

آشکارسازی پرتوهای آلفا با استفاده از کارکرد آشکارسازهای گازی مقیاس ریز در مد SQS

راضیه سوری^۱، علی نگارستانی^{۲*} و محمد ماهانی^۱

^۱دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.

^۲دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.

*کرمان، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، دانشکده برق و کامپیوتر، کدپستی: ۷۶۳۱۱-۳۳۱۳۱

پست الکترونیکی: a.negarestani@kgut.ac.ir

چکیده

در آشکارسازهای گازی در حضور مخلوط‌های گازی جاذب فوتون‌های UV می‌توان بعد از مد تناسبی، وارد مد SQS گردید که با پدیدار شدن یک ستون نور مرئی، در محل ورود اشعه، همراه می‌باشد. در این تحقیق با طراحی، شبیه‌سازی و ساخت سه آشکارساز گازی مقیاس ریز ضخیم، THGEM، با ابعاد هندسی مختلف، نشان داده شده است که چگونه می‌توان با استفاده از قابلیت کارکرد آن‌ها در مد SQS اقدام به تشخیص موقعیت مکانی پرتوهای ورودی نمود. در این روش هر یک از حفره‌های صفحات THGEM، به‌عنوان یک پیکسل تصویر، مستقل از دیگر حفره‌ها، می‌تواند وارد مد SQS شود که در این حالت یک ستون نور درون آن حفره پدیدار می‌گردد. از آن‌جا که شدت روشنایی هر حفره در یک ولتاژ خاص متناسب با تعداد الکترون‌های اولیه وارد شده به آن حفره می‌باشد، نشان داده شده است که از این روش می‌توان، به سهولت، جهت تشخیص پرتوهای آلفا استفاده کرد.

کلیدواژگان: آشکارسازهای گازی مقیاس‌ریز، تکثیرکننده گازی الکترون ضخیم، نرم‌افزار ماکسول، مد ستون نور خود فرو نشان، اشعه آلفا.

۱. مقدمه

در سازمان اروپایی پژوهش‌های هسته‌ای (سرن^۱) و همچنین سازمان ناسا مورد استفاده قرار گرفت. به‌دلیل وجود نیروی الکتروستاتیکی بین سیم‌های باردار به یکدیگر، فاصله بین سیم‌ها در آشکارسازهای چند سیمی بیش از چند میلی‌متر می‌باشد. این فاصله زیاد باعث پایین آوردن قدرت تفکیک مکانی آشکارسازهای چند سیمی می‌گردد [۳، ۴، ۵].

تکنیک استفاده از آشکارسازهای گازی در تعیین موقعیت مکانی اشعه نخستین بار در سال ۱۹۶۸ توسط چارپنگ (برنده جایزه نوبل فیزیک ۱۹۹۲) با معرفی ساختارهای چند سیمی ارائه گردید [۱، ۲]، به‌طوری که در دوره زمانی ده ساله در بسیاری از آزمایش‌های فیزیک ذرات بنیادی و انرژی‌های بالا

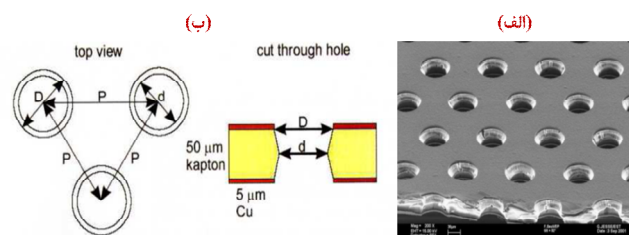
^۱ In French "Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire" (CERN)

در سال ۲۰۰۷، ساولی نسل جدیدی از آشکارسازهای جم، به نام THGEM^۵ را بنا کرد که در آن ضخامت‌ها، حفره‌ها و گام‌ها دارای ابعاد چند دهم میلی‌متری تا میلی‌متری می‌باشند. مزیت اصلی صفحات THGEM، علاوه بر، بهره‌های بالاتر، سادگی ساخت آن‌ها نسبت به آشکارسازهای جم معمولی است. از آن‌جا که در این تحقیق سعی شده است با ساخت جم‌های ضخیم به بررسی کارکرد آن‌ها در مد SQS^۶ پرداخته شود، در ادامه به معرفی اجمالی این مد پرداخته شده است.

۱.۱. مد ستون نور خود فرو نشان (SQS)

آشکارسازهای یونیزاسیون گازی معمولی، به اتاقک یونیزاسیون، شمارنده‌های تناسبی و گایگر-مولر دسته بندی می‌شدند. اما نوع دیگری از سیستم‌های شمارش بر پایه اثرات یونیزاسیون نیز، توسعه یافته‌اند. این شمارشگر نوع خاصی از آشکارسازهای تکثیرکننده گازی است که تا حدودی متفاوت از سیستم‌های شمارنده تناسبی و گایگر-مولر عمل می‌کند و به آن، مد ستون نور خود فرو نشان SQS یا آشکارساز جریان محدود، گفته می‌شود [۱۲]. این آشکارساز با مخلوط‌های گازی جاذب فوتون‌های UV پر شده‌اند و به همین علت هیچ گونه بهمن اضافی به دور از مسیر بهمن اصلی، نمی‌تواند از طریق برانگیختگی جذب فوتونی، به وجود آید و بهمن‌ها به شکل یک streamer یا ستون نور قابل دید، رشد کرده و تکثیر می‌شوند. اغلب، ستون نور، دارای قطری حدود ۲۰۰ میکرون است و تا چند میلی‌متری آند گسترش می‌یابد و نهایتاً در جایی که شدت میدان الکتریکی ضعیف شود، خاتمه خواهد یافت. اندازه دقیق ستون نور و در نتیجه شدت روشنایی، به چگالی بار اولیه و ولتاژ اعمالی به آشکارساز بستگی دارد [۱۳]. این مد، غالباً، در سیستم‌های آشکارسازی چند سیمی حساس به

