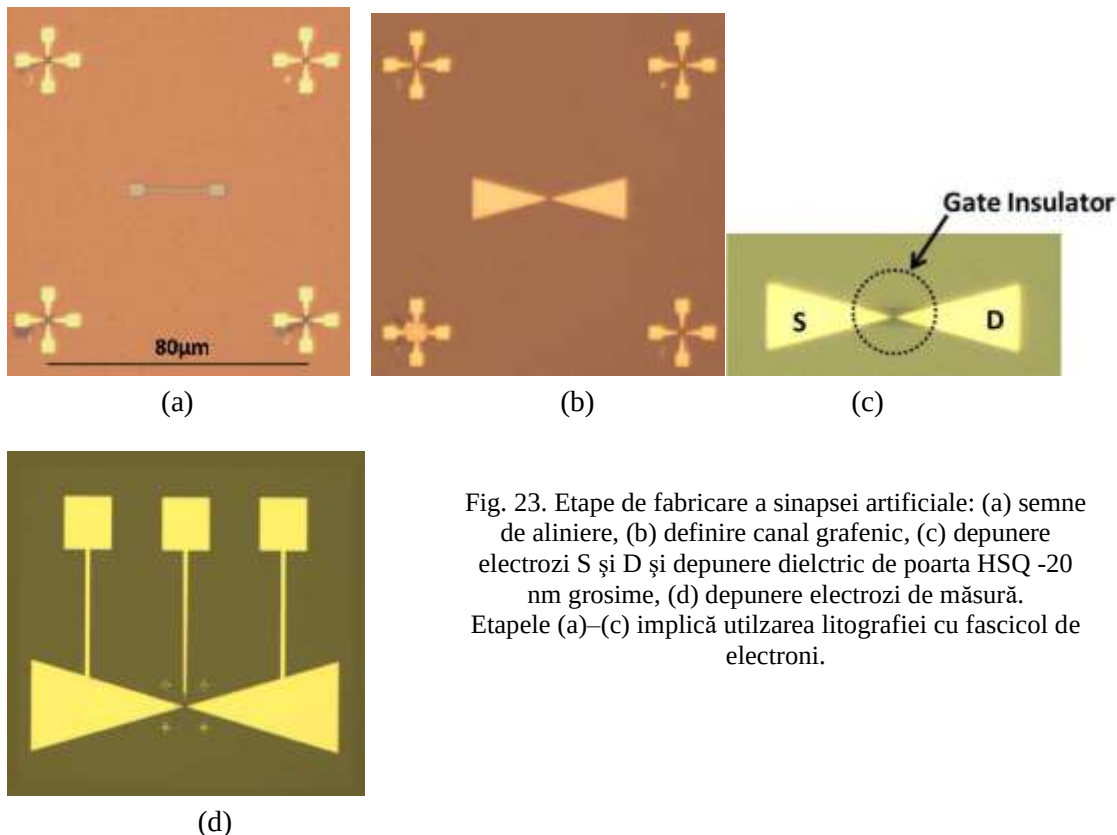


Fig. 23. Etape de fabricare a sinapsei artificiale: (a) semne de aliniere, (b) definire canal grafenic, (c) depunere electrozi S și D și depunere dielectric de poarta HSQ -20 nm grosime, (d) depunere electrozi de măsură. Etapele (a)–(c) implică utilizarea litografiei cu fascicol de electroni.

Detalii despre analiza structurală și creșterea HfO_2 / HfGeO / HfO_2 /Si se găsesc în lucrarea noastră [19] și în capitolul 1, iar transferul pentru canalul grafenă monostrat este realizat de Graphenea și IMT. Procesul de fabricație este asemănător celui descris în capitolul anterior și este arătat în Fig. 23. Cipul sinapsei este ilustrat în Fig. 24 iar imaginea SEM a sinapsei în Fig. 25. Măsurările s-au făcut cu stația Keithley 4200 în condițiile descrise în capitolul 2. Caracteristicile I_D - V_D la diverse tensiuni de poartă sunt prezentate în Fig. 26 iar caracteristicile I_D - V_G la diverse tensiuni de poartă (backgate) la o tensiune de drenă de 0.1 V sunt prezentate în Fig. 27.



