

# Mjerenje prostorne distribucije fokusiranih iona pomoću 2D pozicijski osjetljive PiN diode

Marko Brajković

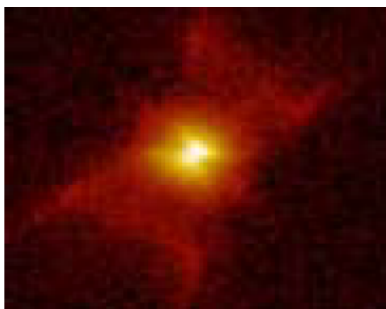
Siječanj 2018.

## Sažetak

U seminaru su izneseni rezultati mjerenja haloa ionskog snopa na mikroprobi Laboratorija za ionske snopove na IRB-u korištenjem 2D pozicijski osjetljive PiN diode. Izmjerena je prostorna i energijska rezolucija po prvi put korištene diode, te prikazan izgled i udio izmjenog haloa za snop  $^{16}\text{O}^{3+}$  energije 5,0625 MeV-a. Dobiveni rezultati pokazuju relativno visok udio nehomogenog haloa (do 8,5%).

## 1 Uvod

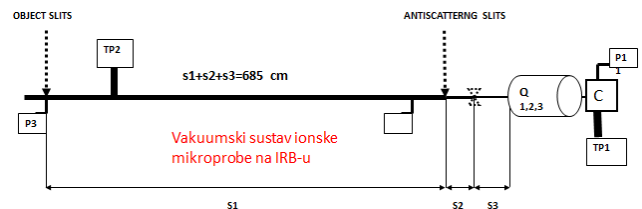
U laboratoriju za interakcije ionske snopove na Institutu Ruđer Bošković nedavno se, u suradnji s Institutom za fiziku, počelo raditi na membranama za filtriranje DNA. Eksperiment se vršio tako da se polimer (membrana) ozrači fokusiranim ionima na ionskoj mikroprobi. Svaka pozicija na membrani se ozrači pomoću samo jednog iona, čiji dolazak se detektira s detektorom smještenim iza membrane. Uz registriranje dolaska iona, signal iz detektora služi da se snop postavi na novu poziciju na membrani. Nakon toga slijedi ponovno ozračavanje s jednim ionom i tako redom (kao da iglom bušimo rupu po rupu nekim redosljedom). Kad proces ozračavanja završi, membrana se jetka i tamo gdje je prošao ion, stvori se kanal širine nekoliko 10 nm, što na kraju izgleda slično situ. Iz dosadašnjih mjerenja, uvidjelo se da se rupe pojavljuju na mjestima gdje ne bi trebale biti, tj. na mjestima gdje nije zadano ozračivanje ionima. Uzrok toga je postojanje tzv. haloa snopa, što rezultira lažnim događajima, tj. upada iona na nepredviđena mjesta na membranu.



Slika 1: Simboličan prikaz haloa snopa.

Jedinstvena i precizna definicija haloa snopa (simbolično prikazanog na slici 1) još uvijek je predmet spora znanstvenika zainteresiranih za tu materiju, ali za praktične svrhe možemo reći da je to skup čestica bilo kojeg podrijetla ili mehanizma nastanka, koji leži u području niske gustoće raspodjele snopa, daleko od njegove jezgre [1]. Što je točno niska gustoća ovisi o situaciji, no u većini slučajeva halo čini manje od 1% intenziteta snopa. Da bi naveli uzroke haloa snopa nužno je pozna-