از طرف دیگر، در آغاز دهه ۱۹۹۰ تکنیک‌هایی مانند حکاکی نوری^۱، کنده‌کاری انتخابی^۲ و ماشین‌کاری لیزری که ابتدا در صنعت نیمه‌هادی معرفی گردید، در طراحی، دسته جدیدی از آشکارسازهای گازی ریز الگو به‌کار گرفته شد. این آشکارسازها با جزئیات ریزمقیاس ساختاری و با مراحل بازخوانش ریزمقیاسی مشخص می‌شوند. این ویژگی‌ها اجازه دسترسی به قدرت تفکیک مکانی کم‌تراز میلی‌متر که در دنبال کردن ذره یا کاربردهای تصویربرداری مفید است، را خواهند داد. همچنین این آشکارسازها دارای مشخصه‌های زمانی فوق‌العاده‌ای هستند و می‌توانند در آهنگ تابش‌های بالا در واحد سطح نیز مورد استفاده قرار گیرند. آشکارساز جم^۳، در سال ۱۹۹۷، به‌عنوان یک آشکارساز تابش توسط ساولی^۴ معرفی شد که دارای بهره‌های بالاتری نسبت به انواع آشکارسازهای مقیاس ریز می‌باشد [۶، ۹، ۸، ۷]. در واقع جم، یک صفحه نازک پلیمری مملو از حفره‌هایی به قطر تقریبی $d = 70 - 90 \mu\text{m}$ و ضخامت $t = 50 \mu\text{m}$ است، که به‌صورت شیمیایی دو طرف آن از فلزی مانند مس به ضخامت تقریبی $5 \mu\text{m}$ پوشانده شده است. در صفحه جم، گام حفره‌ها، P (فاصله مرکز تا مرکز دو حفره مجاور) در حدود $140 \mu\text{m}$ می‌باشد، (شکل ۱) [۱۰، ۱۱].



شکل (۱): (الف) نمایش میکروسکوپی صفحه و حفره‌های جم [۱۱] و

(ب) مشخصه هندسی صفحه جم به همراه حفره‌های آن [۱۰].

¹ Photolithography

² Selective etching

³ Gas Electron Multiplier (GEM)

⁴ Sauli

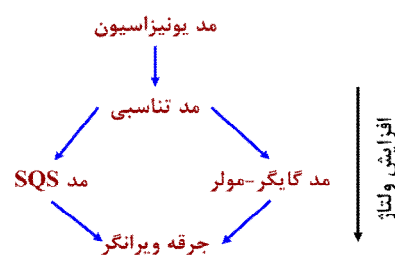
⁵ Thick Gas Electron Multiplier (THGEM)

⁶ Self-Quenched Streamer (SQS)

مثال، در مورد اشعه ایکس به صورت یک منبع رادیواکتیو ^{55}Fe (هرفوتون تولید $n_0=220$ الکترون اولیه می‌کند)، بهره آستانه مورد نیاز 10^4 خواهد بود و در مورد ذرات آلفا (با $n_0=10^5$ الکترون اولیه)، این بهره تقریباً به کم‌تر از 10^2 خواهد رسید [۵].

در این تحقیق، جهت آشکارسازی اشعه آلفا، اقدام به طراحی، شبیه سازی و ساخت سه نمونه آشکارساز گازی مقیاس ریز، THGEM، گردیده است. تغییر ولتاژ اعمالی به آشکارسازهای فوق، که با گاز P10 (ترکیبی از ۹۰٪ گاز آرگون و ۱۰٪ گاز متان) پر شده‌اند، باعث کارکرد هر یک از آنها به صورت جداگانه، در ضرایب تکثیر متفاوت، در ناحیه تناسبی شده است. بسته به تعداد الکترون‌های اولیه وارد شده به هر حفره جم، آن حفره در ولتاژ آستانه خاصی، و یا بهره خاصی، با برآورده کردن حد ریدر و ورود به ناحیه SQS، به صورت یک ستون نور مرئی در خواهد آمد. رؤیت نور در حفره‌هایی که دارای الکترون ورودی کم‌تری هستند، در ولتاژهای بالاتری امکان‌پذیر خواهد بود و بالعکس، که هدف از این کار استفاده از مزیت فیزیکی حفره‌ها (ریز بودن) در تفکیک ستون‌های نوری پدیدار شده جهت داشتن تصویری با وضوح بیش‌تر از پرتو ورودی است. همچنین از آن‌جا که میزان بزرگی ستون نور علاوه بر ولتاژ اعمالی به میزان الکترون اولیه، n_0 ، بستگی دارد [۱۳]، در یک ولتاژ برابر، حفره‌هایی که الکترون بیش‌تری به آنها وارد شده، درخشان‌تر خواهند شد. وضوح مکانی تصویر در ازای ستون‌های نور مشاهده شده (تصویر بی‌واسطه پرتوهای آلفا)، بسته به ابعاد هندسی آشکارساز مقیاس ریز مورد بررسی، کم‌تر از میلی‌متر می‌باشد، که هدف از این کار استفاده از توانایی فیزیکی حفره‌ها در تفکیک ستون‌های نوری پدیدار شده، جهت داشتن تصویری بی‌واسطه از پرتو ورودی است.

