

# Mjerenje utjecaja toka ionskog snopa na procese formiranja defekata u poluvodičkim detektorima zračenja

SAMOSTALNI SEMINAR IZ ISTRAŽIVANJA U FIZICI

Andreo Crnjac

19. siječnja 2018.

## Sažetak

Poluvodički detektori zračenja u mnogim eksperimentima bivaju izloženi enormnim količinama zračenja, primjerice na LHC akceleratoru čestica, dio opreme osjeti tok čestica  $\Phi \sim 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Unaprjeđenje otpornosti poluvodičkih uređaja na oštećenja nastala zračenjem, u smislu traženja novih materijala i tehnika zaštite je stoga vrlo aktivno i aktuelno u fizici. U ovom radu su predstavljeni rezultati proučavanja utjecaja ionskog snopa ugljika energije 3.25 MeV na procese formiranja defekata u čistom siliciju, izvedeni u "Laboratoriju za interakcije ionskih snopova" na IRB-u. Prilikom ozračivanja koristile su se dvije brzine kretanja snopa po površini uzorka. IBIC mikroskopijom smo provjerili vremensku skalu na kojoj defekti migriraju iz oštećenog dijela silicija, što rezultira oporavkom detektorskih sposobnosti diode (CCE se opravio s 0.4 nakon par stotina sekundi, na 0.6 nakon 19.5 sati). Nisu uočene različite promjene brzine i iznosa oporavka oštećenja za dvije ispitivane konfiguracije ozračivanja.

## 1 - Uvod

Poluvodički materijali su često korišteni kao osjetljivi elementi detektora zračenja u modernoj fizici. Prvotna uporaba (1950-ih godina) ovih materijala je bila u brojačima čestica često upotrebljavanim u eksperimentima nuklearne fizike, dok se potrebna tehnologija za konstruiranje sustava za praćenje putanje prolazećeg zračenja razvila tek 1980-ih. Više o povijesnim crticama razvoja poluvodičkih detektora se može naći u [1]. Ti tzv. *tracker* detektorski sustavi su danas u širokoj uporabi za mjerenja u fizici visokih energija i drugim granama znanosti. Važno je stoga poznavati posljedice izloženosti zračenju, posebice nastanak oštećenja u strukturi poluvodičkog materijala, koji mogu utjecati na učinkovitost detekcije uređaja. Iako se mjerenja ovih svojstava poluvodiča izvode od početaka njihovog korištenja u eksperimenta s izloženošću velikim količinama zračenja (gdje je opasnost od kvara najvjerojatnija) i sada se aktivno provjeravaju procesi koji na mikroskopskoj razini utječu na formiranje defekata u strukturi materijala, s obzirom da njihovo razumijevanje nije potpuno.

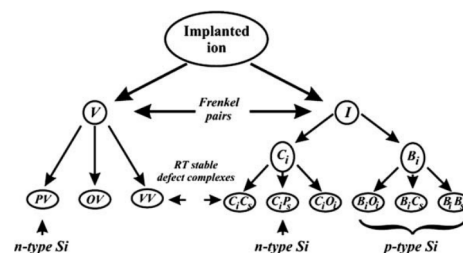
Cilj ovog seminara bio je izmjeriti učinkovitosti skupljanja naboja silicijske diode ozračenone ionskim snopom ugljika energije 3.25 MeV, korištenjem IBIC metode. Prilikom ozračivanja snop se kretao po površini materijala različitim brzinama, zahvaljujući konfiguriranju magnetskog sustava za otklanjanje. Ovime se proučio utjecaj lokalne promjene toka snopa zračenja (u mikro-metarskim dijelovima) na formiranje defekata u poluvodičkom materijalu; a time posljedično i utjecaj na

detekcijske performanse diode.

## 2 - Teorijska pozadina

### 2.1 Defekti nastali ionizacijskim zračenjem

Prodorom nabijenih čestica u kristalnu strukturu poluvodiča počinje se događati niz interakcija kojima ulazno zračenje gubi energiju. Važna nam je samo ne-ionizacijska komponenta gubitka energije (engl. *non-ionizing energy loss - NIEL*) za koju su odgovorni izravni sudari s atomima materije, čime se oni izbijaju iz definiranih pozicija u rešetci i nastaju parovi vakancijskih ( $V$ ) i intersticijskih ( $I$ ) defekata, tzv. Frenkelovi parovi. Ovi defekti imaju značajnu mobilnost na sobnoj temperaturi pa veliki dio nestane u kratkom vremenu ( $\lesssim 10$  ps, [2]) rekombinacijama bliskih intersticija i vakancija. Preostali mogu stvoriti stabilne nečistoće, od kojih su najvažnije prikazane na slici 1.



Slika 1: Prikaz najvažnijih stabilnih nečistoća koje mogu nastati nakon proizvodnje Frenkelovog para. Izvor: [3]

Vakancija  $V$  često difuzijom migrira do druge  $V$  i stvori stabilnu divakanciju ( $VV$ ), moguće je i sparivanje s do-

pirajućim elementima (npr. fosforom -  $PV$ , ili borom  $BV$ ) kao i sparivanje s atomima kisika ( $OV$ ), prisutnim kao prirodno pojavljujuća nečistoća u materijalu. Intersticija  $I$  se može tzv. Watkinsovim mehanizmom zamjene [4] pretvoriti u intersticijski bor  $B_i$  ili intersticijski ugljik  $C_i$  (ugljik je također često neizbježno prisutna prirodna nečistoća u siliciju). Ove dvije vrsta intersticija lako migriraju kristalnom strukturom i sparuju se u složenije nečistoće: intersticijski ugljik - supstitucijski ugljik ( $C_s C_i$ ), intersticijski ugljik - intersticijski kisik ( $C_i O_i$ ), intersticijski bor - supstitucijski ugljik ( $B_i C_s$ ) itd. (pogledati sliku 1 za ostale važnije kombinacije).

