طراحی و ساخت حسگر شار گاز و غشاء نازک شیشه‌ای به روش لایهٔ نشانی و ریزماشینکاری

مرتضی مظفری، عزت‌الله ارضی* و سید شمس‌الدین مهاجرزاد**

دانشکده فیزیک- دانشگاه تهران و پژوهشگاه نیرو- تهران

***دانشکده فیزیک- دانشگاه تهران- تهران**

****آزمایشگاه لایه نازک- دانشکدهٔ مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران**

پست الکترونیکی: arzi@khayam.ut.ac.ir

چکیده

حسگرهای شار گاز با استفاده از تکنیک لایه‌های نازک ساخته شده‌اند. این حسگر از نوع گرمایی بوده و براساس اختلاف دمای ناشی از عبور جریان هوا از روی یک گرمکن الکتریکی کار می‌کند. عنصر حساس به دما در این حسگر، دو سری آرایهٔ ترموکوپلی متشکل از بازوهایی از جنس نیکل و کرم است. این حسگر می‌تواند جریان‌های هوا در حدود sccm ۱۰ تا sccm ۱۰۰۰۰ را اندازه‌گیری نماید و به راحتی امکان تولید انبوه آن وجود دارد. طراحی و ساخت ماسک، لایه نشانی‌های مختلف و لیتوگرافی این لایه‌ها با موفقیت انجام شده است، ریزماشینکاری بر روی شیشه جهت ساخت غشاء شیشه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده بر روی این حسگرها نشان می‌دهد که رفتار حسگر تا sccm ۱۰۰۰ کاملاً خطی است که قابل توجه می‌باشد. در ادامه، طرحی جدید در ساختار هندسی این افزاره که می‌تواند حساسیت افزاره را افزایش دهد، ارائه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: *حسگر، ترموپیل، ریزماشینکاری، شار گاز، لایه نازک*

مقدمه

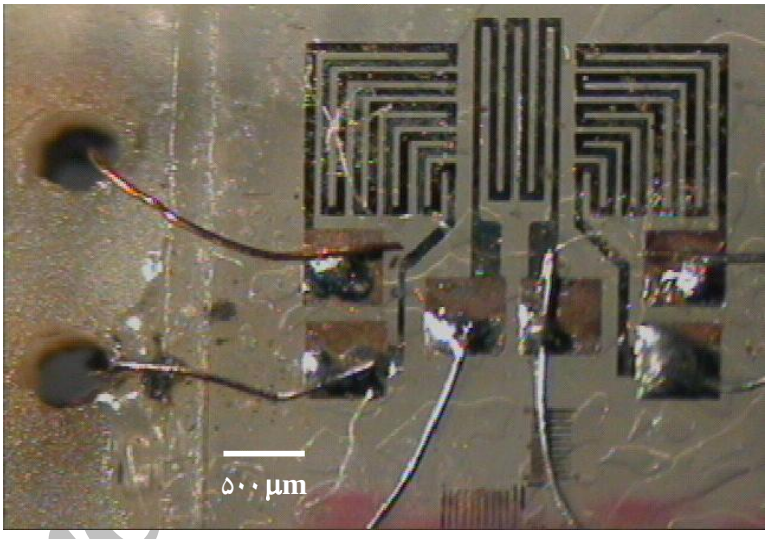
به کارگیری خواص مختلف الکتریکی، مغناطیسی، مکانیکی و غیرهٔ لایه‌های نازک مواد در صنعت میکروالکترونیک منجر به پیشرفت‌های وسیعی در این زمینه شده است، به طوری که بزرگترین بازار تجارت جهانی مربوط به کالاهای الکترونیکی و میکروالکترونیکی می‌باشد. حسگرهای میکروالکترونیکی نیز امروزه جای خود را در قطعات الکترونیک باز کرده و کاربردهای فراوانی یافته‌اند. از جمله این حسگرها، حسگرهای حرارتی هستند. این ادوات دارای یک عنصر حساس به

Archive of SID

www.SID.ir

دما بوده و قادرند تغییرات کوچک دما را به طور دقیق اندازه‌گیری کنند. از جمله این عنصرهای حساس به دما ترموکوپل‌ها هستند [۱] که توانایی اندازه‌گیری اختلاف دمای نسبی بین دو نقطه را دارند، از این عنصر در ادوات مختلفی همچون آشکارسازهای مادون قرمز [۲]، تصویرگرهای مادون قرمز، توان‌سنج‌های لیزری، شارسنج، خلاسنجی و حسگرهای بیولوژیکی استفاده فراوان می‌شود. لازم به ذکر است عملکرد بسیاری از این افزارها بدون استفاده از میکروپل یا غشاء نازک غیرممکن است [۳ و ۴].

در این مقاله مراحل مختلف ساخت حسگر شار گاز و همچنین آزمایش‌های انجام شده بر روی این حسگر مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از ریزماشینکاری بر روی شیشه ارائه می‌شود. لازم به ذکر است که گروه‌های دیگری [۵ و۶] نیز بر روی این نوع ریزماشینکاری ولی با تکنیک‌های اندکی متفاوت فعالیت دارند.



