طراحی گیج خلاً یونی کاتد گرم به صورت آرایه مبتنی بر MEMS

ابراهیم عباسپور ثانی'، دانشیار؛ صادق محمدزاده بازارچی'، استادیار

e.abbaspour@urmia.ac.ir – دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه ارومیه - ارومیه - ایران - s.mohammadzadeh@urmia.ac.ir ۲-دانشکده فنی شهید قاضی طباطبایی- دانشگاه فنی و حرفهای کشور- ارومیه - ایران- s.mohammadzadeh@urmia.ac.ir

چکیده: اندازه گیری خلاً HV و 'UHU تا فشار ^{۱۲}-۱۰ تور از سال ۱۹۵۰ میلادی تاکنون با گیچ یونی کاتد گرم موسوم به 'بایارد آلپرت'' انجام می گیرد. کارهای تحقیقاتی انجامشده روی گیچ یونی نوع MEMS کافی نبوده و تاکنون تجاریسازی نشده است. در این مقاله انواع حس گر خلاً نوع MEMS و غیر MEMS که بتوانند خلاً HV و UHU را اندازه بگیرند، معرفی می شوند. این مقاله یک ایده گیچ خلاً یونی مبتنی بر فناوری MEMS بهصورت آرایه و نیز طراحی و شبیه سازی آن را ارائه می کند. اندازه گیچ یونی پیشنهادی ''Tmm' ×۵×۱ بوده و حداقل ۳۰۰۰ برابر کوچک تر از نوع مر سوم (بایارد آلپرت) است. مصرف توان الکتریکی در این طرح ۵۰ برابر کمتر از نوع مر سوم است. ساختار طرح پیشنهادی شامل کلکتور، کاتد و شـبکه آند از نوع مرسـوم متفاوت بوده و مبتنی بر فنّاوری MEMS اسـت. کاتد در این طرح از جنس نیکل بوده و میتواند در دمای ۵۰۰% الکترون فکنی نماید. طرح کاتد طوری است که دما در طول آن تقریباً یکنواخت و مستقل از فشار خلاً است. طرح پیشنهادی دارای ضریب حساسیت ۶/. در محدوده اندازه گیری ^۲-۱۱ الی ^۲-۱۰ برا ست. خان طرح ۲۰ برابر کمتر از نوع مر سوم است. ساختار طرح پیشنهادی دامای ۲۵۰۷ در الکترون فکنی نماید. طرح کاتد طوری است که دما در طول آن تقریباً یکنواخت و مستقل از فشار خلاً است. طرح پیشنهادی دارای ضریب حساسیت ۶/. در محدوده اندازه گیری ^۲-۱۱ الی ^۲-۱۰ برا ست. طرح ۲۰ برابر کمتر از نوع مرسوم است. طرح پیشنهادی دارای ضریب حساسیت

واژههای کلیدی: گیج یونی MEMS، حسگر خلأ MEMS، گیج یونی کاتد گرم، گیج بایارد آلپرت، حسگر خلاً.

Design of Hot Cathode Ion Gauge Array and MEMS Type

E. Abbaspour Sani¹, Assocaite 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 $12\text{mm}\times5\text{mm}\times1\text{mm}$ 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: ۱۳۹۶/۰۳/۲۷ تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۲۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۲۱ نام نویسنده مسئول: ایران– ارومیه– خیابان شهید بهشتی– دانشگاه ارومیه (پردیس شهر) – مرکز تحقیقات میکروالکترونیک و میکروماشین

۱ – مقدمه

اندازه گیری خلأ روش های مختلفی دارد. ســـه روش الکترونیکی رایج وجود دارند که می توانند با فنّاوری MEMS ساخته شوند. این روشها شــامل حسگر پیرانی ، گیج یونی کاتد ســرد و گیج یوئی کاتد گرم هســتند. حس گر پیرانی در اثر تغییر ضـریب هدایت گرمایی گاز در اثر تغییر فشار گاز عمل میکند. محدوده اندازه گیری خلاً در این حس گر MEMS الی ۷۵ تور است. حس گر پیرانی مبتنی بر فنّاوری MEMS توسط شرکتهای POSIFA ، Xensor و MKS در انواع بستهبندی استاندارد LCC-20 و TO-5 توليد شدهاند ولي حس گر پيراني توانايي اندازهگیری فشــار خلأ کمتر از ^۴-۱۰ تور را ندارد [۳–۱]. در روش دوم گيج خلأ يوني كاتد سـرد با يونيزاسـيون گاز عمل ميكند. محدوده اندازه گیری این نوع گیج یونی در محدوده ^۳-۱۰ الی ^{۱۱-}۱۰ تور است [۴، ۵]. نمونهای از آن گیج یونی، محصـول شـرکت MKS با توانایی اندازه گیری خلأ پایین تا حد ۱۰-۱۰ تور است [۶]. کار تحقیقی روی گیج یونی کاتد سرد مبتنی بر فنّاوری MEMS در اندازه ۲۰×۱۲×۲۰×۲۰ ارائه شده است. این گیج یونی توانایی اندازه گیری خلأ ۰/۱۵ الی ^۷-۱۰×۷/۵ تور را دارد [۷]. روش ســـوم گیج یونی کاتد گرم و رقیب گیج یونی کاتد سرد است. در این گیج یونی بهدلیل اکسیدشدن فیلمان کاتد و کاهش عمر آن و نیز بهدلیل رفتار غیرخطی در ف شارهای بالاتر از ^۳ - ۱۰ تور، امکان اندازه گیری ف شارهای بالاتر از ۱ میلی تور وجود ندارد [۸]. این نوع گیج یونی بهدلیل داشتن قابلیت اندازه گیری فشارهای خلأ بسیار پایین UHV، مورد توجه بوده است. کارهای تحقیقی انجامشده بر روی نوع MEMS این گیج یونی کافی نبوده و منجر به تجاری سازی آن نشده است. در سال ۲۰۱۵ ساخت یک کاتد با فنّاوری MEMS ارائه شـده اسـت. این کاتد می تواند کاتد گیج یونی MEMS را تشکیل دهد [۹]. این کاتد از جنس تنگستن بوده و در دمای بالای ℃۱۸۰۰ کار می کند [۹]. در مرجع [۱۰] شبیه سازی مربوط به گیج یونی کاتد گرم در ابعاد میکروماشین ارائه شده است. در این کار تحقیقی با اعمال میدان مغناطیسی ضریب حسا سیت بهبود داده شـده اسـت ولي به فنَّاوري MEMS پرداخته نشـده اسـت. مقاله حاضر سعی دارد طرحی کامل از گیج یونی کاتد گرم و مبتنی بر فنّاوری MEMS ارائه دهد.

