

نقش آرایش خطوط میدان الکتریکی در ظهور ستون‌های نور مرئی در یک آشکارساز گازی حساس به مکان

سید مهدی هاشمی*

گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.
کرمان، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، گروه مهندسی هسته‌ای، کد پستی: ۳۳۱۳۱-۷۶۳۱۱.
پست الکترونیکی: hashemi.phy1@gmail.com & sm.hashemi@kgut.ac.ir

چکیده

در این تحقیق نقش آرایش خطوط میدان الکتریکی در یک مجتمع تکثیرگر الکترونی به عنوان عامل فرونشانی هندسی در یک آشکارساز گازی حساس به مکان مورد توجه قرار گرفته شده است. با به‌کارگیری دو هندسه و یک پیکربندی دوگانه از این ساختار ریزالگو، میدان الکتریکی در ولتاژ آستانه‌ای که در آن ستون‌های نور مرئی در حضور ترکیب گازی P_{10} در مقابل چشمه رادیواکتیو پدیدار می‌شوند، شبیه‌سازی شده است. در این شبیه‌سازی عبور از اندازه کمینه میدان الکتریکی برای تکثیر الکترون‌ها و تغییرات اندازه میدان الکتریکی در فاصله میان دو الکتروود مجتمع‌های تکثیرگر از یک مقدار حداکثری در مرکز هر حفره و کاهش آن در سطح الکتروودها مشخص می‌شود. همگرایی خطوط میدان الکتریکی در وسط هر کدام از حفره‌ها و واگرایی آن در نزدیکی الکتروودهای آند و کاتد، تشکیل یک ناحیه پلاسمای خود پایدار غیر مخرب به شکل ستون نوری در فضای محصور شده داخل حفره‌های الکتروودها را به دنبال دارد که شدت نور آن به تعداد الکترون‌هایی که در پدیده بهمن الکترونی شرکت داشته‌اند وابسته است.

کلید واژگان: مجتمع تکثیرگر الکترونی، ساختار ریزالگو، میدان الکتریکی، پلاسمای خودپایدار، ستون نور مرئی و فرونشانی هندسی.

۱. مقدمه

که در آغاز قرن گذشته توسط تاونسند^۲ کشف شد، توصیف می‌گردد. کارکرد یک آشکارساز گازی در بهره‌های گازی بالا (ناشی از تکثیر الکترونی زیاد) که دامنه تمام پالس‌های جمع آوری شده مستقل از یونش اولیه است، مد گایگر نامیده می‌شود. این نوع آشکارساز، شمارنده گایگر نام دارد. تا سال ۱۹۳۷ اغلب شمارنده‌های تک سیمی معمولاً در مد گایگر در گازهای تک اتمی، دو اتمی یا ترکیبی از آن‌ها به کار گرفته می‌شدند. در

در سیر تکاملی آشکارسازهای گازی با دو نسل با ساختارهای مختلف مواجه می‌شویم: آشکارسازهای نسل اول با توانایی محدود در دنبال کردن مسیر پرتوی ورودی و آشکارسازهای نسل جدید که بعد از سال ۱۹۶۸ با معرفی شمارنده‌های تناسبی چند سیمی توسط چارپاک^۱، با خصوصیات تفکیک مکانی بالا و قابلیت پردازش تصویر پا به عرصه ظهور نهادند. عملکرد اغلب آشکارسازهای گازی بر مبنای فرایند بهمن الکترونی در گازها

² Townsend

¹ Charpak

که منجر به تخلیه انرژی الکتروستاتیکی ذخیره شده در آشکارساز می‌شود که تخریب ساختار و تجهیزات الکترونیکی را به دنبال دارد.

در میانه قرن پیشین، توسعه تجهیزات الکترونیکی امکان آشکارسازی سیگنال‌های ضعیف حاصله از شمارنده‌های تناسبی در نرخ‌های شمارش زیاد را فراهم نمود. آشکارسازهایی با ویژگی دامنه پالس‌های متناسب با انرژی یونش اولیه، آشکارسازهای تناسبی نامیده می‌شوند. به‌طور معمول این نوع آشکارسازها در فشار جوی یک اتمسفر به کار گرفته می‌شوند و در مقایسه با انواع دیگر آشکارسازها، قابلیت ساخت ناحیه‌های فعال و حساس مختلفی را دارند.

خصوصیت شکل‌گیری مکانی بهمن‌های الکترونی در مد تناسبی، امکان ردیابی محل تولید الکترون‌های اولیه را به روش‌های مختلف الکترونیکی و اپتیکی میسر و مسیر طراحی و ساخت آشکارسازهای گازی حساس به موقعیت^۴ را هموار نمود. کیوفل^۵ از جمله اولین دانشمندانی بود که ایجاد جرقه ناشی از عبور ذرات باردار از داخل آشکارساز را برای بررسی و ردیابی ذرات فرودی به عنوان یک روش اپتیکی مورد استفاده قرار داد [۳].

در ادامه، بلا^۶ و همکارانش با به‌کارگیری تکنولوژی تصویربرداری توانستند محل ایجاد جرقه‌ها (محل ورود ذرات فرودی و تولید الکترون‌های اولیه) را در راستای موازی با الکترودها در یک هندسه با صفحات تخت ثبت نمایند [۴].

دستیابی به موفقیت‌های جدید در زمینه توسعه آشکارسازهای تصویری^۷ بعد از آگاه شدن نسبت به فیزیک جرقه‌ها ممکن شد. مطالعات نشان داد تبدیل بهمن‌های الکترونی به جرقه، توسط سازوکار ایجاد ستون‌های نوری^۸، اتفاق می‌افتد. به‌طوری که اگر قبل از رسیدن ستون‌های نوری به الکترودها

شمارنده‌های گایگر، ولتاژ اعمالی به الکترودها برای تولید بهمن‌های ناشی از تابش یونیزه کننده به اندازه کافی زیاد است و این بهمن‌ها آغاز کننده فرایند خود پایدار^۱ تخلیه کرونا هستند. امتیاز اصلی عملکرد آشکارسازهای گازی در مد گایگر این است که تخلیه کرونا باعث تولید سیگنال‌هایی با دامنه بالا می‌شود که بدون استفاده از تقویت کننده‌ها قابل مشاهده هستند. به همین دلیل، در آغاز قرن گذشته میلادی بدون در دست بودن ابزار تقویت سیگنال، این نوع آشکارساز بسیار مفید بوده است. مهمترین عیب استفاده از مقاومت الکتریکی به‌عنوان عامل فرونشانی خارجی در شمارنده‌های گایگر، محدودیت در نرخ شمارش^۲ ذرات فرودی (نوعاً کمتر از یک کیلو هرتز) همچنین عدم وابستگی ارتفاع پالس‌ها به نوع یا انرژی ذرات فرودی است.

