

# Razvoj testnog postava za nadogradnju komore vremenske projekcije na ALICE detektoru

---

**Karatović, David**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

*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:217:043338>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-19**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

David Karatović

RAZVOJ TESTNOG POSTAVA ZA  
NADOGRADNJU KOMORE VREMENSKE  
PROJEKCIJE NA ALICE DETEKTORU

Diplomski rad

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ  
FIZIKA; SMJER ISTRAŽIVAČKI

**David Karatović**

Diplomski rad

**Razvoj testnog postava za  
nadogradnju komore vremenske  
projekcije na ALICE detektoru**

Voditelj diplomskog rada: doc. dr. sc. Nikola Poljak

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

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

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

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

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

Zagreb, 2019.

Zahvaljujem se na pomoći pri mjerenjima i izradi ovog rada mentoru docentu Nikoli Poljaku, profesoru Mirku Planiniću i članovima njegove grupe, Antoniji i Filipu. Zahvaljujem se obitelji i prijateljima na bezuvjetnoj potpori tijekom cijelog studija. Posebno bih se zahvalio djevojci Magdaleni na beskonačnoj emocionalnoj podršci i kolegi Blažu bez kojega ne bi nikada prošao ni prvu, a ni ostale godine studija.

## Sažetak

Tijekom drugog dugog gašenja Large Hadron Collidera na CERN-u potrebno je nadograditi detektore za mjerenja visokoenergetskih sudara zbog povećanog luminoziteta čestičnih snopova. Na ALICE detektoru, jedna od najbitnijih nadogradnji je zamjena uređaja za očitavanje unutar komore vremenske projekcije detektorima baziranim na Gas Electron Multiplier (GEM) tehnologijama. U diplomskom radu će se razvijati nadogradnje testnog postava za GEM detektore na Fizičkom odsjeku PMF-a u Zagrebu tako što će se testirati visokonaponske karakteristike postava, kao i pokušati realizirati očitavanje signala s detektora pomoću pikoampermetara originalno razvijenih za tu namjenu.

Ključne riječi: komora vremenske projekcije, GEM, testni postav, pikoampermetar

# Diploma thesis title

## **Abstract**

During the second long shutdown of the Large Hadron Collider at CERN, the detectors for high energy collisions must be upgraded to keep track with a significant increase in the particle beams luminosity. An integral part of the ALICE detector upgrade is the replacement of the time projection chamber readout system with GEM technology based detectors. In this master thesis, an upgrade of the experimental setup for the GEM detectors at Physics department of the Faculty of Science in Zagreb will be performed by testing the high voltage properties of the setup, with an attempt to get a readout of a signal from the detector with a picoammeter developed originally for that purpose.

Keywords: time projection chamber, GEM, experimental setup, picoammeter

# Sadržaj

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Uvod</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Komora vremenske projekcije (TPC)</b>                               | <b>2</b>  |
| 2.1      | Princip rada komore vremenske projekcije . . . . .                     | 2         |
| 2.2      | Komora vremenske projekcije na ALICE detektoru . . . . .               | 4         |
| <b>3</b> | <b>Gas Electron Multiplier (GEM)</b>                                   | <b>5</b>  |
| 3.1      | Dizajn i proizvodnja GEM folija . . . . .                              | 5         |
| 3.2      | Princip rada GEM folija . . . . .                                      | 6         |
| 3.3      | Kaskada GEM folija . . . . .   | 8         |
| 3.4      | Svojstva kaskade GEM folija . . . . .                                  | 10        |
| 3.5      | Upotreba GEM folija . . . . .  | 13        |
| <b>4</b> | <b>Pikoampermetar</b>  | <b>15</b> |
| 4.1      | Višekanalni pikoampermetar s optičkim prijenosom podataka . . . . .    | 15        |
| 4.2      | Realizacija pikoampermetra . . . . .                                   | 17        |
| 4.3      | Mjerenja stabilnosti i vremenske razlučivosti pikoampermetra . . . . . | 18        |
| <b>5</b> | <b>Ispitivanje iskrenja GEM postava</b>                                | <b>21</b> |
| 5.1      | Testna komora . . . . .  | 21        |
| 5.2      | Mjerenja s žicom promjera 1 mm s teflonskom izolacijom . . . . .       | 24        |
| 5.3      | Mjerenja s žicom promjera 2 mm . . . . .                               | 29        |
| <b>6</b> | <b>Mjerenje struje s GEM elektroda</b>                                 | <b>34</b> |
| 6.1      | GEM postav u čistoj sobi . . . . .                                     | 34        |
| 6.2      | Rezultati mjerenja struje s GEM elektroda . . . . .                    | 35        |
| <b>7</b> | <b>Zaključak</b>   | <b>37</b> |
|          | <b>Literatura</b>  | <b>38</b> |

# 1 Uvod

Promatranje sudara protona i teških iona na LHC-u (*eng.* Large Hadron Collider) je idealno za proučavanje fundamentalnih svojstava kvantne kromodinamike. Tim sudarima na visokim energijama omogućeno je proučavanje kvark-gluonske plazme, te promatranje prirode faznih prijelaza između kvark-gluonske plazme i normalne hadronske materije.

ALICE (*eng.* A Large Ion Collider Experiment) je detektor koji se nalazi na prstenu LHC-a, te se bavi proučavanjem kvark-gluon plazme. Sudarima iona olova  $^{208}\text{Pb}$ , uz integrirani luminozitet  $\mathcal{L} = 0.16 \text{ nb}^{-1}$ , 2010. i 2011. godine demonstrirana je izvrsna mogućnost praćenja i identifikacije čestica u područjima s visokom gustoćom čestica i naboja. Nakon prvog dugog gašenja LHC-a luminozitet je povećan na  $1 \text{ nb}^{-1}$ , a frekvencija sudara za centralne Pb-Pb sudare je ograničena na  $\sim 300 \text{ Hz}$ .

Nakon drugog dugog gašenja, koje je započelo krajem 2018., bit će omogućeni sudari učestalosti oko  $50 \text{ kHz}$  uz luminozitet  $\mathcal{L} = 10 \text{ nb}^{-1}$ . Veća učestalost sudara i veći luminozitet znače da su potrebni bolji detektori koji će moći brže prikupljati podatke.

Ključni dio nadogradnje komore vremenske projekcije (*eng.* Time Projection Chamber ili skraćeno TPC) na ALICE-u je unaprjeđivanje tehnologije očitavanja. Trenutne komore za očitavanje bazirane na MWPC (*eng.* Multi-Wire Proportional Chamber) tehnologiji će biti zamijenjene GEM (*eng.* Gas Electron Multiplier) tehnologijom koja će moći podnijeti veću brzinu očitavanja potrebnu za nadograđeni TPC. Nakon nadogradnje, stopa prikupljanja podataka TPC-a će se povećati za dva reda veličine, dok će mogućnosti za praćenje i identifikaciju čestica ostati iste.



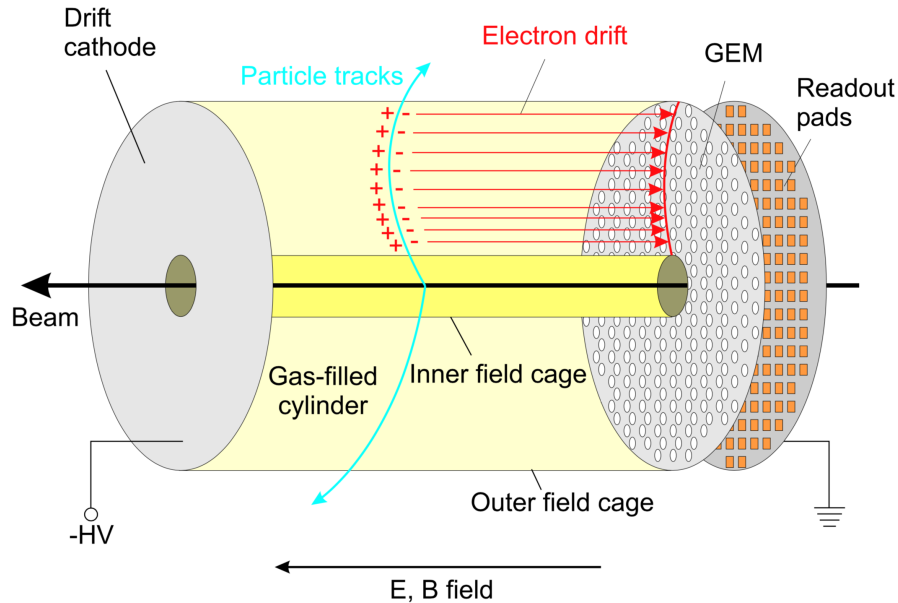
## 2 Komora vremenske projekcije (TPC)

Komora vremenske projekcije koristi se za trodimenzionalno praćenje putanje čestica. Sastoji se od aktivnog volumena, koji je ispunjen plinom ili tekućinom, te se uz kombinaciju električnog i magnetskog polja precizno mogu odrediti putanje ionizirajućih čestica. Prvi TPC je izumio američki znanstvenik David R. Nygren u kasnim sedamdesetim godinama devetnaestog stoljeća u Lawrence Berkeley Laboratoriju [1].

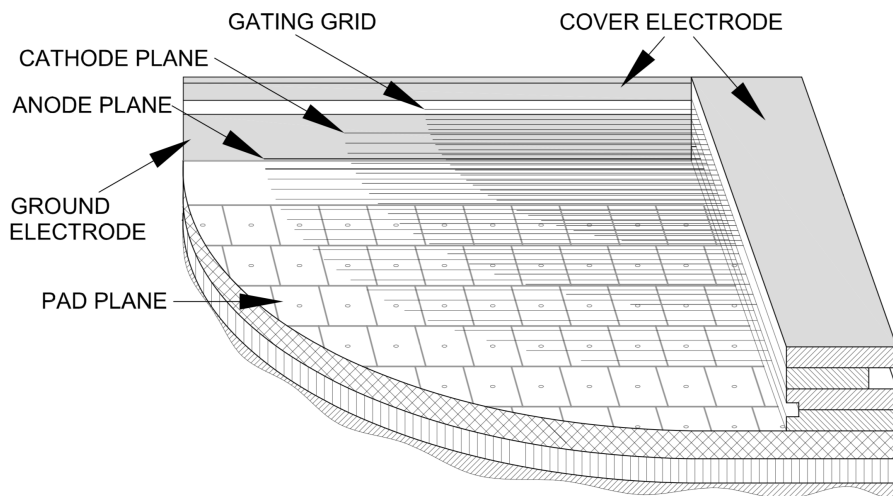
### 2.1 Princip rada komore vremenske projekcije

Prolaskom čestice kroz aktivni volumen TPC-a dolazi do ionizacije plina. Zbog driftnog električnog polja ioni se gibaju prema centralnoj elektrodi, dok elektroni odlaze prema bazama cilindra (slika 2.1). Brzina iona i elektrona ovisi o driftnome polju i svojstvima plina. Elektroni će se gibati oko 1000 puta brže od iona. Na bazama cilindra se nalaze anode za očitavanje, kojima prethodi dio za pojačanje signala. Tad je signal dovoljno velik da se može dalje elektronički pojačati. Pri pojačanju signala nastaje lavina elektrona koja se dalje prikupi na anodama poslaganim u pravilnu mrežu koja pokriva poprečni presjek detektora. Mjerenjem signala induciranog na anodama dobiva se dvodimenzionalna slika putanje, projekcija putanje na ravninu u kojoj se nalaze anode. Treća dimenzija se dobije računanjem driftnog vremena svih elektrona nastalih ionizacijom u aktivnom volumenu. Za to je potrebno točno poznavanje driftnog polja te je potrebno driftno polje držati što homogenijim. Zbog toga je vrlo bitno da se ioni nastali u području pojačanja signala u što manjoj mjeri vrate u driftno područje.

Pri radu MWPC-a, bitnu ulogu igrao je aktivni bipolarni Gating Grid (GG), koji se može podesiti da bude proziran i neproziran za elektrone nastale ionizacijom (slika 2.2). Dok je GG proziran, elektroni prolaze do područja gdje im se signal pojačava i bilježe se mjerenja. Nakon određenog vremena ( $\sim 100 \mu\text{s}$ ) GG postaje neproziran da bi se spriječilo pojačanje neželjenog signala od iona nastalih ionizacijom, te sprječava ione nastale u području pojačanja od povratka u driftno područje, gdje bi došlo do nagomilavanja naboja i distorzije polja. Zbog relativno malene pokretljivosti iona, potrebno je da GG ostane neproziran  $\sim 180 \mu\text{s}$  nakon što je dovršeno očitavanje željenog signala. Zbog toga postoji intrinzično mrtvo vrijeme TPC-a koje traje  $\sim 280 \mu\text{s}$  te ograničava maksimalnu moguću učestalost sudara na  $\sim 3.5 \text{ kHz}$ .



Slika 2.1: Shematski prikaz polovice TPC-a s GEM tehnologijom. Lijevo se nalazi centralna elektroda koja dijeli cilindar na pola i na kojoj je visoki napon negativnog polariteta [2].



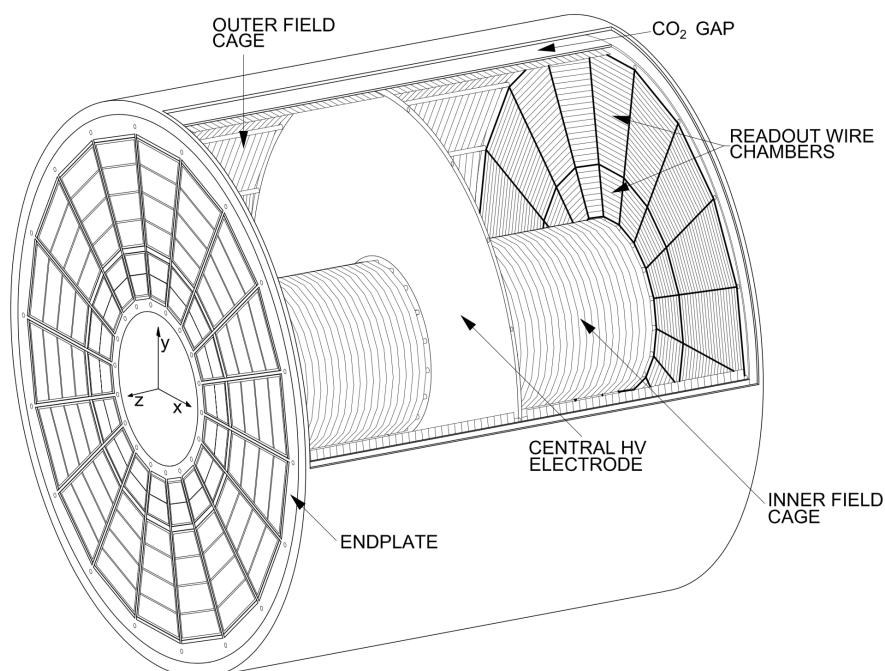
Slika 2.2: Shematski prikaz MWPC komore [3].

Rad TPC-a na većim frekvencijama nije bio moguć zbog spomenutog mrtvog vremena koje proizlazi iz GG-a. No, uklanjanjem GG-a došlo bi do gomilanja naboja i do promjena u driftnom polju te više ne bi bila moguća precizna mjerenja prostornog položaja čestice. Za GEM sustav s kaskadom folija je pokazano da ima pojačano svojstvo blokiranja iona nastalih u području pojačavanja, te da daje pouzdane rezultate u mjerenjima s velikom stopom učestalosti događaja. Takav sustav ne mora koristiti GG i omogućava praktički kontinuirani rad TPC-a, što omogućava proučavanje do

sada nemjerljivih fenomena.

## 2.2 Komora vremenske projekcije na ALICE detektoru

Komora vremenske projekcije na ALICE-u je najveći detektor tog tipa s aktivnim volumenom od  $90 \text{ m}^3$ . Sastoji se od cilindričnog kaveza s visokonaponskom elektrodom koja se nalazi u sredini cilindra i dijeli ga na dva jednaka manja cilindra (slika 2.3). Između centralne elektrode i baza kaveza se stavlja napon, te se time dobije driftno polje. Na bazama kaveza su uređaji za očitavanje koji su se sastojali od 72 komore za očitavanje bazirane na MWPC tehnologiji.



Slika 2.3: Shematski prikaz TPC-a na ALICE-u [4].

Nadograđeni TPC će koristiti mješavinu plina Ne-CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> (90-10-5), zbog veće pokretljivosti iona u neonu, naspram prijašnje korištenog argona. To će smanjiti vjerojatnost nakupljanja naboja u driftnom polju.

