بررسی پدیده پلیمریزاسیون در آشکارسازهای تکثیرگر الکترون گازی ضخیم (THGEM) در مد ستون نوری خود فرونشان (SQS)

INC29-1358

محمدمهدی ابراهیمی بشلی*، محمدجواد خداشناس، امین رضا محمودی، علی نگارستانی

گروه مهندسی هسته‌ای ، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کد پستی: ۷۶۳۱۸۸۵۳۵۶ ، کرمان ـ ایران

چکیده:

پدیده پلیمریزاسیون یکی از عوامل ایجاد اختلال در عملکرد آشکارسازهای گازی به شمار می‌رود. وقوع این پدیده درآشکارسازهای سیمی به‌وضوح مشاهده و اثبات‌شده است. در این مقاله به‌طور خاص با طراحی سیستمی به بررسی پدیده پلیمریزاسیون بر آشکارسازهای تکثیرگر الکترون گازی ضخیم در مد ستون نوری خود فرونشان با استفاده از چندین چشمه آلفا Am^{241} پرداخته‌شده است. در حضور مقدار اندکی (۱۰٪) از گاز هیدروکربنی نظیر متان که به‌عنوان فرونشان در ترکیب گاز P10 مورد استفاده قرار می‌گیرد، مشاهده می‌گردد پس از گذشت دو روز که به‌طور میانگین در هر روز دو تا سه ساعت آشکارساز مورد استفاده قرار می‌گیرد، تغییر و افزایش ناگهانی در سیستم شمارش صورت گرفته و جرقه الکتریکی نیز قابل مشاهده است. با توجه به تصاویر و مشاهدات عینی صورت گرفته، تأثیرات مخرب پدیده پلیمریزاسیون گاز هیدروکربن موجود در سیستم در آشکارسازهای تکثیرگر الکترون گازی ضخیم به اثبات رسیده و پیشنهاداتی جهت بهبود و افزایش طول عمر سیستم ارائه شده است.

کلیدواژه‌ها: آشکارساز تکثیرگر الکترون گازی ضخیم، مد ستون نوری خود فرونشان، پلیمریزاسیون

Investigating the phenomenon of polymerization in thick gas electron Multiplier (THGEM) detectors in self-quenching streamer (SQS) mode

MohammadMahdi EbrahimiBesheli*, MohammadJavad Khodashenas, AminReza Mahmoodi, Ali Negarestani

Faculty of Sciences and Modern Technologies, Graduate University of Advanced Technology, P.O.BOX: 7631885356, Kerman, Iran.

Abstract:

The phenomenon of polymerization is considered one of the factors causing disruption in the performance of gas detectors. The occurrence of this phenomenon in wired detectors has been clearly observed and proven. In this article, with designing a system the polymerization phenomenon on thick gas electron multiplier detectors in self-quenching streamer mode has been investigated by using several Am241 alpha sources. In the presence of a small amount (10%) of hydrocarbon gas such as methane, which is used as a quencher in the composition of P10 gas, it is observed after two days that the detector is used for an average of two to three hours per day. There is a sudden change and increase in the counting system and an electric spark can also be seen. According to the pictures and objective observations, the harmful effects of the polymerization of hydrocarbon gas in the system have been proven in thick gas electron multiplier detectors, and suggestions have been made to improve and extend the life of the system.

Keywords: thick gas electron multiplier detector, self-quenching streamer mode, polymerization

۱. مقدمه

آشکارسازی ذرات یکی از زمینه‌های مهم و پرکاربرد در رشته‌ی مهندسی هسته‌ای به شمار 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[1] می‌باشد. آشکارسازهای گازی در مدهای مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند که یکی از مدهای ساده و پرکاربرد آن مد ستون نوری خود فرونشان (SQS[2]) 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[3] که توسط فابیو 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 در هر $100\ mm^2$ ایجاد شده است[۱].