اندازه هردوی گیجهای یونی کاتد گرم و کاتد سرد نوع مرسوم، بزرگ بوده و توان مصرف بالایی دارند. در یک نمونه گیج یونی مر سوم (بایارد آلپرت)، اندازه قطر "۱ و ارتفاع آن "۲/۷ بوده و دارای توان مصرف ۳۰۰ است [۱۱]. در صورت پیادهسازی نوع MEMS این گیج یونی، اندازه گیج یونی بیش از ۳۰۰۰ برابر کاهش یافته و توان مصرف نیز MEMS حدود ۵۰ برابر کمتر می شود. گیج خلاً یونی مبتنی بر فنآوری 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

پاسے و افزایش قابلیت بازتولید، از مزایای دیگر هسیتند. همچنین می توان به توانایی مجتمع سازی با مدار الکترونیکی به عنوان مزیت دیگر اشاره کرد. قابلیت ایجاد خلاً در محیطهای خیلی کوچک بهعنوان پمپ خلأ از کاربردهای دیگر گیج یونی MEMS به شـمار می رود [۱۲،۵]. طراحی و ساخت حس گر خلأ یونی با فنّاوری MEMS روشی مؤثر در اندازه گیری فشــار خلأ خیلی پایین اســت. طرح این مقاله قدمی در نزدیک شدن به اهداف ذکر شده در بالا است. این مقاله تلاش کرده است جوانب و مشکلات پیادهسازی مبتنی بر فنّاوری MEMS را در نظر گرفته و برای آنها راه کار ارائه دهد. یکی از این مشکلات، محدودیت اندازه گیری جریان الکتریکی بسیار کوچک (کمتر از پیکوآمپر) است. در فشارهای خلاً پایین *ت*ر مانند ^۲ - ۱۰ 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 فنّاوری بومی جریان خروجی گیج یونی را اندازه گرفت. پیاده سازی کاتد در فنّاوری MEMS متفاوت از گیج نوع مرسوم است. با استفاده از فنّاوری MEMS کاتد می تواند به صورت یک میله ساخته شود که در کناره ها به پایه نگه دارنده و کانکتور متصل گردد. با اتصال کاتد به ٔ پایه نگهدارنده و کانکتور، دمای آن در محل اتصال (کنارهها) کاهش می یابد، به عبارتی دمای وسط کاتد بسیار داغتر از کنارههای کاتد می شود. در طرح پیشنهادی این مقاله، روشی پیشینهاد شده است که دمای کاتد در طول آن تقریباً ثابت مىماند. همچنين با ارائه روش پيشنهادى اين مقاله، كاتد طورى طرح شده که دمای آن به فشار گاز مورد اندازه گیری وابسته نیست. در صورت پیادهسازی این طرح دیگر نیازی به سیستم اندازه گیری و کنترل دمای کاتد نیست. گیج خلأ یونی مرسوم دارای یک شبکه آند استوانهای سیمی، موسوم به گرید است که سیم خیلی نازک کلکتور در و سط گرید قرار گرفته است [۴]. پیادهسازی شبکه آند مشابه گیج یونی مرسوم (بایارد آلپرت) در فنّاوری MEMS دشوار بهنظر میرسد. در این مقاله روشیی متفاوت برای پیادهسازی آند و قابل ساخت با فنّاوری MEMS پیشینهاد شده است. در این مقاله شیبیهسازی فرآیند یونیزاسیون گاز، توسط برنامه COMSOL انجام شده است. با به کاربردن این برنامه جزئیات برخورد الاستیک و برخورد منجر به یونیزاسیون بهدست مى آيند. اين جزئيات شامل طول مسير حركت الكترونها، سطح مقطع يونيزاسيون، فركانس يونيزاسيون، سرعت الكترونها، انرژى الكترونها و غيره مي باشند. با استفاده از اين شبيه سازي ابعاد فيزيكي، هندسی و نیز مشخصات الکتریکی قسمتهای گیج یونی بهدست مى آيند. اين مقاله طرح پيشــنهادى را در شــرايط عملكرد بهينه و ر سیدن به ضریب حساسیت بالا در نظر گرفته است. مقاله حاضر یک پروسه پیشنهادی برای ساخت قسمتهای گیج یونی کاتد گرم مبتنی بر فنَّاوری MEMS بهصورت مرحلهای ارائه کرده است.

در این مقاله در بخش ۲ اســاس کار گیج خلأ یونی کاتد گرم و ارائه میشـود. در این بخش سـیسـتم کار گیج یونی کاتد گرم معرفی شده و سپس طرح پیشنهادی این مقاله معرفی می گردد. در بخش ۳ طراحی گیچ خلأ یونی کاتد گرم مبتنی بر فنّاوری MEMS در دو زیربخش جداگانه برای طراحی کاتد و نیز طراحی آند و کلکتور ارائه میشوند. در بخش ۴ ضریب حساسیت گیچ خلأ یونی کاتد گرم MEMS با رابطهای جدید محا سبه و به صورت نمودار ارائه می شود. در بخش ۵ پروسه پیشنهادی ساخت طرح این مقاله بههمراه جزئیات لازم ارائه خواهد شد و در نهایت در بخش ۶ نتیجه گیری از نتایج تحلیلهای بهدست آمده در این طرح پیشنهادی، ارائه می شود.