Fig. 24. Sinapsa artificială grafenă/HfGeO/Si realizată la nivel de plachetă.

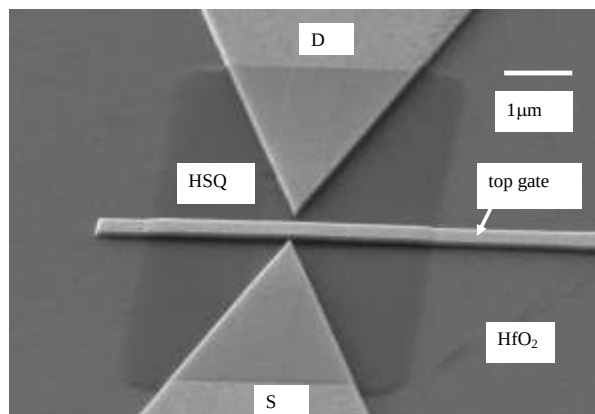


Fig. 25. FET grafenă/HfGeO – sinapsa artificială.

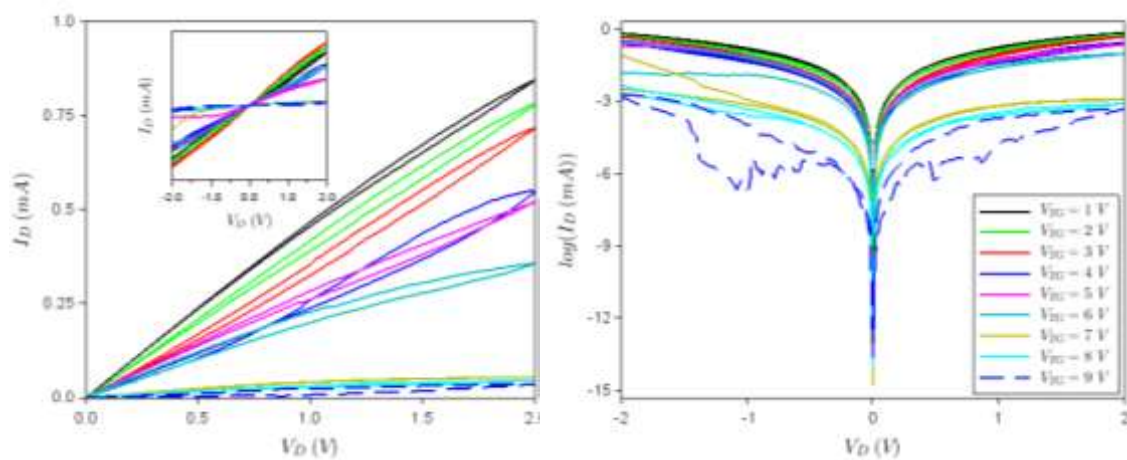


Fig. 26 Caracteristica I_D - V_D măsurată în scară liniară (stânga) și logaritmică (dreapta)

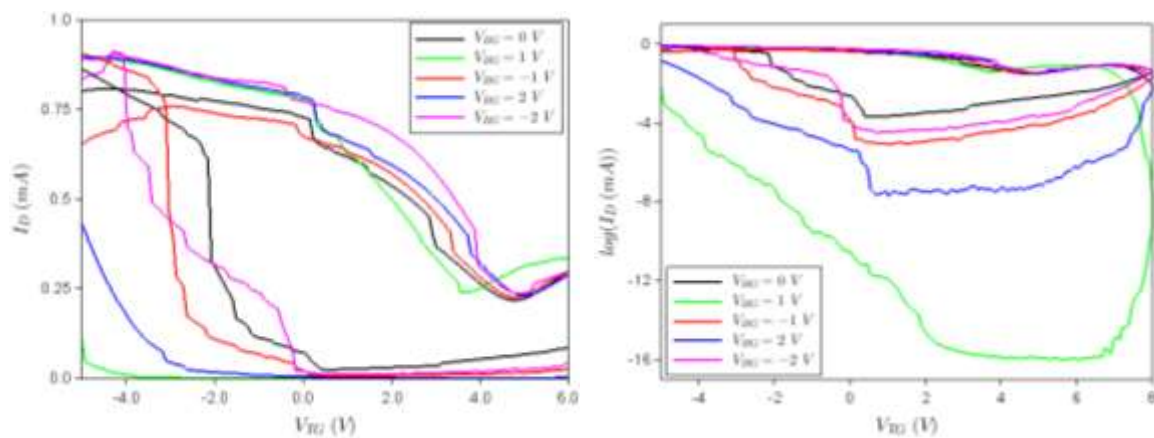


Fig. 27. Dependența I_D - V_G măsurată în scară liniară (stânga) și logaritmică (dreapta).