شکل ۱- تصویری از حسگر شار گاز ساخته شده. گرمکن در وسط و آرایه‌های ترموکوپلی با شکلی L مانند در دو طرف قرار دارند. اتصالات ترموکوپل‌ها و گرمکن به وضوح دیده می‌شوند.

ساختار و چگونگی عملکرد افزاره

این افزاره، مطابق شکل ۱، متشکل از یک گرمکن و دو سری آرایهٔ ترموکوپلی است که به طور متقارن نسبت به گرمکن واقع شده‌اند. با عبور جریان الکتریکی از گرمکن، دمای دو طرف گرمکن به طور متقارن افزایش می‌یابد، با عبور جریان هوا (گاز) از روی این گرمکن، گرما به یک سو منتقل شده و تقارن دمایی در دو طرف آن به هم می‌خورد [۷]. اختلاف دمای ناشی از عبور جریان هوا از روی گرمکن توسط دو سری ترموپیل (آرایه ترموکوپلی) قابل اندازه‌گیری است. هرچه سرعت جریان سیال بیشتر باشد، گرمای منتقل شده بیشتر و در نتیجه اختلاف دمای بیشتری نیز ایجاد می‌شود. بنابراین ترموکوپل‌ها اختلاف ولتاژ بالاتری را نیز نشان می‌دهند. طراحی جدید شکل بازوهای ترموپیل‌ها با توجه به انتخاب شکل L باعث

www.SID.ir

شده است که اتصالات سرد در مسیر انتقال حرارت از طریق همرفت واداشته[1] قرار نگیرد، این عمل منجر به افزایش حساسیت افزاره نسبت به رژیم کالری‌متری شده است، این پدیده در حسگرهای طراحی شده در مرجع [۱] مشاهده نشده است.

روند ساخت حسگر

به طور کلی ساخت و آماده کردن یک نمونه حسگر به دو بخش قابل تقسیم است : ۱- فرایندهای مربوط به ساخت حسگر بر روی زیر لایهٔ مناسب و ۲- مراحل مربوط به بسته‌بندی و نهایی کردن محصول جهت استفاده و آزمایش، که در زیر به آن‌ها پرداخته خواهد شد.

روش ساخت افزاره بر روی زیرلایه

اولین مرحله در ساخت این افزاره، ساخت ماسک است. ماسک‌های مختلف توسط کامپیوتر طراحی و سپس توسط دستگاه نقش‌نگار نوری[2] بر روی فیلم عکاسی کشیده شدند. اندازهٔ این ماسک‌ها طی مراحل مختلف لیتوگرافی و عکس‌برداری، ۱۰ بار کوچک شدند. ماسک نهایی توسط یک مرحلهٔ لیتوگرافی از روی میکروفیلم به روی شیشه‌هایی که یک لایهٔ کروم روی آن نشانده شده است، منتقل گردیدند تا بتوان از آن در دستگاه جهت‌دهندهٔ ماسک استفاده کرد. از آن جائی که سه فلز در این افزاره استفاده شده است، کروم و نیکل برای بازوهای ترموکوپل‌ها و مس برای ایجاد اتصالات الکتریکی خارجی، سه ماسک مختلف نیز طراحی و ساخته شد. بعد از تهیه و ساخت ماسک مرحله بعدی انتخاب و آماده‌سازی زیرلایهٔ مناسب جهت انجام مراحل مختلف لایه‌نشانی و زدایش لایه[3] است. زیرلایهٔ انتخاب شده شیشه‌هایی به ضخامت ۱۳۰ میکرون می‌باشد. این شیشه‌ها را می‌توان به راحتی با قلم الماس به ابعاد کوچکی در اندازهٔ mm^2 ۳×۲ برید. شستشوی این شیشه‌ها به صورت شیمیایی در محلول RCA#۱ که ترکیبی از آمونیاک، پراکسید و آب می‌باشد، به مدت ۱۰ الی ۱۵ دقیقه صورت پذیرفت. پس از شستشو، زیرلایه‌ها با گاز ازت خشک شدند. سپس فلز کروم بر روی این زیرلایه‌ها توسط دستگاه پراکنش لایه نشانی شد و بدین ترتیب لایه‌ای به ضخامت Å ۱۵۰۰ نشانده شد و طی یک مرحلهٔ لیتوگرافی با فوتورزیست و قرار دادن نمونه در محلول زدایش کروم (ترکیبی از سدیم آمونیوم نیترات و اسید پرکلریک) ، طرح مربوط به گرمکن و یکی از بازوهای ترموکوپل‌ها آماده گردید. با استفاده از دستگاه تبخیر به کمک باریکهٔ الکترونی یک لایهٔ نیکل بر روی نمونه تبخیر شد. پس از لیتوگرافی ماسک دوم که توسط دستگاه جهت دهنده ماسک[4] (با دقت جابجایی در جهات x و y به اندازهٔ $1\ \mu m$) با طرح ماسک قبلی در جای مناسب تنظیم گردیده، نوردهی شد. پس از زدایش نیکل در محلول مناسب زدایش (ترکیبی از اسید سولفوریک و سدیم نیتروبنزن و آب)، طرح مربوط به ترموکوپل‌ها تکمیل گردید و برای برقراری اتصالات الکتریکی خارجی، یک لایهٔ مس به ضخامت Å ۲۵۰۰ به روش تبخیر حرارتی بر روی نمونه نشانده شد. لازم به یادآوری است که چسبندگی مس به سطح نمونه ضعیف بوده که برای رفع این مشکل، از دو روش استفاده گردید.

