

تأثیر قرار دادن لایه نازک سیلیکون در زیر غشای دی الکتریک بر روی عملکرد یک میکروهیتر

فاطمه سمائی فر^{۱*}، احمد عقیفی^۲، حسن عبداللهی^۳

۱- دانشجوی دکتری، برق الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۲- استادیار، مجتمع برق الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۳- استادیار، برق و الکترونیک، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

*fsamaeifar@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۴/۱۰، تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۹/۱۵)

چکیده

با توسعه ریز فناوری میکرو ماشین کاری و میکروالکترونیک، میکروهیترها کاربردهای زیادی در میکرو حسگرها پیدا کرده‌اند. یکنواختی توزیع دما یکی از عوامل تأثیرگذار در افزایش حساسیت و دقت یک حسگر گازی است که در آن هیتر استفاده شده است. در این مقاله روش قرار دادن لایه نازک سیلیکون در زیر غشای دی الکتریک به منظور بهبود یکنواختی گرما در میکروهیتر، مورد بررسی قرار گرفته است. دو میکروهیتر پلاتینی با ساختار غشای معلق بر روی بستر سیلیکون و بر پایه فناوری میکرو ماشین کاری حجمی طراحی، ساخته و مشخصه یابی شده‌اند. در میکروهیتر اول از لایه نازک سیلیکون به ضخامت $10\mu\text{m}$ در زیر غشای دی الکتریک استفاده شده است در حالی که میکروهیتر دوم بدون این لایه ساخته شده است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که با قرار دادن لایه نازک سیلیکون، یکنواختی توزیع دما و استحکام مکانیکی بهبود می‌یابد درحالی که توان مصرفی و پاسخ زمانی افزایش می‌یابد. هم چنین نتایج تجربی به نتایج حاصل از شبیه سازی بسیار نزدیک است و نشان می‌دهد که میکروهیتر با لایه نازک سیلیکون به ضخامت $10\mu\text{m}$ برای رسیدن به دمای 50°C دارای توان مصرفی و پاسخ زمانی 50mW و $4/23\text{ms}$ به ترتیب می‌باشد ولی میکروهیتر ساخته شده بدون این لایه، برای رسیدن به این دما دارای توان مصرفی و پاسخ زمانی 13mW و $2/4\text{ms}$ است.

واژه‌های کلیدی:

توزیع دمای یکنواخت، غشای معلق شده، میکروهیتر، میکرو حسگر، MEMS.

۱- مقدمه

توجهی کاهش می‌دهد [۶]. هم چنین استفاده از آن‌ها می‌تواند پیچیدگی فرآیند ساخت [۷] و قیمت در تولید انبوه را کاهش دهد [۸]. به منظور پاسخگویی به نیازهای سیستم‌های الکترونیکی مدرن انتظار می‌رود که میکروهیتر دارای توزیع دمای یکنواخت در سرتاسر ناحیه فعال میکروهیتر، اتلاف توان کم، استحکام حرارتی و مکانیکی بالا (برای افزایش استقامت میکروهیتر در

در سال‌های اخیر با گسترش ریز فناوری میکرو ماشین کاری (MEMS)^۱، به طور گسترده از میکروهیترها در کاربردهایی مثل حسگرهای گازی، حسگرهای فشار، حسگرهای رطوبت، آشکارکننده‌های فرسوخ، منابع فرسوخ و راه‌اندازها استفاده می‌شود [۱-۵]. استفاده از میکروهیترها در حسگرها به دلیل جرم حرارتی کم آن‌ها، پاسخ زمانی و اتلاف توان را به طور قابل

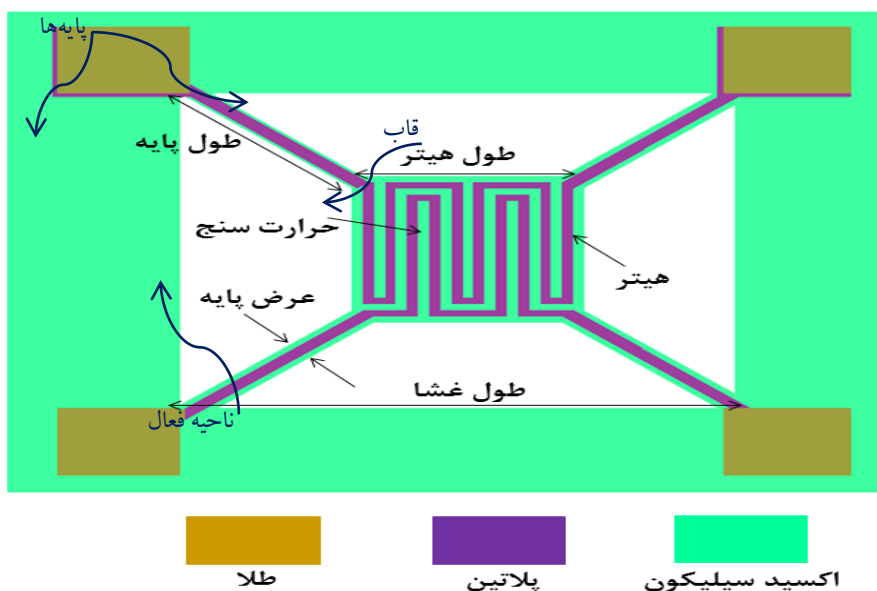
سیلیکون در زیر غشای دی‌الکتریک و میکروهیتر دیگر بدون آن، طراحی شده‌اند تا تاثیر وجود لایه نازک سیلیکون در عملکرد میکروهیترها بررسی شود. سپس مطابق با اصول طراحی و شرایط آزمایشگاه، یک فرایند ساده برای ساخت میکروهیترهای پلاتینی در نظر گرفته شده است. تعدادی از فرآیندهای استاندارد مدار مجتمع هم‌چون تبخیر پرتوالکترونی طلا و پلاتین، سونش مرطوب و فوتولیتوگرافی برای ساخت میکروهیترها به خدمت گرفته شده‌اند. در نهایت میکروهیترهای پلاتینی ساخته و مشخصه‌یابی شده‌اند تا از نظر توان مصرفی، یکنواختی توزیع دما و استحکام مکانیکی مقایسه شوند.

۲- طراحی و شبیه‌سازی

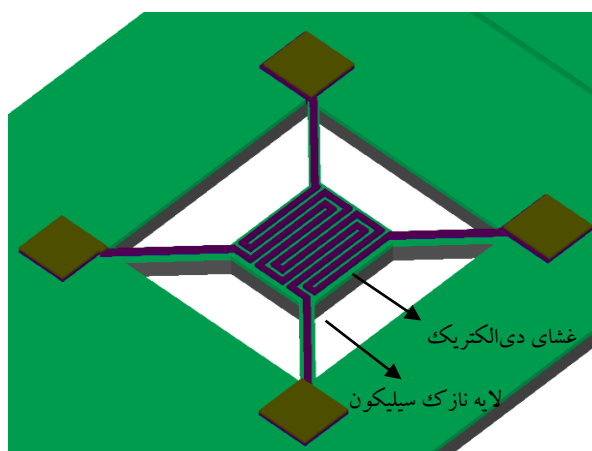
ساختار مورد نظر در این مقاله، دو مقاومت مارپیچ پلاتینی می‌باشد که بر روی یک غشای مستطیل شکل قرار گرفته‌اند و به طور کامل معلق شده‌اند. این ساختار (ساختار غشای معلق شده^۵) کمترین توان مصرفی را برای رسیدن به دمای مطلوب نیازمند است [۲۶]. غشا از طریق ۴ پایه به بستر سیلیکون وصل شده است. یکی از مقاومت‌های پلاتینی به عنوان هیتر و مقاومت دیگری به عنوان حرارت‌سنج استفاده می‌شود. در شکل (۱) نمای بالای میکروهیتر طراحی شده نشان داده است که از ۳ قسمت تشکیل می‌شود که عبارتند از: قاب نگهدارنده، پایه‌های ایزوله کننده حرارتی و ناحیه فعال. ناحیه فعال به شکل مربعی است که در وسط حسگر همانند یک جزیره به حالت معلق می‌باشد. در این ناحیه الکترودهای فلزی به صورت دو مقاومت مارپیچ قرار گرفته‌اند. یکی از الکترودها از ۳ مارپیچ به عنوان منبع تولید گرما (هیتر) و دیگری از ۲ مارپیچ به عنوان حرارت‌سنج تشکیل شده است. چهار پایه‌ی ایزوله کننده در چهار گوشه، به ناحیه فعال مربعی شکل وصل شده‌اند تا ناحیه فعال را به حالت معلق در آورند. این پایه‌ها، ایزوله حرارتی را بین ناحیه فعال و بستر ایجاد می‌کنند تا حرارت از ناحیه فعال به بستر انتقال نیابد. هم‌چنین اتصالات الکتریکی بین الکترودها و مدارات الکتریکی از طریق این پایه‌ها انجام می‌شود. قاب نگهدارنده از جنس بستر