Observăm că sunt îndeplinite condițiile (i) și (ii), în sensul că raportul on/off este uriaș, de 14 ordine de mărime, și ambele dependențe, I_D-V_D și I_D-V_G au histerezis datorită porții flotante a feroelectricului HfGeO, conferind caracterul de memorie nevolatilă FET-urilor. Măsurători în timp ale FET-lui grafenă/HfGeO sunt arătate în Fig. 28. Din această figură se vede cum conductanța crește în timp la aplicarea unei tensiuni pozitive și scade la tensiuni negative, analog cu răspunsul unei sinapse între doi nervi pre și post sinaptici.

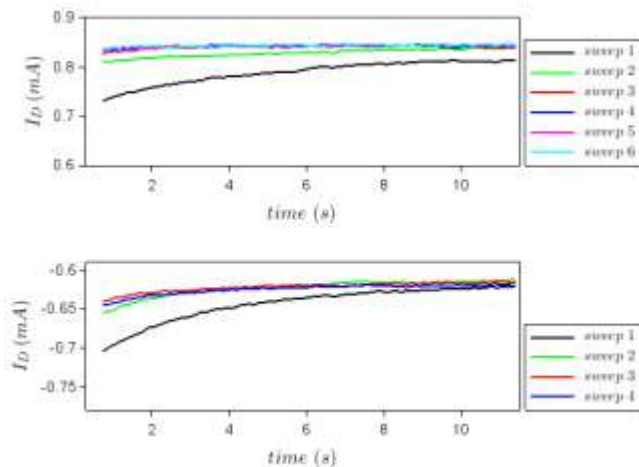


Fig. 28. Curent de drenă funcție de timp: (a) la aplicarea unei tensiuni de +2 V și (b) de -2V

În plus, observăm că, pe măsură ce numărul de sweep-uri se înmulțește, curentul are tendința de a se satura și la un moment dat nu mai crește, indiferent de numărul de sweep-uri. Acest proces este analog proceselor de învățare neasociative denumite obișnuire, dezobișnuire, memorare. Atunci când conductanța crește (scade) are loc procesul de obișnuință la stimulul electric, reprezentat de tensiunea aplicată. După un timp, stimulul este “învățat” și nu mai crește; curentul este memorat. Un alt stimul, adică o altă tensiune aplicată reia procesul obișnuire-memorare-dezobișnuire. Un exemplu din viața de zi cu zi: ne așezăm pe un scaun, simțim scaunul, după care nu îl mai simțim – este memorat, ne-am obișnuit cu el; dacă ne mișcăm simțim din nou scaunul. Mai multe detalii despre memristori, memtranzistori și mecanisme neasociative se găsesc în lucrarea noastră [20].

Capitolul 4. Proiectarea unui circuit termoelectric pentru conversie termică în DC bazat pe heterostructuri grafenă/feroelectrice

Pentru a studia apariția curentului piroelectric precum și cel termoelectric s-au efectuat o serie de simulări utilizând COMSOL MultiPhysics, un software cu element finit. Geometria și materialele considerate sunt prezentate în Fig. 29. Peste un strat de oxid de siliciu cu grosimea de 50 nm, s-a depus un strat de oxid de hafniu cu grosimea de 5 nm, iar la final, un strat de grafenă cu o grosime de 0.5 nm. Proprietățile de material folosite în simulare sunt prezentate în Tabelul 3.