روش اول: استفاده از یک لایهٔ نازک واسطه از جنس آلومینیوم به ضخامت حدود Å ۵۰ بین مس و نمونه

1- Forced convection
2- Photo-plotter
3- Etching
4- Mask aligner

Archive of SID

www.SID.ir

می‌باشد. این لایه آلومینیوم با استفاده از دستگاه تبخیر با باریکهٔ الکترونی لایه نشانی شد.

روش دوم: گرم کردن سطح نمونه تا دمایی بین $۵۰^{o}C$ تا $۲۰۰\ ^{o}C$ است.

در این تحقیق از هر دو روش استفاده شده است. پس از مرحلهٔ لایه نشانی مس و لیتوگرافی طرح ماسک سوم مربوط به اتصالات توده‌های مسی[1] نمونه آماده برای سیم‌بندی و بسته‌بندی است.

بسته‌بندی و آماده‌سازی جهت آزمایش

پس از انجام مراحل مختلف لایه نشانی و لیتوگرافی، نوبت به جداسازی حسگرها و آماده کردن آن‌ها برای انجام آزمایش می‌رسد. در این مرحله ابتدا به کمک قلم الماس، زیرلایه شیشه‌ای را بریده تا حسگرها از هم جدا شوند. نمونه‌ها را بر روی فیبرهای مداری چاپی چسبانده و از سیم‌هایی به ضخامت $۵۰\ \mu m$ برای سیم‌بندی استفاده شده است. اتصال سیم‌ها بر روی توده‌های مسی به ابعاد $۵۰۰ \times ۵۰۰\ \mu m^{۲}$ با روش لحیم‌کاری در زیر میکروسکوپ اپتیکی انجام شده است. با این روش، لحیم‌کاری در ابعاد $۱۰۰ \times ۱۰۰\ \mu m^{۲}$ نیز صورت گرفته است. نمونه پس از برقراری اتصالات الکتریکی خارجی بر روی کانال جهت عبور هوا از روی حسگر مطابق شکل ۲ چسبانده می‌شود. سطح حسگر به گونه‌ای در برابر مسیر جریان هوا قرار می‌گیرد که مماس بر سطح جدار کانال باشد. کانال عبور هوا مقطعی مستطیل شکل به ابعاد $۱\times۱۵mm^{۲}$ دارد. باید توجه داشت ابعاد کانال به گونه‌ای انتخاب شوند که جریان هوا به صورت لایه‌ای[2] باشد.

بررسی چگونگی عملکرد افزاره و نتایج حاصل

در این بخش با طرح و انجام آزمایش‌هایی برروی افزاره‌های ساخته شده، ویژگی‌های ترموکوپل‌های لایه نازک به کار رفته در ساخت حسگر و همچنین نحوهٔ پاسخ‌دهی حسگر مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. جهت بررسی خواص ترموالکتریکی ترموکوپل‌ها افزاره‌ای مطابق شکل ۳ ساخته شد. این افزاره متشکل از یک گرمکن از جنس کروم و سه عدد ترموکوپل نیکل-کرومی با طول‌های متفاوت ۳۰۰، ۶۰۰ و ۱۲۰۰ میکرومتر می‌باشد. این ترموکوپل‌ها کاملاً مشابه یکدیگر بوده و تنها تفاوت آن‌ها در فاصلهٔ اتصال سرد از اتصال گرمشان می‌باشد.