اختلاف پتانسیل بالای اعمال‌شده بین دو الکترود 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 تکثیرشده در بهمن، در الکترود پایینی و یا در صفحه‌ی بازخوانی[4] دیگری جمع‌آوری‌شده 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 حفرهایی 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 به‌دقت مکانی متوسطی دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرد[۲, ۳].

۱-۲. مد ستون نوری خود فرونشان[5]:

یکی از مدهای عملکردی آشکارسازها مد ستون نوری خود فرونشان 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]. بااین‌حال، 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 فرونشان نام‌گذاری شد[۵]. بررسی مد ستون نوری خود فرونشان 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 قرارگرفته است[۶-۸]. ازآنجایی‌که مد ستون نوری خود فرونشان حالتی بسیار مشابه پلاسما و تخلیه الکتریکی دارد، بسیار مستعد برای ایجاد پلیمر در فرآیند پلیمریزاسیون می‌باشد.

---

[1] THGEM (Thick Gas Electron Multiplier)
[2] Self-Quenching Streamers
[3] GEM (Gas Electron multiplier)
[4] Read-out pad
[5] SQS mode

۱-۳. پدیده پلیمریزاسیون: از پلاسما در شیمی برای تولید صنعتی پلیمرها با کمک تخلیه الکتریکی در گازهای هیدروکربنی (گازهای حاوی هیدروکربن‌ها) استفاده می‌شود[۹]. ازاین‌رو 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 در اثر برخورد با متان، آن را تجزیه کند. درحالی‌که برای یونیزاسیون متان به انرژی‌های بالاتر از ۱۲٫۶ الکترون‌ولت نیاز است. ازاین‌رو، به‌منظور تشکیل بهمن 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 درنتیجه پلیمریزه شده و می‌توانند روی الکترودهای تکثیرگر گازی رسوب کنند. برای مثال، رادیکال CH_2 با اثر الکترون بر متان با توجه به واکنش زیر تولید می‌شود[۱۰]:

$$e^- + CH_4 \rightarrow CH_2 + H_2 + e^- \qquad (۱)$$

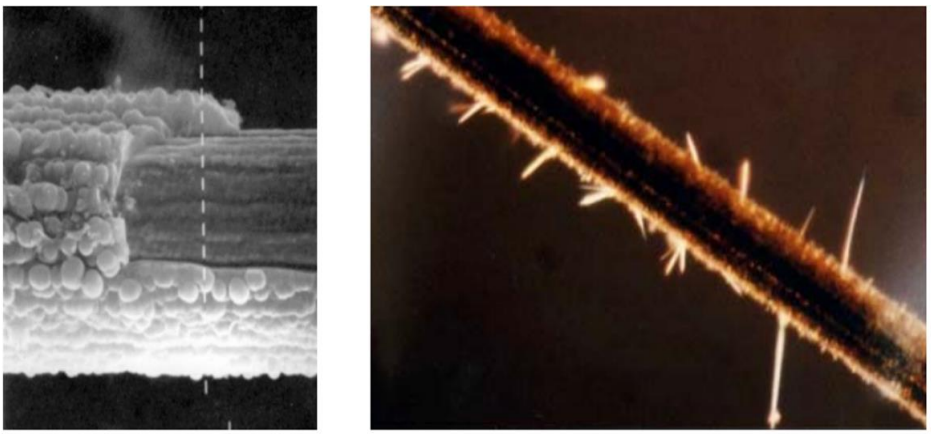
رادیکال‌های آزاد CH_2 نقطه ورود برای تشکیل پلی‌اتیلن با فرمول ساختاری ساده‌شده $n\,[-2C-CH_2H-]$ است که به‌عنوان یک عایق خوب شناخته می‌شود. ازآنجاکه رادیکال CH_2 دارای یک گشتاور دوقطبی بزرگ است، ترجیحاً به الکترودهای قطبی که در آن لایه‌های پلیمریزه کننده با تشکیل زنجیره ساخته می‌شوند، متصل می‌شود.

