

## بررسی پدیده پلیمریزاسیون در آشکارساز تکثیرگر الکترون گازی ضخیم در حالت ستون نوری خود فرو نشان

محمد مهدی ابراهیمی بشلی\*، علی نگارستانی، محمد جواد خدائشناس و امین رضا محمودی

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، کد پستی: ۷۶۳۱۸۸۵۳۵۶.

پست الکترونیکی: mohamadmahdi.eb@gmail.com

### چکیده

یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های آشکارسازهای گازی پدیده پلیمریزاسیون است این عامل می‌تواند عملکرد آشکارساز را به‌طور کلی مختل کند. وقوع این پدیده در آشکارسازهای سیمی مشاهده و اثبات شده است. در این مقاله، پدیده پلیمریزاسیون روی آشکارسازهای تکثیرگر الکترون گازی ضخیم (THGEM) در حالت جریان‌های خود خاموش شونده (SQS) با استفاده از منبع گامای  $^{137}\text{Cs}$  با فعالیت  $3.95 \mu\text{Ci}$  بررسی شده است. در حضور مقدار تقریبی (۱۰٪) گاز هیدروکربنی مانند متان، که به‌عنوان فرو نشان در ترکیب گاز  $\text{P}10$  استفاده می‌شود، مشاهده می‌شود که پس از سه روز که آشکارساز به‌طور متوسط سه تا چهار ساعت در روز مورد استفاده قرار می‌گیرد. تغییرات ناگهانی در سرعت شمارش و همچنین جرقه‌های الکتریکی دیده می‌شود. با توجه به تصاویر و مشاهدات، اثرات مضر پلیمریزاسیون گاز هیدروکربن که از عوامل اصلی این پدیده است در آشکارسازهای THGEM به اثبات رسیده و پیشنهادهایی برای بهبود و افزایش طول عمر سیستم ارائه شده است.

کلیدواژه‌گان: آشکارساز تکثیرگر الکترون گازی ضخیم، مد ستون نوری خود فرو نشان، پلیمریزاسیون، یونیزاسیون، گاز فرو نشان.

### ۱. مقدمه

آشکارسازی ذرات یکی از زمینه‌های مهم و پرکاربرد در رشته‌های علوم و مهندسی هسته‌ای به‌شمار می‌رود. از کاربردهای آن می‌توان به بررسی نشتی لوله‌های انتقال گاز، ضخامت سنجی، زمین‌شناسی هسته‌ای، سطح سنجی، بررسی

پرتوهای کیهانی و پزشکی هسته‌ای اشاره کرد یکی از آشکارسازهای پرکاربرد در زمینه آشکارسازی پرتوها آشکارساز تکثیرگر الکترون گازی ضخیم<sup>۱</sup> است. آشکارسازهای گازی در مدهای مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند که یکی از مدهای

<sup>1</sup> THGEM (Thick Gas Electron Multiplier)

### ۲.۱. مد ستون نوری خود فرو نشان

یکی از مدهای عملکردی آشکارسازها مد ستون نوری خود فرو نشان است. با استفاده از سیم‌های آند ضخیم و کارکرد آن‌ها در مخلوط‌های گازی دارای هیدروکربن، ظهور ناگهانی سیگنال‌های بسیار بزرگ در آشکارسازهای چند سیمی مشاهده شد، ظهور سیگنال‌های بزرگ در ابتدا به انتقال به تخلیه گایگر نسبت داده می‌شد که به دلیل اثر فرونشانی مخلوط گاز مورد استفاده گسترش آن در طول سیم دارای محدودیت نیز بود [۴]. با این حال، تحقیقات بیش‌تر منجر به درک این موضوع شد که این سیگنال‌های بزرگ دارای حالت خاصی از تخلیه هستند، که عمود بر سیم‌ها منتشر می‌شوند و قبل از رسیدن به کاتد میرا می‌شوند. این فرآیند به نام ستون نوری خود فرو نشان نام‌گذاری شد [۵]. بررسی مد ستون نوری خود فرو نشان و طراحی آشکارساز با این مد عملیاتی برای آشکارسازهای تکثیرگر الکترون گازی در کشور خودمان به‌طور گسترده توسط نگارستانی و همکاران مورد تحقیق و پژوهش قرار گرفته است [۶-۸]. از آنجایی که مد ستون نوری خود فرو نشان حالتی بسیار مشابه پلاسما و تخلیه الکتریکی دارد، بسیار مستعد برای ایجاد پلیمر در فرآیند پلیمریزاسیون است.

