

## بررسی عملکرد ساختارهای تکثیرکننده الکترونی ضخیم و مجتمع تکثیرگر الکترونی در آشکارسازی ذرات آلفا

سید مهدی هاشمی

کرمان، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، گروه مهندسی هسته‌ای، کدپستی: ۷۶۳۱۱-۳۳۱۳۱  
پست الکترونیکی: hashemi.phy1@gmail.com

### چکیده

در این مطالعه با به‌کارگیری دو نوع تکثیرگر الکترونی گازی زیرمجموعه ساختارهای ریزالگو، آشکارسازی ذرات آلفا در مد جریان زیاد مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در طراحی و ساخت محفظه آشکارساز، از تکثیرگر الکترونی ضخیم و مجتمع تکثیرگر الکترونی به‌عنوان ناحیه تکثیر به‌همراه یک اتاقک یونش، برای اندازه‌گیری شدت جریان‌های ناشی از برهم‌کنش ذرات آلفا با گاز فرونشاندن درون آشکارساز، استفاده خواهیم کرد. ظهور پیوسته ستون‌های نور مرئی در فضای بین الکترودهای تکثیرگرها در محل ورود ذرات، از جمله مزیت‌های به‌کارگیری این روش اپتیکی برای آشکارسازی پرتوهای یونساز است.

**کلیدواژگان:** ساختار ریزالگو، آشکارسازی ذرات آلفا، تکثیرگر الکترونی ضخیم، مجتمع تکثیرگر الکترونی، مد جریان زیاد.

### ۱. مقدمه

برای تولید یک پالس فراهم می‌کند. میزان بار الکترون‌های تولید شده، حضور و ویژگی‌های ذرات یا تابش‌های اولیه را مشخص می‌سازد [۱].

در سال ۱۹۶۸، چارپاک<sup>۲</sup> با اختراع شمارنده‌های تناسبی چند سیمه<sup>۳</sup> پنجره جدیدی رو به دورنمای استفاده از آشکارسازهای حساس به موقعیت گازی باز نمود که از آن به‌عنوان یک انقلاب در زمینه طراحی و توسعه آشکارسازهای گازی نام می‌برند [۲]. این اختراع با کشف حالت (مد) جریان زیاد هنگام بررسی عملکرد شمارنده‌های چند سیمه در برخی از گازها با نام گازهای جادویی همراه شد [۳]. در دهه ۱۹۸۰،

با معرفی شمارنده‌های تناسبی در اواخر دهه ۴۰ میلادی، استفاده و بررسی عملکرد آن‌ها در دستگاه‌های مختلف مورد توجه قرار گرفت. کارکرد این شمارنده‌ها به فرآیندهای مختلف مربوط به حرکت و اندرکنش الکترون‌ها و یون‌ها در محیط گازی تحت تأثیر میدان الکتریکی وابسته می‌باشد. در این آشکارسازها نوعاً، الکترون‌ها و یون‌های اولیه ایجاد شده در اثر تابش ذرات فرودی جمع‌آوری و به‌سوی ناحیه‌ای با میدان الکتریکی قوی هدایت می‌شوند. در این ناحیه الکترون‌های اولیه، به‌منی از الکترون‌ها را به‌وسیله یونسازی برخوردی<sup>۱</sup> به‌وجود می‌آورند. این پدیده الکترون‌های کافی را

<sup>2</sup> Charpak

<sup>3</sup> Multiwire Proportional Chamber (MWPC)

<sup>1</sup> Impact ionization

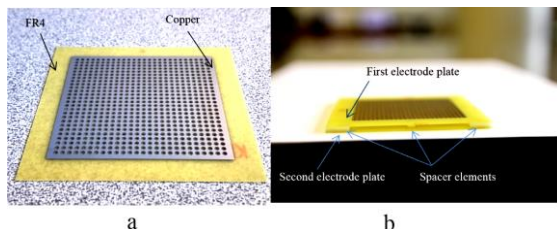
عمل می‌کنند، بدون دیوار می‌باشند و جریان نشتی نمی‌تواند با عبور از روی دیواره داخلی حفره‌ها، بین دو صفحه الکتروود برقرار شود [۱۳]. در این تحقیق در حضور ساختارهای تکثیرگر الکترونی ضخیم و مجتمع تکثیرگر الکترونی، شدت جریان، ولتاژ و تصاویر مربوط به آشکارسازی ذرات آلفای ساطع شده از یک چشمه  $^{241}\text{Am}$  را مورد بررسی قرار خواهیم داد.

