

UNIVERZITET CRNE GORE

PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

Vijeću Prirodno-matematičkog fakulteta

PREDMET: Ocjena master rada

Na osnovu Odluke br. 1451 od 23.06.2022 u skladu sa članom 24 Pravila studiranja na postdiplomskim studijama Univerziteta Crne Gore, odnosimo Vijeću Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta Crne Gore,

Izvještaj

O ocjeni

Master rada od nazivom „**Karakterizacija detektora sa lavinskim efektom niskog pojačanja brzim jonskim snopovima**“ kandidata Miloša Manojlovića, diplomiranog fizičara.

Tema magistarskog rada je iz oblasti eksperimentalne fizike elemenarnih čestica. „Timing“ detektori za eksperimente na sudarajućim snopovima, kao što su ATLAS i CMS postali su neophodnost posebno kada potreba za analizom rijetkih fenomena iziskuje potrebu povećane statistike događaja a samim tim i povećanu luminoznost, što posledično stvara visoku radijaciju kao i povećano nagomilavanje događaja koji nijesu od interesa, tzv „pile-up“. Time se pojavila i izraženija potreba za vremenskim sensorima koji će omogućiti i fundamentalno novi koncept pretraživanja tragova zasnovanom na 4D (x,y,x,t) modelu kao i implementaciju modela 5D (x,y,x,t, E) kalorimetra na budućim sudaračima izvan LHC, kao što je buduća cirkularni sudarač FCC („Future Circular Collider“). Uz prethodno navedeno, buduća generacija state-of-the-art senzora mora posjedovati i visoku toleranciju na povećan nivo radijacije. U kontekstu prethodno navedenog, novi koncept vremenskog, silicijumovog detektora, sa tehnologijom unutrašnje multiplikacije ali niskog pojačanja, Low Gain Avalanche Detector (LGAD) tehnologija je razvijena, i prihvacena kao osnovna tehnologija za vremenske detektore koji će biti instalirani na ATLAS (HGTD) i CMS (MDT) tokom nadogradnje ova dva eksperimenta za rad u sledećoj fazi LHC-a, HL-LHC. LGAD zbog svoje odlične vremenske i prostorne rezolucije, prilično jednostavne proizvodnje kao i dobre otpornosti na radijaciju ispod $3 \times 10^{15} \text{ n}_{eq}/\text{cm}^2$ je postao zanimljiv i privlačan kandidat za monitoring snopa u centrima za hadronsku terapiju (CNAO) i za potrebe protonse kompjuterske tomografije (pCT), kao i u eksperimentima sa jonima (Electron-Ion Collider, US), pa do mjerenja reakcijskog vremena (T_0) detektora za eksperimente koji koriste protonski and pionski snop sa spektrometra HADES (High Acceptance Di-Electron Spectrometer (HADES)) u GSI, Darmstadt, Germany, i analize i monitoringa strukture snopa na sudaraču S-DALINAC (Superconducting DArmstadt LINear Accelerator) pri Tehničkom Univerzitetu u Darmstadtu (Technische Universität Darmstadt), uključujući i medicinske aplikacije na postrojenju MedAustron u Wiener Neustadt, Austria.

Upravo istraživanje magistarskog rada studenta Milosa Manojlovića je dio aktivnost unutar R&D LGAD-a (RD50) na polju ispitivanja vremenog detektora kako za potrebe fizike elementarnih čestica tako i ka njegovom integrisanju u medicinske aplikacije a sa ciljem unapređivanja precizne dozimetrije u hadronskoj

i jonskoj terapiji. Odziv LGAD-a na nisko-energetske jone sa jonskog akceleratora koji je postavljen na institutu Rudjer Bosković je bio primarni cilj magistarskog rada. Kroz ovaj rad unaprijeđena je i sama eksperimentalna metoda IBIC zasnovana na indukciji naelektrisanja jonima (Ion Beam Induced Charge). Rezultati su prikazani na sastancima RD50 kolaboracije, kao i uključeni u nedavno publikovani naučni rad (SCI-indexed).