## 2.2 Rekombinacije defekata

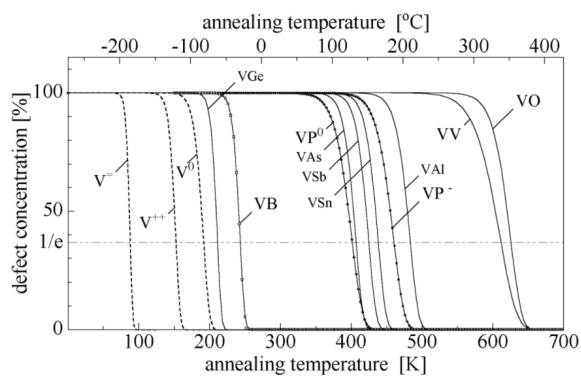
Kao što je već napomenuto, defekti stvoreni ionizacijskim zračenjem su iznimno mobilni u siliciju, stoga treba razmotriti nestajanje defekata kao posljedicu njihove migracije (ovaj efekt je opisan engleskom riječi *annealing*, doslovan prijevod: grijanje) - bilo dolaskom na površinu materijala, bilo rekombinacijama s odgovarajućim parovima.

Model koji dobro opisuje nestajanje defekata rekombinacijom dviju vrsta homogeno raspoređenih defekata ( $X + Y \rightarrow XY$ ) s koncentracijama  $N_x$  i  $N_y$  je dan jednadžbom [5, str. 49.-51.]:

$$-\frac{d}{dt}N_x = -\frac{d}{dt}N_y = 4\pi R(x,y)DN_xN_y, \quad (1)$$

gdje je  $R(x,y)$  maksimalna udaljenost na kojoj se trebaju naći  $x$  i  $y$  defekti da bi se reakcija odvila, a  $D$  je koeficijent difuzije za reakciju. Vidimo da je broj defekata koji nestaju proporcionalan trenutnom broju defekata. Treba imati na umu da relacija 1 jednako dobro opisuje i formiranje kompleksnih nečistoća, kao primjerice već spomenute komplekse  $OV$  ili  $VV$ .

Difuzivnost  $D$  je temperaturno ovisna (raste s temperaturom), pa je koncentracija defekata snažno ovisna o temperaturi na kojoj se materijal nalazi, kao što je prikazano na slici 2 za razne kombinacije nečistoća sa vakancijama.



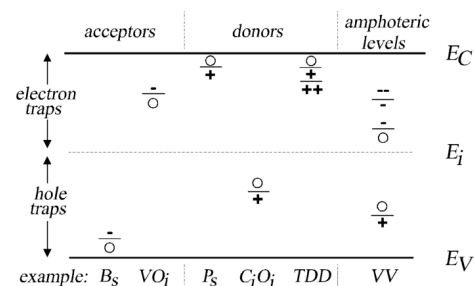
Slika 2: Prikaz temperaturne ovisnosti koncentracije defekata nastalih od vakancija. Izvor: [5]

<sup>1</sup>Teorija raspodjele nosilaca naboja u poluvodičima se može naći u većini udžbenika za elektroniku i mikroelektroniku, primjerice [6, str. 60.-67.]

Iz prethodnog grafa je jasno da ako želimo umanjiti postojanje određene vrste nečistoća, dovoljno je prijeći graničnu temperaturu da bi oni prethodno opisanim procesima bili očišćeni iz materijala.

## 2.3 Defekti kao centri uhvata nosilaca naboja

Svaki defekt nastao u kristalnoj strukturi efektivno nosi naboj (pozitivno, negativno ili neutralno nabijeno stanje) i kao takav može predstavljati centar uhvata slobodnih nosilaca naboja (elektrona i šupljina). Na slici 3 je prikazan energijski dijagram poluvodiča - gdje je jasno naznačena pozicija novog energijskog stanja koje dolazi od postojanja defekata u materijalu, većina ovih stanja se nalazi u procjepu između valentne i vodljive vrpce.



Slika 3: Prikaz energetskog dijagrama poluvodiča s istaknutim stanjima koja pripadaju različitim defektima. Izvor: [5]

Akceptore možemo definirati kao defekte koji su negativno nabijeni nakon okupacije stanja elektronom, a donore kao defekte koji su neutralnog naboja nakon okupacije elektronom. U termalnoj ravnoteži, punjenje stanja je određeno Fermijevom razinom<sup>1</sup>. Ako je Fermij linija u dijagramu iznad same razine defekta - nosioci naboja će popuniti to stanje - na slici 3 ovo je prikazano simbolima iznad/ispod pune linije. Neki defekti mogu imati više nabojnih stanja, ovdje su prikazani  $TDD$  (engl. *thermal double donor*) i  $VV$ , s tim da su stanja koja pripadaju divakanciji specifične amfotermne razine koje se ponašaju kao akceptori i kao donori.

Stanja u gornjoj polovici energijskog procjepa se ponašaju kao centri uhvata elektrona, dok su stanja u donjoj polovici centri uhvata šupljina - tj. služe kao međurazine za prijelaz u vodljivu ili valentnu vrpcu. Vrijeme uhvata nosioca naboja može biti dovoljno dugo, za neke eksperimente, recimo kada je vrijeme u kojem skupljamo naboj na elektrodama kraće od vremena uhvata, da se naboj ne skupi i time ne očita kao struja ili napon. Stoga je ovo mehanizam odgovoran za smanjenje učinkovitosti sakupljanja naboja diode, što je veličina koju smo mjerili u ovom seminaru.