محیط‌های نامتعارف) و مطابقت با فرایند ساخت استاندارد مدار مجتمع (برای توانایی در مجتمع شدن با مدارات الکتریکی و کاهش قیمت در تولید انبوه) باشد. هم‌چنین توانایی تحمل میکروهیتر در انجام فرآیند عملیات حرارتی^۲ بعد از بسته‌بندی در دمای بالاتر از ۷۰۰ درجه سلیسیوس بسیار حائز اهمیت است [۹]. در بسیاری از مقالات منتشر شده در زمینه میکروهیتر از کربیدسیلیکون [۱۰]، پلاتین [۱۱، ۴-۱۵]، پلی‌سیلیکون [۱۶]، طلا [۱۷] و آلومینیوم [۱۸ و ۱۹] به عنوان الکترود گرم کننده استفاده شده است. هم‌چنین از پلی‌مید [۲۰]، سیلیکون [۴-۱۵] و SOI^۳ [۱۷] به عنوان بستر استفاده شده است. پلاتین فلزی است که دمای ذوب آن بالا (1768°C) است و تحمل آن در دماهای بالا بیشتر است. این فلز در برابر مواد شیمیایی پایداری خوبی دارد. در ضمن پاسخ آن در محدوده ۲۰۰- تا ۶۵۰ درجه سلیسیوس خطی است و مقدار ضریب دمایی مقاومت (TCR)^۴ آن برابر با $38 \times 10^{-4} \text{C}^{-1}$ می‌باشد [۸]. از این رو فلز پلاتین به طور گسترده به عنوان المان گرم کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای افزایش حساسیت و دقت یک حسگر گازی که در آن از هیتر استفاده شده است، یکنواختی توزیع دما در ناحیه فعال هیتر بسیار حائز اهمیت است. به منظور عملکرد خوب میکروهیتر اختلاف دما در ناحیه فعال نباید از ۵۰ سلیسیوس تجاوز کند [۲۱]. هم‌چنین در برخی منابع سفارش شده است که اختلاف دما کمتر از ۲۵ سلیسیوس باشد [۲۲]. یکنواختی دما در میکروهیتر را می‌توان از طریق چندین روش از جمله استفاده از لایه سیلیکون در زیر غشای میکروهیتر [۲۲-۲۳]، قرار دادن صفحه پلی‌سیلیکون در زیر غشای میکروهیتر [۲۴] و استفاده از هندسه‌های گوناگون در طراحی میکروهیتر به دست آورد [۲۵]. در [۲۶] روش استفاده از هندسه‌های گوناگون برای بهبود یکنواختی توزیع دما در میکروهیتر به طور کامل مورد بررسی قرار داده شد. در این مطالعه، روش قرار دادن لایه نازک سیلیکون در زیر غشای دی‌الکتریک مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا دو میکروهیتر با ساختار غشای معلق طراحی و شبیه‌سازی شده‌اند. یکی از میکروهیترها با قرار دان لایه نازک

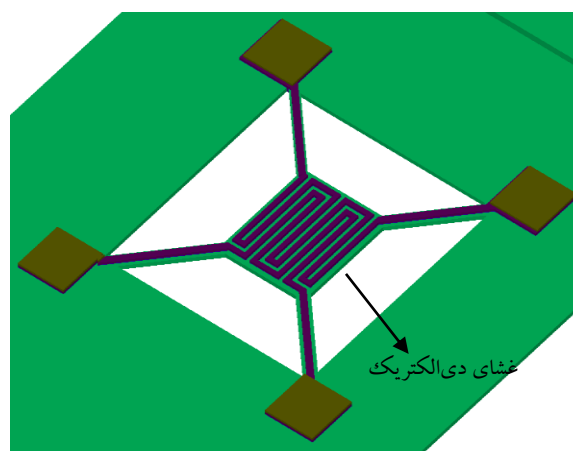
سیلیکون است که ناحیه فعال توسط پایه‌ها به آن وصل شده است.



شکل (۱): نمای بالای میکروهیتر



(ب)



(الف)



شکل (۲): میکروهیتر با ساختار غشای معلق: (الف): نوع الف: میکروهیتر بدون لایه سیلیکون، (ب): نوع ب: میکروهیتر با وجود لایه سیلیکون در زیر غشای دی الکتریک

مقاله روش قرار دادن لایه نازک سیلیکون در زیر غشای دی الکتریک مورد بررسی قرار گرفته است. از اینرو دو نوع ساختار برای میکروهیتر معرفی شده است:

برای افزایش حساسیت و دقت یک حسگر گازی که در آن از هیتر استفاده می‌شود، یکنواختی توزیع دما در ناحیه فعال هیتر بسیار حائز اهمیت است. همان‌طور که در بالا ذکر شد یکنواختی دما در میکروهیتر از طریق چندین روش به دست می‌آید. در این

جزئیات ابعاد میکروهیتر طراحی شده، آورده شده است. در تمامی شبیه‌سازی‌های انجام گرفته، از این خصوصیات و ابعاد استفاده شده است. برای مقایسه یکنواختی توزیع گرما در دو نوع میکروهیتر طراحی شده، به میکروهیترها ولتاژ ورودی برابر با ۰/۳۶۷ داده شده است. نتایج شبیه‌سازی الکتریکی-گرمایی در شکل (۳) آورده شده است. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، میکروهیتر بدون لایه سیلیکون (نوع الف) دارای گرادیان دمای بیش از ۸۰ درجه سلیسیوس است درحالی‌که میکروهیتر با وجود لایه سیلیکون به ضخامت $10\mu\text{m}$ در زیر غشای دی‌الکتریک (نوع ب)، دارای یکنواختی توزیع دمای خوبی می‌باشد.

نوع الف- میکروهیتر بدون لایه سیلیکون در زیر غشای دی‌الکتریک، که در ناحیه فعال فقط از دو لایه اکسیدسیلیکون و پلاتین به صورت یکپارچه تشکیل شده است (شکل ۲-الف). نوع ب- میکروهیتر با وجود لایه سیلیکون در زیر غشای دی‌الکتریک، که در ناحیه فعال علاوه بر لایه‌های پلاتین و اکسیدسیلیکون، لایه سیلیکون نیز وجود دارد (شکل ۲-ب). این دو نوع ساختار با استفاده از نرم‌افزار انسیس^۶ شبیه‌سازی و مقایسه شده‌اند. در شبیه‌سازی‌ها فقط اتلاف انرژی به شیوه جابه‌جایی گرما^۷ ملاحظه گردیده است و از اتلاف انرژی به شیوه تابش گرما^۸ به دلیل سائز میکروهیتر و محدوده دما صرف‌نظر شده است [۱۱]. جدول (۱) خصوصیات فیزیکی مواد استفاده شده در طراحی میکروهیتر را نشان می‌دهد [۲۴]. هم‌چنین در جدول (۲)

جدول (۱): خلاصه‌ای از خصوصیات الکتریکی و گرمایی مواد استفاده شده در شبیه‌سازی میکروهیتر [۲۴]

ماده	چگالی (kg/m^3)	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg-k)	رسانندگی گرمایی (W/m-k)	هدایت الکتریکی (s/m)	مدول یانگ (Mpa)	ضریب پواسن
سیلیکون	۲۳۳۰	۷۰۰	۱۵۰	-	$1/5 \times 10^5$	۰/۱۷
اکسید سیلیکون	۲۲۰۰	۱۰۰۰	۷۳	-	$0/7 \times 10^5$	۰/۲
پلاتین	۲۱۴۴۰	۱۳۲/۵۱	۳۱۵	۰/۰۹۴	$1/6 \times 10^5$	۰/۳۸
طلا	۱۹۲۸۰	۱۲۸/۷۴	۲۹۷	۰/۴۵	$7/8 \times 10^4$	۰/۴۴

است. همان‌طور که شکل (۴) نشان می‌دهد میکروهیتر نوع الف برای رسیدن به دمای ۵۰۰ درجه سلیسیوس دارای جابجایی عمودی در حدود $3/5\mu\text{m}$ است درحالی‌که میکروهیتر نوع ب برای رسیدن به این دما، دارای جابجایی عمودی در حدود $3/1\mu\text{m}$ می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که استحکام میکروهیتر نوع ب ۱۱/۵٪ بهبود یافته است.

