

Rezumat Executiv al activităților realizate în anul 2025

În anul 2025, proiectul HafGraphX a finalizat cu succes prima etapă de dezvoltare a unui detector hibrid inovator pentru imagistică cu raze X, bazat pe filme subțiri de oxid de hafniu (HfO_2) și grafenă integrate în structuri G-FET. Obiectivul acestei etape a fost definirea platformei materiale, tehnologice și experimentale necesare realizării demonstratorului care va fi dezvoltat în etapa următoare.

1. Filme subțiri de HfO_2 obținute prin ALD

Au fost sintetizate filme subțiri de HfO_2 pure și dopate (Zr, Al, Y), cu grosimi de 7 nm și 100 nm, utilizând depunerea în strat atomic (ALD). Procesul a asigurat control atomic al grosimii, uniformitate excelentă și distribuție omogenă a dopanților. Caracterizările GIXRD, XRR, AFM și SEM/EDS au confirmat calitatea structurală și morfologică a filmelor. Dintre materialele investigate, HfO_2 pur și HfYO au prezentat cea mai ridicată stabilitate electrică și cel mai bun potențial pentru detecția razelor X.

2. Răspunsul filmelor pe bază de HfO_2 la radiație X

Măsurătorile curent-tensiune, realizate atât în absența iradierii, cât și sub expunere la fascicul $\text{Cu K}\alpha$ (~8 keV), au evidențiat:

- HfO_2 nedopat: creșteri doză-dependente ale curentului cu +50–60%;
- HfYO : cel mai ridicat răspuns la radiație, generat de densitatea crescută de vacanțe de oxigen și centri F;
- HfAlO și HfZrO : sensibilitate redusă sau afectată de comportamentul ferroelectric.

Aceste rezultate indică HfO_2 și HfYO drept dielectricele active optime pentru etapele ulterioare.

3. Proiectarea, fabricarea și caracterizarea dispozitivelor G-FET

Au fost dezvoltate structuri G-FET cu canale de 50 și 60 μm , realizate prin fotolitografie și depuneri Cr/Au. Grafena CVD a fost transferată pe aceste structuri prin delaminare electrochimică, metodă care minimizează contaminarea și conservă integritatea stratului bidimensional.

Caracterizările Raman și AFM au confirmat calitatea grafenei atât în configurație monostrat (SLG), cât și dublu-strat (BLG).

4. Sensibilitatea structurilor G-FET la radiație X

Dispozitivele G-FET au prezentat creșteri semnificative ale curentului și conductanței sub expunere la raze X:

- sensibilități cuprinse între +40% și peste +120%;
- fotoconductivitate pozitivă și reproductibilă pentru toate configurațiile.

În timp ce structurile SLG prezintă curenți mai mari în condiții normale de operare, structurile BLG demonstrează:

- sensibilitate relativă de peste două ori mai mare;
- creșteri ale conductanței de +120–130%;
- stabilitate electrică superioară și raport semnal/zgomot optim.

Astfel, grafena BLG este selectată drept material conductor ideal pentru prototipul detectorului.

5. Materiale și arhitectură optimă pentru Etapa 2

Integrarea rezultatelor a condus la definirea combinației optime de materiale pentru structurile test:

- HfO_2 nedopat – dielectric stabil și reproductibil;
- HfYO – material cu sensibilitate maximă la raze X;
- grafenă BLG – material de canal cu răspuns electric robust și foarte sensibil.

Această arhitectură hibridă maximizează sensibilitatea detectorului și constituie baza tehnologică pentru dezvoltarea demonstratorului.

Concluzii

Etapa 1 (2025) s-a încheiat cu îndeplinirea integrală a obiectivelor planificate:

- sinteza și caracterizarea completă a filmelor de HfO_2 pure și dopate;
- fabricarea structurilor G-FET compatibile cu integrarea grafenei;
- implementarea transferului electrochimic al grafenei SLG/BLG;
- demonstrarea sensibilității la radiație X a sistemelor dielectrice HfO_2/HfYO și a dispozitivelor G-FET;
- publicarea unui articol științific Open Access și diseminarea rezultatelor la o conferință internațională.

Rezultatele obținute validează fezabilitatea tehnologică a conceptului de detector hibrid pe bază de HfO_2 și grafenă și asigură fundamentul științific și experimental necesar dezvoltării demonstratorului funcțional în etapa următoare.