

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno–matematički fakultet
Fizički odsjek

Realizacija sustava niskoenergijske ionske implantacije

Filip Pavičić

Zagreb, 2025.

Ovaj rad izrađen je u Laboratoriju za interakciju ionskih snopova pri Zavodu za eksperimentalnu fiziku na Institutu Ruđer Bošković pod vodstvom prof. Matka Milina kao mentora i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2024./2025.

Sadržaj

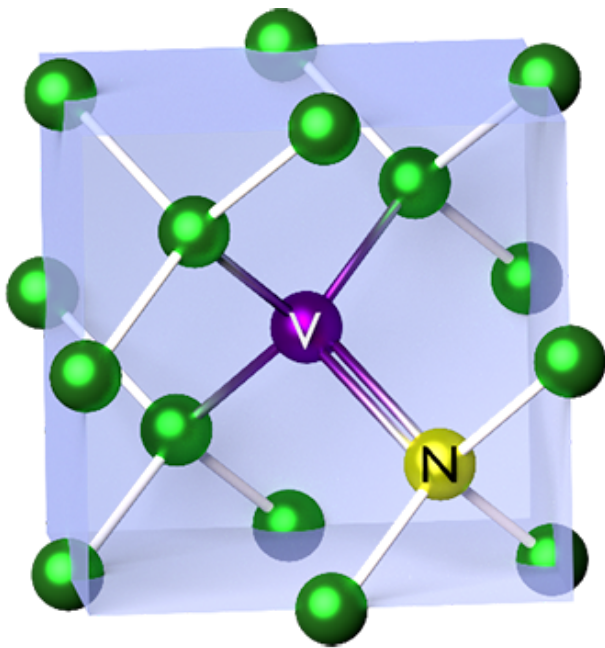
1	Uvod	4
1.0.1	Cilj rada	5
1.1	Teorijska pozadina NV centra	5
1.1.1	ZPL i detekcija NV	5
1.1.2	Spinska struktura NV i ODMR	6
1.1.3	Kreacija NV-a	7
1.1.4	Realne primjene	8
1.2	Osnove ionske implantacije	8
1.2.1	Zaustavljanje iona	9
1.2.2	Ionsko probijanje	11
1.2.3	Ionsko usmjeravanje	13
1.2.4	Proces žarenja	13
1.2.5	Fotodioda i neaktivni sloj	15
2	Eksperimentalni postav	16
2.1	Ionski izvor	16
2.2	Akceleratorski sustav	16
2.2.1	Princip rada Cockcroft-Waltonove cijevi	16
2.2.2	Magnetski analizator	17
2.2.3	Kalibracijska krivulja magneta	18
2.3	Sustav za definiciju snopa	19
2.3.1	Einzel leća	19
2.3.2	Objektne pukotine	19
2.4	Komora za detekciju	19
2.4.1	STIM	20
2.5	Mjerni instrumenti	21
2.5.1	Pretpojačalo	21
2.5.2	Pojačalo	21
2.5.3	Fotodioda	21
2.5.4	ADC	22
2.5.5	Uklanjanje šuma	22

2.5.6	Detekcija neaktivnog sloja	23
2.6	Dijamanta dioda i priprema	23
3	Obrada podataka	23
3.1	Spektralna analiza	24
3.1.1	Osnova analize	24
3.2	Izračun nepouzdanosti	25
3.3	STIM	25
3.4	Detekcija neaktivnog sloja	25
4	Rezultati mjerenja	25
4.1	Spektralna analiza	25
4.1.1	Dušikovi ioni	26
4.2	STIM	27
4.3	Detekcija neaktivnog sloja	27
5	Zaključak	29
5.1	Sljedeći koraci	29
6	Sažetak	36
7	Summary	37

1 Uvod

Vođene težnjom za učinkovitošću, moderne tehnologije razvile su se kroz upornu minijaturizaciju. Uređaji poput tranzistora, magnetskih memorija i lasera napredovali su smanjenjem broja elektrona korištenih po vratima, bitu ili izlaznom fotonu. Dolazak ovih napredaka do svojih prirodnih granica sada inspirira novu generaciju tehnologije za obradu informacija koji se zasniva na kvantnim efektima preplitanja, koherencije i superpozicije pojedinačnih naboja, spinova ili fotona. [1]

U posljednjih nekoliko desetljeća, kvantne tehnologije doživljavaju revoluciju koja obećava preoblikovanje našeg pristupa računarstvu, komunikaciji i senzorskim tehnologijama. Dijamant je privukao posebni interes kao obećavajući materijal za razvoj učinkovitih jednofotonskih izvora [2], zbog otkrića, karakterizacije i integracije u fotonske strukture nekoliko luminiscentnih dušik - praznina (eng. *Nitrogen - Vacancy*, NV) centara povezanih s nečistoćama i defektima u njegovoj kristalnoj matrici [3].



Slika 1: Schematski prikaz NV centra u dijamantskoj strukturi, zeleni atomi su ugljik, a praznina i dušik su jasno naznačeni, izvor: [4]

Njihova visoka kvantna učinkovitost i stabilnost na sobnoj temperaturi otvaraju put za primjene u novom području kvantne komunikacije [5] kao konkurentnog kandidata u odnosu na alternativne platforme, poput kvantnih točaka [6] ili silicijevog karbida [7]. Posebnom tehnikom bi mogli omogućiti i integrirane jednofotonske izvore koji rade na zahtjev. [3] Spinovi u čvrstom stanju obećavajuća su platforma za ostvarivanje ovih kvantnih prednosti zbog svoje

izdržljivosti protiv dekoherencije i mogućnosti skaliranja. Posljednjih godina, pionirski eksperimenti izolirali su pojedinačne spinove na ovim nečistoćama atomske razmjere i demonstrirali visokokvalitetnu inicijalizaciju, manipulaciju i očitavanje njihovih kvantnih stanja. Ovi napreci na razini jednog kubita uspostavljaju kritičnu osnovu, ali povezanost među više kubita je potrebna za otključavanje njihovog punog potencijala. [1] Navedena svojstva omogućuju niz primjena, uključujući fotonske memorije [8], kvantne repetitore [9], ispravljanje pogrešaka [10] i kvantno očitavanje [11].

1.0.1 Cilj rada

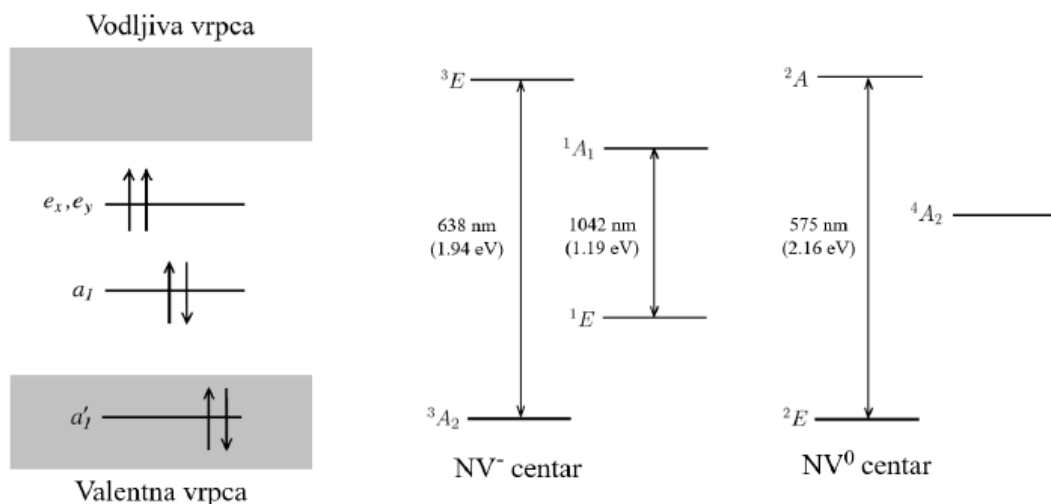
Cilj ovog rada je od **nule** dizajnirati i dovesti u rad sustav za implantaciju niskoenergijskih iona (manje od 200keV) koje ćemo koristiti za stvaranje NV-centara, optički aktivnih defekata u dijamantu. Na pripremljenom uzorku ćemo u budućnosti raditi ispitivanje kvalitete, a u danjoj budućnosti je plan koristiti uzorke za kvantne tehnologije, kao što su jednofotonski izvori i kvantno očitavanje.

1.1 Teorijska pozadina NV centra

NV centar (rjeđe centar boje) je točkasti defekt u dijamantnoj kristalnoj strukturi koji se sastoji od supstitucijskog para dušik - praznine u rešetci dijamanta (vidi sliku 1). Centar kreiramo kao urasli proizvod procesa visokog tlaka i visoke temperature (eng. *High pressure high temperature*, HPHT) [12], kemijskog taloženja iz pare (eng. *Chemical vapor deposition*, CVD) [13], laserskog upisivanja [14] ili kao proizvod ionske implantacije i žarenja [3][14][15][16], tehnike koju ćemo proučavati u ovome radu. Poznato je da centar postoji u negativnim (NV-) i neutralnim (NV0) stanjima naboja. [17][18]

1.1.1 ZPL i detekcija NV

NV- centar se sastoji od osnovnog tripletnog stanja ($S = 1$), pobuđenog tripletnog stanja i metastabilnog stanja sa dva singletna nivoa, vidi slike 2 i 3. Glavni radijativni kanal raspada između osnovnog i pobuđenog stanja ima rezonantnu valnu duljinu od 638nm (1.94eV), koja se još naziva i direktna emisijska linija bez interakcija s fononima (eng. *Zero phonon line*, ZPL). Identifikacijske značajke NV- i NV0 su upravo njihove direktne emisijske linije bez fonona na 1.945 eV (638 nm) i 2.156 eV (575 nm), redom, i pridružene vibracijske vrpce koje se protežu od njihovih ZPL-ova do više/nije energije u apsorpciji/emisiji. [17][18][19][20]



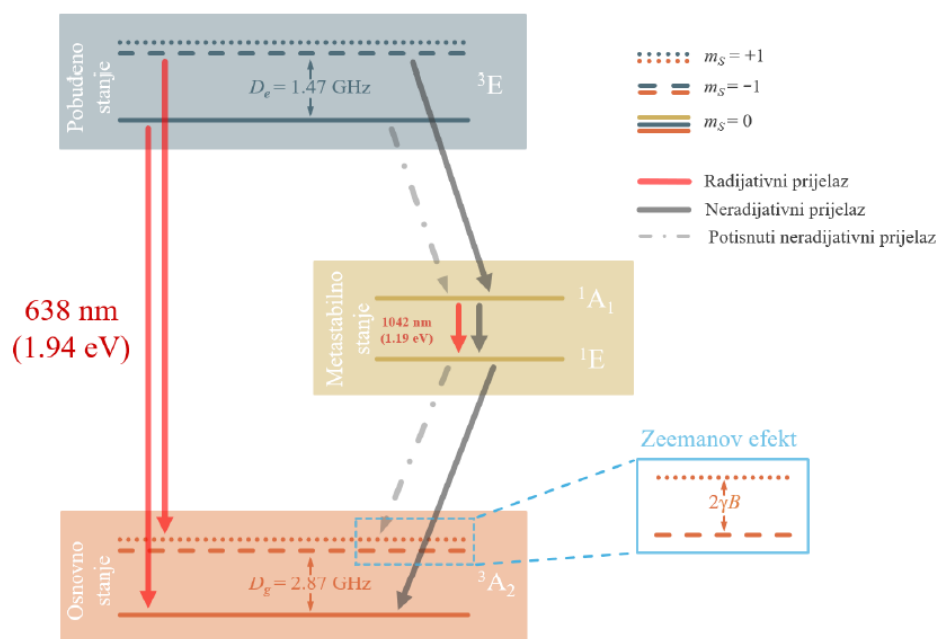
Slika 2: Prikaz spinske konfiguracije osnovnog stanja NV- centra (slika lijevo) i shematski prikaz strukture energetskega stanja NV- i NV⁰ centara uz naznačene elektronske i konfiguracije pojedinog stanja (slika desno) [18]

Dodatna infracrveni ZPL na 1.190 eV (1042 nm) koji je uočljiv samo tijekom optičkog osvjetljenja (s energijom >1.945 eV) povezan je s NV- centrom. Oštre ZPL-ove i dobro definirane vibracijske vrpce NV⁰ i NV- ukazuju na to da se optički prijelazi događaju između diskretnih razina defekata koje su duboko unutar zabranjenog pojasa dijamanta, tako da kontinuum valentnog ili vodljivog pojasa nije uključen u optičke prijelaze. NV centar je stoga poznat kao defekt duboke razine u dijamantu. [17][18][19][20]

ZPL je iznimno važan fenomen za ovu analizu jer omogućava identifikaciju aktivnih NV centara, posljedično i kontrolu kvalitete procesa implantacije.