Vrijeme zatočenja na centrima uhvata se može

izračunati za elektrone ( $\tau_e$ ) i šupljine ( $\tau_h$ ):

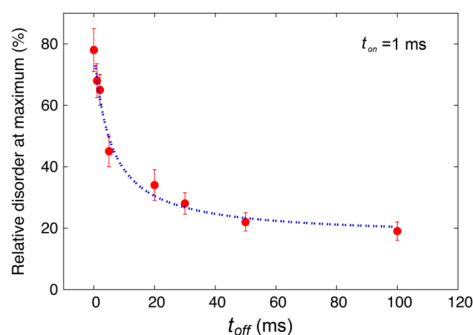
$$1/\tau_e = \sum_{c. \text{uhvata}} = c_{e,t} N_t f_{e,t}, \quad (2)$$

$$1/\tau_h = \sum_{c. \text{uhvata}} = c_{h,t} N_t f_{h,t}, \quad (3)$$

gdje se po centrima uhvata sumira produkt: koncentracije pojedinog centra  $N_t$ , vjerojatnosti uhvata elektrona/šupljine u taj centar  $c_{e/h,t}$  i udio neokupiranih u ukupnom broju centara  $f_{e/h,t}$ . Primjerice, na temperaturi 20 °C, elektron uhvaćen u  $VO^{-/o}$  kompleks se otpušta nakon vremena od 0.4 ns, dok šupljina uhvaćena u  $C_iO_i^{+/o}$  biva oslobođena nakon 7  $\mu$ s. Vidimo da uhvat u  $VO^{-/o}$  centar zasigurno neće utjecati na smanjivanje broja skupljenih nosilaca naboja, dok uhvat  $C_iO_i^{+/o}$  može imati utjecaj. Vremena dobivena ovim računom se ponekad ne slažu s rezultatima eksperimenata pa se u prvom redu trebaju koristiti kao indikacija reda veličine vremena na kojoj se efekt zatočenja događa, a ne točne vrijednosti vremena.

## 2.4 Vremenska evolucija broja defekata nakon ozračivanja poluvodiča

Kao što je već napomenuto, proces inicijalne rekombinacije među Frenkelovim parovima, koji se često naziva kaskadna termalizacija, i koji se odvija na vremenskim skalama pikosekundi u poluvodičima na sobnoj temperaturi, je dobro istražen i parametriziran. Procesni odgovorni za napuštanje naboja nakon kaskadne termalizacije, koji se zajednički nazivaju procesima dinamičkog napuštanja (engl. *dynamic annealing*), su znatno manje teorijski rasvijetljeni te su i dalje aktivno područje istraživanja. Učinkovita tehnika za proučavanje utjecaja dinamičkog napuštanja se radi s pulsним ionskim snopom koji se nakon kratkog puštanja na metu ( $t_{on}$  je obično 1 ms) zatvara, te se nakon vremena  $t_{off}$  ponovno pušta.



Slika 4: Rezultati mjerenja ovisnosti relativnog broja defekata o vremenu prekida u radu pulsniog snopa, u komadu Si ozračenog ionima He energije 2 MeV-a na sobnoj temperaturi. Izvor: [7]

Variranjem vremena  $t_{off}$  mogu se dobiti informacije o skalama na kojima se odvijaju procesi rekombinacije i nestajanja defekata između ponovnog prolaska zračenja. Na slici 4 su prikazani rezultati jednog eksperimenta na siliciju, mjerenje relativnog broja defekata

u ozračenom području u ovisnosti o  $t_{off}$  koji se kretao u rasponu 0 ms (kontinuirani snop) do 100 ms [7].

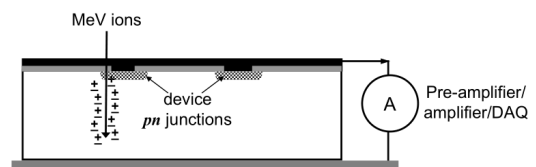
Ako definiramo vrijeme  $\tau$  kao ono unutar kojeg se završi dominantni proces dinamičkog napuštanja, iz grafa vidimo da se saturacija broja defekata javlja oko 50 ms, što upućuje da je vrijeme  $\tau$  reda veličine 10 ms, nelinearnom prilagodbom se dobilo  $\tau = 6 \pm 1$  ms. Slična mjerenja su provedena na povišenim temperaturama od 100 °C u SiC, gdje se za konstantu  $\tau$  dobilo  $\approx 3$  ms [8]. Za sada nije dobro istražena ovisnost procesa dinamičkog napuštanja o vrsti upadnih iona niti drugim važnijim parametrima.

Napuštanja naboja se nadalje odvija i na vremenskim skalama sekundi, minuta i sati, kao što će biti demonstrirano u mjerenjima provedenim u ovom radu, te je nejasno u kolikoj mjeri su pozadinski procesi odgovorni za ovo povezani s efektima u milisekundnim rasponima, no upravo razumijevanje svih ovih procesa je ključno za poboljšanja u industriji poluvodičkih detektora i znanstvene primjene.