## ۲. روش کار

### ۱.۲. هندسه صفحات تکثیرگر الکترونی ضخیم و

#### مجتمع تکثیرگر الکترونی

تصویر صفحات تکثیرگر به کار گرفته شده در شکل ۱ آورده شده است. تکنولوژی ساخت صفحات بر مبنای تکنولوژی حکاکی نوری<sup>۶</sup> بنیان نهاده شده که در صنعت ساخت فیبرهای مدار چاپی به کار گرفته می‌شود. روش فیلم دوتایی<sup>۷</sup> یک روش استاندارد برای تولید این نوع صفحات است. در این روش یک لایه کپتون از جنس اپاکسی FR4 با ضخامت‌های مورد نظر با پوششی از مس بین دو فیلم یکسان قرار داده می‌شود. الگوی حفره‌ها در اختیار دستگاه تراش کامپیوتری<sup>۸</sup> قرار گرفته و نقش حفره‌ها از هر دو طرف عایق FR4، مته‌کاری می‌شود. در این نوع ساختار، فاصله بین مرکز هر حفره تا حفره مجاور، گام<sup>۹</sup> حفره نام دارد.



شکل (۱): a- تصویر یک صفحه تکثیرگر الکترونی ضخیم و b- مجتمع تکثیرگر الکترونی. (ابعاد صفحات ۷ cm×۷ cm با ۷ سطح فعال ۵ cm×۵ cm می‌باشند.)

سازوکارهایی برای توصیف این پدیده که امروزه آن را با نام مد ستون نوری خود فرو نشان<sup>۱</sup> می‌شناسیم، پیشنهاد گردید [۶-۴]. بر طبق داده‌های آزمایشگاهی، از ویژگی‌های اساسی این مد می‌توان به دامنه بزرگ سیگنال جریان (نسبت به حالت تناسبی) همراه با جهش در جریان اندازه‌گیری شده و انتقال غیر پیوسته از حالت تناسبی به مد ستون نوری خود فرو نشان نام برد [۷]. در این مد، نتیجه گسترش بهمن‌های الکترونی در حضور برخی از ترکیب‌های گازی جاذب فوتون‌های ماوراءبنفش (UV) که از اتم‌ها یا مولکول‌های برانگیخته ساطع می‌شوند، ظهور ستون‌های نوری با پهنای ۱۰۰m - ۱۱۵۰μm و گستردگی چند میلی‌متر خواهد بود [۸]. قابل ذکر است که در یک ساختار، بسته به نوع و درصد ترکیب گازی مورد استفاده، آشکارساز در ولتاژهای مختلف وارد این مد خواهد شد [۹].

با ظهور آشکارسازهای گازی ریزالگو<sup>۲</sup> در دهه ۱۹۹۰ میلادی، تکثیرگر الکترون گازی<sup>۳</sup> (GEM) در سال ۱۹۹۶ در مرکز سرن پیشنهاد گردید [۱۰]. در ادامه، تکثیرگر الکترونی گازی ضخیم<sup>۴</sup> (TGEM) بر مبنای الگوی صفحات جم در مقیاسی بزرگتر (قطر حفره‌ها در حدود ۱ - ۰/۳ میلی‌متر) توسط دانشمندان معرفی شد [۱۱، ۱۲]. این چنین ساختارهایی شبه جم نامیده می‌شوند. در راستای بهینه‌سازی ساختارهای شبه جم برای به کارگیری در محیط‌های مرطوب، در سال ۲۰۱۳ در مرکز سرن مجتمع تکثیرگر الکترونی<sup>۵</sup> (EMA) معرفی گردید. مجتمع تکثیرگر الکترونی تشکیل شده از دو صفحه الکتروود با حفره‌های منظم که به وسیله پایه‌های عایقی از یکدیگر جدا شده‌اند. حفره‌های ایجاد شده در این ساختار که هر کدام به عنوان ناحیه تقویت