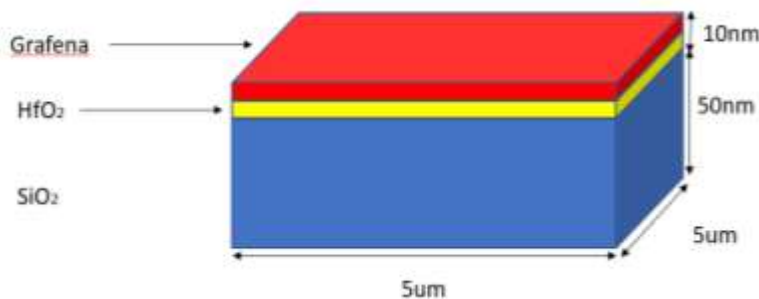


Fig. 29. Geometria și materialele utilizate.

Tabel 3. Proprietăți de material folosite în simulare. Conductivitatea termică și electrică a grafenei poate avea mai multe valori în funcție de paternare

Material	Conductivitate termică [W/mK]	Conductivitate electrică [S/m]	Coeficient Seebeck [V/K]	Permitivitate electrică	Densitate [Kg/m ³]	Capacitate calorică [J/Kg·K]
Grafenă	400, 300, 200, 100, 50	$3 \cdot 10^5$, $3 \cdot 10^6$	$100 \cdot 10^{-6}$	3.3	2250	700
HfO ₂	1.1				9700	120
SiO ₂	1.4				2200	730

În simulări întreaga structură este localizată într-un volum de aer pentru a evita utilizarea coeficientului de convecție, care poate varia între $100 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ și $100 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ la aceste dimensiuni. Temperatura ambientală inițială este de 293.15 K, iar între suprafața de sus a grafenei și suprafața de jos a oxidului de siliciu s-a menținut un gradient de temperatură între 1 și 50 K. Distribuția de temperatură obținută în cazul staționar, cu $\sigma = 3 \times 10^5 \text{ S/m}$, este ilustrată în Fig. 30.

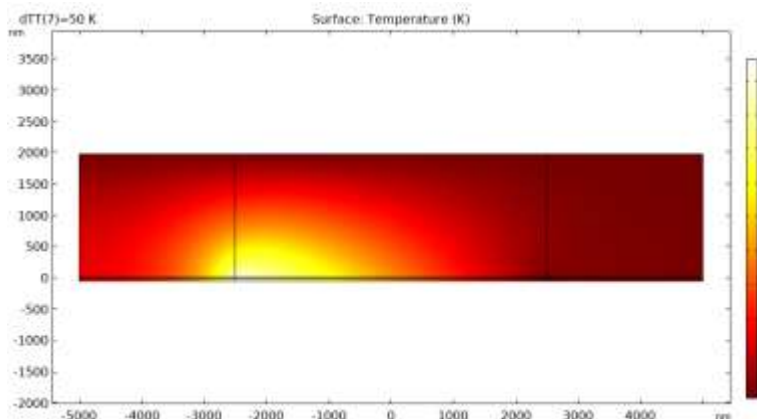


Fig. 30. Distribuția de temperatură în cazul staționar.

În urma simulărilor statice s-a calculat curentul termoelectric în funcție de ΔT , conductivitatea termică a grafenei și cele două valori ale conductivității electrice. Ca exemplu, Fig. 31 ilustrează curentul termoelectric pentru $\sigma = 3 \times 10^5 \text{ S/m}$ și diferite valori ale conductivității termice.

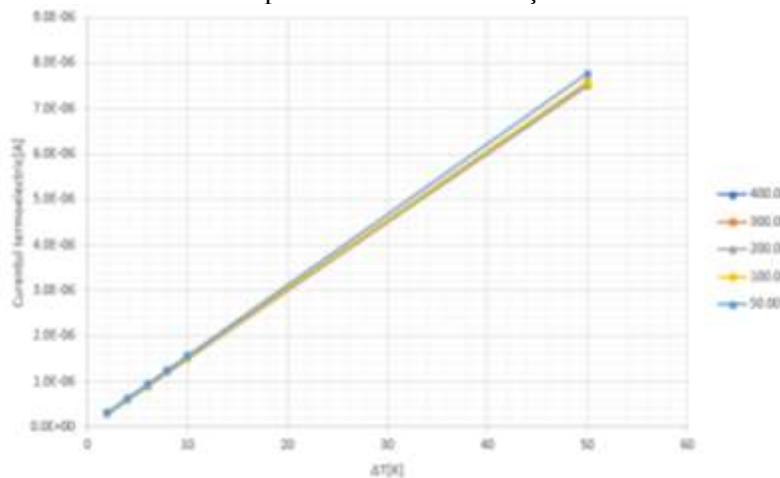


Fig. 31. Curentul termoelectric pentru $\sigma = 3 \times 10^5 \text{ S/m}$ și diferite conductivități termice ale grafenei