vati eksperimentalnu liniju kroz koju prolazi ionski snop. Jedan od dva akceleratora u laboratoriju za interakcije ionskih snopova ([2]) je 6,0 MV Tandem Van der Graff akcelerator, opremljen s različitim ionskim izvorima, izbor kojeg ovisi o željenom ionskom snopu (drugi akcelerator je noviji 1,0 MV Tandetron, koji za potrebe ovog rada nije interesantan). Ionski izvor daje negativne ione koji se u prvom stupnju ubrzavaju do sredine akceleratora u maksimalnom naponu od 6 MV. Tu prolaskom kroz niski tlak dolazi do izbijanja elektrona (engl. *stripping*), što rezultira promjenom predznaka iona. Sada pozitivni ioni ponovno bivaju ubrzani u drugom stupnju prema izlazu iz akceleratora, gdje se magnetskim poljem (dobivenim magnetskim dipolima) preusmjeravaju u odabranu eksperimentalnu liniju (kojih je ukupno sedam). U našem slučaju je korištena nuklearna (ionska) mikroproba, uređaj koji sustavom magnetskih kvadrupolnih leća (uobičajeno tripletom) fokusira ionski snop do mikrometarskih dimenzija i skenira ga preko uzorka koji se nalazi u vakuumskoj komori, okružen različitim detektorima. Više je različitih faktora koji mogu oslabiti fokusiranje snopa i dovesti do pojave/rasta haloa oko fokusiranog snopa MeV-skih energija: "zalutala" magnetska polja, oscilirajuća električna polja, slab vakuum, raspršenje na otvorima, vibracije i ostalo [3]. Iz dosadašnjih istraživanja je ustanovljeno da, u dobro podešenoj eksperimentalnoj liniji, dominantan doprinos pojavi i rastu haloa dolazi od interakcije snopa sa zaostalim plinom u vakuumskoj cijevi duljine 6,85 m u sklopu linije mikroprobe (slika 2).



Slika 2: Shema vakuumnog sustava ionske mikroprobe u laboratoriju za ionske snopove na IRB-u.

Vakuumska cijev navedene duljine proteže se od objektnih otvora do kvadrupolskog postava za fokusiranje snopa. U vakuumskom sustavu gdje se koriste

turbomolekularne pumpe i metalne brtve, kao što je ovaj, zaostali plin se sastoji od laganih molekula, u prosjeku lakših od atmosfere (kao što su  $H_2$ ,  $CH_4 + H_2O$ ,  $CO + N_2$ ,  $CO_2$ ) [4]. U slučaju korištenja drugih pumpi, ali i mogućih curenja vakuuma ili kontaminacije težim ugljikovodicima, zaostali plin još jače utječe na snop i halo je nekoliko puta veći. Utjecaj tlaka zaostalog plina na halo je vidljiv iz jednadžbe stanja (idealnog) plina,  $p = (N/V)kT$ , odakle slijedi da veći tlak zaostalog plina odgovara većoj molekularnoj gustoći plina i većem broju interakcija snopa s plinom. Višestruka raspršenja u prednje kutove uzrokuju uzdužni i kutni rasap snopa, tj. uzdužnu i kutnu (negausijansku) distribuciju intenziteta snopa, dok mali gubici energije pojedinih iona u snopu u interakcijama s molekulama zraka uzrokuje energijski rasap snopa, tj. pojavu distribucije (asimetrične, s repom prema nižim energijama, to dužim što je veći broj interakcija, tj. veći tlak). Upravo od iona na rubovima ovih raspodjela se formira halo snopa. [3]

Cilj ovog seminara bio je izmjeriti halo ionskog snopa (udio i izgled) koristeći 2D pozicijski osjetljivu PiN diodu, što je jedan od mogućih načina mjerenja haloa. Ideja je bila skenirati snop izravno preko diode postavljene u vakuumsku komoru i usporediti izgled skeniranog područja dobiven očitavanjem pozicija iz diode s teorijski izgled skeniranog područja, dobiven očitavanjem pozicije skenera snopa. Kako je ovakva dioda prvi put korištena u ovom laboratoriju, dobar dio rada u laboratoriju je bio posvećen upoznavanju s diodom, postavljanjem diode na mikroprobu, sastavljanju elektroničkog lanca za očitavanje pozicija s diode, a izmjerena je i njena prostorna i energijska rezolucija.