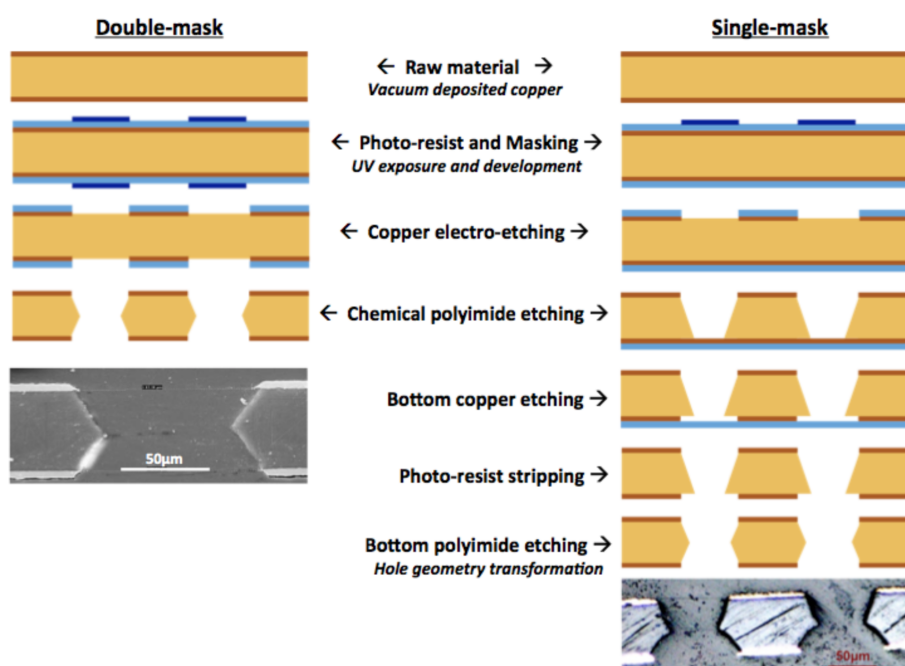
### 3 Gas Electron Multiplier (GEM)

Fabio Sauli je na CERN-u 1997. godine osmislio plinski umnoživač elektrona GEM, koji je jedan od najuspješnijih predstavnika micropattern plinskih detektora. GEM detektori imaju bolja svojstva od prijašnje korištenih MWPC-a, te se danas sve više detektora bazira na GEM tehnologiji.

Detektori s GEM folijama su prvi bili korišteni na COMPASS eksperimentu na CERN-u [5], te se sada već rutinski koriste na eksperimentima s visokom frekvencijom događaja, npr. na LHCb [6], PHENIX [7] i TOTEM [8] eksperimentima.

#### 3.1 Dizajn i proizvodnja GEM folija

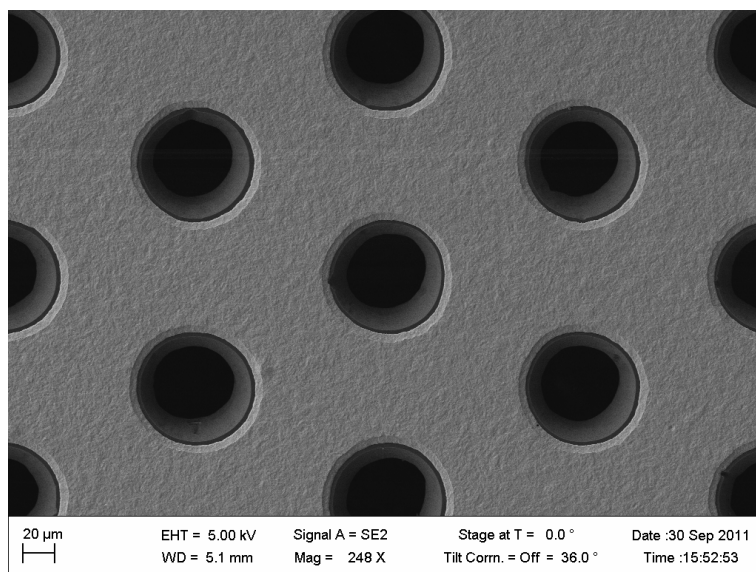
Jedna GEM folija se sastoji od poliimidne izolirajuće folije debljine  $50\mu\text{m}$  čija je površina obložena slojem bakra debljine  $2-5\mu\text{m}$ . Fotolitografskim procesom s jedne ili dvije strane, i otapanjem polimera se u foliji prave dvostruko stožaste rupe u pravilnim razmacima (slika 3.1).



Slika 3.1: Shematski prikaz izrade GEM folije [9].

U tipičnom slučaju rupe imaju unutarnji promjer oko  $50\mu\text{m}$ , vanjski promjer oko  $70\mu\text{m}$ , te je udaljenost među središtima susjednih rupa oko  $140\mu\text{m}$ . Koriste se različite izvedbe, npr. s većim udaljenostima među rupama dobiva se manja prozirnost. Snimka tipične GEM folije napravljena elektronskim mikroskopom je prikazana

na slici 3.2.

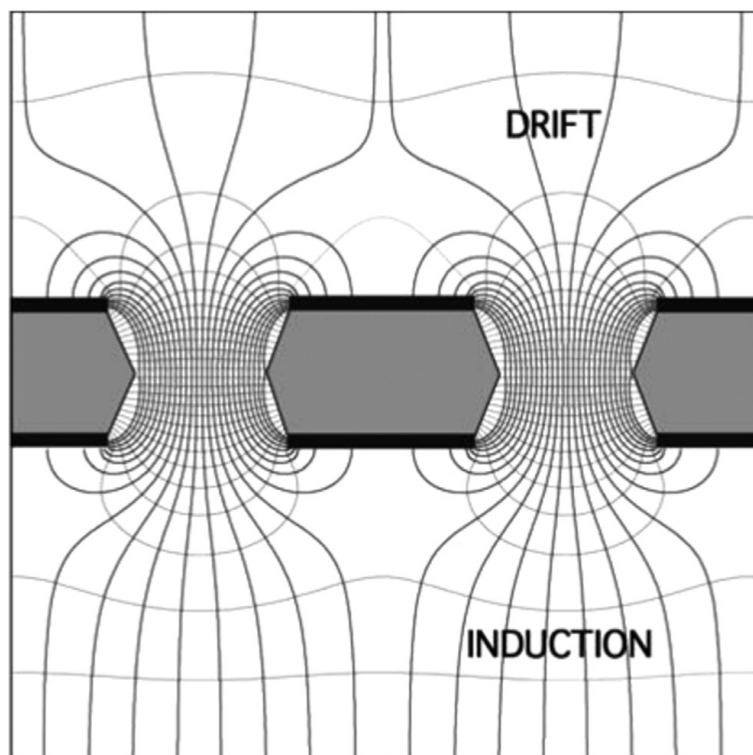


Slika 3.2: Slika GEM folije dobivena elektronskim mikroskopom [4].

### 3.2 Princip rada GEM folija

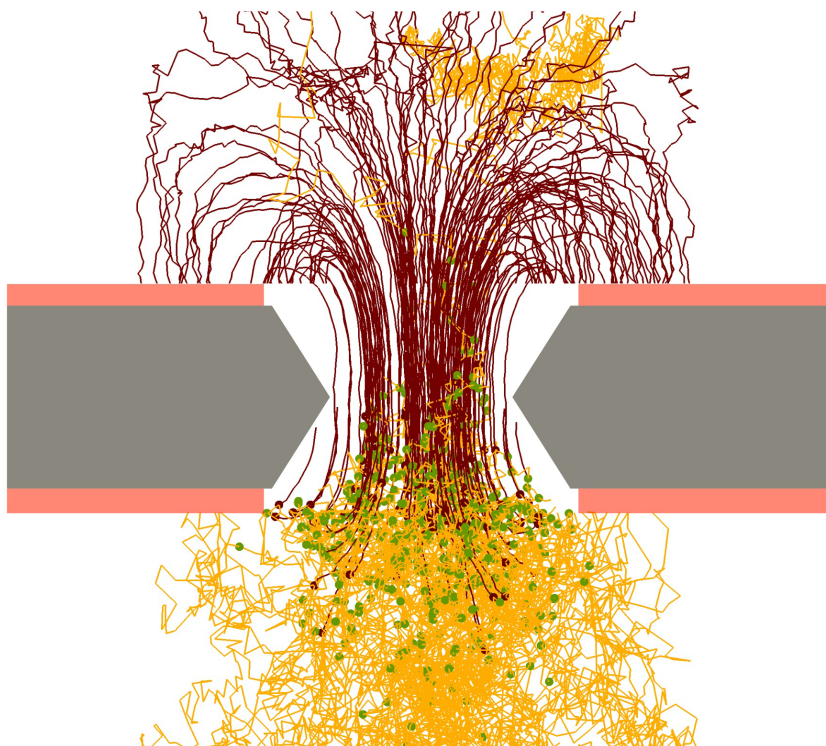
Zbog malenih dimenzija rupa na folijama, ako se nametne razlika potencijala između gornjeg i donjeg sloja bakra, unutar rupa će postojati vrlo jako električno polje. Za razliku potencijala 200 - 400 V, jakost polja unutar rupe će biti  $\sim 50$  kV/cm. Silnice električnog polja će izgledati kao na slici 3.3.

U slučaju upada nabijene čestice, polje unutar rupe će ubrzati česticu te doći će do stvaranja lavine naboja zbog ionizacije plina. Slika 3.4 prikazuje simulaciju kretanja takve lavine. Lavina je započeta s dva elektrona koji su driftnim poljem dovedeni do GEM-a. Elektroni nastali u lavini prolaze kroz rupu na drugu stranu GEM-a te vrlo dobro prate silnice električnog polja, zbog malenog koeficijenta difuzije. Većina nastalih iona će biti prikupljena na gornjoj strani GEM folije, jer je polje unutar rupe puno veće od polja iznad rupe. Od navedenih iona samo će ih par završiti nazad u prostoru driftnog polja. Da bi se što efikasnije skupili elektroni nastali u lavini potrebno je nametnuti jako električno polje ispod GEM-a. Ti elektroni se mogu slati dalje na iduću GEM foliju, gdje se ponavlja isti proces, ili se mogu prikupiti s anodom. Ioni ne sudjeluju u prikupljanju signala te je ono zbog toga vrlo brzo. Također, zbog toga što je inducirani signal prilično velik i rupe su gusto raspoređene, GEM folije postižu vrlo visoku prostornu rezoluciju. U praksi se većinom koriste



Slika 3.3: Električno polje unutar rupe na GEM foliji [10].

kaskade sastavljene od 3-4 GEM folije, s pojačanjem od  $10^3$ - $10^4$  puta.



Slika 3.4: Garfield / Magboltz simulacija dinamike naboja za upad dva elektrona u rupu na GEM-u. Put elektrona je prikazan svijetlim linijama, dok je put iona prikazan tamnim. Točke označavaju gdje se dogodila ionizacija [4].

Efektivno pojačanje  $G_{eff}$  GEM folije se određuje mjerenjem struje na anodi za očitavanje  $I_{anode}$  za danu stopu upada X-zraka  $R$ , pri čemu svaka X-zraka ionizacijom proizvede  $N_{ion}$  elektrona:

$$G_{eff} = \frac{I_{anode}}{eN_{ion}R}, \quad (3.1)$$

pri čemu je  $e$  naboj elektrona. Uz ovakvo definirano pojačanje uzeti su u obzir gubitci nastali prolaskom kroz strukturu GEM-ova. Povratni tok iona  $I_B$  je definiran kao omjer struje na katodi  $I_{cathode}$  i na anodi  $I_{anode}$ :

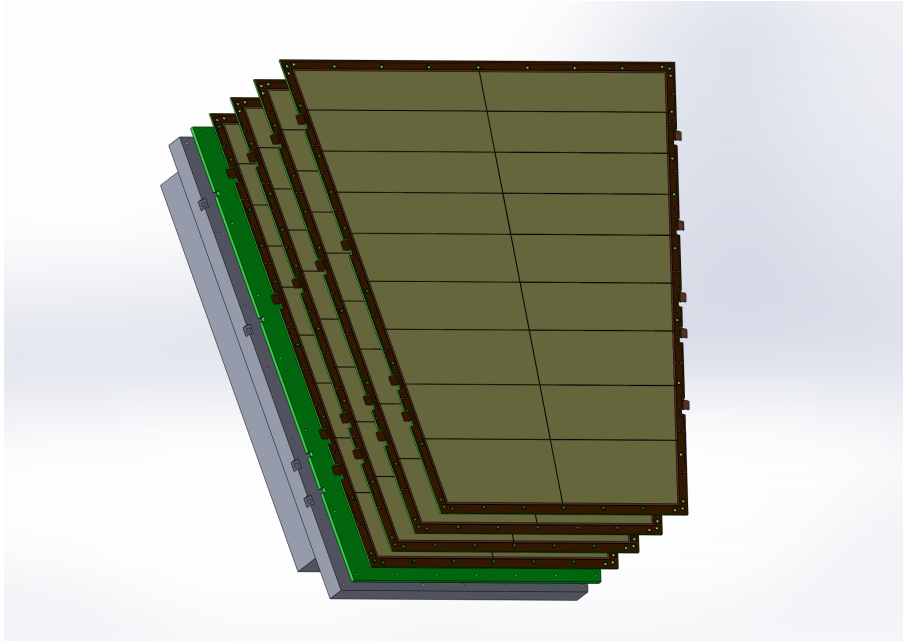
$$I_B = \frac{I_{cathode}}{I_{anode}} = \frac{1 + \epsilon}{G_{eff}}, \quad (3.2)$$

pri čemu je  $\epsilon$  broj iona, po upadnom elektronu, koji odu u područje driftnog polja. U uvjetima koji su nepovoljniji nego oni potrebni za detektore u ALICE-u, dobiveno je da je povratni tok iona  $I_B = 0.25\%$ , što pokazuje izvrsnu sposobnost blokiranja povratnog toka iona GEM sistema [11].

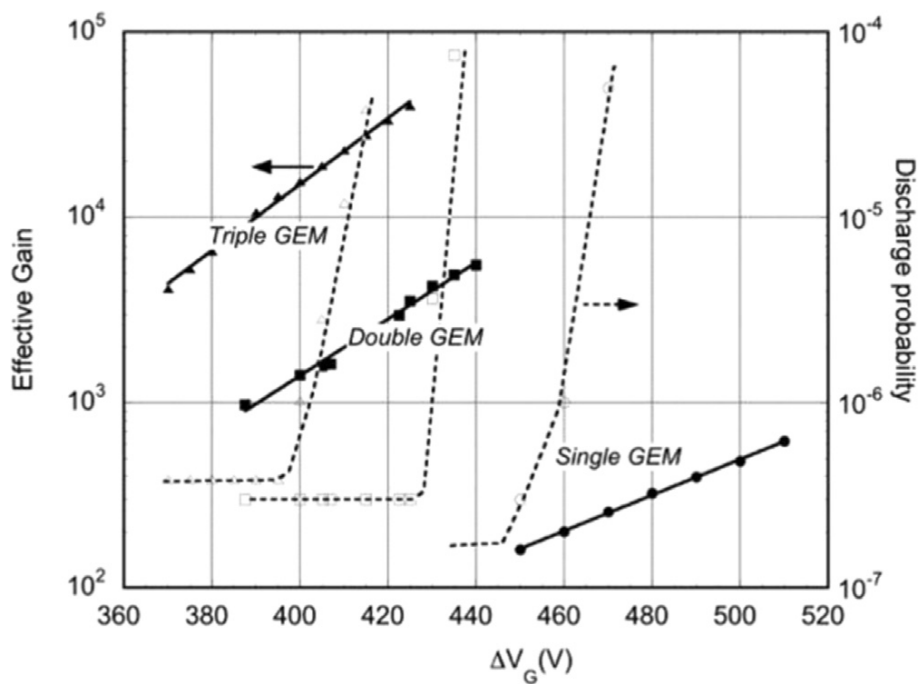
### 3.3 Kaskada GEM folija

Jedna GEM folija može postići pojačanje od  $10^3$  puta, no što je veće pojačanje, to je veća šansa da će doći do neželjenih električnih izboja. Jedinstveno svojstvo GEM folija je da se mogu slagati u kaskade. Pravilnim odabirom napona i udaljenosti između folija, moguće je lavinu elektrona nastalu na prvoj foliji usmjeriti na iduću GEM foliju te taj signal dodatno pojačati. Strukture do 5 GEM folija u kaskadi su uspješno testirane [12, 13]. Prednost slaganja GEM-ova u kaskadu je u tome što su potrebni manji naponi na pojedinačnoj foliji da bi se dobilo željeno pojačanje. Samim time se smanjuje vjerojatnost iskrenja u foliji te se također bolje blokira tok pozitivnih iona prema driftnome polju. Shematski prikaz kaskade od četiri GEM-a vidimo na slici 3.5.

Ovisnost pojačanja o naponu za jednu GEM foliju, te kaskadu od dvije i tri GEM folije je prikazana na slici 3.6. Mjerenja su napravljena pri zračenju alfa česticama u mješavini plina Ar-CO<sub>2</sub>. Pojačanje od  $10^4$  je postignuto za strukturu s tri GEM folije. Ostale konfiguracije su ograničene pojavom električnih izboja na nižim vrijednostima pojačanja, što je posljedica većih napona potrebnih za jednako pojačanje. Drugi plinovi se koriste za različite primjene. Na primjer, korištenjem CF<sub>4</sub> se postiže



Slika 3.5: Grafički model četiri GEM folije [4].

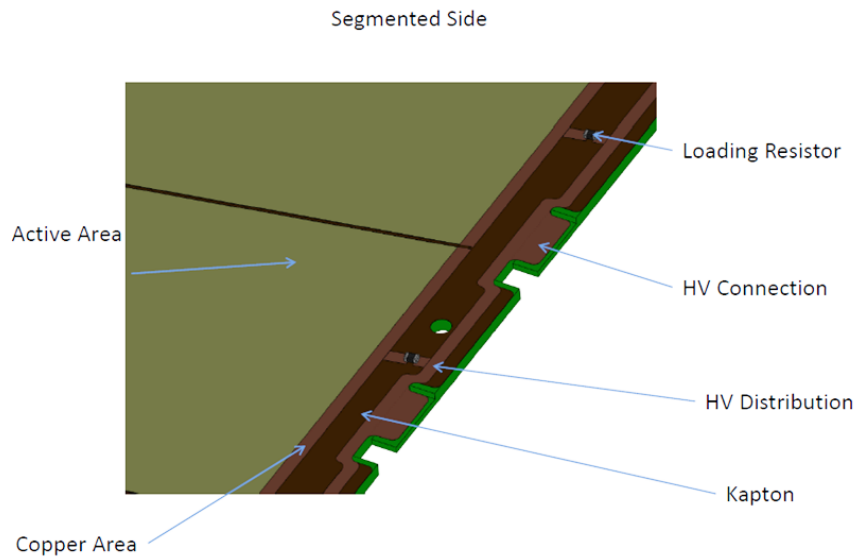


Slika 3.6: Efektivno pojačanje (puna linija) i vjerojatnost iskrenja (isprekidana linija) u ovisnosti o naponu na GEM foliji za različite izvedbe detektora [14].

bolja vremenska razlučivost, zbog veće driftne brzine elektrona, no potrebni su veći naponi što povećava rizik od iskrenja [15].

