



طراحی و ساخت میکروهیتر بهبود یافته با الکترودهایی از جنس طلا و مقایسه عملکرد آن با میکروهیتر پلاتینی

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

^۱ دانشجوی دکتری برق - الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۲ دانشیار دانشکده برق - الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۳ استادیار دانشکده برق، دانشگاه هوایی شهید ستاری

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۲۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۱۰/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۱۶

چکیده

با پیشرفت ریز فناوری میکروماشین‌کاری و میکروالکترونیک، میکروهیترها کاربردهای زیادی در میکرو حسگرها پیدا کرده‌اند. جنس الکتروود گرم‌کننده، یکی از عوامل تاثیرگذار در میزان اتلاف توان، پاسخ زمانی و حساسیت میکروهیتر است. در این مقاله، دو میکروهیتر با هندسه یکسان، اما با دو فلز مختلف روی بستر سیلیکون و بر پایه فناوری میکروماشین‌کاری حجمی (MEMS) طراحی، ساخته و مشخصه‌یابی شده‌اند. در میکروهیتر اول از طلا و در میکروهیتر دوم، از پلاتین به عنوان الکتروود گرم‌کننده استفاده شده، تاثیر جنس الکتروود گرم‌کننده روی میزان عملکرد میکروهیتر بررسی شده است. در ضمن برای بهبود کارایی میکروهیترها، طراحی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته و میکروهیتر با طراحی بهینه انتخاب شده است. نتایج تحلیل تئوری نشان می‌دهد که میکروهیتر طلائی، دارای پاسخ زمانی کمتر و توان مصرفی بیشتری نسبت به میکروهیتر پلاتینی است. نتایج آزمایشگاهی به دست آمده، نتایج حاصل از تحلیل تئوری را تصدیق می‌کند و نشان می‌دهد که میکروهیترهای ساخته شده با طراحی بهینه، دارای عملکرد بالایی هستند؛ به طوری که برای رسیدن به دمای بالای 450°C ، توان مصرفی و پاسخ زمانی در میکروهیتر طلائی به ترتیب 36mW و 1.75ms و در میکروهیتر پلاتینی به ترتیب 30mW و 2.1ms می‌باشند. این نتایج نشان می‌دهند که با ساختن میکروهیترهایی از جنس طلا پاسخ زمانی $16/6\%$ در مقایسه با میکروهیتر پلاتینی بهبود می‌یابد.

کلمات کلیدی: الکتروود گرم‌کننده؛ اتلاف توان؛ سیستم‌های میکروالکترومکانیکی؛ میکروهیتر؛ میکرو حسگر؛ MEMS.

Design and Fabrication of Optimized Gold Micro-Heater and Comparison of its Performance with Platinum MicroHeater

F. Samaeifar^{1,*}, A. Afifi², and H. Abdollahi³

¹ Ph.D. Student, Department of Elec. Eng., MUT University, Tehran, Iran.

² Assoc. Prof., Department of Elec. Eng., MUT University, Tehran, Iran.

³ Assist. Prof., Department of Elec. Eng., Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Abstract

With the development of microelectronics and micromachining technology, micro-heater has found plenty of applications in micro-sensor. Heating electrode material is one of the key factors that affect the power loss, response time, and sensitivity of a micro-heater. In this work, using two various metals, two micro-heaters with the same geometry are designed, fabricated, and characterized on silicon substrates based on the micro-electro-mechanical-system (MEMS) fabrication process. In the first micro-heater, gold, and in the second one, platinum are used as the heating electrode, and the effect of heating electrode material on the performance of the micro-heater is evaluated. Moreover, to improve the micro-heater efficiencies, their design is investigated, and the micro-heater with an optimum design is chosen. The analytical results obtained exhibit that the gold micro-hater has a lower response time and a higher power loss than the platinum micro-heater. The experimental results are in good agreement with the results obtained from the analytical analysis, and show that the fabricated micro-heaters with an optimum design have a high performance; as the power consumption and response time are 36 mW and 1.75 ms , respectively, in the gold micro-heater, and 30 mW and 2.1 ms , respectively, in the platinum micro-heater for a temperature variation from 30 to 450°C . These results demonstrate that with fabrication of the gold micro-heater, the response time improves by 16.6% in comparison with the platinum micro-heater.

Keywords: Heating Electrode; Micro-Electro-Mechanical Systems; Micro-Heater; Micro-Sensor; Power Loss.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۲۲۹۴۵۱۴۱-۲۱(+۹۸)؛ فکس: ۲۲۹۳۵۳۴۱-۲۱(+۹۸)

آدرس پست الکترونیک: fsamaeifar@yahoo.com

۱- مقدمه

میکروهیترها، جزء ساختارهایی هستند که با پیشرفت ریز فناوری میکروماشین‌کاری MEMS^۱، کاربردهای زیادی در حسگرهای گازی، فشار، رطوبت و همچنین آشکارکننده‌های فرسوخ، منابع فرسوخ و راه‌اندازها پیدا کرده‌اند (۱-۵)؛ زیرا استفاده از آن‌ها سبب ساده شدن فرایند ساخت [۶]، کاهش قیمت تمام شده محصول در تولید انبوه [۷]، کاهش اتلاف توان و کاهش پاسخ زمانی [۸] به علت کاهش جرم حرارتی می‌شود. به منظور پاسخگویی به نیازهای سیستم‌های الکترونیکی مدرن انتظار می‌رود که میکروهیتر، دارای یکنواختی توزیع دما در سرتاسر ناحیه فعال، اتلاف توان کم، استحکام حرارتی و مکانیکی بالا (برای افزایش استقامت میکروهیتر در محیط‌های نامتعرف)، سازگاری با فرایندهای ساخت استاندارد مدار مجتمع (برای توانایی در مجتمع شدن با مدارات الکتریکی و کاهش قیمت در تولید انبوه) و توانایی تحمل در انجام فرآیند عملیات حرارتی^۲ بعد از بسته‌بندی در دمای بالاتر از ۷۰۰ درجه سلیسیوس باشد [۹].

