

Ispitivanje svojstava LGAD detektora pomoću snopova protona s energijama od 0.5 MeV-a do 2 MeV-a

Karla Ivanković*

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Bijenička 32, Zagreb

(Dated: siječanj 2022.)

LGAD (Low Gain Avalanche Detector) su silicijski detektori koji su bazirani na PIN diodi. U ovom radu ispituju se svojstva LGAD detektora tj. konkretno uzorka Multipad LGAD detektora HPK-P2 W36 SE3-IP7 sa nominalnom širinom interpada od $70 \mu m$, a pomoću snopova protona od $0.75 MeV$, $1.15 MeV$ i $1.5 MeV$ u "Laboratoriju za interakcije ionskih snopova". Naglasak je stavljen na svojstvo promjene širine interpada sa promjenom napona.

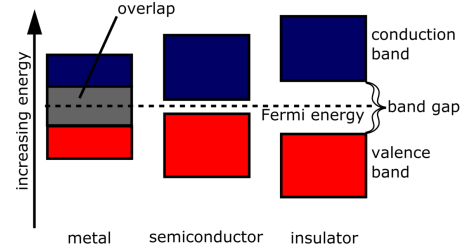
I. UVOD

Poluvodički detektori bazirani su na poluvočkim materijalima, najčešće siliciju i germaniju te je njihov stvarni razvoj započeo 50.tih godina prošlog stoljeća, a korištenje u komercijalne svrhe desetak godina kasnije. Na početku uporabe, poluvodički detektori koristili su se u nuklearnoj fizici kod γ -spektroskopije i za detekciju nabijenih čestica, međutim u kasnijim godinama počinje njihova primjena i u fizici visokih energija. LGAD (Low Gain Avalanche Detector) detektori su silicijski detektori koji ubrzano dobivaju na važnosti upravo zbog uporabe u fizici visokih energija. Cilj ovog seminara je ispitivanje svojstava tih detektora, te primjena različitih programa korištenih u nuklearnoj fizici za projekcije i predviđanje njihovih odgovora kada su izloženi snopovima protona.

II. TEORIJSKI PREGLED

II.1. Poluvodički detektori i njihova svojstva

Poluvodiči su materijali čija je struktura energijske vrpce bitno različita od one vodiča i izolatora. Kod izolatora je vidljiv široki energetske procjep koji spriječava prijelaz elektrona iz valentne u vodljivu vrpcu, dok kod vodiča tog procjeka nema već su valentna i vodljiva vrpca "preklopljene" što omogućava prijelaze elektrona. Kao kod izolatora i kod poluvodiča postoji energetske procjep međutim on je puno manji i pod pravim uvjetima toplinska energija može pobuditi elektrone da prijeđu u vodljivu vrpcu. Usporedba struktura energijskih vrpca vodiča, poluvodiča i izolatora vidljiva je na Slici (1). Jedno od veoma bitnih i korisnih svojstava poluvodičkih detektora je to da je potrebna jako mala energija za stvaranje jednog para elektron-šupljina. Ta se energija naziva w -vrijednost i za silicij iznosi $3.62 eV$ na temperaturi $300 K$. Nadalje, bitno svojstvo ovih detektora je i to da je njihov odgovor linearan sa energijom, uz pretpostavku da je područje osiromašenja dovoljno veliko da zaustavi sve čestice. Napon na elektrodama detektora V je, ako



Slika 1: Prikaz energijske vrpce vodiča, izolatora i poluvodiča. Preuzeto iz [6].