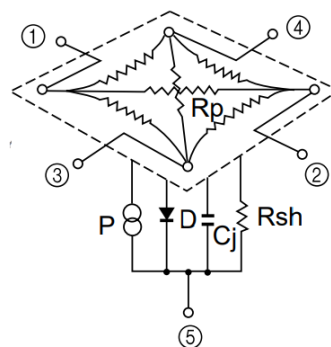
## 2 PiN dioda



Slika 3: Korištena PiN (foto)dioda. Za potrebe ovog eksperimenta uklonjeno je zaštitno stakalce iznad aktivne površine diode.

Za određivanje pozicije iona snopa korišten je dvodimenzionalni pozicijski osjetljiv detektor (engl. *position sensitive detector*, PSD), tipa S2044, kojeg je proizvela tvrtka *Hamamatsu* [5], prikazan na slici 3. PSD je u osnovi PiN dioda: otporni P-tip sloj (sloj koji ima višak "šupljina") je formiran na visokootpornom N-tip sloju silicija (sloj s viškom elektrona). Između P i N sloja se nalazi tzv. intrinzični sloj (sloj koji nema višak pozitivnih ili negativnih nositelja naboja) koji služi da se poveća aktivni sloj, tj. zona osiromašenja na spoju dva jako dopirana sloja. Kupljeni detektor je ustvari

fotodioda, namjenjena detekciji svjetlosti, pa je za potrebe ovog eksperimenta precizno uklonjen stakleni prozor ispred aktivnog sloja diode. Upadom iona (nabijene čestice) na aktivni sloj detektora (kvadrat stranica  $4,7 \times 4,7$  mm) dolazi do stvaranja elektron-šupljina parova koji pod utjecajem električnog polja idu u suprotnim smjerovima prema elektrodama i stvaraju električni signal. Shema ekvivalentnog strujnog kruga diode zajedno s položajem elektroda je prikazana na slici 4. Dioda je korištena u zapornom načinu rada (u kojem se proširuje područje osiromašenja), gdje se zaporni napon dovodio na elektrodu (katodu) spojena na N-sloj diode. Dodatno, u svakom vrhu četverostrane diode nalazi se po jedna elektroda (anoda), spojena na P-sloj diode. Signal nastao upadom iona se ovisno o poziciji upadnog iona raspodjeljuje na te četiri anode.



Slika 4: Shema ekvivalentnog strujnog kruga korištene PiN diode. Oznake: P = generator struje, D = idealna dioda,  $C_j$  = kapacitet spoja,  $R_{sh}$  = "shunt" otpornik,  $R_p$  = pozicionirajući otpornik.

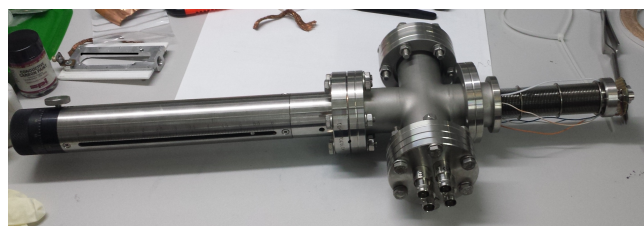
Mjereći električni signal na tim anodama moguće je izračunati položaj upada iona – koordinate (x,y) u odnosu na centar diode računamo koristeći formule:

$$\frac{(I_{X2} + I_{Y1}) - (I_{X1} + I_{Y2})}{I_{X1} + I_{X2} + I_{Y1} + I_{Y2}} = \frac{2x}{5,7\text{mm}}, \quad (1)$$

$$\frac{(I_{X2} + I_{Y2}) - (I_{X1} + I_{Y1})}{I_{X1} + I_{X2} + I_{Y1} + I_{Y2}} = \frac{2y}{5,7\text{mm}}. \quad (2)$$

## 3 Eksperimentalni postav i proces mjerenja

Nakon što je s nje odstranjeno stakalce, dioda je postavljena na nosač (cijev koja omogućava postavljanje diode u vakuumsku komoru), a na elektrode diode su zalemljene žice (slika 5).