جنس الکتروادهای گرم‌کننده، یکی از عوامل تاثیرگذار در عملکرد میکروهیترها است. در بسیاری از مقالات منتشر شده در زمینه میکروهیتر از سیلیکون آلاییده شده با ناخالصی^۳ [۱۱ و ۱۰]، پلاتین [۱۲ و ۱۳]، پلی‌سیلیکون [۱۴ و ۱۵]، طلا [۱۶ و ۱۷] و آلومینیوم [۱۸ و ۱۹]، به عنوان الکترواد گرم‌کننده استفاده شده است. آلومینیوم دمای ذوب پایینی دارد (۶۶۰°C) و حداکثر دمای عملکرد آن ۴۰۰°C است [۱۸]؛ بنابراین آلومینیوم فلز مناسبی برای ساخت الکترواد گرم‌کننده نمی‌باشد. پلی‌سیلیکون و سیلیکون آلاییده شده با ناخالصی هنگام عملکرد در دمای بالا به علت اکسید شدن سیلیکون در هوای اطراف تنزل می‌کنند. از این رو میکروهیترهای ساخته شده با این مواد نیاز، به بسته‌بندی^۴ خاصی دارند [۲۰ و ۲۱]. پلاتین و طلا موادی هستند که با فرایندهای استاندارد ساخت مدار مجتمع سازگار می‌باشند. از این رو این فلزات به طور گسترده به عنوان المان گرم‌کننده، مورد استفاده قرار

می‌گیرند. طلا از پلاتین ارزاتر است و هدایت و انعطاف‌پذیری بیشتری دارد [۲۲]. همچنین طلا دارای پاسخ خطی در دماهای پایین‌تر از ۳۰۰ درجه سلیسیوس و دمای ذوب بالا (۱۰۶۳°C) است. در ضمن مقدار TCR آن برابر $10^{-4} C^{-1}$ است [۸]. پلاتین، فلز رایج دیگری است که دمای ذوب آن بالا (۱۷۶۸°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) آن برابر با $10^{-4} C^{-1}$ است [۹].

در [۲۳] طراحی میکروهیتر پلاتینی به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته، در [۲۴] فرایند ساخت میکروهیتر پلاتینی ارائه شده است. اگر چه میکروهیترهای پلاتینی ساخته شده در [۲۴] دارای عملکرد بالا و توان مصرفی کم هستند، ولی پاسخ زمانی این میکروهیترها زیاد است که دلیل آن، کم بودن ضریب رسانندگی گرمایی پلاتین است. همچنین لایه-نشانی پلاتین به روش پرتو الکترونی^۵ بسیار مشکل است و بهتر است به روش کندوپاش^۶ انجام شود که فرایندی گران-قیمت است. بعلاوه پلاتین بسیار گران‌قیمت است. با وجود این معایب پلاتین، استفاده از طلا پیشنهاد شد که هم از پلاتین ارزاتر است و هم به‌آسانی به روش پرتوالکترونی لایه‌نشانی می‌شود. در ضمن ضریب رسانندگی گرمایی آن از پلاتین بیشتر است.

در این مقاله، ابتدا بهینه‌سازی ساختار و ابعاد میکروهیتر ارائه شده است. سپس دو میکروهیتر با طراحی بهینه و شکل هندسی یکسان، روی سیلیکون به عنوان بستر و اکسیدسیلیکون به عنوان لایه دی‌الکتریک ساخته شده‌اند که تفاوت آن‌ها در جنس الکترواد گرم‌کننده است. در میکروهیتر اول از طلا و در میکروهیتر دوم، از پلاتین به عنوان الکترواد گرم‌کننده استفاده شده است. یک فرایند ساده برای ساخت میکروهیترها، طراحی شده است و تعدادی از فرایندهای استاندارد مدار مجتمع هم‌چون، تبخیر پرتو الکترونی، زدایش مرطوب و فوتولیتوگرافی برای ساخت آن‌ها به خدمت گرفته