<sup>1</sup> Self-Quenching Streamer (SQS) mode

<sup>2</sup> Micro-pattern gaseous detectors

<sup>3</sup> Gas Electron Multiplier (GEM)

<sup>4</sup> Thick Gas Electron Multiplier (TGEM)

<sup>5</sup> Electron Multiplier Assembly (EMA)

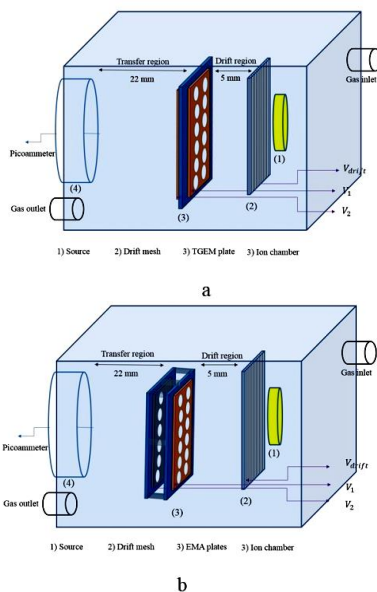
<sup>6</sup> Photolithography

<sup>7</sup> Double mask.

<sup>8</sup> Computer Numerical Control machine

<sup>9</sup> Pitch

ولتاژ ورودی به گونه‌ای اعمال می‌گردد که الکترون‌های تولید شده در ناحیه رانش (به دلیل ولتاژ اعمالی به توری رانش)، در خلاف جهت میدان الکتریکی ایجاد شده به سمت صفحات تکثیرگر الکترونی به‌عنوان ناحیه تکثیر رانده شوند.  $(V_{dr} < V_1 < V_2)$  با اعمال ولتاژ ورودی به الکترودها، در فضای میان صفحات، میدان الکتریکی شبیه میدان الکتریکی یک دوقطبی الکتریکی ایجاد می‌گردد. در این آشکارساز، الکترون‌های اولیه تولید شده در اثر برهم‌کنش ذرات آلفا با مولکول‌ها و اتم‌های موجود در ناحیه رانش به طرف صفحات تکثیرگرهای الکترونی به‌عنوان ناحیه تقویت حرکت می‌کنند. این الکترون‌ها در ناحیه بین صفحات، شتاب کافی جهت شرکت در فرآیندهای تکثیر (بهمنی) را در برخورد با مولکول‌ها و اتم‌های گازی مقابل خود کسب می‌کنند.



شکل (۲): پیکربندی چیدمان اجزاء برای محاسبه جریان در ساختارهای a- تکثیرگر الکترونی ضخیم و b- مجتمع تکثیرگر الکترونی.

### ۳. نتایج انجام آزمایش‌ها

برای هر تکثیرگر سه آزمایش در حضور هوای محیط، گاز آرگون (خلوص ۹۹/۹۹۹ درصد) و ترکیب گازی P10 (۹۰ درصد آرگون به‌علاوه ۱۰ درصد متان) در دمای اتاق و فشار جوی محیط انجام شد. یک چشمه  $^{241}\text{Am}$  با اکتیویته

در این تحقیق، هر صفحه جم ضخیم از یک صفحه FR4 به ضخامت  $0.4\text{ mm}$  که در دو طرف آن لایه‌های مسی به ضخامت  $35\text{ }\mu\text{m}$  قرار دارد، ساخته شده است. در حالی که در مجتمع تکثیرگر الکترونی هر صفحه الکترونی از دو لایه تشکیل می‌گردد. لایه اول از جنس مس به ضخامت  $35\text{ }\mu\text{m}$  و لایه دوم از جنس عایق FR4 به ضخامت  $0.4\text{ mm}$  می‌باشند. قطر و گام تکرار حفره‌های ایجاد شده برای تمامی صفحات استفاده شده به ترتیب  $0.5\text{ mm}$  و  $1\text{ mm}$  در نظر گرفته شده است. هم‌چنین فاصله بین دو الکترونی مجتمع تکثیرگر  $1\text{ mm}$  است. ابعاد تمامی صفحات  $7\text{ cm} \times 7\text{ cm}$  با سطح فعال (لایه مسی)  $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$  می‌باشند.