je naboj na elektrodama $\frac{nE}{w}$ i C kapacitet područja osiromašenja:

$$V = \frac{nE}{wC} \quad (1)$$

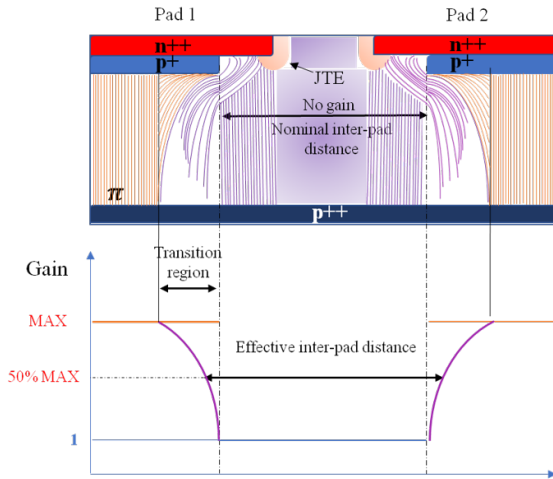
Važna veličina za energijsku rezoluciju je srednji broj nosilaca naboja, ali uz njega još je bitna i varijanca broja nosilaca naboja. Ona ponekad može znatno odstupati od očekivane Poissonove raspodjele pa je važno definirati Fano-faktor kao omjer uočene varijance i varijance Poissonovog modela. Nadalje, za poluvodičke detektore važno je još definirati i područje osiromašenja. Poznato je da u n-dopiranom području postoji višak elektrona, dok u p-dopiranom području postoji višak šupljina, te je moguće od ovakva dva područja napraviti spoj. Kod takvog spoja dolazi do diskontinuiteta u gustoći elektrona i kao posljedica toga dolazi do difuzije iz područja veće gustoće u područje manje gustoće. Nakon nekog vremena, difuzijom dolazi do nagomilavanja negativnog naboja na p dijelu spoja i pozitivnog naboja na n dijelu spoja. Taj nagomilani naboj na rubovima spoja stvara električno polje koje spriječava daljnu difuziju i dovodi do stabilne raspodjele naboja, a područje u kojem je uspostavljena neravnoteža naziva se upravo područje osiromašenja. Ono djeluje kao detektor zračenja. Prilikom mjerenja na detektorima kada su na nekom potencijalu, dolazi do toka slabe, fluktuirajuće struje kroz spojeve poluvodiča, te se takva struja zove struja curenja i djeluje kao šum. Najveći uzrok struje curenja su površinski kanali. Razlog nastanka takve struje može biti i kretanje manjinskih nosilaca naboja, šupljina iz n-područja

* kivankov.phy@pmf.hr

u p-područje ili elektrona iz p-područja u n-područje. Također, mogu je uzrokovati i parovi elektron-šupljina koji nastaju rekombinacijom i ulaze u područje osiromašnja. Osjetljivost poluvodičkih detektora je skoro 100%, daju odličnu energijsku rezoluciju, te ono što je umanjuje može biti šum elektronike koja se koristi ili upravo struja curenja.

II.2. Koncept LGAD detektora

LGAD detektori su poluvodički detektori koji rade na principu stvaranja parova elektron-šupljina. Imaju dodatni jače dopirani p+/n++ sloj (Slika (2)) u kojemu dolazi i do multiplikacije naboja. PIN dioda je temelj LGAD detektora te proizvodi signal proporcionalan ulaznom zračenju tj. energiji koju ulazno zračenje deponira. "Avalanche" ili lavina u imenu ovih detektora sugerira da se u njima događa nešto slično ponašanju Avalanche Photo-Diode (APD) i to jeste tako. Naime, kod Avalanche Photo-Diode (APD) dolazi do multiplikacije kada primarno ionizirani elektroni dobiju dovoljno energije pod utjecajem elektičnog polja da mogu ionizirati daljnje molekule. Potom sekundarni elektroni uzrokuju tercijarnu ionizaciju i tako dalje. Analogon ovome procesu događa se i kod LGAD detektora, međutim povećanje izlaznog signala je dosta manje kod LGAD-a, reda veličine 20 u odnosu na APD kod koje je reda veličine 100-1000. Na Slici (2) je vidljivo da osim područja u kojim postoji multiplikacija koja je slična lavini postoji i područje u kojem nema multiplikacije-interpad.

