

# Detekcija teških iona pomoću emisije sekundarnih elektrona

---

**Retkovac Šešelja, Ivana**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:235853>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-15**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

Ivana Retkovic Šešelja

Detekcija teških iona pomoću emisije  
sekundarnih elektrona

Diplomski rad

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ  
FIZIKA; SMJER ISTRAŽIVAČKI

**Ivana Retkovic Šešelja**

Diplomski rad

**Detekcija teških iona pomoću emisije  
sekundarnih elektrona**

Voditelj diplomskog rada: Dr. sc. Milko Jakšić

Ocjena diplomskog rada: \_\_\_\_\_

Povjerenstvo: 1. \_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

Datum polaganja: \_\_\_\_\_

Zagreb, 2017.

Ovaj rad je izraden na Institutu Ruder Bošković u Zagrebu u Laboratoriju za interakcije ionskih snopova. Zahvalila bi mentoru dr. sc. Milku Jakšiću na vodstvu u izradi diplomskog rada, prenesenom znanju, predanosti i strpljenju. Zahvalila bi se cijeloj grupi iz Laboratorija za interakcije ionskih snopova, posebno dr. sc. Tončiju Tadiću, dr. sc. Ivani Zamboni, mag. phy. Natku Skukanu, te svojim kolegama i prijateljima sa smjera i svima ostalima koji su na bilo koji način pomogli u izradi ovog diplomskog rada. Željela bih se zahvaliti i svojoj mami i baki na nesebičnoj i sveobuhvatnoj podršci tijekom studija i prilikom izrade diplomskog rada.

## Sažetak

Detekcija teških iona pomoću emisije sekundarnih elektrona je od iznimne važnosti kod preciznih implantacija teških iona u materiju ili kod proizvodnje nanorupa u raznim polimerima. U ovom radu je napravljen eksperimentalni postav s dva elektronmultiplikatora ispred mete te jednim silicij-skim detektorom iza mete. Korištene su četiri mete: zlato, dijamant, mylar i silicij-nitrid. Napravljena je iscrpna kalibracija sustava prije nego što su izmjerene efikasnosti detekcije sekundarnih elektrona za četiri različita snopa:  $Li^+$  (E=1MeV),  $H^+$  (E=2MeV),  $He^{3+}$  (E=4MeV) i  $O^+$  (E=4MeV). Efikasnost ovakvog postava nije dobra za polimere kao što je mylar te keramike kao što je silicij-nitrid. Mjerenja su neprecizna zbog njihove strukture te je broj sekundarnih elektrona po ionu emitiranih iz tih materijala manji nego što je to slučaj kod zlata ili dijamanta. Kod ciljanoga istraživanja jedne mete ova metoda bi bila znatno bolje jer bi se tada mogla postići savršena simetrija. Također je primijećeno da je postav izuzetno osjetljiv na geometriju i simetričnost između dva detektora. Te očekivano je potvrđeno da za veću zaustavnu energiju se emitira više sekundarnih elektrona.

Ključne riječi: emisija sekundarnih elektrona, zaustavna enenergija, teški ioni, akcelerator, snop, implantacija iona, fotomultiplikator, elektron multiplikator

# Heavy ion detection by secondary electron emission

## Abstract

Detection of heavy ions by secondary electron emission is of great importance in precise implantation of ions in matter or in nanoholes production in different polymers. In this paper an experimental setup was made with two channeltrons (electron multiplier) in front of the target and one silicon detector behind the target. Four targets were used: gold, diamond, mylar and silicon-nitride. Before the measurements were made the efficiency tests were performed. The efficiency of secondary electron detection was made on four targets with four different blocks:  $E = 4\text{MeV}$  ( $E = 1\text{MeV}$ ),  $H^+$  ( $E = 1\text{MeV}$ ) and  $O^+$  ( $E = 4\text{MeV}$ ). The efficiency of this setup is not good for polymers such as well as for ceramics such as siliconnitride. The measurements are imprecise due to their structure and the number of secondary electrons emitted per ion impacted on such material is lower than that of gold or diamond. Using one specific target would give significantly better results because perfect symmetry could then be achieved. It is also noticeable that the setting is extremely sensitive to geometry and symmetry between the two detectors. As expected, it was confirmed that greater the stopping power is the number of secondary electrons emitted is greater.

Keywords: secondary electron emission , stopping power,heavy ions, accelerator, beam, ion implementation, photo-multipliers, channeltron,

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Emisija sekundarnih elektrona</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Akceleratori sustav na Institutu Ruđer Bošković (IRB-u)</b>	<b>6</b>
3.1	Tandem Van de Graaff . . . . .	6
3.2	Negativni ionski izvori . . . . .	7
3.2.1	Duoplazmatron . . . . .	7
3.2.2	Raspršivački negativni ionski izvor, SNICS . . . . .	8
3.2.3	Rf negativni ionski izvori . . . . .	9
3.3	Dipolni magneti . . . . .	9
3.4	Leće za fokusiranje snopa . . . . .	10
3.4.1	Magnetske . . . . .	10
3.4.2	Elektronske . . . . .	11
3.4.3	Kvadrupolne . . . . .	11
3.5	Neki od osnovnih pojmova vezanih uz snop . . . . .	11
3.5.1	Eminencija . . . . .	11
3.5.2	Sjaj . . . . .	13
3.5.3	Struja . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Detektori</b>	<b>15</b>
4.1	Silicijski detektor s površinskom barijerom . . . . .	15
4.2	Fotomultiplikatori . . . . .	15
<b>5</b>	<b>Eksperiment</b>	<b>20</b>
5.1	Mikroproba . . . . .	20
5.2	Izgradnja nosača . . . . .	21
5.2.1	Prototip 1. . . . .	21
5.2.2	Prototip 2. . . . .	22
5.2.3	Nosač detektora . . . . .	22
5.3	Uzorci . . . . .	24
<b>6</b>	<b>Mjerenja</b>	<b>26</b>
6.1	Kalibracija . . . . .	27



6.2	Mjerenje efikasnosti sistema za detekciju teških iona emisijom sekundarnih elektrona . . . . .	28
6.2.1	Zlato . . . . .	29
6.2.2	Dijamant . . . . .	29
6.2.3	Mylar . . . . .	30
6.2.4	Silicij-nitrid . . . . .	30
<b>7</b>	<b>Zaključak</b>	<b>32</b>
	<b>Literatura</b>	<b>33</b>

# 1 Uvod

Kod mjerenja implantiranih iona u debele mete metoda određivanja broja iona je neprecizna te je često izračunata pomoću modela gdje je od velike koristi SRIM simulacijski program koji pokazuje na kojoj dubini imamo deponiranje energije i koliko je energije deponirana za određeni iona i određenu metu. Želi li se precizan broj zaista implantiranih iona u realnom vremenu trebalo bi mjeriti jedan po jedan implantirani ion što ne možemo. Ako izmjerimo ion izgubili smo ga, tj. izgubili smo informacije u njemu koje smo zadali prilikom njegove proizvodnje u akceleratoru. Još jedan problem kod ovakvog razmišljanja da se prebroje jedan po jedan ion je da ioni u akceleratoru su u *bunchovima*(skupinama) te se ne mogu promatrati jedan po jedan.

Metodom mjerenja emisije sekundarnih elektrona u teoriji bi trebali biti moguće vrlo precizno odrediti koliko je iona prošlo kroz materijal ili se implantiralo. Ion koji prođe i deponira dio svoje energije u materijal izazove emisiju sekundarnih elektrona koje onda uhvati detektor te multiplikacijom pretvori u električni impuls. Dobrom kalibracijom, te daljnjim razvojem metode moglo bi se dovesti na nivo gdje bi bila na nivou teorijskih predviđanja, trenutno efikasnost još nije dovoljno dobra.

u prvom poglavlju je objašnjena sekundarna emisija elektrona te povijesni slijed proučavanja kao i neki od najbitnijih članaka za shvaćanje sekundarne emisije.

U trećem poglavlju je objašnjen princip rada Tandem Van de Graaff akceleratora te njegov povijesni razvoj. Ionski izvori koje ima laboratorij za interakciju ionskih snopova su u nastavku poglavlja objašnjeni, tj. njihov općeniti princip rada. Za skretanje snopa te za izbor atoma od interesa koriste se dipolni magneti. Princip rada te osnovne formule su izložene u trećem poglavlju. Nakon svakog rada na snopu treba se snop fokusirati. Za fokusiranje se koriste leće različitih principa rada. Osnovni pojmovi vezani za snop su izloženi u nastavku.

Četvrto poglavlje je posvećeno detektorima koji su korišteni u eksperimentu te je objašnjen njihov princip rada te povijesni razvoj fotomultiplikatora. Korištena su tri detektora od kojih je jedan silicijski postavljen iza mete te dva *channeltrona* ispred mete. Fokus ovog diplomskog je na prednjim detektorima jer se njima mjere sekundarni elektroni no bez stražnjeg detektora ne bi mogli reći ništa o efikasnosti eksperimentalnog postava. U teoriji nakon iscrpnog kalibriranja za određenu metu i

određeni snop mogao bi se eksperiment vršiti bez silicijskog detektora.

U petom poglavlju je predstavljena komora u kojoj je napravljen eksperiment ( mikroproba) te njen princip rada. Također je kronološki predstavljen razvoj nosača detektora i uzorka koji su u posljednjem pod poglavlju predstavljeni. Za uzorke su korišteni zlato, dijamant, mylar i silicij-nitrid.

U nastavku diplomskog rada su predstavljeni mjereni rezultati i zaključci doneseni na osnovu dobivenih podataka.

## 2 Emisija sekundarnih elektrona

Sekundarna emisija je isijavanje (emisija) elementarnih čestica (najčešće elektrona) s površine neke tvari koja se bombardira česticama iz vanjskog (primarnog) izvora. Energija primarne čestice često je takva da može izbaciti više sekundarnih čestica pa broj sekundarnih čestica može nadmašiti broj primarnih, što se koristi kod fotomultiplikatora.

Ovisnost najveće moguće energije sekundarnog elektrona  $E_k$  dana je sljedećom jednadžbom:

$$E_k = E_i - W_0 \quad (2.1)$$

gdje je  $E_i$  energija upadnog iona, a  $W_0$  izlazni rad koji elektron mora napraviti da bi napustio materijal. Ova formula nije jedino moguće rješenje, možemo imati slučaj gdje ion prođe kroz materijal te ostavio samo dio energije koja izazove emisiju sekundarnih elektrona. Ovaj slučaj je i najzanimljiviji jer tada detektiramo ion silicijskim detektorom iza uzorka i *channeltronima* te smo sigurni da je to pravi signal.

Ulaskom u uzorak, ionski snop prolazi kroz cijeli niz međudjelovanja s atomima u uzorku, putem međudjelovanja s jezgrama atoma ili s njihovim elektronskim omotačem. Sva ta međudjelovanja mogu se grubo podijeliti u dvije osnovne skupine:

i) "Mala" međudjelovanja su međudjelovanja iona s atomskim jezgrama atoma ili elektronskim omotačem atoma, od kojih svako unosi tek malu promjenu energije i smjera iona. To su npr. procesi vezani uz kočenje iona, te uz višestruka raspršenja iona na atomima uzorka.

ii) "Velika" međudjelovanja su sva međudjelovanja koja rezultiraju značajnom promjenom energije i smjera iona, odnosno emisijom raspršenih iona snopa, produkata nuklearnih reakcija, sekundarnih elektrona ili pak elektromagnetskog ( $X$  ili  $\gamma$ ) zračenja.

"Velika" međudjelovanja mogu biti upotrijebljena za određivanje kemijskog sastava uzorka, tj. njima se koriste analitičke metode temeljene na snopovima ubrzanih iona. S druge strane, "mala" međudjelovanja mogu biti upotrijebljena za određivanje dubine na kojoj je došlo do "velikih" međudjelovanja bitnih za analitičke metode. Pored toga, zbog svoje statističke prirode "mala" međudjelovanja često unose nepouzdanost u analitičku metodu.

Upravo znanje o kočenju iona, te višestrukim raspršenjima iona u materiji je od te-

meljne važnosti u metodama analize materijala koristeći snopove nabijenih atomskih čestica. Procesi kočenja i višestrukih raspršenja iona u uzorku doprinose kvarenju energijske rezolucije i gubitku energije ubrzanih iona. U ovu skupinu doprinosa spadaju elektronsko i nuklearno kočenje, odnosno njihov elektronski i nuklearni straggling, te doprinosi kutnog i bočnog širenja snopa uzrokovanog višestrukim elastičnim raspršenjima iona u uzorku.

