

## Realizări științifice 2020

În 2020, a fost inițiat un studiu sistematic asupra unei serii de diode de Si realizate pe Si obținut prin creștere epitaxială a unui strat gros de 45  $\mu\text{m}$  de Si pe substraturi CZ având 10  $\Omega\text{cm}$  și procesate prin inginerie de defecte. Creșterea tuturor straturilor epitaxiale a fost realizată de ITME Varșovia. Singurul parametru variabil impus pentru acest studiu a fost cantitatea de dopaj cu bor. Toate diodele EPI au fost produse de CiS, Germania, folosind aceleași proceduri de implantare și procesare. În acest fel s-au obținut diode cu diferite rezistențe, de 10, 50, 250 și 1000  $\Omega\text{cm}$ , toate având aceeași cantitate de impurități, altele decât cele de bor (C și O). Pentru a fi analizate în comparație, în serie cu diodele EPI, CiS a produs pentru acest studiu și diode CZ și FZ având rezistivitate de 100, respectiv 1000  $\Omega\text{cm}$ . Perechi de diode, din aceleași plachete de Si, au fost supuse iradierii cu 23 GeV protoni și 1 MeV neutroni cu fluențe între  $10^{10}$  și  $10^{13}$   $\text{cm}^{-2}$  pentru investigațiile DLTS și între  $10^{17}$  și  $10^{19}$   $\text{cm}^{-2}$  pentru investigațiile TEM.

În cadrul acestui studiu sunt analizate diode provenind de la aceiași furnizori deci fabricate prin rute de procesare indentice. În plus, toate experimentele s-au desfășurat în același loc, cu aceleași set-up / proceduri. Astfel, studiul întreprins devine relevant pentru înțelegerea motivelor care stau la baza imprastierii mari în rezultatele pentru ratele de “acceptor removal” în Si de tip p, raportate anterior de diferite grupuri de cercetare.

Principalele rezultate obținute în 2020, în funcție de tipul de investigație efectuată sunt:

- 1) Estimarea concentrației de impurități. Tehnica spectroscopică a fost o primă metodă utilizată în analiza probelor neiradiate pentru a determina cantitatea de C, O și B în diodele investigate. În Fig. 1 sunt prezentate rezultatele măsurătorilor SIMS. Cantitatea de C, de  $\sim 1,3 \times 10^{16}$   $\text{cm}^{-3}$  în materialele EPI și CZ, și de  $\sim 10^{15}$   $\text{cm}^{-3}$  (aproape de limita de detecție) în FZ. Concentrația de B, de ordinul  $2 \times 10^{18}$   $\text{cm}^{-3}$ , s-a putut detecta prin SIMS numai pentru substratul CZ de rezistivitate mică pentru straturile EPI. Prin utilizarea echipamentului LA-ICPMS, de curând instalat în NIMP(INCDFM), a devenit posibilă (după fabricarea unor standarde de calibrare adecvate) detectarea B în concentrație de  $10^{13}$   $\text{cm}^{-3}$ .