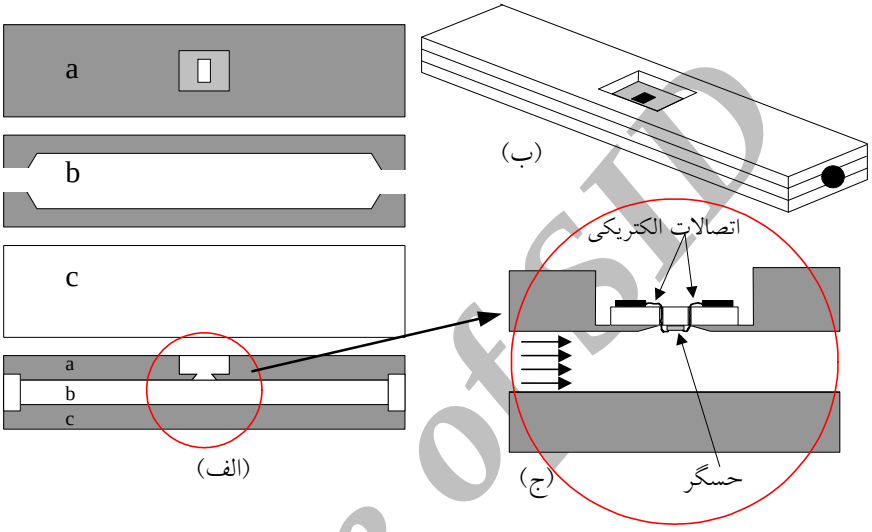
با اعمال یک جریان و توان الکتریکی مشخص به گرمکن، توان الکتریکی تبدیل به توان گرمایی شده و انرژی گرمایی حاصل باعث ایجاد اختلاف دما و در نتیجه گرادیان دما در امتداد عمود بر گرمکن می‌شود. از آنجا که تغییرات ولتاژ ترموالکتریکی ترموکوپل‌ها متناسب با اختلاف دمای بین دو اتصال گرم و سرد آن است، پس هر یک از ترموکوپل‌ها ولتاژی متناسب با این اختلاف دما نشان خواهد داد. در شکل ۴ نمودار تغییرات ولتاژ ترموکوپل‌ها در برابر توان الکتریکی داده شده به گرمکن رسم شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود هر سه ترموکوپل، رفتاری کاملاً خطی از خود نشان می‌دهند که نمایانگر توزیع یکنواخت دما در امتداد بازوهای ترموکوپل‌ها است و این رفتار با توجه به قوانین و روابط فیزیک انتقال حرارت کاملاً قابل توضیح است، شیب نمودارهای فوق که معادل حساسیت ترموکوپل‌ها است به ترتیب به صورت $۳/۷ mV/W$، $۵/۵\ mV/W$ و $۶/۴\ mV/W$ به دست می‌آید. در شکل ۵ منحنی‌های مربوط به ولتاژ ترموکوپل‌ها بر حسب طول بازوهای آن‌ها برای توان‌های مختلف گرمایی گرمکن رسم شده است.

1- Copper Contact pads
2- Laminar

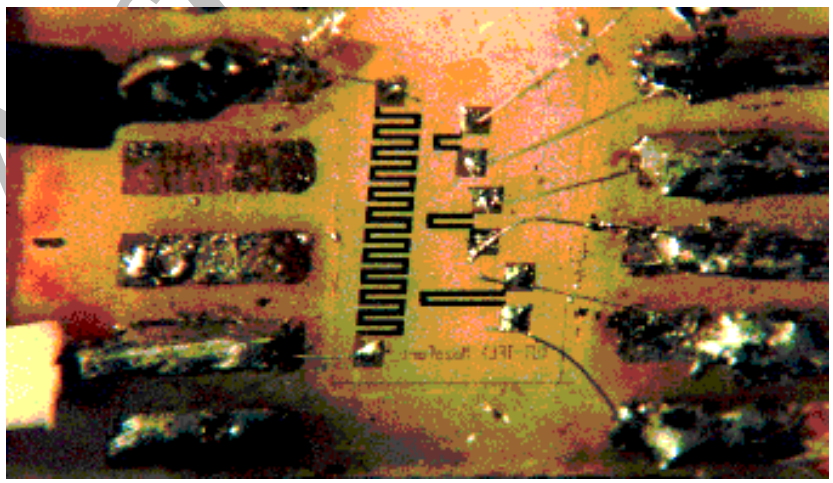
Archive of SID

www.SID.ir

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در تمام توان‌های گرمایی، حساسیت با افزایش طول ترموکوپل افزایش یافته است، ولی این افزایش خطی نیست بلکه شیب آن سیری نزولی دارد و در نهایت به اشباع می‌رسد. با توجه به این شکل مناسب‌ترین طول برای ترموکوپل، ۱/۲ mm خواهد بود.



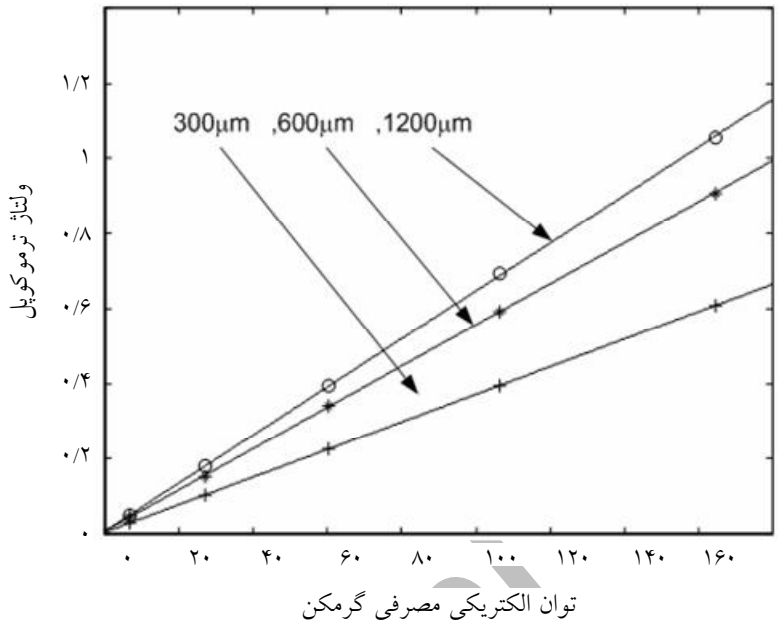
شکل۲- مراحل آماده‌سازی حسگر جهت آزمایش. الف- با چسباندن سه قطعهٔ نشان داده شده a, b, c بر روی هم کانال با مقطع مستطیل آماده می‌شود. ب- نمایی ازکانال آماده شده. ج- نحوه نصب حسگر روی کانال