### ۳.۱. پدیده پلیمریزاسیون

از پلاسما در شیمی برای تولید صنعتی پلیمرها با کمک تخلیه الکتریکی در گازهای هیدروکربنی (گازهای حاوی هیدروکربن‌ها) استفاده می‌شود [۹]. از این‌رو شاید تعجب‌آور نباشد که بهمن‌های تکثیرگر در گازها یا مخلوط‌های هیدروکربنی می‌توانند رسوباتی روی الکترودها ایجاد کنند. به‌عنوان مثال، الکترون با انرژی آستانه ۴.۵ الکترون‌ولت می‌تواند

ساده و پرکاربرد آن مد ستون نوری خود فرو نشان<sup>۱</sup> (SQS) بوده که از مهم‌ترین فواید آن می‌توان به عدم نیاز به سیستم‌های بازخوانی پیچیده اشاره نمود.

### ۱.۱. آشکارساز تکثیرگر الکترون گازی ضخیم

تکثیرگرهای الکترون گازی<sup>۲</sup> که توسط فابو سالی در سال ۱۹۹۷ معرفی شد، یک ورق پلیمری نازک است که از دو طرف با فلز پوشیده شده و با تراکم بالایی از حفره‌ها معمولاً ۵۰ تا ۱۰۰ در هر  $\text{mm}^2$  ایجاد شده است [۱].

اختلاف پتانسیل بالای اعمال شده بین دو الکتروود بالا و پایین سبب ایجاد میدانی با شدت بالا در بین حفره‌ها می‌شود. الکترون‌هایی که در ناحیه بالایی تکثیرگر گازی در اثر عبور پرتو تولید شده‌اند با ورود به این میدان قوی شتاب گرفته و انرژی لازم برای یونیزه کردن گاز را کسب می‌کنند. الکترون‌های تکثیر شده در بهمن، در الکتروود پایینی و یا در صفحه بازخوانی<sup>۳</sup> دیگری جمع‌آوری شده و پاسخ آشکارساز به پرتوی ورودی را شکل می‌دهند.

برای تولید فویل‌های تکثیرگر الکترون گازی از فرآیندهای فوتولیتوگرافی با دقت بالا استفاده می‌شود که امکان ایجاد حفره‌هایی با ابعاد چند ده میکرون را فراهم می‌کند، اما در صفحات تکثیرگر الکترون گازی ضخیم که عملکردی کاملاً مشابه با صفحات تکثیرگری الکترون گازی دارند و تنها تفاوت عمده آن‌ها را می‌توان ابعاد در نظر گرفت روش‌های تولید جایگزین با استفاده از حفاری مکانیکی یا لیزری در ساختارهای ضخیم‌تر، عموماً با گام سوراخ‌های درشت‌تر، برای کاربردهایی که نیاز به دقت مکانی متوسطی دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳،۲].

<sup>1</sup> Self-Quenching Streamers

<sup>2</sup> GEM (Gas Electron multiplier)

<sup>3</sup> Read-out pad

صورت رسانا بودن پلیمر با ایجاد میدان‌های قوی سبب تخلیه الکتریکی و نقص در عملکرد آشکارساز شود.

#### ۲.۴.۱. رسوبات عایق

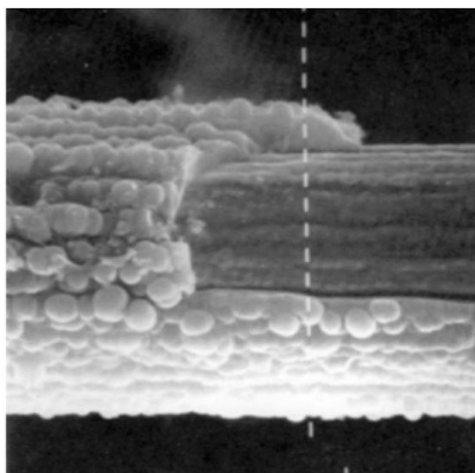
رسوب یک پلیمریزه عایق یا فقط کمی رسانا بر روی آندها با نشست بار روی لایه عایق منجر به ایجاد یک میدان متقابل و در نتیجه کاهش تقویت می‌شود.