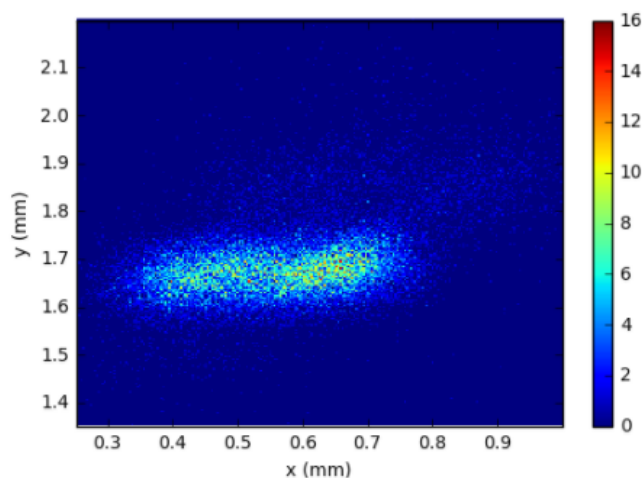


Slika 5: Nosač za PiN diodu.

Nakon postavljanja na mikroprobu dioda je maksimalno izvučena iz cijevi, ali je nedostajalo par centimetara duljine da bude u savršenom fokusu. Na katodu je spojen naponski izvor pomoću kojeg je dioda zaporno polarizirana (korišten je napon od 50 V). Izlazi iz anoda su spojeni na pretpojačalo s četiri ulaza, a signali iz pretpojačala su vođeni na pojačala i višekanalne ADC jedinice (odabran je raspon 1000 kanala), koje su spojene na računalo. Za skupljanje podataka je korišten program *Spector*. Promatranjem signala dobivenog od pulsera ujednačena su pojačanja u svim ADC-ovima. Šum signala iz anode je promatran na osciloskopu - iako je nivo šuma smanjen uzemljenjima vodiča i kontakata nije ga bilo moguće sniziti na željenu razinu, što je bitno utjecalo na smanjenu rezoluciju diode- FWHM signala iz pulsera je iznosio 5%. Korišten je ionski snop  $^{160}\text{Er}^{3+}$  energije 5,0625 MeV struje 100 Hz (što je dosta mala struja). To znači da u jednoj sekundi dolazi otprilike 100 iona na diodu, pri čemu upadom iona na diodu nastaju signali na četiri anode (naponski pulsevi) koji odlaze, preko pretpojačala i pojačala, u četiri ADC jedinice i definiraju poziciju iona na diodi (prema formulama 1 i 2). Skeniranje snopom se vrši djelovanjem djelovanjem magnetskih polja kvadrupolskog tripleta - skenirano je područje kvadratnog oblika, 128x128 piksela. Dimenzije skeniranog područja su određene na način da je u fokus snopa postavljena bakrena mrežica od 400 zarezova po inču, nakon čega je promatrana slika mrežice u *Spector*-u što je omogućilo određivanje veličine jednog piksela ( $2,156 \mu\text{m}$ ). Izvršena su skeniranja  $276 \times 276 \mu\text{m}^2$ ,  $1380 \times 1380 \mu\text{m}^2$  te skeniranja  $4,3 \times 276 \mu\text{m}^2$  i  $276 \times 4,3 \mu\text{m}^2$  za određivanje rezolucije diode u  $x$  i  $y$  smjeru. Rezultati su obrađeni u *Python*-u. ADC-ovi ne registriraju isti ion u identičnom vremenskom trenutku (postoji mala razlika) stoga su naknadno odvojeni koincidentni događaji, uz vremenski prozor od  $50 \mu\text{s}$ .