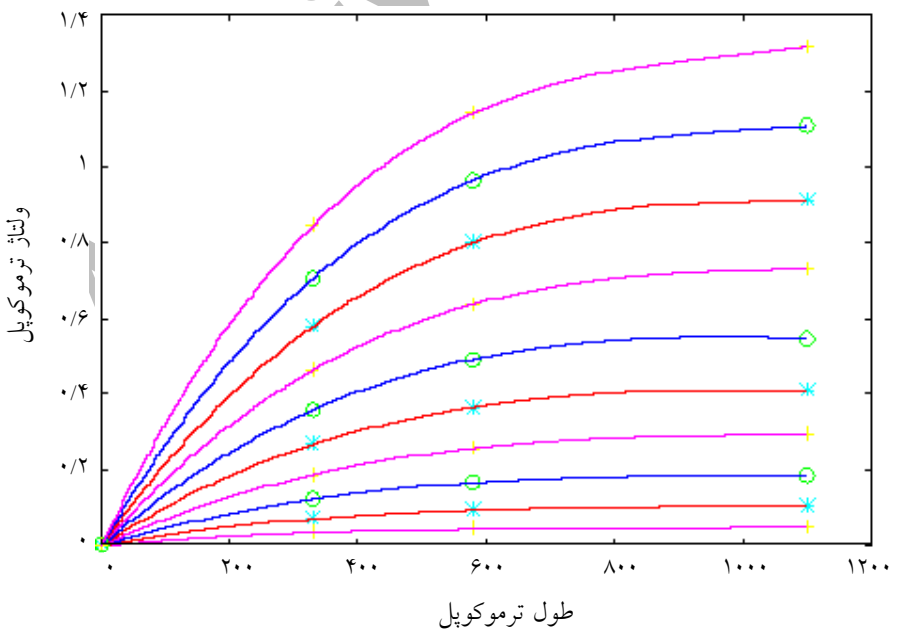
شکل ۳- تصویر ترموکوپل‌های ساخته شده، متشکل از یک گرمکن و سه ترموکوپل ساده

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۴- منحنی تغییرات ولتاژ خروجی ترموکوپل بر حسب توان الکتریکی مصرفی گرمکن



شکل ۵- منحنی تغییرات ولتاژ خروجی ترموکوپل بر حسب طول بازوهای ترموکوپل‌ها برای توان گرمایی گرمکن از ۱۰ تا ۱۶۰ میلی‌وات

www.SID.ir

پس از آزمایش‌های مربوط به حساسیت و رفتار ترموکوپل‌ها نوبت به آزمایش و بررسی رفتار حسگرهای ساخته شده می‌رسد. برای این منظور باید تغییرات ولتاژ ترموپیل‌ها در برابر تغییرات جریان هوای عبوری از داخل کانال ساخته شده را اندازه‌گیری کنیم. هنگامی که سرعت جریان هوا صفر است، توزیع گرما در دو طرف گرمکن کاملاً متقارن می‌باشد و با ایجاد یک جریان هوا این توزیع به هم می‌خورد، که این تغییرات توسط ترموپیل‌ها قابل اندازه‌گیری است. به طور کلی دو رژیم مختلف در چگونگی رفتار این افزاره دخالت دارد:

۱- انتقال گرمای ایجاد شده توسط گرمکن، به وسیله مکانیزم همرفت واداشته، که در جریان‌های کم اتفاق می‌افتد. در این وضعیت، انتقال گرما متناسب با سرعت انتقال جرم هوای جابجا شده است و در نتیجه با سرعت جریان هوا متناسب می‌باشد، که به آن رژیم کالری‌متری نیز می‌گویند.