#### ۳.۴.۱. تشکیل ساختارهای سیخ‌دار

تشکیل رشته‌ای شکل پلیمر روی آند، به نام بلورهای سوزنی<sup>۱</sup> شکل (۱) منجر به تخلیه نقطه‌ای، از جرقه‌های لحظه‌ای تا جریان‌های کوچک دائمی می‌شود.

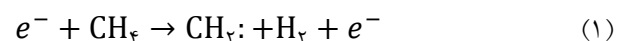


شکل (۱): بلورها و رشته‌های سوزنی روی آند [۱۱].



شکل (۲): توده‌ای از رسوبات روی سیم آند [۱۱].

در اثر برخورد با متان، آن را تجزیه کند. درحالی‌که برای یونیزاسیون متان به انرژی‌های بالاتر از  $12.6 \text{ eV}$  نیاز است. از این‌رو، به‌منظور تشکیل بهممن با یونیزاسیون ثانویه، الکترون‌ها باید از محدوده انرژی آستانه عبور کنند که در آن انرژی تجزیه در متان می‌تواند رخ دهد. در فرآیند تجزیه هیدروکربن‌ها طبق معادله (۱)، رادیکال‌های بسیار واکنش‌پذیر، که مولکول‌های با الکترون‌های ظرفیت غیر پیوندی هستند، تولید می‌شوند. این مولکول‌ها باهم ترکیب می‌شوند تا زنجیره‌های مولکولی را تشکیل دهند و در نتیجه پلیمریزه شده و می‌توانند روی الکترودهای تکثیرگر گازی رسوب کنند. برای مثال، رادیکال  $\text{CH}_2$  با اثر الکترون بر متان با توجه به واکنش زیر تولید می‌شود [۱۰]:



رادیکال‌های آزاد  $\text{CH}_2$  نقطه ورود برای تشکیل پلی‌اتیلن با فرمول ساختاری متشکل از کربن و هیدروژن است که به‌عنوان یک عایق خوب شناخته می‌شود. از آن‌جا که رادیکال  $\text{CH}_2$  به دلیل داشتن الکترون آزاد جفت نشده دارای واکنش‌پذیری بالایی است، ترجیحاً به الکترودهای قطبی که در آن لایه‌های پلیمریزه کننده با تشکیل زنجیره ساخته می‌شوند، متصل می‌شود.

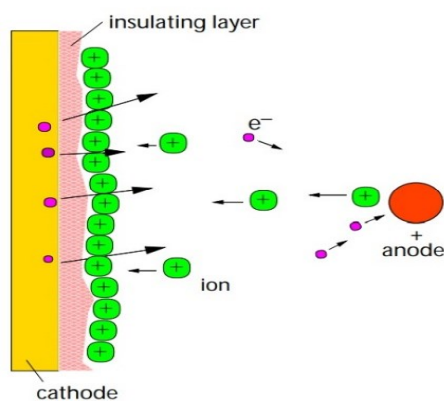
#### ۴.۱. رسوبات روی آند

تصاویر میکروسکوپی از رسوبات روی سیم آند به‌عنوان نمونه در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است.

#### ۱.۴.۱. رسوبات رسانا

رسوب یک پلیمریزه رسانا بر روی آند شکل (۲) منجر به کاهش ناحیه تقویت به دلیل تورم سیم و کاهش فاصله می‌شود. که این امر به‌نوبه خود می‌تواند در فواصل کم بین الکترودها در