^۱ Micro-Electro-Mechanical Systems

^۲ Annealing

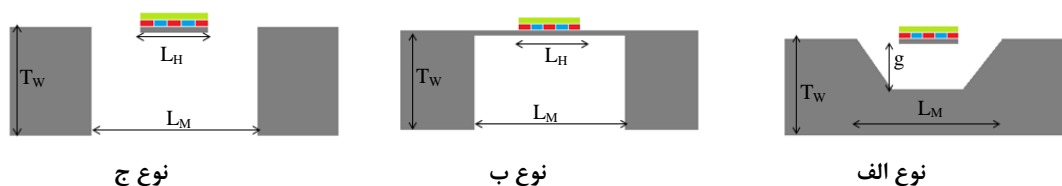
^۳ Impurity-Doped Silicon

^۴ Packaging

^۵ Temperature Coefficient of Resistance

^۶ E-Beam Evaporation

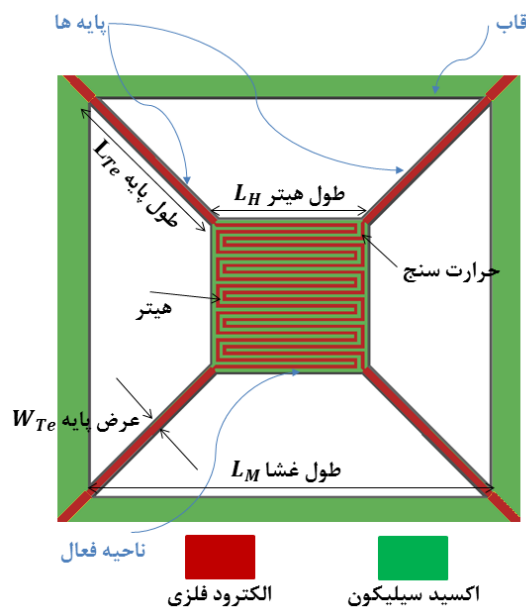
^۷ Sputtering



شکل ۱- انواع میکروهیتر. نوع الف) غشای معلق شده از بالا، نوع ب) غشای معلق نشده، و نوع ج) غشای معلق شده از پایین

اکسید سیلیکون، کروم و الکتروده فلزی (پلاتین یا طلا) می‌باشند.

سیلیکون، لایه تشکیل دهنده غشاء است که ضخامت آن در نواحی فعال و پایه‌های ایزوله کننده در حدود ۵ میکرومتر و ضخامت آن در قاب نگهدارنده به اندازه ضخامت بستر است. روی لایه سیلیکون، یک لایه دی اکسید سیلیکون به ضخامت ۱۰۰۰ نانومتر لایه‌نشانی شده است تا یک عایق الکتریکی بین الکترودهای فلزی و سیلیکون ایجاد شود. روی دی-الکترونیک، کروم به ضخامت ۲۰ نانومتر لایه‌نشانی می‌شود. کروم برای افزایش چسبندگی بین فلز و اکسیدسیلیکون استفاده می‌شود. همچنین روی کروم، فلز که لایه اصلی میکروهیتر است، به ضخامت ۱۲۰ نانومتر لایه‌نشانی شده است.



شکل ۲- نمای بالای میکروهیتر با ساختار بهینه

شده‌اند. در نهایت، برای میکروهیترهای ساخته شده، مشخصه‌های TCR، توان مصرفی و پاسخ زمانی اندازه‌گیری شده است و با استفاده از این مشخصات، تاثیر جنس الکترودهای گرم‌کننده در میزان عملکرد میکروهیتر بررسی شده است.

۲- طراحی میکروهیتر

۲-۱- بررسی ساختار میکروهیتر

سه نوع ساختار برای میکروهیتر می‌تواند وجود داشته باشد که عبارتند از: نوع الف، میکروهیتر با ساختار غشای معلق شده^۱ از بالا، نوع ب، میکروهیتر با ساختار غشای معلق نشده^۲ و نوع ج، میکروهیتر با ساختار غشای معلق شده از پایین [۲۳]. شکل ۱ این سه نوع ساختار میکروهیتر را نشان می‌دهد.

در هر سه نوع ساختار، غشا روی یک کاواک که به وسیله زدایش^۳ بستر سیلیکون ایجاد شده قرار دارد و روی غشا مقاومت مارپیچی لایه‌نشانی می‌شود. همچنین در [۲۳] نشان داده شده است که هیتر با ساختار غشای معلق شده از پایین (نوع ج)، کمترین اتلاف توان را برای رسیدن به دمای مطلوب نیازمند است. از این رو ساختار مورد نظر در این مقاله، ساختار غشای معلق شده از پایین است.

در شکل ۲، نمای میکروهیتر طراحی شده از بالا نشان داده است که از ۳ قسمت تشکیل شده است که عبارتند از: قاب نگهدارنده، پایه‌های ایزوله کننده حرارتی و ناحیه فعال. این میکروهیتر، از ۴ لایه تشکیل شده است که لایه‌ها به صورت یکپارچه هستند و از پایین به بالا به ترتیب سیلیکون،

¹ Suspended Membrane

² Closed Membrane

³ Etch

خصوصیات فیزیکی مواد استفاده شده در طراحی میکروهیتر را نشان می‌دهد [۲۵].

جدول ۱- ابعاد میکروهیتر بهینه شده

ابعاد (μm)	سازه
۵۰۰	طول غشا (L_M)
۲۰۰	طول هیتر (L_H)
۲۱۲	طول پایه‌ها (L_{Te})
۱۵	عرض پایه‌ها (W_{Te})
۱	ضخامت اکسید سیلیکون (T_{SiO_2})
۰/۱۲	ضخامت طلا (T_{Au})
۰/۱۲	ضخامت پلاتین (T_{Pt})