### ۲.۲. چیدمان آزمایشگاهی و عملکرد اجزاء

مطابق شکل ۲، در محفظه آشکارساز (مکعب مستطیلی به ابعاد  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ )، صفحات تکثیرگرها بین الکترونی (توری) رانش<sup>۱</sup> و یک آشکارساز از نوع اتاقک یونش<sup>۲</sup> به‌عنوان وسیله بازخوانش بار الکتریکی جمع‌آوری شده قرار می‌گیرند. این اتاقک تشکیل شده از یک استوانه استیل ضد زنگ به ارتفاع  $20\text{ cm}$  و قطر  $5/4\text{ cm}$  که محور آن یک سیم آهنی به قطر  $2\text{ mm}$  می‌باشد. مقدار بار رسیده به این اتاقک یونش به وسیله یک پیش تقویت‌کننده بار به ولتاژ تبدیل شده و در نهایت جریان مربوط به بارهای الکتریکی جمع شده محاسبه می‌شود.

الکترودهای رانش و تکثیرگرهای الکترونی به یک منبع ولتاژ بالای جریان مستقیم (DC) متصل می‌گردند که در شکل ۲ به ترتیب با ولتاژهای  $V_{drift}$ ،  $V_1$  و  $V_2$  مشخص شده‌اند (شکل ۲a برای تکثیرگر الکترونی ضخیم و ۲b مربوط به مجتمع تکثیرگر الکترونی). با طراحی مدار تقسیم ولتاژ،