Teške nabijene čestice, npr. ioni, gube svoju energiju prolaskom kroz materijal međudjelujući s jezgrama atoma u materijalu i s atomskim elektronima. Energija iona,  $E(x)$ , prolaskom kroz sloj  $\Delta x$  mijenja se te iznosi

$$E(x - \Delta x) = E(x) - S(E)\Delta x \quad (2.2)$$

gdje je  $S(E) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \Delta E / \Delta x = dE/dx$  kočenje iona, tj. gubitak energije iona za jedinicu dužine. Ono je određeno vrstom iona i materijala, te energijom  $E$  iona. Sa  $x$  označena je dužina prijeđenog puta u materijalu. U algoritmu SRIM [3] koji smo koristili za izračunavanje izražava se u  $eV/(10^{15} \text{ atoma}/cm^2)$ . [4]

Jedan od najranijih radova na temu emisije sekundarnih elektrona zbog označavanja pozitivnog iona je objavljen 1930. M. L. E. Oliphant [15] gdje su ioni bili niskih energija do  $1000V$ . Korištene su grijane i ne grijane mete. Glatki i reproducibilni rezultati su dobiveni s grijanim metama. Omjer broja emitiranih sekundarnih elektrona je bio između 20% i 70% za grijane mete te 35% do 125% za hladne mete, postotak raste s porastom energije helijevih iona.

1936., Healea i Chaffee [16] mjerili su emisiju sekundarnih elektrona s grijanog uzorka nikla bombardiranog s ionima helija. Ioni su bili energije do  $1600V$ . Postotak sekundarnih elektrona je rasao do 25 % na energiji od  $1600V$ . Postotke su kasnije morali ispravljati zbog neželjene struje raspršenih iona.

1939. Monica Healea [17] je objavila članak u kojem tvrdi da se odgovor u broju emitiranih sekundarnih elektrona pojavljuje zakrivljenost kod napona od  $1500V$  za ione deuterija te da bi moglo biti ovisno o masi.

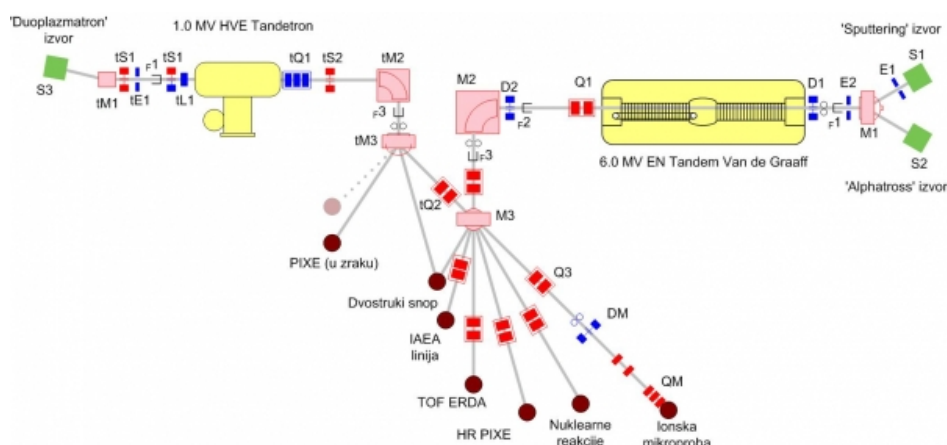
1935. Leo H. Linford [18] je proučavao emisiju sekundarnih elektrona izazvanu ionima žive u rangu od  $0.7MeV$  do  $2.35 MeV$ . Mjerio je sedam do dvadeset elektrona po ionu emitiranih s mete.

139, Hill [19] je bombardirao s protonima, helijem i vodikom od  $400kV$  nakon

što su meta i detektor bili dva sata u visokom vakuumu. Maksimalan odgovor je zabilježen s protonima. Iste godine je James S. Allen [20] mjerio emisiju sekundarnih elektrona iz metala bombardiranog protonima te je mjerio rast broja emitiranih elektrona s energijom iona. U sjeni ovih istraživanja je i ovaj diplomski rad s naglaskom na razvoj detektorskog sistema koji bi iskoristio emisiju sekundarnih elektrona u svrhu precizne detekcije doze implantiranih iona.

### 3 Akceleratori sustav na Institutu Ruđer Bošković (IRB-u)

Na Institutu Ruđer Bošković u laboratoriju za interakciju ionskih snopova trenutno postoje dva elektrostatska tandem akceleratora ( 6.0 MV HVEC EN Tandem Van de Graaff i 1.0 MV HVE Tandetron), te osam linija. Za potpune informacije može se pogledati [6]



Slika 3.1: Laboratorij za interakciju ionskih snopova [6]

Tandetron akcelerator je opremljen s dva ionska izvora: Duaplazmatron s direktnom ekstrakcijom negativnih iona (vodik), te raspršivački izvor SNICS za ostale ione (npr. Li, C, O, Si, itd.) Tandem akcelerator je također opremljen s dva ionska izvora: Alphatross koji se koristi za lake ione (helij i vodik), te SNICS kao Tandetron.

#### 3.1 Tandem Van de Graaff

Akcelerator Van de Graaff tipa poznat je od 1930-tih te je jednostavan uređaj

Na jednom njihovom kraju nalazi se kugla koja je visokonaponski izolirana od svoje okoline izolacijskim plinom, u kojoj se nalazi ionski izvor, koji emitira pozitivne ione. Sama kugla nalazi se na visokom potencijalu do nekoliko milijuna volti i spojena je s potencijalom zemlje vakuumiranom cijevi, tzv. ubrzivačkom cijevi. Pozitivni ioni se ubrzavaju kroz tu cijev i kada dođu do potencijala zemlje, imaju energiju  $e \cdot V$ , gdje je  $e$  elementarni naboj, a  $V$  napon kugle. Napon terminala (kugle), održava se stalnim dovodjenjem naboja pomoću remena, koji se rotira između terminala i potencijala zemlje i na koji se nanosi naboj pomoću tzv. četkica i visokonaponskog

pozitivnog izvora na potencijalu zemlje. [5]

Tandem Van de Graaff akceleratori su konstruirani 1960-tih kada se visokonaponska kugla premjestila s kraja akceleratora u sredinu, tj. Stavljene su akceleratorne cijevi s obje strane visokonaponske kugle dok se ionski izvor premjestio iz unutrašnjosti kugle na kraj. Dakle sada negativni ioni ulaze iz ionskog izvora u ubrzivačku cijev te su ubrzani prema terminalu, koji je na pozitivnom potencijalu. Dolaskom negativnih iona na terminal oni se sudarima s folijom ili rijetkim plinom (tzv. stripper  $N_2 + CO_2$ ) rješavaju 2 ili više elektrona, te postaju pozitivni, s nabojem koji nije jednoznačan. [5] Naime, naboj iona ima vrijednost ovisnu o energiji negativnog iona prije *strippera*, te o atomskom rednom broju i atomskoj masi iona. Vrijednosti naboja oko ravnoteže približno su opisane Gaussovom razdiobom, čija širina ovisi o atomskom rednom broju iona. [4] Tako se za određeni napon terminala dobiva od dva do nekoliko puta veća energija ionskog snopa. Konačna energija nakon ubrzivača je  $(Q + 1) \cdot e \cdot V$ , gdje je  $Q$  ionizacija izlaznog iona,  $V$  napon terminala, a  $e$  elementarni naboj. Ovakav tip ubrzivača treba biti opremljen posebnim tipovima ionskih izvora, koji emitiraju negativne ione.

Postoji ključna razlika između Tandem Van de Graaff akceleratora raznih proizvođača, način dovođenja naboja. Klasično je izolacijskim remenom a noviji tip je lanac od članaka izolatora i metala naizmjenično što ima veću sposobnost prenošenja naboja i veću homogenost količine prenešenog naboja.

## **3.2 Negativni ionski izvori**

Postoji nekoliko tipova negativnih ionskih izvora od kojih ćemo spomenuti samo neke.

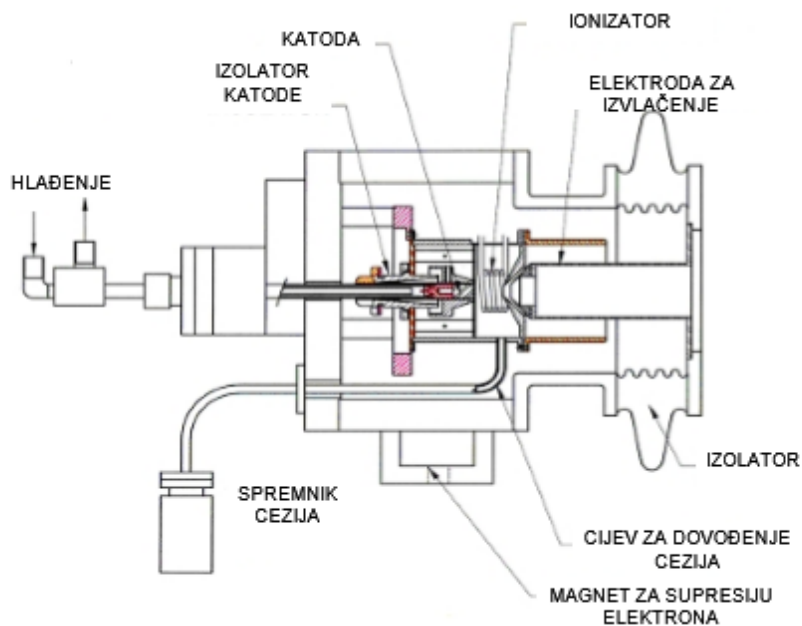
### **3.2.1 Duoplazmatron**

Ovaj tip ionskog izvora je široko rasprostranjen zbog svoje jednostavnosti, a služi za proizvodnju svih pozitivnih i većine negativnih iona plinova (osim dušika i plemenitih plinova). Ioni se izvlače iz plazme proizvedene izbojem struje između užarene katode i anode. Anoda je ploča koja u sredini ima rupu za izvlačenje iona. Uslijed izboja, stvara se kapljica plazme, kojoj su u sredini uglavnom pozitivni ioni, malo prema van nalaze se negativni ioni, a još više na rubu kapljice su elektroni. Ako je otvor



za izvlačenje namješten točno u sredinu kapljice, i primjeni se negativni potencijal izvlačenja, iz izvora će izlaziti pozitivni ioni. Ako se, pak otvor pomakne za otprilike 1 mm izvan centra, te primjeni pozitivni potencijal izvlačenja, iz izvora će izlaziti uglavnom elektroni, ali i određena količina negativnih iona, potrebnih za tandem elektrostatske ubrzivače.

### 3.2.2 Raspršivački negativni ionski izvor, SNICS



Slika 3.2: Shema tipičnog raspršivačkog ionskog izvora

Ovakvi ionski (Ref sputter) izvori koriste se uglavnom za dobivanje negativnih iona iz krutina (iako postoje i modifikacije za plinske izvorske mete). Bitni dijelovi prikazani su na slici 4. Komora izvora s jedne strane ima postavljenu čašicu napunjenu materijalom, koji sadrži željeni element u elementarnom obliku ili spoju (katoda). Katoda je električki izolirana u odnosu na tijelo izvora, nalazi se na potencijalu od -3 do -8 kV u odnosu na tijelo izvora i hladi se deioniziranom vodom ili nekom drugom izolacijskom tekućinom. Ispred katode nalazi se ionizator, optički element dobro definirane geometrije (cilindar, polusfera, konus i sl.), najčešće napravljen od tantala i ugrijan na temperaturu od oko 1250 C. On se nalazi na istom potencijalu kao i oklop, tijelo izvora, na oko -20 kV i ima rupu u sredini, da bi ioni blizu osi mogli proći kroz njega. Nakon ionizatora nalazi se konični oklop s rupom u sredini, a iza njega, na otprilike 8 mm, također konična, elektroda za izvlačenje, koja je električki

izolirana u odnosu na ionizator i nalazi se na potencijalu zemlje. Bitan dio izvora je i spremnik s cezijem, koji se može ugrijati do otprilike 250 C i nalazi se na potencijalu tijela izvora i ionizatora. Princip rada rasprašivačkog izvora je slijedeći: pare cezija prolaze iz spremnika u tijelo izvora, u neposrednu okolinu ionizatora. Kontaktom sa površinom ionizatora, cezij, koji lako otpušta jedan elektron, ionizira se i postaje električki pozitivan. Kako je katoda na negativnom potencijalu u odnosu na ionizator, cezij bude ubrzan prema katodi. Dobro definirana geometrija ionizatora omogućava fokusiranje snopa cezija na točku manju od 1 mm u promjeru na površini katode. Tako pozitivni ioni cezija energije oko 5 keV udaraju u katodu i izbijaju atome i molekule materijala katode. Jedan dio cezijevih para lijepi se na površinu katode, bez da se ionizira i na katodi tvori monoatomni sloj cezija. Taj sloj na katodi smanjuje izlazni rad čestica i time povećava šansu za izlazak negativno nabijenih iona u prostor između katode i ionizatora. Kako postoji razlika potencijala u ovom prostoru, negativni ioni se ubrzavaju u smjeru ionizatora i neki od njih prolaze kroz njegovu šuplju sredinu. Tamo ipak postoji još jače električno polje između ionizatora i elektrode za izvlačenje, te negativni ioni na kraju budu ubrzani van iz ionskog izvora.