Motivacija

Motivacija za ovim istraživanjima je višestruka. Objedinjuje lični interes studenta i interes naučne zajednice, uz to sprovedeno istraživanje predstavlja dio naučnog programa R&D kolaboracije RD50 sa sjedištem u CERN-u čiji je Miloš član. Miloš Manojlović je pokazao želju da se ukluči u SEEIIST projekat (The South East European International Institute for Sustainable Technologies) – što bi predstavljalo Međunarodni institut za održive tehnologije na prostoru Jugoistočne Evrope (SEEIIST) a sa ciljem istraživanja i aplikacije hadronske terapije. Rad na SEEIIST-u podrazumijeva razvoj tehnologija i instrumentacije kao i iskustvo sa akceleratorima, i jonskim i protonskim snopovima. Sa druge strane za mlade istraživače je izazov da se uključe u dizajn i razvoj novih koncepata detektora i tehnologija za detekciju čestica u sudaračima kao što je LHC. Otkrice novih fenomena i čestica uslovljeno je prevashodno razvojem novih senzorskih tehnologija, kao i razvojem nove naučne instrumentacije za karakterizaciju i testiranje senzora koji se razvijaju. Transfer tehnologije sa jednog na drugo naučno polje je od ključne važnosti takodje. Novi koncept vremenskih detektora koji će se po prvi put upotrijebiti u eksperimentima na sudaračima su među trenutno najaktuelnijim tehnološkim izazovima za mlade istraživače. Sa druge strane, koncept vremenskih senzora je od ključne važnosti i za personalizovanu hadronsku terapiju, mikrodozimetriju i monitoring hadronskih i/ili jonskih snopova. Samim tim, uključivanje u razvoj LGAD-a čini se tako izuzetnom šansom za mlade istraživače u Crnoj Gori, da integrišu svoja istraživanja u široki spektar interdisciplinarnih projekata sa novim mogućnostima i potencijalom koji ovaj senzor nudi.

Korišćena eksperimentalna metoda:

Razvoj detektora poluprovodnika sa povećanom tolerancijom na visok nivo radijacije često rezultira uređajima koji značajno odstupaju od onih klasičnih, dizajniranih sa planarnim elektrodama. Smanjivanje drift distance ili implementiranje lokalizovanog visoko dopiranog sloja unutar poluprovodnika koji omogućava umnožavanje generisanog naelektrisanja pod kontrolisanim uslovima (sa umjerenim faktorom pojačanja) su dva načina kojima se nastoji povećati tolerancija senzora na radijaciju, i istovremeno omogućiti izvrsna vremenska (20-50 ps) i prostorna rezolucija (za sada ona iznosi 300 μm). Uz to, potreba za poboljšanim faktorom ispunjenosti većih površina sa pixel-senzorima čime se ostvaruje bolja granularnost detektora a time i bolja preciznost mjerenja zahtijevaju i unapređivanje postojećih naučnih metoda testiranja granularnosti segmentiranih detektora kao i unapređivanje same naučne instrumentacije na nivou 3D mikroskopske karakterizacije. Metoda jonske indukcije naelektrisanja, IBIC je jedna od dostupnih mikroskopskih tehnika karakterizacije koja koristi fokusirane MeV energetske jone za ispitivanje transporta naelektrisanja kroz detektor. Jonski snop se dobija sa akceleratora, a fokusiranje se vrši pomoću magneta i ulaznih otvora. Iako kompleksna tehnika, koja se od 90. godina prošloga vijeka usavršavala, njena fizička suština počiva na fundamentalnim principima interakcije čestica sa materijom. Naime, jonizujuće zračenje pri prolasku kroz osjetljivu zapreminu detektora, interaguje sa atomima te sredine, uglavnom Kulonovom silom, kreirajući na taj način slobodne elektrone. Njihovim odmetanjem sa atomskih orbitala, kreiraju se i šupljine, tako da je efekat prolaska jonizujućeg zračenja kroz poluprovodnički detektor zapravo stvaranje parova elektron-šupljina. Ukoliko se spolja dovede električno polje, ovi parovi će se kretati ka elektrodama, na kojima će se, u konačnom, i sakupiti. Dobijeni signal se dalje pojačava elektronikom koja ima nizak šum, i dalje predaje sistemu za akviziciju podataka. IBIC eksperimenti imaju dvije moguće geometrije ozračivanja: frontalni IBIC, kada se snop jona fokusira s prednje strane detektora i bočni IBIC, kada se snop fokusira sa strane. Uobičajeno se radi frontalno ozračivanje. Za dobijanje mjerenja u ovom radu korišćena je frontalna geometrija (ozračivanje LGAD sa gornje strane gdje se nalazi n^{++} elektroda). Za ozračivanje i uvođenje radijacionih oštećenja koristili su se joni ugljenika