موقعیت، استفاده می‌شده است. همان‌طور که از شکل ۲ دیده می‌شود، این نمونه از آشکارسازها، زمانی که در مد تناسبی کار می‌کنند، با بالا رفتن ولتاژ به جای این که بعد از ناحیه تناسبی وارد ناحیه گایگر-مولر شوند، وارد ناحیه SQS خواهند شد [۱۴و۱۳].



شکل (۲): نمایشی از موقعیت مد SQS در آشکارسازهای گازی [۱۴].

حالت دیگر راهیابی به ناحیه SQS در این آشکارسازها زمانی رخ می‌دهد که در حین کارکرد آشکارساز فوق در مد تناسبی، میزان بار تولیدی ناشی از تکثیر الکترون‌های اولیه، Q ، از حد ریدر^۱ (طبق معادله ۱) تجاوز نماید [۵]:

$$Q = A_{th} n_0 - 10^6 - 10^7 \text{ electrons} \quad (1)$$

که در آن A_{th} آستانه بهره مورد نیاز و n_0 تعداد الکترون‌های اولیه تولید شده توسط تابش، در حجم گاز فعال آشکارساز، است. مقدار دقیق Q به عوامل مختلفی بستگی دارد، که از مهم‌ترین آنها می‌توان هندسه و چگالی ابرالکترونی اولیه [۱۵]، هندسه آشکارساز و پخش الکترون-یون در گاز مورد استفاده و همچنین شکل میدان الکتریکی موجود را نام برد [۱۶]. همان‌طور که از معادله ۱ می‌توان دید، جهت برآورده کردن حد ریدر و ورود به ناحیه SQS زمانی که تنها یک الکترون منفرد ($n_0=1$)، وجود داشته باشد، بهره آستانه A_{th} باید به اندازه 10^6 باشد. با این حال، در مورد اشعه با $n_0 \gg 1$ ، جهت ورود به ناحیه SQS، بهره کم‌تری لازم خواهد بود. به‌عنوان

^۱ Raether limit

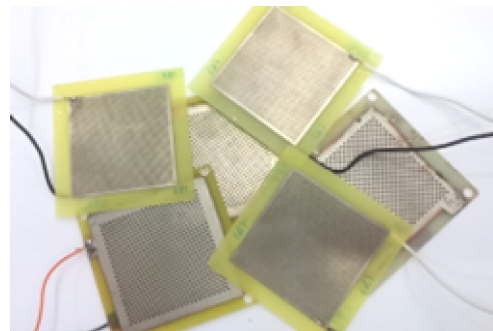
۲. طراحی و ساخت آشکارساز

در این‌جا، از روش فتولیتوگرافی برای ساخت صفحات THGEM استفاده شده است. روش فیلم دوتایی^۴ (الگوی دوتایی) یک روش استاندارد برای تولید صفحات است. در این روش یک لایه کپتون از جنس اپاکسی FR4 با ضخامت‌های چند دهم میلی‌متر که با پوششی از مس به ضخامت $35 \mu\text{m}$ دو طرف آن پوشانده شده است (جدول ۱)، بین دو فیلم یکسان قرار داده شد. الگوی حفره‌ها با استفاده از نرم افزار مورد نظر، در اختیار دستگاه تراش CNC قرار گرفته تا نقش حفره‌ها روی کپتون ایجاد شود. لازم به ذکر است که نقش حفره‌ها، یا به عبارتی الگوی حفره‌ها، از هر دو طرف کپتون یا همان اپاکسی FR4، مته‌کاری می‌شود، به‌همین دلیل مهم‌ترین قسمت این روش یکسان بودن هر دو فیلم تهیه شده، است تا از کاهش بهره و انباشت بار در حفره‌ها جلوگیری شود [۱۷]. در نهایت، به روش کاملاً شیمیایی مس در لبه‌های صفحه و همچنین لبه حفره‌ها با ابعاد مطلوب (همان‌طور که در جدول ۱ نیز مشاهده می‌شود) کنده‌کاری و حذف می‌گردد و به این ترتیب از صفحه THGEM در برابر ولتاژهای بالا و اثر جرقه‌زنی هرچه بیش‌تر محافظت خواهد شد.

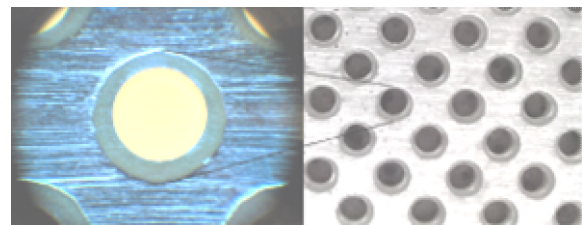
۱.۲. چیدمان سیستم آزمایشگاهی

شکل ۵ قسمت (الف) نمایی از محفظه آشکارساز ساخته شده را نشان می‌دهد. این محفظه شامل چشمه رادیواکتیو، شیرهای ورودی و خروجی گاز P10 و پایه‌های شیاردار با فاصله‌های مشخص جهت نگهداری و حفظ فاصله دقیق بین الکترودهای مختلف آشکارساز می‌باشد (شکل ۵ قسمت ب و ج). گاز P10 باعث می‌شود که آشکارساز بتواند هنگامی که در ناحیه تناسبی کار می‌کند در صورت برآورد شدن شرط ریدر وارد مد SQS شود.