1.1.2 Spinska struktura NV i ODMR

Tripletna stanja negativnog centra dijele se na tri projekcije spina $m_S = 0, \pm 1$, magnetski broj (vidi sliku 3). Bez prisutstva vanjskog magnetskog polja $m_S = \pm 1$ podnivoi su degenerirani. Zahvaljujući slabom spin-orbit međudjelovanju i visokoj Debye temperaturi, NV- centri posjeduju duga karakteristična vremena relaksacije sustava i vrlo visoka vremena dekoherencije, koje je moguće i produljiti metodom koja se zove dinamičko odvezivanje. [18][21] Radi spomenutih svojstava, NV- centri se mogu detektirati tehnikom optički detektirane magnetske rezonance (ODMR). ODMR je tehnika dvostruke rezonance koja omogućava tranziciju između spinskih podrazina sa fotonskom emisijom. Tehnika je iznimno precizna jer omogućava i nekoliko redova veličine kvalitetniju osjetljivost spektroskopije spinske rezonance [21].



Slika 3: Shematski prikaz radijativnih i neradijativnih prijelaza između energetske stanja NV-centra uz prikaz Zeemanovog efekta. [18]

1.1.3 Kreacija NV-a

Spomenuli smo načine s kojima možemo stvoriti NV centre u dijamantu, promotrimo kvalitete i nedostatke istih.

HPHT je tehnika sinteze koja reproducira prirodne uvjete stvaranja dijamanta. Proces započinje postavljanjem dijamantnog zrna (centra nukleacije) na ugljikov supstrat. Sustav se zatim izlaže visokom tlaku i temperaturi što rezultira taljenjem ugljika i rastom dijamanta oko centra nukleacije. Dodavanjem različitih rastaljenih metala i katalizatora moguće je pospješiti rast kristala željenih karakteristika. [18]

Ultrabrzna laserska obrada koristi se desetljećima za izradu struktura unutar prozirnih materijala, od stakala, preko polimera, kristala do bioloških materijala. Međutim, tek je nedavno istražena kao put do kontroliranog stvaranja kompleksa defekata. Potpuni teorijski model za lasersku interakciju s dijamantom još nije eksperimentalno potvrđen. Opažene visoke nelinearnosti korisne su jer dovode do visoke prostorne rezolucije. Međutim, radi istih visokih nelinearnosti proces je teško kontrolirati. Energije impulsa je teško podesiti između dovoljne razine za žarenje dijamanta i prevelike prilikom koje dolazi do nekontroliranog oštećenja. [14]

CVD sinteza je tehnika koja osnovne elemente u plinovitom obliku spaja sa supstratima na

kojima se događa rast kristala, koristeći inertni plin. Dopiranjem *in situ*¹ različitim elementima tijekom sinteze, moguće je stvaranje centara željene orijentacije što nudi prednosti kod izrade ansambla za korištenje u magnetometriji. [13] Premda se pokazalo da ovako formirani centri imaju općenito bolja svojstva u usporedbi s centrima formiranih implantacijom iz ionskog snopa, CVD sintezom nije moguće kontrolirati lokaciju formacije centara. [18]

Ionsku implantaciju kao metodu stvaranja NV centara u dijamantu ćemo detaljnije obraditi u potpoglavlju 1.2.

1.1.4 Realne primjene

NV- centar ima široku primjenu u raznim znanstvenim i tehnološkim granama kao što su uporabe u kvantnim informacijskim tehnologijama, kvantnim računalima i kvantnim komunikacijskim tehnologijama te uporabi kao senzora za magnetsko polje, električno polje, temperaturu, naprezanje i ostalih fizikalnih parametara. Kvalitetno dizajniran i pripremljen sustav može biti kvantni bit (*qubit*) na sobnoj temperaturi i atmosferskom tlaku, može biti osnova za jedno-fotonski izvor, okosnicu kvantne komunikacije i kriptografije. [1][14][17][22][23][24] Visoka osjetljivost centra i specifična fotoaktivnost omogućava i magnetometriju na nano razini i sobnoj temperaturi [11][13][19][25], bio magnetometrijsku primjenu [26], elektrometriju [27] i dekoherentnu mikroskopiju [28]. Uz to se i centar može koristiti i kao termometar na nanometarskoj razini. [29] Centar se koristi za izvođenje eksperimenata koji se bave temeljnim pitanjima u kvantnoj i teoriji kondenzirane tvari. Ovi eksperimenti uključuju kršenje Bellovih nejednakosti [30], magnetsku rezonancu izvan aproksimacije rotirajućeg okvira [31], detekciju Meissnerovog efekta [32] i kvantnu procesnu tomografiju [33]. Kao fotostabilni izvor pojedinačnih fotona, NV- centar se koristi za demonstraciju kvantne kriptografije [34] i generiranja pojedinačnih površinskih plazmona na srebrnim nanožicama [35].

1.2 Osnove ionske implantacije

Ionska implantacija je osnovni pojam ovog rada te kako bi konstruirali kvalitetan eksperimentalni sustav, moramo dobro savladati osnovne pojmove i koncepte koji se koriste u ionskoj implantaciji.

¹*in situ* (lat. na mjestu) je standardni izraz za više tehnika koje se odvijaju na istom mjestu

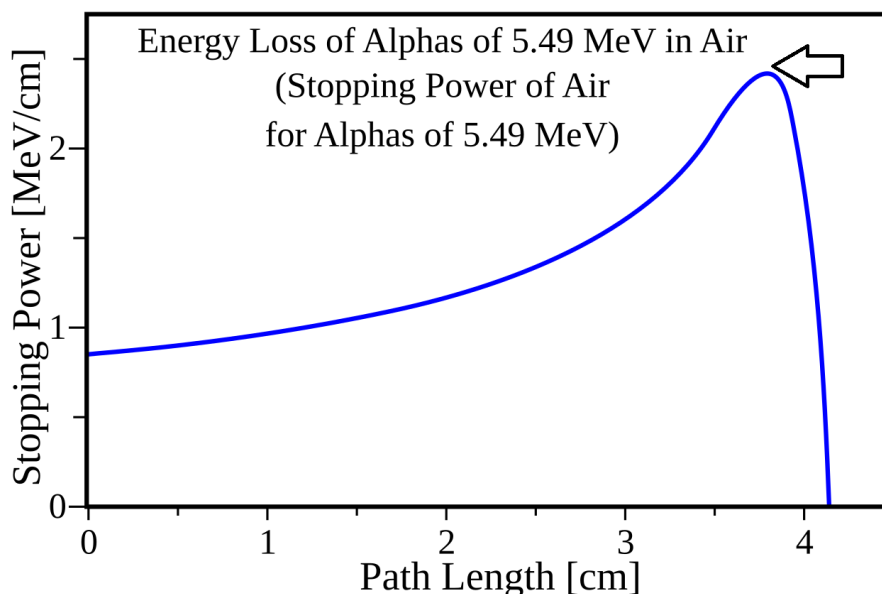
1.2.1 Zaustavljanje iona

Ionska implantacija je tehnika dobre kontrole prostorne raspodjele dopanada u poluvodičkoj industriji, posebno kada je dimenzija uređaja manja od mikrometara. Čestice prolazeći kroz materiju gube energiju kroz razne mehanizme interakcije, ovisno o tome jesu li nabijene ili neutralne, velike brzine ili male, velike ili male mase, itd. [36]

Zaustavna moć (eng. *stopping power*) je fizikalna veličina koja opisuje gubitak energije po jedinici duljine te ovisi o vrsti i energiji čestice te o svojstvima materijala kroz koji prolazi. Dijeli se na elektronsku zaustavnu moć - interakcija iona sa elektronima, i nuklearnu zaustavnu moć - interakcija iona sa jezgrama te ju definiramo na sljedeći način:

$$S(E) = -\frac{dE}{dx} \quad (1)$$

Zaustavna moć se obično povećava prema kraju raspona i doseže maksimum, Braggov vrh (eng. *Bragg peak*), neposredno prije nego što energija padne na nulu. Krivulja koja opisuje zaustavnu moć kao funkciju dubine materijala naziva se Braggova krivulja.

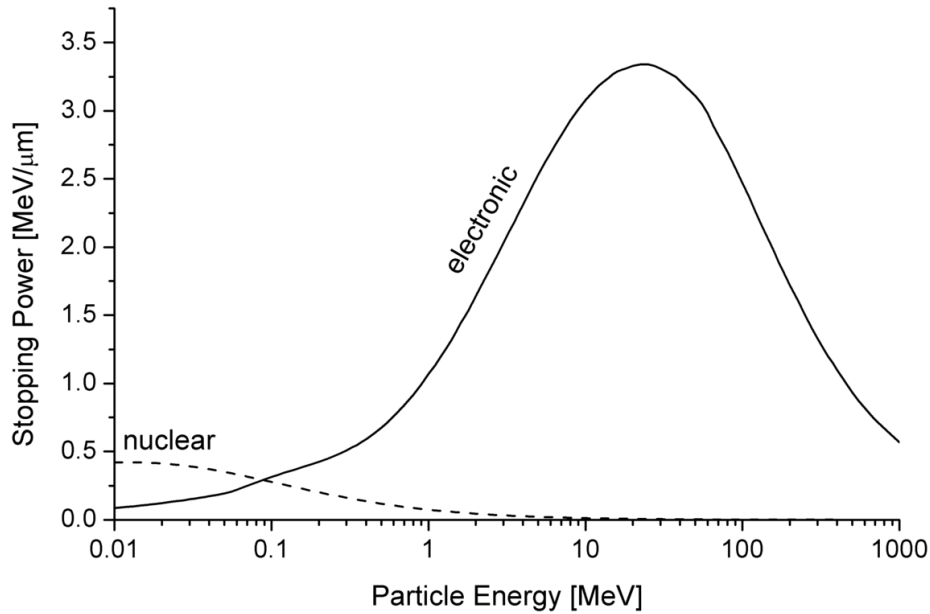


Slika 4: Primjer Braggove krivulje, Braggov vrh je naznačen crnom strelicom, izvor: [37]

Elektronsko zaustavljanje odnosi se na usporavanje iona putem pobuđivanja elektronskih stanja u materijalu. Može se pretpostaviti kao neprekidno u materijalu i uzrokuje razne efekte, kao emisiju sekundarnih iona i lomljenje ili popravljjanje kemijskih veza. Radi velikih razlika u masi između iona i elektrona, put iona se ne mijenja znatno za ovaj način.

Nuklearni energijski gubitak odnosi se na sudar jezgre atoma mete sa ionskim snopom.

Energetski gubitak je opisan izoliranim sudarima, koji tipično znatno mijenjaju putanju iona. Nuklearni energijski gubici također rezultiraju izbacivanjem tzv. raspršenih iona iz materijala mete, kao i kreaciju strukturnih defekata. U dovoljno energetskim sudarima, izbačeni atome iz rešetke se ponašaju kao dio novog ionskog snopa, te i oni osjećaju energetske gubitke, pa i oni mogu izbaciti atome iz rešetke, stvarajući kaskade. Takve izbačene atome nazivamo sekundarnima, a njima izbačene tercijarnima itd.

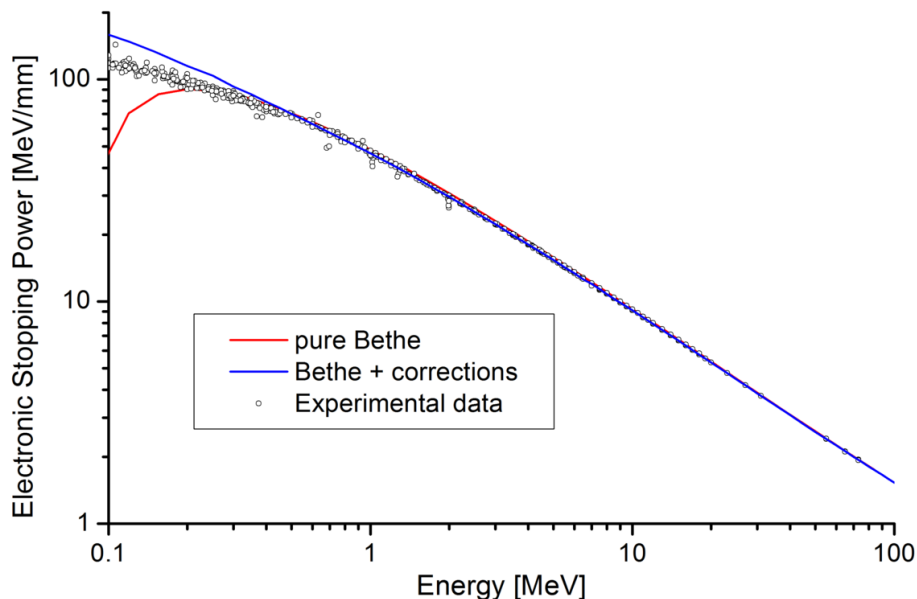


Slika 5: Električni i nuklearni doprinosi zaustavnoj moći, izvor: [37]

Budući da je broj sudara koje ion doživljava s elektronima velik vrlo je teško opisati sve moguće interakcije za sva moguća stanja naboja iona. Umjesto toga, elektronska zaustavna moć često se daje kao jednostavna funkcija energije koja je prosjek uzet za sve procese gubitka energije za različita stanja naboja. Teoretski se može odrediti s točnošću od nekoliko postotka u energetskom rasponu iznad nekoliko stotina keV po nukleonu iz teorijskih obrada, a najpoznatija je Betheova formula:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0^2} \frac{Z^2 e^4}{m_e \beta^2 c^2} N_e \left[\ln \left(\frac{2\gamma^2 m_e \beta^2 c^2}{I} \right) - \beta^2 \right] \quad (2)$$

Gdje je E energija čestice u snopu, x put, $\beta = v/c$ relativistički parametar, γ Lorentzov faktor, m_e masa elektrona, Z broj protona u čestici snopa, N_e gustoća elektrona u materijalu, a I tzv. srednji ionizacijski potencijal.