Kako bi se smanjio ukupni naboj na GEM foliji, jedna strana folije je segmentirana na visoko-naponske sektore. Svaki sektor se napaja preko “loading resistor”-a (slika 3.7), dok se druga strana, koja nije segmentirana, direktno napaja. Takav dizajn smanjuje vjerojatnost električnog izboja između folija. No, i u slučaju izboja naboj u iskri

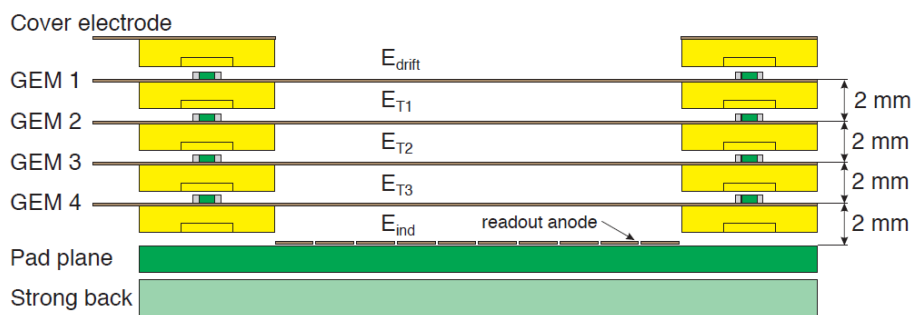




Slika 3.7: Segmentirana strana GEM folije [4].

će biti ograničen zbog toga što je folija segmentirana, te će se pad napona dogoditi samo na dijelu segmentirane folije, dok će druga strana folije ostati na konstantnom potencijalu. Time će se spriječiti daljnja propagacija iskre.

Prva folija u kaskadi GEM-ova, koji će se koristiti na ALICE TPC-u, će imati ne-segmentiranu stranu okrenutu prema gore, jer mora biti cijelo vrijeme na istome potencijalu, kako bi driftno polje unutar TPC-a u svim slučajevima ostalo homogeno. Shematski prikaz detektora sastavljenog od 4 folije dan je na slici 3.8.



Slika 3.8: Shematski prikaz četiri GEM folije [4].

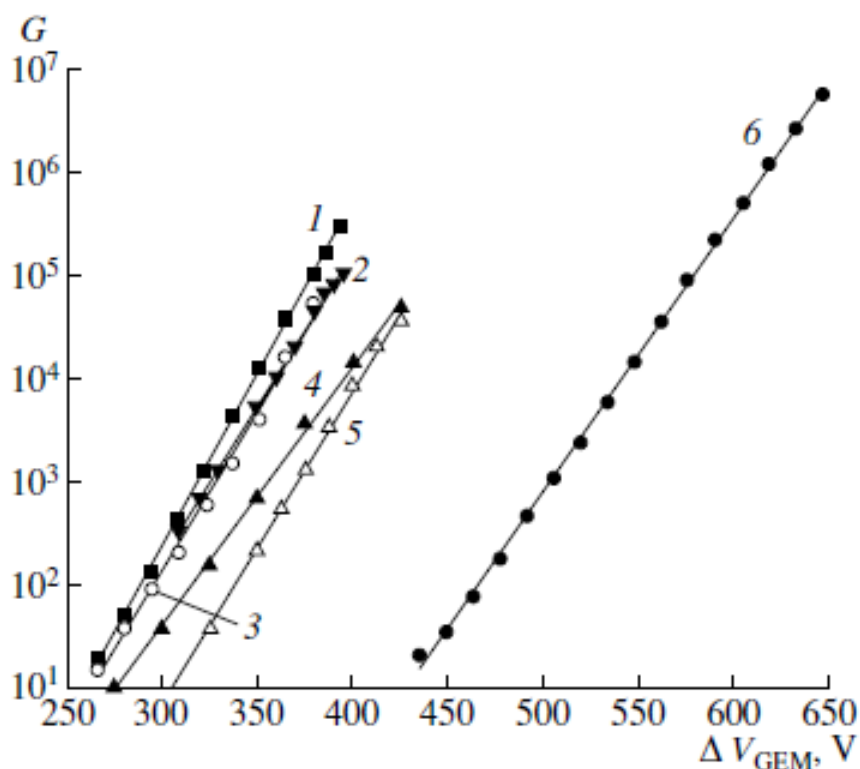
### 3.4 Svojstva kaskade GEM folija

Kaskada GEM folija pokazuje vrlo poželjna i korisna svojstva kao što su: velika pojačanja pri radu s mješavinom plina s molekularnim aditivima [16–18], mala vjerojatnost iskrenja pri radu s visokim intenzitetom zračenja [19, 20], velika pojačanja

pri radu s čistim plemenitim plinovima [16, 21], dobra prostorna [22, 23] i vremenska razlučivost [17, 24], uspješno sprječavanje povratka neželjenih fotona [16, 17] i iona [25–27], mogućnost rada pri visokoj stopi događaja [28], visoka izdržljivost i trajanje, te mogućnost rada u zapečaćenim detektorima [29, 30].

U nastavku će se razmotriti neke od ovih karakteristika. Sve karakteristike su mjerene pri atmosferskom tlaku, osim ako nije naznačeno drukčije.

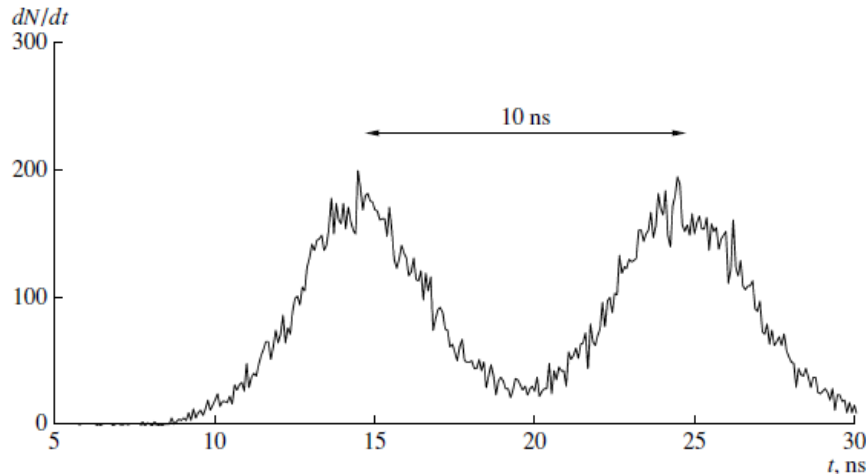
Ovisnost pojačanja kaskade od tri GEM folije je prikazana na slici 3.9, ovisno u kojem plinu s molekularnim aditivima se nalazi. Maksimalno pojačanje i radni napon slabo ovise o odabiru plina te se postižu pojačanja od  $10^5$  uz napone od 400 V na pojedinoj foliji. Pojačanje veće od  $10^6$  se može postići u čistome  $\text{CF}_4$ . Još veća pojačanja, reda veličine  $10^7$  se postižu s kaskadama od četiri GEM folije [18].



Slika 3.9: Ovisnost pojačanja trostrukog GEM-a o naponu za različite plinove pri atmosferskom tlaku [17, 22, 26]: (1) 95% Ar + 5%  $\text{CH}_4$ , (2) 70% Ar + 30%  $\text{CO}_2$ , (3) 98% Ar + 2%  $\text{N}_2$ , (4) 90% Ar + 10%  $\text{CF}_4$ , (5) 90% Xe + 10%  $\text{CH}_4$ , i (6)  $\text{CF}_4$ . Maksimalno pojačanje je ograničeno iskrenjem.

Energetska razlučivost GEM-ova nije rekordna za plinske detektore, no svejedno je dovoljna za većinu mjerenja: za X-zrake energije 5.9 keV-a iznosi oko 9% [31]. Prostorna razlučivost odgovara udaljenosti manjoj od razmaka među rupama te je za nabijene čestice i mekane X-zrake oko  $40\ \mu\text{m}$  [22, 23]. Prilično visoka vremen-

ska razlučivost je postignuta u mješavinama plina baziranim na  $\text{CF}_4$  [17] i  $\text{N}_2$  [16]. Za trostruki GEM u čistome plinu  $\text{CF}_4$  je postignuta razlučivost od 2 ns za single-photoelectron-counting mode. Vremenska karakteristika je prikazana na slici 3.10. Za mjerenja u mješavini 65% Ar + 28%  $\text{CF}_4$  + 7%  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  je dobivena razlučivost od 4 ns [24].



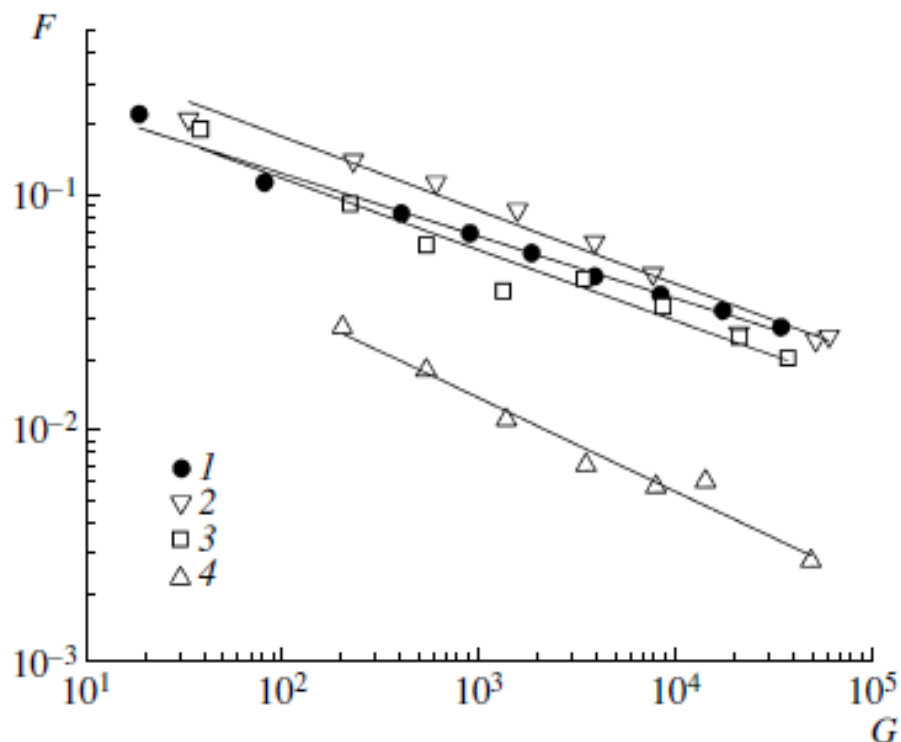
Slika 3.10: Vremenska karakteristika plinskog fotodetektora bazirana na trostrukim GEM-ovima uz poluprozirnu CsI fotokatodu u  $\text{CF}_4$  plinu pri pojačanju od  $10^6$  u modu brojanja jednog fotoelektrona. Vremenska distribucija je prikazana s obzirom na okidanje dvije grupe pulseva, razmaknutih za 10 ns [17].

Mogućnost rada GEM-ova pri visokoj stopi događaja je za dva reda veličine veća od MWPC-a. Pokazano je da se pojačanje jedne GEM folije ne mijenja dok tok čestica ne pređe vrijednost od  $3 \times 10^6 \text{ s}^{-1} \text{ mm}^{-2}$  [28].

GEM folije su značajno otpornije na trošenje s vremenom od MWPC-a [32–34]. Trostruka kaskada GEM folija neće prestati biti funkcionalna nakon prolaska 20  $\text{mC/mm}^2$  naboja, što odgovara 15 godina rada na uvjetima na LHCb detektoru [32]. Za usporedbu, MWPC će pokazati znakove trošenja već nakon par  $\text{mC/mm}^2$  [35]. Velika otpornost GEM detektora na starenje proizlazi iz toga što, u prvoj aproksimaciji, električno polje u rupama ne ovisi o stanju elektroda.

Blokiranje povratnih iona je jedno od najpoželjnijih svojstava kaskade GEM-ova [25–27, 36–39]. Povratni ioni nastaju pri pojačanju signala, te driftaju iz područja pojačanja ka katodi. U komorama vremenske projekcije bitno je spriječiti te ione da dođu u aktivno područje, kako bi driftno polje ostalo homogeno. Također, u plinskim fotodetektorima ioni dolaze do fotokatode te proizvode sekundarne pulseve [40]. Kod MWPC-a su se zbog toga koristile mreže za blokiranje tih iona te su time

ograničavale stopu rada detektora.



Slika 3.11: Tok povratnih iona za trostrukom GEM kaskadu folija u različitim mješavinama plinova - omjer ionske povratne struje prema katodi i anodne struje kao funkcija pojačanja [26]. Pri driftnom polju od 0.5 kV/cm: (1) 90% Ar + 10% CF<sub>4</sub>, (2) 90% Ar + 10% CH<sub>4</sub>, (3) 90% Xe + 10% CH<sub>4</sub>; i pri driftnom polju od 0.1 kV/cm: (4) 90% Ar + 10% CH<sub>4</sub>.

U trostrukim GEM-ovima struja koju proizvode povratni ioni je tek par posto anodne struje pri pojačanju od 10<sup>4</sup> s driftnim poljem 0.5 kV/cm (slika 3.11). Pokazano je da za trostrukom GEM strukturu broj povratnih iona ne ovisi o plinu u kojem se radi te da linearno ovisi o driftnom polju i da polinomno ovisi o pojačanju [26]:

$$F = aG^{-2/3} + bG^{-1/3} + c, \quad (3.3)$$

pri čemu je  $F$  omjer ionske i anodne struje, a  $G$  je pojačanje trostrukog GEM-a. Svaki član u jednadžbi 3.3 odgovara prvoj, drugoj i trećoj GEM foliji, retrospektivno.

### 3.5 Upotreba GEM folija

Svojstva i mogućnosti GEM detektora čine te detektore korisne ne samo u visoko energijskoj i nuklearnoj fizici, već i u astrofizici, medicini, itd. GEM-ovi se koriste u detektorima za praćenje [41–45] pri visokim tokovima čestica [19], u brzim de-

tektorima za sisteme okidača [24, 32], u komorama vremenske projekcije [46–49], Čerenkovljevim detektorima [50, 51], kriogenim detektorima [52–58], za detekciju neutrina [59, 60] i tamne materije [61], za detekciju neutrina raspršenih na jezgrama [62, 63], detektorima za X-zrake [64–67], neutronske detektorima [67], detektorima s optičkim očitanjem [67, 68] i sinhotropno - zračnim detektorima [69, 70].

Jedinstveno svojstvo GEM-ova je mogućnost rada u čistim plemenitim plinovima na principu stvaranja lavina s velikim pojačanjem [16, 71–73], uključujući rad pri visokom tlaku [21, 74–77] i kriogenim temperaturama [52–58]. Rad pri visokim tlakovima i kriogenim temperaturama je posebno važan za izradu dvofaznog lavinskog detektora [52, 53, 55, 57], koji se može koristiti za detekciju solarnih neutrina [59], neutrina iz akceleratora i kozmičkih zraka [60], tamne materije [61], koherentno raspršenih neutrina [63], PET-u (*eng.* Positron-Emission Tomography) [78, 79] te digitalnoj radiografiji [80]. Također, GEM-ovi se mogu koristiti za proučavanje fizike elektronskih lavina u plemenitim plinovima na niskim temperaturama [21, 53, 56, 58].

## 4 Pikoampermetar

Precizno mjerenje malih struja na visokim naponima je potrebno prilikom rada, kalibracije i motrenja detektora baziranih na GEM tehnologiji. Komercijalni uređaji s rezolucijom boljom od 100 pA na naponima većima od 1 kV su rijetki i većinom su integrirani u izvore napona. Da bi se omogućilo mjerenje struje na specifičnim lokacijama potrebno je osmisliti odgovarajući uređaj. Primjer takvog uređaja je dan u [81], te opisuje pikoampermetre korištene za mjerenja struje u THGEM-ovima (*eng.* THick Gas Electron Multiplier) [82]. No, takav pikoampermetar zahtjeva dodatnu analizu prepoznavanja uzoraka, jer nije spojen na računalo, te se ne može koristiti pri visokim stopama mjerenja.