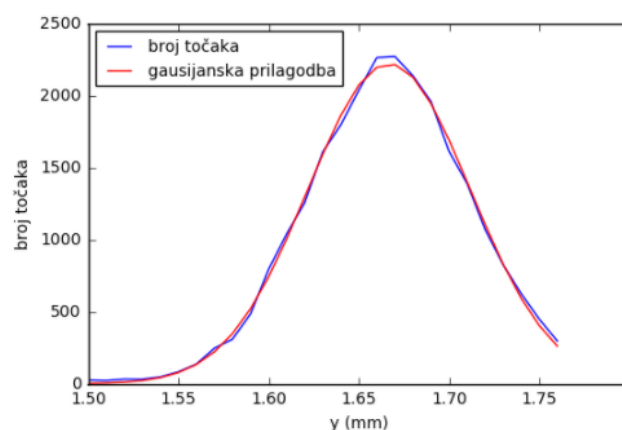
## 4 Rezultati i diskusija

### 4.1 Prostorna rezolucija diode



Slika 6: Skeniranje samo u  $x$  smjeru (skenirano područje  $276 \times 4,3 \mu\text{m}^2$ ).

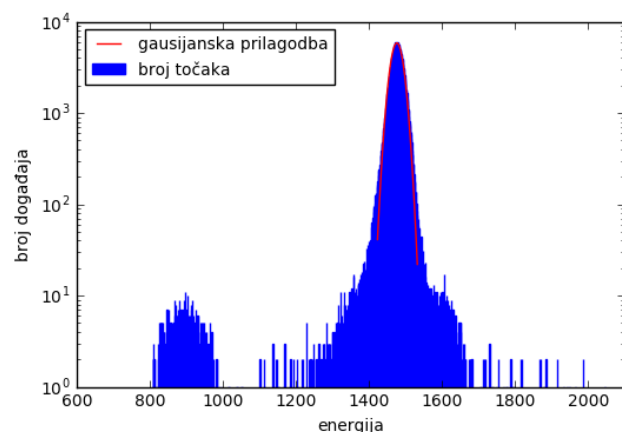
Za određivanje prostorne rezolucije diode izvršeno je skeniranje posebno u  $x$  i  $y$  smjeru. Na slici 6 je prikazan rezultat skeniranja snopa u  $x$  smjeru (dimenzije skeniranog područja su  $276 \times 4,3 \mu\text{m}^2$ ). Slika je dobivena računanjem pozicija na diodi koristeći formule 1 i 2. Rezoluciju smo definirali kao punu širinu na pola maksimuma raspodjele (eng. *full width at half maximum* - FWHM) točaka u  $y$  smjeru. Raspodjela je, zajedno s pripadnom gausijanskom prilagodbom, prikazana na slici 7. Iz prilagodbe je određen  $\text{FWHM}_y$  koji iznosi  $(106 \pm 1) \mu\text{m}$ . Analogno, izvršeno je skeniranje u  $y$  smjeru (dimenzije skeniranog područja su  $4,3 \times 276 \mu\text{m}^2$ ) i na isti način izračunata prostorna rezolucija u  $x$ -smjeru od  $(120 \pm 1) \mu\text{m}$ .



Slika 7: Određivanje rezolucije diode u  $y$  smjeru.

### 4.2 Energijska rezolucija diode

Na slici 8 prikazana je energijska distribucija snopa (skenirano je područje dimenzija  $276 \times 276 \mu\text{m}^2$ ).



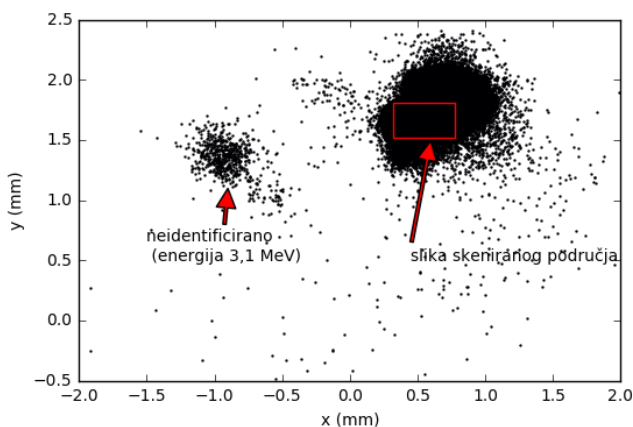
Slika 8: Energijska distribucija snopa u logaritamskoj skali (dimenzija skeniranog područja je  $276 \times 276 \mu\text{m}^2$ ). Lijevi, niskointenzivni maksimum (0,2% ukupnog broja točaka), odgovara skupu raspršenih točaka (vidi sliku 9).