شکل (۵-الف) و (۵-ب) به ترتیب توان مصرفی و پاسخ زمانی را به عنوان تابعی از ضخامت لایه سیلیکون قرار گرفته در زیر غشای دی‌الکتریک در دمای ۵۰۰ درجه سلیسیوس نشان می‌دهند. در این شکل‌ها ضخامت لایه سیلیکون از $0\mu\text{m}$ تا $20\mu\text{m}$ افزایش می‌یابد و مقدار توان مصرفی و پاسخ زمانی با استفاده از

جدول (۲): ابعاد میکروهیتر طراحی شده

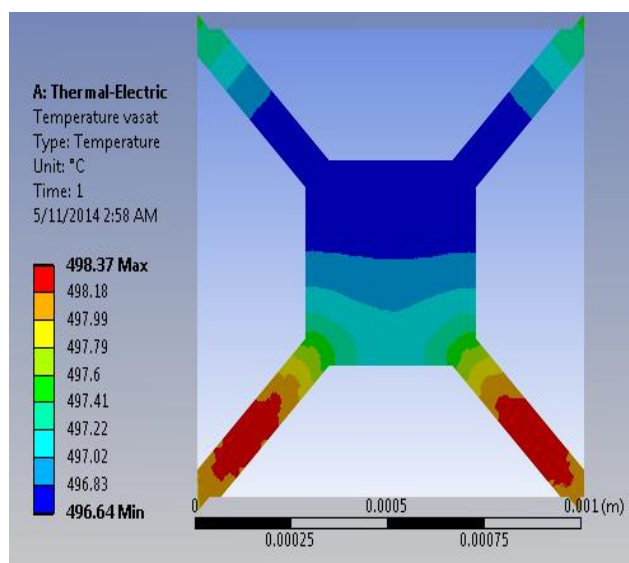
سازه	ابعاد (μm)
طول غشا	۱۰۰۰
طول هیتر	۴۴۰
طول پایه‌ها	۴۰۰
عرض پایه‌ها	۵۰
ضخامت سیلیکون	۱۰
ضخامت اکسید سیلیکون	۱
ضخامت پلاتین	۰/۱۲
ضخامت طلا	۰/۱۵

در شکل (۴) با استفاده شبیه‌سازی مکانیکی-گرمایی در نرم-افزار انسیس استحکام مکانیکی دو نوع میکروهیتر مقایسه شده

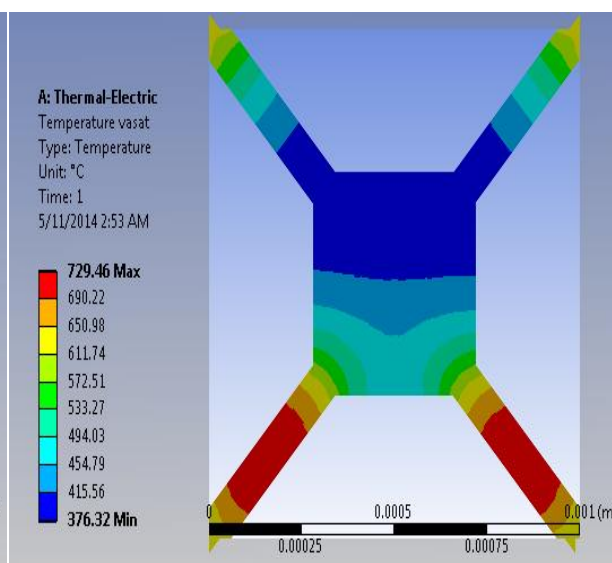
پاسخ زمانی، یکنواختی توزیع دما و استحکام مکانیکی ایجاد می‌کند؛ به‌طوری‌که قرار دادن لایه سیلیکون به ضخامت $10\ \mu\text{m}$ ، توان مصرفی و پاسخ زمانی را به ترتیب 79% و 52% افزایش می‌دهد، در حالیکه یکنواختی توزیع دما و استحکام مکانیکی را بهبود می‌دهد.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی و امکانات ساخت، تصمیم به ساخت دو میکروهیتر با ابعاد ذکر شده در جدول (۲) یکی بدون وجود لایه سیلیکون و دیگری با قرار دادن لایه نازک سیلیکون به ضخامت $10\ \mu\text{m}$ در زیر غشای دی‌الکتریک گرفته شد.

روابط بیان شده در [۲۶] به دست آمده است. همان‌طور که شکل (۵) نشان می‌دهد، در میکروهیتر بدون وجود لایه سیلیکون، توان مصرفی و پاسخ زمانی به ترتیب $10\ \text{mW}$ و $2\ \text{ms}$ می‌باشد و در میکروهیتر با وجود لایه سیلیکون به ضخامت $10\ \mu\text{m}$ ، توان مصرفی و پاسخ زمانی به ترتیب $48\ \text{mW}$ و $4\ \text{ms}$ می‌باشد. مشخص است با افزایش ضخامت سیلیکون، هم توان مصرفی و هم پاسخ زمانی افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که قرار دادن لایه نازک سیلیکون در زیر غشا یک رقابت بین توان مصرفی،

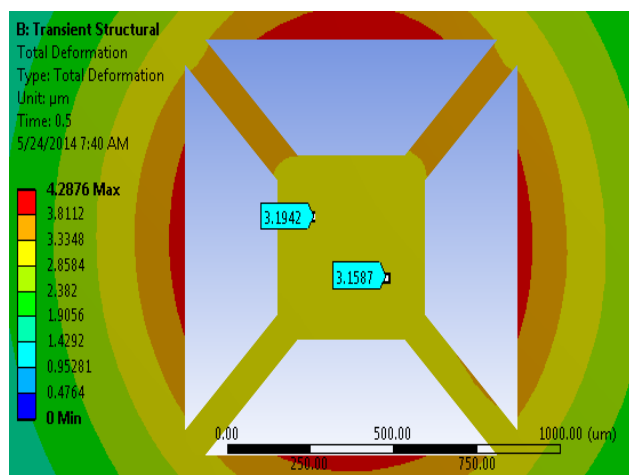


(ب)

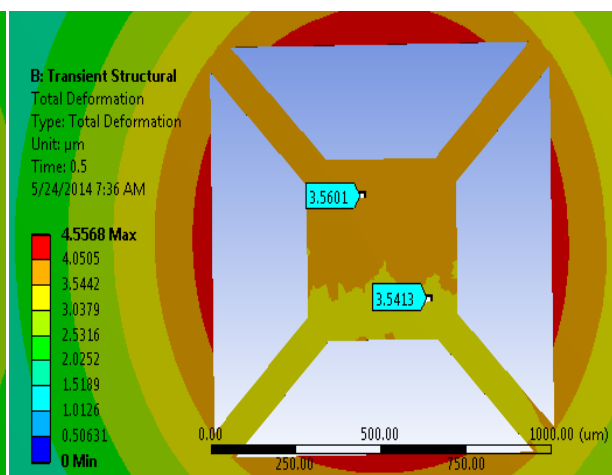


(الف)

شکل (۳): توزیع دما در (الف): میکروهیتر بدون قرار دادن لایه سیلیکون (نوع الف)، (ب): با لایه سیلیکون در زیر ناحیه فعال (نوع ب)