۱-۴. رسوبات روی آند : تصاویر میکروسکوپی از رسوبات روی سیم آند به‌عنوان نمونه در **شکل ۱** نشان داده‌شده است.

۱-۴-۱. رسوبات رسانا: رسوب یک پلیمریزه رسانا بر روی آند **شکل ۱** (ب) 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 میدان‌های قوی سبب ایجاد تخلیه الکتریکی و نقص در عملکرد آشکارساز شود.

۱-۴-۲. 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 درنتیجه کاهش تقویت می‌شود.

۱-۴-۳. تشکیل ساختارهای سیخ دار: تشکیل رشته‌ای شکل پلیمر روی آند، به نام بلورهای سوزنی[۶] **شکل ۱** (الف) منجر به تخلیه نقطه‌ای، از جرقه‌های لحظه‌ای تا جریان‌های کوچک دائمی می‌شود.



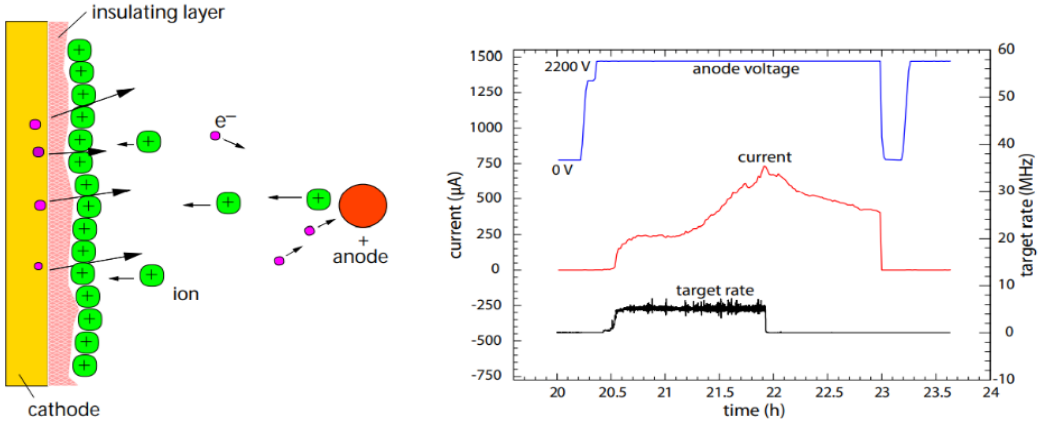
الف) بلورها و رشته‌های سوزنی روی آند — ب) توده‌ای از رسوبات روی سیم آند

شکل ۱. تصاویر میکروسکوپی از تأثیر پدیده پلیمریزاسیون بر روی سیم های آند[۱۱].

[6] Whiskers

۱-۵. رسوبات روی کاتدها، اثر مالتر[۷]:

رسوبات عایق بر روی کاتدها منجر به پدیده‌ای به نام اثر مالتر می‌شود[۱۲] که به‌صورت شماتیک در شکل ۲(ب). به تصویر کشیده شده است. به دلیل نشست یون‌ها در لایه عایق، میدانی بین این لایه و کاتد ایجاد می‌شود که می‌تواند آن‌قدر قوی باشد که باعث خروج الکترون‌ها از کاتد شود، این پدیده را گسیل میدان لایه نازک[۸] می‌نامند. تا زمانی که پتانسیل آند از



شکل ۲. الف) ویژگی های جریان مالتر. ب) تصویر شماتیک اثر مالتر[۱۴،۱۳].

لایه یونی روی کاتد بالاتر باشد، الکترون‌ها می‌توانند از طریق لایه یونی به آند بروند و در آنجا یون‌های بیشتری را از طریق تکثیر تولید کنند و درنتیجه یک جریان دائمی، یعنی جریان مالتر تولید خواهد شد[۱۳].در شکل ۲(الف) رفتار جریان مالتر به تصویر درآمده است. میزان یون‌ها در لایه عایق به وسیله‌ی تعادل بین خنثی شدن یون‌ها توسط الکترون‌ها و تقویت الکترون‌ها در آند و ایجاد یون‌های دیگر تعیین می‌شود. افزایش لایه یونی باعث کاهش اختلاف‌پتانسیل بین لایه یون و آند و درنتیجه کاهش تقویت در آند می‌گردد[۱۴].