<sup>1</sup> Whiskers



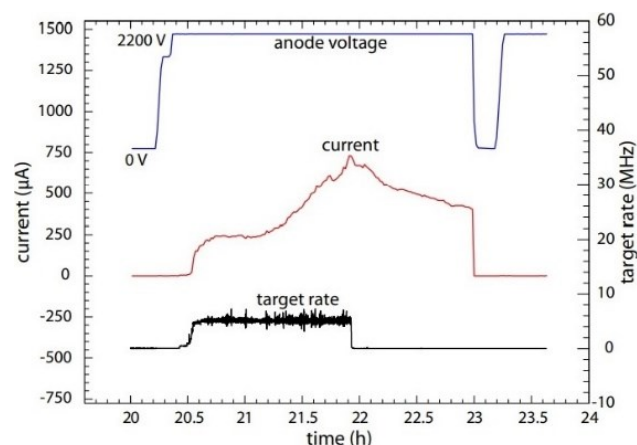
شکل (۴): تصویر شماتیک اثر مالتر [۱۱].

## ۲. روش کار

در روند ساخت و آزمایش آشکارسازهای ذرات با صفحات از تکثیرگر الکترون گازی در مد ستون نوری خود فرو نشان به وسیله تیم آزمایشگاه دانشگاه، افت نسبی پاسخ آشکارساز نسبت به پرتوهای ورودی پس از مدت زمانی مشاهده شد. به همین دلیل مطابق شکل (۸) THGEM معیوب به وسیله میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت و رسوباتی در حفره‌های تکثیرگر گازی مشاهده شد. این نظریه مطرح شد که مشابه آشکارسازهای سیمی احتمال وقوع پدیده پلیمریزاسیون در آشکارسازهای تکثیرگر الکترونی ضخیم نیز وجود دارد. بدین منظور یک سیستم مجزا صرفاً جهت بررسی پدیده پلیمریزاسیون و تأثیرات آن بر کاهش عملکرد آشکارساز گازی تکثیرگر الکترون ضخیم طراحی و ساخته شد. بدین منظور، تعدادی از صفحات آشکارساز تکثیرگر الکترونی گازی ضخیم، یک منبع ولتاژ بالا، یک محفظه بسته برای محیط ایزوله آشکارساز، طراحی مداری برای اعمال میدان در آشکارساز و چشمه آلفای آزمایشگاهی نظیر  $^{137}\text{Cs}$  و گاز پرکننده  $\text{P}10$  با ترکیب ۱۰٪ هیدروکربن متان و ۹۰٪ گاز آرگون مورد استفاده قرار گرفت. ناحیه فعال صفحات تکثیرگر الکترونی ضخیم دارای ابعاد  $\text{cm}^2$   $5 \times 5$  است. این صفحات از یک لایه عایق FR۴ به ضخامت

## ۵.۱. رسوبات روی کاتدها، اثر مالتر<sup>۱</sup>

رسوبات عایق بر روی کاتدها منجر به پدیده‌ای به نام اثر مالتر می‌شود [۱۲] که به صورت شماتیک در شکل (۳) به تصویر کشیده شده است. به دلیل نشست یون‌ها در لایه عایق، میدانی بین این لایه و کاتد ایجاد می‌شود که می‌تواند آن قدر قوی باشد که باعث خروج الکترون‌ها از کاتد شود، این پدیده را گسیل میدان لایه نازک<sup>۲</sup> می‌نامند. تا زمانی که پتانسیل آند از لایه یونی روی کاتد بالاتر باشد، الکترون‌ها می‌توانند از طریق لایه یونی به آند بروند و در آن جا یون‌های بیش‌تری را از طریق تکثیر تولید کنند و در نتیجه یک جریان دائمی، یعنی جریان مالتر تولید خواهد شد [۱۳].



شکل (۳): ویژگی‌های جریان مالتر [۱۴].