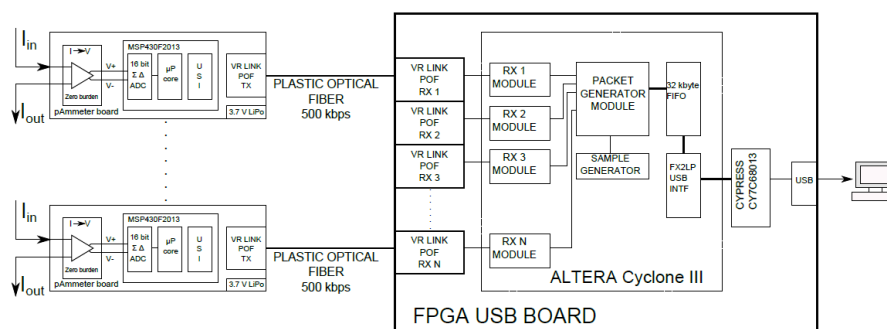
Za rad na standardnom trostrukom GEM postavu pikoampermetar mora moći mjeriti malene struje pri visokim naponima, do 5 kV naspram zemlje. Rad na visokom naponu je potreban za mjerenje struje na driftnoj katodi i na GEM elektrodama. Za takva precizna mjerenja bitno je da struja curenja bude minimalna. Strujom curenja se naziva naboj koji postepeno “iscuri” prema zemlji kroz komponente koje bi se inače smatrale izoliranim. Pomoću mjerenja struje na katodi i anodi se određuje povratni tok iona, definiran jednadžbom 3.2, koji mora biti dovoljno malen da bi se GEM-ovi mogli koristiti u komori vremenske projekcije. Raspon struje koju mjeri navedeni pikoampermetar je  $\pm 100$  nA, što odgovara potrebama kod standardnog trostrukog GEM postava s  $10 \times 10$  cm<sup>2</sup> velikim folijama. Također, raspon je uvjetovan mogućnošću mjerenja pri visokim stopama događaja (50 kHz) i velikim pojačanjima (20 000 puta). Da bi se mjerile struje pri standardnim laboratorijskim pojačanjima i stopama, potrebna je razlučivost bolja od 100 pA. Navedeni uvjeti na raspon i rezoluciju su prikladni za testiranje curenja struje, što je dio provjera kod GEM QA (*eng.* Quality Assurance).

### 4.1 Višekanalni pikoampermetar s optičkim prijenosom podataka

U Zagrebu je 2015.g. razvijen višekanalni pikoampermetar za rad pri visokim naponima i visokom stopom mjerenja. Glavni cilj je bio napraviti malen i svestran uređaj koji se može koristiti u raznim konfiguracijama gdje je potrebno precizno mjerenje struje. Prvi dizajn koristio je optičke kablove za prijenos podataka i komponente s minimalnom potrošnjom kako bi mu baterija što dulje trajala. Optički kablovi

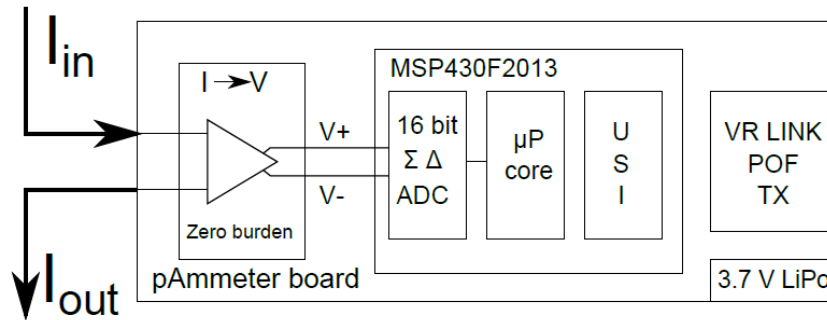
omogućuju visoku stopu očitavanja na željenim frekvencijama.

Cilj je bio napraviti male jedinice pikoampermetra koje se mogu lako montirati na standardni trostruki GEM postav. Da bi uređaj bio što manji prvotno su korištene baterije kao izvor napona, dok se sada koristi DC/DC konverter. Takav način napajanja ne unosi šum u sustav, što je vrlo bitno za precizna mjerenja malenih struja. Pošto je uređaj radio na bateriju, bitno je bilo da troši što manje snage te su komponente izabrane da imaju minimalnu potrošnju. Rad na kaskadi GEM folija zahtjeva da pikoampermetar ima barem 10 kanala za simultano digitalno očitavanje. Za svaku GEM foliju po dva kontakta te po jedna za ostale elektrode koje želimo pratiti, npr. driftna elektroda. Minimalna frekvencija očitavanja je 1 kHz da bi se uređaj mogao koristiti pri detekciji iskrenja, gdje se očekuju vremenske konstante 50-100 ms.



Slika 4.1: Blok dijagram dizajna cijelog pikoampermetra [83].

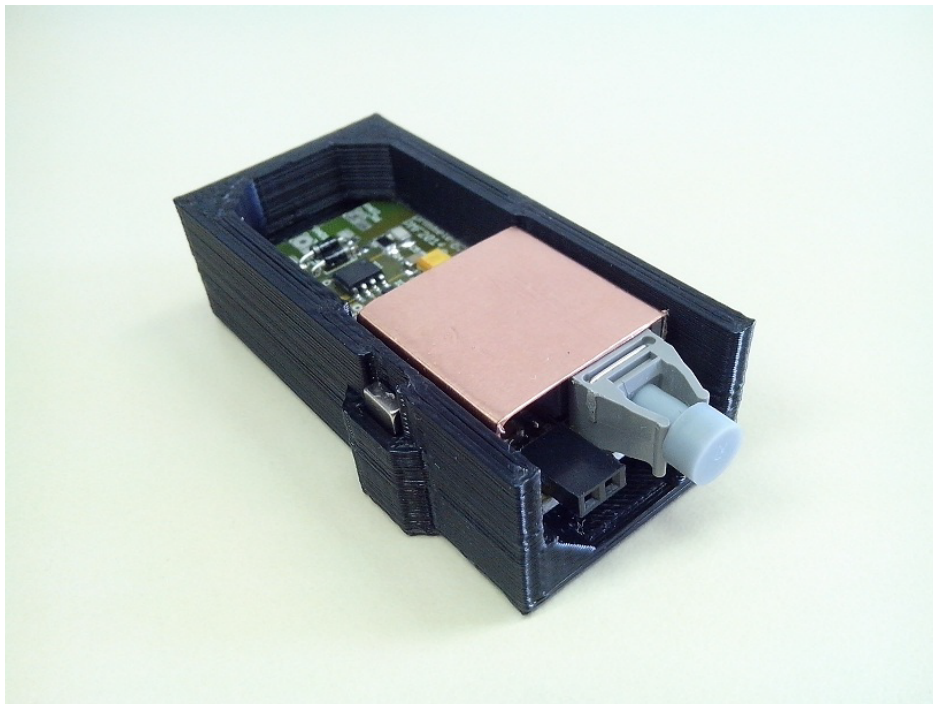
Blok dijagram koncepta pikoampermetra je prikazan na slici 4.1. Pikoampermetar se sastoji od dva glavna dijela, analognog i digitalnog. Analogni dio je pikoampermetarska pločica, čiji je blok dijagram prikazan na slici 4.2. Digitalni dio je FPGA (eng. Field Programmable Gate Array) USB pločica koja je dizajnirana tako da se na nju može istovremeno spojiti do 16 pikoampermetara, što omogućava simultana mjerenja struja na različitim mjestima. Digitalni i analogni dio su povezani optičkim kablom. Princip rada je prekomplikiran da bi se ulazilo u detalje, te se detaljni opis principa rada može pronaći u [83].



Slika 4.2: Blok dijagram dizajna pikoampermetarske ploče [83].

## 4.2 Realizacija pikoampermetra

Na slici 4.3 je prikazana pikoampermetarska pločica dimenzija  $54 \times 23.5 \text{ mm}^2$  u plastičnom kućištu vanjske dimenzije  $62.5 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 19 \text{ mm}$ . Pločica je pokrivena bakrenom trakom spojenom na zemlju, što štiti komponente od interferencije s digitalnim dijelom sklopa.

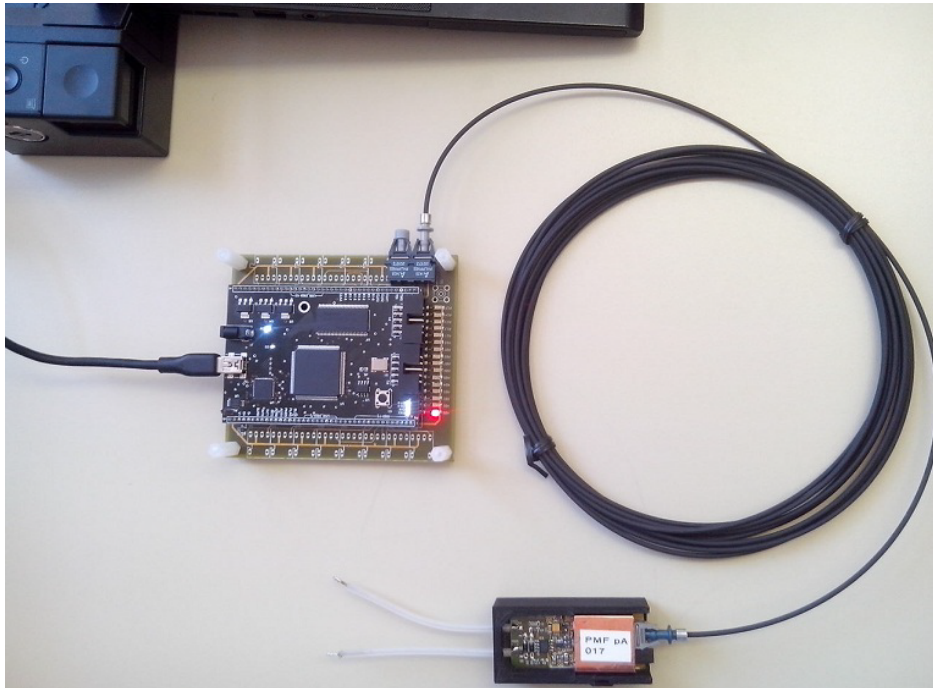


Slika 4.3: Pikoampermetarska ploča u plastičnom kućištu [83].

Izvor napajanja je DC/DC konverter, koji se sastoji od 6 IR dioda koje emitiraju infracrveno svjetlo i 6 PIN dioda koje primaju to svjetlo. PIN diode rade na istome principu kao fotonaponske ćelije i one daju struju potrebnu za rad pikoampermetarske pločice.



Pikoampermetarska pločica je spojena na FPGA USB pločicu s Versatile link optičkim kablom, prikazanim na slici 4.4. Korištena je FPGA ploča s ALTERA Cyclone III, FX2LP i 256 MBit SDRAM. FPGA USB konektor se nalazi na FPGA pločici zajedno s 16 optičkih receivera.



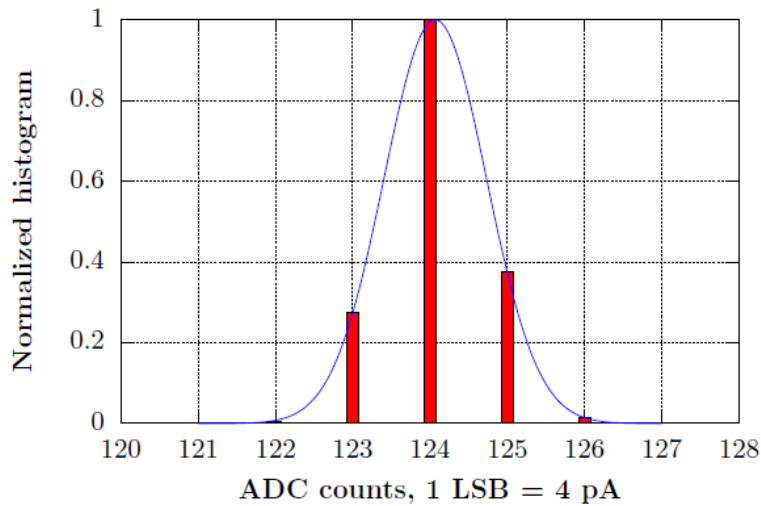
Slika 4.4: Jedna pikoampermetarska pločica spojena na FPGA ploču preko optičkog kabela, dalje spojenog na računalo preko USB-a [83].

### 4.3 Mjerenja stabilnosti i vremenske razlučivosti pikoampermetra

Spajanjem pikoampermetra na zemlju, bez puštanja struje kroz njega, i mjerenjem pri stopi od 1 kHz dobiveno je da kroz pikoampermetar prolazi 1.5 mA struje pri naponu od 3.7 V, tj. energetska potrošnja pri radnim uvjetima reda je veličine 5 mW. Isto mjerenje napravljeno je i spajanjem ampermetra na potencijal od -5 kV te nije došlo do pojave dodatnog šuma ili drugih značajnih problema [83].

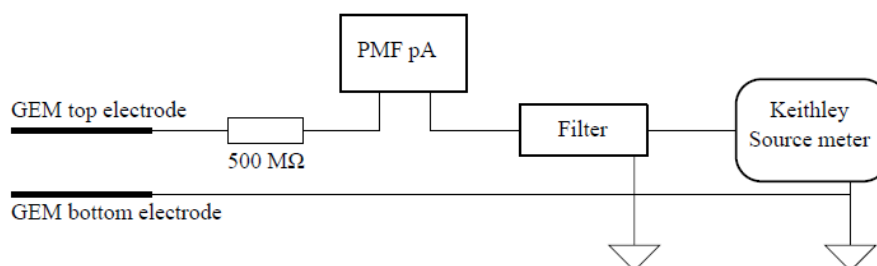
Iduće mjerenje dobiveno je spajanjem pikoampermetra na generator signala Agilent 33500B. Puštena je struja od 0.5 nA kroz pikoampermetar i mjerena kroz 15 minuta. Slika 4.5 prikazuje čisti signal iz ADC-a spojenog na ampermetar. Na signal je prilagođen Gaussijan i prikazuje očitavanja pri kojima jedan bin odgovara struji od 4 pA. FWHM (*eng.* Full Width at Half Maximum) na prilagođenom Gaussijanu je 6.5 pA u testiranju u kojemu je raspon pikampermetra namješten od -125 nA do 125

nA. Uz pretpostavku da generator signala daje stabilan signal koji odgovara 124 ADC bina, razlučivost detektora u takvim uvjetima je  $<7$  pA.



Slika 4.5: Histogram čistog signala iz ADC-a s prilagođenim Gaussijanom [83].

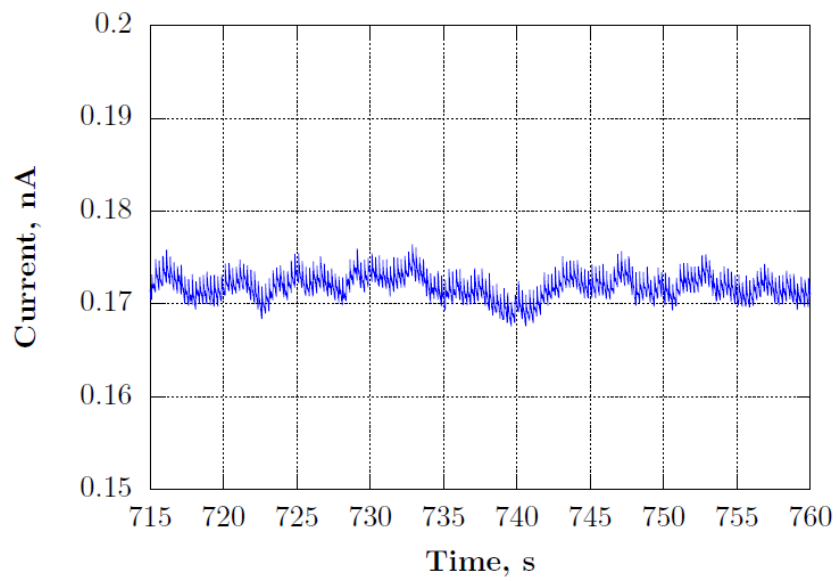
Nakon toga pikoampermetar je spojen na GEM postav u čistoj sobi. Pikoampermetar je spojen na GEM elektrodu i na Keithley 2410 (simulatani izvor i mjerič napona i struje), kao na slici 4.6. Da bi se ograničila struja kroz pikoampermetar, kod električnog izboja na GEM-u serijski je spojen otpornik od  $500\text{ M}\Omega$  između GEM elektrode i pikoampermetra. Na izlazu iz Keithley izvora napona spojen je niskopropusni filter da bi se smanjio visokofrekventni šum iz napajanja. Nakon spajanja je provedeno mjerenje struje kroz 50 minuta pri naponu od 600 V.



Slika 4.6: Blok dijagram GEM postava za mjerenje struje [83].