پیشنهاد استفاده از شمارنده‌های خودفروشان گازی ابتدا توسط تراست^۳ در سال ۱۹۳۷ مطرح شد [۱]. او کشف کرد اضافه کردن مقداری از بخار ترکیبات آلی به ترکیب‌های گازی در آشکارسازهای متداول باعث فرونشانی کرونا (حاصله از یک سازوکار داخلی) بدون استفاده از مقاومت خارجی می‌گردد. به‌طوری که بعد از آغاز شکل‌گیری کرونا، ترکیب گاز فرو نشان، گسترش آن را بعد از چند میکرو ثانیه (ده تا صد میکرو ثانیه) متوقف می‌کند. شمارنده‌های گایگری خودفروشان دو مزیت کلی داشتند: مدارهای الکترونیکی ساده و پالس‌های خروجی با زمان بقای کوتاه مدت که اجازه به‌کارگیری آن‌ها را در نرخ‌های شمارش نسبتاً بالا (یک تا ده کیلو هرتز و بالاتر از آن) می‌داد. آشکارسازهای گازی که با گازهای فرو نشان کار می‌کنند در بهره‌های بالا، عموماً با نوعی از پدیده شکست سریع در مولکول‌های گاز مواجه می‌شوند [۲]. خطر مهم در این نوع شکست، تشکیل یک پل پلاسمای هادی بین کاتد و آند است

⁵ Keuffel

⁶ Bella

⁷ Imaging-detectors

⁸ Streamer

¹ Self-sustained

² Counting rate

³ Trost

⁴ Position-sensitive gaseous detector

(مدت زمان حدود چند نانو ثانیه) و لثاژ اعمالی به شمارنده قطع گردد (فرونشانی خارجی) جرقه‌ای ایجاد نمی‌شود و در صورت شدت نور کافی می‌توان از آن‌ها تصویر برداری کرد. این ایده ابتدا توسط چیکوانی^۱ و دولگوشین^۲ مطرح گردید [۶،۵]. از این‌رو امکان اندازه‌گیری سه بعدی مسیر عبور ذرات در محفظه‌های اندازه‌گیری ستون نور که با گازهای نجیب (معمولاً نئون یا ترکیب نئون و هلیوم) در دمای اتاق کار می‌کردند، فراهم شد.

مطالعات منظم در زمینه بررسی و پیدایش ستون‌های نور مرئی نیز در نیمه اول دهه ۶۰ میلادی در آشکارسازهای گازی صفحات موازی انجام شده‌است. پدیده تشکیل ستون‌های نوری هنگامی که تعداد الکترون‌های نهایی تولید شده در بهمن‌ها به تعداد اصطلاحاً بحرانی^۸ ۱۰^۸ برسد، رخ می‌دهد. این مقدار ابتدا به‌صورت تجربی توسط ریدر^۳ برای گازهای مختلف در ساختار صفحات موازی به‌دست آمد و مطالعات بعدی نشان داد که این مقدار در سایر ساختارها نیز در فشارهای نزدیک به یک اتمسفر صدق می‌کند [۷]. در ولتاژهای بالاتر، شکست اتفاق افتاده و تخلیه الکتریکی همراه با نمایان شدن جرقه را به‌دنبال خواهد داشت.

در دهه ۹۰ میلادی، امکان دسترسی به ساختارهای ریز منجر به ظهور آشکارسازهای گازی ریزالگو^۴ گردید و با توجه به کاربرد گسترده این دسته از آشکارسازها، طراحی‌های مختلفی از این آشکارسازها ارائه شد. در سال ۱۹۹۶ تکثیرگر الکترون گازی^۵ (با نام اختصار GEM) توسط ساولی^۶ مرکز سرن^۷ (CERN)، پیشنهاد شد که با بهره بالاتر نسبت به سایر ساختارهای ریزالگو مورد توجه بیشتری قرار گرفت [۸]. به‌دنبال

معرفی ساختار GEM، تکثیرگر الکترونی گازی ضخیم^۸ و تکثیرگر الکترونی گازی ضخیم مقاوم^۹ بر مبنای الگوی صفحات GEM، همزمان توسط دو گروه از دانشمندان معرفی گردیدند [۱۰،۹]. استفاده از فیبرهای چاپی و دستگاه‌های تراش متداول در ساخت آشکارسازهای نوع GEM همچنین ویژگی‌های قابل توجه این آشکارسازها، آن‌ها را برای کاربردهای بی‌شماری مورد توجه قرار داد و از ابتدای معرفی، در شتاب دهنده ذرات با انرژی بالا در مرکز سرن از جمله در پروژه‌های عظیم RICH^{۱۰} برای ساخت صفحاتی تا مساحت چند ده متر مربع مورد استفاده قرار گرفته شدند و تاکنون جنبه‌های گوناگون آن‌ها توسط محققین مطالعه شده‌است [۱۳-۱۱].