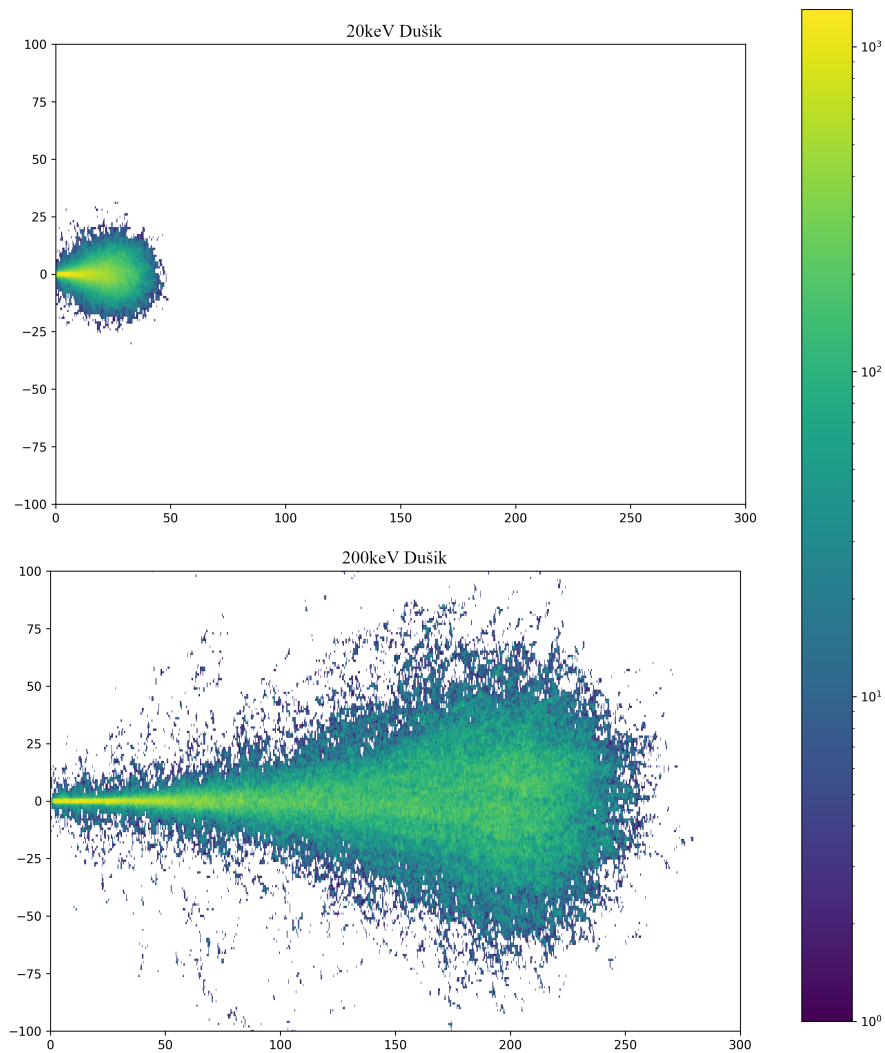
Slika 6: Prikaz Bethove formule sa korekcijama i eksperimentalnim podacima, izvor [38]

Betheova formula je iznimno dobar model za zaustavnu moć, ali primjenjiva je jedino u području dovoljno visokih energija takvih da ion u snopu sa sobom ne nosi elektrone. Mi ćemo većinom raditi sa ionima $N^{+,2+}$, koji sa sobom nosi 6, odnosno 7, elektrona tako da taj model ne vrijedi. Nažalost čak i uz napredne korekcije Bethove formule koje postoje, ne postoji adekvatan teorijski model za postav koji imamo. Kako bi svejedno imali uvid u događanja u sustavu, koristit ćemo Monte Carlo simulacije. Najrelevantniji rad u ovom području je originalni tekst iz 1985. [39] s kojim je započet razvoj programa SRIM/TRIM. SRIM koristi Monte Carlo simulacije kako bi odredio događaje interakcije mete i ionskog snopa. Program ima praktični neograničene mogućnosti odabira mete i ionskog snopa, te se i danas koristi intenzivno u istraživanju. Radi jednostavnost i bržeg korištenja, u ovome radu za sve SRIM simulacije, koristili smo python paket *pysrim*.

1.2.2 Ionsko probijanje

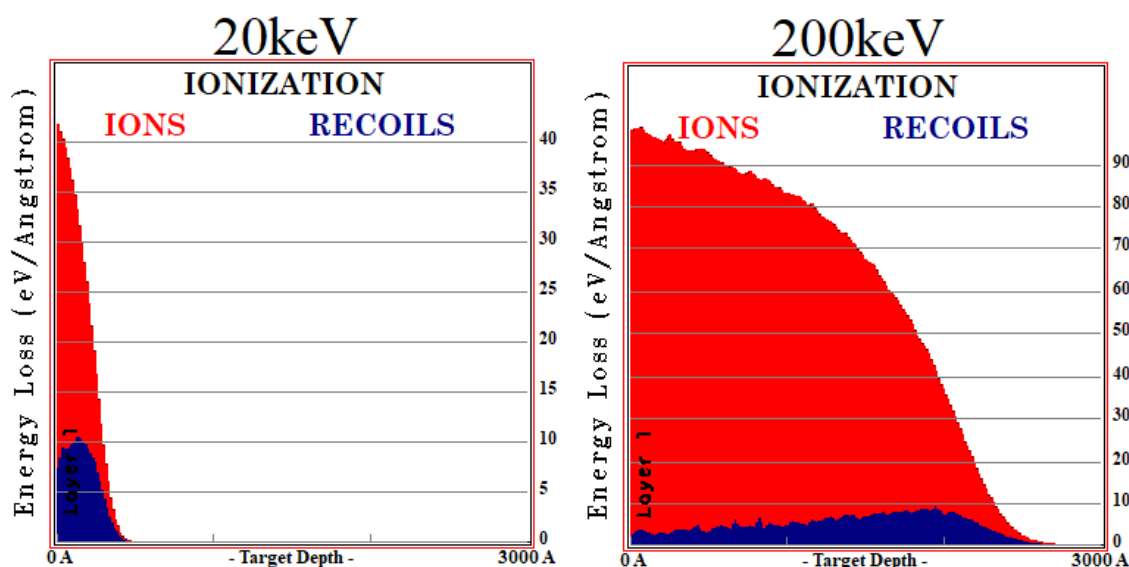
Nakon ubrzanja, ion dušika velike brzine prvo udara u površinu statičke dijamantne mete, zatim se širi kroz dijamantnu rešetku i na kraju gubi energiju, raspršujući se nekoliko puta dok se ne zaustavi i ne zamijeni atom ugljika u dijamantnoj rešetki. To rezultira širenjem fokusa ionskog snopa, što se može definirati kao nesigurnost u konačnom položaju svakog pojedinog implantiranog iona. Raspršenja mogu biti posljedica sudara s elektronima ili s jezgrom atoma. Sudari s

elektronima uglavnom smanjuju brzinu, dok sudari s jezgrama mijenjaju smjer udarnog iona i stvaraju kristalne defekte. Raspršenost je definirana kao kvadratni korijen varijance raspodjele iona i ovisi o nekoliko parametara kao što su masa i energija iona velike brzine, kao i priroda mete. Slika 7 prikazuje rezultate Monte Carlo simulacija u programu SRIM, koje ilustriraju putanje N^+ iona implantiranih u dijamant pri dvije različite kinetičke energije, tj. pri 20keV i 200keV.



Slika 7: Simulacija proces implantacije u SRIM-u

Vidljivo je da se ionsko rasipanje povećava s energijom iona. Kao rezultat toga, implantacija iona niske energije je poželjnija za postizanje visoke prostorne rezolucije u matrici cilja, npr. u ovom slučaju dijamanta. Nekoliko vrsta defekata, kao što su praznine i intersticijski prostori, stvara se duž cijele putanje iona, ali uglavnom na kraju dometa.



Slika 8: Braggova krivulja simulacija iz slike 7, ioni u su predstavljeni crvenom bojom, plavom bojom je predstavljena ionizacija proizvedena sekundarnim (tercijarnim, itd.) ionima, graf je izrađen u programu SRIM

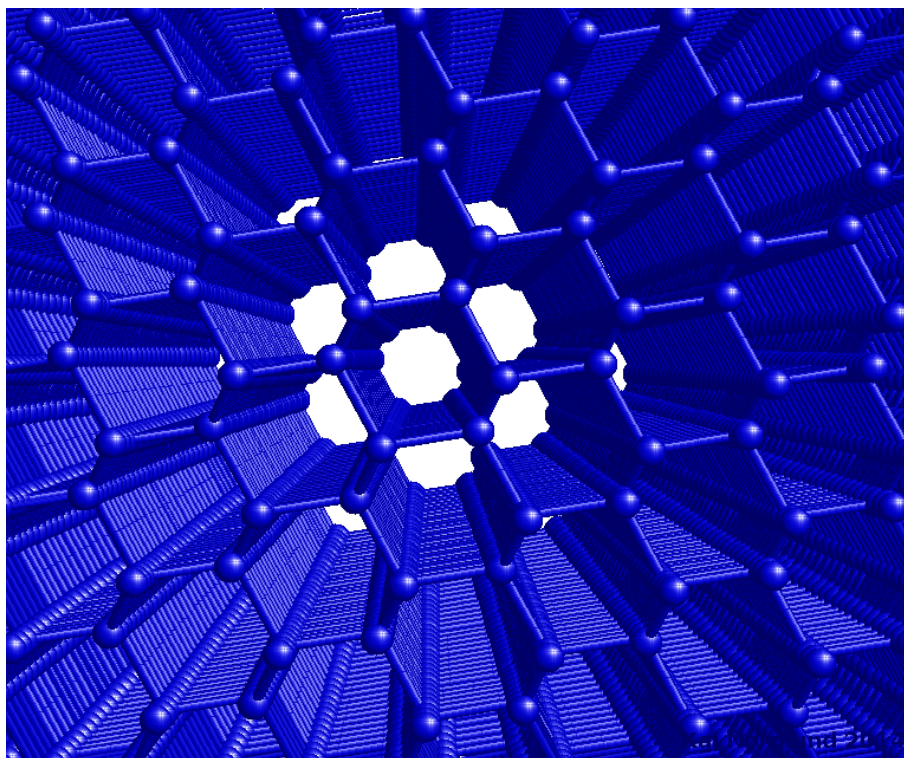
1.2.3 Ionsko usmjeravanje

U kristalnim metama, kada je putanja ionskog snopa paralelna sa jednom od glavnih kristalografskih osi materijala. Ioni prolaze kroz kanal uzduž međuatomskog prostora u kristalu. Time je znatno smanjena interakcija iona i tvari i znatno je povećana dubina prodora iona. Ionsko usmjerenje je fenomen koji nam uvodi nepouzdanosti na dubinu implantacije iona u metu.

