

Rezultate 2021

Proiectul DEPSIS este parte a eforturilor colaborării CERN-RD50, cu o echipă de 7 cercetători (1 masterand, 1 doctorand, 2 PostDocs, 3 cercetători cu experiență) și 2 tehnicieni. Motivația științifică a proiectului este data de necesitatea îmbunătățirii rezistenței la radiații a diferitelor tipuri de senzori de siliciu de tip p (diode PAD, pixeli și benzi, LGAD și HVC MOS) pentru a fi utilizate în upgrade-urile ATLAS și CMS prevăzute pentru experimentele HL-LHC, iar strategia abordată de noi în acest sens este ingineria de defecte. La siliciul de tip p dopat cu B, cea mai evidentă degradare observată în urma iradierii este pierderea dopajului, datorită reacției dintre borul substituțional (Bs) cu atomi interstițiali de siliciu (Si_i) creați prin iradiere, care modifică muta Borul din rețeaua siliciului de pe o poziție substituțională pe una interstițială, atomul de B pierzându-și astfel caracterul de dopant de tip p. Proiectul se concentrează pe investigarea generării și a cineticii defectelor induse de iradierea cu diferite particule în siliciul de tip p în vederea înțelegerii mecanismelor de formare a defectelor ce conțin impurități și a oferi astfel soluții pentru controlul acestui proces de pierdere a dopajului de tip acceptor. S-au efectuat studii sistematice pe o serie de diode Si preparate folosind ingineria de defecte, obținute prin creșterea epitaxială a unui strat de 45 μm de Si pe substraturi de 10 Ωcm Cz. Au fost investigate diode de diferite rezistivități, de 10, 50, 250 și 1000 Ωcm , toate având aceeași cantitate de impurități C și O dar diferite concentrații B. Diodele CZ și FZ de rezistivitate 100 și 1000 Ωcm au fost studiate și în comparație cu diodele EPI după iradiere cu protoni de 23 GeV și neutroni de 1 MeV, fluențe între 10^{10} și 10^{19} cm^{-2} .

Rezultatele originale obținute în funcție de fiecare tip de investigație efectuat (Ax) sunt:

A1) Analize ale conținutului de impurități. Probele neiradiate au fost mai întâi investigate prin tehnici spectroscopice pentru a determina cantitatea de C, O și B din diodele investigate. Cantitatea de C în materialele EPI și CZ este de $\sim 1,3 \times 10^{16}$ cm^{-3} iar în FZ este aproape de limita de detectare $\sim 10^{15}$ cm^{-3} . Conținutul de B a putut fi detectat de SIMS numai în substratul CZ cu rezistivitate scăzută al diodelor, de ordinul a 2×10^{18} cm^{-3} . Prin utilizarea LA-ICPMS, echipament nou instalat în institut, și realizarea unor standarde de calibrare adecvate, a devenit posibilă detectarea B în concentrație mult mai mică. Rezultatele LA-ICPMS au evidențiat o cantitate semnificativ mai mare decât cea așteptată de B în diode, precum și o concentrație semnificativă de P. Acest rezultat demonstrează că dopajul în diodele de tip p cu rezistivitate medie și mare a fost realizat prin compensarea între dopanții B și P și conținutul de bor nu mai poate fi asimilat cu concentrația de dopaj, așa cum se determină în mod uzual din curbele C-V ale diodelor înainte de iradiere.

A2) Investigații TEM – tratamente la temperaturi 80÷350 °C. Pentru investigațiile microstructurale a fost utilizat un microscop TEM JEOL 2100. Probele LGAD iradiate cu fluente mari (până la 10^{19} n/cm^2) au fost preparate folosind metoda convențională a secțiunii transversale bazată pe subțierea mecanică și lustruirea ionilor de Ar. Se detectează un tipar de aliniere de defecte punctiforme în primele zeci de nm de interfață, pe direcția [001] cristalină – vezi Fig.1. Aceasta aliniere de defecte nu se modifică în timpul tratamentului la 80 °C. Hărțile de deformare a rețelei cristaline arată magnitudini foarte scăzute, fără modificări datorate tratamentului la 80 °C. Investigațiile microstructurale au aratat că *tiparul liniar bine definit de defecte punctiforme induse de radiații rămâne și după tratamentul la temperaturi ridicate*. În plus, începând de la 200 °C, încep să se formeze grupuri mari de defecte – vezi Fig.2. Cu toate acestea, siliciul rămâne cristalin chiar și după iradierea extremă, cu 10^{19} n/cm^2 .