### 3.2.3 Rf negativni ionski izvori

Ova grupa ionskih izvora, kao i prva, koristi plazmu plina, ovaj puta proizvedenu radiofrekventnim poljem, a ne električnim lukom, ali se razlikuje od prve po načinu generiranja negativnih iona. S obzirom da se većinom u plazmi nalaze pozitivni ioni i elektroni, ovi izvori prvo izvlače pozitivne ione, a tek onda, provlačeći ih kroz pare alkalnih metala (najčešće Rb, Li i Cs), konvertiraju te ione u negativne s određenom (često vrlo niskom) vjerojatnošću.

## 3.3 Dipolni magneti

Poznato je da je sila na nabijenu česticu u magnetskom polju jednaka vektorskom umnošku polja i brzine čestice te naboja čestice (za nerelativističke brzine, tipične za niskoenergijsku nuklearnu fiziku):

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (3.1)$$

u kojoj je  $\vec{F}$  sila na česticu,  $\vec{v}$  brzina čestice,  $\vec{B}$  vrijednost magnetskog polja i  $q$  naboj čestice. Kod standardnih dipolnih magneta, magnetsko polje unutar željezne jezgre je homogeno i okomito na smjer gibanja iona, tako da sila koja djeluje na ion zakreće snop u ravnini gibanja. Kroz jezgru prolazi snopovod, cijev kojom se gibaju ioni i koja je pod visokim vakuumom. Osnovna funkcija dipolnog magneta je skretanje snopa u željenom smjeru, ali i selekcija snopa kao funkcije njegovog impulsa. Postoji parametar, koji se zove magnetska rigidnost i izražava se kao:

$$R = \frac{p}{q} \quad (3.2)$$

Gdje je  $p$  impuls čestice. Sve čestice s istim  $R$  proći će istu putanju u magnetskom polju. U nerelativističkom slučaju ova relacija dakle postaje:

$$\frac{R^2}{2} = \frac{mE}{q^2} \quad (3.3)$$

Gdje je  $E$  energija iona tj. snopa. Zbog prirode putanje ionskog snopa kroz skretne magnete, takvi magneti uvijek imaju svojstvo fokusiranja snopa u horizontalnoj ravnini. Naročitim izvedbama ulaznih i izlaznih krajeva polova, moguće je dobiti i fokusiranje u vertikalnoj ravnini, u nekim slučajevima, točke vertikalnog i horizontalnog fokusa biti će na istom mjestu (tada je lakše vođenje ionskog snopa kroz sustav).

### **3.4 Leće za fokusiranje snopa**

Ovisno o energiji ionskog snopa, postoje generalno dva načina fokusiranja. Za niske energije od nekoliko eV do najviše nekoliko desetaka keV koriste se najčešće različite verzije cilindrično simetričnih (dipolnih) leća.

#### **3.4.1 Magnetske**

Cilindrična zavojnica, koaksijalna sa snopom. Kod ulaska, snop nailazi na radijalno polje, koje sa gibanjem iona tvori azimutalnu Lorenzovu silu. Nakon dijela s radijalnim poljem, nabijena čestica ulazi u područje s poljem paralelnim smjeru prostiranja snopa, a ukupna rezultirajuća sila je u smjeru osi snopa-zavojnice. Kod magneta, sile su uvijek okomite na gibanje, pa nema promjene energije.

### 3.4.2 Elektronske

Mrežna leća, snopovod je pregrađen mrežicom, velike prozirnosti, kojoj se može mijenjati potencijal neovisno o okolini. Snopovod ispred i iza mrežice su uzemljeni cilindri. Ovisno o narinutom naponu, mrežna leća može biti fokusirajuća i defokusirajuća. Dvodijelna ubrzavajuća (usporavajuća) leća (engl. gap lens): na svakom mjestu gdje se nalazi razlika potencijala, dakle 2 dijela snopovoda na različitim potencijalima, silnice električnog polja imaju putanju približnu polukružnicama. Na tom dijelu putanje nabijene čestice, ona može biti otklonjena ili usmjerena prema osi snopa. Trodijelna leća (Einzel leća) sastoji se od 3 uzastopna cilindrična dijela snopovoda, koji su međusobno izolirani. Dva vanjska dijela spojena su na potencijal zemlje a srednji može biti na pozitivnom (ubrzavajuća za negativne ione) ili negativnom (usporavajuća za negativne ione) potencijalu. Ukupno djelovanje takve leće uvijek je fokusirajuće.

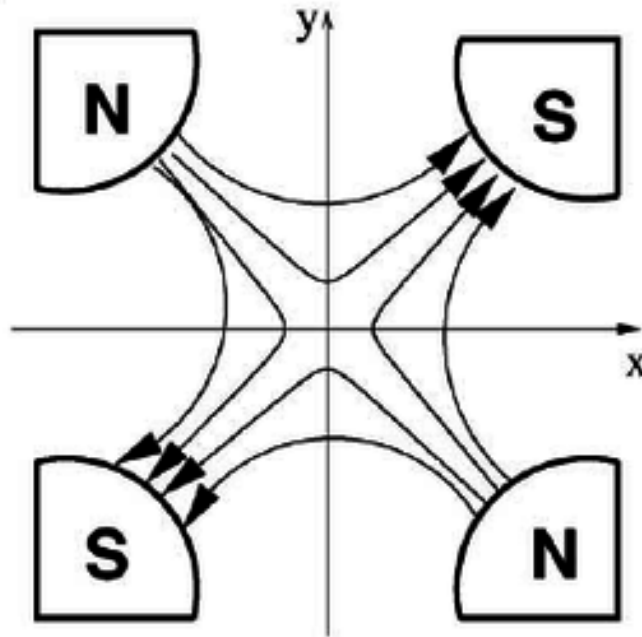
### 3.4.3 Kvadrupolne

S porastom energije, cilindrične leće počinju imati premalu moć fokusiranja, pa se koriste tzv. kvadrupolne leće: bez obzira da li su magnetske ili elektrostatske, tj. koriste li magnetsko polje i Lorenzovu silu ili elektrostatsko polje i Coulombovu silu, ideja im je ista (3.3 za magnetsku leću): Silnice polja spajaju polove kvadrupola, koji su idealno oblika hiperbole. Konfiguracija polja je takva da je gustoća silnica to gušća što smo više udaljeni od centra snopa. Ukupno djelovanje ovakvih leća je u jednoj osi fokusirajuće, a u drugoj defokusirajuće, pa obično dolaze u paru (dublet) ili trojci (triplet).

## 3.5 *Neki od osnovnih pojmova vezanih uz snop*

### 3.5.1 Eminencija

Dimenzija snopa u koordinatnom prostoru nije prava i dovoljna mjera kvalitete snopa. Naime, u nekoj točki, snop može biti fokusiran na vrlo male prostorne dimenzije, ali se takav ne može održati duž linije snopovoda, jer putanje čestica nisu paralelne. S druge strane, može se ugoditi snop na taj način da su mu putanje čestica paralelne, ali tada njegove prostorne dimenzije nisu tako male. Iz klasične i statističke mehanike



Slika 3.3: Magnetski kvadripol [7]

poznat je Liouvilleov teorem, koji govori da je volumen faznog prostora ansambla čestica očuvan. Teorem vrijedi i za snopove nabijenih čestica. Dakle, ako želimo smanjiti površinu koju zauzima presjek snopa, neminovno će se povećati disperzija transverzalnih brzina čestica u snopu. Postoje iznimke od tog teorema, na primjer, gubitak čestica iz snopa zbog sudara sa okolinom, djelovanje sila između čestica (ova situacija je prisutna samo kod vrlo intenzivnih i gustih snopova), općenito djelovanje nekonzervativnih sila na snop. U skladu s Liouvilleovim teoremom logično je definirati pojam emitancije kao:

$$\epsilon_x = \int \int \frac{dx dx'}{\pi} \quad (3.4)$$

$$\epsilon_y = \int \int \frac{dy dy'}{\pi} \quad (3.5)$$

$$x' = \frac{p_x}{p_z} \quad (3.6)$$

$$y' = \frac{p_y}{p_z} \quad (3.7)$$

Uzeli smo  $z$  za smjer gibanja snopa,  $x, y, p_x, p_y$  su impulsi čestica u transverzalnom smjeru a  $p_z$  u longitudinalnom smjeru, također imamo  $p_x, p_y \ll p_z$ . Integracija se vrši preko dogovorene ukupne površine snopa, najčešće je to 95% ako se drugačije

ne specificira. Za konstantnu energiju snopa, emitancija je, osim u gore navedenim slučajevima očuvana. Jedinica emitancije je  $\pi$ -m-rad, gdje  $\pi$  samo označava da je u definiciji emitancije uveden  $\pi$  u nazivnik. Iz gornjih relacija je očito da je emitancija zapravo umnožak dimenzije snopa i kuta rasapa za pojedinu koordinatu i opada s porastom energije snopa. Stoga se definira tzv. normalizirana emitancija kao:

$$\epsilon_{n_x} = \pi \epsilon_x \sqrt{E} \sim \int \int dx dp_x \quad (3.8)$$

gdje je  $E$  energija snopa. Ista definicija vrijedi za druge koordinate. Normalizirana emitancija je veličina, koja se ne mijenja s promjenom energije, pa daje mjeru kvalitete snopa kroz cijeli ubrzivač. Treba napomenuti da je zapravo volumen 6-D prostora  $x \cdot p_x \cdot y \cdot p_y \cdot z \cdot p_z$  konstanta (direktno iz Liouvilleovog teorema), dok zasebne normalizirane emitancije samo povremeno možemo gledati kao konstantne zasebne plohe.

### 3.5.2 Sjaj

Sjaj snopa (brightness) povezuje intenzitet struje snopa i transverzalne emitancije:

$$B = \frac{I}{\pi^2 \epsilon_x \epsilon_y} \quad (3.9)$$

odnosno, za izotropne snopove srednje emitancije  $\epsilon$ :

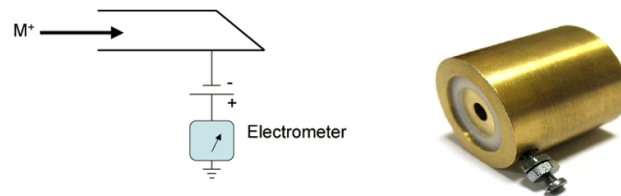
$$B = \frac{I}{\pi^2 \epsilon^2} \quad (3.10)$$

i mjeri se u  $\frac{A}{m^2 rad^2}$ . Ako je emitancija očuvana veličina, i sjaj ostaje očuvan (uz pretpostavku konstantnog broja čestica u snopu). Ova veličina nam daje osjećaj gustoće struje u snopu i paralelnosti snopa.