1.2.4 Proces žarenja

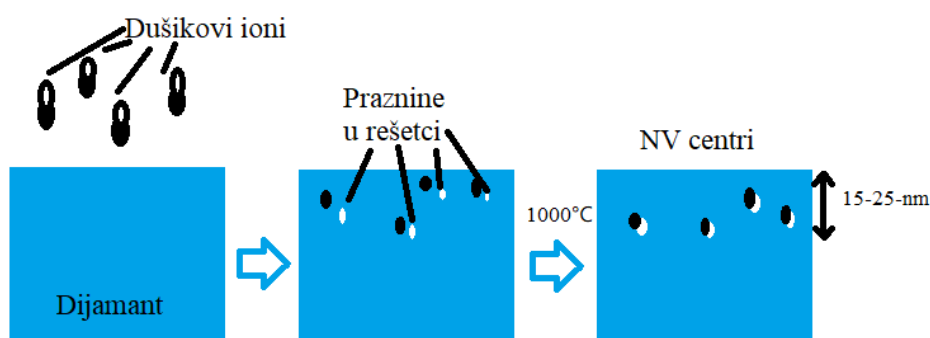
Ionskim ozračivanjem i naknadnim žarenjem može se povećati koncentracija NV(-) fotonjskih centara u dijamantu. Zračenje uzorka ionima visoke energije stvaraju se Frankel parovi, kao i druga oštećenja u dijamantnoj rešetki. Tu tehniku smo odabrali za proizvodnju NV centara u dijamntnoj rešetki. Žarenje osigurava energiju² za mobilizaciju tih defekata, ali neki od tih Frenkelovih parova mogu se razdvojiti i proizvesti izolirane praznine i vlastite međuprostore te slijediti proizvoljan smjer kretanja. Koncentracija tih izoliranih praznina i vlastitih međuprostora je vrlo velika u usporedbi s neozračenim uzorcima. Vlastiti međuprostori su pokretni čak i na sobnoj temperaturi i gibat će se na površinu ili granice kristala, a mogu i formirati defekte slične pločicama. U međuvremenu mogu pomoći i difuziji i isparavanju dušika. Nakon ozračivanja, potrebna je toplinska obrada kako bi se žarenjem uklonili parazitski defekti koji gase luminiscenciju. To se obično radi između 600 °C i 800 °C, gdje neutralne praznine pos-

²Kinetička energija čestica je proporcionalna temperaturi



Slika 9: Simbolički prikaz izgleda fenomena usmjeravanja, izvor: [40]

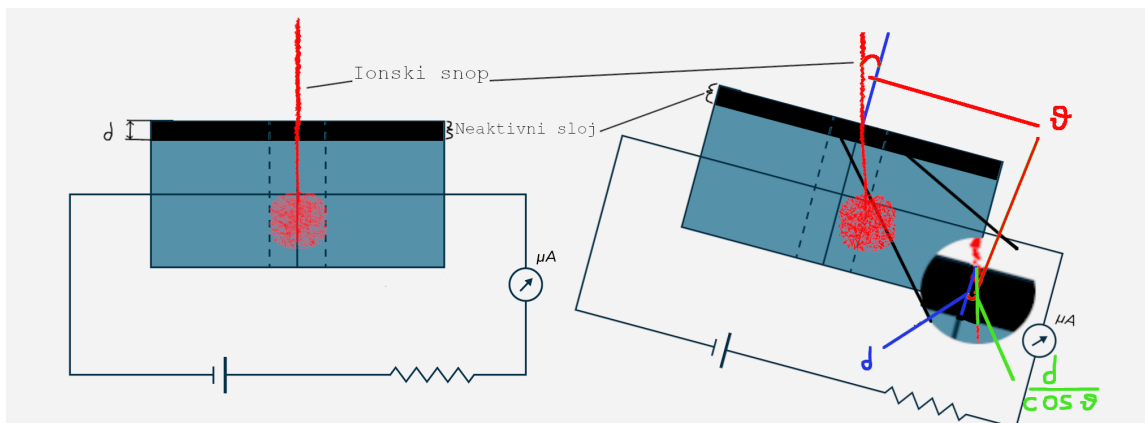
taju pokretne. Obično se pretpostavlja da se NV centri formiraju tijekom ove toplinske obrade. [14][16][18]



Slika 10: Shematski prikaz procesa ugrađivanja NV centra u dijamantskoj strukturi

Međutim, praznine se također mogu zarobiti na postojećim N_2 defektima³ ili mogu formirati dvostruke praznine. Žarenje nakon ozračivanja može se smatrati kvazi-ravnotežnim procesom, a uvid u stvaranje NV(-) centara može se dobiti detaljnim proučavanjem energija formiranja i razina zauzetosti razmatranih defekata. Na slici 10 ilustriran je proces implantacije, uključujući žarenje. Da bi imali pokretne, tj. neutralne praznine nakon ozračivanja, Fermijeva razina mora

³Umjesto jednog atoma dušika imamo dva i prilikom zarobljivanja praznine ne dobivamo aktivni centar



Slika 11: Simbolički prikaz izračuna debljine neaktivnog sloja, na lijevoj strani slike kut ϑ je nula, a na desnoj nije i izvodimo put ionskog snopa

se drastično sniziti. To možemo postići značajnom količinom zračenja, povećanje koncentracije NV defekata se postiže za vrijeme zračenja, dok je veća vjerojatnost formacija praznina tokom procesa žarenja. [16]

1.2.5 Fotodioda i neaktivni sloj

U radu smo za detekciju iona koristili fotodiodu. Fotodioda je poluvodička dioda osjetljiva na svjetlosno zračenje koja proizvodi električni signal kada absorbira fotone. Kada nabijena čestica ulijeće na poluvodič stvara elektron-šupljina parove. Elektroni i šupljine se detektiraju preko elektroničkog sustava. Količina naboja koji se detektira u odnosu na količinu stvorenih naboja ionskim interakcijom zovemo efikasnost skupljanja naboja (eng. *Charge collection efficiency*, CCE). Postoje dodatni efekti u niskoenergetskim interakcijama ionskih snopova s ovakvim sustavima, kao što su razna zasjenjenja električnog polja koji stvaraju smanjenje u CCE-u. Također je bitan efekt za našu analizu inertni sloj materijala ispred samog poluvodičkog spoja na diodi. Ovaj sloj skup s dijelom detektora koji nije u mogućnosti detektirati ione zovemo nazivamo neaktivni ili mrtvi sloj (eng. *dead layer*). Kasnije ćemo određivati njegovu debljinu na našem postavu jer nam je značajan u određivanju srednje vrijednosti energije kao i njezine nepouzdanosti σ . Debljinu ćemo prikazivati ekvivalentnom tj. efektivnom debljinom elementranog silicija. Promotrimo sliku 11, na lijevoj strani slike nalazi se sustav sa fotodiodom gdje je upadni kut nula, a na desnoj strani slike je cijeli postav pod kutem u odnosu na ionski snop. Vidi se iz slike da je put kroz neaktivni sloj veći i da iznosi:

$$s = \frac{d}{\cos \vartheta} \quad (3)$$

Ovaj izraz ćemo koristiti kada budemo radili prilagodbu (eng. *fit*) na izmjerene podatke ovisnosti o kutu.

2 Eksperimentalni postav

Glavni dijelovi sustava za niskoenergetsku ionsku implantaciju su:

- izvor iona
- akceleratorski sustav
- sustav za definiciju energije snopa i prostorne definicije snopa
- komora za detekciju

Imamo i popratne sustave vakuumu i napajanja, koji nisu značajni za ovaj rad i koje ćemo samo spomenuti

2.1 Ionski izvor

Izvor iona koji smo koristili je bio Prevac IS40C1, plinski izvor je uređaj koji stvara atomske i molekularne ione. Izvor proizvodi ione tako da se plin ubacuje u komoru izvora kroz igličasti ventil te izvor molekule plina ionizira pomoću iridijske niti presvučene itrijevim oksidom. Tako ionizirani plin se zatim ubrzava naponom koji stavljamo na elektrodu koja se nalazi na izlazu iz izvora. Ionski izvor ima mogućnost namještanja iznosa struje i napona akceleracije.

2.2 Akceleratorski sustav

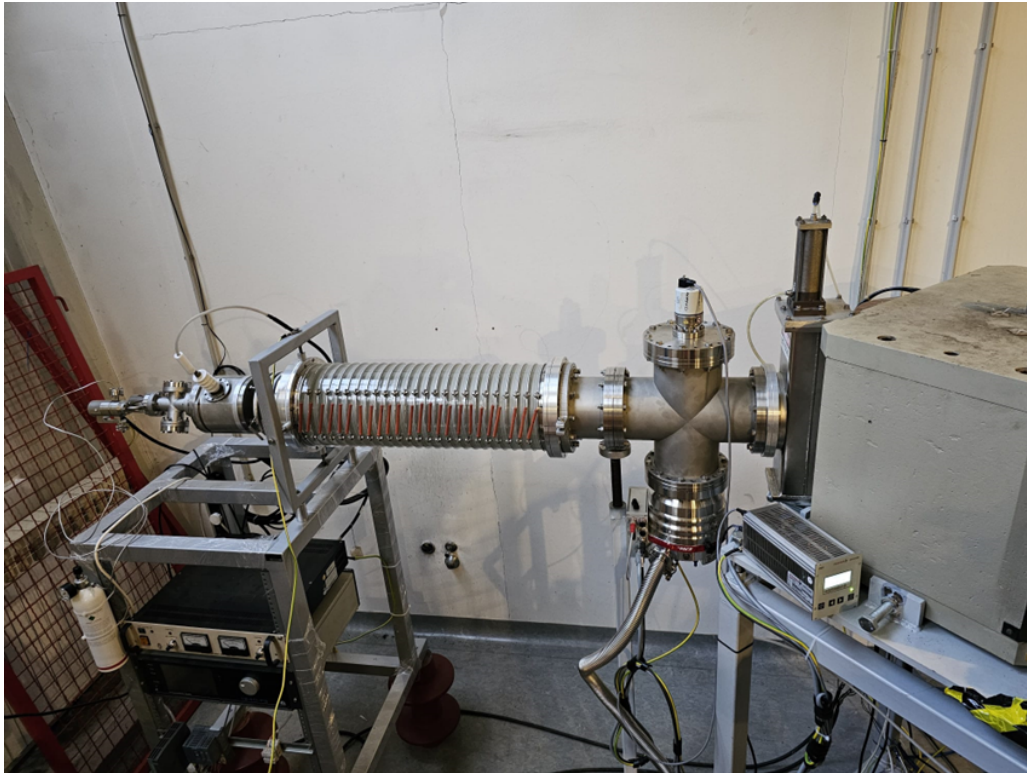
Izvor akcelerira snop do najviše 5kV. Nakon izvora smo instalirali Cockcroft-Waltonovu cijev.

2.2.1 Princip rada Cockcroft-Waltonove cijevi

Dvadesetak kolinearnih metalnih kružnica je spojeno međusobno sa otpornicima znatnog otpora⁴ i izoliratorskom plastikom. Postava je izoliran u odnosu na zemlju te smo pomoću kaskadnog pojačala sustav postavili na potencijal po potrebi, najviše do 200kV. Metalne kružnice su međusobno odvojene jednakim otporima, te kada ioni ulijeću u akceleratorsku cijev, više

⁴20M Ω

su sakupljeni prema središtu kružnica nego kad bi imali samo jedan otpornik, tj. jednu razinu električnog polja.



Slika 12: Akceleratorna cijev i ionski izvor, Laboratorij za interakciju ionskih snopova

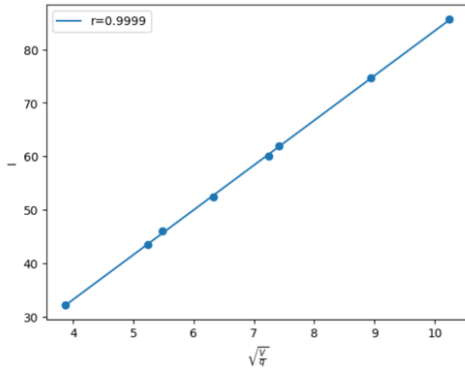
Kad snop dođe do kraja akceleratorne cijevi na potencijalu je zemlje te je ukupno primio energiju od $E = qV_{uk}$, gdje je q naboj čestice u snopu, a V_{uk} ukupni napon akceleracije. U ukupnu energiju čestice ulazi i energije dobivena na izvor, te nam je taj broj bitan za energijsku analizu snopa pomoću analizatorskog magneta.

2.2.2 Magnetski analizator

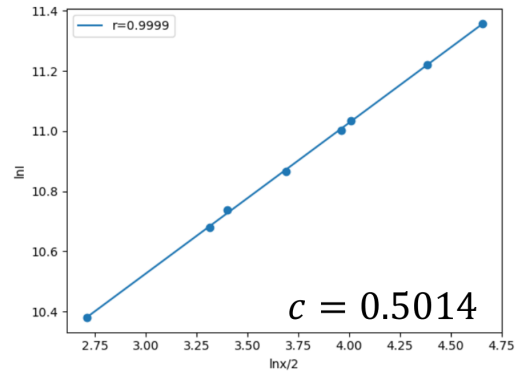
Pomoću elektromagnetskog dipola kojeg još nazivamo i magnetskom skretnicom ili magnetskim analizatorom, razdjeljujemo snop u odnosu na njegovu masu i naboj. Promotrimo Lorentzovu silu (Smolice):

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (4)$$

Unutar magneta pretpostavljamo da je električno polje zanemarivo. Magnetsko polje je ovisno o struji i suscetibilnosti $B = \chi I$. Polje je okomito na brzinu naboja. Magnet obavlja cijev koja je četvrtina kruga pa se nekad i taj element sustava naziva i 90° . Naboj se giba kružnom



(a) Linearna regresija korijena razlomka potencijala i naboja i struje



(b) Linearna regresija logaritma korijena razlomka i logaritma struje

Slika 13: Linearne regresije koje smo koristili za kalibracijsku krivulju, slike su izrađene u pythonu

putanjem pa izjednačavamo centripetalnu silu $F = \frac{mv^2}{r}$ sa Lorentzovom:

$$qv\chi I = \frac{mv^2}{r} \quad (5)$$

Za dani snop možemo mijenjati jedino brzinu $v = \sqrt{\frac{2E}{m}}$ i struju, dok su nam radijus skretnice r , naboj čestice u snopu q , suscetibilnost⁵ magnetskog sustava χ i masa čestice u snopu m konstante. Energiju pišemo kao promjenu potencijala $V = V_{uk}$ i naboj q .

$$q\chi I = m\sqrt{\frac{2Vq}{mr^2}} \quad (6)$$

Konačno za sve snopove vrijedi

$$I \sim \sqrt{\frac{V}{q}} \quad (7)$$

Masu izostavljamo jer koristimo samo jednu vrstu atoma u ionskom izvoru.