Energija je izračunata kao suma visine naponskih pulseva na sve četiri anode, tj. suma vrijednosti u svim ADC-ovima (iskazanih u rasponu od 0 do 1000 kanala).

Zadana energija snopa je 5,0625 MeV-a, ali energijska raspodjela ima određenu širinu zbog konačne rezolucije mjernog postava, tj. diode i pripadnog elektroničkog lanca. Iz gausijanske prilagodbe je određena rezolucija (definirana kao FWHM) od 2,7%. Nešto manje od 1% iona detektiranih na diodi imaju energiju izvan maksimuma centriranog oko vrijednosti 1475 (u nekalibriranoj skali), kao posljedicu različitih raspršenja (najvjerojatnije od otvora). Energije daleko od maksimuma prema višim vrijednostima (veće od npr. 1700) mogu se objasniti pojavom nagomilavanja signala (engl. *pile up*) - dioda zbroji ionizacije 2 iona koja su upala na diodu u kratkom vremenu i prikaže ih kao jedan signal.

### 4.3 Halo i raspršenje snopa

Na slici 9 se nalazi slika dobivena očitavanjem pozicija s diode za skeniranje  $276 \times 276 \mu\text{m}^2$ , dok je na slici 10 prikazan graf gustoće točaka (na toj slici nije prikazano cijelo područje diode nego samo dio koji odgovara direktnom upadu iona, bez većeg raspršenja). Primjećujemo da skenirani dio nije na sredini diode što je posljedica toga da središte diode nije bilo na osi snopa (što je jedan od nedostataka ovog eksperimenta, jer je skenirano područje na kraju bilo blizu krajeva diode gdje je manja energijska rezolucija diode). Isto tako primjećujemo nehomogenost haloa - nije jednako raspodijeljen u svim smjerovima oko skeniranog područja. Izvan područja većeg energijskog maksimuma (maksimum centriran oko vrijednosti 1475 na slici 8, što odgovara energiji snopa od 5 MeV-a) nalazi se oko 0.8% točaka od kojih skoro trećina trećina (0,25 % od ukupnog broja točaka) otpada na grupirani skup točaka lijevo na slici 9 - energijska raspodjela tog skupa točaka odgovara maksimumu niže energije od energije snopa, lijevi maksimum na slici 8, energije oko 3,1 MeV-a (ova energija je određena na način da je pretpostavljeno da suma naponskih pulseva iz anode vrijednosti 0 odgovara energiji 0 MeV-a; nije rađena kalibracija mjerenjem sa snopovima različitih energija).

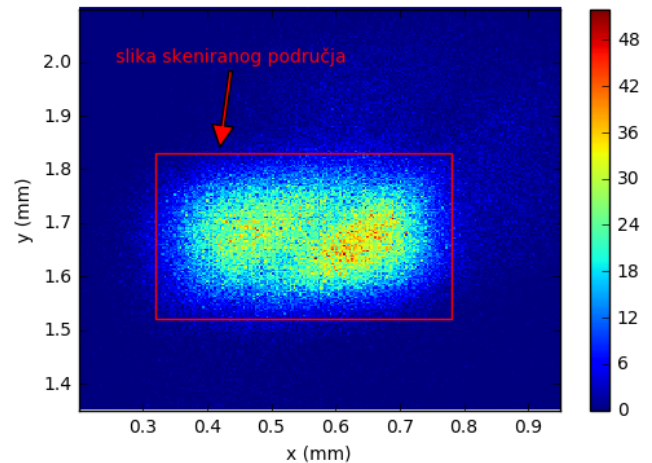


Slika 9: Slika dobivena očitavanjem pozicija na diodi za skeniranje  $276 \times 276 \mu\text{m}^2$ . Crveni pravokutnik odgovara dijelu diode preko kojeg je skeniran snop, do na rezoluciju diode.