energije 6 MeV čiji je domet oko 6 μm i protoni energije 0.8, 1.5 i 2 megaelektronvolta čiji su dometi 12, 31 i 49 mikrometara respektivno. Softverom je bilo omogućeno kontrolisati područje detektora koje se želi ozračiti. Rezultati ozračivanja IBIC metodom očitavali su se u obliku kolorizovane prostorne mape i njoj pridruženog energetskog spektra. Mapa je skalirana tako da se pravi jasna demarkacija između regiona sa različitim električnim poljem, odnosno različitom efikasnošću kolekcije naelektrisanja.

Ostvareni ciljevi

1) Mjerenje udaljenosti između segmenata u multipixel LGAD-u:

Integracija LGAD-a u segmentirani multipixel omogućava bolju poziciju (x,y) osjetljivost. U trenutnoj fazi razvoja, tipična udaljenost između pixela (segmenata) za standardni LGAD (za potrebe CMS-a i ATLAS-a) je između 30 i 100 μm . Veličine pixela su reda mm^2 kako bi se zadovoljio visok faktor popunjavanja sa pixelima kao i prilagodili segmenti veoma složenoj elektronici za precizno mjerenje vremena. Kada se primjenjuje segmentacija, potreban je složen površinski dizajn pixela kako bi se izbjegli neželjeni regioni sa visokim električnim poljem. Stoga se na periferiji n++ sloja dodaje produžetak završnog spoja (eng. Junction Termination Extension-JTE), koji ima ulogu da kontroliše zakrivljenje pn spoja i smanji el. polje na krajevima. JTE se prostire i do sloja multiplikacije s ciljem da umanji el. polje i spriječi preuranjeni proboj na ivici segmenta. Zbog postojanja JTE između susjednih segmenata, stvara se relativno veliko rastojanje među njima. Duž tog rastojanja nema el. polja dovoljno jakog da izazove multiplikaciju. Proizvođači uzoraka HPK (eng. Hamamatsu Photonics K.K.) koji su testirani u ovom radu daju procjenu nominalnog rastojanja među segmentima detektora; međutim nominalna distance se razlikuje od efektivne. Upravo ovo zakrivljavanje linija elektricnog polja, posledično uslovljava zavisnost interpixel distance od dubine LGAD-a (čime se povećava i razlika između nominalne i efektivne udaljenosti između pixela). U kontekstu prethodno navedenog, u ovom radu po prvi put je studiozno i sistematično odradjeno proučavanje udaljenosti između pixela u zavisnosti od dubine LGADa, a da bi se to omogućilo, korisceni su joni sa različitim energijama (Bragov pik je dublje pozicioniran unutar 50 micronskeg senzora sa povećavanjem energije jona). IBIC metoda se pokazala kao izuzetno korisna metoda za 3D mapiranje transporta naelektrisanja i pracenje promjene udaljenosti između pixela sa promjenom dubine LGADa. Ujedno, prezentovana istraživanja u ovom magistarskom radu su dodatno unaprijedila i korišćenje same experimentalne metode koja se koristila.