2.2.3 Kalibracijska krivulja magnetna

Sada možemo mijenjanjem struje na magnetu i energije snopa, odrediti ovisnost jedno o drugome, krivulja koju ćemo nazivati kalibracijska krivulja i koristiti nadalje kao referencu u namještanju snopa. Promotrimo linearnu regresiju korijena napona i struje

⁵Suscetibilnost ovisi o puno faktora, uključujući i struju, ali možemo pretpostaviti da je otprilike konstantna

Te ako logaritmiramo, za regresiju imamo:

$$\ln(I) = \ln(b) + c \ln\left(\frac{V}{q}\right)$$

Iz slike 13a i slike 13b vidimo korijensku ovisnost, gdje je r parametar regresije u oba slučaja otprilike 1, a u slučaju logaritmiranja vidimo da je potencija 0.5. Ova krivulja će nam biti bitna kada različite energije budemo akcelerirali kroz cijev, s krivuljom uvijek možemo odrediti struju potrebnu da bi se snop naciljao u mjernu komoru.

2.3 Sustav za definiciju snopa

2.3.1 Einzel leća

Einzel leća (od njemačkog: *Einzellinse* – jedna leća) je elektrostatička leća sa nabijenim česticama koja fokusira bez promjene energije snopa. Sastoji se od tri ili više cilindričnih ili pravokutnih otvora ili cijevi u seriji duž osi gibanja snopa.

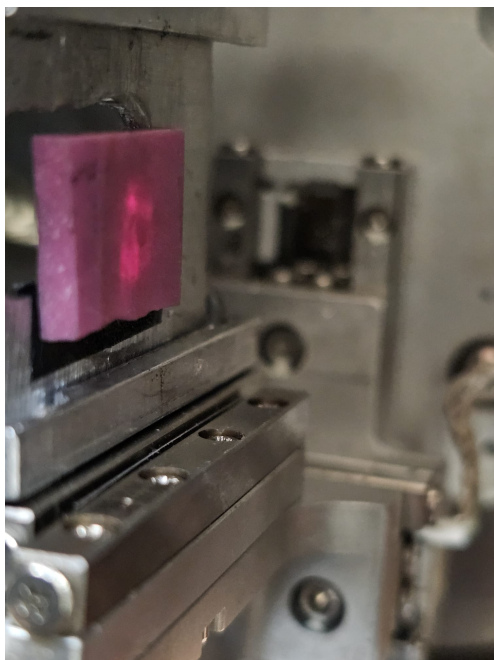
Potencijal na ulazu u leći je isti kao i na izlazu, tako da ioni sadržavaju istu energiju prolaskom kroz leću, iako će se brzina vanjskih čestica promijeniti tako da konvergiraju prema osi. Einzel leća nam je značajna za definiciju snopa i jedini je fokusirajući element u ovom postavu. U budućnosti ćemo instalirati kvadropolne magnete koji će dodatno doprinositi fokusiranju snopa u akceleratorskoj liniji.

2.3.2 Objektne pukotine

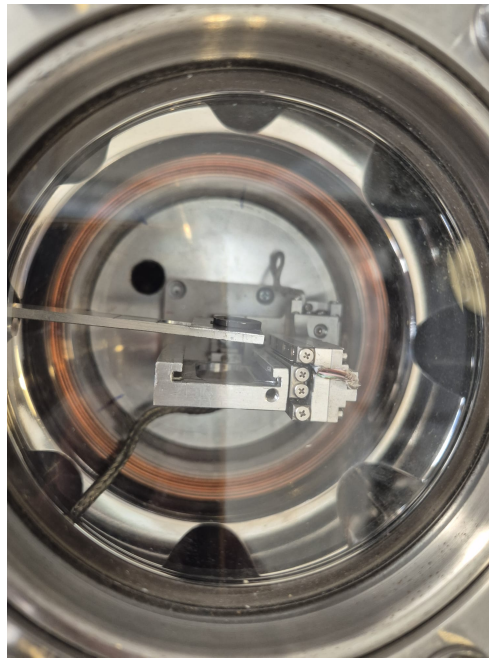
Objektna pukotina reže snop čestica na dimenzije po našoj potrebi. Graničnicima na objektnoj pukotini definiramo snop na oblik i veličinu koja nam je potrebna. Graničnici su povezani na sustav preko prijenosnog računala, ali imaju i opciju ručnog namještanja. Unutar komore postoji i aperturni kolimator koji ćemo koristiti za točnije definiranje snopa (vidi 14a). Aperturni kolimator je fiksno promjera i profila i koristi se za točniju definiciju snopa.

2.4 Komora za detekciju

Prije komore imamo ventil sa Faradayevom čašicom i integratorom struje, koji nam omogućuju prikupljanje i integraciju strujnog signala. S ovim sustavom ne možemo odrediti samu energiju snopa koji detektiramo, ali s obzirom da znamo struju koju puštamo kroz magnetski analizator,



(a) Kvarcni kristal emitira svjetlosno zračenje kada na njega ulijeću nabijene čestice, rubovi snopa su definirani graničnicima objektivne pu- kotine



(b) Unutarnji izgled komore, na sredini slike se vide nosači za uzorke koje pogone piezomoto- snopi, ispred uzorka se nalazi objektni kolimator

Slika 14

možemo iz kalibracijske krivulje zaključiti o kojim česticama se radi⁶.

Komora sadrži i sustav piezomotora⁷ iznimne preciznosti koje ćemo koristiti za STIM. Iz- gled komore prikazan je na slici 14b

2.4.1 STIM

Scanning transmission ion microscopy (STIM) ili skenirajuća transmisijaska ionska mikroskopija je metoda s kojom ćemo provjeriti mogućnosti, poput visoke prostorne razlučivosti, determi- nističke implantacije i sl., našeg postava za samu ionsku implantaciju. Naime piezomotori koji su ugrađeni u komori imaju rezoluciju oko nanometra, ali mi nećemo ići s toliko malim poma- cima. Motori će nam kasnije koristiti za implantaciju dušiku u dijamant. Emulaciju tog procesa možemo napraviti pomoću tehnika STIM-a. Na motoriće ispred fotodiode montiramo bakrenu mrežicu 400 mesh⁸ koja je iza objektnog kolimatora od $5\mu\text{m}$. Motorići mjenjaju položaj te se postiže različiti intenzitet zračenja u ovisnosti o položaju mrežice, tj. motorića. Stvaramo

⁶Na primjer, na početku smo koristili helij i znamo parametre akceleriranja, a kako je He^{1+} 2 reda veličine češći u našem sustavu od He^{2+} , bez kalibracijske krivulje smo znali o kojim ionima se radi, jednostavno po struji na integratoru.

⁷Piezomotori su precizni motori koje radi na principu piezoelektričnog efekta

⁸Mrežica je američki standard tj. 400 otvorenja u jednom inču, manje debljina ruba

određenu sliku u ovisnosti o položaju i intenzitetu.

2.5 Mjerni instrumenti

U komoru je namontirana poluvodička fotodioda, koju smo spojili na izvor visokog napona (eng. *bias*), predpojačalo te za početak na osciloskop.

2.5.1 Pretpojačalo

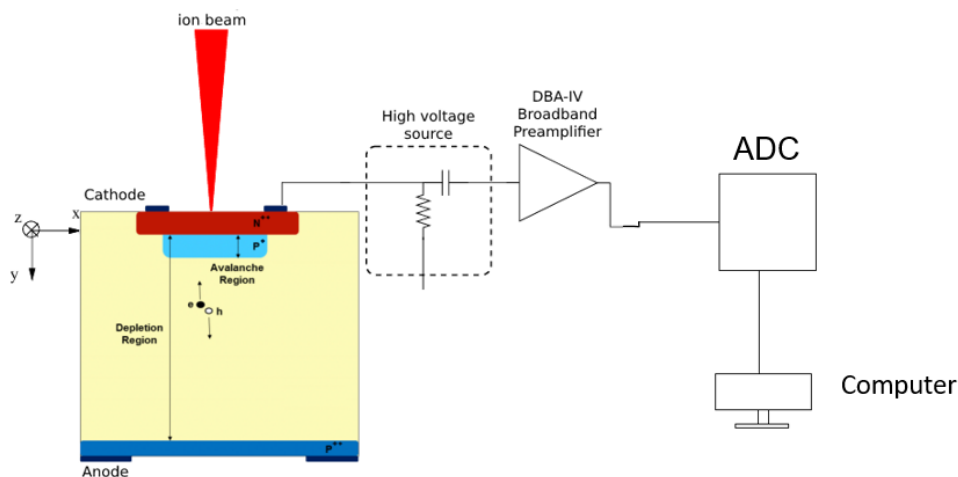
Pretpojačalo je elektroničko pojačalo koje integrira slab električni signal, generiran diodi, u izlazni signal dovoljnog intenziteta. Pretpojačalo prilagođava impedanciju kako bi signal bio iznad granice šuma i kako bi se mogao očitati na daljnim elektroničkim elementima. Pretpojačalo je u ovom slučaju specifično za našu fotodiodu te, u budućnosti, kad instaliramo dijamantnu diodu, s njom ćemo instalirati i njoj specifično pretpojačalo.

2.5.2 Pojačalo

Pojačalo je elektronički uređaj koji povećava iznos signala. Pojačalo je jedna od najvažnijih komponenti u sustavu za obradu signala za primjene u brojanju, mjerenju vremena i spektroskopiji amplitude (energije) impulsa. Ima mogućnost kontrole oblikovanja impulsa potrebne za optimizaciju analogne elektronike. Pojačalo uz pojačanje filtrira signal iz pretpojačala, miče šum. Pojačalo, strujni integrator i ADC se svi nalaze u NIM (eng. *Nuclear instrumentation module*) jedinici za napajanje.

2.5.3 Fotodioda

Pomoću osciloskopa namještamo objektne pukotine na način da u detektor upada točno određen broj iona u traženom vremenskom intervalu. Struje koje su nam potrebne za detekciju nisu velike, te sa potpuno otvorenim pukotinama možemo vrlo lako radijacijom uništiti diodu jer je razina struje na faradayevoj čašici u nA. Zato, namještanjem pukotine, reguliramo struju na red veličine 100Hz, iznos koji nam je dovoljan za jasno detektiranje snopa, a nije prejak pa neće oštetiti diodu. Ovom metodom dobivamo znatno precizniji oblik detekcije iona, te na energijama većim od granice šuma možemo detektirati pojedinačne ione. Nakon što smo sigurni da imamo snop na diodi, prebacujemo izlaz iz pojačala na ADC element (vidi sliku15) Nakon što je snop spreman, povezivanjem na ADC i računalnu analizu, možemo određivati spektar



Slika 15: Schema rada detektora na bazi fotodiode

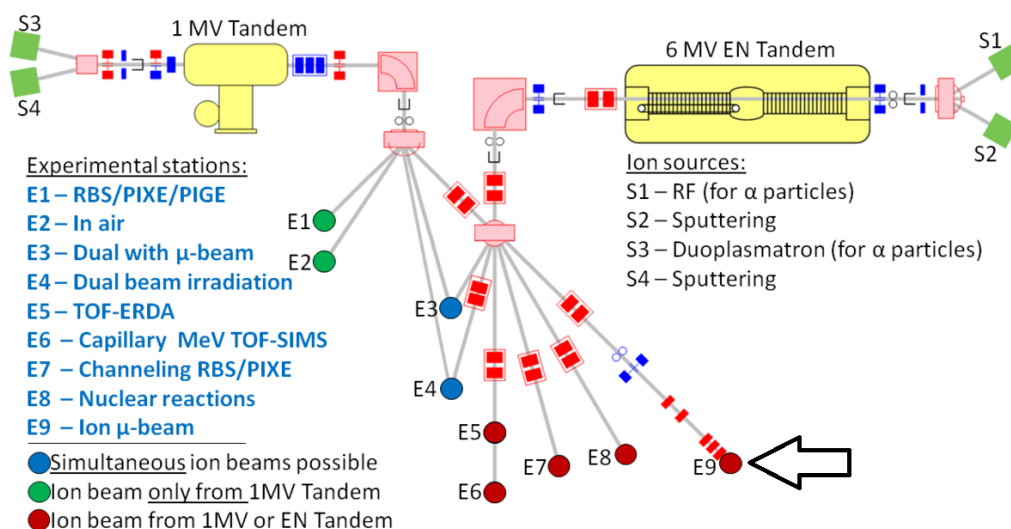
snopa, STIM, i sve ostalo potrebno za ovaj rad. U budućnosti ćemo dijamantu diodu montirati na mjesto fotodiode i cijeli postupak ponoviti analogno.