Primjenom napona od 600 V izmjerena je struja od  $\approx 0.172$  nA (slika 4.7). Kako se sam izvor napona stabilizirao svakih 250 ms, u očitanoj struji se vide nabori ampli-

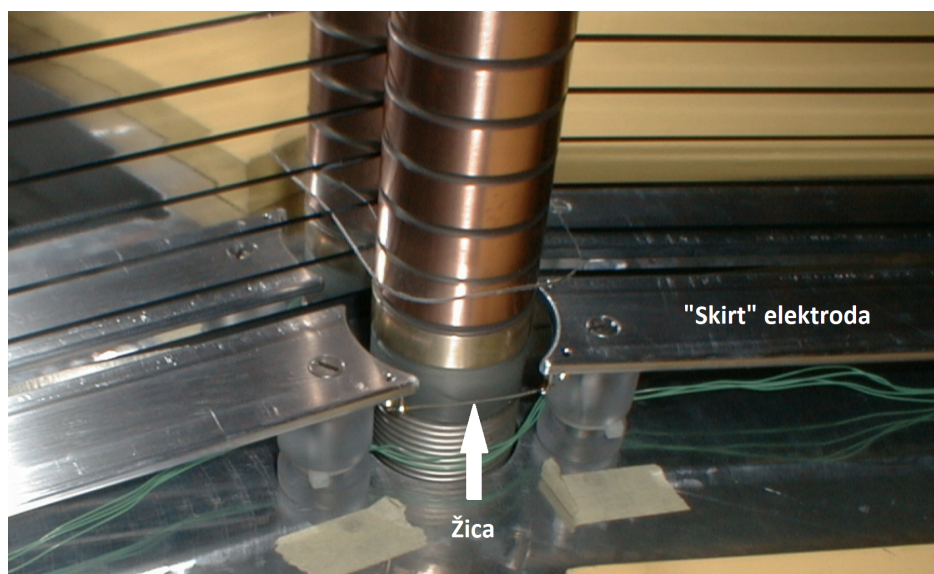
tude 4 pA. Sa stabilnijim izvorom napona bi se smanjili ti nabori. Ovim mjerenjima demonstriran je uspješan rad ampermetra u uvjetima u kojima se planira koristiti.



Slika 4.7: Mjerenja struje iz pikoampermetra pri naponu od 600 V na GEM elektrodi [83].

## 5 Ispitivanje iskrenja GEM postava

Unutar kaveza TPC-a se nalaze bakrene šipke (“resistor rod”) koje se koriste za korekciju napona. Također, pošto je kavez uzemljen, potrebno je između GEM folija i kaveza postaviti tzv. “skirt” elektrodu na koju će se nametnuti napon takav da se što je više moguće smanji distorzija polja unutar radnog područja TPC-a. Sve te komponente će biti na sličnom naponu no pošto nemaju sve isti izvor napajanja, pri uključivanju detektora moguće je da dođe do razlike potencijala od par kV. Sami GEM će biti na naponu od 3 – 4 kV, u odnosu na uzemljeni kavez. Za fiksne udaljenosti između komponenti, koje su određene dizajnom TPC-a, treba provjeriti koliki napon smije biti među komponentama da ne dođe do iskrenja. Iskrenje može napraviti štetu na detektoru i može pokvariti mjerenja, pa treba osigurati da se to neće dogoditi. Na slici 5.1 je prikazano kako izgledaju te kako su raspoređene komponente u detektoru. Na slici se vidi i žica koja spaja susjedne “skirt” elektrode koja bi isto mogla imati utjecaj na vjerojatnost iskrenja.

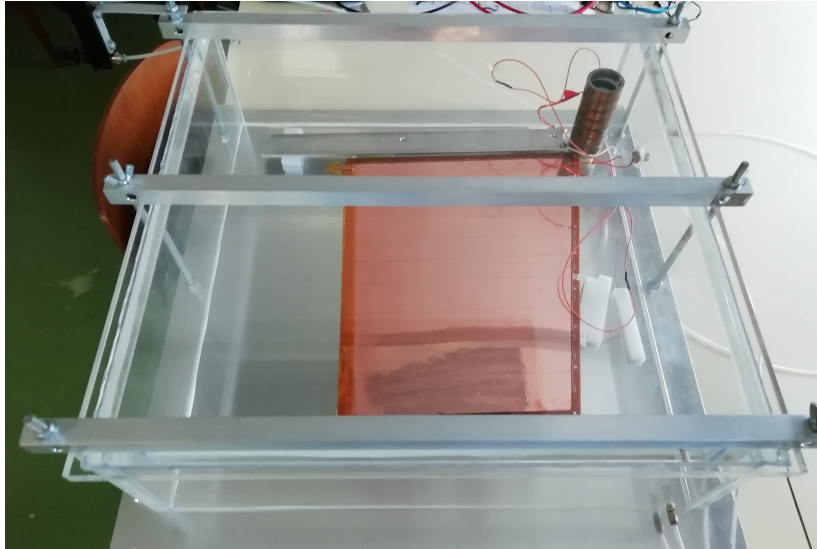


Slika 5.1: Fotografija ruba kaveza TPC-a, na kojoj se vide “skirt” elektrode povezane žicom i bakrena šipka. [4]

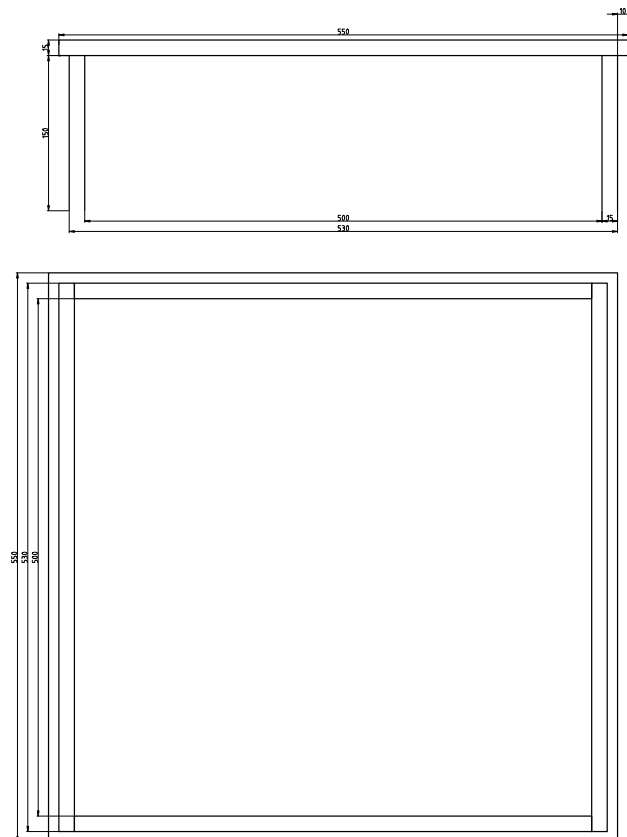
### 5.1 Testna komora

U laboratoriju u Zagrebu napravljen je testni postav kako bi se replicirali uvjeti kakvi će biti na ALICE TPC-u (slika 5.2). Postav se sastoji od komore unutar koje se nalaze komponente detektora. Komora je sastavljena od ploče prekrivene slojem metala i

poklopca od pleksiglasa (akrilnog stakla) debljine 15 mm. Dimenzije donje ploče su  $55\text{ cm} \times 55\text{ cm}$ , a unutarnje dimenzije poklopca su  $50\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ . Tlocrt i bokocrt komore su prikazani na slici 5.3.



Slika 5.2: Fotografija eksperimentalnog postava.



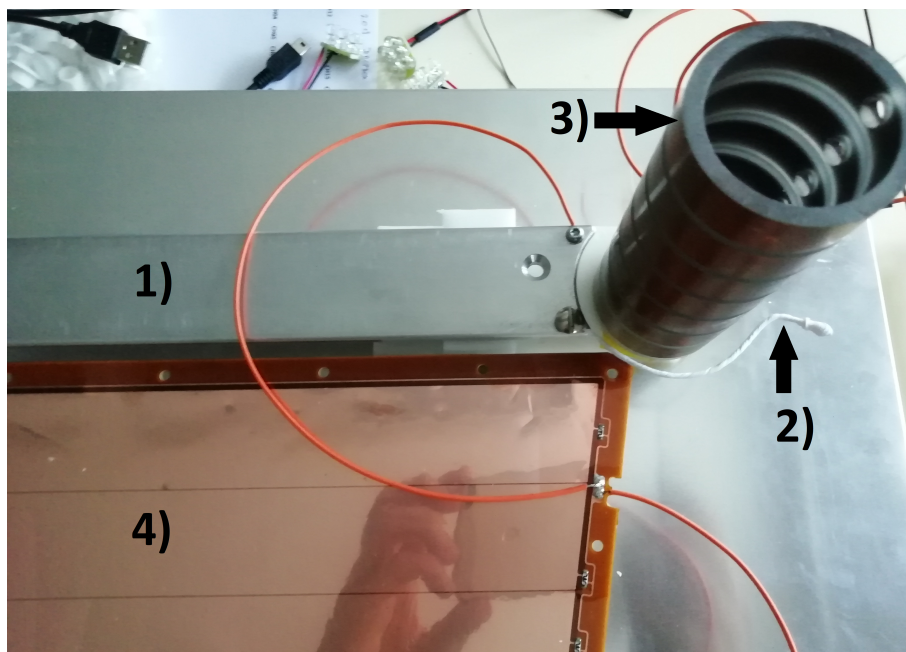
Slika 5.3: Bokocrt (gore) i tlocrt (dolje) komore.

Komponente detektora koje se nalaze unutar komore su: aluminijska “skirt” elektroda na koju je povezana žica od pocinčanog bakra izolirana teflonom, bakrena šipka i GEM folija (slika 5.4).

Pošto se postav sastoji od tri komponente na koje je potrebno nametnuti napon, postoji šest mogućih scenarija koji se mogu odigrati pri paljenju. Može se dogoditi da se na samo jednu komponentu nametne napon, dok su ostale uzemljene, ili da se napon nametne na dvije komponente dok je treća uzemljena. Potrebno je ispitati sve moguće scenarije kako bi se odredilo na kojim vrijednostima napona je detektor siguran od iskrenja. Također, potrebno je prvo odrediti gdje će žica prolaziti i kakvu izolaciju treba koristiti, jer te informacije nisu navedene u dizajnu detektora.

Prije svakog mjerenja provjereno je propušta li komora zrak. Nakon toga se upuhuje plin  $\text{Ne-CO}_2\text{-N}_2$  (90-10-5), koji će se koristiti na ALICE TPC-u, oko 5 sati pri atmosferskom tlaku. Budući da je komora relativno velikog volumena, oko 10 punih volumena komore se izmjeni prije mjerenja. Napon je doveden na gornju stranu GEM folije, koja je kratko spojena s donjom stranom.

Cijeli postav je podignut dva centimetra iznad podloge da bi se smanjio kapacitet između GEM-a i metalne podloge. Kontrolirani izvor napona marke ISEG je spojen s postavom preko SHV konektora. Napon je računalno, preko programa LabView, postepeno podizan do pojave iskre.



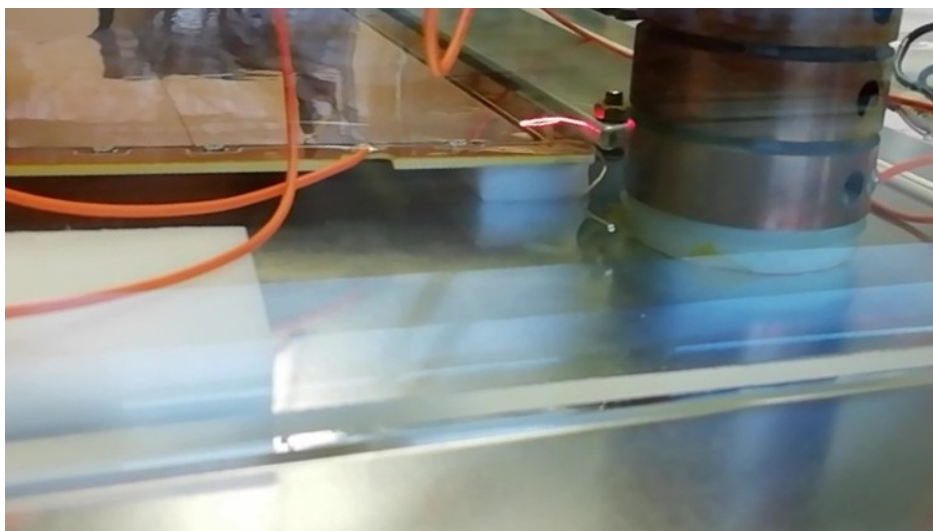
Slika 5.4: Fotografija postava gdje je: 1) “skirt” elektroda, 2) žica omotana teflonom, 3) bakrena šipka i 4) GEM folija.

## 5.2 Mjerenja s žicom promjera 1 mm s teflonskom izolacijom

U dizajnu detektora nije određeno gdje će točno prolaziti žica i kolika će biti debljina teflonske izolacije. Korištenjem raznih položaja žice i raznih debljina teflona, odredit će se koja je udaljenost žice i debljina izolacije sigurna od nepoželjnih električnih proboja.

Udaljenosti između okvira GEM folije i ostatka postava je 5 mm, dok je udaljenost šipke od “skirta”, zajedno sa žicom 6.5 mm. Sve udaljenosti su ručno podešavane prije svakog mjerenja, uz korištenje pomične mjerke, pa u njima postoji određena greška. Udaljenost između GEM-a i šipke je pri ovim mjerenjima manja za otprilike 2 mm od udaljenosti navedene u dizajnu detektora. Taj razmak je bilo najteže postaviti te se korištenjem manje udaljenosti postavila donja granica za proboj. Također, ta udaljenost ima direktnu vezu s udaljenosti između žice i GEM folije pa je bolje da smo sigurni da je udaljenost manja od planirane. Za ova mjerenja korištena je žica promjera 1 mm.

Prva mjerenja, slike 5.5 i 5.6, su napravljena tako da gola žica prolazi ispod GEM folije. Napon je samo na GEM foliji, a ostale komponente su uzemljene. Najkraća udaljenost između vodljivog dijela GEM folije i žice je oko 11 mm.

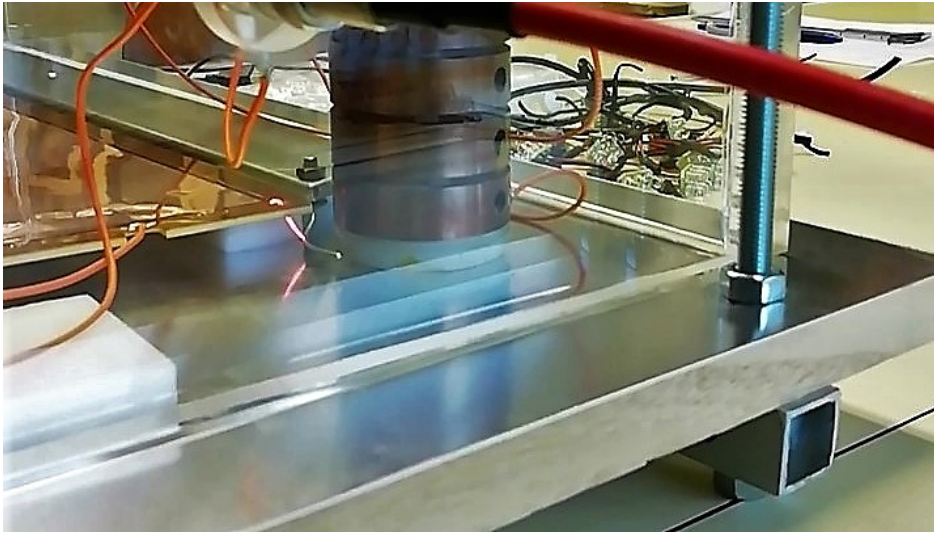


Slika 5.5: Napon je na GEM-u, a ostatak postava je uzemljen, udaljenost GEM-“skirt”  $\approx$  13 mm, izboj na 5.8 kV.

Na slici 5.5 se vidi iskra između “skirt” elektrode i GEM folije na naponu od 5.8 kV. Udaljenost koju je iskra prešla je oko 13 mm.

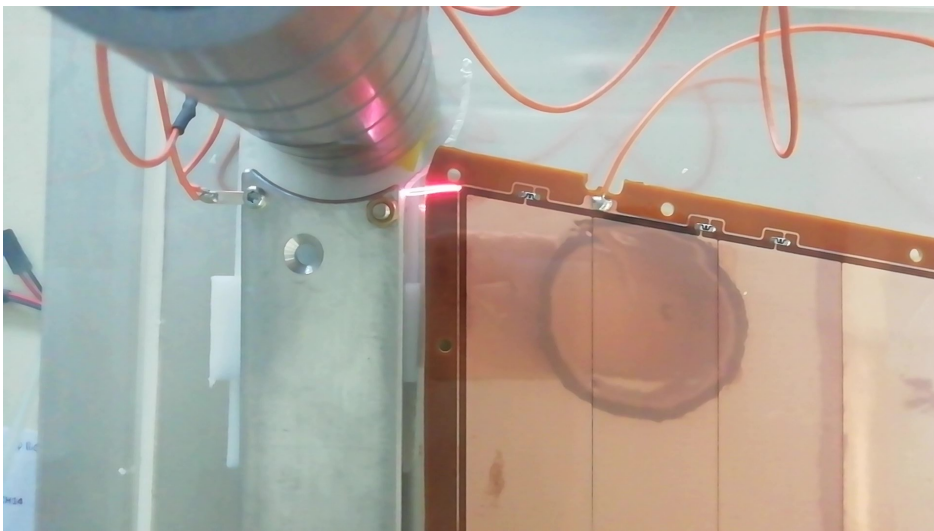
Na slici 5.6 je na naponu od 5.75 kV iskra skočila na žicu kroz rupu u okviru GEM folije. Udaljenost vodljivog dijela GEM-a od žice je oko 11 mm. To je najkraća uda-

ljenost koju je iskra mogla prijeći do uzemljenog dijela postava te je zato preskočila na tako zanimljiv način.



Slika 5.6: Napon između GEM-a i ostatka postava, udaljenost GEM-žica  $\approx 11$  mm, izboj na 5.75 kV.