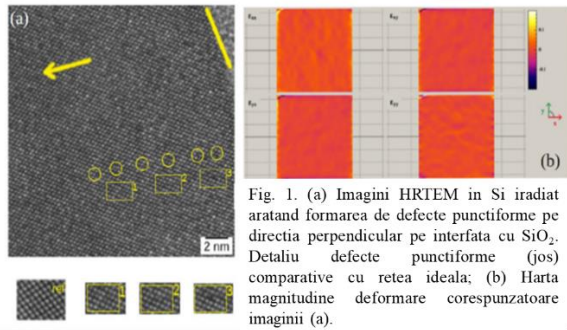


Fig. 1. (a) Imagini HRTEM in Si iradiat aratand formarea de defecte punctiforme pe directia perpendiculara pe interfata cu SiO₂. Detaliu defecte punctiforme (jos) comparative cu retea ideala; (b) Harta magnitudine deformare corespunzatoare imaginii (a).

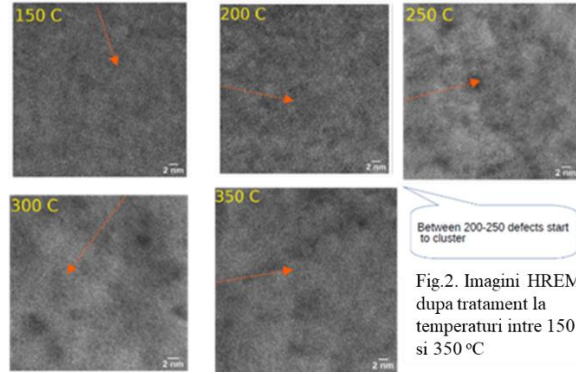


Fig.2. Imagini HREM dupa tratament la temperaturi intre 150 si 350°C

A3) Caracterizare electrică și analiza și modelarea ulterioară a datelor (CV, IV, DLTS și TSC)

- detectia și caracterizarea electrică a tuturor defectelor induse de iradiere, determinarea ratei de generare a defectelor și rolul impurităților în formarea acestora, evaluarea impactului asupra ratei de dispariție a dopantului acceptor (de exemplu prin creerea defectului BiO_i), evoluția în timp. *Au fost detectate patru noi capcane de goluri, dintre care doar 2 au putut fi bine separate și caracterizate complet: H156K ($\sigma h = 4,8 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$, $E_a = 0,29 \text{ eV}$) și H223K ($\sigma h = 1,7 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$, $E_a = 0,36 \text{ eV}$).*

- Proprietățile electrice ale defectului BiO_i și ratele sale de generare – din măsurători DLTS: determinarea energiei de activare E_a , dependenta de câmp, și a ambelor secțiuni de captura pentru electroni și goluri ($E_a = 0,24-0,25 \text{ eV}$, $\sigma_e = 1 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ și $\sigma_h = 2,5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$), afectează performanța dispozitivului - *contribuie cu 100% cu încărcare pozitivă la N_{eff} la RT și are o contribuție nesemnificativă la LC la temperatura camerei (~0,002% LC)*. Acest studiu a arătat că rata de generare a BiO_i nu depinde doar de conținutul de B, C și O, ci și de tipul de particule de iradiere și de fluență. Pentru același material, același dopaj și conținut de impurități, rata de generare a BiO_i rămâne constantă doar pentru fluența hadronică scăzută, sub 10^{11} cm^{-2} . Rezultatele prezentate în Fig.3 arată că rata de introducere a BiO_i (g_{BiO_i}) crește atunci când rezistivitatea scade (așa cum era de așteptat), este constantă pentru rezistivitate medie și fluențe sub 10^{11} n/cm^2 . Pentru fluențe peste 10^{12} n/cm^2 g_{BiO_i} scade iar valorile determinate încep să devină nereproductibile chiar și atunci când se măsoară din nou aceeași probă. O „dispersie” mare similară a rezultatelor este observată și în măsurătorile electrice CV/IV sau TSC și reprezintă un obstacol major în controlul procesului de îndepărtare a acceptorului în dispozitivele de interes.