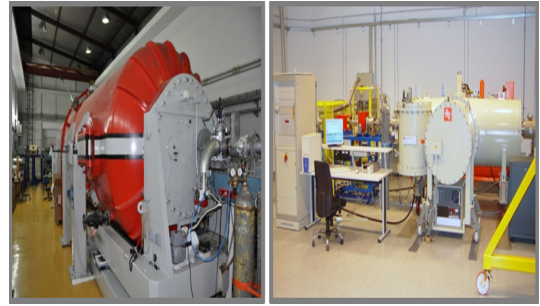


Slika 2: Struktura LGAD detektora.

III. EKSPERIMENTALNE TEHNIKE I POSTAV

Eksperiment je izveden u "Laboratoriju za interakcije ionskih snopova" Instituta Ruđer Bošković. Laboratorij

posjeduje dva akceleratora prikazana na Slici (3), 6.0 MV EN Tandem Van de Graaff akcelerator, te 1.0 MV Tandetron akcelerator, koji ubrzavaju ione do velikih brzina sa velikim energijama. Po izlasku iz akceleratora, snažna magnetska polja usmjeravaju ione i fokusiraju ih u jedan snop. Ionska mikroproba (mikrosonda) je uređaj koji koristi sustav kvadrupolnih leća (dublet ili triplet) za fokusiranje ionskog snopa sa velikom preciznošću i skrenira površinu uzorka tipično do veličine $1 \times 1 \text{ mm}^2$. Shematski prikaz eksperimentalnog postava, uključujući poziciju sustava kvadrupolnih leća vidljiv je na Slici (5). Korišteni su snopovi protona energija 750 keV , 1150 keV i 1500 keV . Mjerenja su snimana pomoću programa Spector 2.



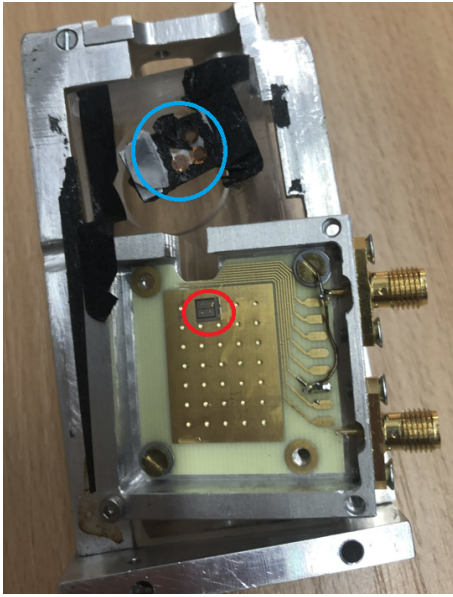
Slika 3: 6.0 MV EN Tandem Van de Graaff akcelerator lijevo i 1.0 MV Tandetron akcelerator desno. Preuzeto iz [5].

III.1. Multipad LGAD detektor HPK-P2 W36 SE3-IP7

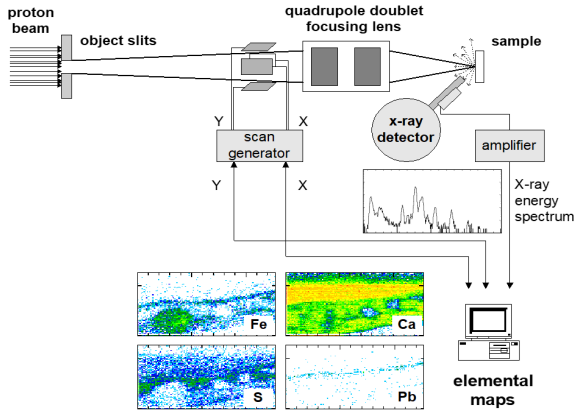
Detektor koji je korišten prikazan je na Slici (4). Na kućištu je vidljiva silicijska pločica (označena crveno) koja je zaljepljena srebrenom pastom, a električni kontakt je ostvaren spajanjem zlatnom žicom četiri područja na vanjske kontakte. Nominalna širina interpada ovog uzorka je $70 \mu\text{m}$. Plavom oznakom označena je mikroskopska mrežica koja je korištena za dobivanje stvarne dimenzije izmjerenih podataka što će kasnije biti detaljnije objašnjeno.