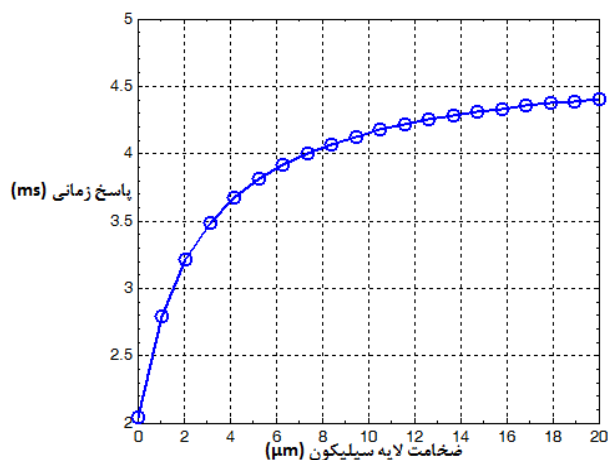


(ب)

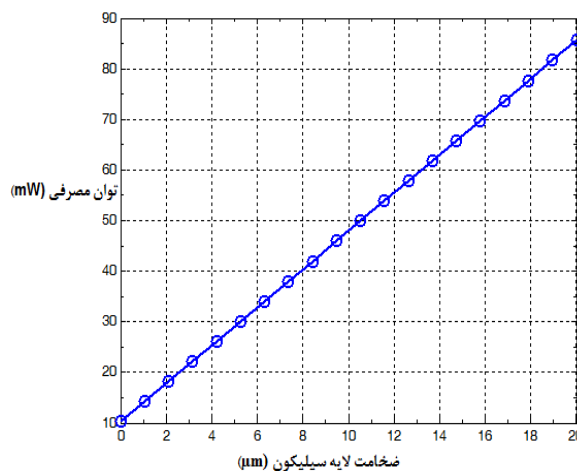


(الف)

شکل (۴): جابجایی عمودی در: (الف): میکروهیتر بدون قرار دادن لایه سیلیکون (نوع الف)، (ب): با لایه سیلیکون در زیر ناحیه فعال (نوع ب)



(ب)



(الف)

شکل (۵): (الف): توان مصرفی به عنوان تابعی از ضخامت لایه سیلیکون قرار گرفته در زیر غشای دی الکتریک، (ب): پاسخ زمانی به عنوان تابعی از ضخامت لایه سیلیکون قرار گرفته در زیر غشای دی الکتریک

۳- فرایند ساخت میکروهیتر

ساخت میکروهیتر با ساختار غشای معلق یک فرآیند با ۴ ماسک است که با استفاده از لیتوگرافی نوری و اتاق تمیز استاندارد انجام می‌شود. میکروهیتر بر روی بستر ویفر سیلیکون (۱۰۰) نوع P با ضخامت ۴۶۰ میکرومتر ساخته می‌شود. ویفر (۱۰۰) یکی از پرکاربردترین صفحات در میکروماشین کاری می‌باشد و اگر ماسک گذاری به گونه‌ای باشد که امتداد لبه ماسک موازی جهت <۱۱۰> باشد، دیواره‌های مایل با زاویه ۵۴/۷۴ در طی پروسه سونش شکل می‌گیرند. بنابراین نرخ زیر بریدگی^۹ در راستای این لبه‌های ماسک بسیار پایین است. شکل (۶) فرایند ساخت را نشان می‌دهد. در زیر مراحل ساخت میکروهیتر به طور خلاصه بیان شده است:

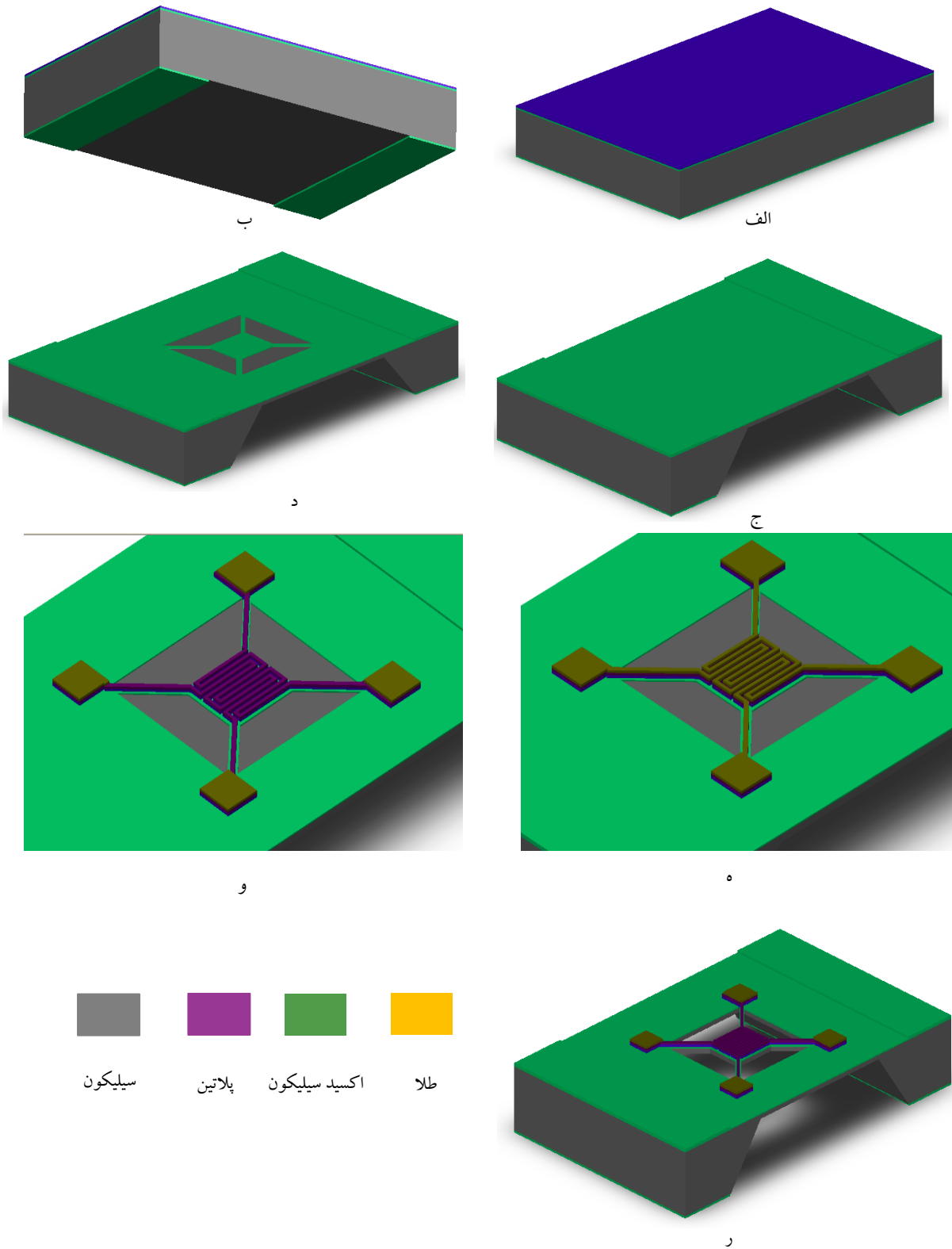
۱- بعد از تمیز کردن ویفر به روش استاندارد RCA، در دو طرف آن اکسید سیلیکون به ضخامت ۱ میکرومتر به روش حرارتی رشد داده شد. سپس ۱۵۰ نانومتر کروم بر روی نمونه‌ها لایه‌نشانی شد. برای افزایش پایداری کروم در TMAH، عملیات حرارتی بر روی کرم در دمای ۴۵۰ درجه سلیسیوس و جو گاز نیتروژن انجام شد (شکل ۶-الف).

۲- اکسید پشت نمونه الگودهی و با استفاده از سونشگر BOE^{۱۰} سونش^{۱۱} شد و یک پنجره در لایه اکسید ایجاد شد (شکل ۶-ب).

