

طراحی گنج خلاء یونی کاند گرم به صورت آرایه مبتنی بر MEMS

ابراهیم عباسپور ثانی^۱، دانشیار؛ صادق محمدزاده بازارچی^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه ارومیه - ارومیه - ایران - e.abbaspour@urmia.ac.ir

۲- دانشکده فنی شهید قاضی طباطبایی- دانشگاه فنی و حرفه‌ای کشور- ارومیه - ایران- s.mohammadzadeh@urmia.ac.ir

چکیده: اندازه‌گیری خلاء HV و UHV تا فشار 10^{-12} تور اژ سال ۱۹۵۰ میلادی تاکنون با گنج یونی کاند گرم موسوم به "بایارد آلپرت" انجام می‌گیرد. کارهای تحقیقاتی انجام‌شده روی گنج یونی نوع MEMS کافی نبوده و تاکنون تجاری‌سازی نشده است. در این مقاله انواع حس‌گر خلاء نوع MEMS و غیر MEMS که بتوانند خلاء HV و UHV را اندازه بگیرند، معرفی می‌شوند. این مقاله یک ایده گنج خلاء یونی مبتنی بر فناوری MEMS به صورت آرایه و نیز طراحی و شبیه‌سازی آن را ارائه می‌کند. اندازه گنج یونی پیشنهادی $1 \times 5 \times 1/2 \text{ mm}^3$ بوده و حداقل ۳۰۰۰ برابر کوچک‌تر از نوع مرسوم (بایارد آلپرت) است. مصرف توان الکتریکی در این طرح ۵۰ برابر کمتر از نوع مرسوم است. ساختار طرح پیشنهادی شامل کلکتور، کاند و شبکه آند از نوع مرسوم متفاوت بوده و مبتنی بر فناوری MEMS است. کاند در این طرح از جنس نیکل بوده و می‌تواند در دمای 750°C الکترون‌فکنی نماید. طرح کاند طوری است که دما در طول آن تقریباً یکنواخت و مستقل از فشار خلاء است. طرح پیشنهادی دارای ضریب حساسیت ۰/۶ در محدوده اندازه‌گیری 10^{-3} الی 2×10^{-7} تور است. ضریب حساسیت در این طرح ۲۰ برابر کمتر از نوع مرسوم است که عیب این طرح را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: گنج یونی MEMS، حس‌گر خلاء MEMS، گنج یونی کاند گرم، گنج بایارد آلپرت، حس‌گر خلاء.

Design of Hot Cathode Ion Gauge Array and MEMS Type

E. Abbaspour Sani¹, Associate Professor; S. Mohammadzadeh Bazarchi², Assistant professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Urmia, Urmia, Iran, Email: e.abbaspour@urmia.ac.ir

2- Faculty of Ghazi Tabatabai, Technical and Vocational University, Urmia, Iran, Email: s.mohammadzadeh@urmia.ac.ir

Abstract: Since 1950, Ultra-high vacuum measurement at the range of 10^{-12} torr has been done by means of hot-filament ionization gauges known as Bayard-Alpert gauge. The research work on the MEMS type of this gauge has not been successful and has not yet been commercialized. This paper introduces a variety of MEMS and non-MEMS vacuum sensors that can measure HV and UHV. This article introduces one idea, design and simulation of MEMS type ionization gauge as an array. The dimensions of proposed gauge occupies are $12\text{mm} \times 5\text{mm} \times 1\text{mm}$ which is at least 3000 times smaller than the traditional one. Total power consumption of the proposed gauge array is 50 times lower than the traditional type. The structure of the proposed gauge consists of collector, cathode and grid differs from the conventional one and is based on MEMS technology. The cathode in this design made of nickel and can electron emission at 750°C . The temperature along the cathode is identical and independent of vacuum pressure. Sensitivity coefficient of the proposal is 0.6 at the measuring range of 10^{-3} to 2×10^{-7} torr. The sensitivity coefficient of the designed architecture is 20 times less than the conventional one, which shows the disadvantage of this design.

Keywords: MEMS ion gauge, MEMS vacuum sensor, hot cathode ion gauge, Bayard-Alpert ion gauge, vacuum pressure sensor.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۲۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۲۱

نام نویسنده مسئول: ابراهیم عباسپور ثانی

نشانی نویسنده مسئول: ایران- ارومیه- خیابان شهید بهشتی- دانشگاه ارومیه (پردیس شهر) - مرکز تحقیقات میکروالکترونیک و میکروماشین

۱- مقدمه

پاسخ و افزایش قابلیت بازتولید، از مزایای دیگر هستند. همچنین می‌توان به توانایی مجتمع‌سازی با مدار الکترونیکی به‌عنوان مزیت دیگر اشاره کرد. قابلیت ایجاد خلأ در محیط‌های خیلی کوچک به‌عنوان پمپ خلأ از کاربردهای دیگر گیج یونی MEMS به‌شمار می‌رود [۵، ۱۲]. طراحی و ساخت حس‌گر خلأ یونی با فناوری MEMS روشی مؤثر در اندازه‌گیری فشار خلأ خیلی پایین است. طرح این مقاله قدمی در نزدیک‌شدن به اهداف ذکرشده در بالا است. این مقاله تلاش کرده است جوانب و مشکلات پیاده‌سازی مبتنی بر فناوری MEMS را در نظر گرفته و برای آن‌ها راه‌کار ارائه دهد. یکی از این مشکلات، محدودیت اندازه‌گیری جریان الکتریکی بسیار کوچک (کمتر از پیکوآمپر) است. در فشارهای خلأ پایین‌تر مانند 10^{-7} تور، جریان خروجی به صدم پیکوآمپر می‌رسد. در این مقاله با آرایه‌ای کردن ۱۰ عدد گیج یونی در کنار هم، جریان خروجی ۱۰ برابر افزایش یافته است. ۱۰ برابرشدن جریان خروجی این امکان را می‌دهد که بتوان با فناوری بومی جریان خروجی گیج یونی را اندازه گرفت. پیاده‌سازی کاند در فناوری MEMS متفاوت از گیج نوع مرسوم است. با استفاده از فناوری MEMS کاند می‌تواند به‌صورت یک میله ساخته شود که در کنارها به پایه نگاه‌دارنده و کانکتور متصل گردد. با اتصال کاند به پایه نگاه‌دارنده و کانکتور، دمای آن در محل اتصال (کناره‌ها) کاهش می‌یابد، به‌عبارتی دمای وسط کاند بسیار داغ‌تر از کناره‌های کاند می‌شود. در طرح پیشنهادی این مقاله، روشی پیشنهاد شده است که دمای کاند در طول آن تقریباً ثابت می‌ماند. همچنین با ارائه روش پیشنهادی این مقاله، کاند طوری طرح شده که دمای آن به فشار گاز مورد اندازه‌گیری وابسته نیست. در صورت پیاده‌سازی این طرح دیگر نیازی به سیستم اندازه‌گیری و کنترل دمای کاند نیست. گیج خلأ یونی مرسوم دارای یک شبکه آند استوانه‌ای سیمی، موسوم به گرید است که سیم خیلی نازک کلکتور در وسط گرید قرار گرفته است [۴]. پیاده‌سازی شبکه آند مشابه گیج یونی مرسوم (بایارد آلپرت) در فناوری MEMS دشوار به‌نظر می‌رسد. در این مقاله روشی متفاوت برای پیاده‌سازی آند و قابل‌ساخت با فناوری MEMS پیشنهاد شده است. در این مقاله شبیه‌سازی فرآیند یونیزاسیون گاز، توسط برنامه COMSOL انجام شده است. با به‌کاربردن این برنامه جزئیات برخورد الاستیک و برخورد منجر به یونیزاسیون به‌دست می‌آیند. این جزئیات شامل طول مسیر حرکت الکترون‌ها، سطح مقطع یونیزاسیون، فرکانس یونیزاسیون، سرعت الکترون‌ها، انرژی الکترون‌ها و غیره می‌باشند. با استفاده از این شبیه‌سازی ابعاد فیزیکی، هندسی و نیز مشخصات الکتریکی قسمت‌های گیج یونی به‌دست می‌آیند. این مقاله طرح پیشنهادی را در شرایط عملکرد بهینه و رسیدن به ضریب حساسیت بالا در نظر گرفته است. مقاله حاضر یک پروسه پیشنهادی برای ساخت قسمت‌های گیج یونی کاند گرم مبتنی بر فناوری MEMS به‌صورت مرحله‌ای ارائه کرده است.

در این مقاله در بخش ۲ اساس کار گیج خلأ یونی کاند گرم و MEMS ارائه می‌شود. در این بخش سیستم کار گیج یونی کاند گرم

اندازه‌گیری خلأ روش‌های مختلفی دارد. سه روش الکترونیکی رایج وجود دارند که می‌توانند با فناوری MEMS ساخته شوند. این روش‌ها شامل حس‌گر پیرانی، گیج یونی کاند سرد و گیج یونی کاند گرم هستند. حس‌گر پیرانی در اثر تغییر ضریب هدایت گرمایی گاز در اثر تغییر فشار گاز عمل می‌کند. محدوده اندازه‌گیری خلأ در این حس‌گر 10^{-4} الی 10^{-1} تور است. حس‌گر پیرانی مبتنی بر فناوری MEMS توسط شرکت‌های Xensor، POSIFA و MKS در انواع بسته‌بندی استاندارد LCC-20 و TO-5 تولید شده‌اند ولی حس‌گر پیرانی توانایی اندازه‌گیری فشار خلأ کمتر از 10^{-4} تور را ندارد [۳-۱]. در روش دوم گیج خلأ یونی کاند سرد با یونیزاسیون گاز عمل می‌کند. محدوده اندازه‌گیری این نوع گیج یونی در محدوده 10^{-3} الی 10^{-12} تور است [۴، ۵]. نمونه‌ای از آن گیج یونی، محصول شرکت MKS با توانایی اندازه‌گیری خلأ پایین تا حد 10^{-12} تور است [۶]. کار تحقیقی روی گیج یونی کاند سرد مبتنی بر فناوری MEMS در اندازه $20 \times 12 \times 10 \text{ mm}^3$ ارائه شده است. این گیج یونی توانایی اندازه‌گیری خلأ 10^{-7} الی 10^{-15} تور را دارد [۷]. روش سوم گیج یونی کاند گرم و رقیب گیج یونی کاند سرد است. در این گیج یونی به‌دلیل اکسیدشدن فیلمان کاند و کاهش عمر آن و نیز به‌دلیل رفتار غیرخطی در فشارهای بالاتر از 10^{-3} تور، امکان اندازه‌گیری فشارهای بالاتر از ۱ میلی‌تور وجود ندارد [۸]. این نوع گیج یونی به‌دلیل داشتن قابلیت اندازه‌گیری فشارهای خلأ بسیار پایین UHV، مورد توجه بوده است. کارهای تحقیقی انجام‌شده بر روی نوع MEMS این گیج یونی کافی نبوده و منجر به تجاری‌سازی آن نشده است. در سال ۲۰۱۵ ساخت یک کاند با فناوری MEMS ارائه شده است. این کاند می‌تواند کاند گیج یونی MEMS را تشکیل دهد [۹]. این کاند از جنس تنگستن بوده و در دمای بالای 1800°C کار می‌کند [۹]. در مرجع [۱۰] شبیه‌سازی مربوط به گیج یونی کاند گرم در ابعاد میکروماشین ارائه شده است. در این کار تحقیقی با اعمال میدان مغناطیسی ضریب حساسیت بهبود داده شده است ولی به فناوری MEMS پرداخته نشده است. مقاله حاضر سعی دارد طراحی کامل از گیج یونی کاند گرم و مبتنی بر فناوری MEMS ارائه دهد.