۲- اساس کار گیج خلأ یونی کاتد گرم مبتنی بر فنّاوری MEMS

گیج خلأ یونی با یونیزاسیون گاز در اثر تابش الکترونها از کاتد گرم کار می کند. عبور جریان الکتریکی سیم کاتد را داغ کرده و شرایط لازم برای تابش الکترونها فراهم می آید. الکترونها با شتاب بهسمت آند حرکت می کنند. الکترونها در مسیر حرکت خود با برخورد به اتمهای گاز باعث یونیزهشدن بعضی از آنها می شوند. میزان یونیزاسیون بستگی به فشار گاز و انرژی الکترونها دارد. مطابق شکل ۱ با ایجاد اختلاف پتانسیل ۱۲۰۷ بین آند و کاتد و رساندن الکترونها به انرژی حدود ۱۰۰۷ بیشترین راندمان تولید یونها حاصل می شود [۱۳، ۱۴]. بونهای مثبت تولید شده جذب سیم کلکتور شده و جریان کلکتور را تشکیل می دهند. از آن جایی که در فرآیند یونیزاسیون در گیج یونی، اتمهای گازی مصرف می شوند از این فرایند می توان در تولید خلأ در



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

یونهایی که جذب کلکتور میشوند یک جریان Ic تولید میکنند که این جریان با رابطه (۱) بیان میشود [۴، ۸]. در این رابطه پارامترهای P فشار برحسب تور، Ic جریان الکترونهای تولیدشده و تابششده توسط سیم کاتد، S ضریب حساسیت گیج یونی با واحد l/torr و m S ضریب حساسیت نسبی هر گاز نسبت به گاز نیتروژن میباشند. Sr هر گاز از نسبت سطح مقطع یونیزاسیون آن گاز (مانند اکسیژن) نسبت به گاز نیتروژن بهدست میآید ($m S_{T=\sigma}_{gas}(\epsilon)/\sigma_{N2}$).

$$lc = S \times Sr \times Ie \times P \tag{1}$$

ضریب حساسیت S بستگی به ابعاد فیزیکی و مشخصات الکتریکی گیج خلاً یونی دارد. داشـتن حسـاسـیت بالا به گیج یونی امکان میدهد که بتواند خلاً با فشارهای تا UHV را اندازه گیری نماید.

در اثر برخورد الکترونهای انرژیدار با سیمهای آند، اشعه ایکس تولید می شود. برخورد اشعه ایکس به سیم کلکتور باعث فرار الکترونها از کلکتور شده و یک جریان خطا ایجاد می کند. با وجود این جریان خطا نمی توان فشارهای خلاً تا UHV را اندازه گیری کرد. برای کاهش اثر تابش اشعه ایکس، سیم کلکتور نازک انتخاب می شود تا کمتر در معرض اشعه ایکس قرار گیرد. از طرف دیگر نازک شدن سیم کلکتور باعث کاهش ضریب حسا سیت می گردد، این عوامل باعث می شود که در انتخاب ضخامت سیم کلکتور یک مصالحه صورت می گیرد [۸].

رابطه (۲) وابستگی ضریب حساسیت گیج خلاً یونی به دما و دیگر مشخصات را نشان میدهد [۸]. واحد ضریب حساسیت ۲/torr بوده و مقدار عددی آن در نوع مر سوم ۱۰ الی ۴۵ گزارش شده است [۸]. در این رابطه، I 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 نمواد ۱ این وابستگی نشان داده شده است.

$$S = \sigma_i \cdot \frac{l}{kT} \tag{(Y)}$$

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 می شود. از طرف دیگر با هر عمل یونیزا سیون، الکترون ثانویه تشکیل می شود که احتمالاً در فرآیند یونیزاسیون شرکت می کند. این جزئیات در رابطه (۲) لحاظ نشدهاند. مقدار ضریب حساسیت گیج یونی مرسوم (بایارد آلپرت) بیشـتر از ۱۰ اسـت [۱۱]. در حالی که با رابطه (۲) و نمودار شکل ۱ مقدار ضریب حساسیت حدود ۱/۵ محاسبه می شود. این محاسـبه با در نظر گرفتن طول مسـیر حرکت الکترونها در گیج این مرسوم و حدود ۲۵۵۳ در نظر گرفته شده است[۱۱]. همچنین بونی مرسوم و حدود ۲۵۵۳ در نظر گرفته شده است[۱۷]. همچنین با فرض این که الکترون ها دارای بهترین حالت انرژی یعنی ۱۰۰ev باشـند. این اختلاف مقدار بهدلیل عدم لحاظ جزئیات ذکرشـده بالا در رابطه (۲) است.

ضریب حسا سیت با طول مسیر حرکت الکترونها رابطه مستقیم دارد، بنابراین با کوچک شدن ابعاد در اثر فنّاوری MEMS، مقدار *I* و در نتیجه ضریب حسا سیت کاهش خواهد یافت. این کاهش حسا سیت 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 دوی آنها با فنّاوری MEMS ایجاد شده و با روش پیوند آندی به هم متصل شدهاند. اجزای ا صلی گیج یونی، روی پایه سیلیکونی پیاده می شوند و فاصله بین پایه سیلیکونی و رویه سیلیکونی فضای یونیزاسیون را تشکیل میدهد. حداقل یک طرف از رویه سیلیکونی برای مکش گاز باز

نگه داشته می شود. ناخالصی بور در رویه سیلیکونی ر سانایی بالا ایجاد می کند و رویه سیلیکون می تواند الکترونهای تولید شده تو سط کاتد را جمع آوری نماید. استفاده از پایه سیلیکون و رویه سیلیکون مشابه فنّاوری به کاررفته در حس گر پیرانی MEMS است [۵، ۱۶]، بنابراین می توان گیج یونی MEMS را با حس گر پیرانی به صورت مجتمع ایجاد نمود تا اندازه گیری در فشارهای بالاتر از ۲۰۰۲ تور نیز امکان پذیر باشد. در شکل ۲ مشاهده می شود که آرایه ۱۰تایی از مجموعه کاتد، آند و کلکتورها در کنار هم چیده شدهاند. آرایه ۱۰تایی باعث افزایش جریان



شکل ۲: شمای رویه و پایه سیلیکونی شامل ۱۰ عدد گیج یونی مبتنی بر فنّاوری MEMS بهصورت 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 می شوند. 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 می شود. از آن جایی 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 بهروش الکتروپلیت ساخته می شود. 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 می دهد.

در این طرح از توان cb برای داغ شدن کاتد تا حدی که بتواند الکترون فکنی نماید استفاده شده است. مقذار توان cb مورد نیاز ۶۹/۲mw ا ست. با در نظر گرفتن ۱۰ عدد گیج یونی آرایهای، توان الکتریکی لازم ۶۹۲mw با توان مصرفی در نوع مرسوم که ۳۰۳ است [11]، حدود ۵۰ برابر کمتر است. با اعمال اختلاف پتانسیل ۱۲۰۷ بین کاتد و آند، الکترونها صاحب انرژی اولیه ۱۲۰۷ می شوند ولی انرژی متوسط آنها در مسیر حرکت به حدود ۱۰۰۰ میرسد. با کسب این مقدار انرژی توسط

الکترون ها احتمال یونیزاسیون اتم های گاز به حداکثر مقدار خود می سد. رویه سیلیکونی با ۱۵۰۷ وظیفه جذب الکترونهای تولید شده توسط کا تد را بر عهده دارد. همچنین الکترون هایی که در اثر یونیزاسیون تولید می شوند به دلیل نداشتن انرژی اولیه به ندرت در یونیزاسیون بعدی شرکت می کنند و آنها نیز جذب رویه سیلیکونی می شوند.