۲-۳- تحلیل انتقال گرما

تحلیل انتقال گرما در میکروهیتر، در [۲۳] به طور کامل بیان شده است. در این مقاله، تحلیل حرارتی مربوط به میکروهیتر طراحی شده با ساختار غشای معلق ارائه شده است تا بتوان دو میکروهیتر طلایی و پلاتینی را با یکدیگر مقایسه کرد. انتقال گرما از طریق تابش گرما و جابه‌جایی گرما به دلیل اندازه میکروهیتر و محدوده دما قابل صرف‌نظر هستند. هم‌چنین همان‌طور که در [۲۳] بیان شد، در میکروهیتر با ساختار غشای معلق، گرما فقط از طریق پایه‌ها و هوای اطراف هدر می‌رود و اتلاف گرما از طریق غشا وجود ندارد. از این‌رو تبادل حرارتی میکروهیتر طراحی شده با محیط اطراف خود، از دو طریق پایه‌ها و هوای پیرامون بررسی شده است؛ بنابراین انتقال حرارت در میکروهیتر طراحی شده را می‌توان از رابطه ۱ بدست آورد:

$$Q = G_{Tethers} \cdot \Delta\theta + G_{Air} \cdot \Delta\theta \quad (W) \quad (1)$$

که در آن $G_{Tethers}$ ، هدایت حرارتی از طریق پایه‌ها، G_{Air} هدایت حرارتی از طریق هوا، Q اتلاف توان و $\Delta\theta$ اختلاف دما در ناحیه فعال میکروهیتر است.

هدایت حرارت از طریق پایه‌ها، از رابطه ۲ بدست می‌آید.

$$G_{Tethers} = \frac{4(k_{Si}t_{Si}W_{Te} + k_{SiO_2}t_{SiO_2}W_{Te} + k_e t_e W_e)}{L_{Te}} \left(\frac{W}{K}\right) \quad (2)$$

که در رابطه (۲)، k_{Si} ضریب هدایت حرارتی سیلیکون، k_{SiO_2} ضریب هدایت حرارتی دی‌اکسید سیلیکون، k_e ضریب هدایت حرارتی الکتروود فلزی، t_{Si} ضخامت سیلیکون در پایه‌ها، t_{SiO_2} ضخامت دی‌اکسید سیلیکون در پایه‌ها، t_e ضخامت

همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، ناحیه فعال به شکل مربعی است که در وسط میکروهیتر همانند یک جزیره به حالت معلق است. در این ناحیه، الکترودهای فلزی به صورت دو مقاومت مارپیچ قرار گرفته‌اند. یکی از الکترودها از ۶ مارپیچ به عنوان منبع تولید گرما (هیتر) و دیگری از ۵ مارپیچ به عنوان حرارت‌سنج تشکیل شده است. چهار پایه-ایزوله‌کننده در چهارگوشه به ناحیه فعال مربعی شکل وصل شده‌اند تا ناحیه فعال را به حالت معلق درآورند. 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 سیلیکون است که ناحیه فعال توسط پایه‌ها به آن وصل شده است.

۲-۲- انتخاب ابعاد میکروهیتر

همان‌طور که در [۲۳] بیان شد، یک میکروهیتر با طول کوتاه (L_H کم)، بازدهی گرمایی بهتر و پاسخ زمانی سریع‌تری را نشان می‌دهد. با نازک‌تر شدن عرض پایه‌ها (W_{Te}) و بلندتر شدن طول آن‌ها (L_{Te})، بازدهی گرمایی بهبود می‌یابد؛ در حالی که پاسخ زمانی کند می‌شود. به هر حال عرض و طول پایه‌ها، یک رقابت بین بازدهی گرمایی و ثابت زمانی ایجاد می‌کنند.

ابعاد بهینه برای میکروهیتر را می‌توان با توجه به کاربرد آن انتخاب کرد. از آن‌جا که این میکروهیتر می‌بایست در حسگرهای گازی مبتنی بر تجزیه حرارتی تفاضلی (DTA^1) به کار برده شود، ابعاد L_H باید بیشتر از $200 \mu m$ انتخاب شود که برای جمع‌آوری نمونه‌های گازی مورد نیاز است؛ بنابراین اندازه L_H ، $200 \mu m$ انتخاب شد. هم‌چنین با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل پارامتر-فشرده^۲ در [۲۳]، میکروهیترها با پهناهای مختلف از W_{Te} در محدوده $10 \mu m$ تا $15 \mu m$ ، ثابت زمانی یکسان و تفاوت اندکی در بازدهی گرمایی دارند. از این‌رو اندازه W_{Te} ، $15 \mu m$ انتخاب شد که موجب استحکام بیشتر میکروهیتر می‌شود. در جدول (۱)، جزئیات ابعاد میکروهیتر بهینه شده، آورده شده است. جدول ۲،

¹ Differential Thermal Analysis

² Lumped-Parameter

جدول ۲- خلاصه‌ای از خصوصیات الکتریکی و گرمایی مواد استفاده شده در طراحی میکروهیتر [۲۵]

خصوصیات فیزیکی مواد استفاده شده در طراحی میکروهیتر					
ماده	چگالی (kg/m ³)	ظرفیت گرمای ویژه (J/kg.K)	ضریب رسانندگی گرمایی (W/m.K)	مدول یانگ (Mpa)	ضریب پواسن
سیلیکون	۲۳۳۰	۷۱۲	۱۰۵	۱/۵×۱۰ ^۵	۰/۱۷
اکسید سیلیکون	۲۲۲۰	۷۴۵	۱/۳۸	۰/۷×۱۰ ^۵	۰/۲
طلا	۱۹۲۸۰	۱۲۸/۷۴	۳۱۵	۷/۸×۱۰ ^۴	۰/۴۴
پلاتین	۲۱۴۴۰	۱۳۲/۵۱	۷۳	۱/۶×۱۰ ^۵	۰/۳۸
هوا	۱/۱۶	۱۰۰۷	۰/۰۲۶	-	-