اندازه‌های هردوی گیج‌های یونی کاند گرم و کاند سرد نوع مرسوم، بزرگ بوده و توان مصرف بالایی دارند. در یک نمونه گیج یونی مرسوم (بایارد آلپرت)، اندازه قطر ۱ و ارتفاع آن $2/7$ بوده و دارای توان مصرف ۳۰w است [۱۱]. در صورت پیاده‌سازی نوع MEMS این گیج یونی، اندازه گیج یونی بیش از ۳۰۰۰ برابر کاهش یافته و توان مصرف نیز حدود ۵۰ برابر کمتر می‌شود. گیج خلأ یونی مبتنی بر فناوری MEMS دارای مزایایی نسبت به نوع بزرگ و مرسوم است. از جمله این مزایا می‌توان به داشتن اندازه بسیار کوچک، توان مصرفی بسیار پایین و افزایش قابلیت اعتماد اشاره کرد. راحتی کار با حس‌گر، کاهش زمان

ضریب حساسیت S بستگی به ابعاد فیزیکی و مشخصات الکتریکی گیج خلأ یونی دارد. داشتن حساسیت بالا به گیج یونی امکان می‌دهد که بتواند خلأ با فشارهای تا UHV را اندازه‌گیری نماید.

در اثر برخورد الکترون‌های انرژی‌دار با سیم‌های آنند، اشعه ایکس تولید می‌شود. برخورد اشعه ایکس به سیم کلکتور باعث فرار الکترون‌ها از کلکتور شده و یک جریان خطا ایجاد می‌کند. با وجود این جریان خطا نمی‌توان فشارهای خلأ تا UHV را اندازه‌گیری کرد. برای کاهش اثر تابش اشعه ایکس، سیم کلکتور نازک انتخاب می‌شود تا کمتر در معرض اشعه ایکس قرار گیرد. از طرف دیگر نازک‌شدن سیم کلکتور باعث کاهش ضریب حساسیت می‌گردد، این عوامل باعث می‌شود که در انتخاب ضخامت سیم کلکتور یک مصالحه صورت می‌گیرد [۸].

رابطه (۲) وابستگی ضریب حساسیت گیج خلأ یونی به دما و دیگر مشخصات را نشان می‌دهد [۸]. واحد ضریب حساسیت 1/torr بوده و مقدار عددی آن در نوع مرسوم ۱۰ الی ۴۵ گزارش شده است [۸]. در این رابطه، l طول مؤثر مسیر حرکت الکترون‌ها در محیط یونیزاسیون و σ_i سطح مقطع یونیزاسیون است. σ_i عددی ثابت نبوده و وابسته انرژی الکترون‌ها است. در نمودار ۱ این وابستگی نشان داده شده است.

$$S = \sigma_i \frac{l}{kT} \quad (2)$$

محاسبه ضریب حساسیت از رابطه (۲) یک روش معمول نیست. این موضوع به این دلیل است که الکترون‌ها در اثر برخورد الاستیک و برخورد یونیزاسیون تغییر مسیر داده و طول مسیر حرکت آن‌ها طولانی می‌شود. از طرف دیگر با هر عمل یونیزاسیون، الکترون ثانویه تشکیل می‌شود که احتمالاً در فرآیند یونیزاسیون شرکت می‌کند. این جزئیات در رابطه (۲) لحاظ نشده‌اند. مقدار ضریب حساسیت گیج یونی مرسوم (بایارد آلپرت) بیشتر از ۱۰ است [۱۱]. در حالی که با رابطه (۲) و نمودار شکل ۱ مقدار ضریب حساسیت حدود ۰/۱۵ محاسبه می‌شود. این محاسبه با در نظر گرفتن طول مسیر حرکت الکترون‌ها در گیج یونی مرسوم به دست می‌آید. طول متوسط الکترون‌ها همان قطر گیج یونی مرسوم و حدود ۲۵mm در نظر گرفته شده است [۱۱]. همچنین با فرض اینکه الکترون‌ها دارای بهترین حالت انرژی یعنی ۱۰۰eV باشند. این اختلاف مقدار به دلیل عدم لحاظ جزئیات ذکر شده بالا در رابطه (۲) است.

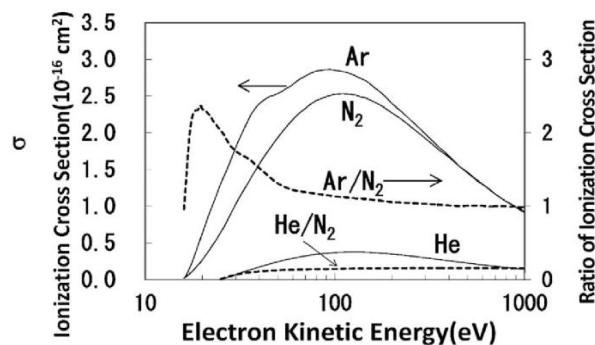
ضریب حساسیت با طول مسیر حرکت الکترون‌ها رابطه مستقیم دارد، بنابراین با کوچک شدن ابعاد در اثر فناوری MEMS، مقدار l و در نتیجه ضریب حساسیت کاهش خواهد یافت. این کاهش حساسیت بهایی است که در کنار بسیاری از مزایا پرداخته می‌شود.

در شکل ۲ ساختار پیشنهادی این مقاله نشان داده شده است. این ساختار شامل یک رویه سیلیکونی و یک پایه سیلیکونی است. هر دو آن‌ها با فناوری MEMS ایجاد شده و با روش پیوند آندی به هم متصل شده‌اند. اجزای اصلی گیج یونی، روی پایه سیلیکونی پیاده می‌شوند و فاصله بین پایه سیلیکونی و رویه سیلیکونی فضای یونیزاسیون را تشکیل می‌دهد. حداقل یک طرف از رویه سیلیکونی برای مکش گاز باز

معرفی شده و سپس طرح پیشنهادی این مقاله معرفی می‌گردد. در بخش ۳ طراحی گیج خلأ یونی کاند گرم مبتنی بر فناوری MEMS در دو زیربخش جداگانه برای طراحی کاند و نیز طراحی آند و کلکتور ارائه می‌شوند. در بخش ۴ ضریب حساسیت گیج خلأ یونی کاند گرم MEMS با رابطه‌ای جدید محاسبه و به صورت نمودار ارائه می‌شود. در بخش ۵ پروسه پیشنهادی ساخت طرح این مقاله به همراه جزئیات لازم ارائه خواهد شد و در نهایت در بخش ۶ نتیجه‌گیری از نتایج تحلیل‌های به‌دست آمده در این طرح پیشنهادی، ارائه می‌شود.

۲- اساس کار گیج خلأ یونی کاند گرم مبتنی بر فناوری MEMS

گیج خلأ یونی با یونیزاسیون گاز در اثر تابش الکترون‌ها از کاند گرم کار می‌کند. عبور جریان الکتریکی سیم کاند را داغ کرده و شرایط لازم برای تابش الکترون‌ها فراهم می‌آید. الکترون‌ها با شتاب به سمت آند حرکت می‌کنند. الکترون‌ها در مسیر حرکت خود با برخورد به اتم‌های گاز باعث یونیزه شدن بعضی از آن‌ها می‌شوند. میزان یونیزاسیون بستگی به فشار گاز و انرژی الکترون‌ها دارد. مطابق شکل ۱ با ایجاد اختلاف پتانسیل ۱۲۰V بین آند و کاند و رساندن الکترون‌ها به انرژی حدود ۱۰۰eV بیشترین راندمان تولید یون‌ها حاصل می‌شود [۱۳، ۱۴]. با یونیزاسیون هر اتم گاز، یک یون مثبت و یک الکترون تولید می‌شوند. یون‌های مثبت تولید شده جذب سیم کلکتور شده و جریان کلکتور را تشکیل می‌دهند. از آنجایی که در فرآیند یونیزاسیون در گیج یونی، اتم‌های گازی مصرف می‌شوند از این فرآیند می‌توان در تولید خلأ در محیط‌های کوچک و در بسته، به‌عنوان پمپ خلأ استفاده نمود [۱۵].

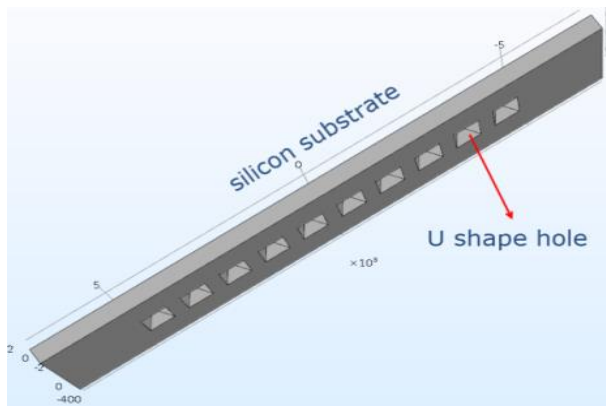


شکل ۱: نمودار سطح مقطع یونیزاسیون نیتروژن و گازهای دیگر [۱۳]

یون‌هایی که جذب کلکتور می‌شوند یک جریان I_c تولید می‌کنند که این جریان با رابطه (۱) بیان می‌شود [۴، ۸]. در این رابطه پارامترهای P فشار برحسب تور، I_e جریان الکترون‌های تولید شده و تابش شده توسط سیم کاند، S ضریب حساسیت گیج یونی با واحد 1/torr و S_r ضریب حساسیت نسبی هر گاز نسبت به گاز نیتروژن می‌باشند. S_r هر گاز از نسبت سطح مقطع یونیزاسیون آن گاز (مانند اکسیژن) نسبت به گاز نیتروژن به‌دست می‌آید [۴، ۸].

$$I_c = S \times S_r \times I_e \times P \quad (1)$$

الکترون‌ها احتمال یونیزاسیون اتم‌های گاز به حداکثر مقدار خود می‌رسد. رویه سیلیکونی با 150°C وظیفه جذب الکترون‌های تولید شده توسط کاتد را بر عهده دارد. همچنین الکترون‌هایی که در اثر یونیزاسیون تولید می‌شوند به دلیل نداشتن انرژی اولیه به ندرت در یونیزاسیون بعدی شرکت می‌کنند و آن‌ها نیز جذب رویه سیلیکونی می‌شوند.



شکل ۳: قسمت پایین پایه سیلیکونی شامل ۱۰ عدد حفره U شکل در زیر هر کاتد

در گیج یونی مرسوم (بایارد آلپرت) تمامی قسمت‌ها با فلز ساخته شده‌اند و برخورد الکترون‌ها با قسمت‌های فلزی اشعه ایکس تولید می‌کند. وجود اشعه ایکس یک خطا و محدودیت اندازه‌گیری محسوب می‌شود [۸]. در گیج یونی مبتنی بر فناوری MEMS پایه کار سیلیکون است و در مقایسه با نوع غیر MEMS قسمت‌های فلزی کمتری دارد، لذا احتمال تولید اشعه ایکس کاهش می‌یابد.