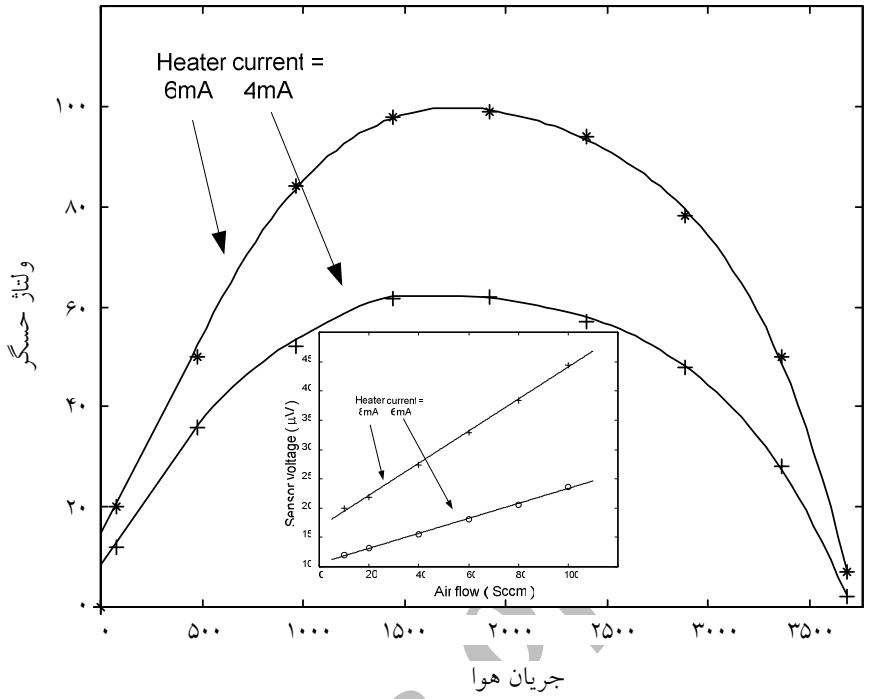
۲- رژیم سرد شدن افزاره که در سرعت‌های بالاتر جریان هوا دخالت دارد. در این وضعیت به علت افزایش سرعت جریان هوا فرصت برای تبادل انرژی گرمایی بین توده هوای گرم شده و ترموپیل‌ها وجود ندارد. لذا جریان هوا انرژی گرمایی را با خود برده و منجر به سرد شدن ترموپیل‌ها می‌شود. با توجه به موارد ذکر شده به دو صورت می‌توان از این نوع حسگر استفاده کرد:

الف- تفاضل ولتاژ ترموپیل‌ها: در این حالت زمانی که جریان هوا وجود ندارد، هر دو ترموپیل به دلیل متقارن بودن افزاره در شرایط یکسان گرمایی قرار دارند، لذا اختلاف ولتاژ صفر خواهد بود (البته اگر ترموپیل‌ها از لحاظ هندسی متقارن نباشند، اختلاف ولتاژ صفر نخواهد بود) و با وجود جریان هوا اختلاف بیشتر خواهد شد (رژیم کالری‌متری). در شکل ۶ نمودار تغییرات تفاضل ولتاژ ترموپیل‌ها برحسب سرعت جریان هوا رسم شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در ابتدا منحنی صعودی است و در جریان‌های کم رفتار حسگر کاملاً خطی است (نمودار شکل کوچک‌تر وارد شده در شکل۶ بیانگر این مطلب است) و با افزایش جریان هوا رژیم سرد شدن بر رژیم کالری‌متری غلبه کرده و نمودار نزولی می‌شود، که بدین ترتیب نقطهٔ عطفی در رفتار حسگر مشاهده می‌شود که نیاز به بررسی نظری دقیق دارد. با اعمال توان الکتریکی بیشتر به گرمکن حساسیت حسگر افزایش می‌یابد که در شکل ۶ نمودار برای جریان ۴ mA و ۶ mA رسم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود در جریان ۴ mA حسگر تا جریان ۴۰۰ sccm و در جریان ۶ mA تا جریان ۱۰۰۰ sccm خطی است. با توجه به این که پاسخ گرفتن از یک افزارهٔ ترموکوپلی با اتصالات فلزی کاری دشوار است، این نتیجه قابل توجه است.