مقایسه خصوصیات طلا و پلاتین				
ماده	نقطه ذوب (°C)	ضریب انبساط گرمایی (۱۰ ^{-۶} /°C)	مقاومت ویژه (μΩ.cm)	TCR (۱۰ ^{-۴} /°C)
طلا	۱۰۶۳	۱۴	۲/۲	۴۰
پلاتین	۱۷۷۴	۸/۸	۱۰/۶	۳۸

در یک سیکل خنک‌کننده بدون جریان الکتریکی، سمت راست رابطه ۵ صفر است و ثابت زمانی در سیکل سرد شدن از رابطه ۶ به دست می‌آید.

$$\tau = R_{Th}C \quad (6) \quad (s)$$

هم‌چنین مقاومت الکتریکی هیتر را می‌توان از رابطه ۷ محاسبه کرد.

$$R_E = \rho \frac{L_e}{w_e \cdot t_e} \quad (7) \quad (\Omega)$$

در رابطه (۷)، ρ مقاومت ویژه فلز و L_e طول کلی الکتروود فلزی در ۶ ماریج است.

مقدار مقاومت الکتریکی با افزایش دما بیشتر می‌شود که از رابطه ۸ می‌توان مقدار مقاومت الکتریکی را در دماهای مختلف محاسبه کرد.

$$R_E = R_0(1 + \alpha(\theta - \theta_0)) \quad (8) \quad (\Omega)$$

TCR یکی از شاخص‌های مهمی است که میکروهیترها را می‌توان با آن ارزیابی کرد. این شاخص را می‌توان با بازنویسی رابطه ۸ به دست آورد:

$$TCR = \frac{R_E - R_0}{R_0(\Delta\theta)} \quad (9) \quad (C^{-1})$$

در ضمن گرمای تولید شده در مقاومت الکتریکی (توان مصرفی الکتریکی) را می‌توان از رابطه ۱۰ به دست آورد:

$$P = \frac{V^2}{R_E} \quad (10) \quad (W)$$

در رابطه (۱۰)، V ولتاژ منبع تغذیه اعمال شده به هیتر است.

۲-۴- نتایج تحلیل تئوری

با جایگذاری مقادیر جداول (۱) و (۲) در معادلات ذکر شده در بالا، مقادیر G_{Air} ، $G_{Thethers}$ و Q برای طلا به ترتیب،

الکتروود فلزی در پایه‌ها، w_{Te} عرض پایه‌ها، w_e عرض الکتروود فلزی در پایه‌ها و L_{Te} طول پایه‌ها است.

هدایت حرارتی از طریق هوا را نیز می‌توان از رابطه ۳ بدست آورد:

$$G_{Air} = \frac{4\pi k_{Air}}{1/r_1 - 1/r_0} \left(\frac{W}{K}\right) \quad (3)$$

در این رابطه:

$r_1 = (L_H^2/2\pi)^{0.5}$ ، $r_0 = (3L_M^2/2\pi)^{0.5}$ می‌باشد که در آن k_{air} ضریب هدایت حرارتی هوا، r_1 شعاع کره فرضی داخلی، r_0 شعاع کره فرضی خارجی، L_H طول هیتر و L_M طول غشا است.

با جایگذاری رابطه ۲ و ۳ در رابطه ۱، مقدار اتلاف توان در میکروهیتر طراحی شده محاسبه خواهد شد.

$$Q = \frac{4(k_{Si}t_{Si}w_{Te} + k_{SiO_2}t_{SiO_2}w_{Te} + k_{e}t_e w_e)}{L_{Te}} \cdot \Delta\theta + \frac{4\pi k_{Air}}{1/r_1 - 1/r_0} \cdot \Delta\theta \quad (4) \quad (W)$$

برای محاسبه ثابت زمانی هیتر، از معادله گذرای ۵ استفاده شده است که در آن از ترم‌های بالاتر مقاومت الکتریکی وابسته به دما، در دماهای پایین چشم پوشی شده است.

$$C \frac{d\Delta\theta}{dt} + \frac{\Delta\theta}{R_{Th}} = I_E^2 \frac{R_0(1 + \alpha(\theta - \theta_0))}{R_E} \quad (5)$$

در رابطه (۵)، θ_0 دمای اولیه، θ دمای ثانویه، R_0 مقدار مقاومت الکتریکی در دمای اولیه، R_E مقدار مقاومت الکتریکی در دمای ثانویه، α ضریب دمایی مقاومت الکتریکی (TCR)، I_E جریان الکتریکی و C ظرفیت گرمایی در غشای نازک مربعی است. هم‌چنین R_{Th} مقاومت گرمایی است که از رابطه $\frac{\Delta\theta}{Q}$ به دست می‌آید.

(۳) اکسید پشت نمونه‌ها الگودهی و با استفاده از زدایشگر BOE^۲ زدایش می‌شوند و یک پنجره در لایه اکسید ایجاد می‌شود (شکل (۴-ج)).

(۴) سیلیکون در محلول TMAH با غلظت ۲۵٪ در دمای ۹۰°C زدایش می‌شود تا عمق زدایش سیلیکون به ۴۵۰ μm برسد (شکل (۴-د)).

(۵) بعد از زدایش سیلیکون، کروم با $(NH_4)_2Ce(NO_3)_6 \cdot 10H_2O$ ۲۰٪ به طور کامل برداشته می‌شود (شکل (۴-ه)).