<sup>1</sup> Drift mesh

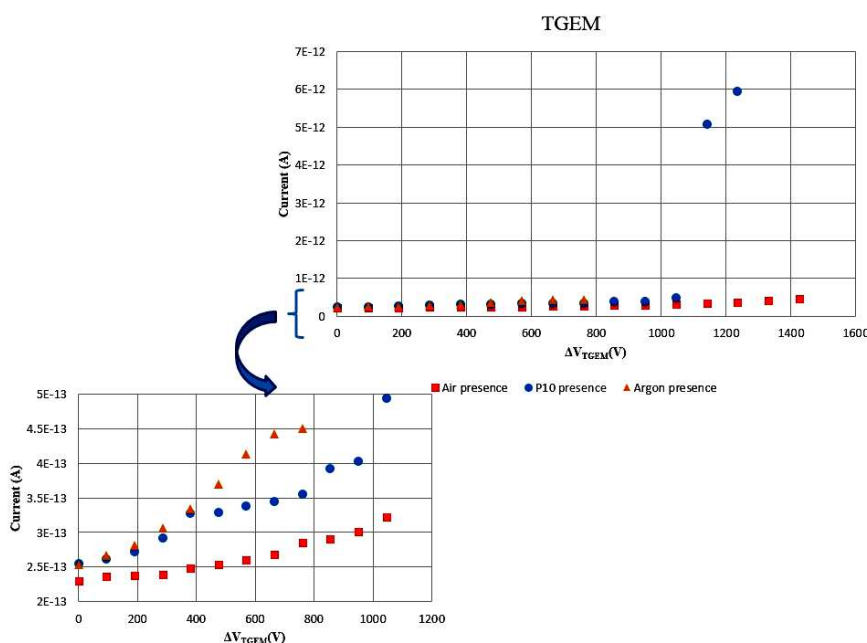
<sup>2</sup> Ion chamber

رسیدن به صفحات، منبع ولتاژ به صورت خودکار قطع می‌گردد. ایجاد جرقه باعث تخلیه بارهای الکتریکی روی صفحات می‌شود. از این رو ولتاژی که در آن جرقه‌ها نمایان می‌شوند، ولتاژ تخلیه نام دارد. آزمایش دوم با استفاده از گاز آرگون صورت پذیرفت. در این جا نیز افزایش ولتاژ، افزایش جریان را به دنبال دارد تا این که در ولتاژهای تخلیه، جرقه‌های ناگهانی در فضاهاى مختلف میان صفحات ظاهر شده و ولتاژ ورودی خودبه‌خود قطع گردد (نشانه‌های مثلثی). در آزمایش سوم با حضور ترکیب گازی P10، با شار ورودی ۵ lit/min، همانند حالت قبل ولتاژ ورودی به الکترودهای آشکارساز اعمال شد. در این حالت نیز زمانی که ولتاژ را افزایش می‌دهیم، جریان اندازه‌گیری شده نیز زیاد می‌شود (نشانه‌های دایروی در شکل‌های ۳ و ۴). در این حالت، در یک ولتاژ خاص با نام ولتاژ انتقال (انتقال از مد تناسبی به مد ستون نوری خودفروشان) با یک جهش در جریان اندازه‌گیری شده مواجه شدیم (نشانه‌های دایروی). هم‌چنین به همراه تغییر شدت ناگهانی، ستون‌های نوری مرئی در فضای بین صفحات مقابل چشمه  $^{241}\text{Am}$  نمایان شدند.

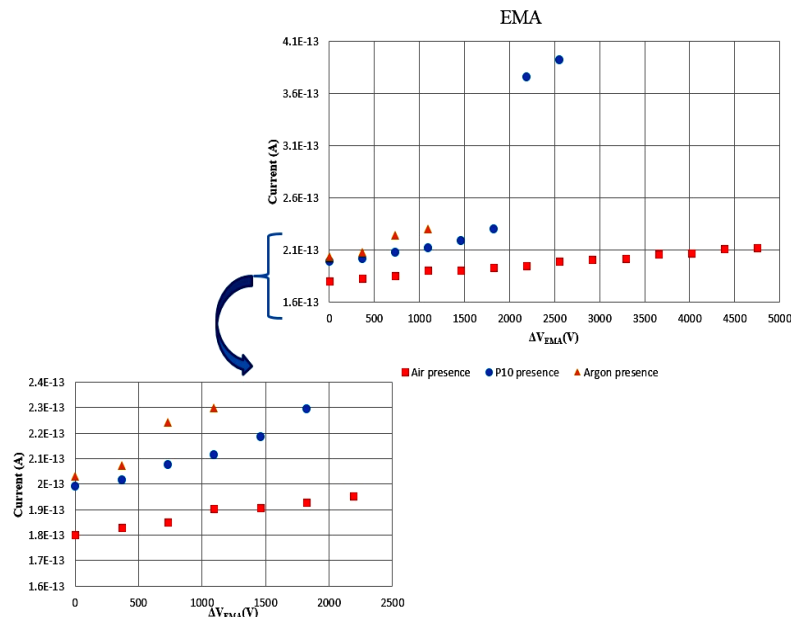
۳۳ کیلوپیکرل و قطر سطح مقطع فعال ۴ mm در فاصله ۵ mm از صفحات تکثیرگرها به گونه‌ای قرار داده شد که ذرات آلفای ساطع شده از آن (با انرژی ۵/۴ MeV) موازی میدان الکتریکی ناحیه رانش به طرف صفحات حرکت کنند. آشکارساز اتاقک یونش نیز در فاصله ۲۲ mm از الکتروود آند تکثیرگرها قرار داده شده تا جریان مربوط به بارهای الکتریکی را که از ناحیه انتقال عبور کرده‌اند، اندازه بگیرد.

### ۱.۳. تغییرات در جریان اندازه‌گیری شده

در آزمایش اول چشمه  $^{241}\text{Am}$  در هوای محیط مقابل تکثیرگرهای الکترونی قرار داده شد. ولتاژ ورودی ( $V_{in}$ ) به الکتروود رانش و الکترودهای تکثیرگرها اعمال گردید. با افزایش ولتاژ ورودی، تغییرات معمولی در جریان اندازه‌گیری شده نمایان می‌شود. دامنه پالس‌های جریان برحسب ولتاژهای اعمالی برای تکثیرگر الکترونی ضخیم و مجتمع تکثیرگر الکترونی به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ (نشانه‌های مربعی) نشان داده شده است. افزایش بیش‌تر ولتاژ باعث ایجاد جرقه‌های ناگهانی در نقاط مختلف فضای بین صفحات تکثیرگر می‌شود. در این مرحله برای جلوگیری از آسیب



شکل (۳): نمایان شدن جهش در جریان اندازه‌گیری شده برحسب ولتاژ اعمالی برای ساختار TGEM.