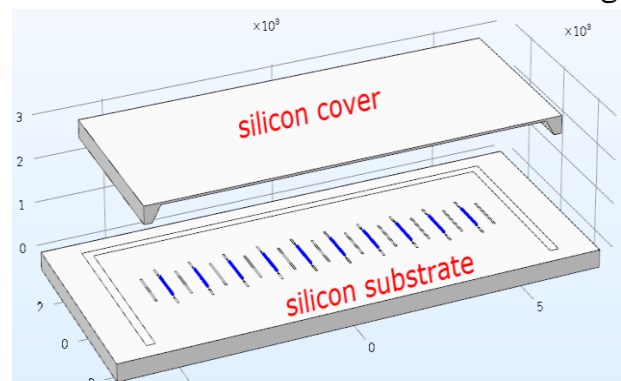
۳- طراحی گیج خلأ یونی کاتد گرم MEMS

۳-۱- طراحی کاتد

برای طراحی قسمت کاتد در گیج یونی MEMS ملاحظات در نظر گرفته می‌شوند. رسیدن به دمای 750°C با حداقل توان مصرفی و ثابت بودن دما در طول فیلمان جزو این ملاحظات می‌باشند. مستقل بودن دمای کاتد در مقابل تغییرات فشار گاز خلأ در محدوده اندازه‌گیری باید مد نظر باشد. همچنین داشتن سطح مقطع کافی برای الکترون‌فکنی و امکان ساخت با فناوری MEMS از ملاحظات دیگر می‌باشند.

در طرح این مقاله (برخلاف گیج یونی مرسوم بایارد آلپرت) کاتد به صورت یک میله از جنس فلز نیکل بر روی اکسید سیلیکون در نظر گرفته شده است. با لایه نشانی اکسید فلز قلبیابی روی نیکل، تابع کار آن به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. در این شرایط کاتد توانایی تشعشع الکترون را در 750°C خواهد داشت [۱۷]. این در حالی است که در نمونه آزمایشگاهی ساخته شده در مرجع [۹]، کاتد از جنس تنگستن بوده و در دمای بالای 1800°C کار می‌کند.

نگه داشته می‌شود. ناخالصی بور در رویه سیلیکونی رسانایی بالا ایجاد می‌کند و رویه سیلیکون می‌تواند الکترون‌های تولید شده توسط کاتد را جمع‌آوری نماید. استفاده از پایه سیلیکون و رویه سیلیکون مشابه فناوری به کاررفته در حسگر پیرانی MEMS است [۵، ۱۶]. بنابراین می‌توان گیج یونی MEMS را با حسگر پیرانی به صورت مجتمع ایجاد نمود تا اندازه‌گیری در فشارهای بالاتر از 10^{-3} تور نیز امکان‌پذیر باشد. در شکل ۲ مشاهده می‌شود که آرایه ۱۰ تایی از مجموعه کاتد، آند و کلکتورها در کنار هم چیده شده‌اند. آرایه ۱۰ تایی باعث افزایش جریان کلکتور شده و محدوده اندازه‌گیری گیج یونی را تا 2×10^{-7} تور افزایش می‌دهد.

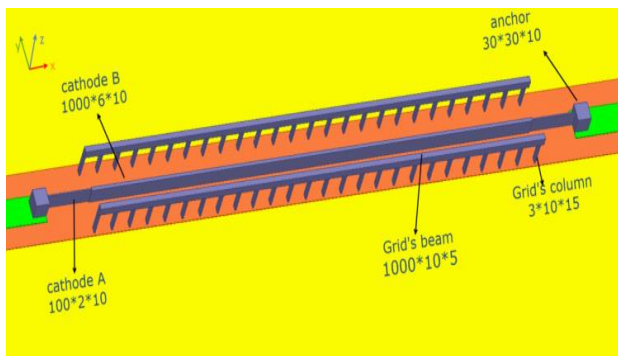


شکل ۲: شمای رویه و پایه سیلیکونی شامل ۱۰ عدد گیج یونی مبتنی بر فناوری MEMS به صورت آرایه

مطابق شکل ۳ در قسمت پایین پایه سیلیکونی به تعداد ۱۰ عدد حفره یا تورفتگی U شکل زیر کاتد ایجاد شده است. حفره‌ها با روش اسیدکاری ناهمسانگرد ایجاد می‌شوند. سقف این حفره‌ها لایه‌ای نازک از اکسید سیلیسیم است که کاتد روی آن قرار دارد. در این شکل هر حفره دقیقاً در قسمت پایین هر کاتد ایجاد می‌شود. از آنجایی که تعداد ۱۰ کاتد به صورت آرایه استفاده شده است، لذا تعداد حفره‌ها نیز ۱۰ عدد است.

در دو طرف فیلمان کاتد و به فاصله خیلی نزدیک، شبکه آند (گرید) قرار دارد. شبکه گرید از یک تعداد میله ستونی و یک تیرک افقی تشکیل یافته است. جنس گرید نیز از نوع نیکل بوده و به همراه کاتد به روش الکتروپلیت ساخته می‌شود. این طرح شامل ۱۰ عدد میله کاتد، ۲۰ عدد شبکه آند و ۱۱ دسته لایه باریک و ۳ تایی کلکتور است. شکل ۴ اطلاعات بیشتری در این مورد نشان می‌دهد.

در این طرح از توان dc برای داغ شدن کاتد تا حدی که بتواند الکترون فکنی نماید استفاده شده است. مقدار توان dc مورد نیاز $69/2\text{mw}$ است. با در نظر گرفتن ۱۰ عدد گیج یونی آرایه‌ای، توان الکتریکی لازم 692mw محاسبه می‌شود. این مقدار توان الکتریکی مصرفی در مقایسه با توان مصرفی در نوع مرسوم که 30w است [۱۱]، حدود ۵۰ برابر کمتر است. با اعمال اختلاف پتانسیل 120v بین کاتد و آند، الکترون‌ها صاحب انرژی اولیه 120eV می‌شوند ولی انرژی متوسط آن‌ها در مسیر حرکت به حدود 100eV می‌رسد. با کسب این مقدار انرژی توسط



شکل ۵: جزئیات شبکه آند شامل تیرک افقی و ۲۶ عدد ستون و نیز کاتد شامل پایه‌های نگه‌دارنده و قسمت باریک A و پهن تر B

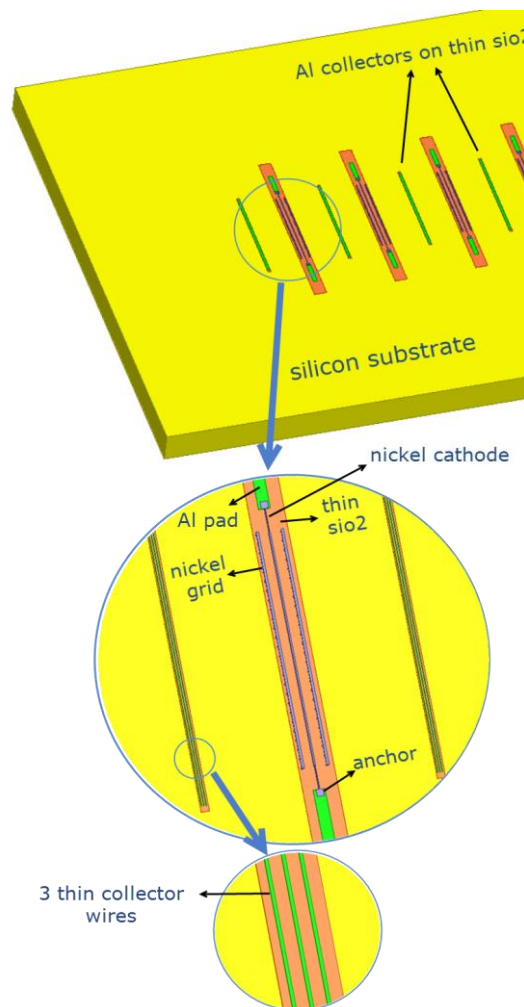
در شکل ۵ میله کاتد معلق نبوده و در دو طرف توسط پایه‌های نگه‌دارنده محکم شده است. لایه زیرین کاتد یک لایه نازک اکسید سیلیسیم است. حالتی که کاتد بر روی لایه اکسید سیلیکون قرار گرفته باشد در مقایسه با حالتی که کاتد معلق باشد، فتاوری ساخت ساده‌تری دارد، زیرا نیازی به خالی کردن زیر کاتد نیست. کاتد از طریق انتقال همرفتی گرما، مقداری از حرارت خود را به بدنه انتقال می‌دهد. انتقال گرما از کاتد به لایه اکسید سیلیکون خیلی بیشتر از انتقال گرما از کاتد به محیط گاز است [۱۸]. این فرایند باعث می‌شود که تغییرات فشار گاز محیط در دمای کاتد (در محدوده اندازه‌گیری) بی‌تأثیر باشد. در روش استقرار کاتد روی اکسید سیلیکون توان الکتریکی زیادتری برای داغ کردن کاتد مصرف می‌شود. حفره‌های U شکل که در طرف مقابل پایه سیلیکون و درست زیر کاتدها قرار دارند با اسیدکاری ناهمسانگرد قابل ساخت هستند. با تعبیه این حفره‌ها، هدررفت گرما از کاتد کاهش می‌یابد و در عین حال مقدار هدررفت طوری است که دمای کاتد به فشار گاز بستگی ندارد. نتایج شبیه‌سازی گرمایی و الکتریکی انجام‌شده نشان می‌دهد که با تعبیه کردن حفره‌ها، توان الکتریکی لازم برای داغ نگه‌داشتن کاتد در دمای ۷۵۰°C به میزان ۱۵۶ برابر کاهش می‌یابد.

رابطه تئوری مورد نیاز برای طراحی پرتوافکنی کاتد در رابطه (۳) بیان شده است. این رابطه بنام ریچارد سون دا شمن شناخته شده است. T در این رابطه دما با واحد کلوین، kb ثابت بولتزمن و ϕ تابع کار فیلمان کاتد با واحد الکترون‌ولت هستند [۱۹].

$$J = 1.20173 \times 10^6 \times \exp\left(-\frac{\phi}{k_B T}\right) \frac{A}{m^2} \quad (3)$$

تابع کار فلز نیکل در صورتی که لایه اکسید آلکالین روی آن نشانده شده باشد به ۱/۱ eV کاهش می‌یابد [۱۷]. با مشخصات فلز نیکل و بر اساس رابطه (۳) برای رسیدن به دمای ۷۵۰°C چگالی جریان $J \approx 5A/m^2$ مورد نیاز است.