عدم نیاز به استفاده از پیش تقویت کننده و تقویت کننده‌های الکترونیکی برای آشکارسازی ذرات در حضور ترکیب برخی از گازهای فرونشان، در کنار دسترسی به ساختارهای ریزالگو از جمله مهمترین مزیت‌های استفاده از ساختارهای نوع GEM در آشکارسازهای گازی حساس به موقعیت است [۱۴، ۱۵]. در این تحقیق با به‌کارگیری دو هندسه متفاوت و یک پیکربندی دوگانه از یک ساختار ریزالگوی بدون دیواره با کمترین احتمال برقراری جریان نشتی بین الکترودها با نام مجتمع تکثیرگر الکترونی^{۱۱} (EMA)، آرایش خطوط میدان الکتریکی در ناحیه تکثیر به عنوان عامل فرونشانی هندسی برای ظاهر شدن یک فضای پلاسمای خودپایدار به شکل ستون‌های نوری معرفی می‌گردد. هدف اصلی بررسی چنین ساختارهایی، امکان سنجی استفاده از آن‌ها برای اندازه‌گیری‌های مربوط به پرتوهای محیطی

⁷ In French "Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire"

⁸ Thick Gas Electron Multiplier (TGEM)

⁹ Resistance Thick Gas Electron Multiplier (RETGEM)

¹⁰ Ring-Imaging Cherenkov counter

¹¹ Electron Multiplier Assembly (EMA)

¹ Chikovani

² Dolgoshein

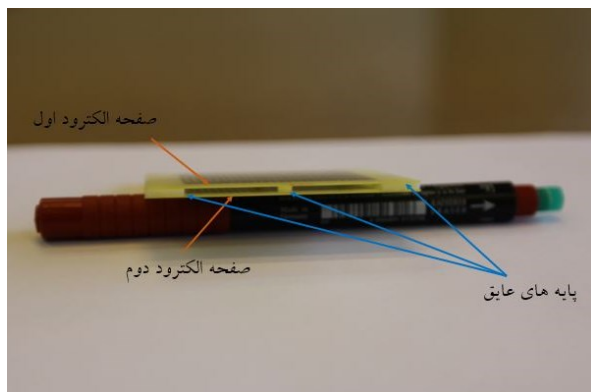
³ Raether

⁴ Micro-pattern gaseous detectors

⁵ Gas Electron Multiplier (GEM)

⁶ F. Sauli

دایروی روی صفحات به شکل آرایه منظمی توسط دستگاه تراش کامپیوتری (CNC)^۲ ایجاد می‌گردد. فاصله بین مرکز هر حفره تا حفره مجاور گام^۳ حفره نام دارد.



شکل (۲): مجتمع تکثیرگر الکترونی.

در این تحقیق، هر صفحه الکتروود به کارگرفته شده در مجتمع‌ها، از دو لایه تشکیل می‌گردد: لایه اول از جنس مس به ضخامت $35 \mu\text{m}$ و لایه دوم از جنس عایق FR4 به ضخامت 0.4 mm . قطر و گام تکرار حفره‌ها ایجاد شده برای مجتمع تکثیرگر ۱ به ترتیب 1 mm و 2 mm و برای مجتمع تکثیرگر ۲ به ترتیب 0.5 mm و 1 mm در نظر گرفته شده‌اند. همچنین فاصله بین دو الکتروود در هر مجتمع تکثیرگر 1 mm است.

۲.۲. پیکربندی اجزاء و شرح فرایند

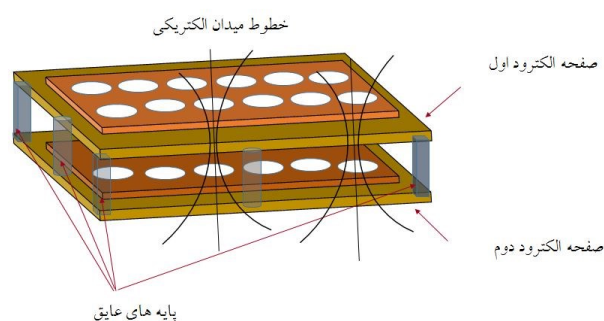
هرکدام از مجتمع‌های تکثیرگر الکترونی به‌طور جداگانه مطابق شکل ۳، در مقابل چشمه پرتوزا و بعد از الکتروود (توری) رانش^۴ قرار می‌گیرند. الکتروود رانش و الکتروودهای مجتمع تکثیرگر الکترونی به یک منبع ولتاژ بالای جریان مستقیم (DC) متصل می‌گردند. با توجه به مدار تقسیم ولتاژ، با اعمال ولتاژ ورودی میدان الکتریکی مطابق شکل در محفظه آشکارساز ایجاد می‌گردد.

از جمله تغییرات غلظت گاز رادون موجود در هوا و چیدمان‌های آزمایشگاهی است که میزان رطوبت در آن‌ها قابل ملاحظه است.

۲. تکثیرگر الکترونی، پیکربندی اجزاء و شرح فرایند

۱.۲. ساختار مجتمع تکثیرگر الکترونی

مجتمع تکثیرگر الکترونی تشکیل شده است از دو صفحه الکتروود با آرایه‌ای منظم از حفره‌های دایروی که به وسیله پایه‌های عایقی از هم جدا شده‌اند (شکل ۱). فضای محصور شده بین حفره‌های متقابل الکتروودها، به‌عنوان ناحیه تکثیر عمل می‌کند و عدم اتصال بین الکتروودها در محل حفره‌ها از برقراری جریان‌های ناشی بین دو الکتروود در هوای مرطوب جلوگیری می‌کند [۱۶]. مقابل هم قرار گرفتن دقیق صفحات الکتروودها برای هم‌افزایی خطوط میدان الکتریکی در داخل حفره‌ها از موارد قابل توجه در ساخت مجتمع تکثیرگر الکترونی است.



شکل (۱): نحوه قرار گیری الکتروودها در یک مجتمع تکثیرگر الکترونی.