- 2) **Mjerenje odziva LGAD-a (promjena pojačanja) na jone (razlicitu masu jona i energiju)** otvorilo je niz novih istraživanja na polju razvoja i dizajna LGAD-a. Kroz ovaj magistarski rad i niz istraživanja koja su bila inicirana preliminarim rezultatima prikazanim u magistarskom radu studenta Milosa Manojlovića se pokazalo da korisceni joni, iako nisko-energetski (MeV) indukuju prilično veliku gustoću naelektrisanja (u veoma malom volumenu senzora), čime se posledično zasjenjuje električno polje unutar sloja multiplikacije, te tako se rezultantno el polje koje „osjećaju“ generisani elektroni drastično lokalno smanjuje – onemogućavajući na ovaj način da elektroni indukovani jonima se dalje ubrzavaju i time dobiju dovoljno energije kako bi se započeo proces impaktne jonizacije, odnosno množavanje nosilaca naelektrisanja (proizvelo pojačanje LGADa). Kao rezultat, proizvedeno pojačanje je mnogo manje od onog koji je generisan prolaskom MIP cestica (MIP Ionizing Particles) ili ga uopste nema. Pokazalo se da je redukovanje jona bilo drastičnije u slučaju interakcije LGAD-a sa teskim jonima nego u odnosu na slučaj kada su se koristili laki joni sto je i bilo za očekivati jer je jonizacioni profil teskih jona drugačiji te na kraćem putu ostave veću energiju (proizvodeći tako i veću gustinu naelektrisanja na svom putu). U kontekstu prethodno navedenog, rezultati ovog magistarskog rada dokazali su da proizvedeno pojačanje LGAD-a zavisi ne samo od energije, već i od tipa radijacije i tipa cestice koja interaguje sa senzorom, kao i od ugla pod kojim ion/čestica ulaze u senzor, te da primjena LGAD-a mora biti pažljivo koncipirana i ograničenja aplikacije dobro studirana. Efekat koji je pokazan i dokazan potvrđuje mehanizam redukcije pojačanja („gain supression“) kod LGAD-a koji nije zanemarljiv u slučaju jona. Prethodno navedeno je postavilo dodatni ograničavajući faktor u budućim primjenama LGADa u experimentima sa česticama koje nijesu MIP (Minimum Ionizing Particles).

- 3) **Odziv LGAD-a (degradacija pojačanja) na radijaciono oštećenje (fluenciju jona):** S obzirom da je IBIC metodom moguće ozračavati LGAD sa fluencijama koje oštećuju LGAD, i to u tačno definisanim i selekovanim oblastima LGADa, kao i nakon toga koristiti jone sa fluencijama kojima se ne oštećuje LGAD već se njima mjeri efekat prethodno napavljenog radijacionog oštećenja, u ovom magistarskom radu dodatno je proučavan i odziv pojačanja LGAD-a na različite fluencije jona. Naime, proučavanja unutar RD50 grupe pokazala su da radijaciona oštećenja utiču na smanjenje pojačanja (kod visokih fluencija on potpuno i nestane), a za to je odgovoran mehanizam uklanjanja akceptora (deaktivacija akceptora). Radijacioni defekti unutar senzora kreiraju dodatne energetske nivoe što posledicno prouzrokuje zahvat šupljina čime se smanjuje efikasnost sakupljanja naelektrisanja. Visoka efikasnost sakupljanja naelektrisanja je veoma važna za obezbjeđivanje visoke prostorne i vremenske rezolucije senzora. Nehomogenim ozračavanjem LGAD-a na ovaj način mogu da se ispituju prelazne obalasti između oštećenog i neoštećenog dijela senzora; ovakve studije su veoma važne npr. za LHCb eksperiment, gdje je prilično nehomogeno oštećavanje vertex i tracking detektora.
- 4) **Odziv LGAD-a na alfa zračenje:** Osim odziva LGADa na MeV jone, testiran je i odziv senzora na alfa zračenje. Visok nivo redukovanja pojačanja je registrovan, i pripisan efektu sjencenja el. polja naelektrisanjem, odnosno efektu polarizacije el. polja u sloju multiplikacije čime se, kao i u slučaju jona, čime se lokalno el. polje vidno smanjuje, a time i „ugušuje“ proces umnožavanja (poizvedeni gain je znatno manji u odnosu na onaj koji bi bio MIP česticama proizveden).