## 3 - Eksperimentalne tehnike

### 3.1 IBIC metoda

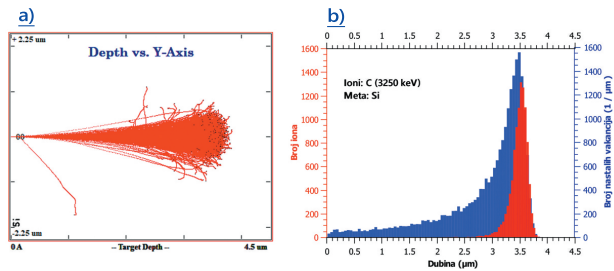
IBIC (engl. *Ion Beam Induced Charge*) mikroskopija je često korištena tehnika u proučavanju svojstava mikroelektroničkih uređaja i općenito procesa na mikroskopskoj razini u kristalnoj strukturi poluvodiča. U eksperimentima s IBIC-om se skuplja naboj induciran prolaskom ionizirajućeg zračenja kroz osjetljivi volumen diode (vidi sliku 5). Oko ionske zrake se stvara niz parova elektron-šupljina (primarna ionizacija) koji se pod utjecajem vanjskog napona skupljaju na kontaktnim područjima anode i katode s osjetljivim volumenom.



Slika 5: Geometrija postava korištenog za IBIC mikroskopiju - ion prolazi osjetljivim volumenom diode i proizvodi ionizaciju duž putanje. Izvor: [9]

Diode imaju niz kontakata pa je moguća dobra prostorna razlučivost mjesta gdje je naboj prikupljen (odnosno lokacije prolaznog iona), a tehnika TRIBIC (engl. *Time-Resolved IBIC*) mikroskopije omogućuje i vremensku informaciju. Dakle dioda se koristi i kao uzorak koji se ispituje i kao detektor (mikroskop). Jasno je da je metoda iznimno pogodna za proučavanje posljedica defekata nastalih kao posljedica ozračivanja poluvodiča. Dodatna prednost je da nabijeni ioni u snopu ostaju na pravocrtnoj putanji kroz više mikrometara poluvodiča (dubina prodiranja snažno ovisi o masi iona, kao i energiji), tj. defokusiranje se odvija

tek pred kraj putanje kada se snop apsorbira u materijalu.



Slika 6: Rezultati TRIM simulacije upada 10000 iona ugljika, energije 3.25 MeV na Si metu. a) Prikaz putanje za 1000 iona kroz materijal. b) Prikaz raspodjele doseg upadnih iona, kao i raspodjele nastalih vakancija po mikrometru putanje o mjestu formacije (dubini)

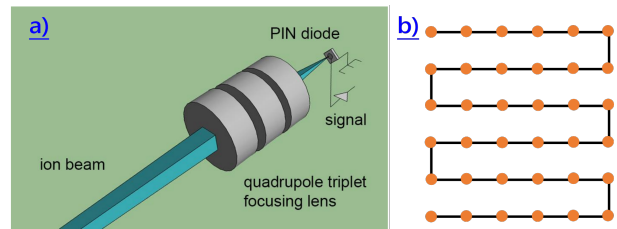
Ovo se može vidjeti na slici 6 (a), gdje su prikazane putanje ionskog snopa ugljika na silicijsku metu (identične postavke kao u našem eksperimentu). Na slici 6 (b) su prikazane raspodjele doseg upadnih iona (centar raspodjele je na  $3.5 \mu\text{m}$ ), zajedno s brojem generiranih vakancija (nastalih samo pri prvotnoj generaciji Frenkelovih parova) po mikrometru dubine. Simulacija je dala prosječan broj od 1165 vakancija generiranih po jednom upadnom ionu. Vidimo da najveći dio defekata također nastaje približno na dubini doseg snopa. Rezultati su dobiveni Monte Carlo simulacijama u programskom paketu TRIM [10].

Najvažnije primjene IBIC mikroskopije su za proučavanje mobilnosti defekata, učinkovitosti sakupljanja naboja (engl. *Charge Collection Efficiency*, dalje u tekstu CCE) nakon ozračivanja detektora (kao u našem eksperimentu), efekata velikih količina zračenja na kristalnu strukturu itd. [9].

### 3.2 Akceleratori sustav i nuklearna mikroproba

Mjerenja su izvođena na akceleratorском postavu u "Laboratoriju za interakciju ionskih snopova" IRB-a. Snop je dobiven elektrostatskim tandem Van de Graaff akceleratorom. Korišten je snop iona ugljika ubrzanih na energiju 3.25 MeV-a. Snop je nakon ubrzavanja doveden na eksperimentalnu liniju s nuklearnom mikroprobom - mikroproba koristi triplet magnetskih kvadrupola koji služe kao fokusirajući elementi u ionskoj optici. Preciznim podešavanjem magnetskih polja moguće je zrake nabijenih čestica fokusirati na submikronske dimenzije. Shema postava je dana na slici 7 (a), u fokusu snopa se nalazi ispitivana poluvodička dioda (osjetljivom površinom okomito postavljenoj na smjer snopa) koja služi i kao detektor u IBIC metodi.

<sup>2</sup>Program je proizveden u istom laboratoriju



Slika 7: a) Shema eksperimentalnog postava s PIN diodom kao detektorom i ispitivačkim uzorkom (IBIC metoda) postavljenom u fokusu ionskog snopa u nuklearnoj mikroprobi. Prikazani su i fokusirajući kvadrupolni magneti. Izvor: [11]; b) Ilustracija kretanja snopa po uzorku prilikom ozračivanja ili skeniranja.