După cum se observă din Fig. 31, cea mai bună soluție din punct de vedere electric este cea pentru conductivitatea termică de 50 W/mK, ceea ce implică paternarea grafenei cu o arie de găuri cu diametru de 30 nm și distanțate la 100 nm. În Fig. 32 este prezentată distribuția de

potențial electric pe linia superioară a stratului de grafenă, iar în Fig. 33 este ilustrată distribuția vitezei aerului ca efect al încălzirii acestuia.

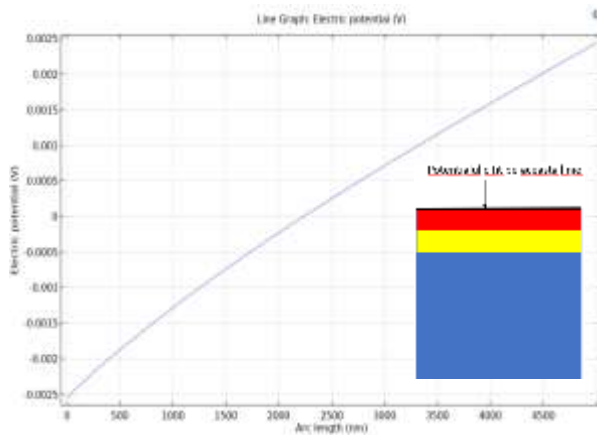


Fig. 32. Distribuția de potențial electric pentru $\Delta T = 10$ K și conductivitatea termică 50 W/m·K.

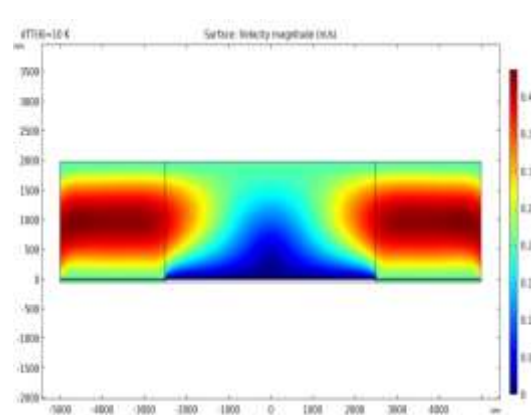


Fig. 33. Distribuția vitezei pentru $\Delta T = 10$ K și conductivitatea termică 50 W/m·K.

Pentru simularea tranzitorie s-au ales pentru grafenă o conductivitate electrică de 3×10^5 S/m, o conductivitate termică de 50 W/m·K, simularea făcându-se pentru un interval de timp de 50 ns și ΔT de 1 K și 10 K. Figura 34 ilustrează variația curentului termoelectric pentru suprafața caldă a grafenei, iar insetul variația medie a temperaturii pentru suprafața oxidului de hafniu. În cazul grafenei, se observă un current foarte mare aproape de momentul inițial, atunci când gradientul de temperatură nu începe să-și facă efectul, dar după 2 ns curentul se stabilizează la o valoare similară cu cea din simularea statică; rezultatele simulărilor statice sunt prezentate mai jos.

$S = 3 \times 10^5$					
ΔT [K]	400.00 [W/mK]	300.00 [W/mK]	200.00 [W/mK]	100.00 [W/mK]	50.00 [W/mK]
2	3.006100E-07	3.008900E-07	3.015500E-07	3.041900E-07	3.114400E-07
4	6.012200E-07	6.017700E-07	6.030900E-07	6.083400E-07	6.228200E-07
6	9.018000E-07	9.026300E-07	9.045900E-07	9.124500E-07	9.341300E-07
8	1.202400E-06	1.203500E-06	1.206100E-06	1.216500E-06	1.245400E-06
10	1.502900E-06	1.504300E-06	1.507500E-06	1.520500E-06	1.556600E-06
50	7.511400E-06	7.517200E-06	7.531600E-06	7.592500E-06	7.767300E-06