در طراحی و ساخت آشکارساز مورد نظر، برای ایجاد محیط تکثیرگر گازی از صفحات THGEM، استفاده شد. صفحات THGEM مورد نظر، دارای لایه‌هایی فلزی از جنس مس به ضخامت $35 \mu\text{m}$ بوده و دی‌الکتریک میانی، یا به عبارتی کپتون^۱، از جنس اپاکسی FR4^۲ می‌باشد. برای بررسی حالات گوناگون، قطر حفره‌ها از بازه $0.3-0.5 \text{ mm}$ ، گام آن‌ها از بازه $1-0.7 \text{ mm}$ و ضخامت لایه دی‌الکتریک از بازه $0.8-0.4 \text{ mm}$ انتخاب می‌شود (جدول ۱). در شکل ۳، تصویر تعدادی از صفحات آورده شده است. جهت پایداری بهتر آشکارساز در ولتاژهای بالا، فلز مس از لبه حفره‌ها، به ضخامت 0.1 mm برداشته شده که به آن لبه حذف شده^۳ مس گفته می‌شود. شکل ۴ تصویر بزرگ‌نمایی شده لبه حذف شده مس، مربوط به یکی از صفحات را نشان می‌دهد.



شکل (۳): تعدادی از صفحات THGEM ساخته شده با حفره‌هایی با قطر و گام‌های مختلف.



شکل (۴): تصویر بزرگ‌نمایی شده لبه حذف شده مس به ضخامت 0.1 mm در لبه حفره‌ها.

^۱ Kapton

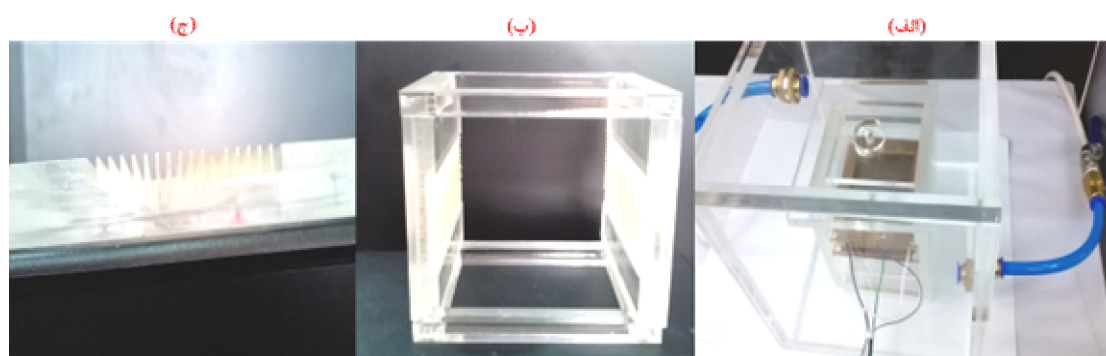
^۲ FR4 Epoxy

^۳ Rim

^۴ Double mask.

جدول (۱): پارامترهای هندسی صفحات THGEM ساخته شده.

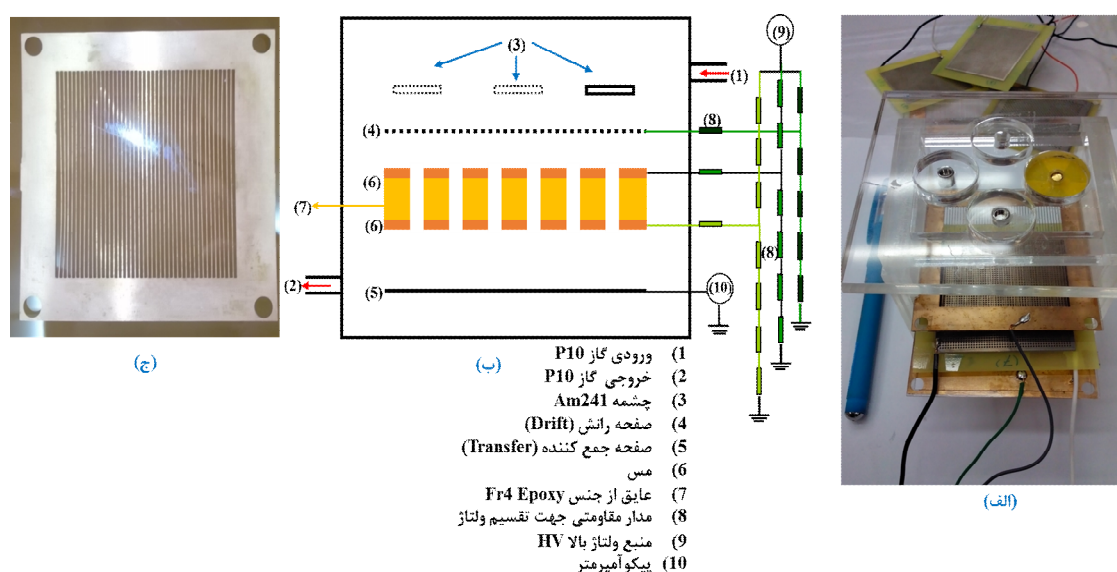
شماره صفحه THGEM#	ضخامت صفحه t(mm)	قطر حفره‌ها d(mm)	قطر لبه حذف شده مس (mm)	گام حفره‌ها a(mm)
۱	۰/۴	۰/۵	۰/۷	۱
۲	۰/۸	۰/۵	۰/۷	۱
۳	۰/۴	۰/۳	۰/۵	۰/۷



شکل (۵): (الف) محفظه بیرونی آشکارساز ساخته شده، (ب) پایه شیاردار جهت نگهداری و حفظ فاصله الکترودها و (ج) تصویر بزرگ‌نمایی شده شیارهای ۱/۵ mm که به فاصله ۰/۵ mm از یکدیگر تعبیه شده‌اند.