### 3.5.3 Struja

Jakost struje nabijenih iona prilikom ozračavanja uzorka bitan je podatak jer se odnosi na količinu iona kojom je bombardiran uzorak. Struje ionskih snopova su do reda veličine nanoampera. Na sve tri triple-ion ili dual-ion beam komore struja iona se mjeri povremenim ubacivanjem Faraday cup-a u snop iona na 30 s. Faraday cup je metalna (vodljiva) šalica dizajnirana da uhvatiti nabijene čestice u vakuumu. Do-

bivena struja može se mjeriti i koristi za određivanje broja iona koji udaraju u šalicu. Faraday cup je dobio ime po Michael Faradayu koji je prvi raspravljao o teoriji iona oko 1830. Izgled Faraday cup-a prikazan je na Slici 3.4 [8] Struja iona mora se



Slika 3.4: Shema Faraday cup-a i njegov vanjski izgled [8]

mjeriti s Faraday cup-ovima direktno iz snopa, a ne s uzorka.. U postojećim komorama najčešće se koriste micro-Faraday cup-ovi; pločica sa 7 malih Faraday cup-ova od  $\phi = 1mm$  (1 u sredini plus 6 ušesterokutu naokolo). Uz Faraday cup još se koriste Beam profile monitor-i (BPM). U BPM uređaju mjere se sekundarni elektroni emitirani sa žice koja rotira, a njihova emisija ovisi o tipu iona i energiji iona. BPM uređaj ne daje informaciju o apsolutnom iznosu struje iona, već su to samo relativna mjerenja struje.

## 4 Detektori

Za vrijeme eksperimenta smo koristili dva detektora za sekundarne elektrone te jedan za detekciju iona koji su prošli kroz uzorak. Osnovni princip rada ćemo objasniti u nastavku.

### 4.1 Silicijski detektor s površinskom barijerom

To je monokristal silicija, koji s jedne (prednje) strane ima napareni tanki sloj zlata, dok je drugi, stražnji kontakt najčešće aluminijski. To je zapravo poluvodička dioda na nametnutim reverznim naponom. Time proširimo područje osiromašenja, u kojem je visoko električno polje. Kad nabijena čestica uđe u to područje, stvore se parovi elektron-šupljina u broju proporcionalnom energiji upadne čestice. Uslijed električnog polja, elektroni i šupljine budu privučeni na pozitivni, odnosno negativni pol poluvodiča i to gibanje naboja stvara električni implus, koji se kasnije pojačava. Gubitak energije opisan je Bethe-Blochovom [9] relacijom i ovisan je o atomskom broju  $A$  i broju protona  $Z$ . Ako se iza ovakvog tankog detektora postavi drugi, debeli, dobiva se tzv. teleskop, pomoću kojega možemo razlikovati i atomski broj, a ne samo ulaznu energiju čestice.

### 4.2 Fotomultiplikatori

Treba odmah naglasiti da je ime detektora varljivo te bi ih trebali zvati elektron-multiplikatori no iz povijesnih razloga koristimo postojeći naziv. Razvoj fotomultiplikatora omogućila su dva velika povijesna otkrića: fotoelektrični efekt i sekundarna emisija elektrona. O fotoelektričnom efektu već smo detaljnije pisali, a sekundarna emisija je fenomen u kojem elektroni u vakuumskoj cijevi udaranjem u elektrodu uzrokuju emisiju dodatnih elektrona. 1902. godine Austin i Starke primijetili su kako metalne površine u koje udaraju elektroni emitiraju veći broj elektrona od upadnih. Primjena ovog otkrića za pojačavanje signala prvi put je predložena tek 1919. godine u patentu čiji je autor bio Joseph Stepian (radio je u puno poznatijem Westinghouse-ovom uredu).

Prvi fotomultiplikatori imali su samo jednu dinodu korištenu za sekundarnu emisiju elektrona. Sastojali su se od jedne polucilindrične fotokatode, jednog sekundarnog



emitera i kolektorske mreže koja je okruživala sekundarni emiter. Ovi početni fotomultiplikatori davali su otprilike osam puta više elektrona od upadnih, a radili su na frekvencijama višim od 10 kHz.

Nakon početnih modela 1934. godine, glavni cilj bio je povećati broj dobivenih elektrona u odnosu na broj upadnih. Zbog ovoga su uvedeni fotomultiplikatori koji su korišteni u više etapa. Glavni izazov bio je usmjeriti elektrone na prvu elektrodu s većim naponom, umjesto da odmah otputuju direktno na posljednju elektrodu (koja se nalazi na najvećem naponu). U početku je ovaj izazov riješen korištenjem jakih magnetskih polja koja su savijala putanje elektrona, što je označilo razvoj magnetskih fotomultiplikatora.

Kasnih 30-ih godina 20. stoljeća, Jan Rajchman iz RCA laboratorija na Princetonu prvi je pokazao primjer elektrostatskog fotomultiplikatora koji više nije morao koristiti magnetska polja. Prvi masovno proizvedeni fotomultiplikator "Type 931" bio je elektrostatskog tipa te je to postala osnova za sve buduće fotomultiplikatore.

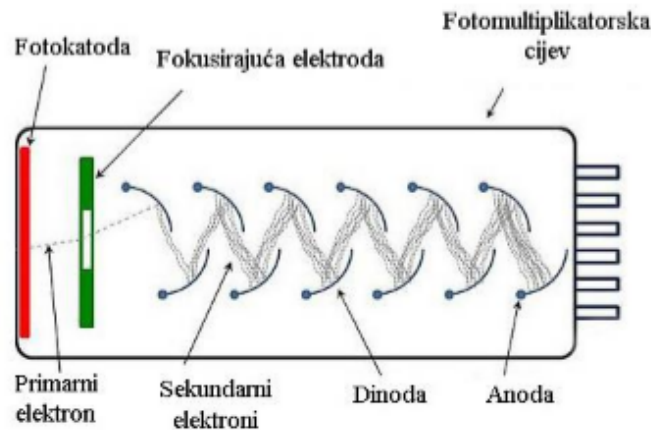
Fotomultiplikatori tipično koriste napon od 1000 do 2000 volta da bi ubrzali elektrone kroz lanac dinoda. Najnegativniji napon spojen je na katodu, a najpozitivniji na anodu. Konstrukcija lanca koji raspodjeljuje napon može se prilagoditi pojedinoj svrsi za koju je konkretni fotomultiplikator namijenjen. Neki instrumenti koji koriste fotomultiplikatore imaju potenciometar koji kontrolira napon na anodi pa time mijenja odnos broja konačnih i broja početnih elektrona.

Dok se nalaze pod visokim naponom, fotomultiplikatori moraju biti zaštićeni od svjetla u okruženju da bi se spriječio mogući dolazak previše svjetla na fotokatodu. Kod nekih modela ovo se postiže mehanički dodavanjem zatvarača koji štite cijev kada je fotomultiplikatorski dio otvoren. Druga mogućnost je dodavanje zaštitnog kruga koji snižava voltažu kada ona na anodi dođe do neke unaprijed dogovorene sigurne granice. Ako se koriste na lokaciji sa snažnim magnetskim poljima koja bi mogla skrenuti elektrone, fotomultiplikatori moraju biti i magnetski oklopljeni, najčešće tankim slojem željeza. Ovaj oklop često se drži na potencijalu katode. Fotomultiplikatori kod kojih postoje velike udaljenosti između fotokatode i prve dinode izuzetno su osjetljivi na vanjska magnetska polja.

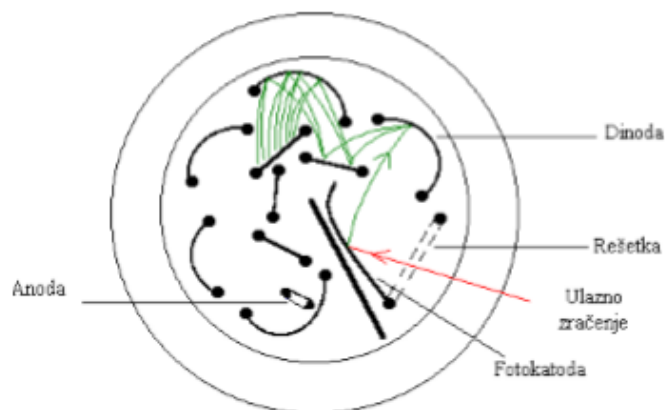
Fotomultiplikatori koriste staklena vakuumirana kućišta, a tipične konstrukcije prikazane su na slikama 4.1 i 4.2. Unutar kućišta nalazimo fotokatodu, više dinoda i anodu. Dolazeći fotoni udaraju u fotokatodu iz koje zatim izlaze elektroni proce-

som fotoelektričnog efekta. Ovi elektroni potom su usmjereni fokusirajućom elektrodom prema elektronskom multiplikatoru (sastavljenom od dinoda), gdje se elektroni umnožavaju procesom sekundarne emisije. [10]

Elektronski multiplikator sastoji se od niza elektroda koje nazivamo dinodama.



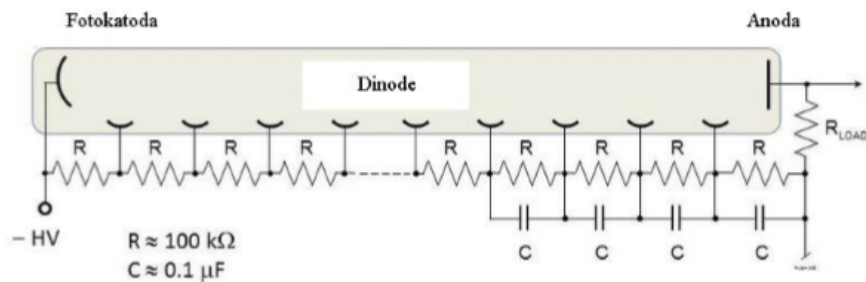
Slika 4.1: Shematski prikaz tipičnog "end-on" fotomultiplikatora [10]



Slika 4.2: Fotomultiplikator "kružnog" dizajna "side-on" koji smanjuje dimenzije, kao i put od katode do prve dinode (što smanjuje osjetljivost na vanjska magnetska polja) [10]

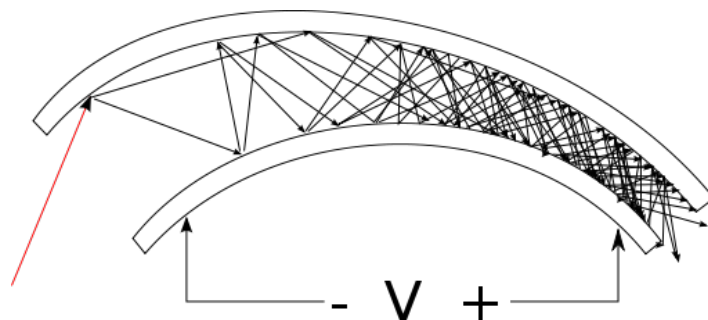
Svaka dinoda nalazi se na višem potencijalu od prethodne, za vrijednost reda veličine 100 Volta. Primarni elektroni kreću se prema prvoj dinodi jer su ubrzani električnim poljem. Oni dolaze na dinodu s kinetičkom energijom reda veličine  $100eV$ . Nakon udaranja u prvu dinodu, emitira se još nisko energetskih elektrona koji su potom ubrzani prema drugoj dinodi. Geometrija dinodnog lanca je takva da broj elektrona raste eksponencijalno na svakom koraku. Npr, ako se na svakoj dinodi za svaki dolazeći elektron proizvede pet novih elektrona te ako imamo dvanaest dinoda, onda na zadnjem koraku za svaki primarni elektron možemo očekivati  $5^{12}$  elektrona. Na

zadnjem mjestu nalazi se anoda. Veliki broj elektrona koji dolazi na anodu znači jaki puls struje koji je lako detektirati, primjerice osciloskopom. Distribucija napona koja je potrebna za seriju dinoda stvara se lančanim djeliteljem napona, kako je prikazano na slici 30. U konkretnom primjeru, fotokatoda se drži na negativnom visokom naponu reda veličine 1000 Volta, dok je anoda vrlo blizu potencijalu uzemljenja. Kondenzatori koji su spojeni preko nekoliko posljednjih dinoda imaju ulogu rezervoara naboja i pomažu održavanju napona na dinodama dok se elektroni šire kroz cijev. Ovaj dizajn izričito je ilustrativan, a u praksi se koriste različita rješenja. De-



Slika 4.3: Lanac otpornika i kondenzatora koji služi za podjelu napona na dinodama [10]

tektor koji je korišten je specifičnog dizajna kontinuirane dinode. Proizveden je u De Tech Detector Technology Inc. model 2300. Zavijena cijev (Slika ?? koja je s unutarne strane napravljena od stakla premazanim tankim slojem poluvodičkog materijala. Na prednju stranu se stavi niski napon koji služi da bi stvorili električno polje iznad uzorka te uvukli sve proizvedene sekundarne elektrone u detektor; na drugi kraj stavi se visoki napon koji služi za ubrzavanje elektrona tj. multiplikaciju. Na kraju detektora je kolektor koji treba biti na istom visokom naponu kao i i kraj multiplikacijske cijevi ili na bliskom naponu kako bi izbjegli iskrenje. Iz komore mikroprobe imamo