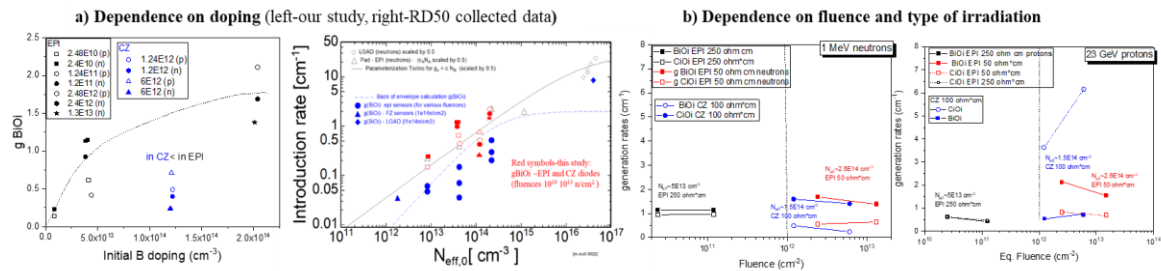


Fig. 3. Dependenta ratei de generare a BiO_i de: a) dopaj conform datelor furnizate de producatori in proiectul DEPSIS (stanga) si in alte diode investigate de alte grupuri din cadrul colaborarii RD50 (dreapta); b) fluenta si tip de iradiere.

- Metastabilitatea defectului BiO_i. Un efort deosebit a fost dedicat înțelegerii motivelor din spatele variației mari a rezultatelor obținute chiar și la măsurarea aceleiași probe, cu aceeași istorie de tratament, afectând astfel serios evaluarea procesului de dispariției dopajului acceptor. Reușim să demonstrăm că motivul din spate este că defectul BiO_i are cel puțin două configurații, A și B, dintre care doar A este detectată în măsurătorile electrice – vezi Fig.4.

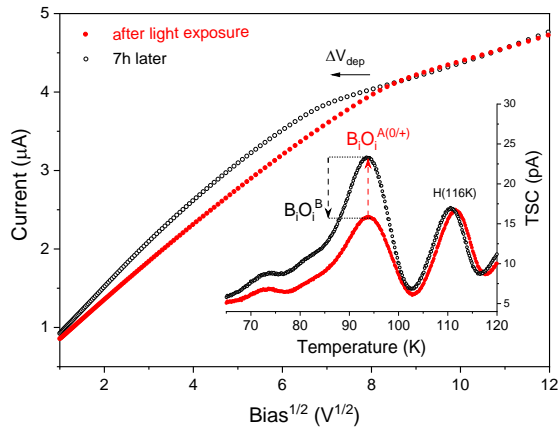


Fig. 4. Spectre TSC si curbe IV masurate pe diode STFZ de 4 kΩcm si iradiate cu $\Phi = 10^{15}$ n/cm² care arata caracterul bistabil al defectului B_iO_i. Primele masuratoari (curbe rosii) sunt inregistrate imediat dupa expunerea la lumina ambientala si urmatoarele dupa 7h, timp in care probele au fost tinute la intuneric (curbele neagre).

S-a constatat că variațiile $[B_iO_i^A]$ sunt declanșate de apariția unui exces de purtători în probe, fie la încălzire, fie prin expunerea scurtă inerentă la lumina ambientală atunci când se manipulează probele înainte de experimente. Atât $[B_iO_i^A]$, cât și N_{eff} , ajung la o stare de echilibru în ~ 7 ore. Ne așteptăm ca magnitudinea variațiilor și constantele de timp să depindă de conținutul de impurități din probe (bor, carbon, oxigen), de intensitatea luminii, de starea de deteriorare a probelor (de exemplu, poziția nivelului Fermi în bandgap, curentul de scurgere) și de temperatură, iar astfel de dependențe vor fi studiate în continuare. În plus, *atâta timp cât cantitatea de defecte B_iO_i în configurația B rămâne nedeterminată, va exista întotdeauna o discrepanță în estimările ratelor de eliminare a borului acceptor din analizele CV/IV și din spectroscopiile de defecte*, cea mai mică realizându-se atunci când sunt efectuate toate măsurătorile pe dispozitive stabilizate. *Cele două configurații ale defectului au un impact diferit asupra ratei de dispariție a dopajului acceptor g_B atât pentru diodele PAD, cât și pentru LGAD ($g_B = 2 \times g_{BiOI^A} + g_{BiOI^B}$), iar distribuția defectului în cele două configurații este principalul motiv din spatele împrăștierii mare a datelor experimentale. Cea mai mică discrepanță dintre rezultatele analizelor CV/IV și spectroscopiile de defecte privind ratele de eliminare a dopajului acceptor cu B se realizează atunci când toate măsurătorile sunt efectuate pe dispozitive stabilizate.*