۳- سیلیکون در TMAH با غلظت ۲۵٪ در دمای ۹۰°C سونش شد تا عمق سونش سیلیکون به ۴۴۰ μm رسید. بعد از سونش سیلیکون، کروم با ۸۰٪ H₂O / ۲۰٪ (NH₄)₂Ce(NO₃) به طور کامل برداشته شد (شکل ۶-ج).

۴- اکسید روی نمونه با استفاده از سونشگر BOE الگودهی و سونش شد (شکل ۶-د).

۵- با استفاده از فرایند Lift-off الکترودها، الگودهی شدند. ابتدا فوتورزیست مثبت بر روی ویفر پخش و الگودهی شد. سپس کروم، پلاتین و طلا به روش تبخیر پرتوالکترونی به ترتیب با ضخامت‌های ۲۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ نانومتر لایه‌نشانی شدند. پلاتین به دلیل ویژگی‌های حرارتی خوب و مطابقت با فناوری MEMS سیلیکون به عنوان الکتروود گرم‌کننده انتخاب شد [۲۷]. کروم برای افزایش چسبندگی پلاتین و اکسید سیلیکون استفاده می‌شود. طلا برای اتصالات الکتریکی می‌باشد. آخرین گام برداشتن لایه‌های رزیست با استفاده از استون و در حمام آلتراسونیک می‌باشد (شکل ۶-ه).



شکل (۶): روندنما فرایند ساخت میکروهیتر: (الف): لایه نشانی اکسید سیلیکون به روش حرارتی در دو طرف ویفر، لایه نشانی کروم بر روی نمونه‌ها، (ب): ایجاد پنجره در لایه اکسید پشت، (ج): سونش سیلیکون به عمق $440\ \mu\text{m}$ ، سونش لایه کروم، (د): الگودهی و سونش اکسید روی نمونه‌ها، (ه): لایه نشانی الکترودها و الگودهی آن‌ها با پروسه Lift-off، (و): الگودهی و سونش طلا و (ز): معلق کردن میکروهیتر

صورت عمودی خارج شدند. در این مرحله نمونه‌ها نباید با باد خشک شوند زیرا باد به ساختار معلق نمونه‌ها صدمه وارد می‌کند، نمونه‌ها باید بدون باد گرفتن و در دمای محیط به خودی خود خشک شوند (شکل ۶-ر).

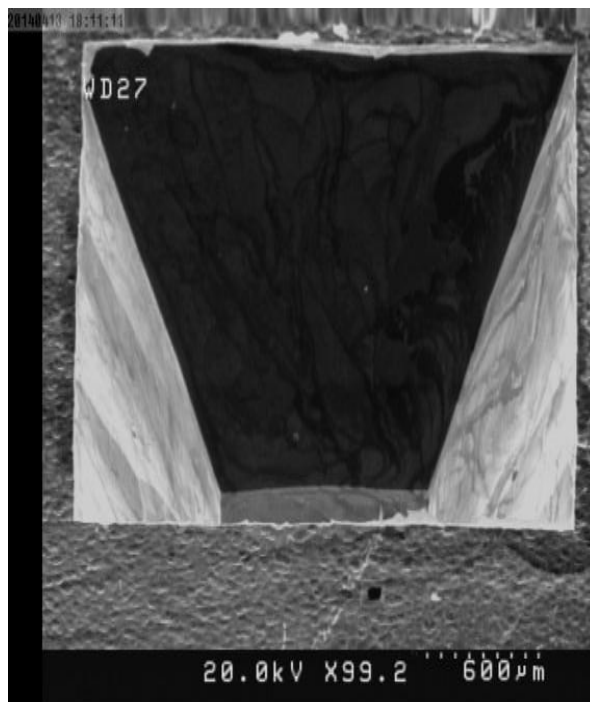
شکل‌های (۷-الف) و (۷-ب) به ترتیب تصاویر SEM از نمای بالا و عرضی از پشت غشا ایجاد شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است سطح غشاهای ایجاد شده صاف و بدون ناهمواری می‌باشد.

شکل (۸) تصویر SEM از نمای بالای میکروهیترهای ساخته شده را نشان می‌دهد. شکل‌های (۹-الف) و (۹-ب) به ترتیب تصاویر SEM از نمای عرضی میکروهیترهای ساخته شده بدون وجود لایه نازک سیلیکون در زیر غشای دی‌الکتریک (نوع الف) و با وجود آن (نوع ب) را نشان می‌دهد.

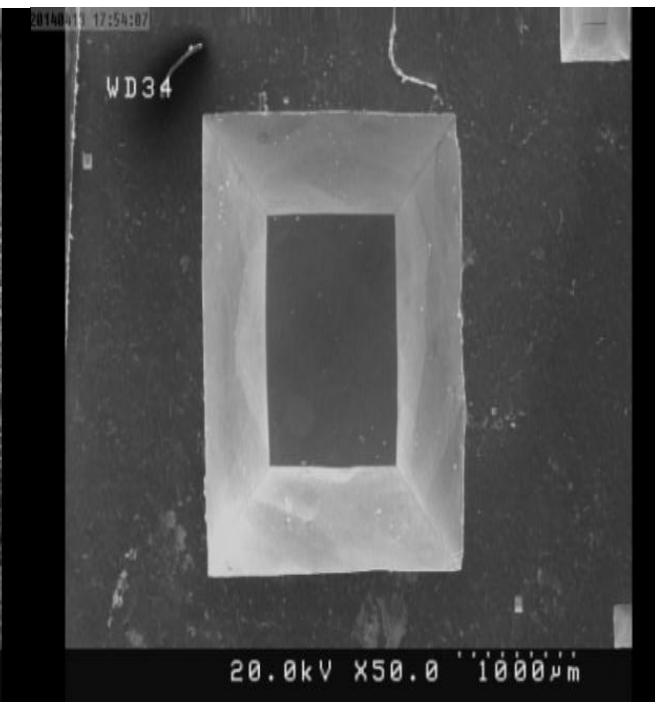
۶- طلا الگودهی شده و با $5I_2/10KI/75H_2O$: سونش شد (شکل ۶-و).

۷- برای معلق کردن میکروهیترهای نوع ب، نمونه‌ها در TMAH با غلظت ۲۵٪ و دمای $90^{\circ}C$ قرار گرفت. بعد از گذشت ۲۰ دقیقه میکروهیترهای نوع ب آماده شدند که در زیر غشای اکسید، لایه نازک سیلیکون در حدود ۱۰ میکرومتر وجود داشت. برای آماده کردن میکروهیترهای نوع الف، می‌بایست لایه نازک سیلیکون به طور کامل سونش شود. برای این منظور، نمونه‌ها در محلول TMAH با غلظت ۵٪ که در آن سیلیکون آمورف به میزان ۱۵g/l حل شده بود، به مدت ۲ ساعت در دمای $80^{\circ}C$ قرار گرفتند. این محلول نسبت به اکسیدسیلیکون کاملاً منفعل است و بدون صدمه زدن به آن، لایه نازک سیلیکون را سونش می‌کند.

۸- نمونه‌ها سپس در داخل آب مقطر غوطه‌ور شدند تا آب جایگزین TMAH شود. بعد از ۱۵ دقیقه، نمونه‌ها از آب به

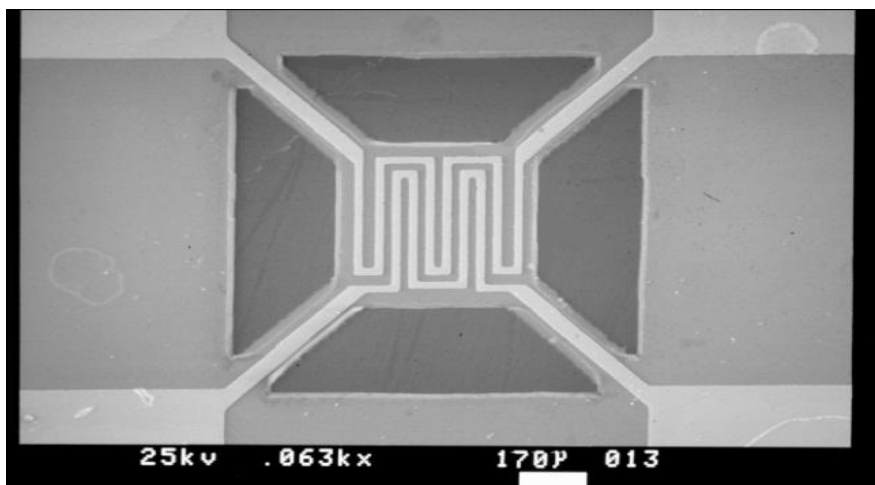


(ب)