۲. روش کار

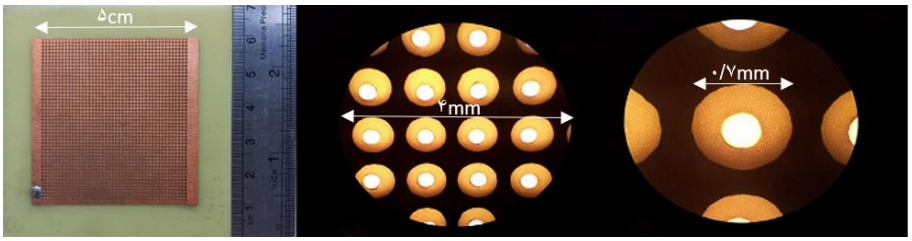
همواره در آشکارسازهای پیشین ساخته‌شده با صفحات تکثیرگر گازی در مد ستون نوری خود فرونشان افت نسبی پاسخ آشکارساز نسبت به پرتوهای ورودی پس از مدت‌زمانی مشاهده می‌شد. به همین دلیل صفحات تکثیرگر گازی معیوب به‌وسیله‌ی میکروسکوپ نوری مستقر در آزمایشگاه دانشگاه موردبررسی قرار گرفت. و رسوباتی در حفره‌های تکثیرگر 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 ^{۲۴۱}Am و گاز پرکننده P10 با ترکیب ۱۰٪ هیدروکربن متان و ۹۰٪ گاز آرگون مورد استفاده قرار گرفت.

ناحیه فعال صفحات تکثیرگر الکترونی ضخیم دارای ابعاد ۵cm×۵cm می‌باشد این صفحات از یک‌لایه عایق FR4 به ضخامت ۰/۴mm تشکیل‌شده که از دو طرف، لایه نازک از مس به ضخامت ۰/۰۳۵mm به آن اضافه‌شده است. سرتاسر این ناحیه فعال با حفره‌هایی به قطر ۰/۴mm با گام ۱mm پوشیده شده است که همان‌طور که در شکل ۳مشخص است لبه‌ی حفره‌ها به‌اندازه ۰/۱mm گرفته‌شده است تا بتوان بدون تخلیه الکتریکی صفحات بالا و پایین تکثیرگر گازی به بهره‌های بالاتری از شدت میدان رسید.شکل ۳ شماتیک این صفحات بهمراه بزرگنمایی آن‌ها را نمایش می‌دهد.