(۶) اکسید روی نمونه‌ها با استفاده از زدایشگر^۳ BHF، الگودهی و زدایش می‌شود (شکل (۴-و)).

(۷) الکترودها با استفاده از پروسه Lift-off الگودهی می‌شوند. ابتدا فوتورزیست مثبت روی ویفر پخش و الگودهی می‌شود. این مرحله از ساخت برای دو میکروهیتر پلاتینی و طلائی متفاوت است. در میکروهیتر پلاتینی، کروم و پلاتین به ترتیب با ضخامت‌های ۲۰ و ۱۲۰ نانومتر لایه‌نشانی می‌شوند. در میکروهیتر طلائی، کروم و طلا به ترتیب با ضخامت‌های ۲۰ و ۱۲۰ نانومتر به روش پرتوالکترونی لایه‌نشانی می‌شوند. کروم برای افزایش چسبندگی بین فلز و اکسید سیلیکون استفاده می‌شود. آخرین گام برداشتن ماده‌ی مقاوم در برابر نور^۴ با استفاده از استون و در حمام آلتراسونیک است (شکل (۴-ز)). لازم به ذکر است، هنگام لایه‌نشانی پلاتین به روش پرتوالکترونی، فلز تشعشعاتی از خود خارج می‌کند که سبب می‌شود دمای محفظه بالا رود و انجام فرایند Lift-Off بعد از لایه‌نشانی ناممکن شود. از این رو برای پایین نگاه داشتن دما هنگام فرایند لایه‌نشانی، می‌بایست چندین بار فرایند لایه‌نشانی متوقف و سیستم خاموش گردد.

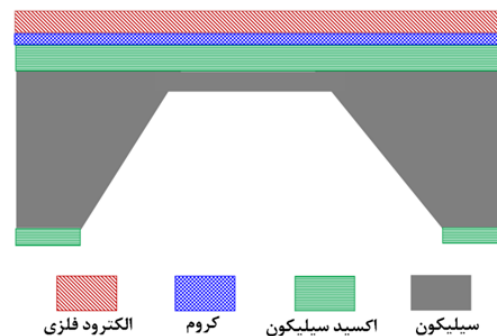
(۸) پس از پایان لایه‌نشانی پلاتین و طلا، از فرآیند بازپخت دما بالا برای بلورسازی لایه‌های نازک پلاتین و طلا استفاده می‌شود. عملیات حرارتی پلاتین در دمای ۱۰۰۰ درجه به مدت ۱۲۰ دقیقه و در محیط نیتروژنی انجام می‌شود [۲۶]. هم‌چنین عملیات حرارتی روی طلا

برای $0.077 mW/K$ ، $0.004 mW/K$ و $32/4 mW$ و $1/6 ms$ و برای پلاتین به ترتیب $0.066 mW/K$ ، $0.004 mW/K$ و $28 mW$ و $1/9 ms$ به دست آمد. در این محاسبات، دمای نهایی هیتر برابر با $700 K$ در نظر گرفته شده است.

هم‌چنین مقادیر R_E و α برای میکروهیتر طراحی شده با طلا به ترتیب $0.437 \Omega K$ و $10^{-4} C^{-1}$ و برای میکروهیتر پلاتینی به ترتیب، $2/1 \Omega K$ و $38 \times 10^{-4} C^{-1}$ محاسبه شدند.

۳- ساخت میکروهیتر

پروسه ساخت میکروهیتر به طور کامل در مقاله دیگری بررسی شده است [۲۴]. در این مقاله، فرآیند ساخت میکروهیترهای پلاتینی و طلائی طراحی شده به طور خلاصه بیان می‌شود. میکروهیترها روی بستر سیلیکون <100> نوع P با ضخامت ۴۶۰ میکرومتر ساخته شده‌اند. شکل ۳، لایه‌های میکروهیتر را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. هم‌چنین در شکل ۴، مراحل ساخت نشان داده شده است.