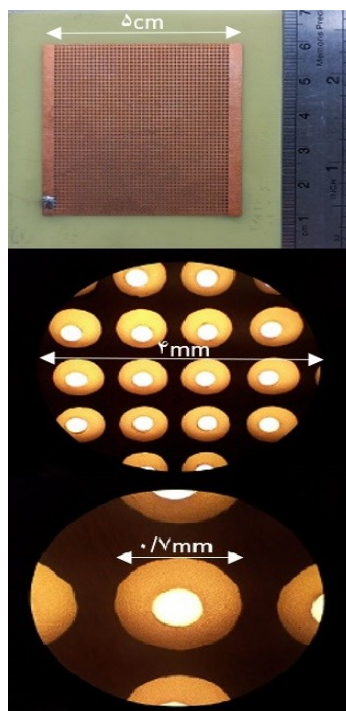
در شکل (۴) رفتار جریان مالتر به تصویر درآمده است. میزان یون‌ها در لایه عایق به وسیله تعادل بین خستگی شدن یون‌ها توسط الکترون‌ها و تقویت الکترون‌ها در آند و ایجاد یون‌های دیگر تعیین می‌شود. افزایش لایه یونی باعث کاهش اختلاف پتانسیل بین لایه یون و آند و در نتیجه کاهش تقویت در آند می‌گردد [۱۴].

<sup>2</sup> Thin film field emission

<sup>1</sup> Malter effect

صفحات بالا و پایین تکثیرگر گازی به بهره‌های بالاتری از شدت میدان رسید. **Error! Reference source not found.** شماتیک این صفحات به همراه بزرگ‌نمایی آن‌ها را نمایش می‌دهد.

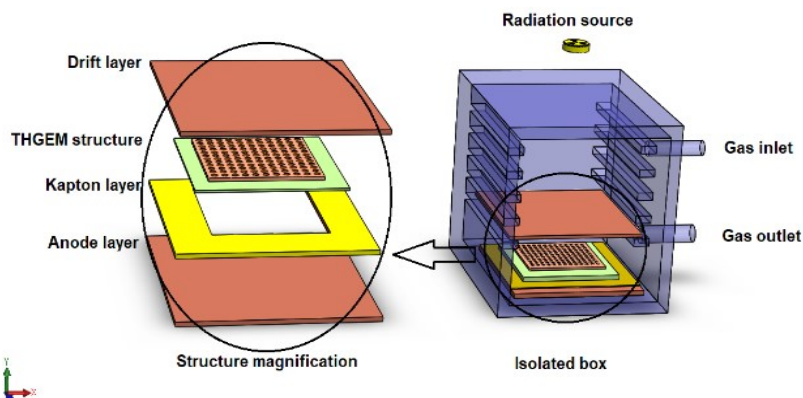
۰.۴ mm تشکیل شده که از دو طرف، لایه نازک از مس به ضخامت ۰.۰۳۵ mm به آن اضافه شده است. سر تا سر این ناحیه فعال با حفره‌هایی به قطر ۰.۴ mm با گام ۱ mm پوشیده شده است که همان‌طور که در **Error! Reference source not found.** مشخص است لبه حفره‌ها به اندازه ۰.۱ mm گرفته شده است تا بتوان بدون تخلیه الکتریکی



شکل (۵): بزرگ‌نمایی میکروسکوپی تکثیرگر الکترون گازی ضخیم.

است و در قسمت بالایی صفحه نیز کاتد به‌عنوان صفحه رانش (Drift) قرار دارد. چشمه نیز در خارج محفظه قرار می‌گیرد. بخش ورودی و خروجی گاز نیز به خوبی در روی شکل مشخص شده است.

برای آزمایش‌ها از سیستم **Error! Reference source not found.** استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید صفحات تکثیرگر الکترونی ضخیم بر روی صفحه آند که به‌عنوان صفحه بازخوانی است با فاصله مشخصی قرار گرفته