Slika 4.4: Skica kontinuiranog elektron multiplikatora [11]

4 izlaza, teorijski trebalo je 6 izlaza no baze detektora koje su na niskom naponu



Slika 4.5: Detektor korišten u eksperimentu [12]. Dio označen sa 1. zovemo baza; 2. je kolektor; 3. je pin

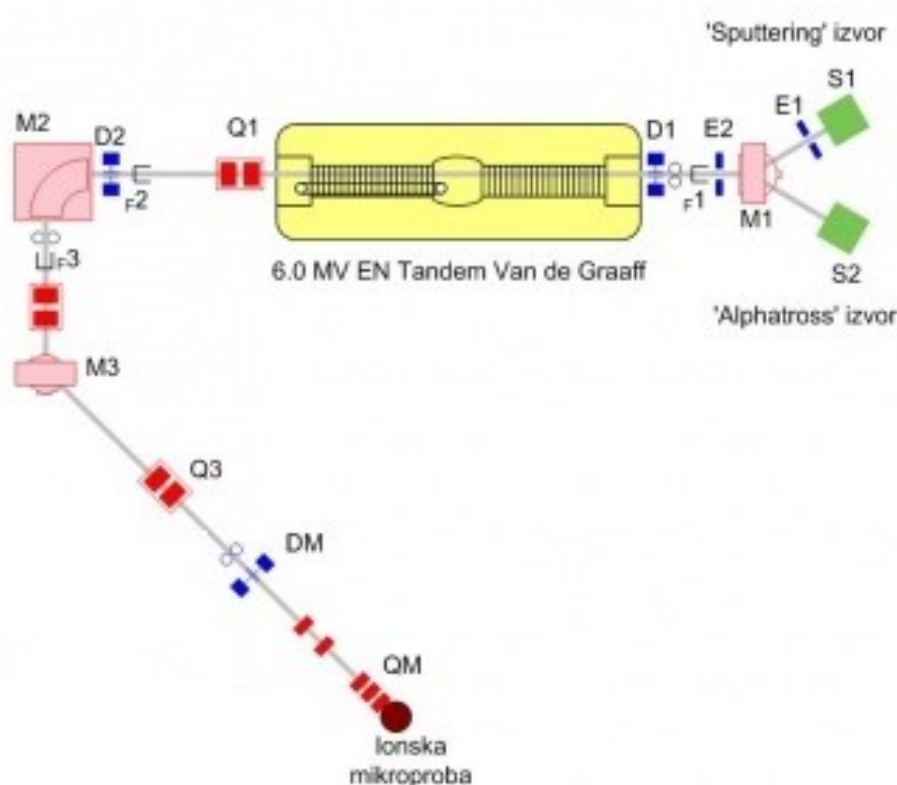
mogu dijeliti izvor, isto kao i visokonaponska dinoda na kraju detektora. Dva izlaza smo koristili kako bi odjeli signale s kolektora na predpojačalo(Camberra), zatim na pojačalo(Ortec) pa u analogno digitalni pretvarač(Canberra ADC) te u računalo sa SPECTOR programom za prikupljanje podataka. Računalo s programom za prikupljanje podataka «SPECTOR» posebno je po tome što ima spojen digitalni elektronički sklop, izrađen u laboratoriju [Ref 8] za komunikaciju s Canberra ADC sklopovima. Program upravlja elektronikom, vrši prikupljanje podataka na tvrdi disk, prikazuje podatke za vrijeme rada, te ima određeni set mogućnosti za kasniju analizu podataka. Da bi se spriječila komunikacija između detektora koji dijele ova napona te tako stvaraju veliku količinu šuma uveden je *drain*, otpornik koji povezuje visoki napon i zemlju. Otpornik mora biti reda veličine keramike koja odvaja visokonaponsku dinodu od baze na niskom naponu ( $1M\Omega$ ), korišten je otpornik od  $1.5M\Omega$

## 5 Eksperiment

Detektori sekundarnih elektrona su postavljeni na posebno dizajnirani nosač na čijoj drugoj strani se nalazila pločica s četiri uzorka: zlato, mylar, dijamant i silicij-nitrid. Sve zajedno je postavljeno u komoru, mikroprobu.

### 5.1 Mikroproba

Nuklearna mikroproba je uređaj kojim se do uzorka dovodi stabilan i prostorno fokusiran snop iona, prethodno ubrzanih ubrzivačem čestica. Na IRB-u se nalazi skorz desno u odnosu na druge eksperimentalne linije 5.1.



Slika 5.1: Shematski prikaz laboratorija u kojem su izostavljene sve linije osim one na kojoj je mikroproba gdje je eksperiment napravljen [6]

U daljnjem tekstu opisani su dijelovi i osnove rada mikroprobe u LIIS-u. Fokusiranje snopa na mikrometarske dimenzije obavlja se kombinacijom pukotina i magnetskih kvadrupola, koji prema analogiji s optikom, predstavljaju svojevrstne ionske leće (slika 5.2). Općenito, prolaskom nabijene čestice kroz magnetsko polje kvadrupola javlja se sila na česticu. Usmjerenost sile je takva da u jednoj osi česticu usmjerava prema, a u drugoj osi od središta snopa. Drugim riječima, svaki magnetski kvadrupol

istovremeno fokusira snop iona u jednoj osi, a defokusira u drugoj. Stoga se uvijek koriste kombinacije od dva, ili više kvadrupola, kako bi se snop fokusirao u obje osi. Mikroproba u LIIS-u najčešće koristi tripletnu konfiguraciju kvadrupola, kojom se postižu prostorne dimenzije ionskog snopa od  $1\mu m$  ili manje. Pritom, prva dva kvadrupola fokusiraju u istoj, a treći kvadrupol, s kraćom žarišnom duljinom, u suprotnoj osi. Početna dimenzija snopa određena je objektnim pukotinama i reda je  $100\mu m$ . Na udaljenosti  $7,5m$  od objektnih pukotina, nalaze se kolimatorske pukotine. Njihova je zadaća rezanje haloa snopa, a uobičajeni otvor im je od  $100\mu m$  do  $1mm$ . Za skeniranje snopa koristi se magnetski skener koji se kontrolira programom za prikupljanje podataka na osobnom računalu. Na kraju mikroprobne linije nalazi se komora u koju se postavljaju uzorci za analizu. Komora je opremljena s nekoliko detektora za standardne analitičke metode kao što su PIXE, RBS, STIM, itd. [1]

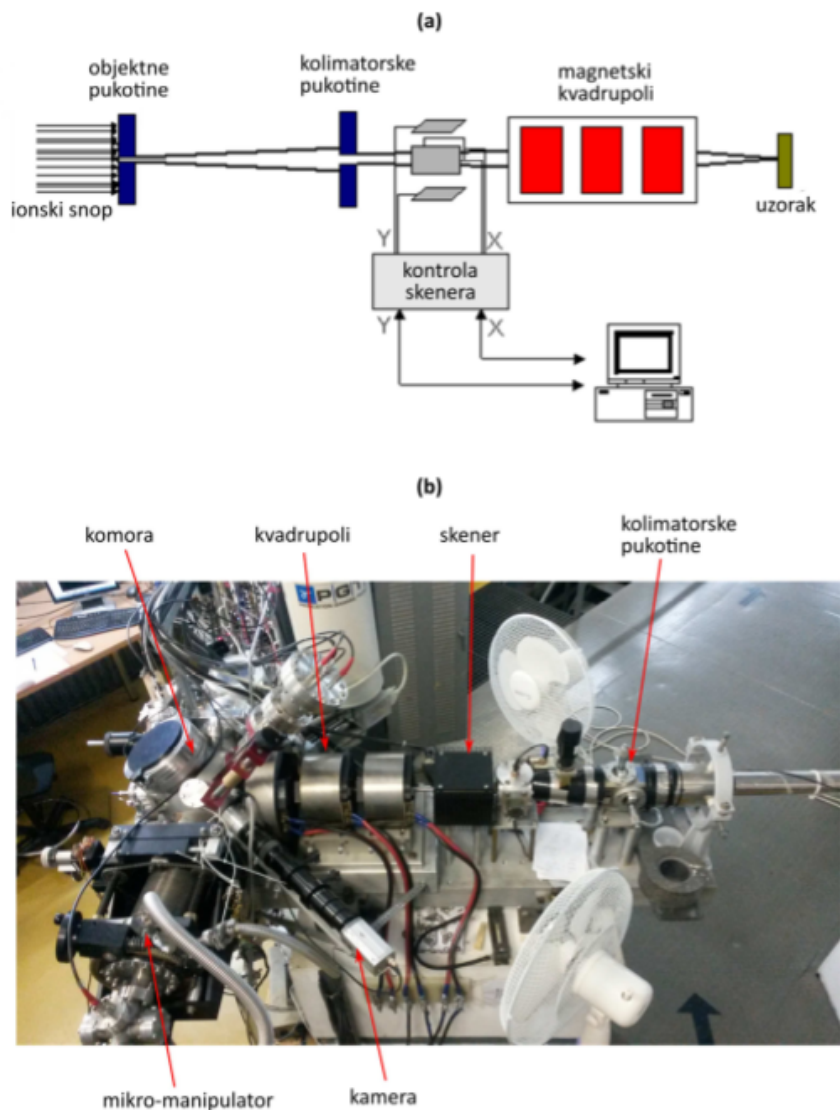
## **5.2 Izgradnja nosača**

Detektori su postavljeni u komoru na dizajniranom nosaču. Neki od zahtjeva eksperimenta su bili da su detektori izolirani od okoline, što bliže uzorku te pod pravilnim međusobnim kutom. Prolaskom kroz prototipe nosača objasniti ćemo problematiku. Svi nosači su dizajnirani i izrađeni u radionici LIIS-a na IRB-u

### **5.2.1 Prototip 1.**

Prvi i najatraktivniji nosač detektora (Slika 5.4) je imao šest otvora promjera  $6mm$  pod kutem od  $45^\circ$  u odnosu na ravninu uzorka i jedan otvor promjera  $5mm$  pod kutem od  $90^\circ$  (Slika 5.3). Otvore pod kutem smo koristili: dva za svjetlost i mikroskop kojim bi pozicionirali uzorke na putanju snopa te dva otvora za detektore s mogućnošću za 4 detektora.

Izolacijska keramika na detektorima nije dovoljno pouzdana da izdrži veliku razliku napona između krajeva detektora (do  $2000V$ ) i uzemljenog nosača napravljenoga od aluminija. Također daljnjim provjerama pokazano je da nosač radi sjenu na uzorak te nije dovoljno dobro vidljivo gdje je snop na uzorku.