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

در گیج یونی مر سوم (بایارد آلپرت) تمامی قسمتها با فلز ساخته شـدهاند و برخورد الکترونها با قسـمتهای فلزی اشـعه ایکس تولید میکند. وجود ا شعه ایکس یک خطا و محدودیت اندازه گیری مح سوب میشود [۸]. در گیج یونی مبتنی بر فنّاوری MEMS پایه کار سیلیکون ا ست 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 قســمت کاتد در گیج یونی MEMS ملاحظاتی در نظر گرفته میشـوند. رسـیدن به دمای ۲۵۰۵ با حداقل توان مصـرفی و ثا بتبودن د ما در طول فیل مان جزو این ملاح ظات می باشــ ند. مســتقلبودن دمای کاتد در مقابل تغییرات فشـار گاز خلاً در محدوده اندازه گیری باید مد نظر باشد. همچنین داشتن سطح مقطع کافی برای الکترونفکنی و امکان سـاخت با فنّاوری 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 قلیایی روی نیکل، تابع کار آن بهمقدار زیادی کاهش مییابد. در این شرایط کاتد توانایی تشعشع الکترون را در ۵°۷۵۰ 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 ۵°۱۸۰۰ کار میکند.





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

در شـکل ۵ جزئیات فیلمان کاتد و شـبکه آند (گرید) نشـان داده شدهاند. در این شکل مشاهده می شود که دو دسته گرید در کنارههای کاتد قرار دارند. شــبکه آند با همان پروســه سـاخت کاتد و با روش الكترويليت قابل پياده سازى است. شبكه آند از جنس فلز نيكل بوده و به پتانسیل ۱۵۰۷ وصل می شود. با وجود اختلاف پتانسیل ۱۵۰ev بین کاتد و شبکه آند، الکترونها با انرژی ۱۵۰ev به سمت شبکه آند شتاب می گیرند. تعدادی از الکترون ها در اثر برخورد به شبکه آند جذب آن ها شده و از بین می وند. الکترونها از فضای بین ستونها با انرژی ۱۵۰ev عبور کرده و وارد فضای یونیزا سیون می شوند. در انتخاب ابعاد و تعداد ستونها از تابع si استفاده می گردد. این تابع از نتایج خروجی برنامه COMSOL و تحليل برنامه MATLAB حاصل می شود. وجود تيرک 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 بهسمت پایین و پایه سیلیکونی حرکت کرده و جذب آن می شوند. این الکترون ها شانس شرکت در فرآیند یونیزاسیون را از دست میدهند.



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

در شــکل ۵ میله کاتد معلق نبوده و در دو طرف توسـط پایههای نگەدارندە محکم شدە است. لايە زيرين كاتد يک لايە نازک اکسيد سیلیسیم است. حالتی که کاند بر روی لایه اکسید سیلیکون قرار گرفته با شد در مقایسه با حالتی که کاتد معلق با شد، فنّاوری 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 كاتد به محيط گاز است [۱۸]. اين فرايند باعث مي شود كه تغييرات فشار گاز محیط در دمای کاتد (در محدوده اندازه گیری) بی تأثیر با شد. در روش استقرار کاتد روی اکسید سیلیکون توان الکتریکی زیادتری برای داغ کردن کاتد مصرف می شود. حفرههای U شـکل 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 می یابد و در عین حال مقدار هدررفت طوری است که دمای کاتد به فشار گاز بستگی ندارد. نتایج شبیهسازی گرمایی و الكتريكي انجامشده نشان ميدهد كه با تعبيه كردن حفرهها، توان الکتریکی لازم برای داغ نگهداشتن کاتد در دمای ℃۷۵۰ به میزان ۱۵۶ برابر كاهش مىيابد.

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].

$$J=1.20173 \times 10^6 \times exp\left(-\frac{\varphi}{k_BT}\right)\frac{A}{m^2} \tag{(7)}$$

تابع کار فلز نیکل در صورتی که لایه اکسید آلکالین روی آن نشانده شده با شد به ۱/۱ev کاهش مییابد [۱۷]. با مشخصات فلز نیکل و بر اســاس رابطه (۳) برای رســیدن به دمای ℃۷۵۰ چگالی جریان J≃۵A/m^۲ موردنیاز است.

در طرح این مقاله بهدلیل ابعاد MEMS فضای یونیزا سیون کوچک ۱ ست و این باعث می شود یونهای تولید شده کم با شند. جریان سیم کلکتور که از جمعآوری یونها تشکیل میشود نیز مقدار کوچکی

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 اندازه گیری کرد [۲۰]. با فنّاوری بومی، جریان پیکوآمپر قابل اندازه گیری است [۲۱]. در این مقاله حداقل جریان قابل اندازه گیری کلکتور یعنی Icmin مقدار ۰/۱PA. در نظر گرفته شده است.

در رابطه (۱) حداقل فشار خلأ اندازه گیری در شرایط حداقل جریان قابل اندازه گیری Icmin اتفاق می افتد. رابطه (۱) برای گاز نیتروژن با Sr=۱ و در شرایط حداقل فشار اندازه گیری به صورت رابطه (۴) بازنویسی شده است.

(۴)

 $I_{cmin} = S \times P_{min} \times Ie$

برای به دست آوردن IB، دانستن مقدار تقریبی ضریب حساسیت الزامی است. ضریب حساسیت با توجه به رابطه (۲) به طول مسیر حرکت الکترونها *I* بستگی دارد. رویه سیلیکون از سیلیکون با ضخامت م۰ ۵۰۰ تشکیل یافته است، بنابراین ارتفاع فضای یونیزا سیون همان وسط فضای یونیزاسیون است تا بتواند یونها را جمع آوری نماید. وسط فضای یونیزاسیون است تا بتواند یونها را جمع آوری نماید. موقعیت و سط با در نظر گرفتن فا صله کاتد تا کلکتور سلا۵۰۰ حا صل میشود. در این شرایط فاصله بین دو گیج یونی مجاور در آرایه، میشود. در این شرایط فاصله بین دو گیج یونی محاور در آرایه، میشود. در این شرایط فاصله بین دو گیج یونی ماور در آرایه، بی متری را طی نمایند. با فرض اینکه الکترونها فا صله دو گیج یونی را پیمایش کنند، طول مسیر حرکت الکترونها فا صله دو گیج یونی را پیمایش کنند، طول مسیر در طرح پیشنهادی با ابعاد گیج پونی غیر MEMS [۱۱]، مقدار تخمینی ضریب حساسیت در این طرح حدود ۵/۰ به دست میآید.