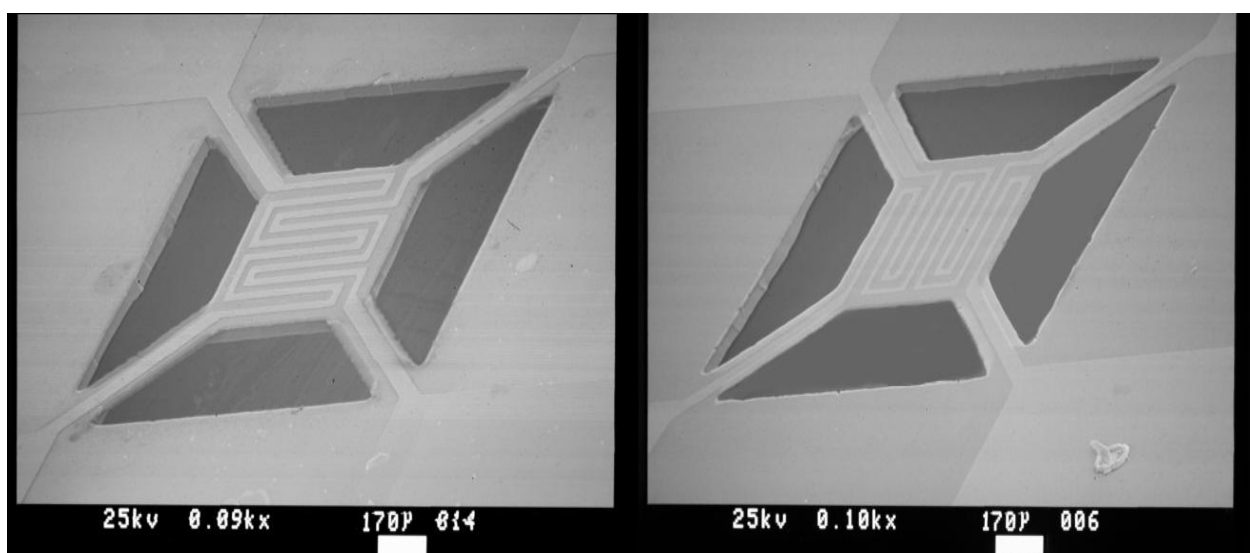


(الف)

شکل (۷): تصاویر SEM از پشت غشاهای ایجاد شده (الف): نمای بالا، (ب): نمای عرضی



شکل (۸): تصویر SEM از نمای بالا میکروهیترهای ساخته شده



(ب)

(الف)

شکل (۹): تصویر SEM از نمای عرضی میکروهیترهای ساخته شده (الف): بدون قرار دادن لایه سیلیکون، (ب): با لایه سیلیکون در زیر ناحیه فعال

۴- نتایج آزمایش

میکروهیترهای ساخته شده از دو مقاومت پلاتینی تشکیل شده- اند. از یکی از مقاومت‌ها به عنوان هیتر و از مقاومت دیگر به عنوان حرارت‌سنج استفاده شده است. ابتدا میکروهیترهای ساخته شده سیم‌زنی شدند و سپس مشخصات دمایی میکروهیترها، توان مصرفی و پاسخ زمانی آن‌ها بررسی شد.

۴-۱- ضریب مقاومت الکتریکی (TCR)

برای تعیین مشخصات دمایی میکروهیترها و کالیبره کردن آن‌ها، میکروهیترها به همراه یک سنسور دمای مرجع داخل کوره

قرار داده شدند و تغییرات مقاومت برای گام‌های دمایی مختلف اندازه‌گیری شد (شکل ۱۰). همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است پاسخ دمایی خطی و مقدار TCR برابر 10^{-3}C^{-1} می‌باشد. مقدار TCR از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\alpha = \frac{R_t - R_i}{R_i (\Delta T)}$$

در این رابطه α ضریب مقاومت دمایی (TCR)، ΔT اختلاف دما، R_t و R_i مقدار مقاومت در دماهای t و i درجه سلیسیوس می‌باشند.

۴-۲- توان مصرفی

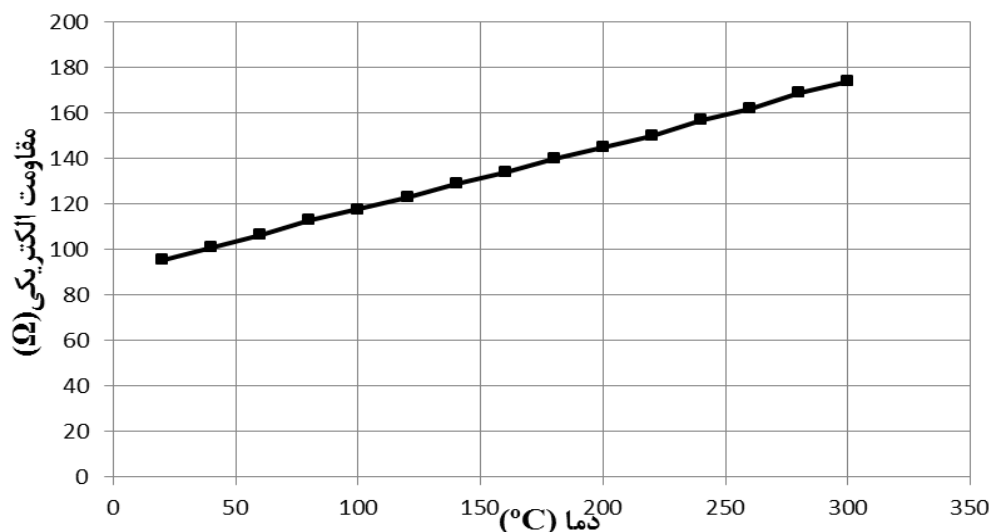
در شکل (۱۱) توان مصرفی میکروهیتر به عنوان تابعی از دمای آن نشان داده شده است. برای به دست آوردن این نمودار، به میکروهیترها ولتاژهای مختلف اعمال شد و تغییرات مقاومت الکتریکی ثبت شد. سپس با استفاده از رابطه $P = \frac{V^2}{R}$ و شکل (۱۰)، نمودار تغییرات توان مصرفی در مقابل تغییرات دما رسم شد. همان‌طور که از این شکل می‌توان استنباط کرد میکروهیتر نوع ب برای رسیدن به دمای 500°C ، 50mW توان نیاز دارد در حالیکه میکروهیتر نوع الف برای رسیدن به این دما، فقط 13mW توان مصرف می‌کند. یعنی با توجه به نتایج اندازه‌گیری شده، با قرار دادن لایه نازک سیلیکون در زیر غشای دی-الکتریک، توان مصرفی 74% افزایش یافته است. باید توجه کرد که نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی فقط در حدود 5% با هم تفاوت دارند و این نشان می‌دهد که شبیه‌سازی بیان شده، از اطمینان کافی برخوردار است.