شکل ۳- تصویر شماتیک از چیدمان لایه‌های میکروهیتر

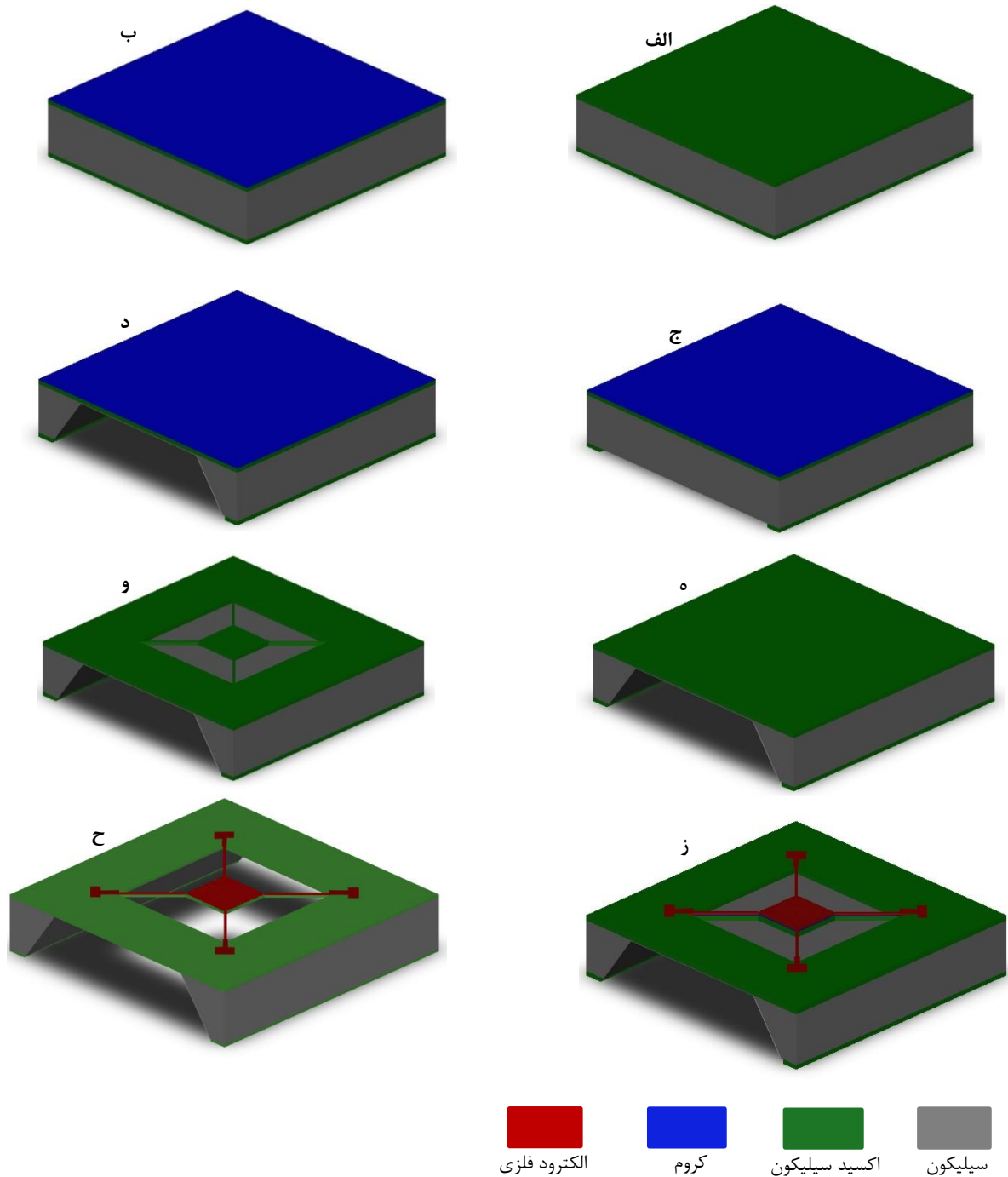
- (۱) بعد از تمیز کردن ویفر به روش استاندارد RCA، در دو طرف آن اکسید سیلیکون به ضخامت ۱۰۰۰ نانومتر به روش حرارتی رشد داده می‌شود (شکل (۴-الف)).
- (۲) کروم با ضخامت ۱۵۰ نانومتر روی نمونه‌ها لایه‌نشانی می‌شود. از کروم برای محافظت بیشتر سیلیکون در محلول TMAH^۱ استفاده می‌شود (شکل (۴-ب)).

^۲ Buffered Hydrofluoric Acid

^۳ Buffered Hydrofluoric Acid

^۴ Photoresist

^۱ Tetramethyl Ammonium Hydroxide



شکل ۴- روندنمای پروسه ساخت میکروهیتر. الف- لایه‌نشانی اکسید سیلیکون به روش حرارتی در دو طرف ویفر، ب- لایه-نشانی کروم بر روی نمونه‌ها، ج- ایجاد پنجره در لایه اکسید پشت، د- زدایش سیلیکون به عمق 450nm ، ه- زدایش لایه کروم، و- الگودهی و زدایش اکسید روی نمونه‌ها، ز- لایه‌نشانی الکتروودها، الگودهی آن‌ها با پروسه **Lift-off** و انجام عملیات حرارتی بر روی الکتروودهای فلزی، ح- معلق کردن میکروهیتر

شکل نشان داده شده‌اند، هیچ گونه اتصالی ندارند که نشان می‌دهد، فرایند لیتوگرافی با حداقل اندازه $4\mu\text{m}$ ، با موفقیت انجام شده است.

۴- نتایج آزمایش

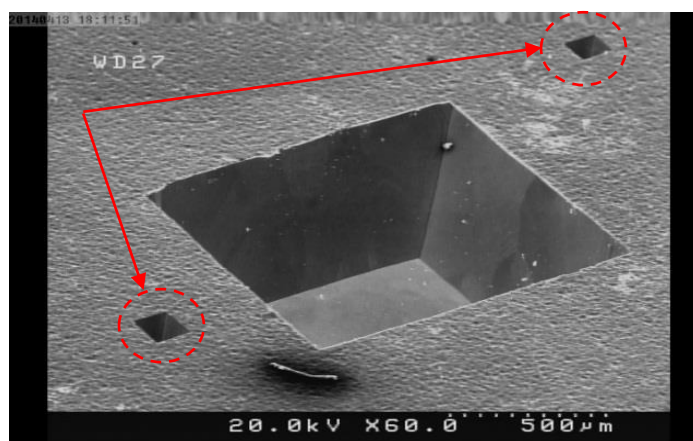
میکروهیترهای ساخته شده از دو مقاومت مارپیچ فلزی تشکیل شده‌اند. یکی از مقاومت‌ها به عنوان هیتر و مقاومت دیگر، به عنوان حرارت‌سنج استفاده شده است. ابتدا میکروهیترهای ساخته شده توسط چسب نقره سیم‌زنی شدند و سپس مشخصات دمایی میکروهیترها، توان مصرفی و پاسخ زمانی آن‌ها بررسی شد.