شکل (۴): نمایان شدن جهش در جریان اندازه‌گیری شده بر حسب ولتاژ اعمالی برای ساختار

EMA

۲.۳. ولتاژهای انتقال و تخلیه

در جدول ۱، اختلاف ولتاژهای بین الکترودهای ساختارهای مورد استفاده در ولتاژهای تخلیه و انتقال آورده شده‌اند. در مجتمع تکثیرگر الکترونی و ولتاژ انتقال در حدود نصف ولتاژهای تخلیه است، در حالی که در تکثیرگر الکترونی ضخیم این اختلاف کم‌تر می‌شود.

جدول (۱): اختلاف ولتاژ بین دو الکترودهای مورد استفاده در ولتاژهای انتقال و تخلیه در حضور هوای محیط، آرگون خالص و

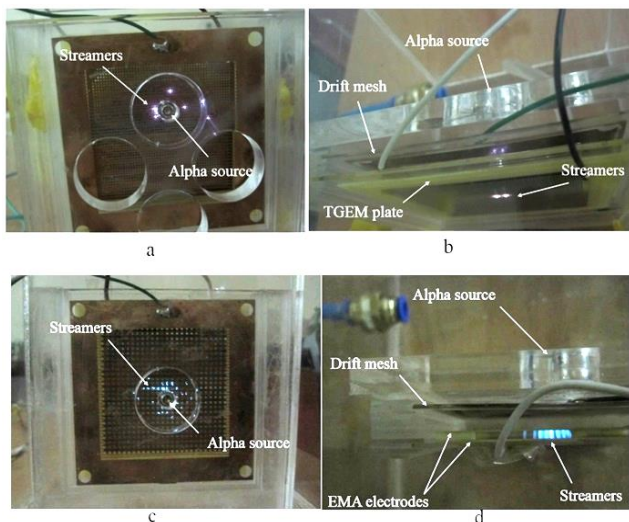
ترکیب گاز P10

نوع ساختار	تخلیه در آرگون	تخلیه در هوا	ΔV انتقال در
	ΔV (V)	ΔV (V)	P10(V)
TGEM	۸۱۷	۱۵۲۰	۱۱۰۲
EMA	۱۴۶۰	۴۹۶۴	۱۹۷۱

۳.۳. تصویر ستون‌های نوری خود فرو نشان در محفظه

آشکارساز

تصویر ستون‌های نوری خود فرو نشان در حضور گاز P10 و در ولتاژ انتقال، از نمای مقابل و بالای محفظه آشکارساز مربوط به تکثیرگرها در شکل ۵ آورده شده است.



شکل (۵): تصاویر مربوط به ظهور ستون‌های خودفرو نشان در ساختار تکثیرگر الکترونی ضخیم (a & b) و مجتمع تکثیرگر الکترونی (c & d).

برای مشاهده رویدادهای داخل محفظه، جنس آن از نوع مواد شفاف ساخته شده است. چشمه  $^{241}\text{Am}$  نیز در مرکز دایره مشخص شده قرار دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مد ستون نوری خودفرو نشان، در ساختار تکثیرگر الکترونی ضخیم نورهای مرئی به شکل نقاط نورانی روی صفحه و در ساختار مجتمع تکثیرگر الکترونی، این نورها به شکل یک ستون نوری بین دو الکترودهای نمایان می‌گردند.