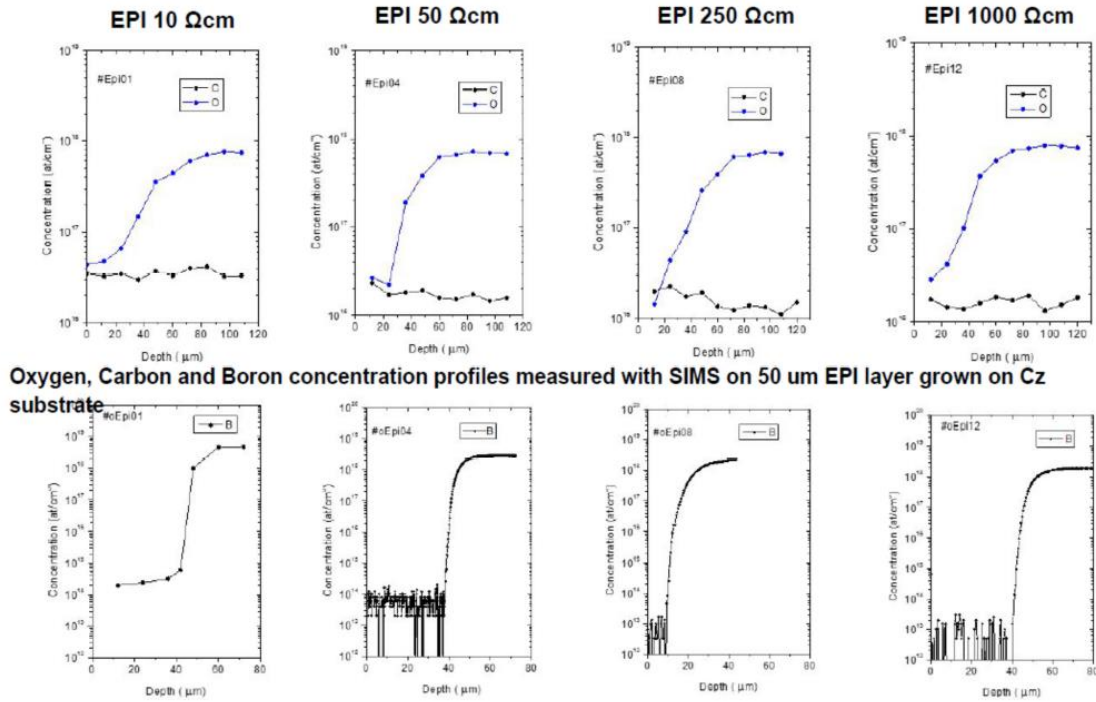
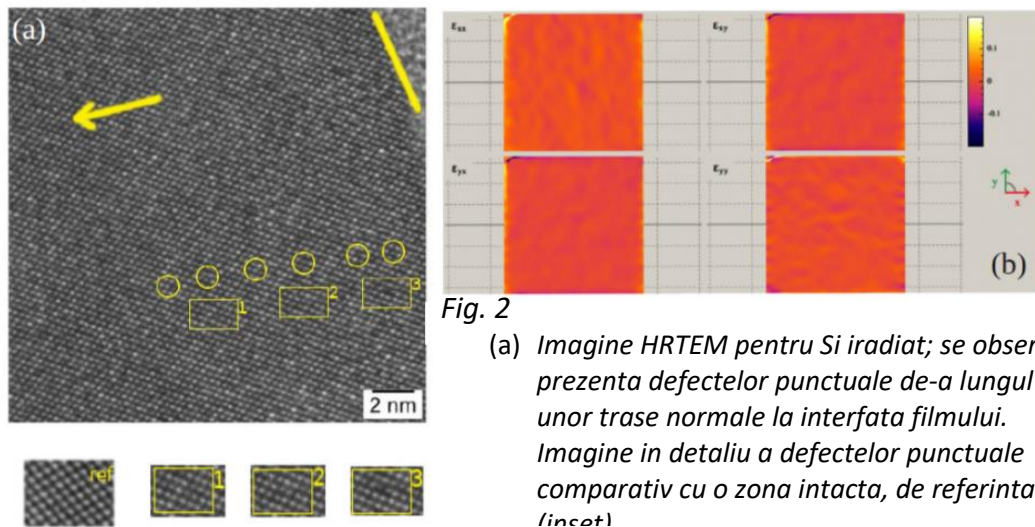


Fig.1. Concentrația de C, O și B obținută în urma analizei SIMS pentru diodele EPI (straturi cu grosimea de 45 μm și diferite valori de rezistență, crescute pe substraturi CZ de 10 Ωcm).

- 2) Investigații TEM – tratamente termice la 80 C. Echipamentul JEOL 2100 TEM a fost utilizat pentru investigații microstructurale. Proba a fost preparata folosind metoda convențională “cross-section” ce constă în subțierea specimenului cu ioni de Ar. Au fost puse în evidență defecte punctuale (Fig2a pentru un LGAD iradiat cu neutroni de 1MeV, fluență de  $10^{19} \text{ cm}^{-2}$ ) ce par să se grupeze de-a lungul unor trase normale la planul filmului, pe aceși direcție ca cea de iradiere cu fascicul de neutroni. Hărțile de stres (Fig. 2b) au fost obținute din imagini HRTEM ca mapări ale deplasărilor locale ale structurii cristaline în raport cu o zonă de referință. Deplasările sunt obținute sub ipoteza de deformare infinitesimală, prin urmare componentele de stres din imaginile de mai jos pot fi interpretate ca deplasări de-a lungul și normal la interfață ( $e_{xx}$ ,  $e_{yy}$ ) și deplasări de forfecare ( $e_{xy}$ ,  $e_{yx}$ ). 0,2%). Marimea deformării este foarte scăzută deci structurile nu prezintă un stres intern semnificativ în urma formării diferitelor defecte. Nu se observă modificări în timpul tratamentului termic pe termen lung la 80 C.