$S = 3 \times 10^6$					
ΔT [K]	400.00 [W/mK]	300.00 [W/mK]	200.00 [W/mK]	100.00 [W/mK]	50.00 [W/mK]
1	1.503100E-06	1.504500E-06	1.507800E-06	1.521000E-06	1.557300E-06
2	3.006100E-06	3.008900E-06	3.015500E-06	3.041900E-06	3.114400E-06
4	6.012200E-06	6.017700E-06	6.030900E-06	6.083400E-06	6.228200E-06
6	9.018000E-06	9.026300E-06	9.045900E-06	9.124500E-06	9.341300E-06
8	1.202400E-05	1.203500E-05	1.206100E-05	1.216500E-05	1.245400E-05
10	1.502900E-05	1.504300E-05	1.507500E-05	1.520500E-05	1.556600E-05
50	7.511400E-05	7.517200E-05	7.531600E-05	7.592500E-05	7.767300E-05

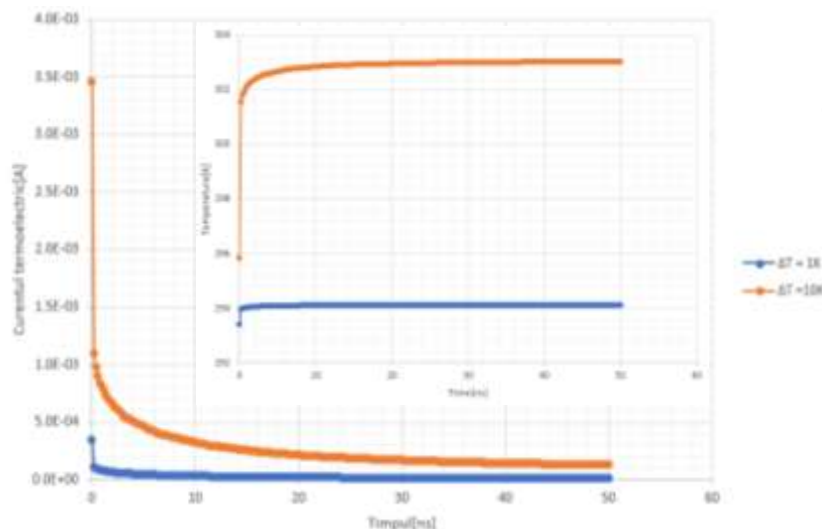


Fig. 34. Variația în timp a curentului termoelectric. Inset: variația medie a temperaturii pentru suprafața HfO_2 .

Cu aceste date s-a proiectat, folosind CST Microwave Studio®, circuitul termoelectric prezentat în insetul din Fig. 35 în care este integrat tranzistorul GFET pentru detecția termoelectrică.

Circuitul este alcatuit din următoarele elemente: două linii coplanare pentru poartă (sus) și drenă (jos) din aur (cu grosime de cel puțin 300 nm), sursa fiind conectată la masă și stratul propriu-zis de grafenă în zona de interes, cu dimensiuni W_D (lățimea drenă), W_{DP} (distanța drenă-poartă), W_P (lățimea porții) și W_{PS} (distanța poartă-sursă) variabile. Substratul folosit este HfZrO (6 nm grosime)/HR-Si (cu grosimea de 525 μm). A fost necesar ca porturile de polarizare a porții și drenă să fie proiectate în ghid de undă coplanar (CPW) cu dimensiuni interstițiu-linie-interstițiu de 60-100-60 μm pentru a măsura direct pe plachetă ("on wafer") prototipurile fabricate. Astfel, se pot folosi capetele de măsură standard, ceea ce asigură stabilitatea mecanică a punctelor de contact, conectarea potrivită la traseele metalice și reducerea drastică a interferențelor electromagnetice. Dimensiunile totale ale fiecărei structuri sunt 0.931 mm (lățime W) $\times$ 1.78 mm (lungime L). Pentru că nu este posibilă simularea electromagnetică a GFET-ului integrat cu liniile coplanare, a fost simulată structura fără GFET în vederea obținerii curbelor de referință (parametri S) pentru caracterizarea în regim de semnal mic. Rezultatele sunt date în Fig. 35 .