III.2. STIM metoda ("Scanning transmission ion microscopy")

Skenirajuća transmisijiska ionska mikroskopija (STIM) je tehnika kojom se detektiraju transmitirani ioni, najčešće protoni ili alfa čestice. Načina na koji čestice gube energiju u uzorku daje informaciju o gustoći i strukturi uzorka, te se koristi za mapiranje strukture tankog uzorka (do $30 \mu\text{m}$).



Slika 4: Multipad LGAD detektor HPK-P2 W36 SE3-IP7.

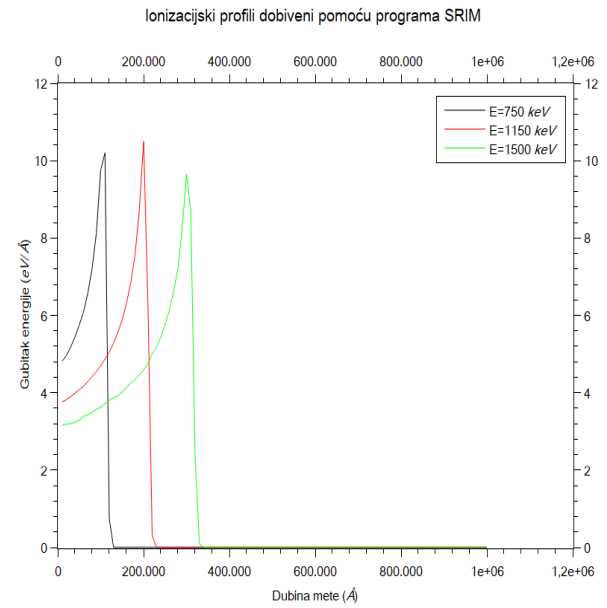


Slika 5: Shematski prikaz eksperimentalnog postava.

III.3. SRIM simulacijski program

Program SRIM omogućuje između ostalog izradu simulacija ionizacijskih profila i dubina prodiranja za izabrane energije snopa, vrste snopa i meta. Energije snopa protona korištenih u eksperimentu su 750 keV , 1150 keV i 1500 keV , a meta je silicij. Sukladno tome, na Slici (6) prikazani su ionizacijski profili navedene tri energije protonskog snopa za metu silicija dobiveni SRIM simulacijom. Također, korištenjem SRIM programa dobivene su i očekivane dubine prodiranja protonskog snopa energija od 700 keV do 1500 keV u siliciju prikazane u Tablici (1).

Računanje dubina prodiranja za različite energije protonskog snopa u siliciju prije mjerenja je važno. Očekivanje



Slika 6: Ionizacijski profili za energije protonskog snopa od 750 keV , 1150 keV i 1500 keV i metu silicija dobiveni simulacijom pomoću programa SRIM.

Energija ionskog snopa (keV)	Dubina prodiranja (μm)
700	9.67
800	11.74
1100	18.84
1200	21.48
1500	30.29

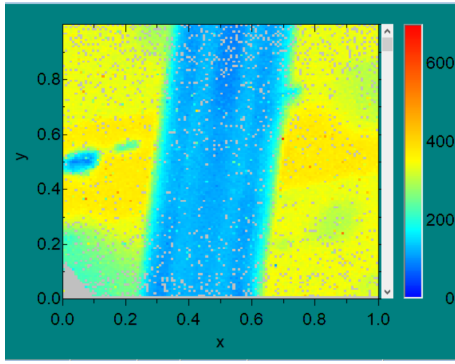
Tablica I: Tablica očekivane dubine prodiranja snopova protona energija od 700 keV do 1500 keV u siliciju dobivena pomoću programa SRIM.

je da će veće energije protonskog snopa prodirati dublje u metu i samim time snopovi veće energije će u području multiplikacije izazvati veći odgovor u detektoru.