3) Investigații DLTS: detectarea și caracterizarea electrică a tuturor defectelor induse de iradiere, determinarea ratei (ratelor) de generare a defectelor și rolul impurităților în formarea lor; evaluarea impactul asupra ratei de eliminare a acceptorului (de exemplu, defectul BiOi), evoluția în timp.

- Au fost detectate patru noi defecte ce acționează ca capcane de sarcina pozitivă (“hole traps”). Dintre acestea, doar 2 s-a putut obtine un semnal diferentiat și astfel caracteriza: H156K ( $\sigma_h = 4,8 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$  și  $E_a = 0,29 \text{ eV}$ ) și H223K ( $\sigma_h = 1,7 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$  și  $E_a = 0,36 \text{ eV}$ ). Pentru caracterizarea celorlalte doua defecte, este necesara finalizarea upgradarii DLTS.
- *Proprietățile electrice ale defectului BiOi*: dependența de câmp a  $E_a$  și determinarea ambelor secțiuni de captura pentru electroni și goluri ( $E_a = 0,24\text{-}0,25 \text{ eV}$ ,  $\sigma_e = 1 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$  și  $\sigma_h = 2,5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ). Impactul asupra performanței dispozitivului: *la temperatura camerei, contribuie integral la  $N_{eff}$  cu sarcini pozitive și are o contribuție nesemnificativă la curentul de scurgere (~0,002% LC).*

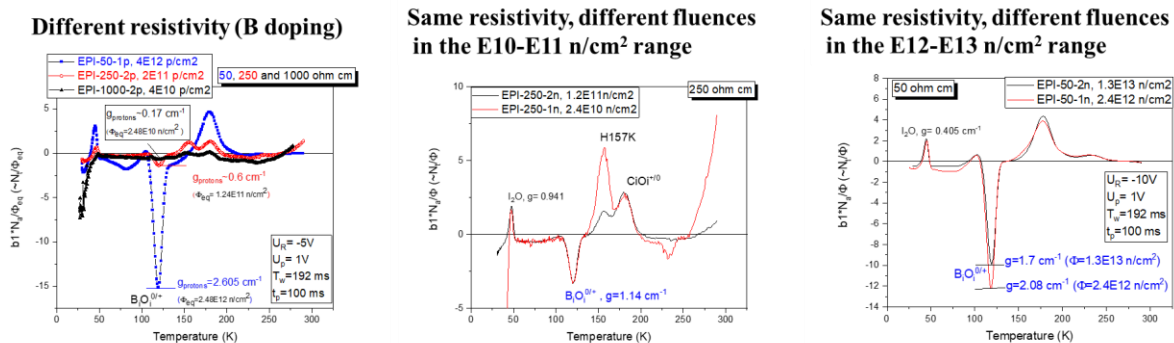


Fig. 3. Rata de generare a BiOi în diode EPI de diferite rezistivități, expuse la diferite iradiieri cu hadroni (23 GeV protoni și 1 MeV neutroni) și fluențe diferite.

- *Rata (Ratele) de generare a defectelor BiOi.* Studiul nostru a arătat că rata de generare a BiOi nu depinde doar de conținutul de B, C și O, ci și de tipul de iradiere (neutroni sau protoni) și de fluența de iradiere. Pentru același material, cu același dopaj și concentrație de impurități, rata de generare a BiOi rămâne constantă doar pentru fluențele de iradiere cu hadroni sunt mici, sub  $10^{11}$   $\text{cm}^{-2}$ . Cateva exemple de valori pentru rate de generare a BiOi determinate sunt date în Fig. 3 pentru diodele EPI; rezultatele DLTS obținute sunt prezentate astfel încât să se poată compara direct ratele de generare pentru BiOi. Figurile 4 și 5 arată dependența ratei de generare a BiOi în funcție de dopaj, fluență, tipul de iradiere și materialul iradiat. Rezultatele arată că rata de generare a defectelor BiOi crește atunci când rezistivitatea este mică (așa cum era de așteptat), este constantă pentru rezistivitate medie și fluențe sub  $10^{11}$   $\text{p/cm}^2$  și scade odată cu creșterea fluenței peste  $10^{12}$   $\text{n/cm}^2$ .