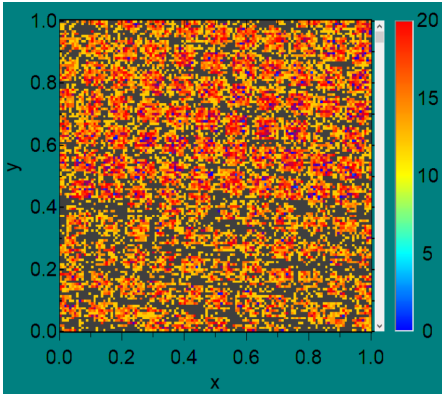
### 3.3 Opis eksperimentalnog postava

U eksperimentu je korištena PIN dioda *Hamamatsu S5821*, sa silicijem kao poluvodičkim osjetljivim materijalom. PIN diode imaju nedopirani, intrinzični (I) sloj između p i n dopiranih rubnih područja. Intrinzični sloj ima jednake radne uvjete za mobilnost nosilaca naboja, pa ne utječe na funkcioniranje pn spojeva u diodi, već služi samo za povećanje volumena osjetljivog na prolaz zračenja. Dioda je postavljena na nosač u nuklearnoj mikroprobi uz vakuumske uvjete, te centrirana u fokus snopa mikrometarskog profila (ponovno pogledati sliku 7 (a)). Na diodu je spojen vanjski napon u zapornom režimu. Izlaz iz diode je doveden na predpojačalo. Nakon toga je signal proveden kroz brzi elektronički brojač signala (kojim se preciznije određuje doza - broj depoziranih iona u materijalu tokom mjerenja, u odnosu na softversko brojanje) a potom i na računalo, gdje je obrada podataka rađena u programskom paketu *Spector 2* (specifično dizajniranim<sup>2</sup> za kontroliranje parametara eksperimentalne akceleratorске linije, te prikazivanje i obradu rezultata).

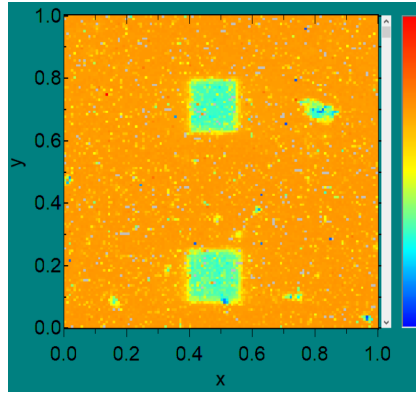
## 4 - Rezultati mjerenja i diskusija

### 4.1 Definiranje prostorne skale

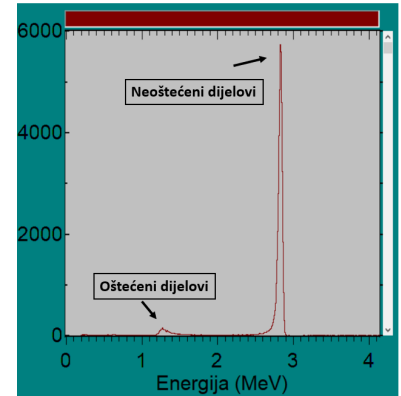
Nuklearna mikroproba je opremljena magnetskim sustavom za otklanjanje (ili skenerom) snopa u obje dimenzije okomite na smjer toka iona, odnosno sposobna je skenirati uzorak. Da bi se odredilo kolika je prostorna skala područja dostupnog za skeniranje, postavljena je mikroskopska mrežica s 1000 zarezova po inču u fokusu snopa, te je skenirano uz maksimalni odklon snopa. Detektor, postavljen iza mrežice je prikupljao događaje koji su grafički prikazani na slici 8. Brojanjem zarezova, uz jednostavna trigonometrijska razmatranja, određeno je da x i y os područja skeniranja imaju jednak raspon od  $0.0274 \text{ cm}$ . Kako softver radi podjelu slike na  $128 \times 128$  piksela, znamo da je površina jednog piksela  $(2.141)^2 \mu\text{m}^2$ .



Slika 8: Prikaz događaja detektiranih nakon prolaska kroz mikroskopsku mrežicu u 2D histogramu. Podaci su korišteni za kalibraciju prostorne skale.



Slika 9: Događaji zabilježeni IBIC metodom u ovisnosti o poziciji upada na diodu. Vidljivo je da je manji broj detektiranih događajima u područjima ozračivanja.



Slika 10: Prikaz energijskog spektra broja događaja zabilježenog skeniranjem područja prikazanog na slici 8.