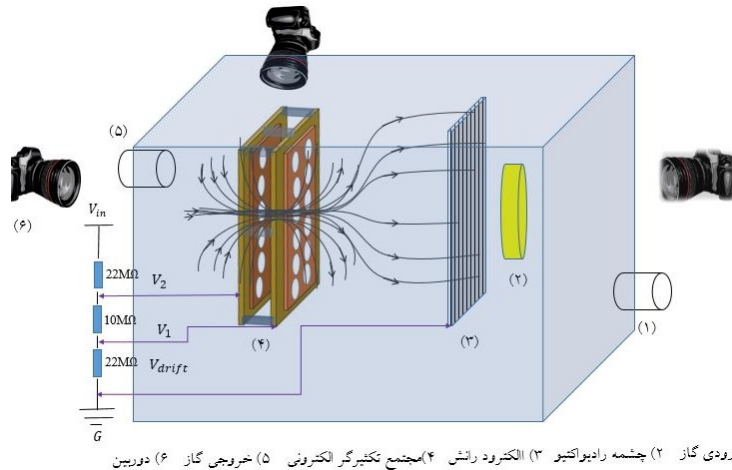
تصویر یک مجتمع تکثیرگر ساخته شده، در شکل ۲ آورده شده‌است. تکنولوژی ساخت صفحات بر مبنای تکنولوژی حکاکی نوری (فوتولیتوگرافی)^۱ بنیان نهاده شده که در صنعت ساخت فیبرهای مدار چاپی به کار گرفته می‌شود. حفره‌های

³ Pitch

⁴ Drift mesh

¹ Photolithography

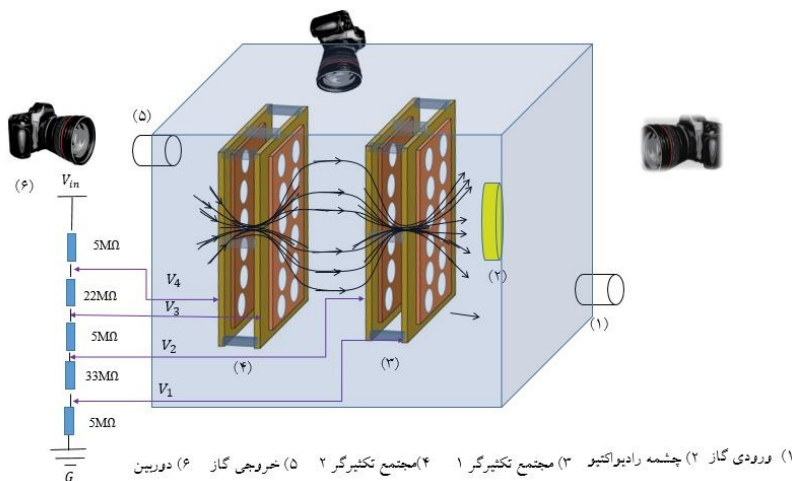
² Computer Numerical Machine



شکل (۳): نحوه قرار گرفتن یک مجتمع تکثیرگر الکترونی در محفظه آشکارساز.

مستقیم (DC) متصل می‌گردند که باعث ایجاد میدان الکتریکی مطابق شکل ۴ می‌شود.

برای پیکربندی دوگانه از مجتمع‌ها، مجتمع تکثیرگر ۱ در مقابل چشمه پرتوزا و بعد از آن مجتمع تکثیرگر ۲ قرار می‌گیرد. در این حالت نیز الکترودهای مجتمع‌ها به یک منبع ولتاژ بالای جریان



شکل (۴): پیکربندی دوگانه از مجتمع‌های تکثیرگر الکترونی.

شرکت در فرایند تکثیر بهمنی را در برخورد با مولکول‌ها و اتم‌های گازی مقابل خود کسب می‌کنند. در کنار یونش مولکول‌های گاز در ناحیه تکثیر، برانگیختگی مولکول‌های گاز، نشر فوتون‌ها را به دنبال خواهد داشت. طیف‌های نشری بهمن‌ها به میدان الکتریکی اعمالی به الکترودهای ناحیه تکثیر همچنین حالت‌های مختلف برانگیختگی اتمی و مولکولی مربوط به ترکیبات گازی موجود در محفظه آشکارساز وابسته هستند.

در این پیکربندی‌ها، بعد از اعمال ولتاژ، الکترون‌های تولید شده ناشی از برهمکنش ذرات ساطع شده از منبع با ترکیب گازی داخل محفظه آشکارساز در ناحیه رانش (فضای بین چشمه و الکتروود اول مجتمع تکثیرگر) در خلاف جهت میدان الکتریکی ایجاد شده به سمت صفحات مجتمع تکثیرگر الکترونی به عنوان ناحیه تکثیر رانده می‌شوند. در ناحیه بین صفحات تکثیرگرها، در حضور میدان الکتریکی قوی، الکترون‌ها شتاب کافی جهت

ولتاژ اعمال شده به الکترودها، ظهور ستون نور مرئی در مقابل چشمه آمرسیوم را به دنبال نداشت و با افزایش بیشتر ولتاژ، در فضاهای مختلف میان صفحات تکثیرگرها جرقه های ناشی از تخلیه الکتریکی نمایان گردید. استمرار در این حالت ذوب شدن لایه فلزی و آسیب به صفحات را موجب می شود. در جدول ۱، ولتاژهای آستانه در حضور ترکیب گازی P10 و تخلیه الکتریکی در حضور هوا برای آزمایش های مذکور آورده شده است.

جدول (۱): ولتاژ آستانه مربوط به نمایان شدن ستون های نوری در

ترکیب گازی P10 و ولتاژ تخلیه الکتریکی در هوا.