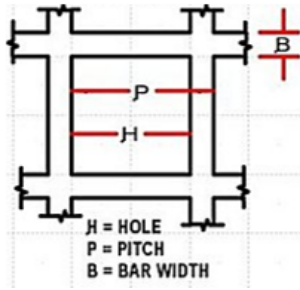
IV. REZULTATI I DISKUSIJA

Prvi korak u obradi podataka je definiranje stvarne veličine piksela. Svi rezultati koji su dobiveni programskim paketom Spector 2, a metodom STIM definirani su u pikselima, te se primjer rezultata mjerenja može vidjeti na Slici (7). Veličina takve mape je 128×128 piksela. Za preračunavanje veličine piksela u stvarnu veličinu u μm koristi se mikroskopska mrežica koja se skenira prije samog mjerenja. U ovom slučaju korištena je mikroskopska mrežica sa 600 zareza po inču, sa veličinom "rupe" od $37\text{ }\mu\text{m}$ ("H" na Slici (2)) i veličinom "linije" od $5\text{ }\mu\text{m}$ ("B" na Slici (8)).

Korištenjem Spector 2 programa, snimljena je dakle mrežica za različite veličine skeniranja ("scan size") i za sve tri energije. Za energiju 750 keV korištene veličine

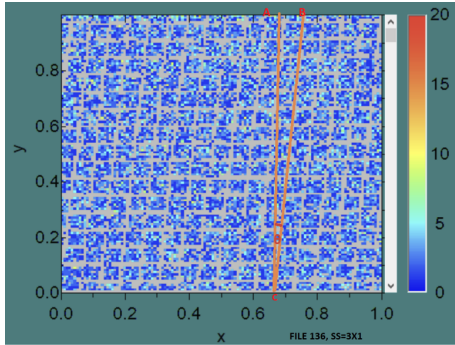


Slika 7: Primjer snimljene mape u programu Spector 2, konkretno snimljeni interpad za energiju 0.75 MeV i napon 70 V .



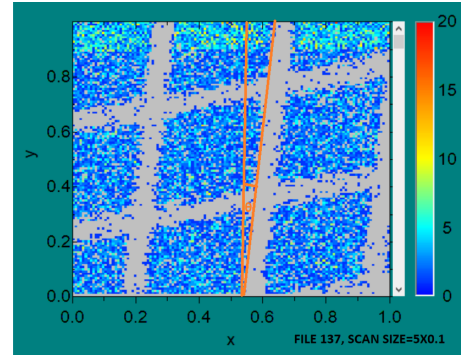
Slika 8: Prikaz jedne ćelije mikroskopske mrežice.

skeniranja su 3×1 i 5×0.1 , što je prikazano na Slici (9) i Slici (10). Ranije je navedena veličina mape kao 128 pik-



Slika 9: Snimljena mikroskopska mrežica na energiji 750 keV uz veličinu skeniranja 3×1 .

sela, te koristeći tu informaciju, lako je procijeniti udaljenost točaka A i B na Slici (9) kao 13 piksela, dok je udaljenost točaka B i C definirana kao 16 x širina "rupe" zbrojena sa 16 x širinom "linije" što uz ranije navedene parametre mrežice daje $672 \mu\text{m}$. Korištenjem jednostavnih trigonometrijskih alata dolazi se do kuta sa Slike (9)



Slika 10: Snimljena mikroskopska mrežica na energiji 750 keV uz veličinu skeniranja 5×0.1 .