## 4.2 Provjera utjecaja toka ionskog snopa na CCE

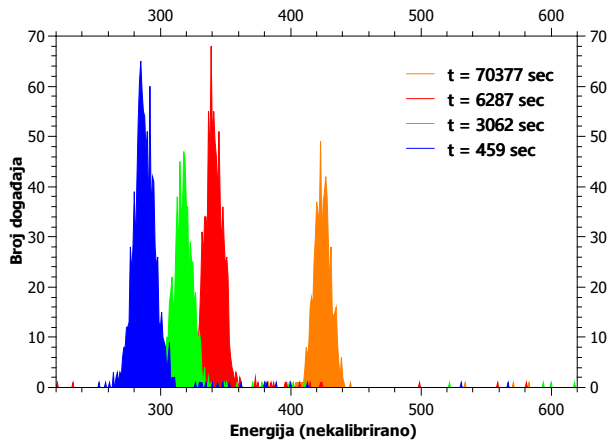
Mikroskopska mrežica je zamijenjena PIN diodom koja je spojena kao detektor u IBIC metodi, kako je već opisano. Softverski su definirana dva područja veličine  $20 \times 20$  piksela ( $42.82 \times 42.82 \mu\text{m}$ ) koja su ozračena snopom frekvencije 40 kHz, ali s bitnom izmjenom jednog parametra. Naime prilikom iradijacije, snop se po definiranom području, zahvaljujući magnetskom otklancanju u skeneru, kretao kako je shematski prikazano na slici 7 (b) u cik-cak putanji, pri tome se na donjoj sekciji zadržavajući  $\eta_1 = 10000 \mu\text{s}/\text{piksel}$ , a na gornjoj  $\eta_2 = 100 \mu\text{s}/\text{piksel}$ . Na dalje u tekstu će se koristiti oznake  $\eta_1$  i  $\eta_2$  za dvije konfiguracije ozračivanja uzorka. Treba razumjeti da su oba snopa imali identična svojstva prilikom ovih ozračivanja, odnosno oba su se sastojala od iona ugljika energije 3.25 MeV. Važno je bilo i održati jednaku dozu zračenja ispuštenu u sekcije  $\eta_1$  i  $\eta_2$ , elektroničkim brojačem je izmjereno približno  $2 \cdot 10^6$  događaja prilikom oba izlaganja, no kako nije postojao automatizirani mehanizam koji bi prekinuo snop na definiranoj vrijednosti brojača, to je obavljano ručno, pa određena greška postoji. Iz ovog se može izračunati da je prilikom početne iradijacije u trajanju  $\approx 50$  sekundi, prilikom "šaranja" po površini, snop na područje jednog piksela došao 1250 puta u razmacima  $\approx 40$  ms u slučaju brzine  $\eta_2$  (odnosno 100 puta rijeđe, 12 ili 13 puta u razmacima  $\approx 4$  s, u slučaju  $\eta_1$ ) pri tome svaki put ispuštajući prosječno 4 iona (za brzinu  $\eta_2$ ), odnosno 400 iona (za brzinu  $\eta_1$ ). Promjena vremena zadržavanja snopa na jednom pikselu, zapravo simulira dva efekta - 1) broj iona koji u malom vremenskom prozoru prolete dovoljno blizu jedni drugima da izazovu veću vjerojatnost rekombinacije nastalih defekata, te 2) razliku vremena povratka snopa na istu lokaciju (slično kao  $t_{off}$  u eksperimentu sa slike 4).

Nakon početnog ozračivanja određeno je nekoliko serija skeniranja ukupnog područja ( $128 \times 128$  piksela), skeniranje označava da smo minimalnim mogućim bro-

jem događaja (ograničeno brzinom kretanja snopa) prekrili navedenu površinu, i pri tome korištenjem IBIC metode skupili informacije o broju događaja u ovisnosti o poziciji na diodi. Ovi podaci su korišteni za određivanje vremenske evolucije CCE-a (a time i broja defekata) na način koji će sada biti opisan.

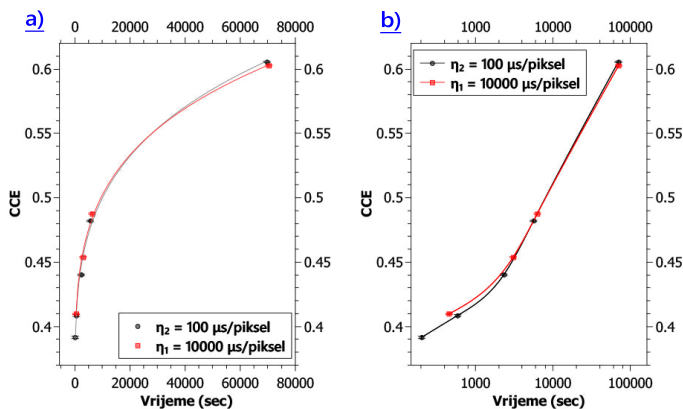
Na slici 9 je prikazan broj događaja skupljen prilikom skeniranja snopom, nakon ozračivanja oba područja. Jasno se vidi da je broj detektiranih događaja u ozračenim područjima manji nego u okolnim neoštećenim dijelovima. S obzirom da neoštećena PIN dioda s vanjskim naponom u zapornom režimu sakuplja sav naboj koji prolazi (100% CCE) [11], što znači da možemo izbrojati događaje u oštećenom području, i događaje prikupljene na jednakoj površini u neoštećenom području, te njihovim dijeljenjem dobiti CCE za oštećeni dio. Kako je broj događaja proporcionalan energiji, ovo je ekvivalentno dijeljenju vrijednosti energije događaja iz spektara ozračenog i zdravog dijela diode. Radi izbjegavanja rubnih efekata, odabrani su centralni dijelovi od  $10 \times 10$  piksela iz oštećene sekcije i  $10 \times 10$  pikselni dijelovi iz neoštećene sekcije (dakle i podatke za neoštećeni dio smo izdvajali iz pripadnih mjerenja za taj vremenski trenutak, da bi u obzir uzeli i moguće malo opadanje CCE-a od ozračivanja skeniranjem).

Na slici 10 je prikazan energijski spektar za ukupno područje skeniranja (koje je vidljivo na slici 9), gdje se vide doprinosi od oštećenih i neoštećenih dijelova; a na slici 11 su zajedno prikazani spektri događaja koji pripadaju dijelu ozračenom snopom  $\eta_2$  (donja sekcija) u različitim vremenskim trenucima nakon ozračivanja. Spektri se sastoje od karakterističnog maksimuma čija se pozicija određivala gausijanskom prilagodbom. Vidljivo je da s prolaskom vremena, oštećeni dio detektora ima maksimum na većoj energiji, pa time i CCE raste. Slični gausijanski maksimumi se dobivaju i u spektrima za drugo oštećeno područje, kao i za podatke iz neoštećenih dijelova, pa oni nisu posebno prikazivani.