در طرح این مقاله به دلیل ابعاد MEMS فضای یونیزاسیون کوچک است و این باعث می‌شود یون‌های تولید شده کم باشند. جریان سیم کلکتور که از جمع‌آوری یون‌ها تشکیل می‌شود نیز مقدار کوچکی



شکل ۴: قسمت بالای پایه سیلیکونی و جزئیات بیشتر از شبکه آند (گرید)، کاتد و کلکتور

در شکل ۵ جزئیات فیلمان کاتد و شبکه آند (گرید) نشان داده شده‌اند. در این شکل مشاهده می‌شود که دو دسته گرید در کناره‌های کاتد قرار دارند. شبکه آند با همان پروسه ساخت کاتد و با روش الکتروپلیت قابل پیاده سازی است. شبکه آند از جنس فلز نیکل بوده و به پتانسیل ۱۵۰v وصل می‌شود. با وجود اختلاف پتانسیل ۱۵۰eV بین کاتد و شبکه آند، الکترون‌ها با انرژی ۱۵۰eV به سمت شبکه آند شتاب می‌گیرند. تعدادی از الکترون‌ها در اثر برخورد به شبکه آند جذب آن‌ها شده و از بین می‌روند. الکترون‌ها از فضای بین ستون‌ها با انرژی ۱۵۰eV عبور کرده و وارد فضای یونیزاسیون می‌شوند. در انتخاب ابعاد و تعداد ستون‌ها از تابع $I \times \sigma_i$ استفاده می‌گردد. این تابع از نتایج خروجی برنامه COMSOL و تحلیل برنامه MATLAB حاصل می‌شود. وجود تیرک افقی در شبکه آند برای سمت‌دادن اشعه کاتدی به قسمت بالای فضای یونیزاسیون در نظر گرفته شده است. در صورت عدم استفاده از تیرک افقی در شبکه آند، اشعه کاتدی به سمت پایین و پایه سیلیکونی حرکت کرده و جذب آن می‌شوند. این الکترون‌ها شانس شرکت در فرآیند یونیزاسیون را از دست می‌دهند.

با در نظر گرفتن مقادیر $I_{e\min}$ و I_e و نیز مقدار ضریب حساسیت، مقدار حداقل فشار قابل اندازه‌گیری P_{\min} از رابطه (۱) مقدار 2×10^{-7} تور به دست می‌آید. در صورتی که ضریب حساسیت افزایش یابد می‌توان فشارهای خلأ پایین‌تر از 2×10^{-7} تور را هم اندازه گرفت. یک روش برای اندازه‌گیری فشار خلأ پایین‌تر، پیاده‌سازی آرایه ۲ بعدی گیج یونی است. روش دیگر استفاده از مدار اندازه‌گیری با قدرت اندازه‌گیری جریان‌های الکتریکی در حد فمتوآمپر است. در طرح این مقاله سیستم اندازه‌گیری جریان الکتریکی در حد پیکوآمپر و مطابق با فناوری بومی در نظر گرفته شده است.

در جدول ۱ ابعاد فیزیکی قسمت کاند به‌طور خلاصه نشان داده شده‌اند. ابعاد کاند با ملاحظات در نظر گرفته شده و برای رسیدن به شرایط عملکرد بهینه، با کمک نرم‌افزار COMSOL5 طرح شده‌اند. این ملاحظات، مقدار جریان و چگالی جریان سیم کاند، ایجاد دمای ثابت $750 \square$ در طول سیم کاند هستند. همچنین عدم وابستگی دمای کاند به فشار گاز، داشتن حداقل مصرف توان و سازگاری با فناوری MEMS از موارد دیگر می‌باشند. به‌عنوان مثال در جدول ۱ در ستون اول که مربوط به ابعاد قسمت اصلی کاند است. انتخاب ابعاد طوری است که جریان الکترون فکنی کاند با رابطه (۵) ایجاد می‌گردد. در این معادله ضریب ۲ به دلیل الکترون فکنی کاند از دو طرف است.

$$I_{e,1\text{ section}} = 2 \times J \times 1000 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m} = 0.1 \mu\text{A} \quad (5)$$

شبیه‌سازی گرمایی میله کاند با مشخصات جدول ۱ نشان می‌دهد که در دمای هر کاند با مصرف $69/2 \text{mw}$ به 750°C می‌رسد. برای الکترون فکنی یکسان در طول کاند باید دمای کاند در طول آن یکسان باشد. از آنجایی که کاند در دو طرف به خطوط اتصال الکتریکی از جنس طلا متصل می‌شود، دمای کاند در این نقاط تا حد زیادی کاهش می‌یابد. برای جبران این افت دما، ضخامت کاند در دو انتها باریک‌تر انتخاب شده است. این قسمت‌ها در شکل ۵ و جدول ۱ با کاند A نام‌گذاری شده‌اند. با باریک شدن این قسمت‌ها انتقال گرما به سیم‌های ارتباطی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر مقاومت الکتریکی در قسمت A افزایش یافته و توان الکتریکی بیشتری مصرف می‌گردد و دمای کاهش یافته جبران می‌گردد.

در گیج یونی مرسوم (بایارد آلپرت) فیلمان کاند از جنس تنگستن و به‌صورت ریبون بوده و توسط دو پایه در هوا معلق نگه داشته می‌شود، بنابراین گرمای آن و در نتیجه الکترون فکنی در آن با فشار گاز تغییر می‌کند. دلیل تغییر دمای فیلمان کاند با فشار گاز به وابستگی ضریب هدایت گرمایی گازها به فشار مربوط می‌شود. رابطه (۶) وابستگی ضریب هدایت گرمایی گاز اکسیژن به دما و فشار گاز را نشان می‌دهد [۱۸]. در این رابطه، k_0 ضریب هدایت گرمایی در دمای اتاق و فشار اتم سفر، T دمای گاز، P فشار گاز برحسب پاسکال و d ارتفاع فاصله گازی برحسب متر می‌باشند. این رابطه نشان می‌دهد که با افزایش فشار گاز، ضریب هدایت گرمایی کاهش یافته و فیلمان کاند داغ‌تر می‌شود و برای ثابت نگه‌داشتن آن نیاز به کنترل کننده دما است.

خواهد بود. در فشارهای خلأ HV و UHV مقدار جریان کلکتور خیلی کوچک و در حد دهم پیکوآمپر خواهد بود. در حال حاضر جریان الکتریکی ۰/۱ فمتوآمپر با نویز قابل قبول را می‌توان اندازه‌گیری کرد [۲۰]. با فناوری بومی، جریان پیکوآمپر قابل اندازه‌گیری است [۲۱]. در این مقاله حداقل جریان قابل اندازه‌گیری کلکتور یعنی $I_{e\min}$ مقدار 0.1pA در نظر گرفته شده است. در رابطه (۱) حداقل فشار خلأ اندازه‌گیری در شرایط حداقل جریان قابل اندازه‌گیری $I_{e\min}$ اتفاق می‌افتد. رابطه (۱) برای گاز نیتروژن با $St=1$ و در شرایط حداقل فشار اندازه‌گیری به‌صورت رابطه (۴) بازنویسی شده است.

$$I_{e\min} = S \times P_{\min} \times I_e \quad (4)$$

برای به دست آوردن I_e دانستن مقدار تقریبی ضریب حساسیت الزامی است. ضریب حساسیت با توجه به رابطه (۲) به طول مسیر حرکت الکترون‌ها l بستگی دارد. رویه سیلیکون از سیلیکون با ضخامت $500 \mu\text{m}$ تشکیل یافته است، بنابراین ارتفاع فضای یونیزاسیون همان $500 \mu\text{m}$ در نظر گرفته می‌شود. بهترین موقعیت کلکتور قرار گرفتن در وسط فضای یونیزاسیون است تا بتواند یون‌ها را جمع‌آوری نماید. موقعیت وسط با در نظر گرفتن فاصله کاند تا کلکتور $500 \mu\text{m}$ حاصل می‌شود. در این شرایط فاصله بین دو گیج یونی مجاور در آرایه، $1000 \mu\text{m}$ خواهد شد. در طرح این مقاله با طراحی مناسب سعی شده است الکترون‌ها قبل از اینکه جذب رویه سیلیکون شوند مسافت بیشتری را طی نمایند. با فرض اینکه الکترون‌ها فاصله دو گیج یونی را پیمایش کنند، طول مسیر حرکت الکترون‌ها (یعنی l) به $2000 \mu\text{m}$ خواهد رسید. با مقایسه این طول مسیر در طرح پیشنهادی با ابعاد گیج یونی غیر MEMS [۱۱]، مقدار تخمینی ضریب حساسیت در این طرح حدود ۰/۵ به دست می‌آید.

ابعاد گیج یونی پیشنهادی MEMS و چگالی جریان کاند حاصل از رابطه (۳) بیانگر این واقعیت است که جریان الکترون فکنی هر کاند یعنی $I_{e,1\text{ section}}$ در حدود $0.1 \mu\text{A}$ است. با توجه به این داده‌ها جریان کل کاتدها در آرایه $1 \mu\text{A}$ محاسبه می‌گردد.

جدول ۱: مشخصات و ابعاد قسمت کاند

لایه اکسید زیرین	جای پایه (pad)	پایه نگه‌دارنده (anchor)	قسمت کاند (A)	قسمت اصلی کاند (B)	جنس
اکسید سیلیسیم	طلا	نیکل	نیکل	نیکل با رویه اکسید	جنس
-	-	۳۰	۱۰۰	۱۰۰۰	طول μm
-	۵۰	۳۰	۲	۶	عرض μm
۱	۵	۱۰	۱۰	۱۰	ضخامت μm

نمودار توزیع دمایی داغ‌ترین نقطه کاتد در مقابل تغییرات فشار گاز خلأ توسط شبیه‌سازی COMSOL در نمودار شکل ۷ نشان داده شده است. این نمودار بیانگر استقلال دمایی کاتد در مقابل تغییرات فشار گاز در محدوده اندازه‌گیری 10^{-3} تور الی 2×10^{-7} تور است. گزارش کار تحقیقی کاتد ساخته‌شده با فناوری MEMS نشان می‌دهد که اختلاف دمایی وسط کاتد تا کناره‌های آن 160.0°C است [۹]. در حالی که در طرح این مقاله اختلاف دمایی وسط کاتد با کناره‌ها فقط 10°C است.

۳-۲- طراحی شبکه آند (گرید) و کلکتور

جزئیات شبکه آند (گرید) و لایه کلکتور در شکل ۵ قابل‌دسترسی است. شبکه آند از ستون‌های فلزی و یک تیر افقی تشکیل شده است. جنس آن نیکل بوده و با روش الکتروپلیت قابل ساخت است. ابعاد شبکه آند در مقدار حساسیت گنج یونی MEMS تعیین‌کننده است. در صورتی که تعداد ستون‌ها بیشتر باشد الکترون‌های زیادی به ستون‌ها جذب شده و قبل از ورود به محیط یونیزاسیون از فرآیند یونیزاسیون خارج می‌شوند. در صورتی که تعداد ستون‌های آند کم باشند نیروی الکترواستاتیکی برای شتاب الکترون‌ها کاهش می‌یابد و انرژی الکترون‌ها نیز کاهش خواهد یافت. در هر دو حالت کارایی گنج یونی و در نتیجه ضریب حساسیت کاهش خواهد یافت.