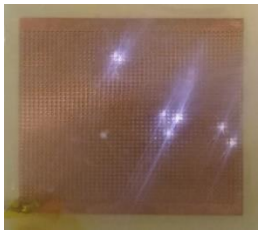
---

[7] Malter effect
[8] Thin film field emission



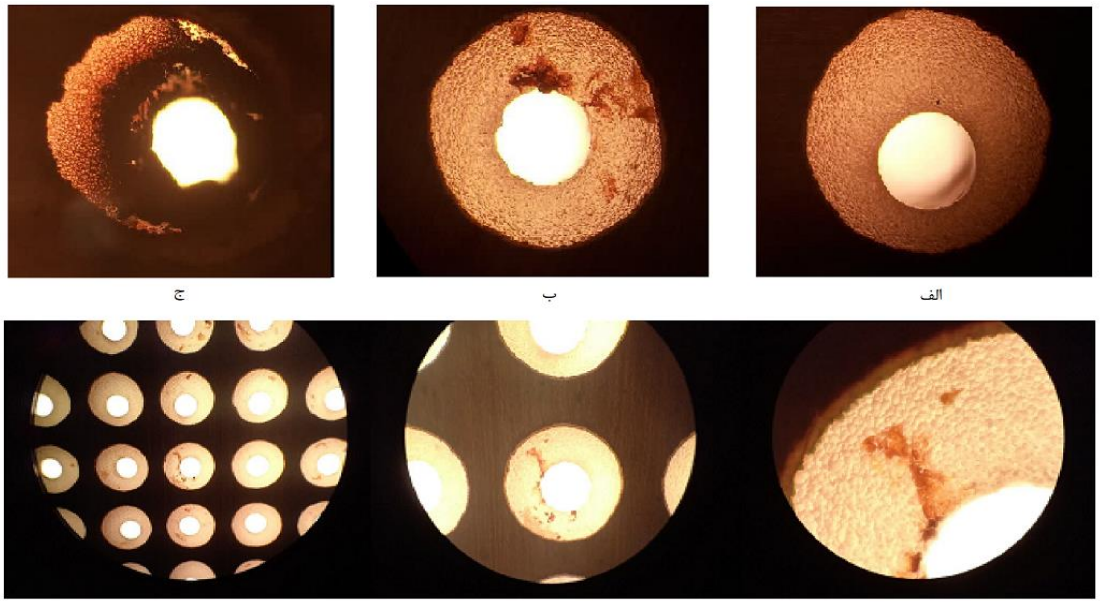
شکل ۳. بزرگنمایی میکروسکوپی تکثیرگر الکترون گازی ضخیم

به‌منظور بررسی سریع‌تر نتایج، چندین چشمه‌ی ساطع کننده‌ی آلفا(^{241}Am) در محیط آشکارساز جاگذاری شد. شکل ۴ فعالیت این مد عملکردی را نشان می‌دهد. بعد از گذشت دو روز که به‌طور متوسط آشکارساز در هرروز ۲ تا ۳ ساعت فعالیت مداوم در مد ستون نوری خود فرونشان با شدت بالا در فشار گاز ثابت داشته است، مشاهده شد که عملکرد آن در حال ضعیف شدن می‌باشد، بدین نحو که افزایش و تغییر ناگهانی در سیستم شمارش مشاهده‌شده و علاوه بر آن جرقه الکتریکی که سبب معیوب شدن آشکارساز می‌شود نیز رؤیت شده است.



شکل ۴ فعالیت در مد SQS

همان‌طور که درشکل ۵ (ب) به‌وضوح مشاهده می‌شود دقیقا در محل دیواره‌ی حفره‌های تکثیرگر گازی، رسوبات به‌صورت توده‌هایی انباشته شده‌اند. رسانا بودن رسوبات می‌تواند باعث اختلال جدی در عملکرد آشکارساز شود. قابل ذکر است در



شکل ۵. نشست رسوبات در فرآیند پلیمریزاسیون در حفره‌ها: الف) حفره سالم قبل از آزمایش. ب) حفره بعد از انجام آزمایش، ج) تأثیر مخرب تخلیه الکتریکی بر حفره‌ها د) مراحل بزرگنمایی به‌وسیله میکروسکوپ نوری به ترتیب از چپ به راست ۵mm، ۲mm، ۰/۵mm

مواردی که اختلاف ولتاژ صفحات تکثیرگر گازی از میزان مشخصی فراتر رود پدیده مخرب دیگری به نام تخلیه الکتریکی[9]

[9] Discharge

بین حفره‌ها اتفاق می‌افتد که همان‌طور که در شکل ۵ (ج) مشاهده می‌شود سبب ذوب شدن لایه عایق میانی و اتصال صفحات تکثیرگر گازی و درنهایت معیوب شدن صفحه آشکارساز می‌شود. پدیده پلیمریزاسیون در موارد شدیدتر می‌تواند این رخداد را تشدید کرده و فرآیند آشکارسازی را مختل کند.