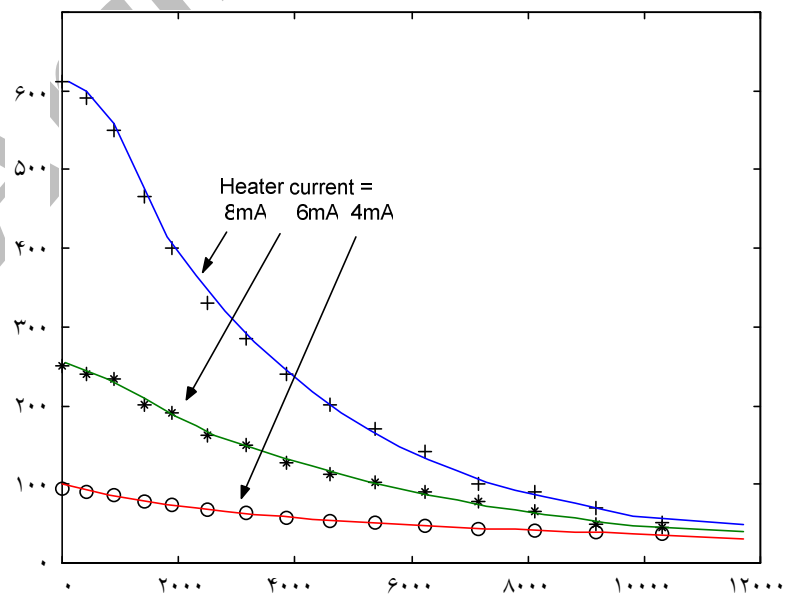
ب- حاصل جمع ولتاژ ترموپیل‌ها: در این وضعیت با جمع کردن ولتاژ ترموپیل‌ها می‌توان از رژیم سرد شدن بهره برد و از حسگر جهت اندازه‌گیری جریان‌های بالاتر استفاده نمود. زمانی که جریان هوا وجود ندارد، حسگر دارای بیشترین ولتاژ بوده و با سرد شدن گرمکن، ولتاژ حاصل جمع ترموپیل‌ها کاهش می‌یابد. در شکل ۷ نمودار تغییرات ولتاژ حاصل جمع ترموپیل‌ها بر حسب تغییرات جریان هوا رسم شده است. با توجه به نمودار در جریان‌های کم (کمتر از ۵۰۰ sccm) به دلیل وجود رژیم کالری‌متری شیب منحنی کم است و در جریان‌های بالا و غلبه رژیم سرد شدن، شیب منحنی افزایش می‌یابد و در جریان‌های بیشتر از ۵۰۰۰ sccm حسگر به سمت اشباع شدن رفته و شیب منحنی کم می‌شود. رفتار حسگر ساخته شده در این وضعیت، مشابه با رفتار حسگرهای ساخته شده توسط دیگر محققین است [۸].

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۶- منحنی تغییرات ولتاژ خروجی حسگر شار گاز بر حسب میزان جریان هوا، در حالت تفاضل ولتاژهای ترموپیل‌ها، در جریان‌های الکتریکی mA ۴ و mA ۶ اعمال شده به گرمکن. شکل کوچک‌تر در جریان‌های mA ۶ و mA ۸ تا جریان sccm ۱۰۰ اندازه‌گیری شده است.

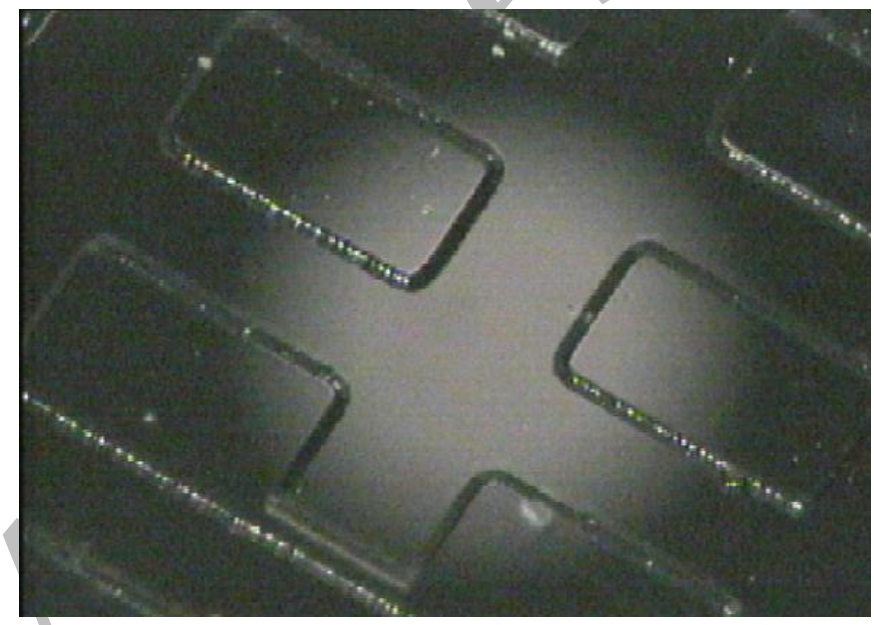


شکل ۷- منحنی تغییرات ولتاژ حسگر بر حسب جریان هوا، در حالت حاصل جمع ولتاژهای ترموپیل‌ها

www.SID.ir

بررسی و ساخت غشاء شیشه‌ای

یکی از عوامل مهم در افزایش حساسیت و سرعت پاسخ‌دهی افزاره، کاهش جرم زیرلایه است. برای این منظور عملیات ریزماشینکاری در محلول شیمیایی بر روی شیشه انجام شده است. پس از ساخت ماسک مورد نظر که مستطیل‌هایی به ابعاد $۲۰۰\times۵۰۰\ \mu m^2$ می‌باشد، زدایش شیشه در محلول بافر شده اسیدهیدروفلوئوریک (BHF) انجام پذیرفته است. آهنگ زدایش این محلول یک میکرون در دقیقه بوده و ماسک محافظ در برابر زدایش، فلز کروم است. پس از ۵۰ دقیقه زدایش در این محلول و کاهش ضخامت شیشه از دو طرف، ضخامت غشاء به حدود ۳۰ میکرون می‌رسد. در شکل ۸ تصویری از غشاهای ساخته شده مشاهده می‌شود. با قرار دادن یک لایهٔ نیترید سیلیکان بر روی شیشه می‌توان غشائی از نیترید سیلیکان به ضخامت ۰/۵ میکرون بر روی شیشه ایجاد کرد. با ساخت این حسگر بر روی این غشاء با توجه به کاهش قابل توجه جرم زیرلایه و در نتیجه کاهش اینرسی حرارتی افزاره می‌توان حساسیت و سرعت پاسخ افزاره را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داد.