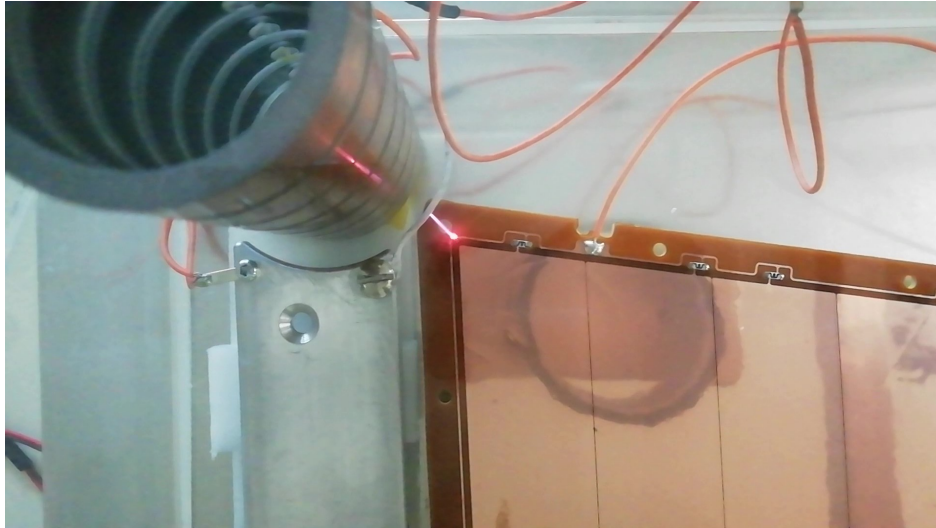
Na slici 5.7 je slučaj kad je žica izolirana tankim slojem teflona debljine oko  $50 \mu\text{m}$ , izboj se dogodi između GEM folije i “skirt” elektrode, na naponu od 5.5 kV. Udaljenost vodljivog dijela GEM-a od “skirt”-a je oko 13 mm.



Slika 5.7: Napon između GEM-a i ostatka postava, udaljenost GEM-“skirt”  $\approx 13$  mm, izboj na 5.5 kV.

U idućim mjerjenjima žica prolazi iznad GEM folije i udaljena je oko 9 mm od vodljivog dijela. Na slici 5.8, iskra je izbila između GEM folije i žice, na naponu od 5 kV.





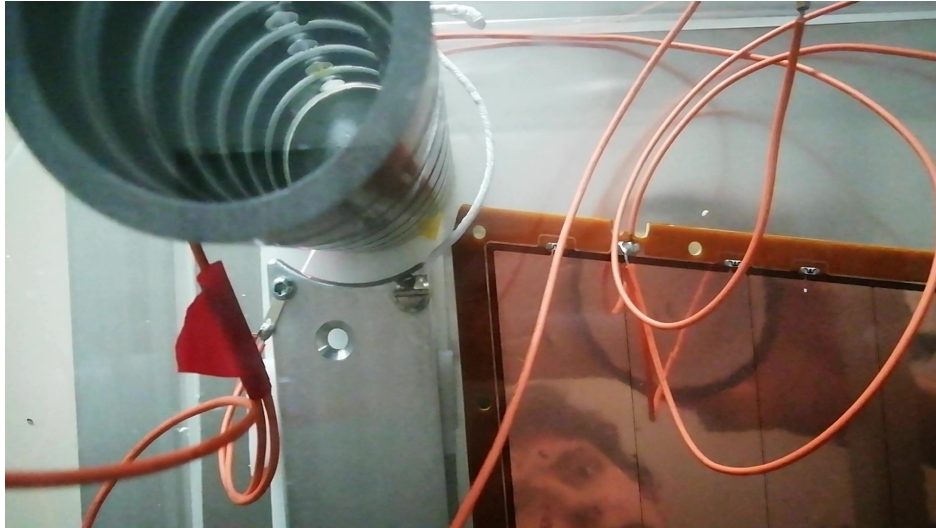
Slika 5.8: Napon između GEM-a i ostatka postava, udaljenost GEM-žica  $\approx 9$  mm, izboj na 5 kV.

Nakon što je izbila iskra između GEM-a i žice, dodan je još jedan sloj teflona na žicu. Znači, debljina teflonske izolacije je oko 0.1 mm. Napon je, uz GEM foliju, doveden i na “skirt”. Na slici 5.9 je došlo do izboja između žice i šipke na naponu od 5.4 kV. Udaljenost žice od šipke je 6.5 mm.



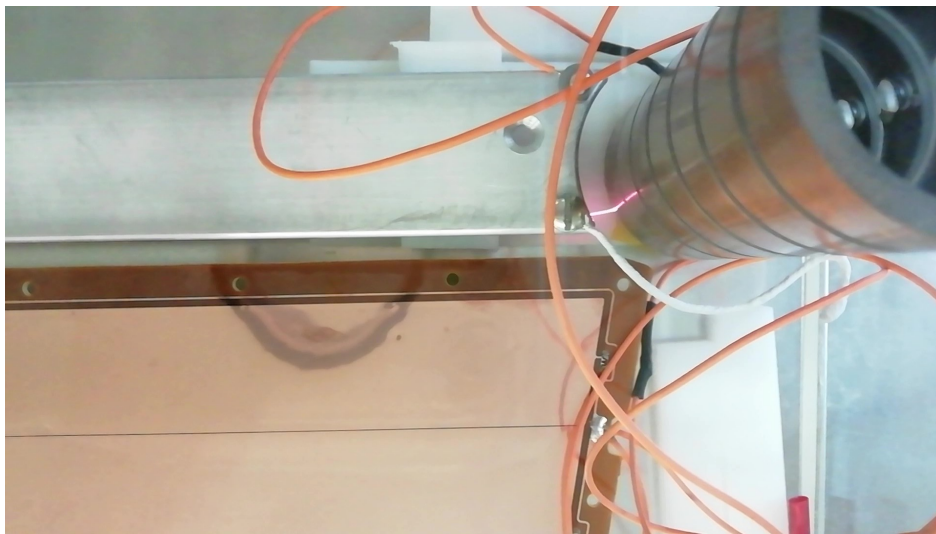
Slika 5.9: Napon je na GEM-u i “skirt”-u, a šipka je uzemljena, udaljenost šipka-žica  $\approx 6.5$  mm, izboj na 5.4 kV.

Nakon što je iskra opet izbila iz žice, dodano je još par slojeva teflona, te je izolacija na slici 5.10 debela oko 0.3 mm. Napon je na GEM foliji i šipci, dok je “skirt” elektroda uzemljena. Iskra je izbila između “skirt”-a i šipke, na naponu od 4.8 kV i udaljenosti  $\approx 6.5$  mm.



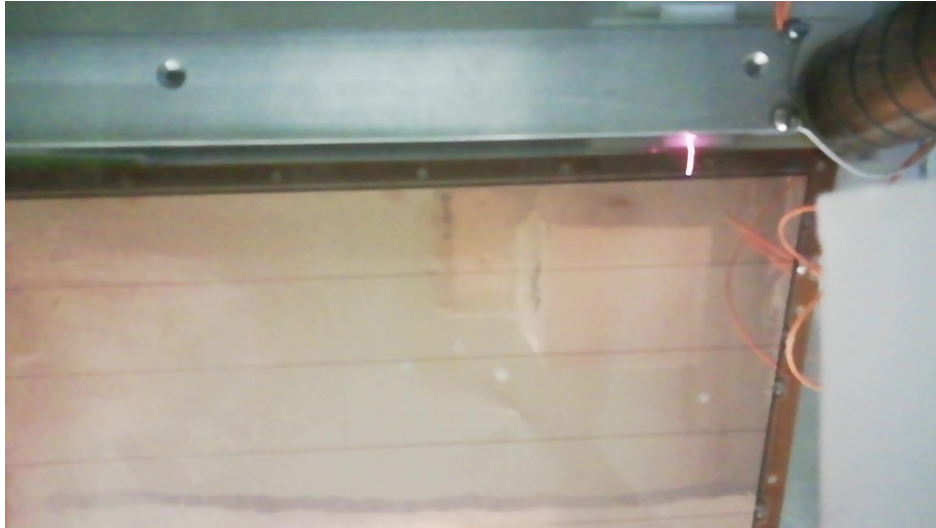
Slika 5.10: Napon je na GEM-u i šipci, a “skirt” je uzemljen, udaljenost šipka-“skirt”  $\approx 6.5$  mm, izboj na 4.8 kV.

Nametanjem napona samo na “skirt” elektrodu dolazi do izboja na 4.8 kV, između “skirt”-a i šipke (slika 5.11). Pri ovome mjerenju i mjerenju prikazanom na slici 5.10 je najmanja vrijednost napona pri kojoj dolazi do iskrenja.



Slika 5.11: Napon je na “skirt”-u, a GEM folija i šipka su uzemljeni, udaljenost šipka-“skirt”  $\approx 6.5$  mm, izboj na 4.8 kV.

Na kraju je napon stavljen na “skirt” i na šipku, dok je GEM folija uzemljena. Iskrenje se krenulo pojavljivati tek na naponu od 6.5 kV, između “skirt”-a i GEM folije (slika 5.12), a i između šipke i GEM folije (slika 5.13). Pošto su šipka i “skirt” jednako udaljeni od vodljivog dijela GEM folije, za očekivati je da će doći do iskrenja između obje komponente i GEM-a. Udaljenost koju je iskra prevalila je  $\approx 13$  mm.



Slika 5.12: Napon je na šipci i “skirt”-u, a GEM je uzemljen, udaljenost GEM-“skirt”  $\approx 13$  mm, izboj na 6.5 kV.



Slika 5.13: Napon je na šipci i “skirt”-u, a GEM je uzemljen, udaljenost GEM-šipka  $\approx 13$  mm, izboj na 6.5 kV.

Usporedbom ovih mjerenja (slika 5.12 i 5.13) sa slučajem kad je samo GEM folija na naponu (slika 5.7), vidi se da je bitno koja je komponenta na visokom naponu, tj. da nije bitna samo razlika potencijala za električni izboj već je bitan i polaritet napona. U ovome konkretnom slučaju s GEM folije izbija na 5.5 kV, dok s šipke ili “skirt”-a na 6.5 kV. To nam govori da bakar na GEM foliji ima puno manji izlazni rad od bakrene šipke ili aluminijske “skirt” elektrode. Šipka i “skirt” imaju približno jednak izlazni rad što potvrđuje ista vrijednost napona na slikama 5.10 i 5.11.

Mjerenje gdje je samo šipka na visokom naponu nije napravljeno, ali za očekivati je da ne bi vodilo do novih spoznaja. Dobili bi se slični rezultati kao u slučaju na slici

5.10, gdje je uz šipku i GEM folija također na naponu. Iskrenje se događa tamo gdje je najmanja udaljenost, a to je između “skirt”-a i šipke tako da napon na GEM foliji ne igra značajnu ulogu na kojoj će vrijednosti napona doći do izboja.

Sve vrijednosti napona na kojima je došlo do izboja sabrane su u tablici 5.1. Najniža vrijednost napona pri kojoj je došlo do iskrenja je 4.8 kV, dok je radni napon za korištene komponente detektora oko 3.5 kV. Razlika od  $\sim 1$  kV nam osigurava da do iskrenja neće doći, ako su zadržane udaljenosti među komponentama: GEM-“skirt”=5 mm, GEM-šipka=5 mm, “skirt”-šipka=6.5 mm. Primijećeno je da se iskrenje događa većinom između žice i ostatka postava. Da bi se osigurali da žica neće stvarati probleme, preporučio bih izolaciju od teflona debljine 0.3 mm.

| Komponente na naponu: | Napon pri izboju: | Udaljenost:  |
|-----------------------|-------------------|--------------|
| GEM folija            | 5.8 kV            | (13±0.5) mm  |
| GEM folija            | 5.75 kV           | (11±0.5) mm  |
| GEM folija            | 5.5 kV            | (13±0.5) mm  |
| GEM folija            | 5 kV              | (9±0.5) mm   |
| GEM folija i “skirt”  | 5.4 kV            | (6.5±0.5) mm |
| GEM folija i šipka    | 4.8 kV            | (6.5±0.5) mm |
| “skirt”               | 4.8 kV            | (6.5±0.5) mm |
| “skirt” i šipka       | 6.5 kV            | (13±0.5) mm  |

Tablica 5.1: Sve vrijednosti na kojima je došlo do izboja i prikladne udaljenosti. U prvom stupcu su napisane komponente na kojima je napon, dok je ostatak uzemljen. U drugom su stupcu vrijednosti napona pri kojem je došlo do izboja. Treći stupac označava udaljenost koju je iskra prevalila.

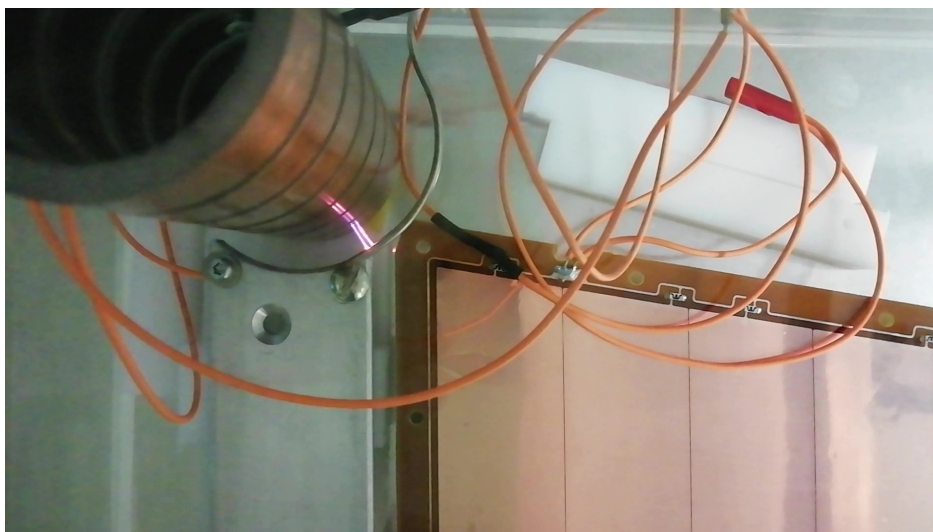
Pri završetku mjerenja dogovorena je online prezentacija s grupom TPC stručnjaka. Nakon prezentacije je zaključeno da će žica sigurno prolaziti barem 5 mm iznad GEM folije na 6.5 mm udaljenosti od šipke. No, postavilo se pitanje može li se koristiti žica bez teflonske izolacije. Predloženo je da se naprave mjerenja s debljom žicom, promjera 2 mm, bez korištenja teflonske izolacije. Deblja žica je predložena da bi se smanjio radijus zakrivljenosti čime bi se možda umanjila tendencija izboja direktno na žicu.

### 5.3 Mjerenja s žicom promjera 2 mm

Postavljenjem deblje žice smanjuje se njena udaljenost od ostalih komponenti. Da bi se održala udaljenost od 6.5 mm između žice i šipke, mora doći do preklapanja između žice i ruba GEM folije. Da bi se smanjilo preklapanje, udaljenost ruba i GEM

folije je kod ovih mjerenja postavljena na 7.5 mm, kao što je navedeno u dizajnu detektora. Takva konfiguracija daje udaljenost žice i vodljivog dijela GEM folije oko 9 mm, što je ista udaljenost kao u prošlim mjerenjima. Ostale udaljenosti su ostale iste: GEM folija-“skirt”=5 mm, “skirt”-šipka=6.5 mm.

Mjerenja su započeta stavljanjem napona na “skirt” elektrodu dok su ostale komponente uzemljene. Do iskrenja dolazi između “skirt”-a i šipke, čija je udaljenost  $\approx$  6.5 mm, pri naponu od 5.4 kV. Iskrenje vidimo na slici 5.14. Ovaj slučaj odgovara situaciji iz prijašnjih mjerenja na slici 5.11. Do razlike od skoro pola kilovolta je došlo zbog toga što udaljenost igra bitnu ulogu te su pri mjerenjima s debljom žicom “skirt” i šipka vjerojatno bili bliži za  $\sim$  1 mm.

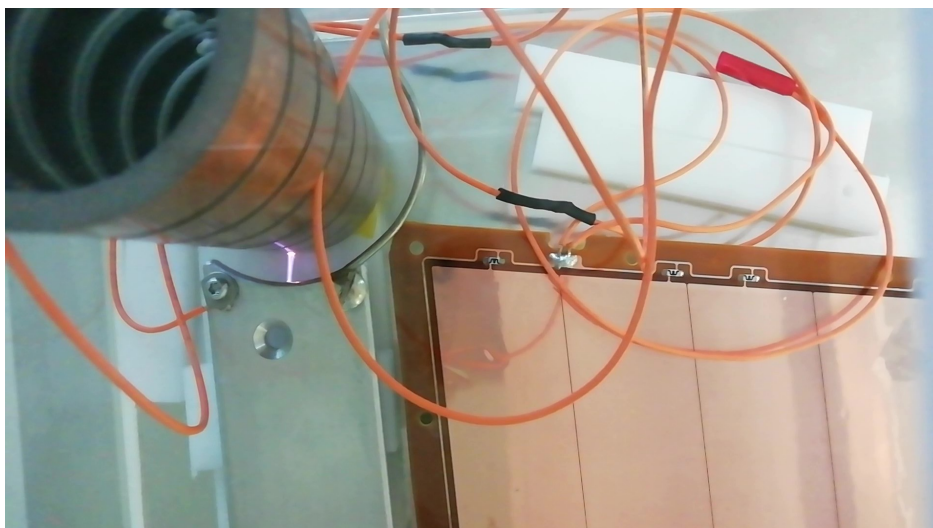


Slika 5.14: Napon je na “skirt”-u, a ostatak je uzemljen, udaljenost “skirt”-šipka  $\approx$  6.5 mm, izboj na 5.4 kV.