2.5.4 ADC

Analogno-digitalni pretvarač (eng. *Analog-to-digital converter*, ADC) je sustav koji pretvara analogni signal, tj. iznose energije registrirane na sustavu mjernog instrumenta, u digitalni signal, tj. broj kanala šifriran u bitovima. ADC je važan dio našeg postava jer nam priprema signal za digitalnu obradu.

2.5.5 Uklanjanje šuma

Važan dio ovog rada je bio uklanjanje šuma s obzirom da se radi o detekciji pojedinačnih iona niskih energija. Šumu na fotodiodi doprinosi svjetlo iz okoline, elektronički šum cijelog sustava, interni šum, rezolucija same diode, itd. Prvi načina uklanjanja je bio spajanje svih mjernih uređaja na isti potencijal, tj. zemlju, te smo time eliminirali bilo kakve sustavne pogreške u obliku promjene potencijala. Također je važno bilo i potpuno uzemljenje prepojačala pomoću bakrenih žica i aluminijske folije. Pokrivanje komore sa crnom tkaninom je bilo nužno radi blokiranja vidljive svjetlosti koja je upadala u komoru. Dijamantna dioda nije osjetljiva na svjetlost, niti je vodič, klasificira se kao nisko šumna dioda. Prilikom njezine instalacije predviđamo da će se šum u postavu još značajnije smanjiti.



Slika 16: Eksperimentalne linije Laboratorija za interakciju ionskih snopova, crnom strelicom je označena komora u kojoj smo ispitali debljinu neaktivnog sloja, izvor: [42]

2.5.6 Detekcija neaktivnog sloja

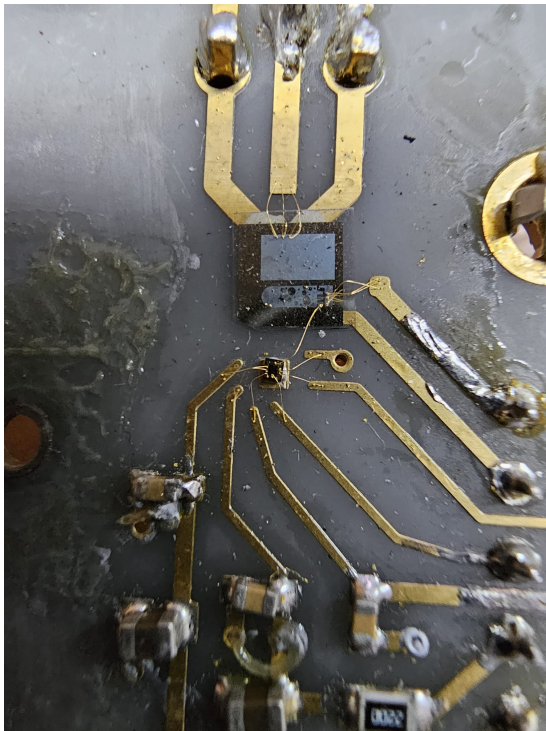
U odvojenoj komori od našeg postava u Laboratoriju za interakciju ionskih snopova, koristili smo sličan postav kao i naš, ali opremljen rotacijskim motorima. Na postav koji motori mogu rotirati smo montirali diodu koju koristimo za mjerenje u našoj originalnoj komori (vidi sliku 16). Varijacijom upadnog kuta ionskog snopa smo odredili debljinu neaktivnog sloja.

2.6 Dijamanta dioda i priprema

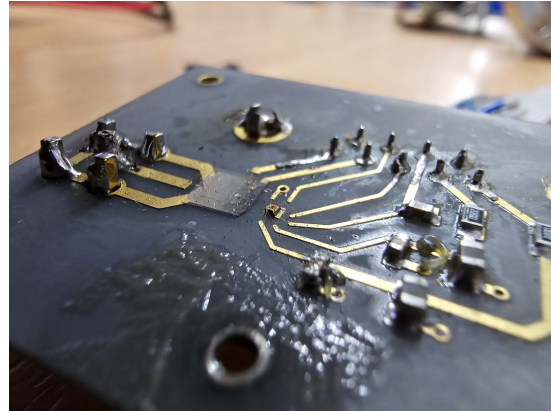
Na slikama u 17 prikazan je sustav dijamante diode sa pripadnim pretpojačalom. Slike su trenutno stanje ovog rada, na diodu ćemo montirati vodljive žice i spremne su za instalaciju u komoru. Pripremu diode i razradu elektroničkog sklopa i principa rada uzimamo iz [41].

3 Obrada podataka

Početkom rada koristili smo helij radi jednostavnosti nabave i postanoj stabilnosti u ovakvim sustavima. Sve analize koje smo radili smo ponovili sa dušikom, a nakon što smo montirali dušik nismo više radili s helijem



(a)



(b)

Slika 17: Montiranje i priprema dijamante diode za rad. Crvenim kružićem je označena dijamantna aktivna površina, plavim je označeno pretpojačalo diode.

3.1 Spektralna analiza

3.1.1 Osnova analize

Prvi korak u analizi aparature je analiza spektra. Kao što smo rekli, naš postav ima mogućnost određivanja energije pojedinačnog iona u snopu. Aplikacija Spector v2, razvijena na IRB, bilježi događaje po kanalu iz ADC-a. Unutar aplikacije postoji mogućnost analize, ali mi smo izvezli *raw data* tj. neobrađene podatke i analizirali ih u pyhtonu koristeći biblioteke *scipy* i *numpy* i biblioteke *matplotlib* i *seaborn* za vizualizaciju. U rasponu između maksimalne energije koja nas zanima ili maksimalne energije koju sustav može proizvesti i minimalne energiju koju možemo detektirati potrebna nam je krivulja koja će nam govoriti koliku stvarnu energiju bilježimo u detektoru. Ovu krivulju nazivamo kalibracijska krivulja i značajna nam je jer nam govori koje su mogućnosti našeg postava i kakve su karakteristike detekcije. Kada u budućnosti pređemo na dijamantnu diodu ova krivulja će nam biti značajna jer ćemo s njom moći znati koliku točno energiju implantiramo u uzorak.

3.2 Izračun nepouzdanosti

Uz linearnu regresiju s kojom dobivamo kalibracijsku krivulju, imamo i mogućnost pojedinačne prilagodbe na svaki od spektara u točkama mjerenja. Podatke smo prilagodili na normalnu razdiobu i pripadne nepouzdanosti smo uračunali po standardnoj statističkoj teoriji:

$$\sigma_i = \text{FWHM}_i * \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_{i,s}^2} \quad (8)$$

Gdje je i oznaka mjerenja, FWHM širina prilagođene krivulje na pola najveće vrijednosti (eng. *Full width half maximum*), σ_r nepouzdanost parametra nagiba u linearnoj regresiji i $\sigma_{i,s}$ nepouzdanost od prilagodbe normalne razdiobe na spektar itog mjerenja.

3.3 STIM

Spector unutar sebe ima mogućnosti za ovu tehniku te ćemo ga za to i koristiti. Analizu podataka smo radili u pythonu, koristeći spomenute biblioteke. Matematičku prilagodbu podataka u ovom radu je rađen prema ne linearnoj Levenberg-Marquardt metodi [43]. Prilagodba se radi na error funkciju i python funkciju *curve_fit*. Propagacije nepouzdanosti ide preko standardne statističke teorije, koristeći nepouzdanosti dane u funkcijama.

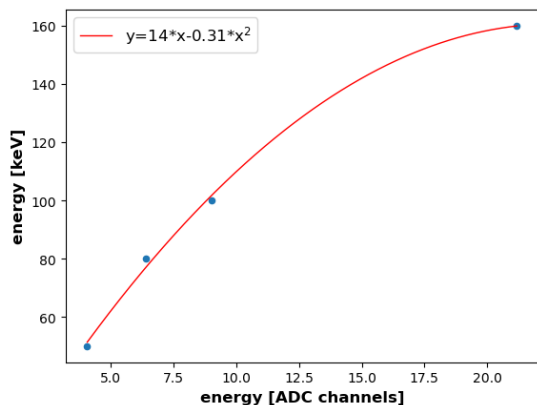
3.4 Detekcija neaktivnog sloja

Važan pojam u ovome radu je elektronička granica detekcije, elektronički šum i sposobnosti elektroničke linije. U budućnosti ćemo instalirati dijamantnu diodu i jako nam je važno da točno znamo kakve sposobnosti ima naša elektronička linije. Neaktivni sloj utječe na energiju koju možemo pouzdano detektirati, te ako zanemarimo druge efekte, jedine ostale razlike u stvarnoj energiji i detektiranoj energiji se nalaze u elektroničkoj liniji. Obradu podataka radili smo analogno kao u prošla dva slučaja

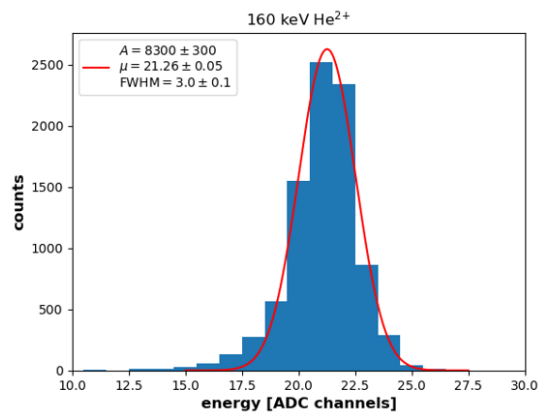
4 Rezultati mjerenja

4.1 Spektralna analiza

Analizu spektra i kalibracijsku krivulju smo napravili dva put, jednom kao probu sa helijevim ionima, drugi put sa dušikovim. Helij nam je bio ogledni primjer i za njega nismo radili nikakvu

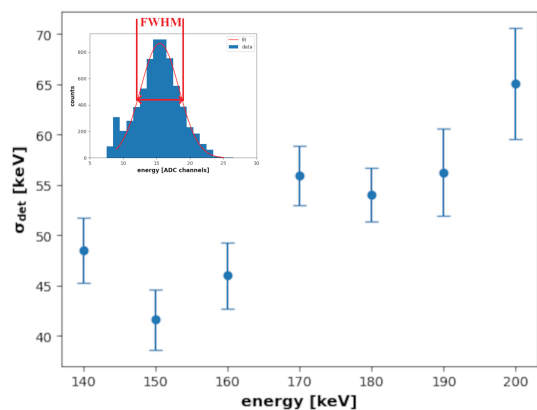


(a) Kalibracijska krivulja za helijeve ione

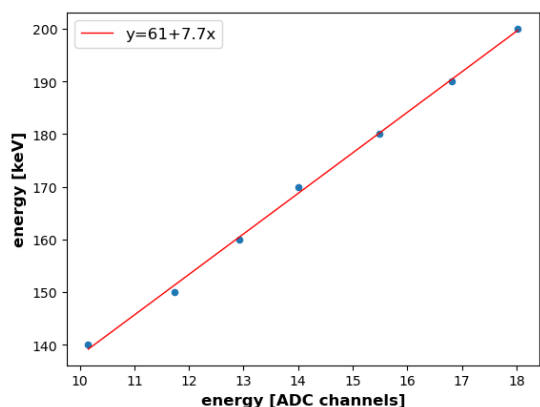


(b) Spektar detekcije He^{2+} na energiji akceleracije od 160 keV

Slika 18: Prikaz spektralne analize za helijeve ione



(a) Prikaz nepouzdanosti energije po točkama, energiju uzimamo kao otprilike točno određenu, u kutu je prikaz jednog o spektara u ovoj analizi i njegov FWHM



(b) Kalibracijska krivulja za dušik

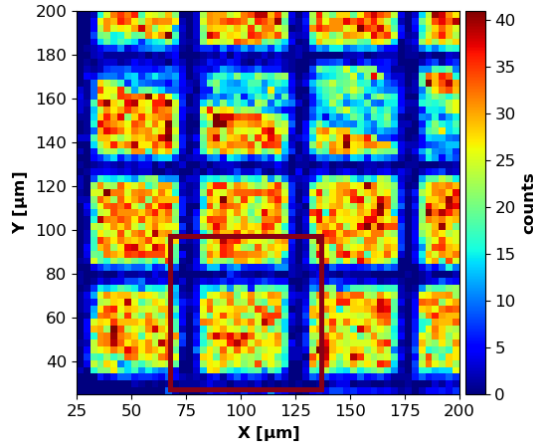
Slika 19: Prikaz spektralne analize za dušikove ione

posebnu analizu osim prikaza koncepta (vidi slike 18a i 18b).