Rezultati postignuti istraživanjem kandidata Miloša Manojlovića već sada imaju veliki uticaj na dalji razvoj LGAD-a i na njegovu primjenu u različitim kontekstima i sa različitim konačnim ciljevima primjene.

Prezentovani rezultati/publikacije:

- Jakšić, M., Crnjac, A., Kramberger, G., **Manojlović, M.**, Laštovička-Medin, G., & Ramos, M. R. (2022). Ion Microbeam Studies of Charge Transport in Semiconductor Radiation Detectors With Three-Dimensional Structures: An Example of LGAD. *Frontiers in Physics*, (SCI indexed) <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.877577>, 13 May 2022,
- Gordana Laštovička-Medin. Mateusz Rebarz, Gregor Kramberger, Tomas Laštovička, Jakob Andreasson, Martin Preček, Mauricio Rodriguez-Ramose, **Miloš Manojlović**, *Studis of LGAD performance limitations, Single Event Burnout and Gain Suppression, with Femtosecond-Laser and Ion Beams*, submitted in **Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A** (VCI Proceeding); april 2022, under reviewing
- **Miloš Manojlović**, *Report on gain study with low energy ions, report at the CNM*, Barcelona, Spain 2022
- **Manojlović, M.**, Laštovička-Medin, G., Jakšić, M., Kramberger, G., Crnjac, A., & Ramos, M. R. (2021, May 21–23). *A feasibility study on the utilization of the Ion Beam Induced Charge (IBIC) Nuclear Microprobe Technique at the RBI for the LGAD's Characterization including Interpad-Gap Measurements* [Presentation]. **The 38th RD50 Workshop**, Online, Workshop. <https://indi.to/KzZRh>

Zaključak

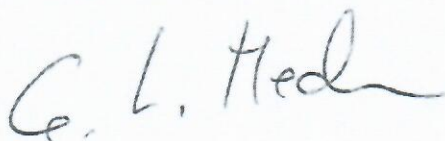
Na osnovu analize master rada, Komisija je ustanovila da je zadata tema dobro istražena korišćenjem odgovarajuće naučne metodologije, i da postignuti rezultati već sada imaju značajan uticaj na dalji LGAD R&D što će unaprijediti i nova naučna otkrića na polju fizike elementarnih čestica kao i primjenu u medicini, te tako predlaže Vijeću Prirodno-matematičkog fakulteta da odobri odbranu master rada „Karakterizacija detektora sa lavinskim efektom niskog pojačanja brzim jonskim snopovima”, kandidata Miloša Manojlovića.

U Podgorici, 6.07.2022

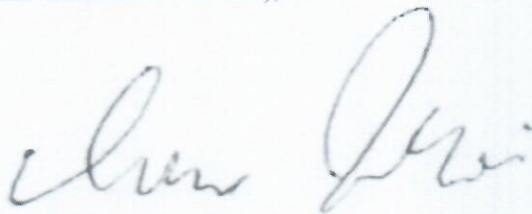
Članovi komisije:



- 1) Dr Gregor Kramberger, mentor, Institut Jožef Srečan, Ljubljana



- 2) Prof. Dr Gordana Laštovička-Medin, redovni profesor Univerziteta Crne Gore
(Prirodno-matematički fakultet), član



- 3) Dr Milko Jakšić, akademik Hrvatske akademije nauka (Institut Rudjer Bošković),
član