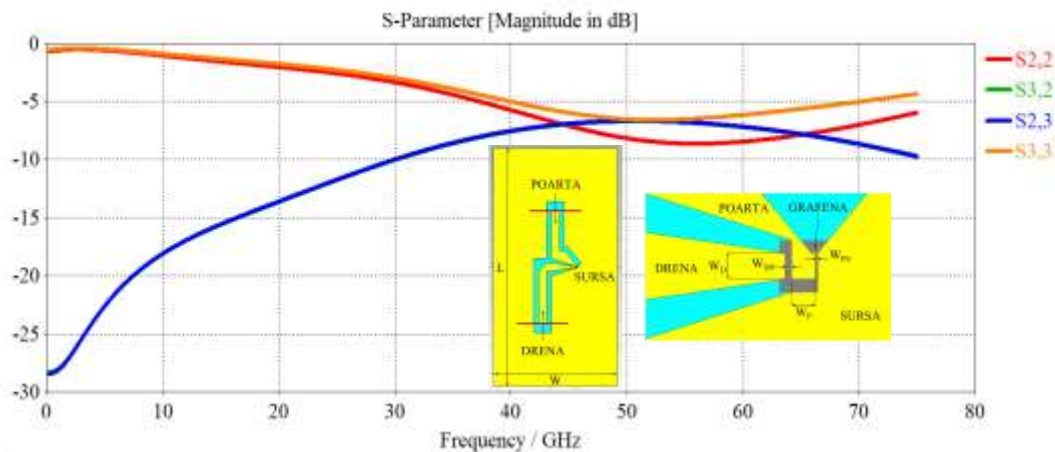


Fig. 2: Simularile electromagnetice ale structurii în ghid de unda coplanar fara GFET.

Portul 2 este drenă, iar portul 3 este poartă. Pierderile la reflexie $S_{2,2}$ și $S_{3,3}$ sunt aproape identice și adaptarea la impedanța de referință de 50 ohmi este satisfăcătoare între 40 și 70 GHz. Coeficienții $S_{3,2}$ și $S_{2,3}$ arată că transmisia este maximă la 50.9 GHz, cu $S_{3,2} = S_{2,3} = -6,7$ dB. Aceste rezultate pot avea mici variații funcție de parametrii geometrici W_D , W_{DP} , W_P și W_{PS} .

Avantajul principal al structurilor proiectate este că acestea pot fi măsurate "on-wafer", permițând o caracterizare ușoară a dispozitivelor prin combinarea unei excitări în microunde cu o polarizare în curent continuu. În același timp, prezența tranzistorului pe baza de grafenă între poartă și sursă schimbă proprietățile ghidului de undă în termeni de pierdere la reflexie și transmisie în microunde. Practic, electrodul cald al FET-ului este poartă, unde se injectează microunde în circuit, iar electrodul rece este sursa, care este masă, legată la masa aparatului. Tranzistorul FET grafenă/feroelectric funcționează ca detector de microunde unde detecția se realizează termoelectric: $V_{det} = -S\Delta T$, unde V_{det} este tensiunea DC detectată, S este coeficientul Seebeck, iar ΔT este diferența de temperatură dintre sursă și drenă. Notând $G = \partial I_D / \partial V_D$ conductanța transistorului, avem $V_{det} = -(\pi^2 k_B T / 3e^2)(1/G)(dG/dV_G)\Delta T$, tensiunea detectată fiind proporțională cu ΔT și cu parametrii DC ai tranzistorului.

5. Concluzii

Raportul a prezentat rezultate experimentale privind creșterea de heterostructuri grafenă/feroelectric, fabricarea și datele experimentale referitoare la demonstratorul D2 - circuite logice bazate pe FET-uri pe heterostructuri grafenă/feroelectrice și D3 - circuit neuromorfic bazat pe FET pe heterostructuri grafenă/feroelectrice, precum și proiectarea unui circuit termoelectric

pentru conversie termica în DC bazat pe heterostructuri grafenă/feroelectrice. Având în vedere că consorțiul a realizat aceste cercetări în timpul pandemiei și că anul acesta a publicat 6 articole ISI iar directorul de proiect a avut două lucrări invitate la prestigioasa conferință EMRS, considerăm că obiectivele proiectului au fost atinse.