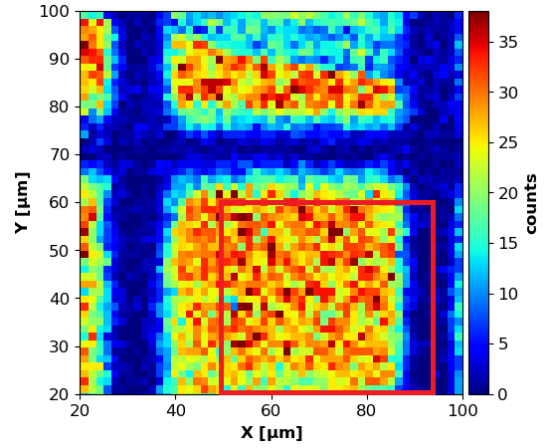
4.1.1 Dušikovi ioni

Za dušik su nam referentne dvije analize, pod slikom 19a vidimo nepouzdanost u energiji za 7 točaka energije dušikovih atoma. Analogno prikazujemo u slici 19b iznose stvarne energije i kanala na ADC-u. Konačni rezultat je linearna regresija koju imamo pod slikom 19b i ona nam daje parametre ovisnosti energije o kanalu:

$$y = (61 + 7.7x) \text{ keV} \quad (9)$$



(a) Slika mrežice na STIM-u



(b) Uvećanje slike mrežice

Slika 20: Rezultati STIM-a na mrežici, rezultati su rotirani i boje su istaknutije

Gdje je energija iona y, a kanal x.

4.2 STIM

U STIM analizi smo imali više mjerenja od kojih smo odabrali prikazane na slikama 20a i 20b⁹. Slike nisu isto mjerenje već smo na regiji označenoj sa smeđim kvadratićem pod 20a ponovili mjerenje sa kvalitetnijom rezolucijom, tj. napravili uvećanje. U analizi podataka smo odabrali regiju označenu crvenim kvadratićem na slici 20b kao područje na kojem ćemo raditi analizu radi najviše statističke relevantnosti. Rezolucija koju smo izračunali iz crvene regije na slici 20b iznosi:

$$R = (5.2 \pm 2) \mu\text{m} \quad (10)$$

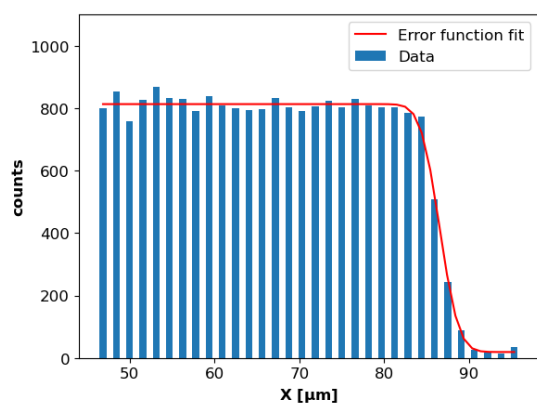
Analizu rezolucije smo vršili iz odsječka koji je prikazan na slici 21a. Spektar u toj regiji je prikazan na slici 21b

4.3 Detekcija neaktivnog sloja

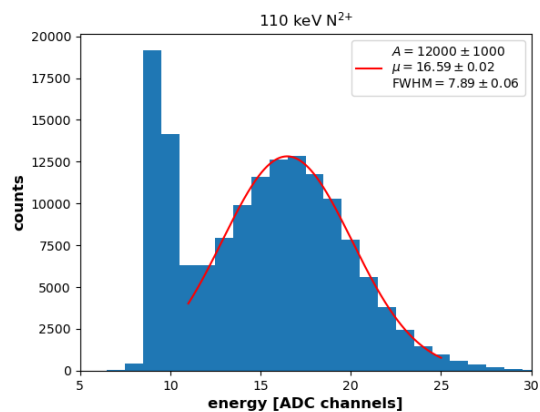
Detekciju neaktivnog sloja prikazujemo na slici 22. Rezultat prilagodbe je debljina efektivnog sloja elementarnog silicija:

$$t_{\text{eff}} = (131 \pm 2) \text{ nm} \quad (11)$$

⁹Na obje ilustracije izgleda kao da ne počinju od nula, to je radi rotacije koja je odrezala dio rezultata kako bi slika bila četvrtastog oblika

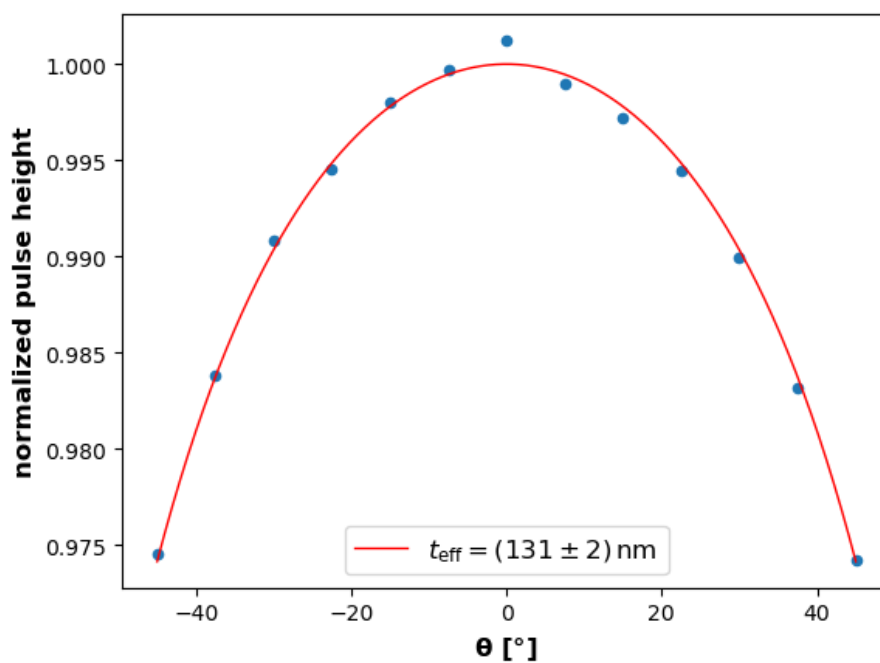


(a) Prikaz prilagodbe error funkcije na podatke mjerenja



(b) Spektar regije na kojoj smo radili izračun

Slika 21



Slika 22: Prikaz rezultata ovisnosti normalizirane visine signala o kutu upada ionskog snopa

5 Zaključak

Spektralna analiza je proizvela očekivane rezultate: Helijeva kalibracijska krivulja iznosi $y = (14x - 0.31x^2)$ keV, a dušikova $y = (61 + 7.7x)$ keV, gdje je y energija i x kanal na ADC-u. Helijevi i dušikovi ioni imaju različite režime u istim granicama energije. Vidimo na slici 18a da je energija u kvadratnoj ovisnosti o kanalu, za te parametre smo i radili prilagodbu podataka. Jasno, dušik (vidi sliku 19b) ima otprilike linearnu ovisnost. Helij koji smo koristili u mjerenjima ima ili 1 ili nijedan elektron vezan za sebe i time je puno kvalitetniji prikaz Betheovog modela (vidi jednadžbu 2). Dušik ima puno više elektrona i režim se mijenja.

Rezultat STI mikroskopije je vrijedan s obzirom da smo kao srednju vrijednost rezolucije u relevantnoj regiji dobili $5.2 \mu\text{m}$ od očekivanih $5 \mu\text{m}$ što je relativna pogreška od $R = 4\%$. Promjer objektnog kolimatora je $5 \mu\text{m}$ te kako snop nakon kolimatora nije paralelan, za očekivati je da će se dobiti lošija prostorna rezolucija. Specifično, u našem slučaju je kolimator bio jako blizu mrežice, pa je i sirenje snopa neznajno. STIM je bio bitan i kao pokazatelj da naš postav ima sve mogućnosti koje su potrebne za niskoenergetsku implantaciju te je sa završetkom tog koraka istraživanje krenulo u smjeru instalacije dijamantne diode. Bitno je napomenuti da iznos nepouzdanosti nije značajan, rezultat koji pokazuje da je eksperimentalni postav kvalitetno osmišljen i dizajniran te ispravno konstruiran.

Srednja vrijednost debljine neaktivnog sloja iznosi (131 ± 2) nm efektivne debljine silicija. Iz [44] koji su radili sličnu analizu, možemo zaključiti da je veličina koju smo dobili očekivana.

5.1 Sljedeći koraci

Koristeći rezultate za neaktivni sloj, prvi sljedeći korak je odrediti šum i granice šuma elektroničkog sustava. Kako znamo koliko je efektivno u siliciju debljine neaktivni sloj, možemo u SRIM simulacijama provjeriti koliki je njegov utjecaj na mjerenu energiju. SRIM simulacije nam u tom slučaju govore razlike u mjerenoj i stvarnoj energije čestice. Dijamantna dioda nema neaktivni sloj i tada nam je jedino važan šum elektroničke linije, granica detekcije elektroničke linije i kalibracijska krivulja sustava elektroničke linije i dijamantne diode. Sve te vrijednosti možemo ili izračunati ili kvalitetno procijeniti s podacima koje smo proizveli u ovom radu i podacima mjerenja na samoj dijamantnoj diodi.

Instalacijom dijamantne diode prelazimo u fazu istraživanja u kojoj, nakon osnovne analize opisane u ovom radu, možemo započeti ionsku implantaciju. Nakon što implantiramo ione

u dijamant, kao primjer funkcioniranja koncepta, same izmijenjene dijamante ćemo slati na danju obradu, spomenuto žarenje, kako bi se formirali NV-centri, kasnije na optičko snimanje fotoaktivnosti centara kako bi procijenili učinkovitost našeg postava. Implantirani dijamant sa aktivnim NV- centrima se tada može koristiti za sve primjene koje smo spomenuli u ovom radu, od kvante komunikacije sve do primjena biofizike i drugih. U daljoj budućnosti je plan implantirane dijamante koristiti kao jednofotonske izvore za primjene kvantne komunikacije i kao detektore u kvantnom očitovanju.

Zahvale

Htio bi se zahvaliti dr. sc. Zdravku Siketiću, voditelju Laboratorija za interakciju ionskih snopova pri Zavodu za eksperimentalnu fiziku, koji je koordinirao veliku većinu ovoga rada i bez čijeg doprinosa ovaj rad ne bi bio moguć.

Literatura

- [1] Awschalom, D. D., Hanson, R., Wrachtrup, J., & Zhou, B. B. (2018). Quantum technologies with optically interfaced solid-state spins. *Nature Photonics*, 12(9), 516–527. <https://doi.org/10.1038/s41566-018-0232-2>
- [2] Eisaman, M. D., Fan, J., Migdall, A. and Polyakov, S. V. Single-photon sources and detectors. *Rev. Sci. Instrum.* 82, 071101 (2011).
- [3] Forneris J, Traina P, Monticone DG, Amato G, Boarino L, Brida G, Degiovanni IP, Enrico E, Moreva E, Grilj V, Skukan N, Jakšić M, Genovese M, Olivero P. *Electrical stimulation of non-classical photon emission from diamond color centers by means of sub-superficial graphitic electrodes.*, *Sci Rep.* 2015 Oct 29;5:15901. doi: doi.org/10.1038/srep15901 PMID: 26510889; PMCID: PMC4625126.
- [4] <https://www.nist.gov/programs-projects/diamond-nv-center-magnetometry>, datum pristupanja 15. kolovoza 2025.
- [5] Aharonovich, I. et al. Diamond-based single-photon emitters. *Rep. Prog. Phys.* 74, 076501 (2011).
- [6] Buckley, S. et al. Engineered quantum dot single-photon sources. *Rep. Prog. Phys.* 75, 126503 (2012).
- [7] Castelletto, S. et al. A silicon carbide room-temperature single-photon source. *Nat. Mater.* 13, 151–156 (2014).
- [8] de Riedmatten, H. and Afzelius, M. in *Engineering the Atom-Photon Interaction* (eds. Predojević, A. and Mitchell, M. W.) 241–273 (Springer, 2015).
- [9] Munro, W. J., Azuma, K., Tamaki, K. and Nemoto, K. Inside Quantum Repeaters. *IEEE J. 502 Sel. Top. Quantum Electron.* 21, 78–90 (2015).
- [10] Terhal, B. M. Quantum error correction for quantum memories. *Rev. Mod. Phys.* 87, 307–346 (2015).
- [11] Degen, C. L., Reinhard, F. and Cappellaro, P. Quantum sensing. *Rev. Mod. Phys.* 89, 035002 (2017).