۴-۳- پاسخ زمانی

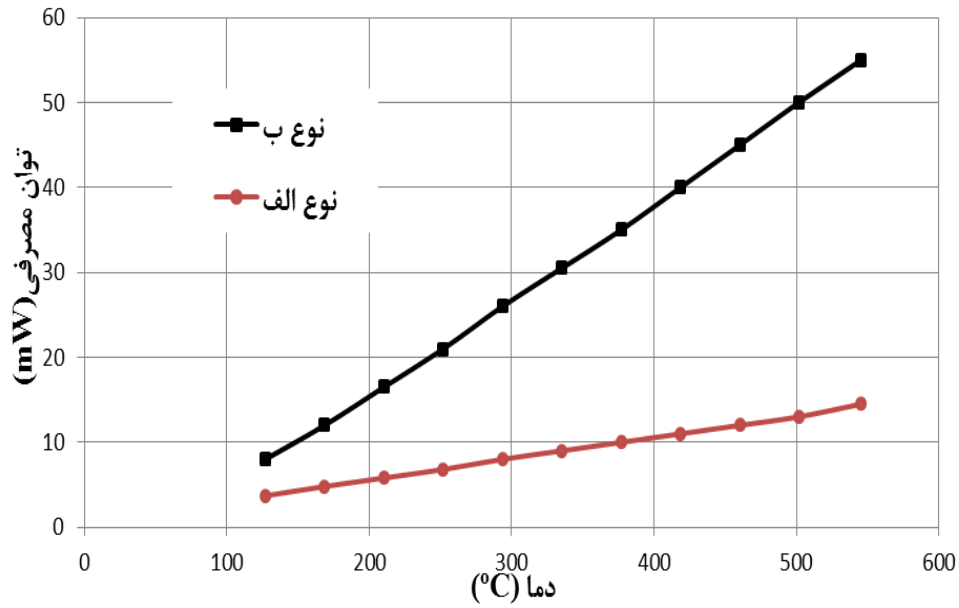
برای اندازه‌گیری پاسخ زمانی میکروهیترهای ساخته شده، پالس مربعی جریان با دامنه 5 میلی‌آمپر و با مدت زمان 70 میلی‌ثانیه به هیتر اعمال شد و ولتاژ حرارت‌سنج اندازه‌گیری شد. شکل (۱۲-الف) و (۱۲-ب) به ترتیب ولتاژ حرارت‌سنج

میکروهیترهای نوع الف و نوع ب را به عنوان تابعی از زمان وقتی پالس جریان به هیتر وارد می‌شود را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص است که ثابت زمانی میکروهیتر نوع ب در یک سیکل گرم شدن تا دمای 500 درجه سیلیسیوس، $4/23$ میلی‌ثانیه است در حالیکه ثابت زمانی میکروهیتر نوع الف $2/4$ میلی‌ثانیه می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با قرار دادن لایه سیلیکون به ضخامت $10\mu\text{m}$ در زیر غشای دی-الکتریک، پاسخ زمانی 43% افزایش می‌یابد که به نتایج حاصل از شبیه‌سازی بسیار نزدیک است.

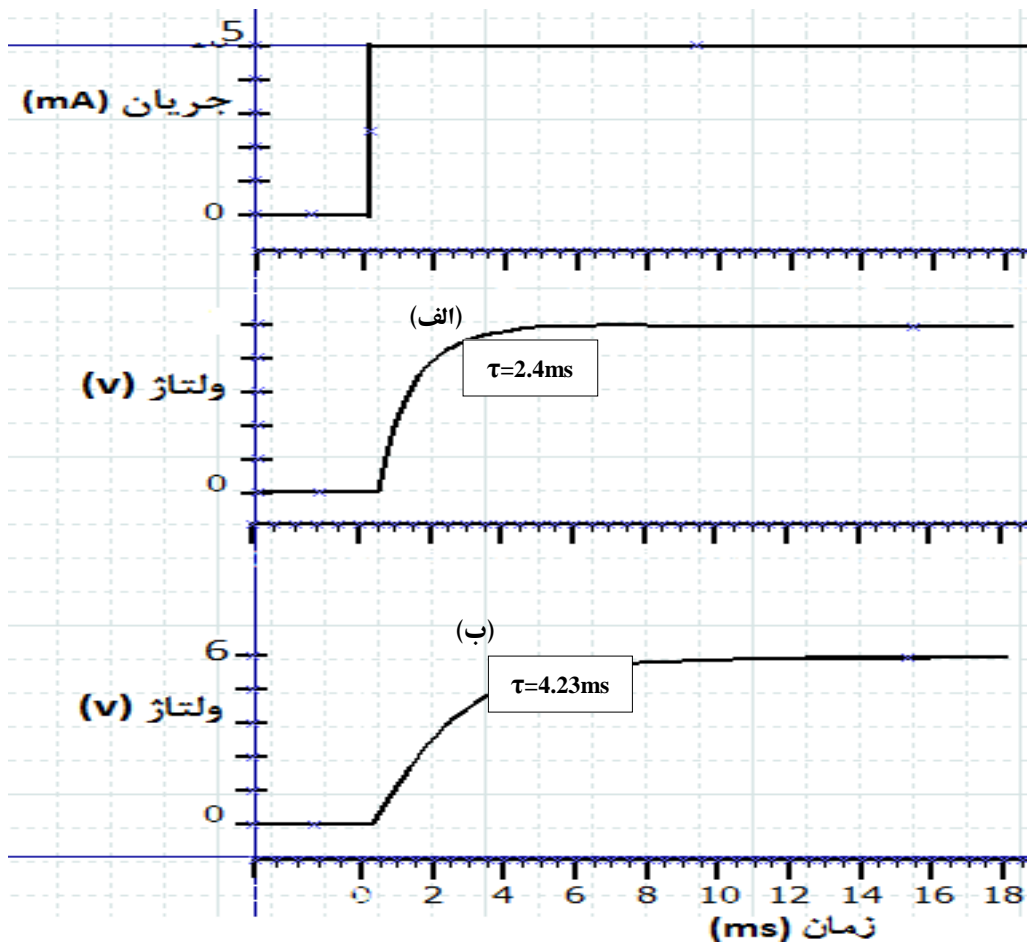
همان‌طور که از نتایج شبیه‌سازی نیز انتظار می‌رفت با قرار دادن لایه نازک سیلیکون، توان مصرفی و پاسخ زمانی افزایش یافته است ولی به دلیل رسانندگی گرمایی لایه سیلیکون، یکنواختی گرما در ناحیه فعال میکروهیتر بهبود می‌یابد. هم‌چنین استحکام مکانیکی میکروهیتر نیز بهبود یافته است. انتظار می‌رود با نازک‌تر کردن لایه سیلیکون تعبیه شده در زیر غشای دی-الکتریک (در حدود $1\mu\text{m}$)، یک مصالحه بین توان مصرفی، استحکام مکانیکی و یکنواختی توزیع گرما ایجاد کرد. خلاصه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی و آزمایشگاهی میکروهیترها در جدول (۳) آورده شده است.



شکل (۱۰): منحنی تغییرات مقاومت با تغییر دما در میکروهیترهای پلاتینی ساخته شده



شکل (۱۱): تغییرات دمای میکروهیتر به عنوان تابعی از توان مصرفی آن



شکل (۱۲): ولتاژ حرارت‌سنج به عنوان تابعی از زمان با اعمال پالس مربعی جریان به هیتر

جدول (۳): مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی و تجربی

نتایج حاصل از شبیه سازی			
میزان افزایش	میکروهیتر نوع ب (با وجود لایه سیلیکون)	میکروهیتر نوع الف (بدون لایه سیلیکون)	
٪۷۹	۴۸	۱۰	توان مصرفی (mW)
٪۵۲	۴/۱۵	۲	پاسخ زمانی (ms)
نتایج آزمایشگاهی اندازه گیری شده			
میزان افزایش	میکروهیتر نوع ب (با وجود لایه سیلیکون)	میکروهیتر نوع الف (بدون لایه سیلیکون)	
٪۷۴	۵۰	۱۳	توان مصرفی (mW)
٪۴۳	۴/۲۳	۲/۴	پاسخ زمانی (ms)

۵- نتیجه گیری

در این مقاله دو میکروهیتر با ساختار غشای معلق با استفاده از سیلیکون به عنوان بستر، اکسیدسیلیکون به عنوان لایه دی-الکتریک و پلاتین به عنوان الکتروود گرم کننده طراحی، ساخته و مشخصه یابی شده اند. یکی از میکروهیترها با قرار دان لایه نازک سیلیکون در زیر غشای دی الکتریک و میکروهیتر دیگر بدون این لایه، ساخته شده است تا تاثیر وجود لایه نازک سیلیکون در عملکرد میکروهیترها بررسی شود. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که با قرار دادن لایه نازک سیلیکون، استحکام مکانیکی به میزان ۱۱/۵٪ افزایش می یابد. هم چنین یکنواختی توزیع دما بهبود می یابد ولی پاسخ زمانی و توان مصرفی افزایش می یابند. در ضمن نتایج تجربی که از مشخصه یابی میکروهیترهای ساخته شده به دست آمده است، نتایج حاصل از شبیه سازی را تصدیق می کند و نشان می دهد که با قرار دادن لایه نازک سیلیکون به ضخامت $10\mu\text{m}$ در زیر غشا، توان مصرفی و پاسخ زمانی به ترتیب به میزان ۷۴٪ و ۴۳٪ افزایش می یابند ولی میکروهیتر از نظر استقامت و هم چنین یکنواختی توزیع دما به دلیل رسانندگی گرمایی لایه سیلیکون، بهبود می یابد. انتظار می رود که با نازک تر کردن لایه سیلیکون تعبیه شده (در حدود $1\mu\text{m}$) یک مصالحه بین توان مصرفی، استحکام مکانیکی، پاسخ زمانی و یکنواختی توزیع گرما به دست آورد.