i stvarne veličine mape:

$$\tan(\theta) = \frac{13}{128} \quad (2)$$

$$AC = 672 \mu\text{m} \cdot \cos(\theta) = 668.56 \mu\text{m} \quad (3)$$

Oдавde slijedi stvarna veličina piksela za veličinu skeniranja 3×1 :

$$\Delta p_{ss=3 \times 1} = \frac{668.56 \mu\text{m}}{128 px} = 5.22 \mu\text{m}/px \quad (4)$$

Nadalje, dobivena veličina se dijeljenjem sa 3 pretvara u stvarnu veličinu piksela za veličinu skeniranja 1×1 , te se ovakav postupak ponavlja i za druge veličine skeniranja na ovoj energiji. Krajnji rezultat se dobiva kao aritmetička sredina svih rezultata za veličinu skeniranja 1×1 . Koristeći ovu metodu, dobivene su stvarne veličine piksela za sve energije koje omogućuju usporedbu rezultata i one su redom:

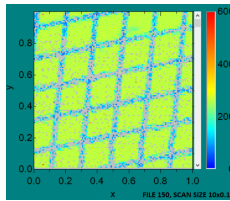
$$\Delta p_{750 \text{ keV}} = 1.70 \mu\text{m}/px \quad (5)$$

$$\Delta p_{1.15 \text{ MeV}} = 1.54 \mu\text{m}/px \quad (6)$$

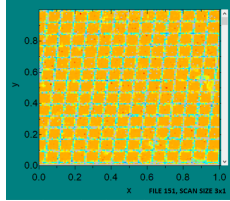
$$\Delta p_{1.5 \text{ MeV}} = 1.27 \mu\text{m}/px \quad (7)$$

Snimljene mikroskopske mrežice STIM metodom za energiju 1.15 MeV sa veličinama skeniranja 10×0.1 i 3×1 u Spectoru 2 prikazane su na Slici 11.a i 11.b, a za energiju 1.5 MeV sa veličinama skeniranja 5×1 i 4×1 na Slici 12.a i 12.b.

Sljedeći korak u obradi podataka je definiranje histograma u programu Spector 2 u području interpada, na način prikazan na Slici (13). Nadalje, histogram je obrađen pomoću programskog paketa Qtiplot, u kojem je određena širina na polovici ekstrema koja je definirana upravo kao širina interpada, označena na Slici (14) kao udaljenost točaka A i B. Ovakav postupak ponovljen

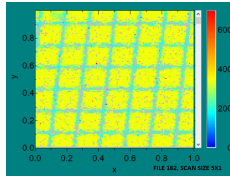


(a) Snimljena mikroskopska mrežica na energiji 1150 keV uz veličinu skeniranja 10x0.1.

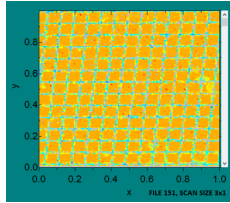


(b) Snimljena mikroskopska mrežica na energiji 1150 keV uz veličinu skeniranja 3x1.

Slika 11: Snimljena mikroskopska mrežica STIM metodom za energiju 1150 keV.

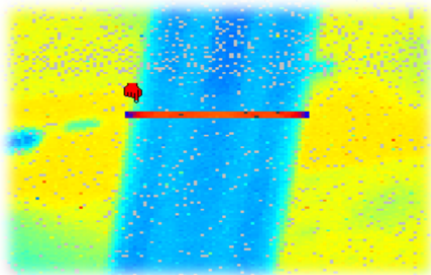


(a) Snimljena mikroskopska mrežica na energiji 1500 keV uz veličinu skeniranja 5x1.