- [12] Yafei Zhang, Chuanyi Zang, Hongan Ma, Zhongzhu Liang, Lin Zhou, Shangsheng Li, and Xiaopeng Jia. Hpht synthesis of large single crystal diamond doped with high nitrogen concentration. *Diamond and Related Materials*, 17(2):209–211, 2008.
- [13] Luo, T., Lindner, L., Langer, J., Cimalla, V., Vidal, X., Hahl, F., Schreyvogel, C., Onoda, S., Ishii, S., Ohshima, T., Wang, D., Simpson, D. A., Johnson, B. C., Capelli, M., Blinder, R., and Jeske, J. (2022). Creation of nitrogen-vacancy centers in chemical vapor deposition diamond for sensing applications. *New Journal of Physics*, 24(3), 033030. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/ac58b6>
- [14] Smith, J. M., Meynell, S. A., Jayich, A. C. B., & Meijer, J. (2019). Colour centre generation in diamond for quantum technologies. *Nanophotonics*, 8(11), 1889–1906. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2019-0196>
- [15] Meijer J, Burchard B, Domhan M, et al. Generation of single colour centres by focused nitrogen implantation. *Appl Phys Lett* 2005;87:261909.
- [16] Haque, A., and Sumaiya, S. (2017). An overview on the formation and processing of Nitrogen-Vacancy photonic centers in diamond by ion implantation. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 1(1), 6. <https://doi.org/10.3390/jmmp1010006>
- [17] M. W. Doherty, N. B. Manson, P. Delaney, F. Jelezko, J. Wrachtrup, L. C. L. Hollenberg, *The nitrogen-vacancy colour centre in diamond*, *Physics Reports* 528 (2013) 1-45.
- [18] Livio Žužić. Razvoj in situ postava za optičku karakterizaciju implantiranih NV centara boje u dijamantu. Diplomski rad. Zagreb, 2024.
- [19] Schirhagl, R., Chang, K., Loretz, M., and Degen, C. L. (2013). Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond: Nanoscale sensors for Physics and Biology. *Annual Review of Physical Chemistry*, 65(1), 83–105. <https://doi.org/10.1146/annurev-physchem-040513-103659>
- [20] Gali, A., Fyta, M., and Kaxiras, E. (2008). Ab initio supercell calculations on nitrogen-vacancy center in diamond: Electronic structure and hyperfine tensors. *Physical Review B*, 77(15). <https://doi.org/10.1103/physrevb.77.155206>
- [21] H.C. Chang, W.W.W. Hsiao, and M.C. Su. *Fluorescent Nanodiamonds*. Wiley, 2018.

- [22] M.V. Gurudev Dutt, L. Childress, L. Jiang, E. Togan, J. Maze, F. Jelezko, A.S. Zibrov, P.R. Hemmer, M.D. Lukin, *Science* 316 (2007) 1312.
- [23] P. Neumann, N. Mizuochi, F. Rempp, P. Hemmer, H. Watanabe, S. Yamasaki, V. Jacques, T. Gaebel, F. Jelezko, J. Wrachtrup, *Science* 320 (2008) 1326.
- [24] E. Togan, Y. Chu, A.S. Trifonov, L. Jiang, J. Maze, L. Childress, M.V.G. Dutt, A.S. Sørensen, P.R. Hemmer, A.S. Zibrov, M.D. Lukin, *Nature* 466 (2010) 730.
- [25] D.J. Maertz, A.P. Wijnheijmer, G.D. Fuchs, M.E. Nowakowski, D.D. Awschalom, *Appl. Phys. Lett.* 96 (2010) 092504.
- [26] L.P. McGuinness, Y. Yan, A. Stacey, D. A. Simpson, L. T. Hall, D. Maclaurin, S. Prawer, P. Mulvaney, J. Wrachtrup, F. Caruso, R. E. Scholten, L. C. L. Hollenberg, *Nature Nanotechnology* 6 (2011) 358.
- [27] F. Dolde, H. Fedder, M.W. Doherty, T. Nöbauer, F. Rempp, G. Balasubramanian, T. Wolf, F. Reinhard, L. C. L. Hollenberg, F. Jelezko, J. Wrachtrup, *Nature Physics* 5 (2011) 243.
- [28] J.H. Cole, L.C.L. Hollenberg, *Nanotechnology* 20 (2009) 495401.
- [29] V.M. Acosta, E. Bauch, M.P. Ledbetter, A. Waxman, L.-S. Bouchard, D. Budker, *Phys. Rev. Lett.* 104 (2010) 070801.
- [30] G. Waldherr, P. Neumann, S. F. Huelga, F. Jelezko, J. Wrachtrup, *Phys. Rev. Lett.* 107 (2011) 090401.
- [31] G.D. Fuchs, V.V. Dobrovitski, D.M. Toyli, F.J. Heremans, D.D. Awschalom, *Science* 326 (2009) 1520.
- [32] L.-S. Bouchard, V.M. Acosta, E. Bauch, D. Budker, *New J. Phys.* 13 (2011) 025017.
- [33] M. Howard, J. Twamley, C. Wittmann, T. Gaebel, F. Jelezko, J. Wrachtrup, *New J. Phys.* 8 (2006) 33.
- [34] A. Beveratos, R. Brouri, T. Gacoin, A. Villing, J-P. Poizat, P. Grangier, *Phys. Rev. Lett.* 89 (2002) 187901.
- [35] R. Kolesov, B. Grotz, G. Balasubramanian, R.J. Stohr, A.A.L. Nicolet, P.R. Hemmer, F. Jelezko, J. Wrachtrup, *Nature Physics* 5 (2009) 470.

- [36] Sigmund, P. (2006). Particle penetration and radiation effects. In Springer series in solid-state sciences. <https://doi.org/10.1007/3-540-31718-x>
- [37] [https://en.wikipedia.org/wiki/Stopping_power_\(particle_radiation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Stopping_power_(particle_radiation)), datum pristupanja 16. kolovoz 2025.
- [38] https://en.wikipedia.org/wiki/Bethe_formula, datum pristupanja 17. kolovoz 2025.
- [39] Ziegler, J.F., Biersack, J.P. (1985). The Stopping and Range of Ions in Matter. In: Bromley, D.A. (eds) Treatise on Heavy-Ion Science. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-8103-1_3
- [40] https://en.wikipedia.org/wiki/Channelling_%28physics%29, datum pristupanja 19. kolovoz 2025.
- [41] Vićentijević, M., Jakšić, M., and Suligoj, T. (2023). Implantation site design for large area diamond quantum device fabrication. Scientific Reports, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40785-3>
- [42] <https://www.irb.hr/Zavodi/Zavod-za-eksperimentalnu-fiziku/Laboratorij-za-interakcije-ionskih-snopova/Clanci/Akceleratori>, datum pristupanja 20. kolovoz 2025.
- [43] Udalagama, C., Bettiol, A., Van Kan, J., Teo, E., Breese, M., Osipowicz, T., and Watt, F. (2005). An automatic beam focusing system for MeV protons. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B Beam Interactions With Materials and Atoms, 231(1–4), 389–393. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2005.01.088>
- [44] Vittone, E., Lopez, J. G., Jaksic, M., Ramos, M. J., Lohstroh, A., Pastuovic, Z., Rath, S., Siegele, R., Skukan, N., Vizkelethy, G., and Simon, A. (2019). Determination of radiation hardness of silicon diodes. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B Beam Interactions With Materials and Atoms, 449, 6–10. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.04.032>

6 Sažetak

Dušik-praznina (NV) centri u dijamantu predstavljaju jednu od najobećavajućih platformi za razvoj kvantnih tehnologija budućnosti. Ovi defekti u kristalnoj strukturi dijamanta omogućavaju kvantno računarstvo na sobnoj temperaturi, jednofotonske izvore za kvantnu komunikaciju te magnetometriju na nanometarskoj razini. Cilj ovog rada je bio dizajnirati i dovesti u rad sustav za niskoenergetsku ionsku implantaciju (manje od 200 keV) koji će omogućiti kontrolirano stvaranje NV-centara u dijamantu.

Eksperimentalni postav sastoji se od nekoliko ključnih komponenti: Prevac IS40C1 ionskog izvora za proizvodnju dušikovih iona, Cockcroft-Waltonove cijevi za ubrzavanje iona do 200 keV, magnetskog analizatora za selekciju iona prema masi i naboju, Einzel leće za fokusiranje snopa te komore za detekciju opremljene piezomotorima nanometarske preciznosti. Za karakterizaciju sustava korištena je Si poluvodička fotodioda koja će u budućnosti biti zamijenjena dijamantnom diodom.

Provedena su tri tipa mjerenja za potpunu karakterizaciju sustava. Spektralnom analizom određena je kalibracijska krivulja energije iona $y = (61 + 7.7x)$ keV, gdje je y energija iona u keV, a x broj kanala na analogno-digitalnom pretvaraču. Skeniranjem transmisijskom ionskom mikroskopijom (STIM) na bakrenoj mrežici izmjerena je prostorna rezolucija sustava $R = (5.2 \pm 2) \mu\text{m}$, što odgovara teorijskim očekivanjima s obzirom na promjer objektnog kolimatora od $5 \mu\text{m}$. Mjerenjem ovisnosti signala o upadnom kutu ionskog snopa određena je efektivna debljina neaktivnog sloja fotodiode $t_{\text{eff}} = (131 \pm 2)$ nm silicija.

Rezultati pokazuju da je konstruirani sustav potpuno funkcionalan i spreman za implantaciju dušika u dijamant. Postignuta prostorna rezolucija omogućava preciznu kontrolu lokacije NV-centara, što je ključno za buduće primjene u kvantnim uređajima. Monte Carlo simulacije provedene SRIM programom potvrđuju da energije do 200 keV omogućavaju implantaciju na dubine od nekoliko desetaka nanometara, što je optimalno za stvaranje površinskih NV-centara.

Sljedeći koraci uključuju instalaciju dijamantne diode, karakterizaciju njezine elektroničke linije i početak stvarnih eksperimenata implantacije. Nakon implantacije, dijamantni uzorci će se žariti na 600-800°C radi aktivacije NV-centara, a njihova fotoaktivnost će se verificirati optičkim mjerenjima. Konstruirani sustav otvara put prema determinističkom stvaranju NV-centara potrebnih za kvantnu komunikaciju, magnetometriju i ostale primjene kvantnih tehnologija.

Ključne riječi: NV centri u dijamantu, kvantne tehnologije, niskoenergijska ionska implantacija

7 Summary

Nitrogen-vacancy (NV) centers in diamond represent one of the most promising platforms for future quantum technologies. These defects in diamond's crystal structure enable room-temperature quantum computing, single-photon sources for quantum communication, and nanoscale magnetometry. The aim of this work was to design and commission a low-energy ion implantation system (below 200 keV) that will enable controlled creation of NV-centers in diamond.

The experimental setup consists of several key components: a Prevac IS40C1 ion source for nitrogen ion production, a Cockcroft-Walton accelerator tube for ion acceleration up to 200 keV, a magnetic analyzer for ion selection by mass and charge, an Einzel lens for beam focusing, and a detection chamber equipped with nanometer-precision piezomotors. For system characterization, a Si semiconductor photodiode was used, which will be replaced by a diamond diode in future work.

Three types of measurements were performed for complete system characterization. Spectral analysis determined the ion energy calibration curve $y = (61 + 7.7x)$ keV, where y is the ion energy in keV and x is the analog-to-digital converter channel number. Scanning transmission ion microscopy (STIM) on a copper grid measured the spatial resolution $R = (5.2 \pm 2) \mu\text{m}$, which corresponds to theoretical expectations given the $5 \mu\text{m}$ object collimator diameter. By measuring signal dependence on ion beam incident angle, the effective dead layer thickness of the photodiode was determined as $t_{\text{eff}} = (131 \pm 2)$ nm of silicon.

Results demonstrate that the constructed system is fully functional and ready for nitrogen implantation in diamond. The achieved spatial resolution enables precise control of NV-center locations, which is crucial for future quantum device applications. Monte Carlo simulations performed using the SRIM program confirm that energies up to 200 keV allow implantation at depths of several tens of nanometers, which is optimal for creating near-surface NV-centers.

Next steps include installation of the diamond diode, characterization of its electronic response, and beginning actual implantation experiments. After implantation, diamond samples will be annealed at 600-800°C to activate NV-centers, and their photoactivity will be verified through optical measurements. The constructed system paves the way toward deterministic creation of NV-centers needed for quantum communication, magnetometry, and other quantum technology applications.

Keywords: NV centers in diamonds, quantum technology, low-energy ion implantation