مجموع تکثیرگر	ولتاژ آستانه	ولتاژ تخلیه الکتریکی
	(گاز P10)	(هوا)
شماره ۱	۳۵۰۰	۶۷۰۰
شماره ۲	۳۲۰۰	۶۵۰۰
پیکربندی دوگانه	۶۵۰۰	۱۰۵۰۰

۱.۳. ظهور نور مرئی در ناحیه محصور بین حفره ها در

مقابل چشمه

تصویر ستون های نور مرئی درون هر حفره از صفحات تکثیرگر از نماهای پشت چشمه، بالای مجتمع ها و مقابل الکترودها و مجتمع های تکثیرگر در شکل های ۵ تا ۷، آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود در ولتاژ آستانه، درون هر کدام از حفره هایی که در مقابل چشمه آلفا قرار گرفته اند ستون های نور مرئی به طور پیوسته بدون تخریب لایه های مسی الکترودها پدیدار می گردند. دقت در اندازه گیری مکان (تفکیک مکانی)^۲ ذرات فرودی بسته به قطر حفره های ایجاد شده در صفحات الکترودها، مشخص می گردد. به عنوان مثال؛ در مجتمع تکثیرگر ۲ که حفره های ایجاد شده در آن دارای قطر ۰/۵ میلی متر و گام ۱ میلی متر هستند، مسیرهای^۳ ورود ذرات به داخل صفحات با

به طور کلی به دلیل سازوکارهای پیچیده برانگیختگی و یونیزاسیون بین اتم های گازهای نجیب و مولکول های گازهای فرو نشان، فرایندهای مختلفی می تواند رخ دهد که منجر به ساطع شدن فوتون ها با انرژی هایی در محدوده بین پرتوهای مادون قرمز تا فرابنفش گردد [۵]. در این تحقیق محل ظهور پرتوهای نور مرئی در ولتاژهای معین در فضاهای محدود به حفره هایی که در مقابل چشمه قرار گرفته اند از سه نما توسط دوربین ثبت می شود.

۳. نتایج آزمایش ها

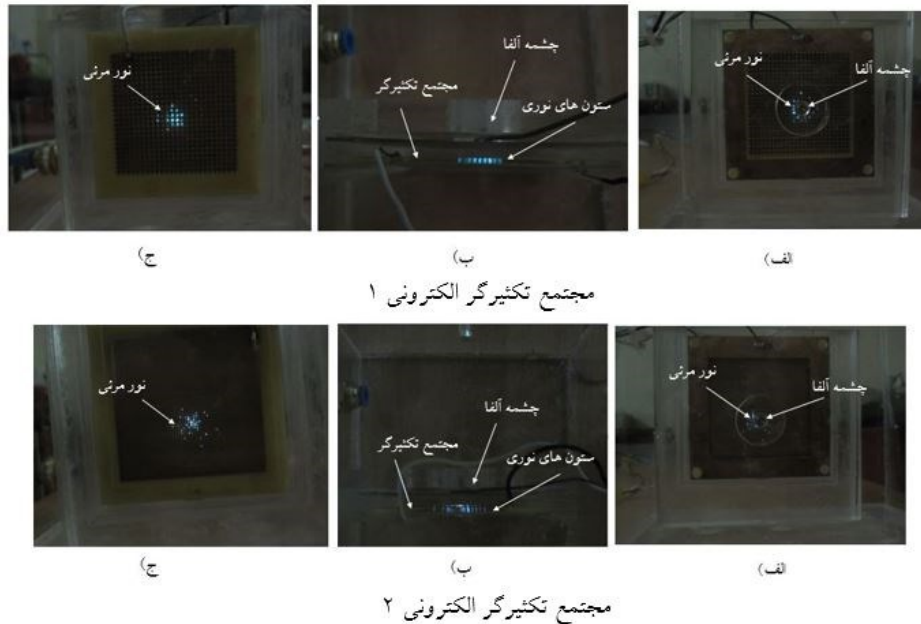
آزمایش ها در حضور ترکیب گازی P10 (۹۰ درصد آرگون بعلاوه ۱۰ درصد متان)، یکی از گازهای رایج برای آشکارسازهای گازی در مد تناسبی، در دمای اتاق و فشار جوی محیط برای دو مجتمع تکثیرگر و همچنین پیکربندی دوگانه مجتمع ها انجام شد. با انتخاب یک محفظه مکعبی از جنس پلی گلاس شفاف با طول ضلع ۱۵ cm به عنوان محفظه آشکارساز، چشمه ^{۲۴۱}Am با اکتیویته ۳۰ کیلو بکرل (ذرات آلفا با انرژی ۵/۴ MeV) در مقابل مجتمع های تکثیرگر قرار داده شد. ولتاژ ورودی (V_{in}) به الکترودها و الکترودهای تکثیرگرها مطابق با مدارهای تقسیم ولتاژ اعمال گردید. با افزایش ولتاژ اعمالی در یک ولتاژ مشخص (ولتاژ آستانه^۱) ستون های نور مرئی در فضای بین صفحات مقابل چشمه آمرسیوم نمایان شدند. در پیکربندی دوگانه، دو مجتمع به فاصله ۴ mm از یکدیگر قرار گرفته شدند. در این حالت نیز در یک ولتاژ معین، در ناحیه بین الکترودهای هر مجتمع تکثیرگر که در مقابل چشمه قرار داشتند ستون های نور مرئی ظاهر گردیدند. در ولتاژهای بیشتر از ولتاژ آستانه و تا قبل از رسیدن به ولتاژ تخلیه الکتریکی، شدت نورهای مرئی نیز افزایش پیدا می کرد. با انجام مراحل فوق در مجاورت هوای آزاد و عدم حضور ترکیب گازی P10، افزایش

³ Tracks

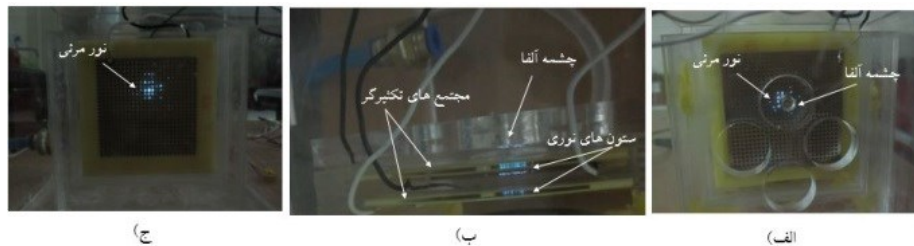
¹ Threshold

² Resolution

دقت کمتر از ۱ میلی‌متر به دست می‌آید. در شکل ۵ تفکیک مکانی بهتر مربوط به مجتمع تکثیرگر ۲ قابل مشاهده است.