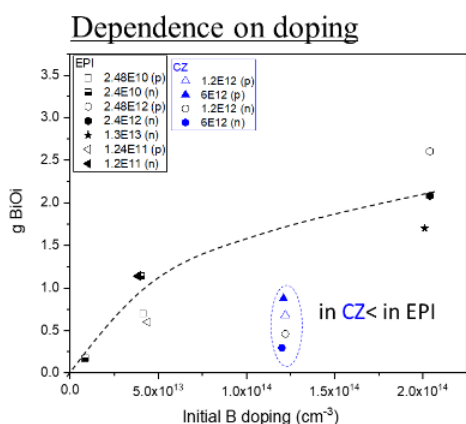


Fig.4. Depedenta ratei de generare a BiOi în funcție de concentrația de B în diodele EPI – comparatie cu diodele CZ

Dependence on the material (different O content in EPI and CZ materials, similar C content)

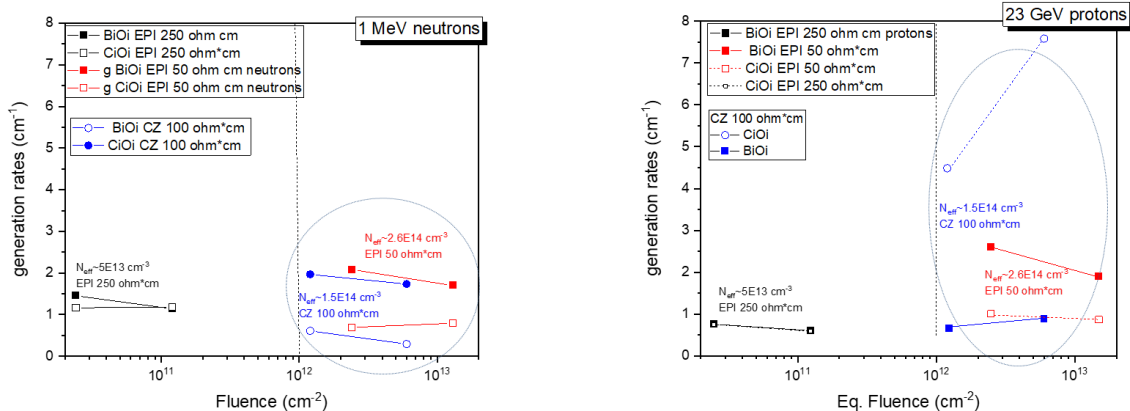


Fig. 5. Ratele de generare a BiOi și CiOi în diodele EPI și CZ, iradiate cu neutroni și protoni.

În același timp, iradierea cu protoni induce *mai multe* defecte decât cea cu neutronii în diodele EPI cu rezistivitate mica și *mai puține* în cele cu rezistivitate medie și mare. Dependența de fluență a BiOi în materialul CZ cu rezistivitate mică este similară cu cea indentificată pentru diodele EPI după iradierea cu neutroni, dar nu după iradierea cu protoni. Deși conținutul de C este

similar în ambele tipuri de diode, EPI și CZ, și doar conținutul de O diferă (de 40 de ori mai mult în CZ decât în EPI), rezultatele nu pot fi explicate luând în considerare doar procesele concurențiale dintre B și C. În plus, există o dispersie mare a datelor obținute chiar și pentru diodele din prezentul studiu deși pentru acestea au fost luate o multitudine de precauții (aceiași furnizori, aceeași prelucrare, aceleași set-ups și proceduri). Astfel, rezultatele sugerează că, pe lângă procesul concurențial cunoscut, generarea defectului  $\text{CiO}_i$ , cel puțin un alt mecanism concurent influențează generarea defectului  $\text{BiO}_i$ , și, în consecință, rata fenomenului “acceptor removal” în diodele Si de tip p. Se poate considera influența interstițialelor în alte defecte (cum ar fi defectul  $\text{I}_2\text{O}$ , generat mai frecvent în materialul CZ). Impactul acestui defect poate fi corect evaluat prin studierea disocierii sale la temperaturi peste 100 C. Până în prezent, studiile noastre de tratare termică au fost efectuate la 60 C; pentru această temperatură singura variație detectată a fost a concentrației defectului V3 care își schimbă configurația de la o stare ce generează curent de scurgere (LC) la o stare fără impact asupra caracteristicilor dispozitivului.