ابعاد گیج یونی پیشنهادی MEMS و چگالی جریان کاتد حاصل از رابطه (۳) بیانگر این واقعیت است که جریان الکترونفکنی هر کاتد یعنی Ie,section، در حدود ۱µA۰ است. با توجه به این دادهها جریان کل کاتدها در آرایه ۱µA محاسبه می گردد.

		<u>`</u>		
:0]		-7:		
j	:0)			-
)		**	<i>o</i> .	

جدول ۱: مشخصات و ابعاد قسمت کاتد

	مت اصلی کاند (B)	قسمت کاتد (A)	نگەدارندە (anchor)	جای پایہ (pad)	لايه اكسيد زيرين
جنس	نيكل با رويه اكسيد	نيكل	نيكل	طلا	اکسید سیلیسیم
µm طول	1	1	٣٠	-	-
µm عرض	۶	٢	٣٠	۵۰	-
µm ضخامت	١٠	١.	١.	۵	١

با در نظر گرفتن مقادیر Icmi و IE و نیز مقدار ضریب حسا سیت، مقدار حداقل فشار قابلاندازه گیری Pmi از رابطه (۱) مقدار ۲۰۰×۲ تور بهدست می آید. در صورتی که ضریب حساسیت افزایش یابد می توان فشارهای خلأ پایین تر از ۲۰۱×۲ تور را هم اندازه گرفت. یک روش برای اندازه گیری فشار خلأ پایین تر، پیادهسازی آرایه ۲ بعدی گیج یونی است. روش دیگر استفاده از مدار اندازه گیری با قدرت اندازه گیری جریانهای الکتریکی در حد فمتوآمپر است. در طرح این مقاله سیستم اندازه گیری جریان الکتریکی در حد پیکوآمپر و مطابق با فنّاوری بومی در نظر گرفته شده است.

در جدول ۱ ابعاد فیزیکی قسمت کاتد بهطور خلاصه نشان داده شدهاند. ابعاد کاتد 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 کاتد، ایجاد دمای ثابت ۷۵۰ در طول سیم کاتد هستند. همچنین عدم وابستگی دمای کاتد به فشار گاز، داشتن حداقل مصرف توان و سازگاری با فنّاوری MEMS از موارد دیگر میباشند. بهعنوان مثال در جدول ۱ در ستون اول که مربوط به ابعاد قسمت ا صلی کاتد ا ست. انتخاب ابعاد طوری ا ست که جریان الکترونفکنی کاتد با رابطه (۵) ایجاد می گردد. در ابن معادله ضریب ۲ بهدلیل الکترون فکنی کاتد از دو طرف است.

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

شبیه سازی گرمایی میله کاتد با مشخصات جدول ۱ نشان می دهد که در دمای هر کاتد با مصرف ۶۹/۲mw به ۲۵۰۵۷ می س.د. برای الکترونفکنی یکسان در طول کاتد باید دمای کاتد در طول آن یکسان باشـد. از آنجایی که کاتد در دو طرف به خطوط اتصال الکتریکی از جنس طلا متصل می شود، دمای کاتد در این نقاط تا حد زیادی کاهش می یابد. برای جبران این افت دما، ضـخامت کاتد در دو انتها باریک تر انتخاب شـده است. این قسـمتها در شکل ۵ و جدول ۱ با کاتد A نام گذاری شدهاند. با باریک شدن این قسمتها انتقال گرما به سیمهای ارتباطی کاهش می یابد. از طرف دیگر مقاومت الکتریکی در قسـمت A افزایش یافته و توان الکتریکی بیشـتری مصرف می گردد و د مای کاهش یافته جبران می گردد.

در گیج یونی مرسوم (بایارد آلپرت) فیلمان کاتد از جنس تنگستن و بهصورت ریبون بوده و توسط دو پایه در هوا معلق نگه داشته میشود، بنابراین گرمای آن و در نتیجه الکترونفکنی در آن با فشار گاز تغییر می کند. دلیل تغییر دمای فیلمان کاتد 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 می دهد (۱۸]. در این رابطه، ko ضریب هدایت گرمایی در دمای اتاق و فشار اتم سفر، T دمای گاز، P فشار گاز برحسب پا سکال و b ارتفاع فا صله گازی برحسب متر می باشاند. این رابطه نشان می دهد که با افزایش فشار گاز، ضریب هدایت گرمایی کاهشیافته و فیلمان کاتد داغتر می شود و برای ثابت نگهداشتن آن نیاز به کنترل کننده دما است.

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

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 گر مایی داشـــته و انرژی گر مایی کا تد از آن طریق به پا یه سیلیکونی انتقال مییابد و هدررفت گرما محسوب می شود. 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 اتم سفر و در کمترین مقدار خود حدود ۵ برابر اســت که قابل ملاحظه اسـت [۱۸]. در قبال هدررفت گرمای کاتد از طریق اکسید سیلیکونی، دمای کاتد در طول آن یکنواخت بوده و با تغییر فشـار گاز ثابت میماند، بنابراین نیاز به سیستم کنترل دما نیست.

شکل ۶ شبیه سازی تحلیل گرمایی کاتد را نشان میدهد که در آن با تغییر فشار گاز در محدوده اندازه گیری، دمای کاتد فقط به مقدار ۲°۲ تغییر می کند. اختلاف دمای بین نقطه وسط و نقاط کناری آن حدود ۲۰°C یعنی ۱/۳٪ 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 دمای داغ ترین نقطه کاتد برحسب تغییر فشار گاز

نمودار توزیع دمایی داغ ترین نقطه کاتد در مقابل تغییرات فشار گاز خلاً تو سط شبیه ساز COMSOL در نمودار شکل ۷ نشان داده شده است. این نمودار بیانگر استقلال دمایی کاتد در مقابل تغییرات فشار گاز در محدوده اندازه گیری ۲۰۰۲ تور الی ۲۰۰×۲ تور است.

گزارش کار تحقیقی کاتد ساخته شده با فنّاوری MEMS نشان میدهد که اختلاف دمای وسط کاتد تا کنارههای آن ۲۰۰۶ است [۹]. در حالی که در طرح این مقاله اختلاف دمای وسط کاتد با کنارهها فقط ۲۰۰۲ است.