شکل (۵): تصویر ستون‌های نوری در مجتمع‌های تکثیرگر الکترونی ۱ و ۲ از نماهای الف) پشت چشمه، ب) بالای مجتمع و ج) مقابل مجتمع تکثیرگر.

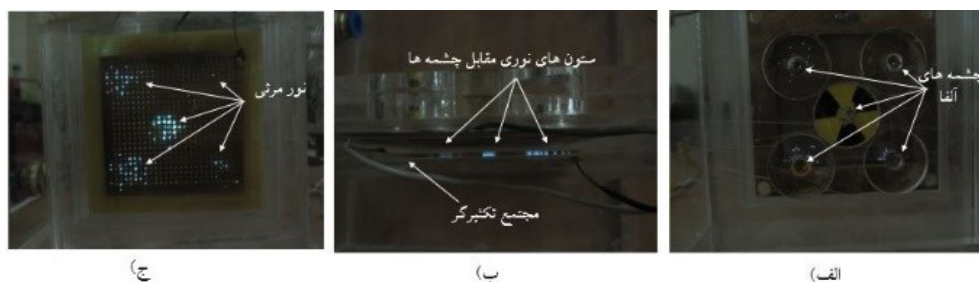


شکل (۶): تصویر ستون‌های نوری در پیکربندی دوگانه از مجتمع‌های تکثیرگر الکترونی از نماهای الف) پشت چشمه، ب) بالای مجتمع‌ها و ج) مقابل مجتمع تکثیرگر الکترونی ۲.

همانطور که مشاهده می‌گردد شدت نور پرتوها در حفره‌های مقابل چشمه مرکزی با اکتیویته بالاتر بیشتر از سایر حفره‌ها است. به‌طور کلی در ساختارهای به کارگرفته شده بسته به تعداد الکترون‌هایی که وارد هر کدام از حفره‌ها می‌شوند، در یک ولتاژ آستانه با برآورده شدن شرط ریدر، ستون‌های نور مرئی در ناحیه تکثیر نمایان خواهند شد. شدت نور ساطع شده به مقدار الکترون‌هایی که در پدیده بهمن الکترونی شرکت داشته‌اند وابستگی دارد.

در شکل ۶ تصویر ستون‌های نور مرئی بین صفحات هر مجتمع تکثیرگر به طور جداگانه در ولتاژ آستانه برای پیکربندی دوگانه از مجتمع‌ها نمایش داده شده است.

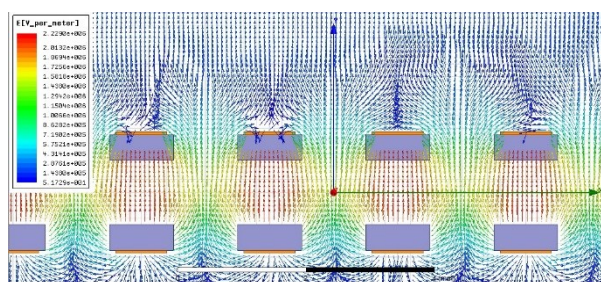
در ادامه آزمایش‌ها، برای بررسی رابطه بین اکتیویته هر چشمه و شدت نورهای ظاهر شده از چند چشمه با اکتیویته‌های مختلف در حضور مجتمع تکثیرگر ۱ استفاده شده است. در شکل ۷، چشمه مرکزی دارای اکتیویته ۱۵۰ کیلو بکرل و سایر چشمه‌ها (چهار گوش) دارای اکتیویته ۳۰ کیلو بکرل هستند.



شکل (۷): تصویر ستون‌های نوری در مقابل چشمه‌هایی با اکتیویته مختلف از نماهای الف) پشت چشمه، ب) بالای مجتمع و ج) مقابل مجتمع. شدت نورها در مقابل چشمه مرکزی با اکتیویته بیشتر از سایرین زیادتر است.

بلا قرار دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ولتاژ آستانه، اندازه میدان الکتریکی بین الکترودهای مجتمع‌های تکثیرگر به بیش از مقدار $10^6 V/m$ ، کمیته مقدار لازم جهت تکثیر الکترونی در گازهای معمولی، می‌رسد [۱۸].

مطابق شکل‌های ۸ و ۹ اندازه میدان الکتریکی در داخل هر حفره در فاصله میان دو الکترودهای مجتمع‌ها به ترتیب به مقدار حداکثری $10^6 V/m \times 1/43$ و $10^6 V/m \times 1/28$ می‌رسد و در نزدیکی سطح الکترودها کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۱۰ نیز اندازه میدان الکتریکی برای پیکربندی دوگانه در فضای میان حفره‌های مجتمع تکثیرگر ۱ و ۲ به ترتیب به مقدار $10^6 V/m \times 1/65$ و $10^6 V/m \times 1/10$ رسیده‌است.



شکل (۸): شبیه‌سازی میدان الکتریکی در مجتمع تکثیرگر ۱. اندازه میدان در فضای میان حفره‌ها به مقدار $10^6 V/m \times 1/43$ می‌رسد و در سطح الکترودها کاهش می‌یابد.

۴. تحلیل و بررسی داده‌ها

۴.۱. میدان‌های الکتریکی در ناحیه تکثیر

در این قسمت برای نشان دادن شکل و اندازه میدان الکتریکی هنگام ظاهر شدن ستون‌های نوری در نواحی تکثیر، میدان الکتریکی میان صفحات مجتمع تکثیرگر الکترونی با نرم افزار ماکسول شبیه‌سازی می‌شود [۱۷]. با توجه به تکرار و تقارن خطوط میدان در آرایه‌های این نوع ساختار، با ترسیم قسمتی از صفحات در فضای دو بعدی این نرم افزار (تعیین ابعاد و جنس صفحات)، ولتاژهای اعمالی به الکترودها را مشخص و خطوط میدان الکتریکی را به دست می‌آوریم. برطبق شکل مداری تقسیم ولتاژ، ولتاژهای اعمالی V_1 و V_2 به الکترودهای کاتد و آند دو مجتمع تکثیرگر به ترتیب برابر با $0.138 V_{in}$ و $0.861 V_{in}$ و در حالت پیکربندی دوگانه ولتاژهای اعمالی V_1 و V_2 به الکترودهای کاتد و آند مجتمع تکثیرگر اول $0.071 V_{in}$ و $0.928 V_{in}$ ، همچنین ولتاژهای اعمالی V_3 و V_4 به الکترودهای کاتد و آند مجتمع تکثیرگر دوم $0.614 V_{in}$ و $0.928 V_{in}$ هستند. در این شبیه‌سازی ولتاژ آستانه‌ای که در آن بین صفحات تکثیرگرها ستون‌های نور مرئی ظاهر می‌شوند به عنوان ولتاژ ورودی در نظر گرفته می‌شود. شکل و اندازه میدان الکتریکی در فضای بین صفحات مجتمع‌های تکثیرگر در شکل‌های ۸ تا ۱۰ آمده است. در این شکل‌ها الکترودهای کاتد و الکترودهای کاتد در