Više je mogućih uzroka pojave tih točaka: raspršenje na antiraspršivačkim otvorima (eng. *anti-scattering*

*slits*), pojava kisika drugog naboja interakcijom sa zaostalim plinom između objektnih otvora i kvadrupola ili ionizacija ugljikovodika (npr.  $\text{CH}_4$ ) u zaostalom plinu interakcijom sa snopom, koji onda upadaju u komoru zajedno sa snopom. Određivanje pravog uzroka zahtijeva daljnja mjerenja.

Na slici 10 je uočljivo da intenzivni dio (crveni pravokutnik, koji odgovara dijelu diode preko kojeg je skeniran snop, do na rezoluciju diode) nema oblik kvadrata, nego oblik pravokutnika, izduženog u  $x$ -smjeru. Takav izgled skeniranog područja na diodi je očekivan budući da se dioda nije nalazila točno u fokusu kvadrupolskog sistema, nego nekoliko centimetara iza fokusa. Naime, sistem fokusiranja je podešen da je demagnifikacija u  $x$ -smjeru nekoliko puta jača nego u  $y$ -smjeru (što znači da se fokus brže gubi u jednom nego u drugom smjeru) što rezultira time da u našem postavu snop nije bio fokusiran jednako u  $x$  i  $y$  smjeru, pa duljina stranica skeniranih područja nije jednaka.



Slika 10: Graf gustoće točaka dobivenih očitavanjem pozicija na diodi za skeniranje  $276 \times 276 \mu\text{m}^2$  (nije prikazano cijelo područje diode). Crveni pravokutnik odgovara dijelu diode preko kojeg je skeniran snop, do na rezoluciju diode.

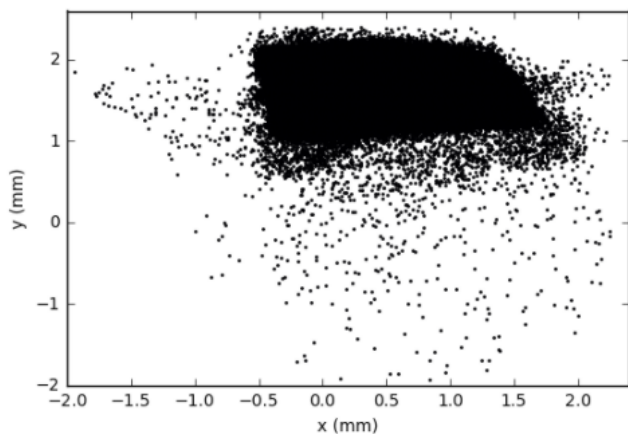
Ukupno se izvan intenzivnog pravokutnika na slici 10 nalazi 8,5% točaka, što je dosta velik rasap snopa (u dobro podešenom sustavu je za očekivati da halo bude ispod 1 %).

Na slici 11 nalazi se slika očitavanja diode za kvadratno područje skeniranja čija je stranica pet puta veća nego u prvom slučaju,  $1380 \times 1380 \mu\text{m}^2$ . Zbog položaja diode (izvan fokusa) ponovno ne očekujemo kvadrat na diodi, ali dio skeniranog područja u  $y$ -smjeru nije vidljiv i zbog toga što je taj dio prešao preko ruba osjetljive površine diode. Također, kao i u prvom skeniranju, uočavamo nehomogenosti, kao i veći rasap u  $y$ -smjeru. Broj događaja koji se nalaze izvan energijskog maksimuma (uglavnom kao posljedica raspršenja) iznosi 2%. Broj točaka koji se nalazi izvan intenzivnog područja (raspršenje i halo) je 3,2% (većina njih, 2,5% ukupnog broja točaka, je unutar energijskog maksimuma).