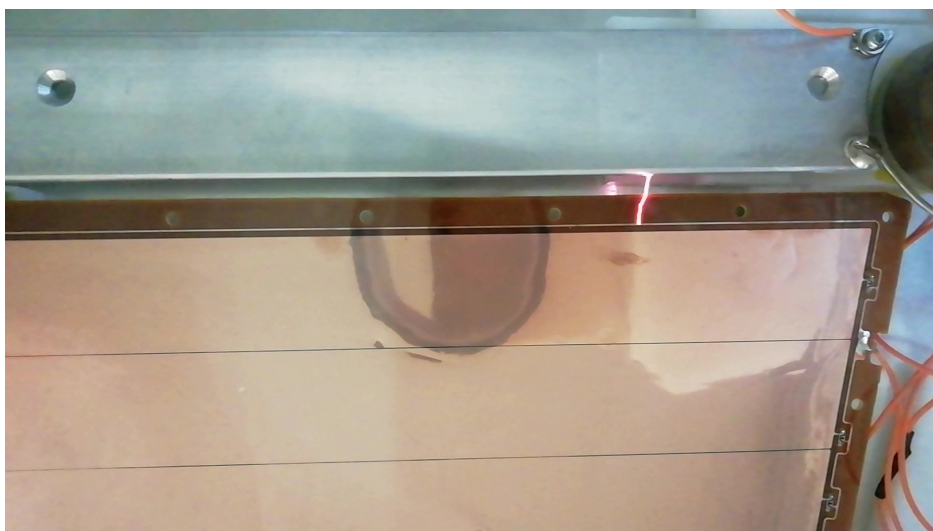
Postavljanjem napona samo na šipku, dok je ostatak uzemljen dolazi do izboja na 5.4 kV, između šipke i “skirt”-a (slika 5.15). Udaljenost je oko 6.5 mm. Ovo mjerenje se slaže s prošlim mjerenjem (slika 5.14).

Slučaj u kojemu su “skirt” i šipka na naponu je prikazan na slici 5.16. Do električnog izboja je došlo na naponu od 6.5 kV, a iskra je prevalila put od  $\approx$  13 mm. Ova mjerenja se u potpunosti slažu s prijašnje napravljenim mjerenjima (slika 5.12 i 5.13).

Kad je samo GEM folija na visokom naponu do izboja dolazi na 5 kV i iskri između žice i vodljivog dijela GEM folije čija je udaljenost  $\approx$  9 mm. Slučaj je prikazan na slici 5.17. Usporedbom s prijašnjim mjerenjima, slika 5.8, vidimo da je do izboja došlo pri istom naponu. Da se zaključiti da toliko tanak sloj teflona ne pruža značajnu izolaciju



Slika 5.15: Napon je na šipci, a ostatak je uzemljen, udaljenost “skirt”-šipka  $\approx 6.5$  mm, izboj na 5.4 kV.



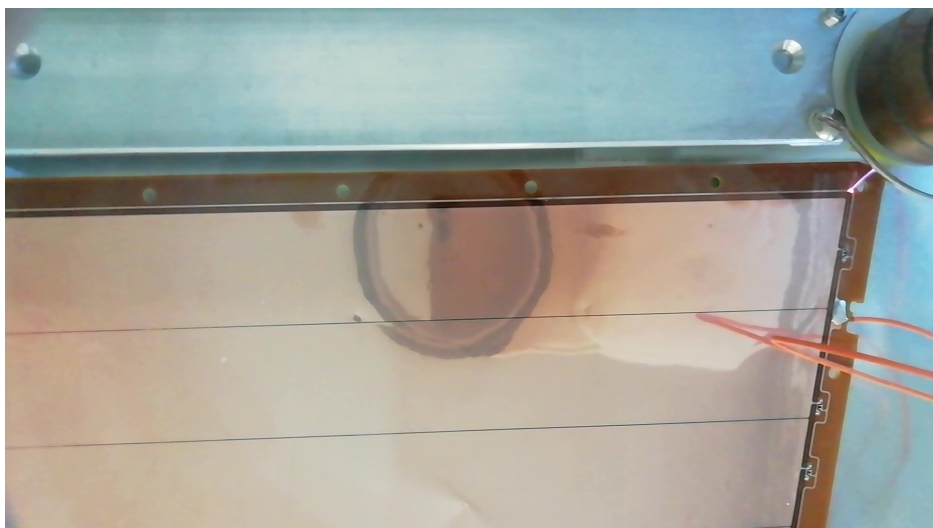
Slika 5.16: Napon je na šipci i “skirt”-u, a ostatak je uzemljen, udaljenost “skirt”-GEM  $\approx 13$  mm, izboj na 6.5 kV.

pri naponima oko 5 kV.

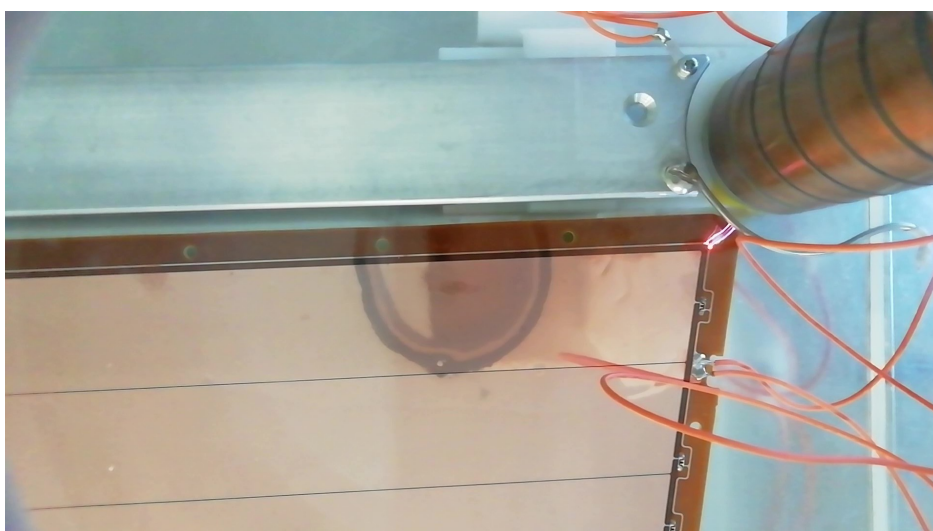
Postavljanjem napona na GEM i šipku dobiva se isti rezultat kao i kad je napon samo na GEM-u. Iskri između GEM-a i žice na 5 kV (slika 5.18).

Postavljanjem napona na GEM i na “skirt” do izboja dolazi na 5.5 kV između šipke i “skirt”-a (slika 5.19). Ovo mjerenje se slaže s mjerenjem na slici 5.14, kad je samo “skirt” bio na naponu.

U tablici 5.2 su sve vrijednosti pri kojima je došlo do izboja za mjerenja napravljena s žicom debljine 2 mm. Najniža vrijednost napona pri kojoj je došlo do izboja je 5 kV, između GEM folije i žice. Radni napon GEM folije je oko 3.5 kV, što je za 1.5



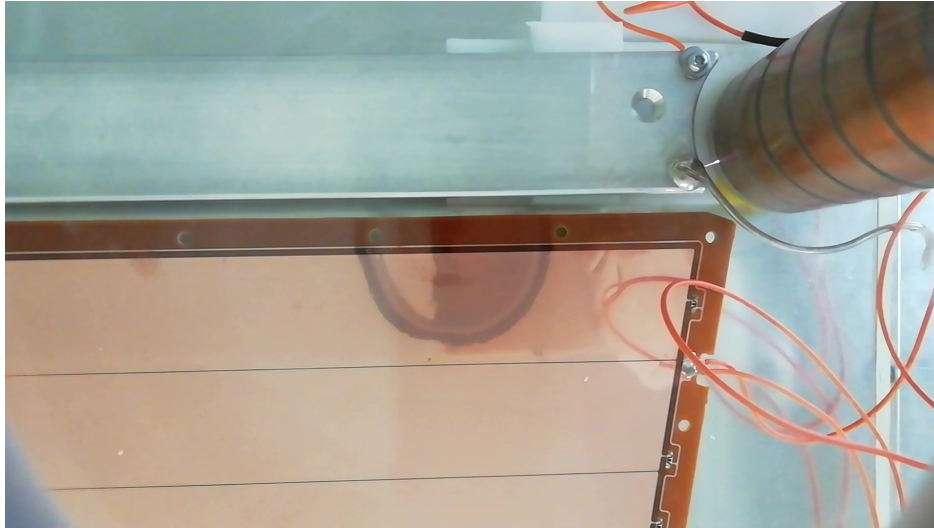
Slika 5.17: Napon je na GEM-u, a ostatak je uzemljen, udaljenost žica-GEM  $\approx 9$  mm, izboj na 5 kV.



Slika 5.18: Napon je na GEM-u i šipci, a ostatak je uzemljen, udaljenost žica-GEM  $\approx 9$  mm, izboj na 5 kV.

kV manje od najmanjeg napona pri kojem je došlo do iskrenja.

Razlika između mjerenja s tanjom i debljom žicom je, osim očite razlike u promjerima žice, udaljenost između GEM-a i šipke. No, te razlike u udaljenosti se otprilike poništavaju pa je jedina efektivna razlika radijus zakrivljenosti žice, što bi moglo igrati ulogu u naponu potrebnom da bi došlo do izboja. Ako su mjerenja s obje žice bila međusobno konzistentna, rezultati u kojima žica ne igra ulogu bi trebali biti jednaki. Usporedbom rezultati iz tablice 5.1 i 5.2 se vidi da se mjerenja kada su GEM i “skirt” te “skirt” i šipka na naponu, međusobno podudaraju. Mjerenja u kojima dolazi do izboja između “skirt”-a i šipke bi trebali dati jednake rezultate, što ovdje nije



Slika 5.19: Napon je na GEM-u i “skirt”-u, a ostatak je uzemljen, udaljenost “skirt”-šipka  $\approx 6.5$  mm, izboj na 5.5 kV.

| Komponente na naponu: | Napon pri izboju: | Udaljenost:        |
|-----------------------|-------------------|--------------------|
| “skirt”               | 5.4 kV            | $(6.5 \pm 0.5)$ mm |
| šipka                 | 5.4 kV            | $(6.5 \pm 0.5)$ mm |
| “skirt” i šipka       | 6.5 kV            | $(13 \pm 0.5)$ mm  |
| GEM folija            | 5 kV              | $(9 \pm 0.5)$ mm   |
| GEM folija i šipka    | 5 kV              | $(9 \pm 0.5)$ mm   |
| GEM folija i “skirt”  | 5.5 kV            | $(6.5 \pm 0.5)$ mm |

Tablica 5.2: Vrijednosti na kojima je došlo do izboja i prikladne udaljenosti za mjerenja s žicom promjera 2 mm. U prvom stupcu su napisane komponente na kojima je napon, dok je ostatak uzemljen. U drugom su stupcu vrijednosti napona pri kojem je došlo do izboja. Treći stupac označava udaljenost koju je iskra prevalila.

slučaj zbog greške u udaljenosti. Naime, razlika u udaljenosti reda veličine milimetar može dovesti do razlike u naponu izboja od par stotina volta. To i je slučaj u mjerenjima kad su GEM folija i šipka, i sami “skirt” na naponu. Na prvim mjerenjima (slike 5.10 i 5.11) je došlo do izboja na 4.8 kV, dok je na idućim mjerenjima (slike 5.14 i 5.15) došlo do izboja na 5.4 kV. Ta mjerenja su konzistentna, unatoč razlici od 600 V, zbog greške u udaljenosti među komponentama. To samo znači da su u mjerenjima s debljom žicom “skirt” i šipka bili udaljeniji nego kod mjerenja s tanjom žicom.

U oba slučaja je minimalni napon pri kojem je došlo do iskrenja za više od 1 kV veći od radnog napona GEM folije. Svakako je bolje za koristiti žicu izoliranu teflonom, no ako to nije moguće gola žica promjera 2 mm je također sigurna za rad.

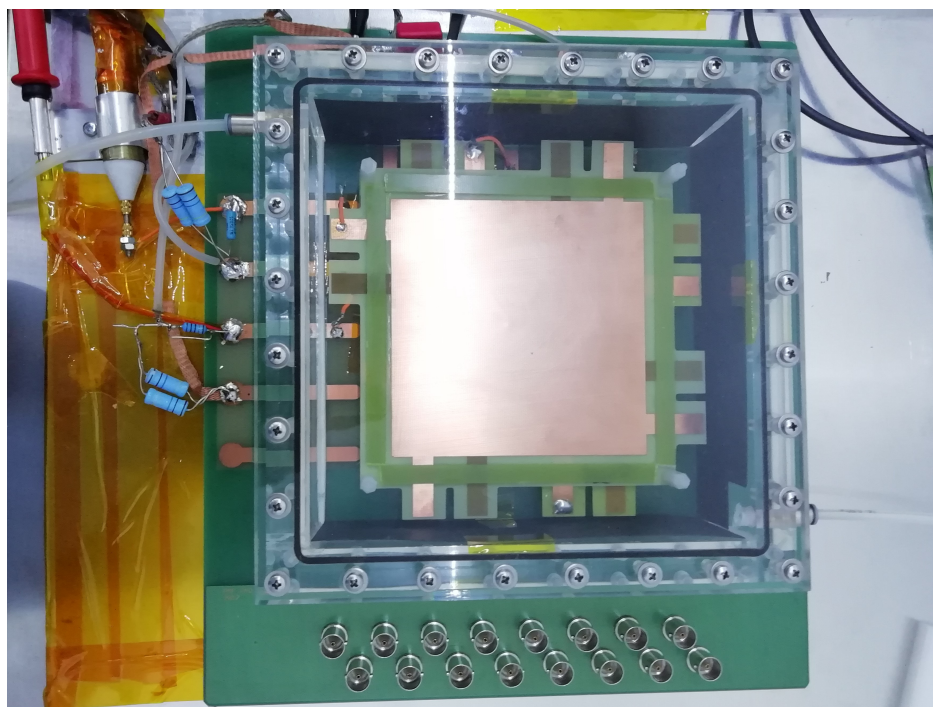


## 6 Mjerenje struje s GEM elektroda

Pomoću pikoampermetra, koji je dizajniran upravo za rad na GEM folijama, vrlo se precizno mogu mjeriti malene struje između elektroda na GEM postavu. Precizna mjerenja struje daju bolje uvide o tome što se događa u detektoru u raznim situacijama, npr. pri stavljanju napona ili prilikom iskrenja. Iz tih mjerenja se mogu dobiti informacije koje su korisne za testiranje ili nadogradnju detektora. Konkretno, iz mjerenja struje curenja između elektroda na jednoj GEM foliji može se dobiti informacija o tome kad će doći do električnog izboja. Znajući kad će doći do iskrenja, pravovremenim isključivanjem ili smanjivanjem napona iskrenje se može izbjeći, što nosi očitu prednost za ispravan i kontinuiran rad detektora.

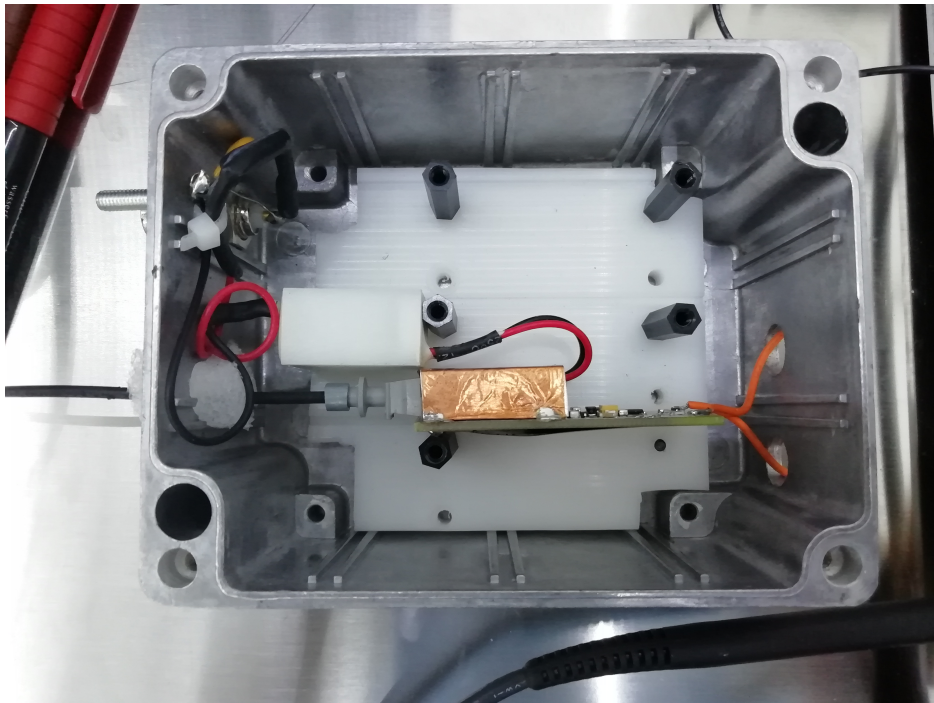
### 6.1 GEM postav u čistoj sobi

Mjerenja struje u Zagrebu se rade u čistoj sobi na standardnom GEM postavu. Na podlozi, koja je u biti elektroda za očitavanje kao što će se koristiti na ALICE TPC-u, se unutar komore od pleksiglasa nalazi jedna ili više  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  GEM folija (slika 6.1). U komoru se pušta mješavina plina  $\text{Ne-CO}_2\text{-N}_2$  (90-10-5) pri atmosferskom tlaku.