Slika 11: Zajednički prikaz energijskih spektara oštećenog dijela diode, ozračenog brzinom otklona snopa  $\eta_2$ , u različitim vremenskim trenucima nakon prvotne radijacije. Nad maksimumima je provedena gausijanska prilagodba radi određivanja pozicije u energiji

Sada možemo prikazati rezultate obrade podataka za vremensku ovisnost učinkovitosti skupljanja naboja, za dva područja oštećena ionima na prethodno opisani način. Na slici 12 su prikazani ovi podaci u linearnoj i logaritamskoj vremenskoj skali.



Slika 12: Prikaz vremenske evolucije CCE-a za dvije brzine kretanja snopa pri ozračivanju u: a) linearnoj i b) logaritamskoj vremenskoj skali. Greške dolaze od gausijanskih prilagodbi maksimuma (vidi sliku 11 i iznose manje od 1% vrijednosti). CCE je u oba slučaja porastao s  $\approx 0.4$  na  $\approx 0.6$  u razmaku od približno 70000 sekundi. Brzina oporavka CCE-a opada s vremenom.

S obzirom da je početno ozračivanje dva područja diode obavljeno u različitim vremenskim trenucima, zajedničko skeniranje obje sekcije zapravo daje podatke o CCE-u u različitim vremenskim razmacima za pojedinu sekciju. Za početno mjerenje dodatna je razlika u tome što su gornja i donja polovica mjernog područja skenirane odvojeno, pa se ne može utvrditi ni da je definiran konstantan vremenski odmak prikupljenih podataka (ovo se može bolje vidjeti na logaritamskoj vremenskoj skali). Ipak ovo ne predstavlja značajan problem s obzirom da su posljednje točke na grafu dobivene nakon približno 19h i 30min. Napravljena je prilagodba funkcijom korijena n-tog reda oblika  $A + B \cdot x^{1/C}$ , koja je za parametar C dala

$C = 5 \pm 1$  u oba slučaja. Vremenski trend oporavka učinkovitosti skupljanja naboja je najjači na početku, nakon čega stagnira u rastu. U navedenom vremenskom rasponu CCE se oporavio s  $\approx 0.4$  na  $\approx 0.6$ . Ovaj oporavak je značajan i pokazuje da u vremenskoj skali od jednog dana, na sobnim temperaturama postoje znatne migracije defekata, koji posljedično difundiraju iz oštećenog dijela i/ili se rekombiniraju u odgovarajućim reakcijama u kristalnoj rešetci. Kako nismo pravili detaljnije proučavanje koje su vrste defekata dominantno nastajale prilikom upada 3.25 MeV-skih C iona na čisti Si, što se uz određene aproksimacije može napraviti, dobiveni rezultat oporavka CCE-a se ne može konkretnom kvantifikacijom usporediti s teorijskim očekivanjem. Poznato je da međunarodna organizacija za standarde (*ASTM International*) propisuje da se nakon ozračivanja poluvodičke komponente ostave 24 sata na 80 °C i atmosferskom tlaku radi stabilizacije oštećenja nastalih od defekata, prije bilo kakvog ponovnog testiranja ([12]), možemo konstatirati da su slična mjerenja vjerojatno već uočila procese oporavka poluvodiča na ovim vremenskim nivoima.

Ako želimo izračunati vjerojatnost utjecaja gustoće ionskog toka na procese formiranja defekata, jednostavan račun pokazuje da je za vrijeme zaustavljanja snopa na jednom pikselu prilikom početne iradijacije, na dio površine  $R^2\pi$ , gdje je  $R \approx 5\text{Å}$  [3, str. 171.] maksimalni doseg reakcije u jednadžbi 1 za rekombinaciju vakancije i intersticije, upalo približno  $\approx 70$  iona za snop  $\eta_2$  odnosno 100 puta manje za snop  $\eta_1$  (ovdje se ipak treba prisjetiti da je broj nastalih vakancija i intersticija znatno veći - po napravljenoj simulaciji, slika 6, prosječan broj vakancija nastalih po upadnom ionu po  $\mu\text{m}$  dubine je 1165). To znači da je vjerojatnost tako bliskog proleta dvaju iona, koji bi povećali broj rekombinacija Frenkelovih parova pri kaskadnoj termalizaciji (prisjetiti se teorije u odjeljku 2.4), unutar vremenskog intervala 10 ps, manja od  $10^{-6}$ . Time zasigurno možemo utvrditi da promijenama gustoće iona postignutim u ovim mjerenjima nismo mogli zamjetno utjecati na procese kaskadne termalizacije.

Stoga možemo raspraviti utjecaj toka iona na dinamičko napuštanje naboja, koje se kao što znamo odvija u širokom rasponu vremenskih skala (od submikrosekundnih procesa, do procesa na razini dana i duže). Izračunali smo da je vrijeme povratka snopa na područje istog piksela prilikom otklanjanja u cik-cak putanji, za brzinu otklona  $\eta_1$  bilo  $\tau_1 \approx 4$  s, a za brzinu  $\eta_2$  bilo  $\tau_2 \approx 40$  ms. Ovime zapravo provjeravamo jeli postojao utjecaj na procese dinamičkog napuštanja naboja na vremenskim skalama koje su 2 reda veličine različite - sekunde i stotinke sekundi. Rezultati oporavka CCE-a pokazuju da u oba slučaja trend oporavka imao identično ponašanje, koje je krenulo s vrijednosti CCE = 40% nakon par stotina sekundi, imalo najstrmiji porast unutar idućih pola sata, nakon čega je