باعث حرکت الکترون‌ها در راستای میدان بین دو الکترودها می‌شود. جهت رانش بهتر الکترون‌ها، می‌توان از یک صفحه رانش، که به طور جداگانه به منبع تغذیه ولتاژ بالا DC متصل می‌باشد، استفاده نمود (شکل ۶ قسمت ج).

همان‌طور که در شکل ۶ قسمت (الف) و (ب) نشان داده شده است، الکترودهای THGEM، صفحات مسی THGEM، به منبع تغذیه ولتاژ بالا DC وصل می‌شوند. هنگام اعمال ولتاژ، هر کدام از حفره‌های THGEM شبیه یک دوقطبی الکتریکی رفتار می‌کند. میدان الکتریکی کانونی هر کدام از این دوقطبی‌ها



شکل (۶): (الف) تصویر، (ب) طرح آشکارساز ساخته شده و (ج) عکس صفحه مشبک ساخته شده، الکترودها ناحیه رانش.

در آزمایش شماره ۱، با وجود گاز و بدون حضور چشمه آلفا، ولتاژ اعمالی به الکترودهای THGEM را افزایش داده، تا جایی که بین الکترودها جرقه مشاهده شود. این امر به منزله یافتن حداکثر ولتاژ قابل تحمل، می‌باشد.

در آزمایش شماره ۲، با وجود گاز و حضور چشمه اقدام به افزایش ولتاژ شد، تا جایی که آشکارساز وارد مد SQS گردید و ستون نور پدیدار شد.

در آزمایش شماره ۳، مجدداً آزمونی شبیه به آزمایش شماره ۲، با حضور چشمه و در هوای معمولی، تکرار شد. بعضی از نتایج مربوط به هر کدام از این سه آزمایش، برای هریک از THGEM های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب و به صورت جداگانه، در شکل ۷، نشان داده شده است.

شکل ۸، عکس گرفته شده از ستون نور حاصل از آزمایش شماره ۲، برای THGEM^۳، را نشان می‌دهد. این ستون نور دقیقاً در مقابل چشمه برای تمامی THGEM های مورد آزمایش مشاهده شد. لازم به ذکر است که، این ستون نور در آزمایش های شماره ۱ و ۳ مشاهده نگردید.

در این دو حالت ولتاژ تا جرقه زدن بین الکترودهای THGEM بالا رفت که، در این حالت منبع ولتاژ بر اثر جریان زیاد به صورت خودکار قطع گردید. نکته مهم این است که، با جابه جایی چشمه در مکان های از پیش تعبیه شده (شکل ۶)، محل تشکیل ستون نور جابه جا گردید.

در آشکارسازهای نوع THGEM^۱، THGEM^۲ و THGEM^۳ به ترتیب ستون های نور در ولتاژهای ۸۶۴/۳۳، ۱۲۶۸/۶۸ و ۹۲۱/۹۵ ولت، در حضور گاز و چشمه پدیدار گردیده است.

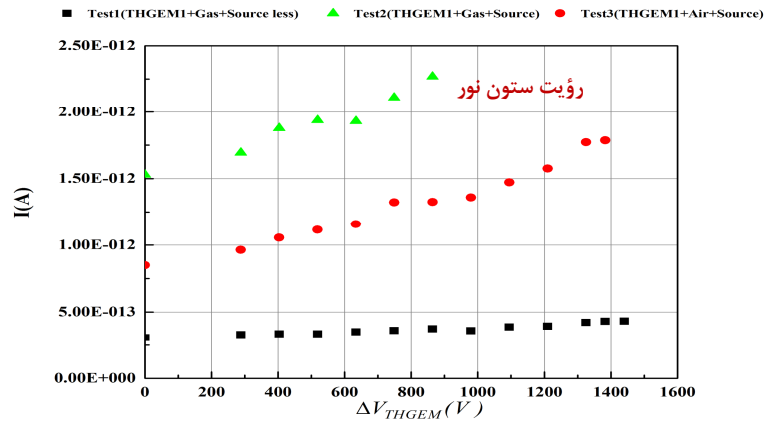
ولتاژ اعمالی به صفحات مختلف آشکارساز اعم از صفحه مشبک رانش، صفحات THGEM و صفحه جمع کننده، به گونه ای است که الکترون های اولیه و الکترون های تکثیری، با توجه به جهت میدان ناشی از ولتاژ اعمالی، به سمت صفحه جمع کننده، رانده و اندازه گیری می شوند.

الکترون های اولیه به علت یونسازی اشعه ورودی در ناحیه رانش به وجود می آیند. تعداد الکترون های اولیه به انرژی اشعه ورودی و انرژی یونیزاسیون گاز مورد استفاده، بستگی دارد.