برای بررسی عملکرد یونیزاسیون در طرح پیشنهادی این مقاله از شبیه‌سازی CPT (Charged Particle Tracing) در نرم‌افزار COMSOL و نیز تحلیل MATLAB استفاده شده است. شکل ۸ شبیه‌سازی CPT و حرکت ۶۴۰ الکترون در 0.4 نانوثانیه بدون ملاحظه یونیزاسیون و برخورد الاستیک را نشان می‌دهد. این شبیه‌سازی برای به‌دست‌آوردن طول مسیر حرکت الکترون‌ها و نیز انرژی و سرعت آن‌ها به‌کار می‌رود و برای طراحی بسیار مفید است. در این شکل ملاحظه می‌شود که الکترون‌ها از کاتد داغ با پتانسیل 307 خارج شده و به سمت آند با پتانسیل 1507 شتاب می‌گیرند. الکترون‌ها با انرژی $120eV$ به محیط یونیزاسیون وارد می‌شوند. در صورتی که برخورد الاستیک و برخورد یونیزاسیون در این شبیه‌سازی فعال باشند بعضی از الکترون‌ها در اثر برخورد با اتم‌های گاز، آن‌ها را یونیزه کرده و یون‌های مثبت تولید می‌شوند. یون‌های تولیدشده در محیط یونیزاسیون جذب سیم‌های نازک کلکتور با پتانسیل 07 شده و الکترون‌ها نیز جذب رویه سیلیکونی با پتانسیل 1507 می‌شوند.

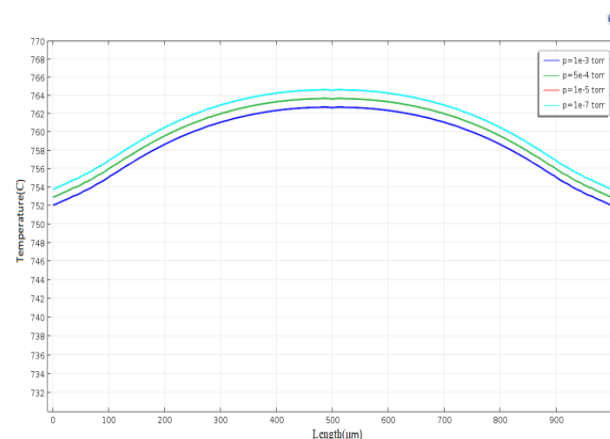
در طراحی گنج یونی بیشترین توجه به رسیدن به ضریب حساسیت بالا است. ضریب حساسیت S از رابطه (۲) به متوسط مسیر حرکت الکترون‌ها (یعنی l) و سطح مقطع یونیزاسیون σ_i (مربوط به نمودار شکل ۱) بستگی دارد.

در این مقاله تابع $l \times \sigma_i$ به‌عنوان عاملی تعیین‌کننده برای رسیدن به حساسیت بالا در گنج یونی تعریف شده است. در این تابع، l بستگی به مشخصات و ابعاد فیزیکی و σ_i بستگی به مشخصات الکترونیکی گنج

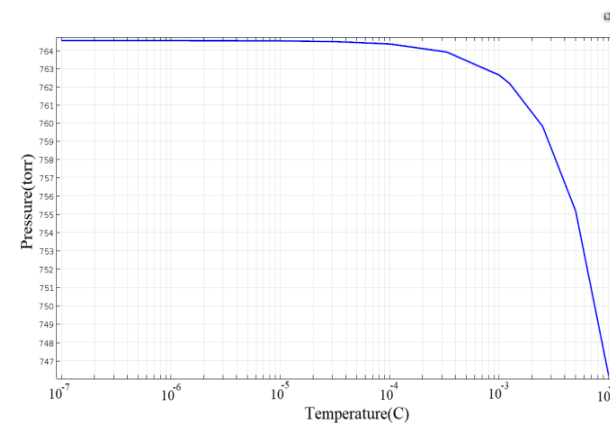
$$k = \frac{k_0}{\left(1 + \frac{7.6 \times 10^{-5} \times T}{p \times d}\right)} \quad (6)$$

در طرح این مقاله، کاتد روی اکسید سیلیکون قرار دارد که قسمت پایین آن حفره U شکل ایجاد شده است. کاتد با لایه اکسید سیلیکون تبادل گرمایی داشته و انرژی گرمایی کاتد از آن طریق به پایه سیلیکونی انتقال می‌یابد و هدررفت گرما محسوب می‌شود. نسبت این هدررفت گرما به پایه سیلیکونی در مقایسه با هدررفت گرما به محیط گاز، از نسبت ضریب انتقال گرمایی اکسید سیلیکون نسبت به هوا به دست می‌آید. این نسبت در فشار ۱ اتمسفر و در کمترین مقدار خود حدود ۵ برابر است که قابل ملاحظه است [۱۸]. در قبال هدررفت گرمای کاتد از طریق اکسید سیلیکون به پایه سیلیکونی، دمایی کاتد در طول آن یکنواخت بوده و با تغییر فشار گاز ثابت می‌ماند، بنابراین نیاز به سیستم کنترل دما نیست.

شکل ۶ شبیه‌سازی تحلیل گرمایی کاتد را نشان می‌دهد که در آن با تغییر فشار گاز در محدوده اندازه‌گیری، دمایی کاتد فقط به مقدار 2°C تغییر می‌کند. اختلاف دمایی بین نقطه وسط و نقاط کناری آن حدود 10°C یعنی $1/3\%$ است که نشان‌دهنده یکنواخت بودن دما در طول کاتد است.



شکل ۶: تحلیل توزیع دمایی در طول کاتد در فشارهای گاز مختلف



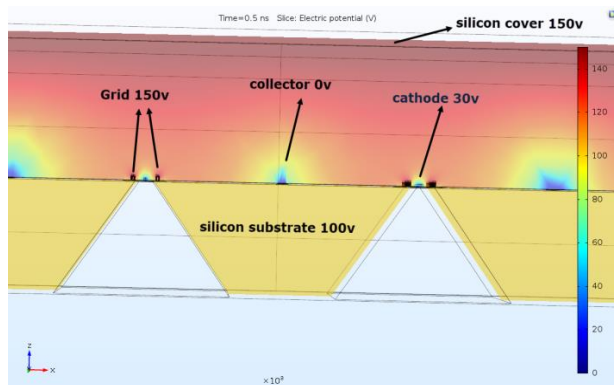
شکل ۷: تغییرات دمایی داغ‌ترین نقطه کاتد بر حسب تغییر فشار گاز

عملیات مشابه می‌توان پارامترها و ابعاد فیزیکی سایر قسمت‌های شبکه آند و کلکتور را به‌دست آورد که در جدول ۲ درج شده‌اند. در گیج یونی غیر MEMS از سیم کلکتور بسیار نازک با ضخامت $10/125\text{mm}$ استفاده می‌شود تا این سیم کمتر در معرض تابش اشعه ایکس قرار گیرد. اشعه ایکس در اثر برخورد الکترون‌ها با قسمت‌های فلزی شبکه آند تولید می‌شوند [۸]. در فشار خلأ HV و UHV وجود اشعه ایکس عامل محدودکننده در اندازه‌گیری خلأ به‌شمار می‌رود. به‌عنوان مثال در یک نوع گیج یونی مرسوم (بایارد آلپرت) در اثر وجود اشعه ایکس، اندازه‌گیری به 3×10^{-10} محدود می‌شود [۲۴]. در طرح این مقاله از سیم بسیار نازک کلکتور یعنی از ۳ عدد کلکتور به پهنای $2\text{ }\mu\text{m}$ استفاده شده است تا خطای تابش اشعه ایکس به حداقل برسد.

جدول ۲: جنس و ابعاد شبکه آند و کلکتور (اعداد به μm)

فاصله تا کلکتور	فاصله تا کاتد	ارتفاع	طول	قطر	تعداد	جنس	ستون آند
۴۵۵	۴۵	۱۵	۳	۱۰	۲۶	نیکل	آند
۴۵۵	۴۵	۵	۱۰۰۰	۱۰	۱	نیکل	تیرک بالایی
-	۵۰۰	۱	۱۲۰۰	۲	۳	نیکل	کلکتور

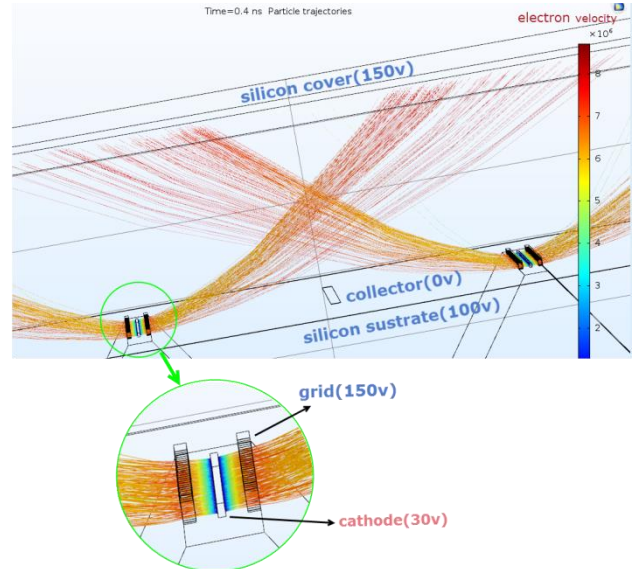
قدرت جذب یون‌های مثبت توسط کلکتور یکی از جنبه‌های کارایی گیج خلأ یونی کاتد گرم محسوب می‌شود. در شکل ۱۰ نمای جانبی گیج خلأ یونی MEMS نشان داده شده است. در این شکل ملاحظه می‌شود که $\{R-1\}$ پتانسیل الکتریکی کلکتور کمتر از قسمت‌های دیگر است، لذا یون‌های مثبت از دیگر قسمت‌ها دور شده و تمایل به جذب در سیم‌های کلکتور دارند.



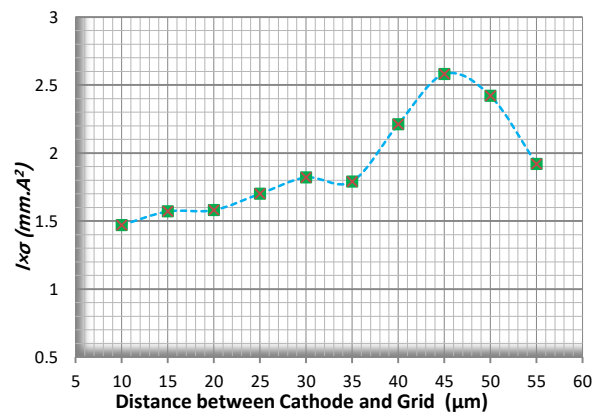
شکل ۱۰: شبیه‌سازی پتانسیل الکتریکی گیج یونی پیشنهادی

در شکل ۱۱ علت جذب شدن یون‌ها در کلکتور بهتر نشان داده شده‌اند. در این شکل میدان الکتریکی در برش مقطعی به‌صورت پیکانه نمایش داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که جهت میدان‌های الکتریکی به سمت سیم‌های کلکتور است.