#### ۴. تحلیل و بررسی داده‌ها

همان‌طور که در شکل‌های ۳ و ۴ مشخص شده، در حضور هوا و گاز آرگون، مقدار جریان اندازه‌گیری شده با افزایش ولتاژ ورودی به آرامی افزایش می‌یابد. این تغییرات در جریان، به دلیل افزایش تعداد الکترونی‌هایی است که با افزایش ولتاژ بین الکترودها (به عبارتی افزایش میدان الکتریکی) از ناحیه رانش عبور کرده‌اند و به شمارنده (اتاقک یونش) رسیده‌اند. مشاهده جهش جریان در نمودار تغییرات جریان بر حسب ولتاژ اعمالی به الکترودهای دو ساختار مذکور در حضور ترکیب گازی P10، نشان‌دهنده این است که در ولتاژ انتقال بهره آشکارساز به بهره آستانه برای انتقال بین مد تناسبی و مد ستون نوری خودفروشان رسیده است. جهش مشاهده شده در جریان اندازه‌گیری شده، با سازوکارهای موجود ارائه شده و هم‌چنین آزمایش‌های انجام شده بر دیگر ساختارها از جمله آشکارساز گازی سیمی، هم‌خوانی کامل دارد [۹]. در این جا نشان داده شده که این جهش در ساختار تکثیرکننده الکترونی ضخیم نسبت به مجتمع تکثیرگر بزرگ‌تر است. در تکثیرکننده الکترونی ضخیم دامنه پالس جریان بعد از ظاهر شدن ستون‌های نوری در حدود ده برابر دامنه پالس قبل از ورود به مد ستون نوری خودفروشان شده است.

طبق جدول ۱، ولتاژهای انتقال در ترکیب گازی P10 و در حضور چشمه  $^{241}\text{Am}$  در تمامی ساختارها از ولتاژهای تخلیه در هوا کم‌تر می‌باشند. با مقایسه ولتاژ تخلیه در گاز آرگون خالص و هوا مشخص می‌گردد که در حضور گاز آرگون خالص، ولتاژهای تخلیه کمتر از ولتاژهای تخلیه در حضور هوا می‌باشند. تحقیقات نشان داده است که در گازهای نجیب خالص، فرآیندهای مختلفی در توسعه بهمن‌های الکترونی و در نهایت شکست و تخلیه گاز درون آشکارساز مشارکت دارند که یکی از مهم‌ترین آن‌ها شرایط مربوط به سطح کاتد آشکارساز است [۱۴]. از این رو بهره قابل دسترسی

در آشکارسازهایی که با گاز نجیب خالص پر شده‌اند، کم‌تر از بهره آشکارسازهایی است که از گازهای فروشان در آن‌ها استفاده شده است. بنابراین در حضور گاز خالص آرگون قبل از برآورده شدن شرایط تشکیل مد ستون نوری خودفروشان، در ولتاژهای بالا (بهره‌های گازی بالا) پدیده شکست گاز اتفاق افتاده و آشکارساز نمی‌تواند وارد این مد شود. از این رو ستون‌های خودفروشان در حضور گاز آرگون خالص در مقابل چشمه آلفا ظاهر نمی‌شوند.

مطابق شکل ۵، در ولتاژ انتقال، در هر حفره‌ای که ذرات آلفا وارد شده‌اند، آن حفره به‌تنهایی وارد مد ستون نوری خودفروشان شده و ستون‌های نورانی در آن ظاهر شده‌اند. با توجه به این تصاویر کاهش قطر حفره‌های صفحات تکثیرگرها، افزایش قدرت تفکیک مکانی ذرات ورودی را به دنبال خواهد داشت. بنابراین قطر حفره‌ها را می‌توان به‌عنوان عامل تفکیک مکانی در نظر گرفت. از طرفی در ساختار تکثیرگر الکترونی ضخیم، ولتاژ انتقال نزدیک به ولتاژ تخلیه بوده و درخشندگی نورهای مرئی بیش‌تر از درخشندگی آن‌ها در ساختار مجتمع تکثیرگر الکترونی است.