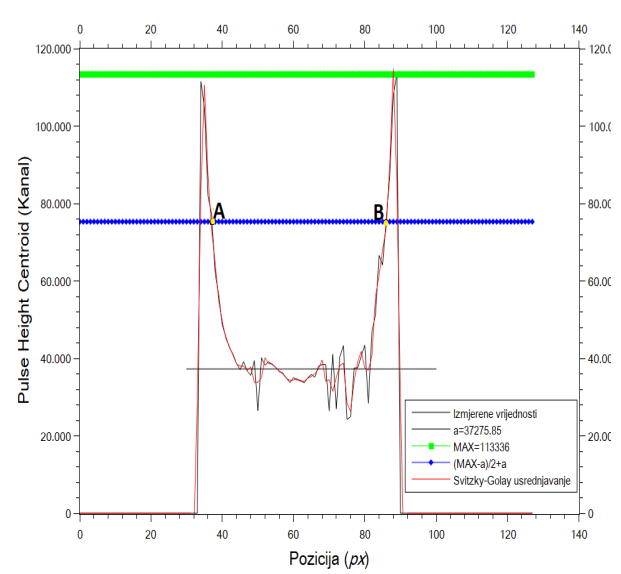
(b) Snimljena mikroskopska mrežica na energiji 1500 keV uz veličinu skeniranja 4x1.

Slika 12: Snimljena mikroskopska mrežica STIM metodom za energiju 1500 keV.



Slika 13: Definiranje područja iz kojeg se uzima histogram.

Širina interpada na energiji 750 keV i naponu 70 V



Slika 14: Definirana širina interpada kao udaljenost točaka A i B na histogramu.

Energija (keV)	Napon (V)	Širina interpada (μm)
750	60	90.97
	70	84.96
	80	82.77
	100	78.03
	120	74.43
	140	76.74
	160	78.19

Tablica II: Tablica rezultata širine interpada za različite napone na energiji 750 keV.

je za obradu svih mjerenja za energiju 750 keV na naponima od 60 V do 160 V, te su rezultati prikazani u Tablici (2).

Greška kod mjerenja za širine interpada na energiji 750 keV je $\pm 3.40 \mu m$. Nadalje, rezultati za preostale dvije energije dobiveni su na potpuno jednak način i prikazani su u Tablici (3) za energiju 1.15 MeV i u Tablici (4) za energiju 1.5 MeV.

Energija (MeV)	Napon (V)	Širina interpada (μm)
1.15	60	114.03
	80	97.37
	100	92.98
	120	89.48
	140	87.74
	160	87.09
	180	86.80

Tablica III: Tablica rezultata širine interpada za različite napone na energiji 1.15 MeV.

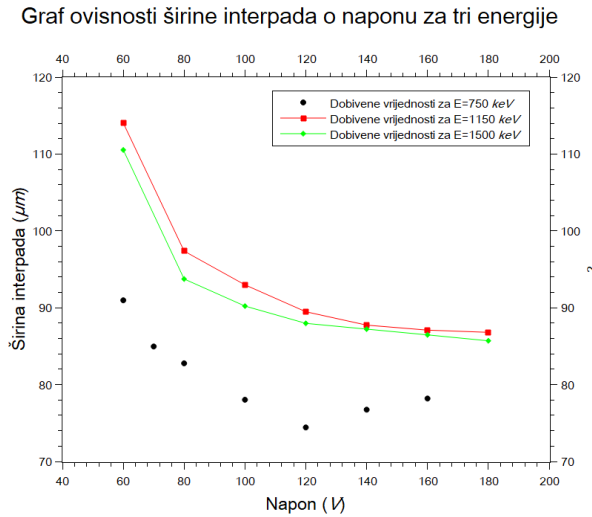
Greška kod obrađenih podataka za širinu interpada na energiji 1.15 MeV je $\pm 3.08 \mu m$.

Energija (MeV)	Napon (V)	Širina interpada (μm)
1.50	60	110,53
	80	93,74
	100	90,22
	120	87,97
	140	87,22
	160	86,47
	180	85,70

Tablica IV: Tablica rezultata širine interpada za različite napone na energiji 1.50 MeV.