- Modelarea centrilor coulombici: aproximări de câmp electric dedicate emisiei 3D Poole-Frenkel (PF) a electronilor de pe defectele B_iO_i din regiunea de tip p a diodelor investigate de tip n⁺⁺/p/p⁺⁺. Am început să dezvoltăm modele teoretice mai complexe, ținând cont de temperatura și variația spațială a câmpului electric, luând în considerare până acum doar defectul B_iO_i (vezi Fig5a). Pentru acest defect, am determinat energia de activare la câmp zero (vezi Fig. 5b) și am arătat că, atunci când starea de saracire de purtatori nu este contabilizată corect, evaluările CV și TSC supraestimează atât procesul de eliminare a acceptorului cât și concentrația defectului B_iO_i. Variația concentrației de B_iO_i, extrasă din TSC după tratamente la diferite temperaturi, prezentată în Fig. 5c, a fost utilizată pentru a determina energia de activare și factorul de frecvență pentru cinetica de transformare a defectului: $E_a = 1,35$ eV și $k_0 = 2,58 \times 10^{11}$ s⁻¹. *Creșterea lui N_{eff} la temperaturi peste 150 °C se corelează cu dispariția semnalului dat de B_iO_i^{A(0/+)}, variația în N_{eff} fiind de aproximativ două ori mai mare decât cea în BiOI. Acest fapt reflectă faptul că defectul B_iO_i disociază la aceste temperaturi, eliberând B_i care revine în poziție substitutională, B_s, și că defectul inițial în configurația B este într-o concentrație considerabil mai mică decât în configurația A (în dispozitivele stabilizate).*

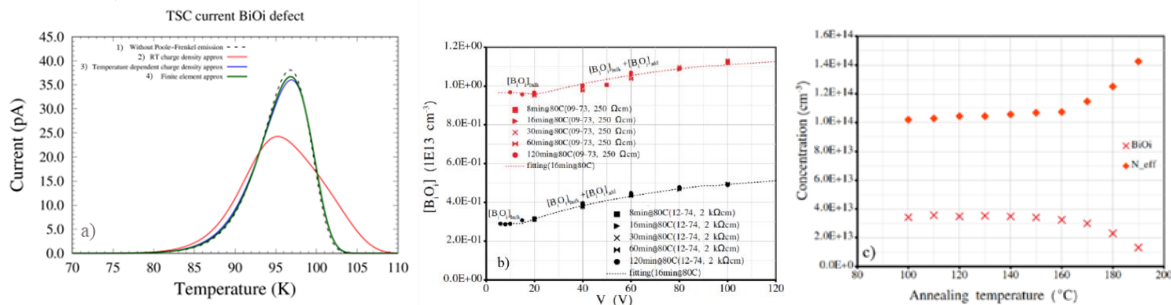


Fig. 5: a) Semnal TSC corespunzator unui singur defect PF (B_iO_i) în 4 aproximatii de calcul; b) rezultate ale masuratorilor TSC folosite pentru cuantificarea efectului PF în cazul defectului B_iO_i ; c) dependenta N_{eff} (din C-V) și $[B_iO_i]$ (din TSC) de temperatura de tratament izocron în cazul unei diode EPI- 50 Ω cm iradiata cu protoni de 23 GeV, $\Phi_{eq} = 4.3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$

Dintre rezultatele obținute, cele mai relevante pentru comunitatea științifică sunt legate de:

(i) defectul B_iO_i , care s-a dovedit a fi cauza principală atât pentru procesul de îndepărtare a acceptorului în siliciul de tip p, cât și pentru împrăștierea neobișnuită de mare a datelor experimentale, fapt ce poate fi acum justificat de o explicație fizică validă - natura bistabilă a defectului. Au fost detectate variații de până la 100% în $[B_iO_i^A]$ în primele 7 ore de la expunerea probei la lumina ambientală de laborator – ceea ce înseamnă că, în acest timp, o cantitate considerabilă de B_iO_i este „ascunsă” în configurația B încă nedetectată, nefiind astfel luată în considerare la calcularea ratei de generare a defectului. Rata corectă de generare a B_iO_i ar trebui să includă și cantitatea din configurația B încă nedetectată ($g_{BiO_i} = g_{BiO_i^A} + g_{BiO_i^B}$); Cea mai mică discrepanță în estimări se realizează atunci când toate măsurătorile sunt efectuate pe dispozitive stabilizate.

(ii) cantitatea de bor din probele investigate. Aceasta a fost detectat în experimentele LA-ICPMS ca fiind în concentrații mult mai mari decât se aștepta din datele furnizate de furnizorii de siliciu. În funcție de producător, discrepanța poate fi de până la 100 de ori și se datorează compensației cu Fosfor pentru obținerea rezisivității dorite. Astfel de discrepanțe au un impact foarte mare pentru orice încercare de parametrizare a procesului de eliminare a dopajului acceptor și pe viitor ar trebui atent evaluate.