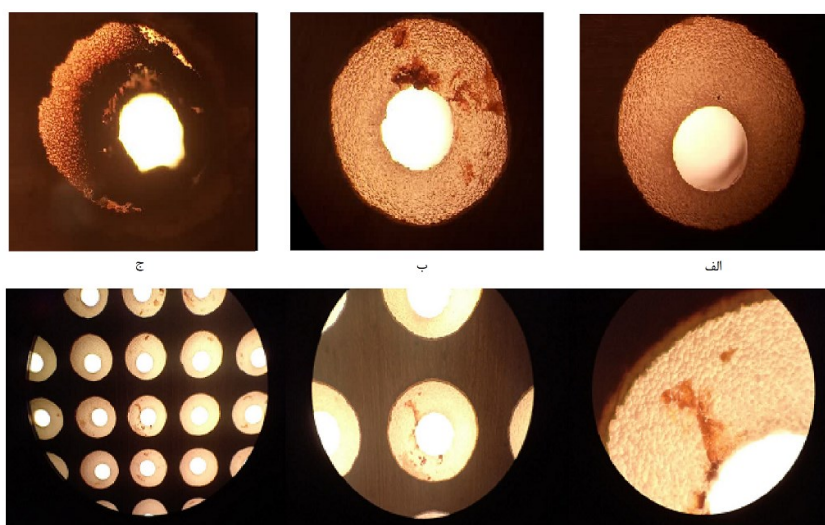


شکل (۶): سیستم طراحی شده برای آشکارساز.

### ۳. نتایج

معیوب شدن آشکارساز می شود نیز رؤیت شده است. همان طور که در شکل (۶) به وضوح مشاهده می شود دقیقاً در محل دیواره حفره های تکثیرگر گازی، رسوبات به صورت توده هایی انباشته شده اند. رسانا بودن رسوبات می تواند باعث اختلال جدی در عملکرد آشکارساز شود.

بعد از گذشت سه روز که به طور متوسط آشکارساز در هر روز ۳ تا ۴ ساعت فعالیت مداوم در مد ستون نوری خود فرو نشان با شدت بالا در فشار گاز ثابت داشته است، مشاهده شد که حساسیت آن در حال ضعیف شدن است، بدین نحو که کاهش وابستگی به چشمه در نرخ شمارش سیستم مشاهده شد که برای افزایش حساسیت با افزایش ولتاژ جرعه الکتریکی که سبب



شکل (۶): نشست رسوبات در فرآیند پلیمریزاسیون در حفره ها: الف) حفره سالم قبل از آزمایش. ب) حفره بعد از انجام آزمایش، ج) تأثیر مخرب تخلیه الکتریکی بر حفره ها د) مراحل بزرگ نمایی به وسیله میکروسکوپ نوری به ترتیب از چپ به راست  $\times 40$ ،  $\times 10$ ،  $\times 4$

### ۴. نتیجه گیری

در این پژوهش اختلال در عملکرد آشکارساز موجب شد که با بررسی های بیشتر و مشاهده صفحات THGEM در زیر میکروسکوپ به این موضوع پی برده شد که فرآیند پلیمریزاسیون مشابه آشکارسازهای سیمی در آشکارسازهای گازی تکثیرگر الکترون ضخیم در حضور گاز هیدروکربن رخ می دهد و اثرات مخرب آن بر این دسته از آشکارسازها به اثبات رسید و همان طور که گفته شد عملکرد صحیح آشکارساز در مد ستون نوری خود فرو نشان در مدت ۳ روز که در هر روز ۳ تا ۴ ساعت با شمارش بالا فعالیت انجام داد در حضور گازهای

همان طور که در شکل (۷) نشان داده شده است، پدیده پلیمریزاسیون بر روی صفحه بازخوانی PCB نیز دقیقاً زیر سوراخ های THGEM که در آن جریان الکترون ها وجود دارد، مشاهده می شود. نقاط سیاه پلیمر هستند.



شکل (۷): اثر پلیمریزاسیون بر روی صفحه مسی آند.

به عنوان مثال پروپانول ( $C_3H_8O_2$ ) و متیلال ( $C_2H_6O_2$ ) نیز می تواند مؤثر واقع شود [۱۱]. که اثرات آن در پژوهش های بعدی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. البته باید متذکر شد که مد SQS از آن جایی که عملکردی بسیار مشابه با پلاسما دارد به نوبه خود تشدید کننده فرآیند پلیمریزاسیون است. در صورتی که از مدهای جایگزین دیگر مانند مد تناسبی استفاده شود نرخ این فرایند به شدت کاهش می یابد. که این خود نیازمند سیستم های بازخوانی پیچیده تر خواهد بود.