۲-۳- 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 الکتروپیلت قابل ساخت است. ابعاد شبکه آند در مقدار حساسیت گیج یونی MEMS تعیین کننده 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 می شوند. در صورتی که تعداد ستونهای آند کم باشند نیروی الکترواستاتیکی برای شـتاب الکترونها کاهش می یابد و انرژی الکترونها نیز کاهش خواهد یافت. در هر دو حالت کارایی گیج یونی و در نتیجه ضـریب حساسیت کاهش خواهد یافت.

برای برر سی عملکرد یونیزا سیون در طرح پیشنهادی این مقاله از شبیه سازی (COMSOL استفاده شده است. شکل ۸ شبیه سازی CPT و نیز تحلیل MATLAB استفاده شده است. شکل ۸ شبیه سازی CPT و حرکت ۶۴۰ الکترون در ۲۰/۰ نانوثانیه بدون ملاحظه یونیزاسیون و برخورد الاستیک را نشان میدهد. این شبیه سازی برای به دست آوردن طول مسیر حرکت الکترونها و نیز انرژی و سرعت آنها به کار می ود و برای طراحی بسیار مفید است. در این شکل ملاحظه می شود که پتاذ سیل ۲۰۵۰ شتاب می گیرند. الکترونها با انرژی ۲۰۷۷ به محیط پتاذ سیل ۱۵۰۷ شتاب می گیرند. الکترونها با انرژی ۲۰۷۷ به محیط یونیزاسیون وارد می شود. درصورتی که برخورد الاستیک و برخورد برخورد با اتم های گاز، آن ها را یونیزه کرده و یون های مثبت تولید می شوند. یونهای تولید شده در محیط یونیزاسیون جذب سیمهای نازک کلکتور با پتانسیل ۲۰ شده و الکترونها نیز جذب رویه سیلیکونی با پتانسیل ۱۵۰۷ می شوند.

در طراحی گیج یونی بیشــترین توجه به رســیدن به ضـریب حساسیت بالا است. ضریب حساسیت S از رابطه (۲) به متوسط مسیر حرکت الکترونها (یعنی I) و سـطح مقطع یونیزاسـیون $\overline{\sigma}$ (مربوط به نمودار شکل ۱) بستگی دارد.

در این مقاله تابع sivai بهعنوان عاملی تعیین کننده برای رسیدن به حساسیت بالا در گیج یونی تعریف شده است. در این تابع، *ا* بستگی به م شخ صات و ابعاد فیزیکی و *o*i ب ستگی به م شخ صات الکتریکی گیج

یونی دارند. با شبیه سازی های CPT (مانند نمودار شکل ۸) و تحلیل نتایج خروجی آن توسط MATLAB می توان *I* را به دست آورد. علاوه بر مقدار متوسط مسیر حرکت الکترون ها، انرژی متوسط الکترون ها نیز به دست می آیند. با داشتن انرژی متوسط الکترون ها، تابع *i* از داده های منابع معتبر [۱۴، ۲۲، ۲۳] قابل استخراج است.



شکل ۸: شبیهسازی حرکت الکترونها بدون برخورد با اتمها



فاصله شبکه آند و کاتد یکی از پارامترهای طراحی شبکه آند است. شبیه سازیهای انجام شده نشان می دهد که با تغییر فاصله آند تا کاتد از ۱۰μ۳ تا ۵۵mμ طول متوسط مسیر حرکت الکترونها از از ۱۰μ۳ تا ۱/۸۵۵mm طول متوسط میکند. همچنین مقدار انرژی متوسط الکترونها از ۸۰ev تا ۱۱۰۷ تغییر میکند. نمودار شکل ۹ متوسط الکترونها از ۸۰ev تا کاتد از ۱۰μ۳ تا ۵۵mμ به نمایش گذا شته است. این نمودار نشان می دهد که فا صله بین کاتد و آند در بهترین شرایط ۴۵m۴ است.

فاصله ۴۵mµ بین آند و کاتد یکی از پارامترهای طراحی است که در جدول ۲ در ســتون مربوطه درج شــده اســت. همچنین با انجام

عملیات مشابه می توان 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 ناز ک با ضخامت ۱۰/۱۲۵mm می شود تا این سیم کمتر در معرض تابش ا شعه ایکس قرار گیرد. اشعه ایکس در اثر برخورد الکترونها با قسمتهای فلزی شبکه آند تولید می شوند [۸]. در فشار خلاً HV و UHV وجود اشعه ایکس عامل محدودکننده در اندازه گیری خلاً به شمار می رود. بهعنوان مثال در یک نوع گیج یونی مر سوم (بایارد آلپرت) در اثر وجود اشعه ایکس، اندازه گیری به ^{۱۰}-۱۰×۳ محدود می شود [۲۴]. در طرح این مقاله از سیم بسیار نازک کلکتور یعنی از ۳ عدد کلکتور به پهنای این مقاله از سیم بسیار نازک کلکتور یعنی از ۳ عدد کلکتور به پهنای

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

			-				
	جنس	تعداد	عرض	طول	ارتفاع	فاصله تا كاتد	فاصله تا كلكتور
ستون آند	نيكل	79	١٠	٣	۱۵	40	400
تیرک بالایی	نيكل	١	۱.	۱۰۰۰	۵	۴۵	400
كلكتور	نيكل	٣	٢	17	١	۵۰۰	-

قدرت جذب یون های مثبت توسط کلکتور یکی از جنبه های کارایی گیج خلأ یونی کاتد گرم مح سوب می شود. در شکل ۱۰ نمای جانبی گیج خلأ یونی MEMS نشان داده شده است. در این شکل ملاحظه می شود که {R-1} پتانسییل 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 شـکل ۱۱ علت جذبشـدن يونها در کلکتور بهتر نشـان داده شدهاند. در اين شکل ميدان الکتريکی در برش مقطعی به صورت پيکانه نمايش داده شده است. اين شکل نشان میدهد که جهت ميدانهای الکتريکی بهسمت سيمهای کلکتور است.