یونی دارند. با شبیه‌سازی‌های CPT (مانند نمودار شکل ۸) و تحلیل نتایج خروجی آن توسط MATLAB می‌توان I را به‌دست آورد. علاوه بر مقدار متوسط مسیر حرکت الکترون‌ها، انرژی متوسط الکترون‌ها نیز به‌دست می‌آیند. با داشتن انرژی متوسط الکترون‌ها، تابع σ_i از داده‌های منابع معتبر [۱۴، ۲۲، ۲۳] قابل استخراج است.



شکل ۸: شبیه‌سازی حرکت الکترون‌ها بدون برخورد با آنها

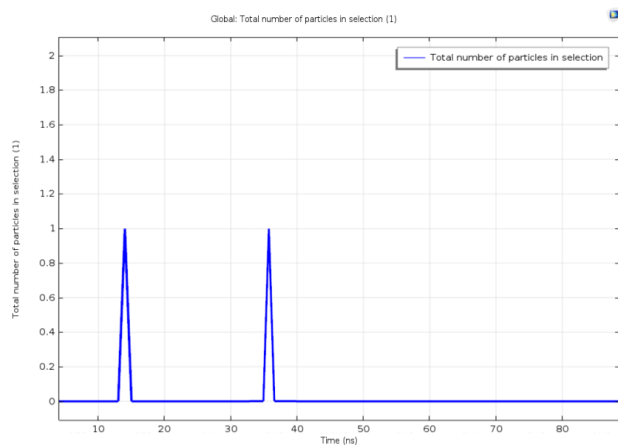


شکل ۹: نمودار تغییر $I \times \sigma_i$ برحسب تغییرات فاصله بین کاتد و آند

فاصله شبکه آند و کاتد یکی از پارامترهای طراحی شبکه آند است. شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که با تغییر فاصله آند تا کاتد از $10\text{ }\mu\text{m}$ تا $55\text{ }\mu\text{m}$ طول متوسط مسیر حرکت الکترون‌ها از $l=1/1056\text{mm}$ تا $l=1/1855\text{mm}$ تغییر می‌کند. همچنین مقدار انرژی متوسط الکترون‌ها از 80 eV تا 110 eV تغییر می‌کند. نمودار شکل ۹ تابع $I \times \sigma_i$ را برای فاصله آند تا کاتد از $10\text{ }\mu\text{m}$ تا $55\text{ }\mu\text{m}$ به نمایش گذاشته است. این نمودار نشان می‌دهد که فاصله بین کاتد و آند در بهترین شرایط $45\text{ }\mu\text{m}$ است.

فاصله $45\text{ }\mu\text{m}$ بین آند و کاتد یکی از پارامترهای طراحی است که در جدول ۲ در ستون مربوطه درج شده است. همچنین با انجام

شکل ۱۳ تعداد و زمان جذب یون‌های مربوط به شبیه‌سازی شکل ۱۲ را نشان می‌دهد. از نتایج این شکل یعنی مجموع یون‌های جذب شده می‌توان ضریب حساسیت را طبق رابطه (۷) محاسبه کرد.



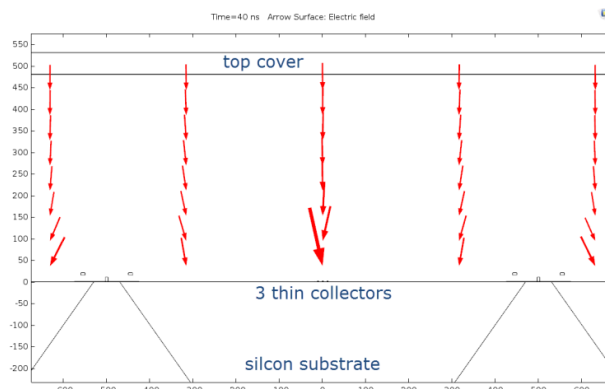
شکل ۱۳: شبیه‌سازی نمایش زمان جذب شدن ۲ عدد یون مثبت توسط کلکتور

$$S = \frac{\text{number of collected ion}}{\text{number of trajected electron}} \times \frac{1}{P} \text{ torr}^{-1} \quad (7)$$

نمودار شکل ۱۴ ضریب حساسیت طرح پیشنهادی این مقاله را نشان می‌دهد که از نتایج چندین بار شبیه‌سازی برخورد الاستیک و برخورد یونیزاسیون توسط COMSOL به دست آمده است. فرآیندهای برخورد الاستیک و برخورد یونیزاسیون تصادفی هستند و باید شبیه‌سازی چندین بار تکرار شود. در این نمودار محدوده اندازه‌گیری گیج یونی طرح شده 2×10^{-7} تور الی 10^{-3} تور است. نمودار شکل ۱۴ نشان می‌دهد که مقدار متوسط ضریب حساسیت تقریباً ۰/۶ است. این مقدار نزدیک به مقدار تخمینی در شروع طراحی است. این مقدار حساسیت در مقایسه با ضریب حساسیت نوع مرسوم که ۱۰ الی ۴۵ است [۸] حداقل ۲۰ برابر کاهش نشان می‌دهد. این نتیجه به‌عنوان یک عیب طرح این مقاله بوده و بهایی است که در مقابل کسب مزایای متعدد پرداخته می‌شود. کاهش ضریب حساسیت باعث کاهش جریان خروجی می‌شود. در فشارهای خلأ خیلی پایین، جریان خروجی کاهش می‌یابد و در این شرایط مدار الکترونیکی دقیق‌تری برای اندازه‌گیری جریان خروجی کلکتور مورد نیاز است. در این مقاله با آرایه ۱۰ عددی از گیج‌های یونی، حداقل فشار خلأ قابل اندازه‌گیری 2×10^{-7} تور حاصل شد.

برای گسترش رنج اندازه‌گیری می‌توان آرایه ۲ بعدی مثلاً آرایه ۱۰ در ۱۰ را به کار برد تا قدرت اندازه‌گیری تا فشار خلأ 2×10^{-8} تور امکان‌پذیر باشد.

در جدول ۳ مشخصات و عملکرد گیج یونی پیشنهادی و نوع مرسوم (غیر MEMS) با هم مقایسه شده‌اند. این جدول نشان می‌دهد که گیج یونی MEMS پیشنهادی از نظر ضریب حساسیت کمتر از نوع

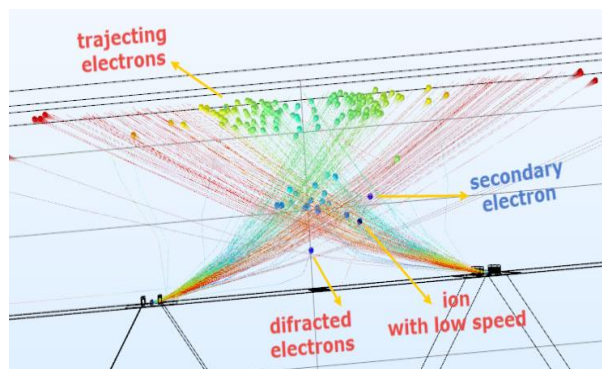


شکل ۱۱: نمایش جهت میدان الکتریکی به صورت پیکانه در برش مقطعی فضای یونیزاسیون

۴- محاسبه ضریب حساسیت گیج یونی MEMS

توسط ابزار و روش‌های شبیه‌سازی (که در بخش قبلی معرفی شدند) می‌توان طرح بهینه‌ای برای مشخصات فیزیکی، هندسی و الکتریکی گیج یونی MEMS ارائه کرد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی و در شرایط بهینه، مقدار متوسط انرژی الکترون‌ها حدود ۱۱۰ eV و طول متوسط مسیر الکترون‌ها $l = 1/855 \text{ mm}$ حاصل می‌شوند. با داشتن انرژی متوسط الکترون‌ها، سطح مقطع یونیزاسیون σ_i از نمودار شکل ۱ یا جداول منابع معتبر [۱۳، ۱۵] قابل دستیابی است.

برای به دست آوردن ضریب حساسیت که در شبیه‌سازی این مقاله ارائه شده است، تعداد یون‌های جمع‌آوری شده توسط کلکتور به تعداد الکترون‌های ره‌اشده از کاتد (در فشار معین) تقسیم می‌شوند که رابطه (۵) آن را نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی این روش لازم است داده‌های برخورد الاستیک و برخورد یونیزاسیون از جداول مراجع معتبر [۱۴، ۲۲، ۲۳] به نرم‌افزار COMSOL تعریف گردد.



شکل ۱۲: شبیه‌سازی برخورد الاستیک، یونیزاسیون و تولید یون مثبت و الکترون ثانویه در اثر حرکت ۳۲۰ الکترون در حضور گاز نیتروژن با فشار ۰/۱ تور

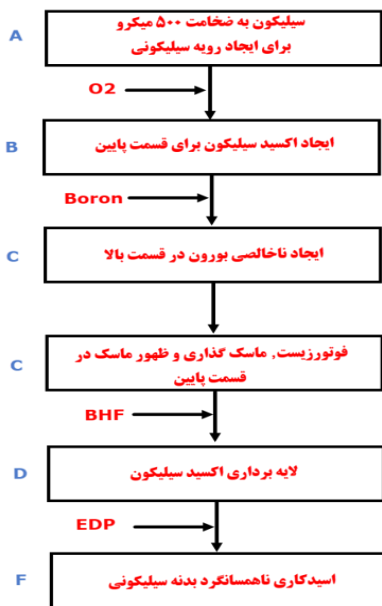
شکل ۱۲ شبیه‌سازی CPT مربوط به حرکت ۳۲۰ الکترون ره‌اشده از کاتد را نشان می‌دهد. در این شکل یون‌های مثبت تولید شده و نیز تغییر مسیر حرکت الکترون‌ها در اثر برخورد الاستیک و برخورد یونیزاسیون نشان داده شده‌اند. همچنین در این شکل تولید الکترون‌های ثانویه به‌طور مشخص ملاحظه می‌گردد.

۵- پروسه پیشنهادی برای ساخت

پروسه مربوط به ساخت قسمت رویه سیلیکونی به صورت دیاگرام گردش در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. در این پروسه، ابتدا یک لایه نوع p به ضخامت تقریبی $50 \mu\text{m}$ توسط نفوذ ناخالصی بور ایجاد می شود. این لایه به عنوان توقف لایه برداری توسط EDP عمل می کند. این ناخالصی همچنین یک ناحیه نوع p تشکیل می دهد که رسانایی بالایی داشته و امکان جمع آوری الکترون ها را فراهم می آورد. در این پروسه یک غشاء به ضخامت $50 \mu\text{m}$ و نیمه هادی نوع p در رویه سیلیکون ایجاد می گردد.

پروسه ایجاد ۱۰ عدد حفره در قسمت زیرین پایه سیلیکونی هم مشابه پروسه شکل ۱۵ است. ناخالصی بور در این پروسه نفوذ داده نمی شود و مرحله C وجود ندارد.