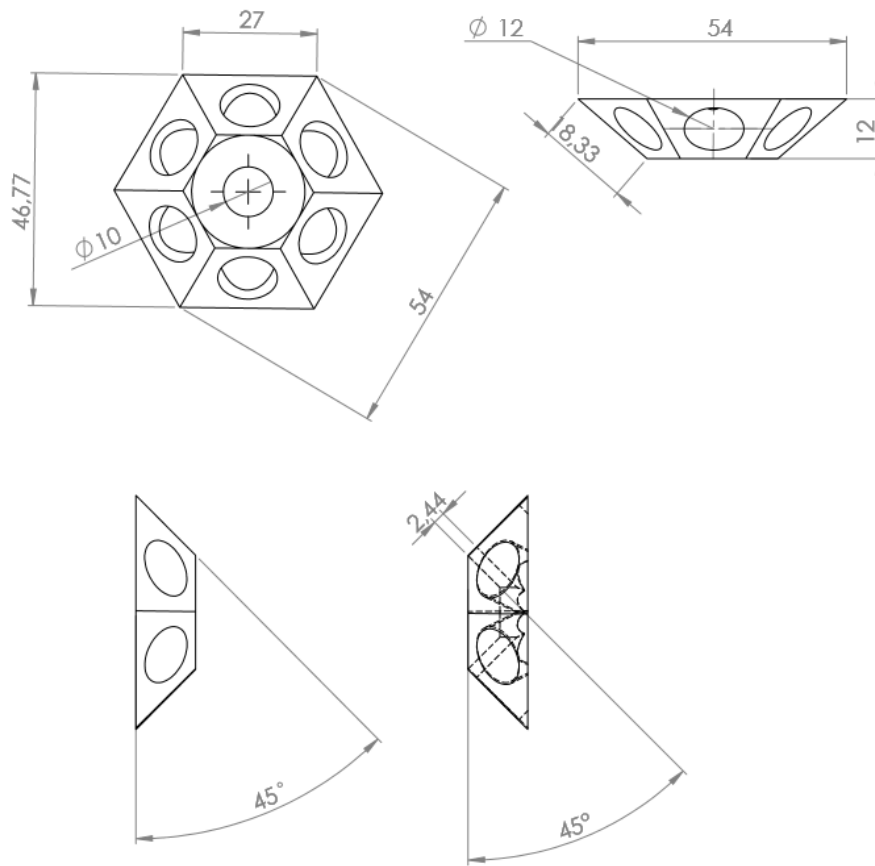
Slika 5.2: (a) Shematski prikaz nuklearne mikroprobe. (b) Snimak završnog dijela mikroprobne linije u LIIS-u. [1]

### 5.2.2 Prototip 2.

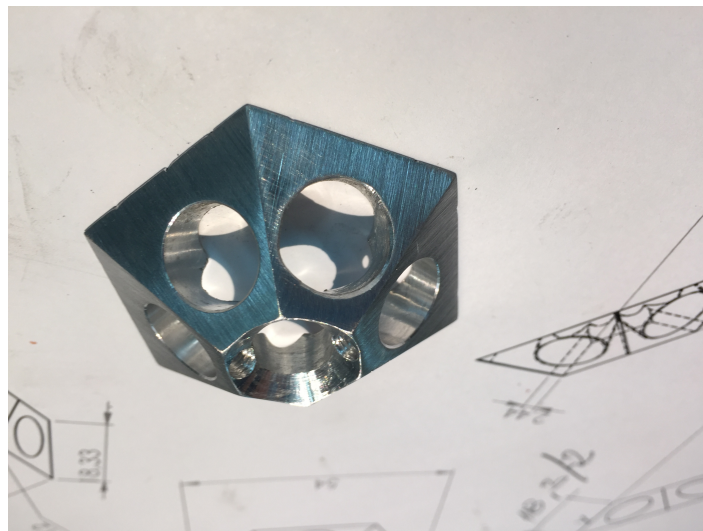
Kod drugog prototipa odbačena je ideja piramide te je napravljen luk koji s bočnih strana dozvoljava pogled mikroskopom na uzorak te isto tako i svjetlosti da obasja uzorak. Dva detektora su postavljena pod kutem od  $45^\circ$  u rupama promjera  $6\text{mm}$  te je rupa za snop koja je pod kutem od  $90^\circ$  u odnosu na uzorak promjera  $5\text{mm}$ . Ponovno je nosač napravljen od aluminija što se pokazalo ne adekvatno.

### 5.2.3 Nosač detektora

Konačno izabrani nosač detektora je zapravo napravljen po nacrtu (Slika 5.5 drugog prototipa, no napravljen od teflona (Slika 5.6). Sada izlorani detektori su bili



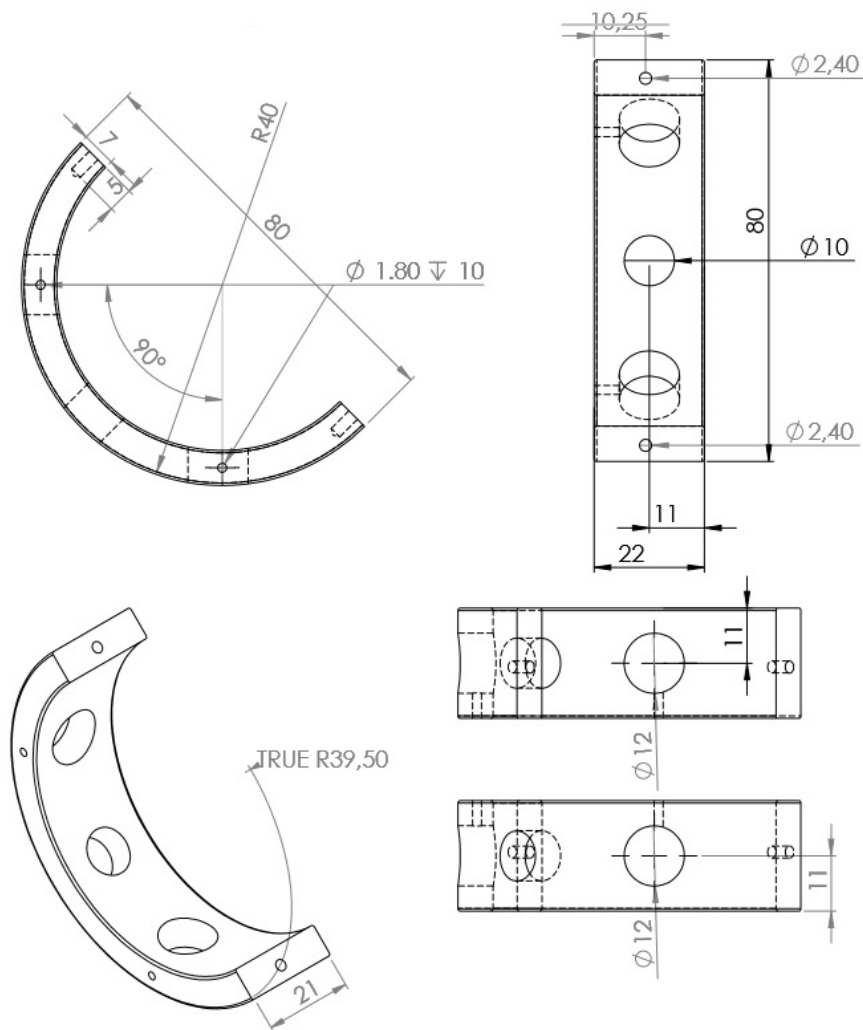
Slika 5.3: Shematski prikaz nosača [2]



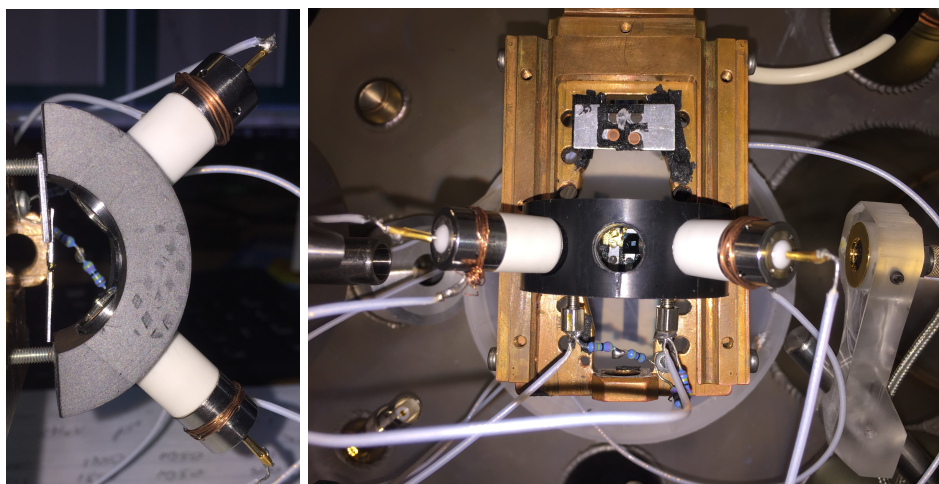
Slika 5.4: Prvi prototip nosača detektora

postavljeni u međusobnom kutu od  $90^\circ$  te je uzorak bio postavljen na dnu luka





Slika 5.5: Shema drugog prototipa nosača detektora [2]

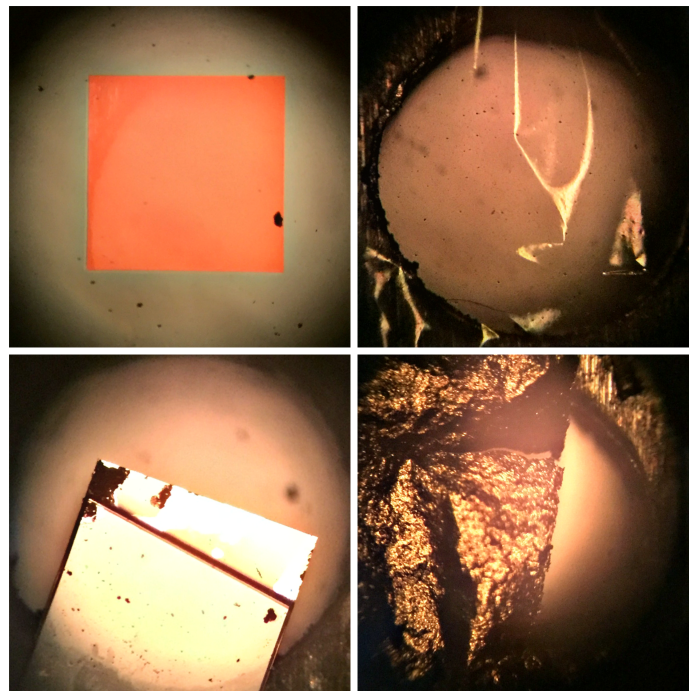


Slika 5.6: Nosač detektora

### 5.3 Uzorci

Imali smo četiri uzorka zlato, mylar, silicij-nitrid i dijamant. Zlato debljine je bilo u listićima te je postavljeno preko samo pola rupe kako bi imali najbolje određenu efi-

kasnost detektora; naime silicijski detektor postavljen iza uzoraka je na pola površine dobivao puni snop te se moglo točno odrediti koliko je iona došlo po jedinici površine. Također zlato kao dobar vodič je bilo dobro uzemljeno te nije se nabijalo i stvaralo nepostojeće signale zbog promjene električnog polja. mylar debljine je bio u foliji koja je zalijepljena preko cijele površine rupe te je zbog debljine većina snopa prolazila foliju. Silicij-nitrid je bio na prozoru silicija debljine te je bio izbor zbog svoje pravilne geometrije, također je prekrivao cijelu rupu. Dijamant je bio krhotina vrlo tankog dijamanta koji je imao preko svoje površine različite debljine što će se i vidjeti u energijskom spektru iona koji su prošli kroz dijamant, uzorak nije prikrivao cijelu rupu što je bilo pogodno za određivanje efikasnosti.

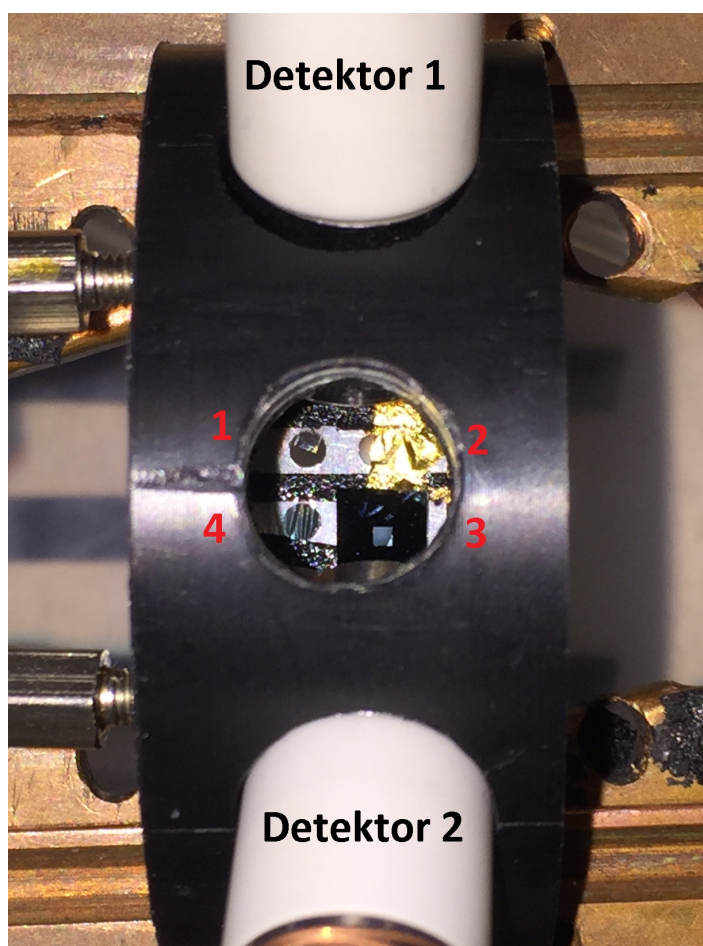


Slika 5.7: Silicij-nitrid (gore lijevo), mylar (gore desno), Dijamant (dolje lijevo) i Zlato (dolje desno)

## 6 Mjerenja

Za mjerenje su korištena 4 različita snopa pozitivnih iona :  $Li^+$  energije  $1MeV$ ,  $H^+$  energije  $2MeV$ ,  $He^{3+}$  energije  $4MeV$  i  $O^{3+}$  energije  $4MeV$ . Sami rezultati su prikazani na grafovima efikasnosti detektora o kočenju iona u materijalu (eng. Stopping power). Jedinica se sama nametnula sobzirom da za bilo kakvo smisleno prikazivanje mjerenja u grafičkom obliku bila je potrebna mjera koja uzima u obzir i atomski broj iona i njihovu energiju s obzirom da emisija sekundarnih iona ovisi o obje veličine.