۴- محاسبه ضریب حساسیت گیج یونی MEMS

تو سط ابزار و روش های شبیه سازی (که در بخش قبلی معرفی شدند) میتوان طرح بهینه ای برای مشخصات فیزیکی، هندسی و الکتریکی گیج یونی MEMS ارائه کرد. بر ۱ ساس نتایج شبیه سازی و در شرایط بهینه، مقدار متوسط انرژی الکترون ها حدود ۱۱۰ev و طول متوسط مسیر الکترون ها ۱۸۵۵mm – حاصل می شوند. با داشتن انرژی متوسط الکترون ها، سطح مقطع یونیز اسیون *آه* از نمودار شکل ۱ یا جداول منابع معتبر [۱۳، ۱۵] قابل دستیابی است.

برای بهدست آوردن ضریب حساسیت که در شبیه سازی این مقاله ارائه شده است، تعداد یونهای جمع آوری شده تو سط کلکتور به تعداد الکترونهای رهاشده از کاتد (در فشار معین) تقسیم می شوند که رابطه(۵) آن را نشان می دهد. در شیبیه سازی 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 ۰/۰۱ 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 الکترون ها در اثر برخورد الاستیک و برخورد یونیزاسیون نشان داده شدهاند. همچنین در این شکل تولید الکترونهای ثانویه بهطور مشخص ملاحظه می گردد.

ش کل ۱۳ تعداد و زمان جذب یونهای مربوط به شبیهسازی شکل ۱۲ را نشان میدهد. از نتایج این شکل یعنی مجموع یونهای جذب شده می توان ضریب حساسیت را طبق رابطه (۲) محاسبه کرد.



توسط كلكتور

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

نمودار شکل ۱۴ ضریب حسا سیت طرح پیشنهادی این مقاله را نشان میدهد که از نتایج چندین بار شبیه سازی برخورد الا ستیک و برخورد یونیزاسیون توسط COMSOL به دست آمده است. فرآیندهای برخورد الاستيك و برخورد يونيزاسيون تصادفي هستند و بايد شبیه سازی چندین بار تکرار شود. در این نمودار محدوده اندازه گیری گیج یونی طرح شدہ $^{-1}$ ۲۰×۲۲ تور الی $^{-7}$ ۱۰ تور است. نمودار شکل ۱۴ نشان میدهد که مقدار متوسط ضریب حساسیت تقریباً ۱/۶ 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 می شود. کاهش ضریب حساسیت باعث کاهش جریان خروجی می شود. در فشارهای خلاً خیلی پایین، جریان خروجی کاهش می یابد و در این شرایط مدار الکترونیکی دقیق تری برای اندازه گیری جریان خروجی کلکتور مورد نیاز است. در این مقاله با آرایه ۱۰ عددی از گیجهای یونی، حداقل فشار خلأ قابل اندازه گیری ۲۰-۲×۲ تور حاصل شد.

برای گسترش رنج اندازه گیری می توان آرایه ۲ بعدی مثلاً آرایه ۱۰ در ۱۰ را به کار برد تا قدرت اندازه گیری تا فشار خلا^{ً ۸}-۱۰×۲ تور امکان پذیر باشد.

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

گیج یونی نوع مرســـوم بوده و همچنین به مدار اندازهگیری جریان دقیق تری نیاز است.



جدول ۳: مقایسه گیج یونی کاتد گرم پیشنهادی MEMS و گیج یونی کاتد گرم غبر MEMS (بابارد آلبرت)

	گیج خلأ یونی کاتد گرم بایارد آلپرت (مرسوم) [۸، ۱۱]	گیج خلأ یونی کاتد گرم نوع MEMS (پیشنهادی)			
ضريب حساسيت	1 2.	• / ۵- • / Y			
اندازه (mm ³)	88118	۶			
توان مصرفی (وات)	٣٠	•/۶٩٢			
نياز به حسگر دما و مدار کنترل	دارد	ندارد			
نیاز به مدار دقیق اندازه گیری جریان کوچک	ندارد	دارد			
حداقل فشار خلأ قابلاندازهگیری	۱۰ ^{-۱۲} تور	۲×۱۰ ^{-۴}			
حداکثر فشار خلأ قابلاندازهگیری	۳-۱۰ تور	۳-۱۰ تور			
پروسه ساخت و تولید انبوه	پروسه راحت و تولید تکی	پروسه دشوار و تولید انبوه			
قابليت توليد مجدد	ندارد	دارد			
دمای کار فیلمان کاتد	١٧٠٠ 🗆 – ٣٣٠٠ 🗋	۷۵۰ 🗆			

در جدول ۳ بهجز دو مورد در بقیه موارد گیج یونی پیشنهادی این مقاله نسبت نوع مرسوم برای اندازه گیری خلاً تا مقدار ۲۰۰۲ ×۲ تور، از تمامی مزیتهای ذکرشده در جدول ۳ برخوردار است.

۵- پروسه پیشنهادی برای ساخت

پروسه مربوط به ساخت قسمت رویه سیلیکونی بهصورت دیاگرام گردشی در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. در این پروسه، ابتدا یکلایه نوع q بهضخامت تقریبی Δ۰μ۳ توسط نفوذ ناخالصی بور ایجاد میشود. این لایه بهعنوان توقف لایهبرداری توسط EDP عمل میکند. اینٔ ناخالصی همچنین یک ناحیه نوع q تشکیل میدهد که رسانایی بالایی داشته و امکان جمع آوری الکترونها را فراهم می آورد. در این پروسه یک غشاء بهضخامت Δ۰μ۳ و نیمههادی نوع q در رویه سیلیکون ایجاد می گردد.

پروسه ایجاد ۱۰ عدد حفره در قسمت زیرین پایه سیلیکونی هم م 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 پرو سه ساخت، مربوط به قسمت بالای پایه سیلیکونی است. در این پروسه ساخت، لایههای نیکل و طلا و ات صال دهندههای آنها در ضخامتهای متفاوت به کار رفتهاند، 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 کاتد و آند که ارتفاع بلندتری نسبت به بقیه قسمتها دارند ایجاد می شوند.



شکل ۱۵: دیاگرام گردشی پروسه ساخت رویه سیلیکونی

شکل ۱۶ قسمت بالای پایه سیلیکونی را نشان میدهد که در آن لایه نیکل و طلا مشخص شدهاند. در این شکل همچنین آندها، کاتدها و کلکتورها و ارتباطات الکتریکی بین آنها مشخص شدهاند. همچنین جنس لایهها ذکر شده و در مورد ابعاد هر کدام توضیحاتی داده شدهاند. در این شکل دو لایه نیکل بهضخامت μμ و طلا بهضخامت ۵ میه 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^مآند بیشتر از μ۹۰۱ است و ایجاد آن با فلز نشانی یا لایه نشانی معمولی مقدور نیست، بنابراین یک لایه نازک بهضخامت س۹۱ بهعنوان دانه اولیه ایجاد می شود و سپس طی عمل الکتروپلیت ضخامت مورد نظر تحقق می یابد. طلا دارای نقطه ذوب بالای ۲۰۰۰ است و استفاده از آن در کنار کاتد از جنس نیکل (که تا ۲۵ ۷۰۰ داغ می شود)، اطمینان بخش است. همچنین لایه طلا با داشتن ضخامت س۹۵ و پهنای ۳۰μ۳ برای برقراری ارتباط الکتریکی هر کاتد و انتقال جریان الکتریکی ۱۷۷۳A مناسب است [۲۵].