Greška kod obrađenih podataka za širinu interpada na energiji 1.50 MeV je $\pm 2.54 \mu m$.

Iz obrađenih podataka u tablicama, vidljivo je da se širina interpada mijenja, tj. točnije smanjuje sa povećanjem napona što je zorno vidljivo na Slici (15) koja prikazuje usporedbu promjena širine interpada s naponom za sve tri energije. Slika (15) prikazuje kako se sa povećanjem na-



Slika 15: Graf ovisnosti širine interpada o naponu za energije 750 keV, 1.15 MeV i 1.5 MeV

pona širina interpada LGAD detektora smanjuje, ali kod najniže energije, one od 750 keV dolazi do neočekivanog porasta širine interpada sa naponom u području od 120 V do 160 V. Porast u ovom području može biti uzrokovao smetnjama i šumovima koji se javljaju zbog visokog napona te niske energije snopa.

V. ZAKLJUČAK

Koristeći metodu STIM mikroskopije moguće je odrediti kako se ponaša širina interpada LGAD detek-

tora promjenom napona na različitim energijama. Primjećeno je da je za sve tri korištene energije protonskog snopa ponašanje jednako, širina interpada se smanjuje s povećanjem napona, što je i očekivano. Takvo ponašanje interpada lako je objasniti na jednostavnom primjeru pločastog kondenzatora sa paralelnim pločama i homogenim električnim poljem. Poznato je da, iako je između ploča ovakvog kondenzatora električno polje homogeno, na rubovima dolazi do nehomogenosti i "zakrivljenja" silnica električnog polja. Upravo je takvo ponašanje jednostavna analogija onome što se događa kod interpada LGAD detektora. Fenomen koji je potrebno pobliže analizirati je porast širine interpada sa naponom na energiji 750 keV za napone 120 V, 140 V i 160 V. Uzrok tome mogu biti šumovi uzrokovani visokim naponom ali i činjenica da dolazi i do smetnji zbog niske energije protonskog snopa. Zanimljiva je činjenica da se krivulja za energiju 1.5 MeV na Slici (15) nalazi ispod krivulje za energiju 1.15 MeV, a iznad one za 750 keV, što navodi na zaključak da je potrebno u budućnosti napraviti još mjerenja za energije iznad 1.5 MeV kako bi se utvrdilo radi li se o stvarnoj anomaliji ili o grešci u mjerenju. LGAD detektori imaju umjerenu multiplikaciju i pojačanje u izlaznom signalu u odnosu na ulazni od oko 20, te mal šum u odnosu na signal. Sve ovo čini ih iznimno korisnim alatom sa velikim potencijalom za korištenje u fizici visokih energija.

VI. ZAHVALE

Posebno bih se željela zahvaliti svom mentoru dr. sc. Milki Jakšiću na uloženom vremenu i pruženoj prilici, kao i dr. sc. Mauriciu R. Ramosu na pojašnjavanju teorijskih koncepata, te Andreu Crnjcu na velikoj pomoći pri korištenju eksperimentalnog postava i objašnjavanju načina rada istog.

VII. LITERATURA

- [1] Ettore Vittone, "Semiconductor Characterization by Scanning Ion Beam Induced Charge (IBIC) Microscopy", International Scholarly Research Notices, vol. 2013
- [2] N. Moffat et al 2018, "Low Gain Avalanche Detectors (LGAD) for particle physics and synchrotron applications", JINST 13 C03014
- [3] William R. Leo, "Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-to Approach", Springer-Verlag, 1987.
- [4] <http://www.srim.org/>
- [5] Internetska stranica Instituta Ruđer Bošković, Laboratorij za interakcije ionskih snopova, <https://www.irb.hr/Zavodi/Zavod-za-eksperimentalnu-fiziku/Laboratorij-za-interakcije-ionskih-snopova>
- [6] <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Bandgap>