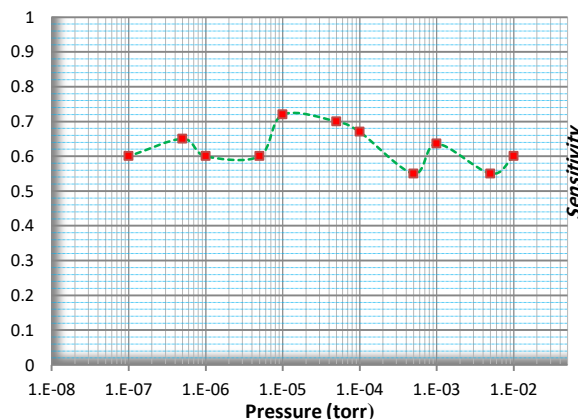
در طرح این مقاله بیشترین حجم کاری پروسه ساخت، مربوط به قسمت بالای پایه سیلیکونی است. در این پروسه ساخت، لایه های نیکل و طلا و اتصال دهنده های آنها در ضخامت های متفاوت به کار رفته اند، بنابراین در این بخش پروسه ساخت قسمت بالای پایه سیلیکونی در دو مرحله ارائه می شود. در مرحله اول لایه نیکل و لایه طلا ایجاد می شوند و در مرحله دوم کاند و آند که ارتفاع بلندتری نسبت به بقیه قسمت ها دارند ایجاد می شوند.



شکل ۱۵: دیاگرام گردش پروسه ساخت رویه سیلیکونی

شکل ۱۶ قسمت بالای پایه سیلیکونی را نشان می دهد که در آن لایه نیکل و طلا مشخص شده اند. در این شکل همچنین آندا، کاتدها و کلکتورها و ارتباطات الکتریکی بین آنها مشخص شده اند.

گنج یونی نوع مرسوم بوده و همچنین به مدار اندازه گیری جریان دقیق تری نیاز است.



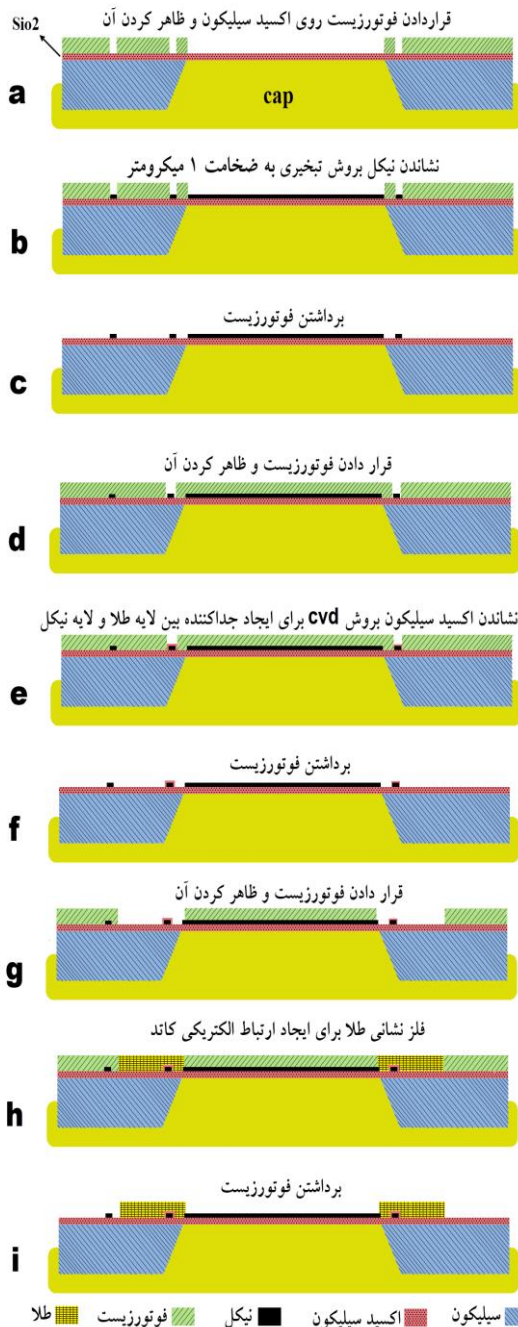
شکل ۱۴: شبیه سازی ضریب حساسیت گنج یونی پیشنهادی در فشارهای خلاً مختلف

جدول ۳: مقایسه گنج یونی کاند گرم پیشنهادی MEMS و گنج یونی کاند گرم غیر MEMS (بایارد آلبرت)

	گنج خلاً یونی کاند گرم نوع MEMS (پیشنهادی)	گنج خلاً یونی کاند گرم بایارد آلبرت (مرسوم) [۸، ۱۱]
ضریب حساسیت	۰/۵-۰/۷	۱۰ - ۲۰
اندازه (mm ³)	۶	۳۳۱۱۷
توان مصرفی (وات)	۰/۶۹۲	۳۰
نیاز به حس گر دما و مدار کنترل	ندارد	دارد
نیاز به مدار دقیق اندازه گیری جریان کوچک	دارد	ندارد
حداقل فشار خلاً قابل اندازه گیری	3×10^{-7} تور	10^{-12} تور
حداکثر فشار خلاً قابل اندازه گیری	10^{-3} تور	10^{-3} تور
پروسه دشوار و تولید انبوه	پروسه راحت و تولید انبوه	پروسه ساخت و تولید انبوه
تکی	ندارد	قابلیت تولید مجدد
دمای کار فیلمان کاند	۷۵۰ □	۱۷۰۰ □ - ۲۳۰۰ □

در جدول ۳ به جز دو مورد در بقیه موارد گنج یونی پیشنهادی این مقاله نسبت نوع مرسوم برای اندازه گیری خلاً تا مقدار 3×10^{-7} تور، از تمامی مزیت های ذکر شده در جدول ۳ برخوردار است.

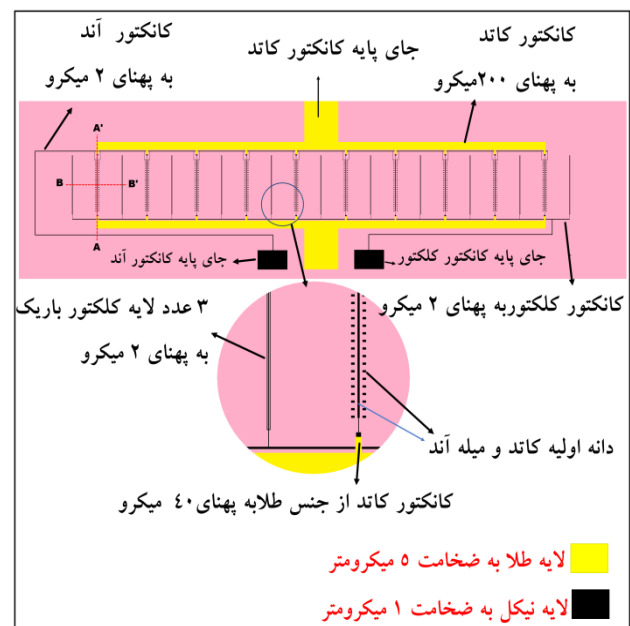
فلز با ارتفاع بلند، لیتوگرافی ضخیم با روش های متفاوت امکان پذیر است [۲۶].



شکل ۱۷: نمایش پروسه های نشان دادن لایه نیکل به ضخامت ۱μm و لایه طلا به ضخامت ۵μm در قسمت بالای پایه سیلیکونی و مشخصات هر کدام از آن ها با ذکر ابعاد و جنس هر کدام

در شکل ۱۸ پروسه های ایجاد کاتد و دو دسته آند در برش طولی BB' (مربوط به شکل ۱۶) نشان داده شده اند. در این شکل کاتد با ارتفاع ۱۰μm، ستون های آند با ارتفاع ۱۵μm و تیرک افقی آند با روش ۵μm ایجاد می شوند. در مجموع نیکل با ضخامت ۲۰μm با روش الکتروپلیت ایجاد می شود. این عمل در ۳ قدم اجرا می شود که هر قدم

همچنین جنس لایه ها ذکر شده و در مورد ابعاد هر کدام توضیحاتی داده شده اند. در این شکل دو لایه نیکل به ضخامت ۱μm و طلا به ضخامت ۵μm دیده می شوند. لایه نیکل تشکیل دهنده کلکتور و کانکتورها بوده و نیز برای آند و کاتد، دانه اولیه محسوب می شود. ارتفاع کاتد و آند بیشتر از ۱۰μm است و ایجاد آن با فلز نشانی یا لایه نشانی معمولی مقدور نیست، بنابراین یک لایه نازک به ضخامت ۱μm به عنوان دانه اولیه ایجاد می شود و سپس طی عمل الکتروپلیت ضخامت مورد نظر تحقق می یابد. طلا دارای نقطه ذوب بالای ۱۰۰۰°C است و استفاده از آن در کنار کاتد از جنس نیکل (که تا ۷۵۰°C داغ می شود)، اطمینان بخش است. همچنین لایه طلا با داشتن ضخامت ۵μm و پهنای ۴۰μm برای برقراری ارتباط الکتریکی هر کاتد و انتقال جریان الکتریکی ۱۷۷mA مناسب است [۲۵].



شکل ۱۶: قسمت بالای پایه سیلیکونی و مشخصات هر کدام از قسمت ها با ذکر ابعاد و جنس هر کدام

در شکل ۱۷ پروسه ایجاد لایه های نیکل و طلا در برش عرضی AA' (مشخص شده در شکل ۱۶)، نشان داده شده اند. در این پروسه لایه نیکل به ضخامت ۱μm برای ایجاد کلکتور، دانه اولیه ستون های آند، دانه اولیه کاتد و ارتباطات الکتریکی آن ها به کار رفته است. ارتباطات الکتریکی کاتد توسط طلا به ضخامت ۵μm صورت می گیرد. در این پروسه ساخت، ۳ قدم ماسک گذاری پیشنهاد شده است. قدم اول برای نشان دادن لایه نیکل و قدم سوم برای نشان دادن لایه طلا است. با توجه به برش AA' یک لایه جداکننده بین لایه طلا و لایه نیکل مورد نیاز است که در قدم دوم توسط لایه نشانی اکسید سیلیسیم با پروسه CVD فراهم می گردد.

مرحله دوم ایجاد کاتد و آند از جنس نیکل با ارتفاع بلند است. در این مقاله روش الکتروپلیت برای ایجاد لایه های فلزی با ضخامت بالا (که در اینجا بالای ۱۰μm است) پیشنهاد شده است. برای ایجاد لایه

مرحله a تا مرحله d در شکل ۱۸ مربوط به قدم اول و ایجاد کاتد به طور کامل است. پروسه های e و f مربوط به قدم دوم و تکمیل ستون های آند، پروسه های g و h مربوط به ایجاد تیرک افقی آند هستند. در پروسه i لایه نشانی فلز قلیایی بر سطح کاتد صورت می گیرد. روکش نازک اکسید فلز قلیایی، بر سطح کاتد (طبق مطالب بخش ۳)، تابع کار کاتد را به ۱/۱ eV کاهش می دهد. کاهش تابع کار کاتد، پرتوافکنی آن در دمای پایین تر از ۷۵۰ K را ممکن می سازد.