Kao što će biti vidljivo geometrija u ovakvom ansamblu detektora i uzorka je od ključne važnosti. Sistem nije bio simetričan što se vidi u rezultatima. Na Slici 6.1 vidljivo je kako će se koji detektor oslovljavati u nastavku te koji su odnosi između njih i uzorka. Sva mjerenja su napravljena u vakuumu od  $10^{-7}$ , te pojačanjem 50 na



Slika 6.1: Fotografija nosača uzorka s montiranim detektorima u vakuumskoj komori. Oznake su: 1. Dijamant, 2. Zlato, 3. Silicij-Nitrid, 4. mylar.

detektoru 1 i pojačanju od 100 s atenuatorom od 20% na drugom detektoru. Veličina

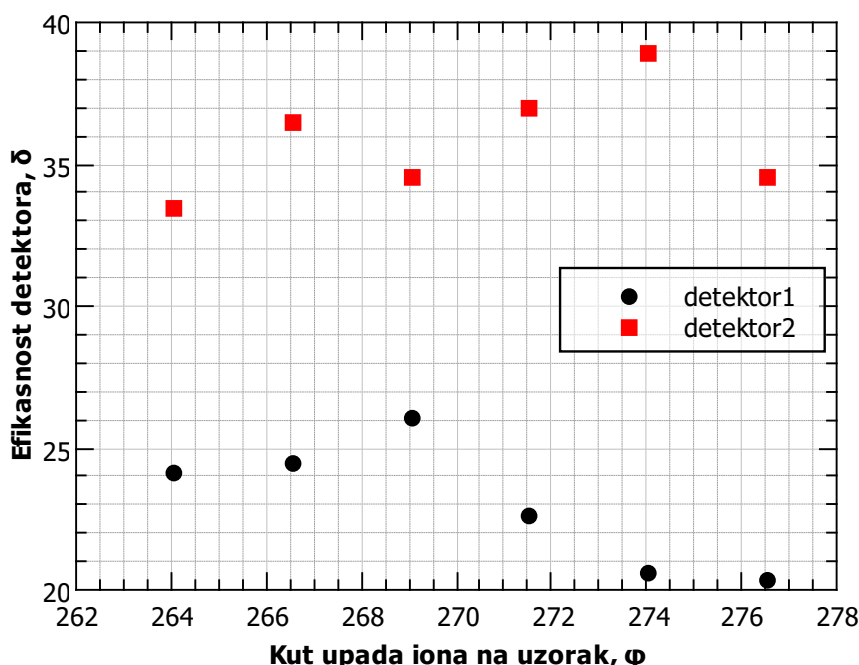
skeniranja je bila  $4 \times 1$ . Energija kočenja izračunata je pomoću programa SRIM [3]:

	Dijamant	zlato	mylar	silicij-nitrid
$Li^+$	$7.521 * 10^{-3}$	$2.812 * 10^{-3}$	$8.439 * 10^{-3}$	$6.855 * 10^{-3}$
$H^+$	$8.284 * 10^{-5}$	$3.469 * 10^{-5}$	$9.442 * 10^{-5}$	$7.602 * 10^{-5}$
$Li^+$	$4.487 * 10^{-5}$	$2.724 * 10^{-4}$	$7.174 * 10^{-4}$	$5.889 * 10^{-4}$
$Li^+$	$3.002 * 10^{-2}$	$1.232 * 10^{-2}$	$3.346 * 10^{-2}$	$2.794 * 10^{-2}$

Tablica 6.1: Opis tablice

## 6.1 Kalibracija

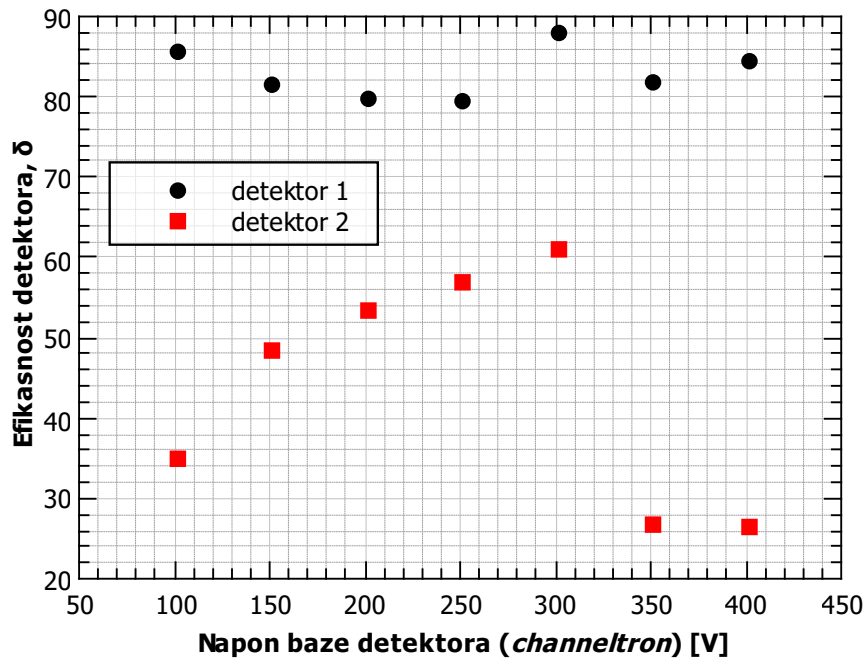
Prije početka samih mjerenja trebalo je odrediti optimalne uvijete za rad detektora. Zbog geometrijske razlike u sistemu i ne simetričnosti najpovoljniji kut za jedan detektor nije isto tako i najpovoljniji kut za drugi detektor. Određivanje optimalnog kuta je napravljeno na naponima: baza = 300 , kolektor=1850, pin=1950 za prepoznavanje fizičkih djelova na kojima su naponi stavljeni pogledati Sliku 4.5. Sa slike 6.2 možemo vidjeti da je optimalni kut  $266,5^\circ$  Kalibracija napona je bila mnogo iscr-



Slika 6.2: Kalibracijska krivulja kuta za centriranje detektorskog sistema za maksimalnu efikasnost

prija te je ovdje grafički prikazana kalibracija napona baze. Obzirom da su detektori dijelili napon baze i napon kolektora birani su naponi koji nisu najbolji ni za jedan

detektor ali su u zbroju najbolji. Prvo se kalibrirao napon između pina i kolektora te je primjećeno da su detektori najefikasniji kada su naponi između pina i kolektora različiti za 100V s većim naponom na pinu. Zatim se testiralo koji je radni napon optimalan tj za koju razliku napona između kolektora i baze detektori su najefikasniji. Primijećeno je da je to za razliku od 1550V s većim naponom logično na kolektoru. Posljednje se određivalo koji je napon na bazi optimalan i to možemo vidjeti na slici



Slika 6.3: Kalibracijska krivulja napona za određivanje maksimalne efikasnosti za napone na detektorima

6.3. Taj napon je vrlo bitan pošto on stvara električno polje koje uvlači emitirane sekundarne elektrone u detektor. Određeno je da je 300V

## 6.2 Mjerenje efikasnosti sistema za detekciju teških iona emisijom sekundarnih elektrona

Zbog dugog vremena vakuumiranja komore stavljena su sva 4 uzorka istovremeno na nosač što bi značilo da nisu svi uzorci jednako udaljeni od oba detektora i to je vidljivo u rezultatima. Sa slike 6.1 vidimo da su zlato i dijamant bliži detektoru 1 što znači da će njegova efikasnost biti veća, te da su mylar i silicij-nitrid bliži detektoru 2. Sva mjerenja su napravljena na optimalnim naponima: baza = 300 , kolektor=1850, pin=1950. Efikasnost je određena tako da se broj registriranih

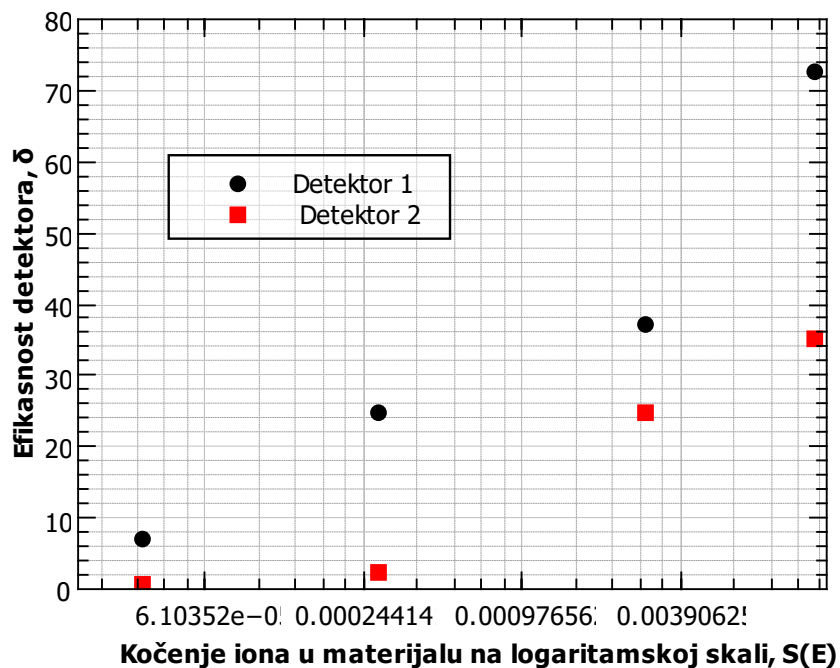
dogadaja u *channeltronu* ( $n_c$ ) podijelio s brojem dogadaja u silicijskom detektoru ( $n_s$ ) te pomnožio s 100.

$$\delta = \frac{n_c}{n_s} * 100 \quad (6.1)$$

### 6.2.1 Zlato

Na uzorku zlata kao metalnu imamo veliki broj emitiranih sekundarnih elektrona no zbog njegove naborane strokture koja je prouzročena montiranjem na nosač uzoraka nije najpogodniji za procjenu efikasnosti.

Efikasnost raste s zaustavnom energijom što je u jednu ruku jasno jer kod nižih energija nije nužno da svaki ion izazove emisiju sekundarnih elektrona. (Slika 6.4) Očekivano je detektor 1 efikasniji.