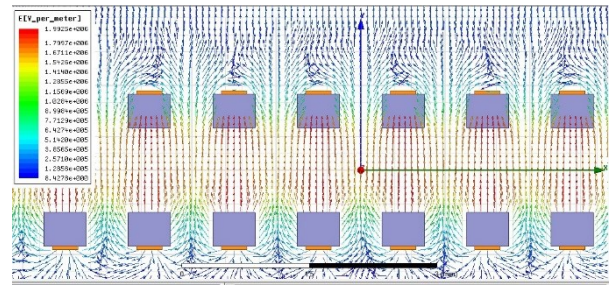
الکترودها (شکل‌های ۸ تا ۱۰) مؤید نقش مؤثر میدان‌های الکتریکی در حرکت الکترون‌ها تولید شده در ناحیه رانش و هدایت آن‌ها به طرف ناحیه تکثیر است.

۲.۴. تأثیر آرایش خطوط میدان الکتریکی در تشکیل

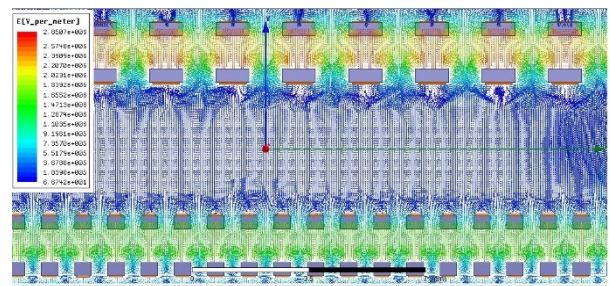
فضای پلاسمای خودپایدار

با توجه به شکل‌های ۸ تا ۱۰، در ساختار مجتمع تکثیر الکترونی، همگرایی و واگرایی خطوط میدان الکتریکی در ناحیه تکثیر منجر به ایجاد نوعی فرونشانی هندسی در این ناحیه می‌شود که تشکیل فضای پلاسمای پایدار غیر مخرب در حفره‌های مقابل چشمه آمرسیوم را به‌دنبال دارد. به‌طوری که با توجه به تراکم خطوط میدان الکتریکی در ناحیه بین دو الکترودها، در هر حفره پلاسمای تشکیل شده در مرکز (با میدان الکتریکی بیشینه)، به طرف الکترودها گسترش یافته و یک ستون نوری در فضای محصور شده توسط ابعاد حفره‌ها به‌طور پیوسته بدون تخریب لایه‌های مسی الکترودها بین آند و کاتد نمایان می‌شود. افزایش بیشتر ولتاژ اعمالی به الکترودها و عبور از حد ریدر در ناحیه تکثیر، ایجاد جرقه و پدیده مخرب شکست و تخلیه الکتریکی را برای الکترودهای مجتمع‌ها به‌دنبال خواهد داشت.

قابل ذکر است که در هندسه صفحات موازی و ساختارهای سیمی که آرایش خطوط میدان الکتریکی به‌ترتیب به‌شکل خطوط موازی یکنواخت و شعاعی هستند، ستون‌های نوری تشکیل شده در نزدیکی آند، به سرعت گسترش یافته و در صورت عدم استفاده از فرونشانی‌های خارجی و یا کاهش سریع ولتاژ ورودی، این ستون‌های نوری به جرقه‌های نورانی و مخرب تبدیل می‌گردند. از این‌رو در روش‌های اپتیکی برای مشاهده مسیر عبور ذرات باردار در فضای آشکارسازهای گازی با هندسه صفحات موازی و استوانه‌ای اغلب فرونشانی خارجی (استفاده از مقاومت خارجی و یا کنترل ولتاژ اعمالی) که باعث



شکل (۹): شبیه‌سازی میدان الکتریکی در مجتمع تکثیرگر ۲. اندازه میدان در فضای میان حفره‌ها به مقدار $1/28 \times 10^6 \text{ V/m}$ می‌رسد و در سطح الکترودها کاهش می‌یابد.



شکل (۱۰): شبیه‌سازی میدان الکتریکی برای پیکربندی دوگانه. اندازه میدان در در مجتمع ۱ به مقدار $1/65 \times 10^6 \text{ V/m}$ و در مجتمع ۲ به مقدار $1/10 \times 10^6 \text{ V/m}$ می‌رسد.