شکل ۸- تصویر اپتیکی از شیشه ای که عملیات ریزماشینکاری بر روی آن صورت پذیرفته است

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله روش ساخت یک حسگر شار گاز و غشاء نازک شیشه‌ای توضیح داده شد. شکل هندسی افزاره باعث شد تا حسگر بتواند در رژیم کالری‌متری در برابر جریان هوا حساسیت نشان دهد. رفتار این حسگر در مقابل جریان هوا در دو حالت، حاصل جمع و تفاضل ولتاژهای ترموپیل‌ها، مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به این که پاسخ گرفتن از افزاره‌ای ترموکوپلی با اتصالات فلزی کاری دشوار است، طراحی خاص این افزاره باعث شده است تا بتوان نتایجی این چنین به دست آورد، به

www.SID.ir

طوری که تا جریان sccm ۴۰۰ و sccm ۱۰۰۰ برای جریان‌های مختلف ۴ و۶ میلی‌آمپر اعمال شده به گرمکن، رفتار حسگر خطی است. برای دستیابی به این نتایج، طراحی و ساخت کانال هوا جهت ایجاد حرکت لایه‌ای هوا از روی حسگر نقش موثری داشته است. سیم‌بندی و برقراری اتصالات الکتریکی به روش ریز لحیم‌کاری صورت پذیرفت، ریزماشینکاری زیر لایه‌های شیشه‌ای جهت ساخت غشاء نازک در محلول شیمیایی با موفقیت انجام شد، امید می‌رود که بتوان این نوع حسگر را به تولید نیمه صنعتی رساند.

مراجع

[۱] مهاجرزاده، ش، خاکی‌فیروز، ع، صالحی، ف، گیتی‌بین، م و اصل‌سلیمانی، ا، "ترموکوپل‌های فلزی مینیاتوری و کاربرد آن‌ها در ساخت حسگرهای حرارتی و شار گاز"، *مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس مهندسی برق ایران*، جلد اول ، ۱۳۷۹، صفحات ۱۲۷ تا ۱۳۳.

[2] Lenggenhaaer, R., Jaeggi, D., Malcovati, P., Duran, H. and Baltes, H., *"CMOS Membrane Infrared Sensors and Improved TMAHW etchant"* E. Doering, IEDM, (1999) 531-535.

[۳] مظفری، م، زندی، ک، حاجی، ص، مهاجرزاده، ش، و اصل‌سلیمانی، ا، "بررسی و ساخت پل‌های میکرونی و غشاهای نازک نیترید سیلکیان روی ویفر Si(100) "، *مجموعه مقالات نهمین کنفرانس مهندسی برق ایران*، جلد **اول**، ۱۳۸۰، صفحات ۳۴.۱ تا ۳۴.۷.

[۴] مظفری، م، مهاجرزاده، ش، اصل‌سلیمانی، ا، و ارضی، ع، *"طراحی ساخت* حسگر شار گاز و غشای شیشه‌ای *با استفاده* از روش‌های لایهٔ نازک و ریزماشینکاری*". مجموعه مقالات کنفرانس فیزیک ایران، دانشگاه تربیت معلم سبزوار*، ۱۳۸۰، صفحات ۹ و ۶۴.

[5] Rossi, C., Temple-Boyer, P. and Esteve, D., "Realization and performance of thin SiO_2/SiNx membrane for microheater applications" *Sensors and Actuators* A 64 (1998) 241-245.

[6] Shafai, C., Brett, M.J. and Hrudey, T.M., "Etch-induced stress failures of SiO_2 cantilever beams". *Sensors and Actuators* A70, (1998) 283-290.

[7] Domínguez, M., Masana, F.N., Jiménez,V., Bermejo. S., Amirola, J., Ballester, J., Fueyo, N. and Castañer, L.M., "Low-Cost Thermal Σ–Δ Air Flow Sensor" *IEEE Sensors Journal*, 2, 5 (2002).

[8] Elbel,T., Bethke, M., Rahf, M., Runge, D., Schuppe,W. and Kessler, E, "Smart gas flow sensor with a thin film thermopile*"*, *Proceedings of the 9th International trade fair and conference for sensors, transducers and systems*, Nurenberg/ Germany, 1 (1999) 225-230.

Archive of SID

www.SID.ir