۶- نتیجه

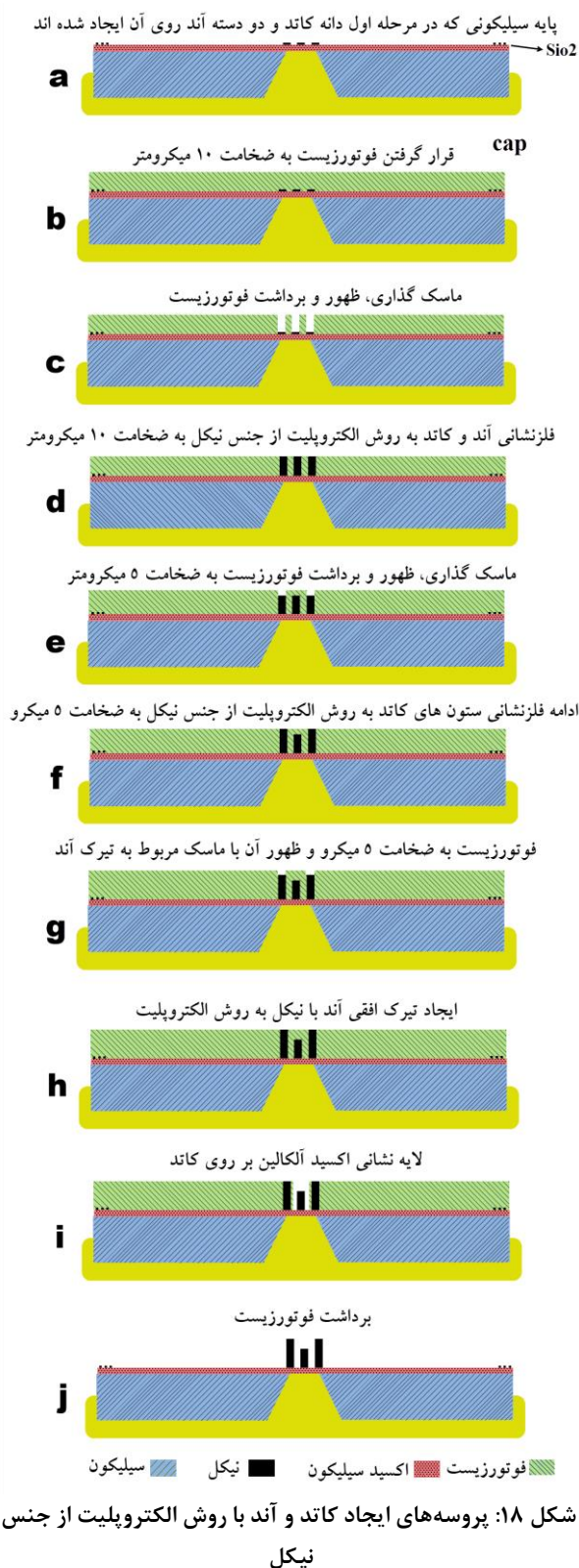
ایده گیج یونی کاتد گرم مبتنی بر فناوری MEMS و به صورت آرایه ای در این مقاله ارائه شد. این ایده امکان پیاده سازی گیج یونی در ابعاد خیلی کوچک را بررسی کرد. روند طراحی قسمت ها متناسب با فناوری MEMS و پروسه ساخت پیشنهادی ارائه شد. تحلیل های الکتریکی، حرارتی، یونیزاسیون و برخورد الاستیک توسط شبیه سازی COMSOL انجام گرفت.

با آرایه کردن ۱۰ عددی گیج یونی جریان خروجی افزایش یافته و در نتیجه محدوده اندازه گیری ۱۰ برابر بهبود داده شد. با پیشنهاد آرایه کردن دو بعدی مثلاً ۱۰×۱۰ می توان قدرت اندازه گیری را ۱۰۰ برابر افزایش داد و خلأهای خیلی پایین را اندازه گرفت. در این مقاله کاتد برای حداقل فشار خلأ اندازه گیری ۱۰^{-۷}×۲ طرح شد. طرح کاتد مطابق فناوری MEMS بوده و در دمای ۷۵۰°C پرتوافکنی می نماید. طراحی کاتد طوری است که دما در طول آن یکسان بوده و فقط ۱/۳٪ تغییر می کند. کاتد در محدوده اندازه گیری مستقل از تغییرات فشار خلأ است و فقط ۲°C تغییر می کند. در این مقاله یک ایده برای ایجاد شبکه آند پیشنهاد شد که با فناوری MEMS قابل پیاده سازی است. طرح پیشنهادی مشابه حس گر پیرانی مبتنی بر فناوری MEMS، دارای رویه و پایه سیلیکونی است و می تواند به صورت مجتمع با آن ساخته شود. رویه سیلیکونی الکترون ها را جمع آوری می کند در حالی که اشعه ایکس در اثر برخورد الکترون ها به حداقل می رسد. در این مقاله از روش جدیدی برای شبیه سازی استفاده گردید و از نتایج آن برای طرح قسمت های مختلف در شرایط عملکرد بهتر استفاده شد. بر اساس نتایج این شبیه سازی ضریب حساسیت محاسبه گردید که نشان می دهد مقدار آن در این طرح ۰/۶ است.

سیاس گذاری

نویسندگان این مقاله، بدین وسیله از اعضای هیئت تحریریه مجله علمی- پژوهشی مهندسی برق دانشگاه تبریز تشکر می نمایند و نیز از همکاری که اطلاعات ارزشمندی را در اختیار ما گذاشتند و از داوران محترم که با نظرات ارزشمند خود ما را راهنمایی نمودند تشکر می نمایند.

شامل مراحل فوتورزیست، ماسک گذاری، ظهور، برداشتن فوتورزیست و الکتروپلیت نیکل می باشند.



شکل ۱۸: پروسه های ایجاد کاتد و آند با روش الکتروپلیت از جنس نیکل

Journal of the Vacuum Society of Japan, vol. 59, no. 6, pp. 156-159, 2016.

- [14] Y. K. Kim and J. P. Desclaux, "Ionization of carbon, nitrogen, and oxygen by electron impact," Journal of Physical Review A, vol. 66, no. 1, pp. 66 012708(1-12), 2002.
- [15] T. Grzebyk, A. G. Drzazga, J. A. Dziuban and K. Maamari, "Integration of a MEMS-type vacuum pump with a MEMS-type Pirani pressure gauge," Journal of Vacuum Science & Technology B, vol. 33, no. 3, pp. 03C103(1-6), 2015.
- [16] MKS instrument Inc., *shrinking thepirani vacuum gauge*, <http://www.johnmorris.com.au>.
- [17] Talking electronics, *Electron Emission*, <http://www.talkingelectronics.com>.
- [18] Electronic cooling, *The Thermal Conductivity of Air at Reduced Pressures and Length Scales*, <https://www.electroniccooling.com>.
- [19] B. David, *Introduction to Gas Discharges*, University of Notre Dame, Notre Dame, 2012.
- [20] Keysight Technologies, Femto Picoammeter and Electrometer High Resistance Meter, <https://www.amplicon.com>.
- [21] Electronic Afzar Azama, *pico Amperemeter*, <http://www.irannano.org>
- [22] K. Tamm, C. Mayeux, L. Sikk, J. F. Gal and P. Burk, "Theoretical modeling of sensitivity factors of Bayard-Alpert ionization gauges," Journal of International Journal of Mass Spectrometry, vol. 341-342, pp. 52-58, 2013.
- [23] Y. Itikawa, "Cross Sections for Electron Collisions with Nitrogen Molecules," Journal of Physical and Chemical Reference Data, vol. 35, no. 1, pp. 31-53, 2006.
- [24] MKS instrument inc., Mini Ion Gauge (MIG), *Hot Cathode Ionization Pressure Vacuum Sensor*, <https://www.mksinst.com>.
- [25] B. Razavi, RF Microelectronics, 2nd Edition, Prentice Hall, 2011.

[۲۶] علیرضا شمسی، سعید دلآرام فریمانی و احمد عقیفی، «استفاده از روش لیتوگرافی نرم جهت ایجاد میکروساختارها روی بستر آب‌دوست شده پلیمر»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۲، صفحات ۱۳۳-۱۲۷، ۱۳۹۵.

مراجع

- [1] L. Zhang, B. Jiao, S. Yun, Y. Kong, C. Ku and D. Chen, "A CMOS Compatible MEMS Pirani Vacuum Gauge with Monocrystal Silicon Heaters and Heat Sinks," Journal of Chinese Physics Letters, vol. 34, no. 2, pp. 025101(1-4), 2017.
- [2] S. M. Piotto, S. D. Cesta and P. Bruschi, "A Compact CMOS Compatible micro-Pirani Vacuum Sensor with Wide Operating Range and Low Power Consumption," Journal of Procedia Engineering, vol. 168, pp. 766-769, 2016.
- [3] F. Zhang, Y. Zhen, B. Tang, W. Su and Z. Tang, "Design and Fabrication of High Vacuum Gauge Based on Micro Hotplate," Trans Tech Publications, vol. 645, 2015.
- [4] F. O. Hanlon, *User's Guide to Vacuum Technology*, John Wiley and sons, Newyork, 2004.
- [5] MKS instrument Inc., *Technical Brochure of 999 Quattro multisensor vacuum transducer*, <https://www.mksinst.com/docs/ur/pin999.aspx>.
- [6] MKS instrument Inc., *Series 943 operation and maintenance manual cold cathode Vacuum Sensor System*, <https://www.mksinst.com>.
- [7] T. Grzebyk and A. G. Drzazga, "MEMS type ionization vacuum sensor," Journal of Sensors and Actuators A, Physical, vol. 246, pp. 148-155, 2016.
- [8] Stanford research Systems, *Bayard-Alpert Ionization Gauges*, <http://www.thinksrs.com>.
- [9] J. Q. Wang and J. Yu, "Fabrication Process and Electro-Thermal Modeling for the Cathode of the CMOS-Compatible Hot-Filament Vacuum Gauge", Key Engineering Materials, vol. 645-646, pp. 836-840, 2015
- [10] S. M. Bazarchi, E. A. Sani, "Micromachined Ionization Vacuum Gauge and Improve its Sensitivity with Magnetic Field," Eurasian Journal of Analytical Chemistry, vol.12(7b), pp. 1137-1151, 2017
- [11] Stanford research Systems, *Bayard-Alpert Ionization Gauges*, <http://www.thinksrs.com>.
- [12] T. Grzebyk, A. G. Drzazga and J. A. Dziuban, "Glow-discharge ion-sorption micropump for vacuum MEMS," Journal of Sensors and Actuators A: Physical, vol. 208, pp. 113-119, 2014.
- [13] S. Suginuma, M. Hirata and T. Kobata, "Simulation of Relative Sensitivity Coefficient of Bayard-Alpert Gauge,"

زیر نویس‌ها

- ^{۱۰} Anisiotrpoic
- ^{۱۱} Electro emission
- ^{۱۲} Thermal emission
- ^{۱۳} Richeadson Dashman
- ^{۱۴} Etch stop
- ^{۱۵} seed
- ^{۱۶} Insulator
- ^{۱۷} Chemical Vapor Deposiyion

- ^۱ High Vavuum
- ^۲ Ultra High Vacuum
- ^۳ Bayard Alpert Gauge
- ^۴ pirani
- ^۵ Anchor
- ^۶ Connector
- ^۷ Grid
- ^۸ Ionization Cross section
- ^۹ Anodic Bound