#### ۵. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق با به‌کارگیری ساختارهای تکثیرگر الکترونی ضخیم در کنار مجتمع تکثیرگر الکترونی، روشی نوین بر مبنای مشاهدات مستقیم ستون‌های نورانی برای آشکارسازی فعال ذرات باردار ارائه گردید. طبق سازوکارهای مطرح شده و آزمایش‌های انجام شده برای بررسی مد ستون نوری خودفروشان در ساختارهای تک‌سیمی و چندسیمی، بعد از انتقال به این مد با تعداد زیادی الکترون در اطراف آند مواجه می‌شویم. به عبارتی تغییرات گسسته و افزایش ناگهانی جریان از جمله خصوصیات بارز مربوط به این مد می‌باشند. در این کار، در حضور صفحات تکثیرگر، موفق به مشاهده و

اندازه‌گیری این جهش در تغییرات شدت جریان بر حسب ولتاژهای اعمالی به ناحیه تکثیر شدیم. به عبارت دیگر با حضور ترکیب گازی P10 به عنوان گاز فرونشان داخل فضای آشکارساز و جذب فوتون‌های UV ایجاد شده در بهمن‌ها توسط گاز فرونشان، در ولتاژهای مشخصی شرایط ورود به مد ستون نوری خودفرونشان فراهم گردیده است، که در این حالت درون هر کدام از حفره‌هایی که در مقابل چشمه رادیواکتیو قرار گرفته‌اند ستون‌های نوری خود فرونشان

پدیدار می‌گردند. هم‌چنین در این روش، دقت در اندازه‌گیری مکان (تفکیک مکانی) ذرات فرودی بسته به قطر حفره‌های ایجاد شده در صفحات الکترودها، مشخص می‌شود. با نظر به پایداری این مد اندازه‌گیری و ظهور پیوسته ستون‌های نورانی در مقابل چشمه رادیواکتیو، بهینه‌سازی و به‌کارگیری این نوع روش آشکارسازی برای استفاده در پرتوسنجی‌های محیطی پیشنهاد می‌گردد.

## ۶. مراجع

- [1] G.F. Knoll. Radiation detection and measurement, John Wiley & Sons, 2010.
- [2] G. Charpak, R. Bouclier, T. Bressani, J. Favier, and C. Zupancic. The use of multiwire proportional counters to select and localize charged particles, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 62 (1968) 262–268.
- [3] R. Bouclier, G. Charpak, Z. Dimcovski, G. Fischer, F. Sauli, G. Coignet and G. Flüge. Investigation of some properties of multiwire proportional chambers, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 88 (1970) 149–161.
- [4] G.D. Alekseev, N.A. Kalinina, V.V. Karpukhin, D.M. Khazin and V.V. Kruglov. Investigation of Self-Quenching Streamer Discharge in a wire chamber, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 177 (1980) 385–397.
- [5] M. Atac, A.V. Tollestrup and D. Potter. Self-Quenching Streamers, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 200 (1982) 345–354.
- [6] L.S. Zhang. A possible mechanism of the self-quenching streamer mode, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 247 (1986) 343–346.
- [7] T. Hsiao-Wei, D. Yuan-Tsai and S. Xiao-An. Investigation of self-Quenching streamer discharge. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 266 (1984) 353–360.
- [8] Y. Tie-Jian, C. Hong-Fang, Y. Bao-Zhong and T. Hsiao-Wei. Self-Quenching Streamer Discharge Under Extremely Large Amount of Quenching Gas, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 252 (1986) 61–64.
- [9] N. Koori, K. Kawamura, H. Sakai, T. Sakae, I. Kumabe, H. Kametani, H. Ijiri and M. Matoba. Self-Quenching streamers in magic gas mixtures. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 243 (1986) 486–494.
- [10] F. Sauli, GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 386 (1997) 531–534.
- [11] R. Chechik, A. Breskin, C. Shalem and D. Mormann. Thick GEM-like hole multipliers: properties and possible applications, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 535 (2004) 303–308.
- [12] R. Oliveira<sup>1</sup>, V. Peskov, F. Pietropaolo and P. Picchi. First Tests of Thick GEMs with Electrodes Made of a Resistive Kapton, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 576 (2007) 362–366.
- [13] V. Peskov, A. Di Mauroa, P. Fonte, P. Martinengo, E. Nappi, R. Oliviera and P. Picchi. Development of a new generation of micropattern gaseous detectors for high energy physics, astrophysics and environmental applications, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 732 (2013) 255–259.
- [14] A. Phelps and Z.L. Petrovi. Cold-cathode discharges and breakdown in argon: surface and gasphase production of secondary electrons, Plasma Sources Science and Technology, 8 (1999) 21–44.