مطابق مدارهای تقسیم ولتاژ (مشخص شده در شکل‌های ۳ و ۴) و داده‌های جدول ۱، در پیکربندی دوگانه از مجتمع‌ها، بدلیل عدم استفاده از الکترودها رانش برای مجتمع تکثیرگر ۱، در ولتاژ آستانه ($V_{th} = 6500$) که ستون‌های نوری ظاهر می‌شوند، اختلاف ولتاژ بین دو الکترودها تکثیرگر، $\Delta V_{th} = 3061 \text{ V}$ نسبت به ساختار تک مجتمعی با حضور الکترودها رانش (ولتاژ آستانه $V_{th} = 3500$)، $\Delta V_{th} = 2530 \text{ V}$ زیادتر است. در حالی که برای مجتمع تکثیرگر ۲، وجود مجتمع ۱ و تکثیر اولیه الکترون‌ها در آن، منجر به کاهش اختلاف ولتاژ آستانه $\Delta V_{th} = 2041 \text{ V}$ ، در مقایسه با اختلاف ولتاژ آستانه مجتمع دوم با الکترودها رانش، $\Delta V_{th} = 2342 \text{ V}$ می‌شود. این تفاوت‌ها در اختلاف ولتاژهای آستانه (به همین ترتیب برای ولتاژهای تخلیه) همچنین اندازه حداکثری میدان‌های الکتریکی در داخل حفره‌های میان

الکترودهای آند و کاتد مجتمع تکثیرگر الکترونی، باعث گسترش پلاسمای تشکیل شده از مرکز هر حفره با بیشینه میدان الکتریکی به طرف الکترودها شده و یک ستون نوری را در فضای محصور شده توسط ابعاد حفره‌ها تشکیل می‌دهد که شدت آن به تعداد الکترونی‌هایی که در پدیده بهمن الکترونی شرکت داشته‌اند، وابستگی دارد. نمایان شدن ستون‌های نوری پایدار با شدت‌های مختلف در مقابل چشمه‌های پرتوزا با اکتیویته‌های متفاوت نشان دهنده کارایی به کارگیری این نوع ساختار با کمترین احتمال جریان نشستی بین الکترودها، جهت استفاده برای اندازه‌گیری‌های مربوط به پرتوهای محیطی از جمله غلظت گاز رادون موجود در هوا است. استفاده از پیکربندی‌های ترکیبی و تکرار آرایه‌ای از الکترودها در مقابل هم، جهت هم افزایی خطوط میدان الکتریکی در ناحیه تکثیر در راستای بهبود عملکرد تکثیرگر پیشنهاد می‌گردد.

جلوگیری از تبدیل ستون نوری به جرقه در ناحیه تکثیر می‌شود مورد توجه قرار گرفته شده در حالی که آرایش خطوط میدان الکتریکی در ساختارهایی از جمله مجتمع تکثیرگر الکترونی، مانع از گسترش سریع ستون‌های نوری و تبدیل آن‌ها به جرقه می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

شکل‌گیری خطوط میدان الکتریکی دو قطبی گونه در مجتمع تکثیرگر الکترونی در کنار استفاده از گاز مناسب، راه استفاده از ساختارهای نوع GEM برای آشکارسازی پرتوهای یونیزان را به‌عنوان یک روش اپتیکی هموار نموده است. آرایش خطوط میدان الکتریکی بین الکترودهای مجتمع تکثیرگر الکترونی، نوعی فرونشانی هندسی را موجب می‌گردد که باعث ظاهر شدن یک ناحیه پلاسمای خود پایدار به شکل ستون‌های نوری در ولتاژ آستانه بین الکترودهای تکثیرگر می‌شود. همگرایی خطوط میدان در وسط هر کدام از حفره‌ها و واگرایی آن در نزدیکی

۶. مراجع

1. E. Nappi, V. Peskov. *Imaging Gaseous Detectors and Their Applications*. (Chap. 2 and 3.). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013.
2. V. Peskov, B. D. Ramsey, P. Fonte. Surface streamer breakdown mechanisms in microstrip gas counters. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sec. A* 392 (1977) 89-108.
3. J. W. Keuffel. Parallel-Plate Counters. *Rev. Sci. Instrum.* 20 (1949) 202-208.
4. F. Bella, C. Franzinetti, D. Lee. On spark counters. *Il Nuovo Cimento* 10 (1953) 1338-1340.
5. G. E. Chikovani, V. N. Roinishvili, V. A. Mikhailov. Operation mechanism of the track spark chamber. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sec. A* 29 (1964) 261-269.
6. B. A. Dolgoshein, B. I. Luchkov. A new gas-discharge track detector streamer chamber *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sec. A* 26 (1964) 345-347.
7. H. Raether. *Electron avalanches and breakdown in gases*, Chap. 6, Butterworths, London, 1964.
8. F. Sauli. GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sec. A* 386 (1997) 531-534.
9. R. Chechik, A. Breskin, C. Shalem, D. Mörmann. Thick GEM-like hole multipliers: properties and possible applications, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sec. A* 535 (2004) 303-308.
10. R. Oliveira, V. Peskov, F. Pietropaolo, P. Picchi. First Tests of Thick GEMs with Electrodes Made of a Resistive Kapton. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sec. A* 576 (2007) 362-366.
11. D. Mormann, A. Breskin, R. Chechik, C. Shalem. Operation principles and properties of the multi-GEM gaseous photomultiplier with reflective photocathode. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sec. A* 530 (2004) 258-274.

12. R. Chechik, A. Breskin, C. Shalem. Thick GEM-like multipliers – a simple solution for large area UV-RICH detectors, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sec. A* 553 (2005) 35-40.
13. S. Leardini, A. Saá-Hernández, M. Kuźniak, D. González-Díaz, C. D. R. Azevedo, F. Lucas, P. Amedo, A. F. V. Cortez, D. Fernández-Posada, B. Mehl, G. Nieradka, R. Oliveira, V. Peskov. FAT-GEMs: (Field Assisted) Transparent Gaseous-Electroluminescence Multipliers. *Front. Detect. Sci. Technol.* 2 (2024).
14. S. M. Hashemi, A. Negarestani. A new method to alpha particle detection use of Electron Multiplier Assembly(EMA) in SQS mode. *J. Instrumentation* (13) (2018) P05025.
15. S. M. Hashemi, A. Negarestani. Investigation of alpha particle tracks in GEM-type structures based on SQS mode. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sec. A* 913 (2019) 20-27.
16. V. Peskov, A. Di Mauroa, P. Fonte, P. Martinengo, E. Nappi, R. Oliviera, P. Picchi. Development of a new generation of micropattern gaseous detectors for high energy physics, astrophysics and environmental applications. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sec. A* 732 (2013) 255-259.
17. MAXWELL Commercial Finite Element Computation Package, Ansoft Co. Pittsburg, PA, USA.
18. G. F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*. John Wiley & Sons, 2010.