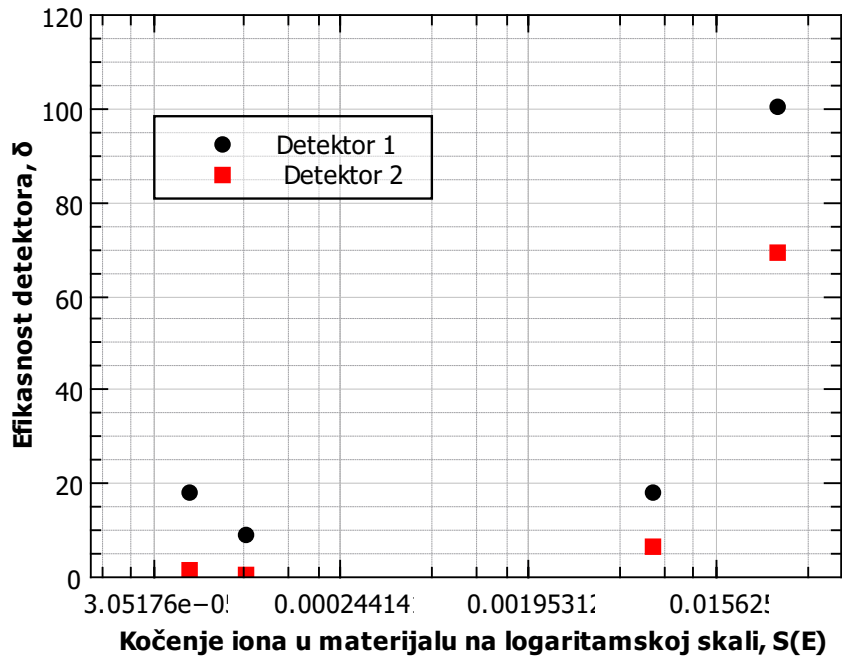


Slika 6.4: Mjerena efikasnost detektora za sekundarnu emisiju elektrona kod bombardiranja listića zlata s ionima  $H^+$ ,  $He^{3+}$ ,  $Li^+$ ,  $O^{3+}$

### 6.2.2 Dijamant

Dijamant kao poznati emiter sekundarnih elektrona je bio logičan izbor. Fragment koji je uzet kao uzorak je raznih debljina no ponaša se kao uzorak zlata s porastom zaustavne energije (Slika 6.5). Problem kod uzorka dijamanta je da se kao izolator

nabija prilikom bombardiranja pozitivnim ionima te stvara klustere naboja što je problem od određivanja efikasnosti detektora. Svaka promjena električnog polja može izazvati lažne signale tj izbijanje elektrona unutar elektron multiplikatora bez da je upadni elektron ikada došao. Detektor 2 je bliži meti te je zato i efikasniji.



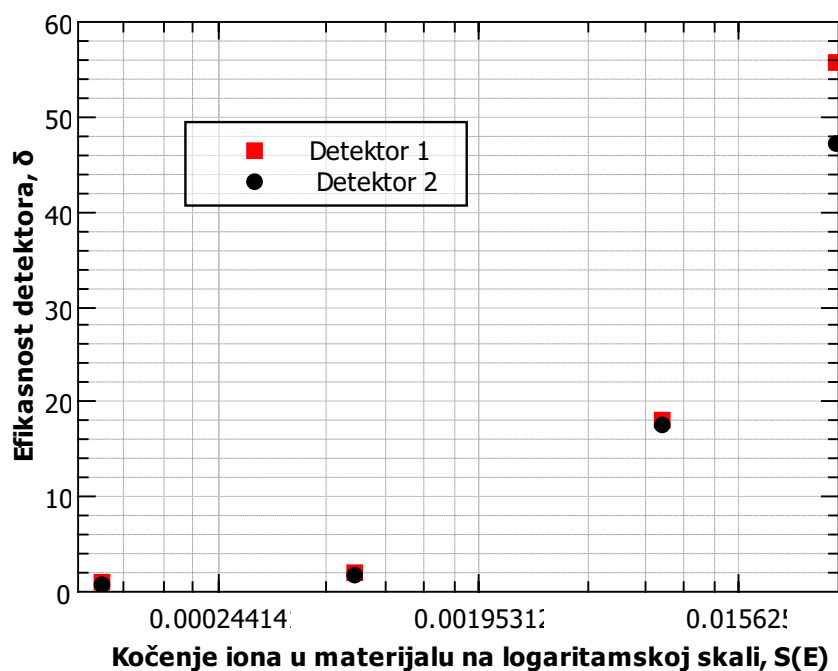
Slika 6.5: Mjerena efikasnost detektora za sekundarnu emisiju elektrona kod bombardiranja tankog dijamanta s ionima  $H^+$ ,  $He^{3+}$ ,  $Li^+$ ,  $O^{3+}$

### 6.2.3 Mylar

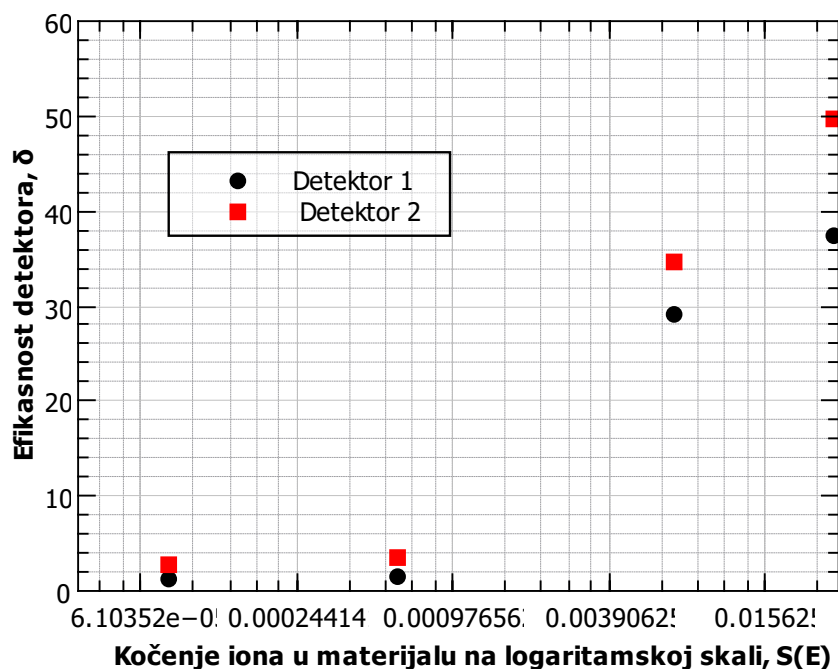
Tanka folija mylara se ispostavila kao loša meta, Bila je naborana i nije emitirala puno sekundarnih elektrona; kasnije je s porastom energije efikasnost porasla tek na nešto više od 50 %. Detektor 1 je efikasniji jer je bliži samoj meti. (Slika 6.6)

### 6.2.4 Silicij-nitrid

Silicij-nitrid također emitira puno sekundarnih elektrona no kod njega nije bilo prozora tj rupe kroz koju bi snop mogao ne smetano dolaziti do silicijskog detektora iza mete. Te se ova mjerenja moraju uzeti s rezervom. Efikasnost detektora 2 je veća jer je on bliži meti. (Slika 6.7)



Slika 6.6: Mjerena efikasnost detektora za sekundarnu emisiju elektrona kod bombardiranja listića mylara s ionima  $H^+$ ,  $He^{3+}$ ,  $Li^+$ ,  $O^{3+}$



Slika 6.7: Mjerena efikasnost detektora za sekundarnu emisiju elektrona kod bombardiranja silicij-nitrida s ionima  $H^+$ ,  $He^{3+}$ ,  $Li^+$ ,  $O^{3+}$



## 7 Zaključak

U ovom diplomskom radu je dizajniram nosač detektora i uzorka koji su potom stavljani u vakuumsku komoru naziva mikroproba. Nakon iscrpne karakteriziranje izmjerena je efikasnost mjerenja sekundarnih elektrona izazvanih upadnim ionima. Testiranja su izvedena na četiri različita uzorka s četiri različita snopa:  $Li^+$  (E=1MeV),  $H^+$  (E=2MeV) ,  $He^{3+}$  (E=4MeV) i  $O^+$  (E=4MeV) . Efikasnost ovakvog postava nije dobra za polimere kao što je mylar te keramike kao što je silicij-nitrid. Sustav je izuzetno osjetljiv na simetriju zbog električnog polja koje se uspostavlja zbog napona na bazama detektora te uzemljenosti mete. Mjerenja su neprecizna zbog njihove strukture te je broj sekundarnih elektrona po ionu u udaru na takav materijal manji nego što je to slučaj kod zlata ili dijamanta. Kod ciljanoga istraživanja jedne mete ova metoda bi bila znatno bolje jer bi se tada mogla postići savršena simetrija. Isto tako važno je naglasiti da elektronički lanac nije bio identičan za oba detektora. Kada bi zahtijevali još veću preciznost ovaj postav omogućava odvojeno napajanje detektora što bi onda smanjilo šum od komunikacije, naime čim se dva detektora povežu žicom ako jedan detektor dobije signal postoji mogućnost da i drugi detektor odašilje također signal koji on zapravo nije ni dobio. No u ovom radu to nije bilo u fokusu već sastavljanje samog postava te njegovo kalibriranje. Te očekivano je potvrđeno da za veću zaustavnu energiju se emitira više sekundarnih elektrona .

## Bibliography

- [1] Veljko Grilj,ISPITIVANJE I RAZVOJ TANKIH DIJAMANTNIH DETEKTORA, Doktorski rad,Zagreb : Prirodoslovno-matematički fakultet, 2015.
- [2] Dassault Systèmes,SolidWorks, Solid modeling computer-aided design and computer-aided engineering, 2014.
- [3] SRIM, The Stopping and Range of Ions in Matter Software, James F. Ziegler ,2013.
- [4] Pavao Roko Andričević, Prilagodba energije ubrzanih iona za ozračavanje materijala od interesa za fuzijske reaktore, Diplomski rad, Zagreb : Prirodoslovno-matematički fakultet, 2015.
- [5] Natko Skukan, Proizvodnja radioaktivnog nuklearnog snopa  ${}^7\text{Be}$ , Diplomski rad, Zagreb : Prirodoslovno-matematički fakultet, 2010.
- [6] Šestar, Baza podataka instrumenata za znanstvena istraživanja, (2017. Knjižnica Instituta Ruđer Bošković), [https://sestar.irb.hr/instrumenti\\_show.php?ID=7](https://sestar.irb.hr/instrumenti_show.php?ID=7), 2017.
- [7] D. Varentsov, P. Spiller, H. Eickhoff, D. H. H. Hoffmann ,Precise ion optical description of strip-line pulsed magnetic lenses , (2002.Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section ), [https://www.researchgate.net/figure/239355858\\_fig1\\_Fig-1-Operating-principle-of-pulsed-high-current-magnetic-lenses-From-left-to](https://www.researchgate.net/figure/239355858_fig1_Fig-1-Operating-principle-of-pulsed-high-current-magnetic-lenses-From-left-to) 2017.
- [8] Faraday cup [https://en.wikipedia.org/wiki/Faraday\\_cup](https://en.wikipedia.org/wiki/Faraday_cup), 2017.
- [9] Bethe-Bloch formula , <http://www.phy.olemiss.edu/~crealdi/PHYS415/EnergyLossof%20ParticlesinMatter.pdf>, 2017.
- [10] Marko Šolić, Spektrometar sa CCD detektorom , Diplomski rad, Zagreb : Prirodoslovno-matematički fakultet, 2015.
- [11] Electron multiplier [https://en.wikipedia.org/wiki/Electron\\_multiplier](https://en.wikipedia.org/wiki/Electron_multiplier), 2017.

- [12] De Tech, Detector Technology, Inc. <http://www.detechnic.com/channelem.html>, 2017.
- [13] M. Jakšić, I. Bogdanović Radović, M. Bogovac, V. Desnica, S. Fazinić, M. Karlušić, Z. Medunić, H. Muto, Ž. Pastuović, Z. Siketić, N. Skukan, T. Tadić / Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 260 (2007) 114-118
- [14] J.W. Murdock, G.H. Miller, Secondary electron emission due to positive ion bombardment , Iowa State Collage, Jiune 1955,
- [15] Oliphant, M. L. E., The Liberation of Electrons from Metal Surfaces PoSitive Ions, Part I–Experimental, Roy. Soc. Proc., A, vol. 12 73-387,-1930.
- [16] Healea, M., and Chaffee, E. L., Secondary Electron Emission from Hot Nickel Target Due to Bombardment Ex Hydrogen Ions, Phys. Rev., vol. 49, 925-930, 1936.
- [17] Healea M., Comparison of the Secondary Electron Emission Due to  $H_2$  and  $D_2$  Ions, Phys. Rev., vol. 55, 984, 1939.
- [18] Linford, L. H., The Emission of Electrons Swiftly Moving Mercury Ions, Phys. Rev., vol. 47, "279-282, 1935.
- [19] Hill, A. G., Buechner, W. W., Clark, J. s., and Fisk, J. B., The Emission of Secondary lectrons Under High Ener y POSitive Ion BOMBardment, Phys. Rev., vol. 55, 463- 70i 1939.
- [20] Allen, J. s., The Emission of Secondary Electrons from Metals Bombard with Protons, Phys. Rev., vol. 55, 336-339, 1939.