Slika 6.1: Fotografija GEM postava u čistoj sobi.

Na lijevom dijelu slike 6.1 vide se priključci za napajanje pojedinačnih elektroda. Pri mjerenjima je korišten izvor napona marke ISEG. Kod kontakata za napajanje se vide elektrode povezane otpornicima. Otpornici su postavljeni da bi se pri izboju umanjila snaga struje kroz elektrode i sustav za iščitavanje, kako ne bi došlo do oštećenja. U gornjem lijevom kutu se vide sonde dizajnirane za mjerenja s pikoampermetrom koje imaju točno određen kapacitet, kako bi se mogla raditi vrlo precizna mjerenja. Pikoampermetar i mikrometar su serijski spojeni između elektroda na jednoj GEM foliji, kao na slici 4.6. Na slici 4.6 nije prikazan mikrometar. Fotografija pikoampermetra u metalnom kućištu korištenog pri mjerenjima je na slici 6.2. Pikoampermetar je dalje spojen na FPGA pločicu koja je spojena na računalo.

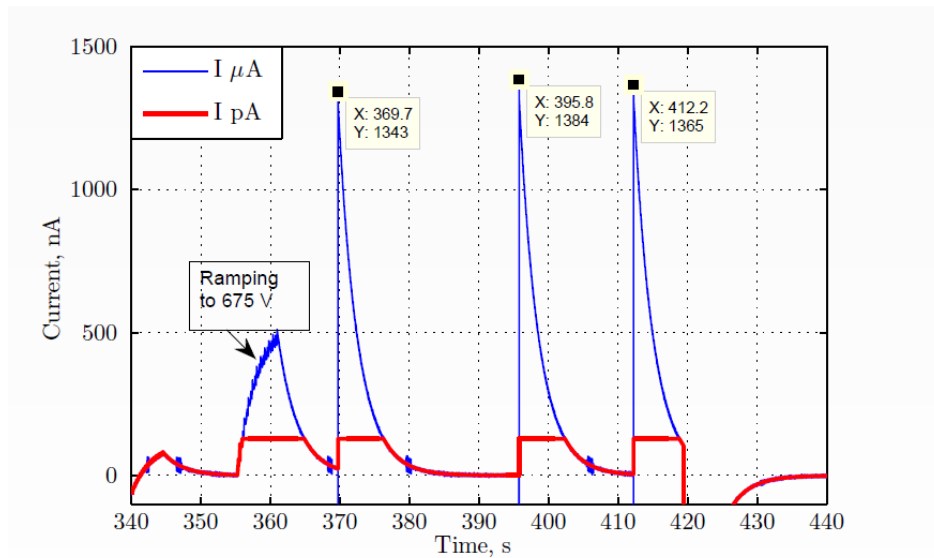


Slika 6.2: Fotografija pikoampermetra unutar kućišta.

## 6.2 Rezultati mjerenja struje s GEM elektroda

Podizanjem napona na GEM foliji do 675 V inducirano je iskrenje. Korišteni pikoampermetar ima raspon od -127 nA do 127 nA, a mikroampermetar od -60  $\mu$ A do 60  $\mu$ A. Snimljeni rezultati su prikazani na slici 6.3.

Vidi se na slici 6.3 da su očitavanja s pikoampermetra ograničena odozgo na 127 nA, zbog raspona na kojemu mjeri sam pikoampermetar. Mjerenja s mikroampermetrom se podudaraju s mjerenjima pikoampermetra te se vidi kako struja brzo raste



Slika 6.3: Vremenska ovisnost iznosa struje na pikoampermetru (crveno) i mikroampermetru (plavo). Napon na GEM foliji je 675 V.

prije pojave iskre. Na prvom vrhu se lijepo vidi postepeni porast struje u vremenu. Na drugim vrhovima je taj porast brži, no vidi se na manjoj vremenskoj skali. Detekcijom tog porasta u struji i isključivanjem napajanja nakon detekcije, moglo bi se spriječiti iskrenje. Na slici se također da primijetiti kako do izboja prvo dođe na nižoj vrijednosti struje te kasnije taj iznos poraste i ostaje približno konstantan.

## 7 Zaključak

Mjerenjima prikazanim u poglavlju 5 ispitana su visokonaponska svojstva GEM postava, koji je replika sustava za očitavanje signala koji će se koristiti u komori vremenske projekcije na ALICE detektoru. Demonstrirano je da će primjenom dovoljno visokog napona doći do iskrenja među komponentama postava.

Za fiksne udaljenosti među komponentama, koje su zadane dizajnom detektora, dobiveno je da je minimalna vrijednost napona pri kojoj dolazi do električnog izboja 4.8 kV. Izboj se događa između “skirt” elektrode i šipke (“resistor rod”) pri udaljenosti od  $\approx 6.5$  mm. Maksimalni radni napon na komponentama detektora je oko 3.5 kV. Razlika od 1 kV između radnog napona i minimalnog napona potrebnog za izboj osigurava da do izboja neće doći, ako se zadrže udaljenosti iz dizajna detektora.

U dizajnu detektora nije naveden položaj žice koja spaja susjedne “skirt” elektrode niti joj je određen promjer i eventualna izolacija. Mjerenjima je pokazano da žica ne uzrokuje direktno iskrenje na naponima manjim od 5 kV, ako je udaljenost žice od vodljivog dijela GEM folije 9 mm i od šipke 6.5 mm. Kako bi se maksimalno osigurali da neće doći do izboja na žicu ili sa žice, preporuča se korištenje pocinčane bakrene žice promjera 1 mm s teflonskom izolacijom debljine 0.3 mm, na temelju mjerenja iz poglavlja 5.

Mjerenjima s pikoampermetrom, u poglavlju 6, je demonstrirana tendencija porasta struje između elektroda GEM folije prije samog iskrenja. Pravovremenom detekcijom porasta i gašenjem ili smanjivanjem napona potencijalno se može u potpunosti spriječiti pojava iskrenja. Planira se tu ideju ostvariti u sustavu za zaštitu od proboja. Takav sustav bi uvelike povećao sigurnost i pouzdanost GEM folija.

## Bibliography

- [1] "The Ernest Orlando Lawrence Award: 1980's Laureates". US Department of Energy. Retrieved 2007-08-18. David R. Nygren, 1985: Physics: For the development of experimental techniques in particle physics and especially for the invention of the Time Projection Chamber" .
- [2] M. Kotulla et al. "Technical Progress Report for PANDA: Strong Interaction Studies with Antiprotons". FAIR-ESAC/Pbar/Technical Progress Report (February 2005).
- [3] <http://alice-tpc.web.cern.ch/content/tpc-readout-chambers> .
- [4] ALICE Collaboration. Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Time Projection Chamber. CERN-LHCC-2013-020. 2013. URL: <http://cds.cern.ch/record/1622286> .
- [5] P. Abbon et al. "The COMPASS Experiment at CERN". In: Nucl. Instr. Meth. A 577.3 (2007), pp. 455–518. DOI: 10.1016/j.nima.2007.03.026.
- [6] G. Bencivenni et al. "A triple GEM detector with pad readout for high rate charged particle triggering". In: Nucl. Instr. Meth. A 488.3 (2002), pp. 493–502. DOI: 10.1016/S0168-9002(02) 00515-6.
- [7] Z. Fraenkel et al. "A hadron blind detector for the PHENIX experiment at RHIC". In: Nucl. Instr. Meth. A 546.3 (2005), pp. 466–480. DOI: 10.1016/j.nima.2005.02.039
- [8] M. G. Bagliesi et al. "The TOTEM T2 telescope based on triple-GEM chambers". In: Nucl. Instr. Meth. A 617.1-3 (2010), pp. 134–137. DOI: 10.1016/j.nima.2009.07.006.
- [9] Choi J., Performance of the GEM detector based on Korean foils for the CMS Muon Upgrade, LHC students poster session, <https://indico.cern.ch/event/797774/>
- [10] F. Sauli : The gas electron multiplier (GEM) : Operating principles and applications

- [11] S. Blatt et al. “Charge transfer of GEM structures in high magnetic fields”. In: Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 150.0 (2006), pp. 155–158. DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2004.07.005.
- [12] A. Bondar, et al., Nuclear Instruments and Methods A 496 (2003) 325.
- [13] K. Dehmelt, Performance of a Quintuple-GEM Based RICH Detector Prototype, arXiv:submit/1158752, 2015.
- [14] S. Bachmann, et al., Nuclear Instruments and Methods A 479 (2002) 294.
- [15] M. Alfonsi, et al., Nuclear Instruments and Methods A 518 (2004) 106.
- [16] Buzulutskov, A., Breskin, A., Chechik, R., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2000, vol. 443, p. 164.
- [17] Breskin, A., Buzulutskov, A., and Chechik, R., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2002, vol. 483, p. 670.
- [18] Vavra, J. and Sharma, A., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2002, vol. 478, p. 235.
- [19] Bachmann, S., Bressan, A., Ketzer, B., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2001, vol. 470, p. 548.
- [20] Bachmann, S., Bressan, A., Capeans, M., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2002, vol. 479, p. 294.
- [21] Buzulutskov, A., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2002, vol. 494, p. 148.
- [22] Sauli, F., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2004, vol. 522, p. 93.
- [23] Bachmann, S., Bressan, A., Ropelewski, L., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 1999, vol. 433, p. 464.
- [24] Alfonsi, M., Bencivenni, G., Bonivento, W., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2004, vol. 535, p. 319.
- [25] Bachmann, S., Bressan, A., Ropelewski, L., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 1999, vol. 438, p. 376.

- [26] Bondar, A., Buzulutskov, A., Shekhtman, L., and Vasiljev, A., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2003, vol. 496, p. 325.
- [27] Sauli, F., Kappler, S., and Ropelewski, L., IEEE Trans. Nucl. Sci., 2003, vol. 50, p. 803.
- [28] Benlloch, J., Bressan, A., Buttner, C., et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., 1998, vol. 42, p. 234.
- [29] Breskin, A., Buzulutskov, A., Chechik, R., et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., 2001, vol. 48, p. 417.
- [30] Balcerzyk, M., Morman, D., Breskin, A., et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., 2003, vol. 50, p. 847.
- [31] Amaro, F., Veloso, J.F.C.A., Maia, J.M., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2004, vol. 535, p. 341.
- [32] Alfonsi, M., Bencivenni, G., de Simone, P., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2004, vol. 518, p. 106.
- [33] Altunbas, C., Dehmelt, K., Kappler, S., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2003, vol. 515, p. 249.
- [34] Guirl, L., Kane, S., May, J., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2002, vol. 478, p. 263.
- [35] Sauli, F., Experimental Techniques in High Energy Physics, Ferbel, T., Ed., Reading: Addison-Wesley, 1987; Preprint CERN, Geneva, 1977, no. 77-09.
- [36] Breskin, A., Buzulutskov, A., Chechik, R., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2002, vol. 478, p. 225.
- [37] Park, S.H., Kim, Y.K., Han, S.H., et al., J. Korean Phys. Soc., 2003, vol. 43, p. 332.
- [38] Mormann, D., Breskin, A., Chechik, R., and Bloch, D., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2004, vol. 516, p. 315.
- [39] Killenberg, M., Lotze, S., Mnich, J., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2004, vol. 530, p. 251.

- [40] Breskin, A., Mormann, D., Lyashenko, A., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2005, vol. 553, p. 46.
- [41] Altunbas, C., Capeans, M., Dehmelt, K., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2002, vol. 490, p. 177.
- [42] Ketzer, B., Weitzel, Q., Paul, S., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2004, vol. 535, p. 314.
- [43] Aulchenko, V.M., Bondar, A.E., Buzulutskov, A.F., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2002, vol. 494, p. 241.
- [44] Bozzo, M., Oriunno, M., Ropelewski, L., et al., in Proc. IEEE Nucl. Sci. Symp., Rome: Italy, 2004, vol. 1, p. 447.
- [45] <http://gdd.web.cern.ch/GDD/>.
- [46] TESLA Technical Design Report. Part IV, Behnke, T., Bertolucci, S., Heuer, R.-D., and Settles, R., Eds., Preprint DESY 2001-011 and ECFA 2001-209, Hamburg, 2001.
- [47] Karlen, D., Poffenberger, P., and Rosenbaum, G., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2005, vol. 555, p. 80.
- [48] Ableev, V., Ambrosino, F., Apollonio, M., et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., 2005, vol. 52, p. 2944.
- [49] TPC R&D for an ILC Detector: Status Report from the ILC-TPC Groups, Proposal PRC R&D-01/03 of the DESY Physics Review Committee, 2006; <http://www.desy.de/prc/>.
- [50] Fraenkel, Z., Kozlov, A., Naglis, M., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2005, vol. 546, p. 466.
- [51] Kozlov, A., Ravinovich, I., Shekhtman, L., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2004, vol. 523, p. 344.
- [52] Buzulutskov, A., Bondar, A., Shekhtman, L., et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., 2003, vol. 50, p. 2491.



- [53] Bondar, A., Buzulutskov, A., Shekhtman, L., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2004, vol. 524, p. 130.
- [54] Bondar, A., Buzulutskov, A., Pavluchenko, D., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2004, vol. 535, p. 299.
- [55] Bondar, A., Buzulutskov, A., Pavluchenko, D., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2005, vol. 548, p. 439.
- [56] Buzulutskov, A., Dodd, J., Galea, R., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2005, vol. 548, p. 487.
- [57] Bondar, A., Buzulutskov, A., Grebenuk, A., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2006, vol. 556, p. 273.
- [58] Galea, R., Dodd, J., Ju, Y., et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., 2006, vol. 53, p. 2260.
- [59] Dodd, J., Leltchouk, M., Radeka, V., et al., E-Bubble Chamber Project, <http://www.nevis.columbia.edu/~ebubble/>; Willis, W.J., Tracking with Electron Bubbles. BNL Instrumentation Division Seminar, 2003, <https://www.inst.bnl.gov/seminar>.
- [60] Ereditato, A. and Rubbia, A., <http://arxiv.org/hepph/0509022>.
- [61] Rubbia, A., <http://arxiv.org/hep-ph/0510320>.
- [62] Barbeau, P., Collar, J.I., Miyamoto, J., and Shipsey, I., IEEE Trans. Nucl. Sci., 2003, vol. 50, p. 1285.
- [63] Haggmann, C. and Bernstein, A., IEEE Trans. Nucl. Sci., 2004, vol. 51, p. 2151.
- [64] Bachmann, S., Kappler, S., Ketzer, B., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2002, vol. 478, p. 104.
- [65] Bellazzini, R., Angelini, F., Baldini, L., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2006, vol. 560, p. 425.
- [66] Danielsson, M., Fonte, P., Francke, T., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2004, vol. 518, p. 406.

- [67] Fraga, F.A.F., Margato, L.M.S., and Fetal, S.T.G., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2003, vol. 513, p. 379.
- [68] Margato, L.M.S., Fraga, F.A.F., Fetal, S.T.G., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2004, vol. 535, p. 231.
- [69] Aulchenko, A., Zhulanov, V., Shekhtman, L., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2005, vol. 543, p. 350.
- [70] Aulchenko, V.M., Bukin, M.A., Papishev, P.A., et al., in Int. Synchrotron Radiation Conf., Novosibirsk, 2006.
- [71] Bressan, A., Buzulutskov, A., Ropelewski, L., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 1999, vol. 423, p. 119.
- [72] Buzulutskov, A., Shekhtman, L., Bressan, A., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 1999, vol. 433, p. 471.
- [73] Buzulutskov, A., Breskin, A., Chechik, R., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2000, vol. 442, p. 68.
- [74] Bondar, A., Buzulutskov, A., Sauli, F., and Shekhtman, L., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 1998, vol. 419, p. 418.
- [75] Bondar, A., Buzulutskov, A., and Shekhtman, L., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2002, vol. 481, p. 200.
- [76] Bondar, A., Buzulutskov, A., Shekhtman, L., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2002, vol. 493, p. 8.
- [77] Aulchenko, V., Bondar, A., Buzulutskov, A., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2003, vol. 513, p. 256.
- [78] Chen, M. and Bolozdynya, A., US Patent no. 5665971, 1997.
- [79] Buzulutskov, A., Bondar, A., Shekhtman, L., et al., Proposal for CRDF grant RP1-2550-NO-3, 2003; in Int. Symp. on Development of Detectors for Particle, Astro-Particle and Synchrotron Radiation Experiments, SLAC, Stanford, United States, 2006, <http://www.conf.slac.stanford.edu/snic/>.

- [80] Buzulutskov, A., Grebenuk, A., Pavlyuchenko, D., et al., Proposal for INTAS Grant 04-78-6744, 2004; Presented at Int. Symp. on Development of Detectors for Particle, Astro-Particle and Synchrotron Radiation Experiments, SLAC, Stanford, United States 2006, <http://www.conf.slac.stanford.edu/snic/>.
- [81] E. Rocco, Development of a gaseous photon detector for cherenkov imaging applications, Ph.D. thesis, Turin U. (2010).
- [82] C. Shalem, R. Chechik, A. Breskin, K. Michaeli, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2006, A 558 (2) (2006) 475–489. doi:10.1016/j.nima.2005.12.241.
- [83] A. Utrobičić, M. Kovačić, F. Erhardt, N. Poljak, M. Planinić, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2015, vol. 801, p. 21-26.