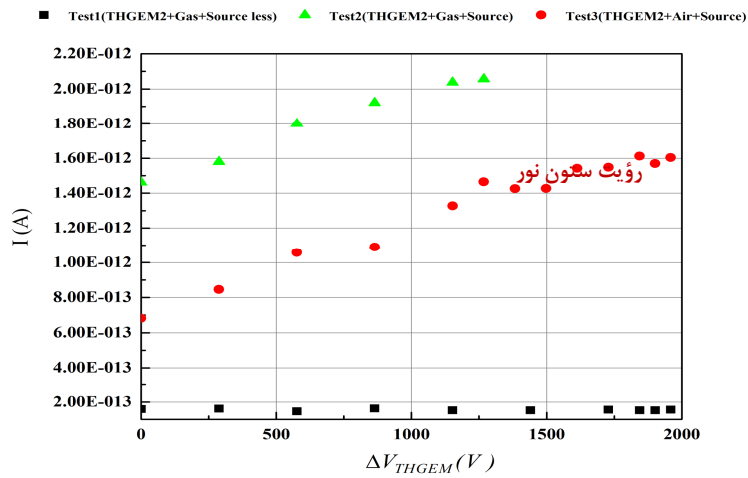
این الکترون ها توسط میدان الکتریکی به درون حفره ها رانده شده و به شرط این که آشکارساز در ناحیه تناسبی باشد در آن جا تکثیر می گردند، و هر وقت که شرط ریدر برآورد گشت وارد مد SQS شده، که در این صورت آن حفره به صورت یک ستون نور مرئی دیده می شود. این امر منجر به تولید نور مرئی در مقابل محل اشعه یا چشمه رادیواکتیو خواهد شد. شدت این روشنایی بستگی مستقیم به انرژی پرتو ورودی و ضریب تکثیر آشکارساز دارد [۱۳]. تعداد حفره های روشن شده بستگی به گستره مکانی یونسازی در جهت عمود بر میدان الکتریکی خواهد داشت. بنابراین بسته به ابعاد حفره های ایجاد شده روی صفحات THGEM و گام بین حفره ها با یک تفکیک مکانی کم تر از میلی متر، می توان محل نسبتاً دقیق پرتوهای رادیواکتیو وارد شده در جهت میدان الکتریکی را مشخص نمود. همان طور که از شکل ۶ دیده می - شود، در طراحی آشکارساز، با جابه جایی چشمه ²⁴¹Am، مکان ستون های نور، تغییر خواهد کرد.

۳. نتایج آزمایشگاهی

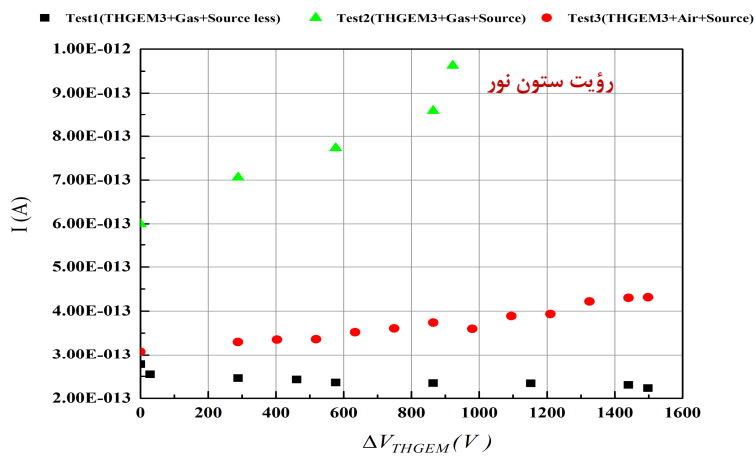
برای هریک از THGEM های ساخته شده سه آزمایش مختلف صورت پذیرفت.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۷): نتایج آزمایش‌های ۱، ۲، ۳ برای (الف) THGEM_۱، (ب) THGEM_۲ و (ج) THGEM_۳.



شکل (۸): عکس گرفته شده از ستون نور مقابل چشمه آلفا.

۴. بررسی و تحلیل نتایج

همان‌گونه که در شکل ۷ می‌توان دید، میزان ثابت شدت جریان خروجی در هر سه THGEM، آزمایش شماره ۱ در حقیقت میزان جریان بی‌اس و یا صفر سیستم می‌باشد که با افزایش ولتاژ نیز تغییری نمی‌کند. در آزمایش شماره ۳، هر سه THGEM رفتاری تقریباً مشابه از خود نشان می‌دهند، به طوری که با افزایش ولتاژ، میزان جریان افزایش می‌یابد که این می‌تواند ناشی از افزایش عبور الکترون‌های اولیه تولید شده در ناحیه رانش، با افزایش میدان الکتریکی اعمالی باشد. بدیهی است در این حالت هیچ تکثیری رخ نداده است. ولتاژ قابل تحمل آشکارساز در این آزمایش همانند آزمایش شماره ۱ می‌باشد. اما در آزمایش شماره ۲، در ابتدا همانند آزمایش ۳، با افزایش ولتاژ ورودی، افزایش نه چندان زیاد جریان اندازه‌گیری، مشاهده می‌شود.

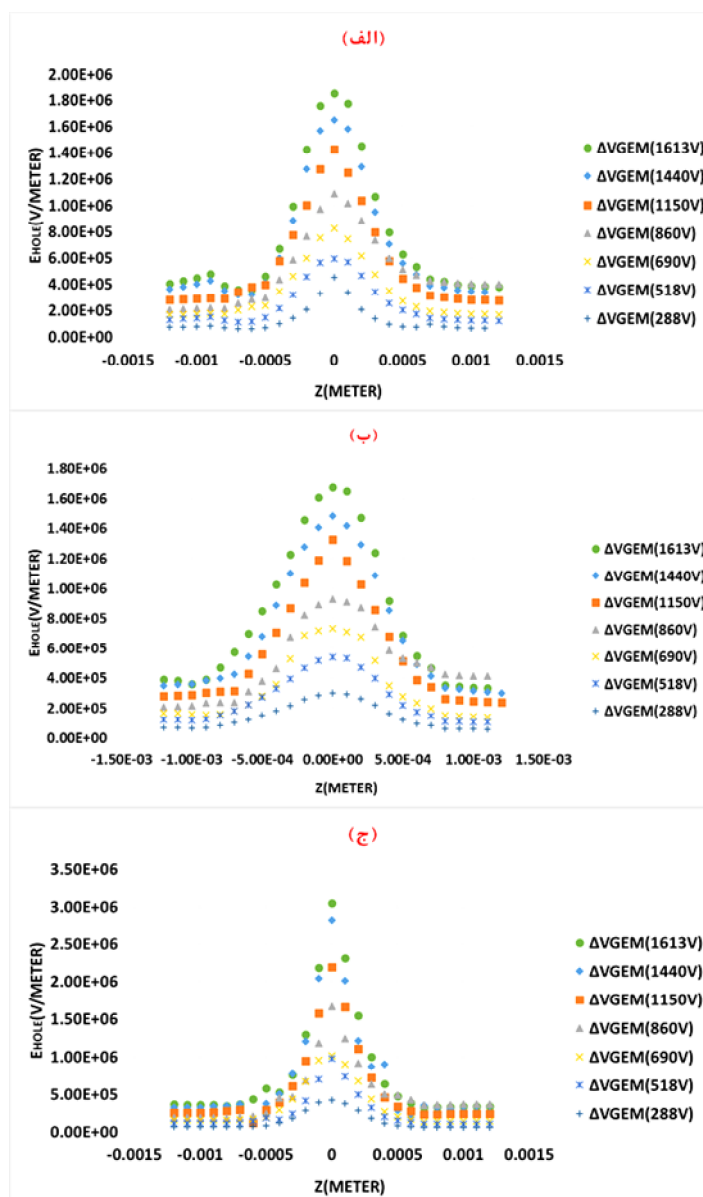
اما بر خلاف آزمایش ۳، با افزایش ولتاژ اعمالی نهایتاً در یک ولتاژ خاص، که خیلی کم‌تر از ولتاژ قابل تحمل توسط آشکارساز است، ستون نور مشاهده شد.