krenula saturacija prema vrijednosti  $CCE = 60\%$  (nakon 19.5 sati). Time možemo zaključiti da naša metoda modifikiranja toka snopa u lokaliziranom području od nekoliko  $\mu\text{m}^2$  (površina jednog piksela), promjenom brzine otklona snopa iona, nije utjecala ni na procese dinamičkog odlaženja naboja - barem ne u mjeri koja bi bila uočljiva ovim eksperimentalnim postavom, gdje smo imali greške u određivanju CCE-a  $\leq 1\%$ . Kako je već napomenuto, neki znanstveni radovi su pokazali da je vremenska konstanta na kojoj završava dominantni proces napuštanja naboja nakon kaskadne termalizacije manja od 10 ms ([7] i [8]), pa u tom smislu bi se moglo reći da promjenama vremena zadržavanja ionskog snopa na mikrometarskom području, i vremena povratka snopa na isto područje (od 40 ms na 4 s), nismo ni trebali utjecati na nestanak defekata i oporavak učinkovitosti sakupljanja naboja.

## 5 - Zaključak

Korištenjem ionskog snopa mikrometarskog profila u eksperimentalnom postavu s nuklearnom mikroprobom moguće je kontrolirati lokaciju stvaranja oštećenja na uzorku koji se nalazi u fokusu ionskih putanji. Proučavanje defekata nastalih u siliciju pri interakciji s ionima ugljika napravljeno je iskorištavajući metodu IBIC mikroskopije, gdje je PIN poluvodička dioda i detektor čestica i ispitivani materijal, te je moguće precizno odrediti lokacije prolaska zračenja i nastanka defekata.

Dva manja područja diode su ozračena dozom od  $\approx 2 \cdot 10^6$  iona, ali s modifikiranim parametrom brzine kretanja snopa po površini u dva slučaja (100  $\mu\text{s}/\text{piksel}$  i 10000  $\mu\text{s}/\text{piksel}$ ), što je simuliralo lokalnu (nekoliko mikrometara) promjenu toka iona.

Uočeno je da su čak i na vremenskim skalama jednog dana procesi dinamičkog napuštanja naboja aktivni (a ne samo u milisekundnim ili kraćim razinama), posljedično čega je izmjeren znatan oporavak CCE-a ozračenih sekcija. Nisu zapažene promjene u ponašanju oporavka CCE-a za dva ispitivana slučaja ozračivanja. Za moguće uočavanje utjecaja na formiranje defekata trebalo bi postići veću gustoću toka iona (veću frekvenciju snopa) i promijeniti postavke eksperimentalnog postava koje bi omogućili bolje kontroliranje vremena i načina zadržavanja snopa na mikrometarskim dijelovima diode, kako bi se povećala vjerojatnost rekombinacije i napuštanja defekata.

Detalnija i opsežnija ispitivanja su potrebna za objašnjenje pozadinskih procesa u kristalnoj strukturi poluvodiča odgovornih za smanjenje broja defekata nakon iradijacije u vremenskim skalama proučavanim u ovom radu.

## Zahvale

Posebno se zahvaljujem mentoru dr. sc. Milki Jakšiću na uloženom vremenu i znanju. Zahvaljujem se i Ivanu Sudiću i Natku Skukanu na dodatnim pojašnjenjima teorijske pozadine.

---

## Literatura

- [1] M. Turala, *Silicon tracking detectors — historical overview.*; Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 541 (2005)
- [2] M. Tang, L. Colombo, J. Zhu, T. D. De La Rubia, *Intrinsic point defects in crystalline silicon: Tight-binding molecular dynamics studies of self-diffusion, interstitial-vacancy recombination, and formation volumes.*; Physical Review B, 55(21) (1997)
- [3] S. Libertino, A. La Magna, *Damage Formation and Evolution in Ion-Implanted Crystalline Si*; Materials Science with Ion Beams, Topics in Applied Physics, vol 116 (2009)
- [4] G. D. Watkins, *Defects in irradiated silicon: EPR and electron-nuclear double resonance of interstitial boron*; Phys. Rev. B 12, 5824 (1975)
- [5] M. Moll, *Radiation damage in silicon particle detectors — microscopic defects and macroscopic properties.*; Ph.D. Thesis, University of Hamburg (1992)
- [6] Ž. Butković, J. D. Pukšec, A. Barić, *Elektronika 1*; skripta, Fakultet elektrotehnike i računarstva (2006)
- [7] M.T. Myers, S. Charnvanichborikarn, L. Shao, S.O. Kucheyev, *Pulsed Ion Beam Measurement of the Time Constant of Dynamic Annealing in Si*; Phys. Rev. Lett., 109 (2012)

- [8] J. B. Wallace, L. B. Bayu Aji, L. Shao, S. O. Kucheyev, *Time constant of defect relaxation in ion-irradiated 3C-SiC*; Appl. Phys. Lett. 106, 202102 (2015)
- [9] M.B.H. Breese, E. Vittone, G. Vizkelethy, P.J. Sellin, *A review of ion beam induced charge microscopy*; Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 264 (2007)
- [10] TRIM (TRansport of Ions In Matter) - programski paket u sklopu SRIM-a: <http://www.srim.org/>
- [11] M. Jakšić et al., *Comparison of proton microbeam and gamma irradiation for the radiation hardness testing of silicon PIN diodes*; Journal of Instrumentation, Vol. 8 (2013)
- [12] ASTM, *E1854-07 Standard Practice for Ensuring Test Consistency in Neutron-Induced Displacement Damage of Electronic Parts*; ASTM Standards, ASTM International, 2007