هیدروکربن سبب کاهش حساسیت آشکارساز و کاهش نرخ شمارش می شود. از آن جایی که هیدروکربن ها عامل اصلی پلیمریزاسیون به شمار می روند باید تا جای ممکن از استفاده از آن ها پرهیز کرد و از گازهای جایگزین دیگر نظیر  $CO_2$  و یا  $CF_4$  استفاده نمود [۱۵]. اما این گازها نیز به نوبه خود مشکلاتی نظیر عملکرد فرونشانی ضعیف و ایجاد ترکیبات خورنده را به وجود می آورند که باید در تحقیقات دیگری مورد بررسی قرار گیرند. از طرفی افزودن گازهای غیر پلیمریزه کننده نظیر الکل ها،

## ۵. مراجع

1. F. Sauli. GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors. *Nuc. Inst. and Meth. in Phys. Res. Sec. A: Acc., Spec., Det. and Ass. Equip.* 386 (2-3) (1997) 531-534.
2. R. Chechik, A. Breskin, C. Shalem, D. Mörmann. Thick GEM-like hole multipliers: properties and possible applications. *Nuc. Inst. and Meth. in Phys. Res. Sec. A: Acc., Spec., Det. and Ass. Equip.* 535 (1-2) (2004) 303-308.
3. L. Periale, V. Peskov, P. Carlson, T. Francke, P. Pavlopoulos, P. Picchi, F. Pietropaolo. Detection of the primary scintillation light from dense Ar, Kr and Xe with novel photosensitive gaseous detectors. *Nuc. Inst. and Meth. in Phys. Res. Sec. A: Acc., Spec., Det. and Ass. Equip.* 478 (1-2) (2002) 377-383.
4. S. Brehin, A. Berger, G. Marel, G. Tarte, R. Turlay, G. Charpak, F. Sauli. Some observations concerning the construction of proportional chambers with thick sense wires. *Nucl. Instrum. Methods* 123 (2) (1975) 225-229.
5. G. Alekseev, N. Kalinina, V. Karpukhin, D. Khazins, V. Kruglov. Investigation of self-quenching streamer discharge in a wire chamber. *Nucl. Instrum. Methods* 177 (2-3) (1980) 385-397.
6. S. M. Hashemi, A. Negarestani. A new method for alpha particle detection use of Electron multiplier assembly (EMA) in SQS mode. *J. Instrum.* 13 (05) (2018) P05025.
7. R. Souri, A. Negarestani, M. Mahani. A new approach for direct imaging of Alpha radiation by using Micro Pattern Gas Detectors in SQS mode. *Nuc. Inst. and Meth. in Phys. Res. Sec. A: Acc., Spec., Det. and Ass. Equip.* 884 (2018) 128-135.
8. R. Arsia, M. K. Salem, A. Negarestani, A. H. Sari. A new approach to measure radon by Thick Gas Electron Multiplier. *Radiat. Phys. Chem.* 196 (2022) 110114.
9. H. Yasuda. New insights into aging phenomena from plasma chemistry. *Nuc. Inst. and Meth. in Phys. Res. Sec. A: Acc., Spec., Det. and Ass. Equip.* 515 (1-2) (2003) 15-30.
10. J. Va'vra, Physics and chemistry of aging—early developments. *Nuc. Inst. and Meth. in Phys. Res. Sec. A: Acc., Spec., Det. and Ass. Equip.* 515 (1-2) (2003) 1-14.
11. H. Kolanoski, N. Wermes, *Particle Detectors: Fundamentals and Applications*. Oxford University Press, USA, 2020.
12. L. Malter. Thin film field emission. *Phys. Rev.* 50 (1) (1936) 48.
13. A. Schreiner. Aging studies of drift chambers of the HERA-B outer tracker using CF 4-based gases. 2001.
14. H. Albrecht, S. Bauer, M. Beck, A. Belkov, K. Berkhan, G. Bohm, M. Bruinsma, T. Buran, M. Capeans, J. Chamanina. Aging studies for the large honeycomb drift tube system of the Outer Tracker of HERA-B. *Nuc. Inst. and Meth. in Phys. Res. Sec. A: Acc., Spec., Det. and Ass. Equip.* 515 (1-2) (2003) 155-165.
15. M. Titov. Radiation damage and long-term aging in gas detectors. in: Innovative Detectors for Supercolliders. *World Scientific* (2004) 199-226.