این امر، بدان معنا است، که آشکارساز وارد مد SQS شده است و از آنجا که طبق آزمایش شماره ۱، در غیاب چشمه، در این ولتاژ، وارد مد SQS نشده بود، می‌توان نتیجه گرفت که این آشکارساز زمانی که در مد تناسبی کار کرده است، با برآورد کردن شرط ریدر، وارد مد SQS شده است. برای اطمینان بیشتر از صحت این مطلب، از آنجا که حداقل شدت میدان الکتریکی لازم جهت تکثیر 10^6 V/m است، اقدام به برآورد میزان شدت میدان الکتریکی درون این آشکارسازها، با استفاده از نرم‌افزار ماکسول، گردید. در این نرم‌افزار با دانستن هندسه و جنس محیط و همچنین ولتاژ اعمالی، می‌توان شدت میدان را در مکان‌های مختلف به دست آورد [۱۸]. در شکل ۹ منحنی‌های تغییرات شدت میدان الکتریکی در راستای حرکت

الکترون‌ها یا عمق حفره‌ها (راستای Z)، به ازای ولتاژهای مختلف اعمالی به الکترون‌های THGEM‌های ۱ و ۲ و ۳ آورده شده است. این منحنی‌ها نشان می‌دهند که قبل از پدیدار شدن ستون نور شدت میدان به بیش از اندازه 10^6 V/m، حد آستانه شدت میدان جهت تکثیر، رسیده است، یعنی شرط لازم جهت ورود به ناحیه SQS را داشته است.

از طرف دیگر، از آنجا که چشمه به کار برده شده، چشمه‌ای آلفا می‌باشد و تعداد الکترون-یون‌های تولید شده ناشی از هر واپاشی آلفا برابر با $(\omega=20)$ $n_0 = (E=5/4 \text{ MeV})$ که در آن ω متوسط انرژی لازم برای تولید یک زوج یون در گاز و E انرژی ذره آلفای چشمه ^{241}Am ، $5/4 \text{ MeV}$ می‌باشد. یعنی در بهترین حالت که تمام این الکترون‌ها، $10^5 \times 2/7$ وارد یک حفره گردند، میزان تکثیر (طبق فرمول ۱) باید بیش از حدود ۴۰ باشد تا شرط ریدر برآورد گردیده و ستون نور پدیدار گشته باشد. به دلایل مختلف (حرکت ذره آلفا در جهت عمود میدان الکتریکی، بازترکیب الکترون - یون و...) تعداد الکترون‌های ورودی به یک حفره خیلی کم‌تر از این مقدار است در نتیجه ضریب تکثیر باید خیلی بیش‌تر از این مقدار باشد. از آنجا که در عمل در آشکارسازهای THGEM ضریب بهره 10^5 دست یافتنی است، در نتیجه برای حفره‌هایی که تعداد الکترون‌های ورودی ۱۰۰ هم باشد، زمانی که با بالابردن ولتاژ، این ضریب تکثیر به دست آید، در آن حفره نیز، ستون نور پدیدار می‌گردد. همچنین از نتایج آزمایشات مشاهده می‌شود که هر چه ابعاد هندسی حفره‌ها کوچک‌تر باشد، ستون‌های نور متمرکزتر و جایگزیده‌تر، نسبت به چشمه آلفا، خواهند بود. بهترین تفکیک مکانی در این آزمایشات مربوط به THGEM^۳ می‌باشد، که دارای تعداد $3/53$ ستون نور بر mm^2 است. از طرف دیگر، همان‌گونه که در نتایج شبیه‌سازی نشان داده شد، هر چه ضخامت آشکارساز کوچک‌تر باشد، در ولتاژهای پایین‌تری می‌توان به ناحیه تناسبی

و در نتیجه رؤیت ستون نور، دست یافت که این امر در عمل نیز با مقایسه نتایج آزمایشات THGEM^۱ و THGEM^۲ که کاملاً مشابه می‌باشند، و تنها ضخامت‌های مختلف دارند، مشاهده شده است (شکل ۷).