شکل ۱۶: قسمت بالای پایه سیلیکونی و مشخصات هرکدام از قسمتها با ذکر ابعاد و جنس هرکدام

در شـکل ۱۷ پروسـه ایجاد لایههای نیکل و طلا در برش عرضـی AA (مشخص شده در شکل ۱۶)، نشان داده شدهاند. در این پرو سه لایه نیکل بهضـخامت ۱μ۳ برای ایجاد کلکتور، دانه اولیه ســتونهای آند، دانه اولیه کاتد و ارتباطات الکتریکی آن ها به کار رفته اســت. ارتباطات الکتریکی کاتد تو سط طلا به ضخامت ۵μ۳ صورت می گیرد. در این پرو سه ساخت، ۳ قدم ما سک گذاری پیشنهاد شده است. قدم اول برای نشاندن لایه نیکل و قدم سوم برای نشاندن لایه طلا است. با توجه به برش AA یک لایه جداکننده بین لایه طلا و لایه نیکل مورد نیاز است که در قدم دوم تو سط 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 لایههای فلزی با ضـخامت بالا (که در اینجا بالای ۱۰µسا است) پیشنهاد شده است. برای ایجاد لایه

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

طراحی گیج خلأ یونی کاتد گرم . . .



شکل ۱۷: نمایش پروسههای نشاندن لایه نیکل بهضخامت ۱μm و لایه طلا بهضخامت ۵μm در قسمت بالای پایه سیلیکونی و مشخصات هرکدام از آنها با ذکر ابعاد و جنس هرکدام

در شکل ۱۸ پرو سههای ایجاد کاتد و دو د سته آند در برش طولی BB^۲ (مربوط به شـکل ۱۶) نشـان داده شـدهاند. در این شـکل کاتد با ارتفاع ۱۰μ۳، ستونهای آند با ارتفاع ۱۵μ۳ و تیرک افقی آند با ارتفاع ۵μ۳ ایجاد میشـوند. در مجموع نیکل با ضـخامت ۲۰μ۳ با روش الکتروپلیت ایجاد می شود. این عمل در ۳ قدم اجرا می شود که هر قدم

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



مرحله a تا مرحله b در شـكل ۱۸ مربوط به قدم اول و ایجاد كاتد بهطور كامل اسـت. پروسـههای e و f مربوط به قدم دوم و تكمیل سـتونهای آند، پروسـههای g و h مربوط به ایجاد تیرک افقی آند هستند. در پروسه i لایهنشانی فلز قلیایی بر سطح كاتد صورت میگیرد. روكش نازک اكسید فلز قلیایی، بر سطح كاتد (طبق مطالب بخش ۳)، تابع كار كاتد را به vi ۱/۱ كاهش می دهد. كاهش تابع كار كاتد، پرتوافكنی آن در دمای پایینتر از ۷۵۰ را ممكن می سازد.

۶- نتيجه

ایده گیج یونی کاتد گرم مبتنی بر فنّاوری MEMS و بهصورت آرایهای در این مقاله ارائه شد. این ایده امکان پیادهسازی گیج یونی در ابعاد خیلی کوچک را بررسی کرد. روند طراحی قسمتها متناسب با فنّاوری MEMS و پروسه ساخت پیشنهادی ارائه شد. تحلیلهای الکتریکی، حرارتی، یونیزاسیون و برخورد الاستیک توسط شبیهسازی COMSOL انجام گرفت.

با آرایه کردن ۱۰ عددی گیج یونی جریان خروجی افزایش یافته و درنتیجه محدوده اندازه گیری ۱۰ برابر بهبود داده شد. با پیشنهاد آرایه کردن دو بعدی مثلاً ۱۰×۱۰ میتوان 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 ^۲ ۲۰ ×۲ طرح شد. طرح کاتد مطابق فنّاوری MEMS بوده و در دمای ℃۷۵۰ پرتوافکنی مینماید. 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 خلا است و فقط ۲°C تغییر میکند. در این مقاله یک ایده برای ایجاد شبکه آند ییشنهاد شد که با فنّاوری MEMS قابل پیادهسازی است. طرح پیشنهادی مشابه حس گر پیرانی مبتنی بر فنّاوری MEMS، دارای رویه و پایه سیلیکونی است و می تواند به صورت مجتمع با آن ساخته شود. رویه سیلیکونی الکترونها را جمع آوری میکند در حالیکه اشعه ایکس در اثر برخورد الكترونها به حداقل مىرسد. در اين مقاله از روش جديدى برای شبیهسازی استفاده گردید و از نتایج آن برای طرح قسمتهای مختلف در شرایط عملکرد بهتر استفاده شد. بر اساس نتایج این شبیهسازی ضریب حساسیت محاسبه گردید که نشان میدهد مقدار آن در این طرح ۱/۶ است.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله، بدینوسیله از اعضای هیئت تحریریه مجله علمی-پژوهشی مهندسی برق دانشگاه تبریز تشکر مینمایند و نیز از همکارانی که اطلاعات ارزشمندی را در اختیار ما گذاشتند و از داوران محترم که با نظرات ارزشمند خود ما را راهنمایی نمودند تشکر مینمایند. 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.electronicscooling.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. Tämm, 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 عفیفی، «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.

- [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., *Tecknical 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, "Glowdischarge 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,"

زيرنويسها

- Anisiotrpoic
- `` Electro emission
- Thermal emission
- ۲۳ Richeadson Dashman
- ۱٤ Etch stop
- `°seed
- ^۱ Insulator
- ^{\v}Chemical Vapor Deposition

- ۱ High Vavuum
- ^v Ultra High Vacuum
- " Bayard Alpert Gauge
- ٤ pirani
- ° Anchor
- ¹ Connector
- ^v Grid
- [^] Ionization Cross section
- ⁹ Anodic Bound

مراجع