۶- سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می دانند از گروه الکترونیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر به خصوص آقای مهندس منصور محتشمی فر برای حمایت های مالی و کمک های ارزشمندشان در تمام مراحل این پروژه تشکر نمایند.

۷- مراجع

- [1] J. Courbat, M. Canonica, D. Teyssieux, D. Briand & N. De Rooij, "Design and fabrication of micro-hotplates made on a polyimide foil: electrothermal simulation and characterization to achieve power consumption in the low mW range", Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 21, pp. 015014, 2010.
- [2] C.-L. Dai, "A capacitive humidity sensor integrated with micro heater and ring oscillator circuit fabricated by CMOS-MEMS technique", Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 122, pp. 375-380, 2007.
- [3] Elmi, S. Zampolli, E. Cozzani, F. Mancarella & G. Cardinali, "Development of ultra-low-power consumption MOX sensors with ppb-level VOC detection capabilities for emerging applications", Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 135, pp. 342-351, 2008.
- [4] W.-J. Hwang, K.-S. Shin, J.-H. Roh, D.-S. Lee & S.-H. Choa, "Development of micro-heaters with optimized temperature compensation design for gas sensors", Sensors, Vol. 11, pp. 2580-2591, 2011.

- dangled by wires in air”, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 83, pp. 250-255, 2002.
- [15] K.-N. Lee, D.-S. Lee, S.-W. Jung, Y.-H. Jang, Y.-K. Kim & W.-K. Seong, “A high-temperature MEMS heater using suspended silicon structures”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 19, pp. 115011, 2009.
- [16] M. Ehmann, P. Ruther, M. von Arx & O. Paul, “Operation and short-term drift of polysilicon-heated CMOS microstructures at temperatures up to 1200 K”, *Journal of micromechanics and microengineering*, Vol. 11, pp. 397, 2001.
- [17] X. Yi, J. Lai, H. Liang & X. Zhai, “Fabrication of a MEMS micro-hotplate”, in *Journal of Physics: Conference Series*, pp. 012098, 2011.
- [18] T. A. Kunt, T. J. McAvoy, R. E. Cavicchi & S. Semancik, “Optimization of temperature programmed sensing for gas identification using micro-hotplate sensors”, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 53, pp. 24-43, 1998.
- [19] R. Phatthanakun, P. Deekla, W. Pummara, C. Sriphung, C. Pantong & N. Chomnawang, “Fabrication and control of thin-film aluminum microheater and nickel temperature sensor”, *Proceedings of 8th International Conference of the Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, pp. 14-17, 2011.
- [20] M. Aslam, C. Gregory & J. Hatfield, “Polyimide membrane for micro-heated gas sensor array”, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 103, pp. 153-157, 2004.
- [21] S. Astié, A. Gue, E. Scheid & J. Guillemet, “Design of a low power SnO₂ gas sensor integrated on silicon oxynitride membrane”, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 67, pp. 84-88, 2000.
- [22] D. Briand, M. Gretillat, B. Van Der Schoot & N. De Rooij, “Thermal management of micro-hotplates using MEMCAD as simulation tool”, *Power (mW)*, Vol. 1, pp. 5mm2, 2000.
- [23] P. Ruther, M. Ehmann, T. Lindemann & O. Paul, “Dependence of the temperature distribution in micro hotplates on heater geometry and heating mode”, *Proceedings of the 12th International Conference of Transducers, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, pp. 73-76, 2003.
- [5] W. Konz, J. Hildenbrand, M. Bauersfeld, S. Hartwig, A. Lambrecht, V. Lehmann & et al, “Micromachined IR-source with excellent blackbody like behaviour”, in *Proc. SPIE*, pp. 540-548, 2005.
- [6] C. Tao, C. Yin, M. He & S. Tu, “Thermal analysis and design of a micro-hotplate for Si-substrated micro-structural gas sensor”, *Proceedings of the 3rd IEEE International Conference of Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, pp. 284-287, 2008.
- [7] J. Courbat, D. Briand & N. F. De Rooij, “Reliability improvement of suspended platinum-based micro-heating elements” *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 142, pp. 284-291, 2008.
- [8] G.-S. Chung & J.-M. Jeong, “Fabrication of micro heaters on polycrystalline 3C-SiC suspended membranes for gas sensors and their characteristics”, *Microelectronic Engineering*, Vol. 87, pp. 2348-2352, 2010.
- [9] J. Laconte, D. Flandre & J.-P. Raskin, *Micromachined thin-film sensors for SOI-CMOS co-integration*, Springer, Berlin, 2006.
- [10] J.-C. Shim & G.-S. Chung, “Fabrication and characteristics of Pt/ZnO NO sensor integrated SiC micro heater”, in *Sensors IEEE*, pp. 350-353, 2010.
- [11] J. C. Belmonte, J. Puigcorbe, J. Arbiol, A. Vila, J. Morante, N. Sabate & et al, “High-temperature low-power performing micromachined suspended micro-hotplate for gas sensing applications”, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 114, pp. 826-835, 2006.
- [12] B. Guo, A. Bermak, P. C. Chan & G.-Z. Yan, “A monolithic integrated 4×4 tin oxide gas sensor array with on-chip multiplexing and differential readout circuits”, *solid-state electronics*, Vol. 51, pp. 69-76, 2007.
- [13] Hotovy, V. Rehacek, F. Mika, T. Lalinsky, S. Hascik, G. Vanko & et al, “Gallium arsenide suspended microheater for MEMS sensor arrays”, *Microsystem Technologies*, Vol. 14, pp. 629-635, 2008.
- [14] D.-S. Lee, C.-H. Shim, J.-W. Lim, J.-S. Huh, D.-D. Lee & Y.-T. Kim, “A microsensor array with porous tin oxide thin films and microhotplate

[27] Mayadas & M. Shatzkes, "Electrical-resistivity model for polycrystalline films: the case of arbitrary reflection at external surfaces", Physical review B, Vol. 1, pp. 1382, 1970.

[24] J. O. Dennis, A. Y. Ahmed & N. M. Mohamad, "Design, Simulation and Modeling of a Micromachined High Temperature Microhotplate for Application in Trace Gas Detection", International Journal of Engineering and Technology, Vol. 10, pp. 89-96, 2010.

۸- پی نوشت

- [1] Micro-electromechanical Systems
- [2] Annealing
- [3] Silicon on insulator
- [4] Temperature coefficient of resistance
- [5] Suspended membrane
- [6] ANSYS
- [7] Thermal convention
- [8] Thermal radiation
- [9] Undercut
- [10] Buffered hydrofluoric acid
- [11] Etch

[25] O. Sidek, M. Ishak, M. Khalid, M. Abu Bakar & M. Miskam, "Effect of heater geometry on the high temperature distribution on a MEMS micro-hotplate", Proceedings of the 3rd Asia Symposium of Quality Electronic Design (ASQED), pp. 100-104, 2011.

[۲۶] ف. سمائی فر، ح. حاج قاسم، م. محتشمی فر، م. رض. علی احمدی، "طراحی و شبیه سازی میکروهیتر ساخته شده با تکنولوژی MEMS"، مجله صنایع الکترونیک، دوره ۳، شماره ۴، ص. ۹۵-۱۱۱، زمستان ۱۳۹۱.