شکل (۹): نتایج نرم‌افزار ماکسول برای تغییرات میدان الکتریکی در راستای Z در وسط یک حفره در ولتاژهای اعمالی مختلف (الف) THGEM^۱، (ب) THGEM^۲ و (ج) THGEM^۳. مبدأ در مرکز حفره و جهت مثبت محور رو به سمت ناحیه رانش می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

ساخت. در این تحقیق نشان داده شد که، آشکارسازهای گازی مقیاس ریز، که در سال‌های اخیر معرفی گردیده‌اند، به‌علت شکل هندسی خود، با این محدودیت روبرو نیستند. این آشکارسازها گسترش مکانی ستون‌های نور ایجاد شده را در جهت عمود بر خطوط میدان الکتریکی فقط در پهنای داخلی حفره خواهند داشت.

استفاده از مد SQS از چند دهه قبل، جهت تعیین موقیت مکانی پرتو ورودی با استفاده از آشکارسازهای گازی تناسبی چند سیمی، پیشنهاد گردید. اما محدودیت در کنترل گسترش مکانی ستون نور، در جهت عمود بر خطوط میدان الکتریکی، تعیین محل فرود اشعه را با عدم دقت چندین میلی‌متری روبرو

- (۱) تعیین موقعیت مکانی و تعیین شدت اشعه UV با لایه نشانی CsI روی صفحه بالایی THGEM.
- (۲) تعیین موقعیت مکانی و شدت پرتو نوترون (حرارتی) با لایه نشانی بور روی صفحه بالایی THGEM.
- (۳) تعیین موقعیت مکانی و شدت اشعه ایکس و مورد استفاده قرار گیرد.

در نتیجه تعیین دقت مکانی در این آشکارسازها، بستگی به ابعاد هندسی و طول گام حفره‌های صفحات جم ضخیم دارد. یعنی تعیین دقت مکانی اشعه ورودی در این آشکارسازها، می‌تواند کم‌تر از میلی‌متر باشد.

با این توصیف پیشنهاد می‌گردد این روش آشکارسازی، در موارد متعددی از جمله:

۶. مراجع

- [1] A.P. Jeavons, G. Charpak, R.J. Stubbs. The high-density multiwire drift chamber. *Nuclear Instruments and Methods* 124. 2 (1975) 491–503.
- [2] G. Charpak, D. Rahm, H. Steiner. Some developments in the operation of multiwire proportional chambers. *Nuclear Instruments and Methods* 80.1 (1970) 13–34.
- [3] G. Agocs, B. Clark, P. Martinego, R. Oliveira, V. Peskov, P. Pietropaolo, P. Picchi. Developments and the preliminary tests of resistive GEMs manufactured by a screen printing technology. *Journal of Instrumentation* 3. 02 (2008) P02012.
- [4] Y. Bilevych, V.B. Carballo, M. Chefdeville, P. Colas, E. Delagnes, M. Fransen, H. Van Der Graaf, W.J.C. Koppert, J. Melai, C. Salm, J. Schmitz. Spark protection layers for CMOS pixel anode chips in MPGDs. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 629.1 (2011) 66–73.
- [5] V. Peskov, P. Fonte. Research on discharges in micropattern and small gap gaseous detectors. *arXiv preprint arXiv:0911.0463* (2009).
- [6] M. PoliLener. Triple-GEM detectors for the innermost region of the muon apparatus at the LHCb experiment. PhD Thesis, Università degli Studi di Roma. Tor Vergata (2005).
- [7] F. Simon. Commissioning of the GEM Detectors in the COMPASS Experiment. Doctoral dissertation. Diploma thesis. TU Munchen (2001).
- [8] F. Murtas. Development of a gaseous detector based on Gas Electron Multiplier (GEM) Technology. Talk presented at the LNF (INFN). Frascati 28 (2002).
- [9] L. Ropelewski. Gas Micropattern Detectors for Tracking. Talk at the “Workshop on Tracking In high Multiplicity Environments”. Universität at Zurich, 6 October (2005).
- [10] T. Huber. Ion Backflow studies with a Triple GEM detector. Diss. Master’s thesis. Technische Universität München. Physik Department (2007) cited in 8 (2007).
- [11] F. Sauli. Development and applications of gas electron multiplier detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 505.1 (2003) 195–198.
- [12] G.F. Knoll. Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons Press, (2010).
- [13] A. Ji-Gang, K.J. Anderson, F.S. Merritt, M. Oreglia, J.E. Pilcher, A. Possoz, W. Schappert. A study of the self-quenched streamer mode using a nitrogen laser. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 267, no. 2-3 (1988) 396–407.
- [14] G.D. Alekseev, N.A. Kalinina, V.V. Karpukhin, D.M. Khazins, V.V. Kruglov. Investigation of self-quenching streamer discharge in a wire chamber. *Nuclear Instruments and Methods* 177.2-3 (1980) 385–397.
- [15] V. Peskov, P. Fonte, M. Danielsson, C. Iacobaeus, J. Ostling, M. Wallmark. The study and optimization of new micropattern gaseous detectors for high-rate applications. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 48.4 (2001) 1070–1074.
- [16] P. Fonte, V. Peskov, B.D. Ramsey. A study of breakdown limits in microstrip gas counters with preamplification structures. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 416.1 (1998) 23–31.
- [17] M. Villa, S.D. Pinto, M. Alfonsi, I. Brock, G. Croci, E. David, R. De Oliveira, L. Ropelewski, H. Taureg, M. van Stenis. Progress on large area GEMs. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 628.1 (2011) 182–186.
- [18] Y. Zhao. A novel fast remesh-free finite element method for optimal design of electric machines. Doctoral dissertation, The Hong Kong Polytechnic University (2015).