Referințe

- [1] M. Dragoman, M. Aldrigo, D. Dragoman, S. Iordanescu, A. Dinescu, M. Modreanu, Phys. Status Solidi RRL, 2000521 (2021).
- [2] M. Dragoman, M. Aldrigo, D. Dragoman, S. Iordanescu, A. Dinescu, M. Modreanu, Nanotechnol. Mag. 15, 8-19 (2021).
- [3] C. Palade, A. Slav, A.M. Lepadatu, I. Stavarache, I. Dascalescu, A.V. Maraloiu, C. Negrița, C. Logofatu, T. Stoica, V.S. Teodorescu, M.L. Ciurea, S. Lazanu, Nanotechnology 30, 44550 (2019).
- [4] C. Palade, A.M. Lepadatu, A. Slav, O. Cojocaru, A. Iuga, V.A. Maraloiu, A. Moldovan, M. Dinescu, V.S. Teodorescu, T. Stoica, M.L. Ciurea, J. Mater. Chem. C 9, 12353 (2021).
- [5] S. Dutta, H. Aramberri, T. Schenk, J. Íñiguez, Phys. Status Solidi RRL 14, 2000047 (2020).
- [6] J. Liu, S. Liu, L. H. Liu, B. Hanrahan, S. T. Pantelides, Phys. Rev. Appl. 12, 034032 (2019).
- [7] L. Xu, T. Nishimura, S. Shibayama, T. Yajima, S. Migita, A. Toriumi, J. Appl. Phys. 122, 124104 (2017).
- [8] L. Collins, U. Celano, ACS Appl. Mater. Interfaces 12, 41659 (2020)
- [9] S. Estandia, J. Gazquez, M. Varela, N. Dix, M. Qian, R. Solanas, I. Fina, F. Sanchez, J. Mater. Chem. C 9, 3486 (2021).
- [10] V.K. Sangwan, H.-S. Lee, H. Bergeron, I. Balla, M.E. Beck, K.-S. Chen, M.C. Hersam, Nature 554, 500-504 (2018).
- [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, Adv. Funct. Mater. 29, 1901106 (2019).
- [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, ACS Nano 13, 14262-14273 (2019).
- [13] H.-S. Lee, V.K. Sangwan, W.A. Gaviria Rojas, H. Bergeron, H.Y. Jeong, J. Yuan, K. Su, M. C. Hersam, Adv. Funct. Mater. 30, 2003683 (2020).
- [14] X. Feng, S. Li, S.L. Wong, S. Tong, L. Chen, P. Zhang, L. Wang, X. Fong, D. Chi, K.-W. Ang, ACS Nano 15, 1764-1774 (2021).
- [15] G.V. Resta, Y. Balaji, D. Linn, I.P. Radu, F. Catthoor, P.-E. Gaillardon, G. De Micheli, ACS Nano 12, 7039-7047 (2018).
- [16] C. Pan, C.-Y. Wang, S.-J. Liang, Y. Wang, T. Cao, P. Wang, C. Wang, S. Wang, B. Chen, A. Gao, E. Liu, K. Watanabe, T. Taniguchi, F. Miao, Nature Electronics 3, 383-390 (2020).
- [17] J.-H. Bas, H. Kim, D. Kwon, S. Lim, S.-T. Lee, B.G. Park, J.-H. Lee, IEEE Electron Device Letters 40, 624-627 (2019).
- [18] M. Dragoman, D. Dragoman, *Electronics at atomic scale beyond CMOS*, Springer, Cham, Switzerland, 2021.
- [19] M. Dragoman, A. Dinescu, D. Dragoman, C. Palade, A. Moldovan, M. Dinescu, V.S. Teodorescu, M.L. Ciurea, Nanotechnology, 31, 495207 (2020).
- [20] M. Dragoman, I. Tiginyanu, D. Dragoman, A. Dinescu, T. Braniste, V. Ciobanu, J. Appl. Phys. 124, 152110 (2018).
- [21] M.R. Gasper, R.C. Toonen, N.C. Varaljay, R.R. Romanofsky, F.A. Miranda, IEEE Trans. Nanotechnol. 18, 879 – 884 (2019).

Director de proiect, cerc.st.gr 1
Mircea Dragoman