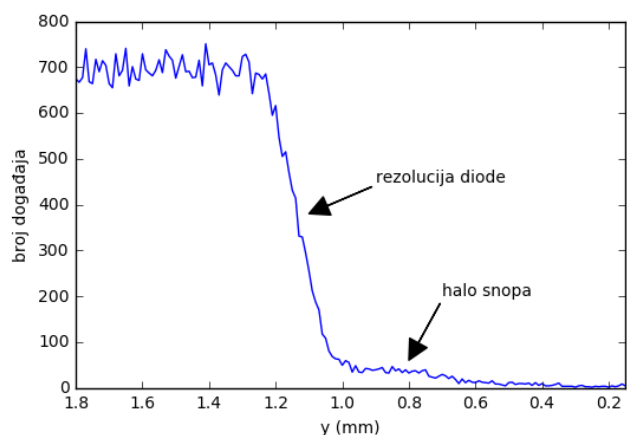
Na slici 12 prikazana je raspodjela broja točaka u



$y$ -smjeru za  $x > -0,5$  mm i  $y < 1,8$  mm. Prvi dio raspodjele prikazuje intenzivno područje s velikim, ujednačenim brojem događaja, nakon čega se broj točaka dosta smanjuje broj točaka s ( $y > 1,2$  mm), sa širinom opadanja određenom prostornom rezolucijom diode, a zatim od  $y = 1,0$  mm pad je sporiji, gdje raspodjela opisuje halo, točke izvan najintenzivnijeg dijela skeniranog područja.



Slika 11: Slika dobivena očitavanjem pozicija na diodi za skeniranje  $1380 \times 1380 \mu\text{m}^2$ .



Slika 12: Raspodjela broja točaka u  $y$ -smjeru od intenzivnog područja do jako raspršenih točaka. Označen je dio raspodjele gdje širina pada odgovara prostornoj rezoluciji diode i dio koji odgovara prostornom rasporedu haloa snopa.

## 5 Zaključak

Provedena mjerenja su pokazala ispravnost rada 2D pozicijski osjetljive PiN diode, što omogućava daljnje korištenje ove diode za slična mjerenja. U slučaju dodatnog smanjenja šuma elektroničkog lanca moguće je još poboljšati energijsku i prostornu rezoluciju diode. Mjerenja haloa snopa u ovom eksperimentu su pokazala da je halo nehomogeno raspoređen i da je relativno velik (do 8,5%). Da bi se utvrdio razlog tako velikog rasapa snopa, nužno je provesti daljnja mjerenja. Postav se

mora korigirati tako da se dioda postavi točno u fokus snopa, te provesti mjerenja za više različitih iona (od protona, pa prema većim masama), različitih energija iona te za različite tlakove u vakuumskom dijelu postava. Tek s takvim, sveobuhvatnim mjerenjima bit ćemo sigurni koliki je stvarni udio haloa i koja poboljšanja izvesti na liniji mikroprobe kako bi se halo eventualno smanjio.

## Literatura

- [1] A.V. Fedotov, ERL 2005 Workshop, Newport News, Va, USA, prezentacija: [https://www.jlab.org/conferences/ERL/2005/talks/WG2/WG2\\_Fedotov\\_Tue\\_1600.pdf](https://www.jlab.org/conferences/ERL/2005/talks/WG2/WG2_Fedotov_Tue_1600.pdf)
- [2] <http://www.irb.hr/Istrazivanja/Zavodi/Zavod-za-eksperimentalnu-fiziku/Laboratorij-za-interakcije-ionskih-snopova>
- [3] T.Tadić, M. Jakšić, *Heavy ion microbeam vacuum requirements*; Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 267 (2009)
- [4] N.S. Harris, *Modern Vacuum Practice*; McGraw-Hill Int., poglavlje 4 (1989)
- [5] <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/alpha/P/4010/4156/S2044/index.html>