۳. نتیجه‌گیری و پیشنهادات:

در این پژوهش نشان دادیم که فرآیند پلیمریزاسیون در آشکارسازهای گازی تکثیرگر الکترون ضخیم در حضور گاز هیدروکربن رخ می‌دهد و اثرات مخرب آن بر این دسته از آشکارسازها به اثبات رسید و مشاهده شد عملکرد صحیح آشکارساز در مد ستون نوری خود فرونشان در مدت زمان طولانی با حضور گازهای هیدروکربن دچار اختلال می‌شود. ازآنجایی‌که هیدروکربن‌ها عامل اصلی پلیمریزاسیون به شمار می‌روند باید تا جای ممکن از استفاده از آن‌ها پرهیز کرد و از گازهای جایگزین دیگر نظیر CO_2 و یا CF_4 استفاده نمود. اما این گازها نیز به‌نوبه خود مشکلاتی نظیر عملکرد فرونشانی ضعیف و ایجاد ترکیبات خورنده را به وجود می‌آورند. از طرفی افزودن گازهای غیر پلیمریزه کننده نظیر الکل‌ها، به‌عنوان مثال پروپانول (C_3H_8O) و متیلال ($C_3H_8O_2$) نیز می‌تواند مؤثر واقع شود[۱۱]. که اثرات آن در پژوهش‌های بعدی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. البته باید متذکر شویم که مد SQS از آن جایی که عملکردی بسیار مشابه با پلاسما دارد به نوبه خود تشدید کننده فرآیند پلیمریزاسیون می باشد. در صورتی که از مد های جایگزین دیگر مانند مد تناسبی استفاده شود نرخ این فرایند به شدت کاهش می‌یابد. که این خود نیازمند سیستم های بازخوانی پیچیده تر خواهد بود.

۴. مراجع

1. Sauli, F., *GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1997. 386(2-3): p. 531-534.
2. Chechik, R., et al ,.*Thick GEM-like hole multipliers: properties and possible applications.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2004. 535(1-2): p. 303-308.
3. Periale, L., et al., *Detection of the primary scintillation light from dense Ar, Kr and Xe with novel photosensitive gaseous detectors.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2002. 478(1-2 :(p. 377-383.
4. Brehin, S., et al., *Some observations concerning the construction of proportional chambers with thick sense wires.* Nuclear Instruments and Methods, 1975. 123(2): p. 225-229.
5. Alekseev, G., et al., *Investigation of self-quenching streamer discharge in a wire chamber.* Nuclear Instruments and Methods, 1980. 177(2-3): p. 385-397.
6. Arsia, R., et al., *A new approach to measure radon by Thick Gas Electron Multiplier.* Radiation Physics and Chemistry, 2022. 196: p. 110114.
7. Hashemi, S.M. and A. Negarestani, *A new method for alpha particle detection use of Electron multiplier assembly (EMA) in SQS mode.* Journal of Instrumentation, 2018. 13(05): p. P05025.
8. Souri, R., A. Negarestani, and M. Mahani, *A new approach for direct imaging of Alpha radiation by using Micro Pattern Gas Detectors in SQS mode.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018. 884: p. 128-135.
9. Yasuda, H., *New insights into aging phenomena from plasma chemistry.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003. 515(1-2): p. 15-30.
10. Va'vra, J., *Physics and chemistry of aging–early developments.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003. 515(1-2): p.1-14.
11. Kolanoski, H. and N. Wermes, *Particle Detectors: Fundamentals and Applications*. 2020: Oxford University Press, USA.

12. Malter, L., *Thin film field emission.* Physical Review, 1936. 50(1): p. 48.
13. Schreiner, A., *Aging studies of drift chambers of the HERA-B outer tracker using CF 4-based gases.* 2001.
14. Albrecht, H., et al., *Aging studies for the large honeycomb drift tube system of the Outer Tracker of HERA-B.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003. **515**(1-2): p. 155-165.