برای تعیین مشخصات دمایی میکروهیتر و کالیبره کردن آن، میکروهیتر به همراه یک حسگر دمایی مرجع داخل کوره قرار داده شد و تغییرات مقاومت برای گام‌های دمایی مختلف اندازه‌گیری شد (شکل ۷). همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، پاسخ دمایی هر دو میکروهیتر تا دمایی 500K خطی است. طبق این شکل، میکروهیتر طلایی دارای $\text{TCR} = 33 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ و میکروهیتر پلاتینی دارای $\text{TCR} = 29 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ است. به دست آمده در هر دو میکروهیتر از مقادیر تئوری (پلاتین $38 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ و طلا $40 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) کمتر است. این اختلاف به علت پراکندگی الکترون‌ها در مرزخانه‌های داخل فیلم نازک باشد. همچنین ابعاد هندسی فیلم و شرایط لایه‌نشانی در TCR فیلم نازک فلز تاثیر می‌گذارد [۲۷].

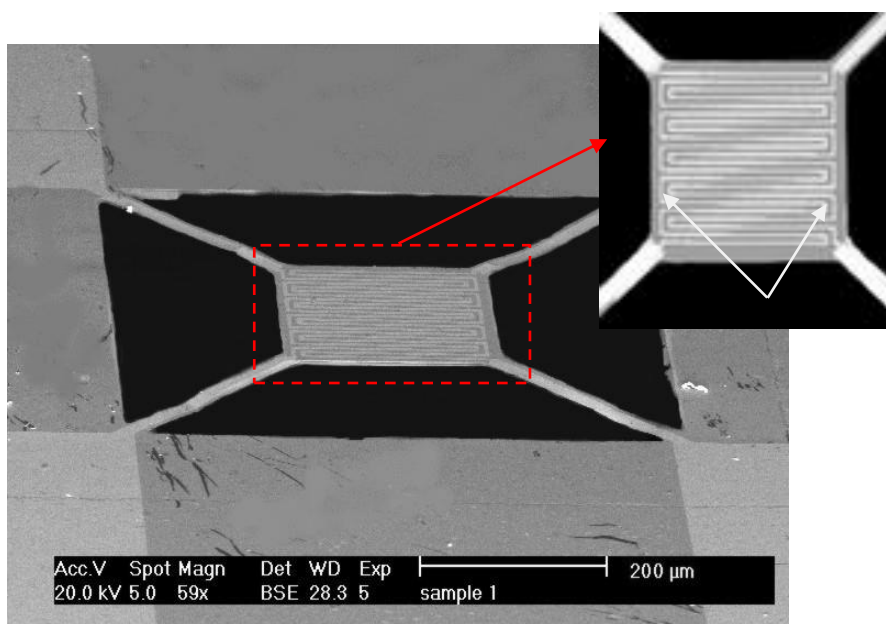
نیز، در محیط نیتروژنی و در دمایی 320°C درجه به مدت 30 دقیقه انجام می‌شود [۹].

(۹) در نهایت، برای معلق کردن میکروهیتر، نمونه‌ها در TMAH با غلظت 25% و دمایی 90°C قرار می‌گیرند. نمونه‌ها سپس داخل آب مقطر غوطه‌ور می‌شوند تا آب جایگزین TMAH شود. بعد از 15 دقیقه، نمونه‌ها از آب به صورت عمودی خارج می‌شوند. 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 دمایی محیط به خودی خود خشک می‌شوند. عملیات رهاسازی سازه میکروهیتر از مایع در این روش ساده است (شکل ۴-ح).

شکل ۵، تصویر SEM گرفته شده از پشت غشاهای ایجاد شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، سطح غشاهای ایجاد شده صاف و بدون ناهمواری است که نشان می‌دهد، فرایند ساخت کاملاً کنترل شده است. در ضمن حفره‌هایی که در این تصویر با رنگ قرمز مشخص شده‌اند، مارکرهایی می‌باشند که از آن‌ها برای انجام لیتوگرافی دوطرفه استفاده شده است. شکل ۶، تصویر SEM از نمای عرضی میکروهیترهای ساخته شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، میکروهیتر به صورت معلق است و ناحیه فعال به صورت جریزه در وسط آن قرار گرفته است. این ناحیه با کادر قرمز مشخص شده است و نمای بالای آن، در گوشه سمت راست شکل نشان داده شده است. در ضمن الکترودهای فلزی که با پیکان‌های سفید رنگ در



شکل ۵- تصویر SEM از پشت غشاهای ایجاد شده



شکل ۶- تصویر SEM از نمای عرضی میکروهیترهای ساخته شده

در ضمن برای بررسی بیشتر میکروهیترهای ساخته شده، ولتاژ ثابت به هر دو میکروهیتر طلایی و پلاتینی اعمال شد تا دمای آن‌ها به 700°C برسد. سپس مدت یک ساعت در این دما نگه داشته شدند تا پایداری و عملکرد آن‌ها بررسی شود. نتایج بررسی نشان داد که میکروهیترهای طلایی هنگام عملکرد در دمای 700°C بعد از یک ساعت به آرامی شروع به ذوب شدن می‌کنند؛ درحالی‌که میکروهیترهای پلاتینی در این دما، عملکرد خوبی دارند.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

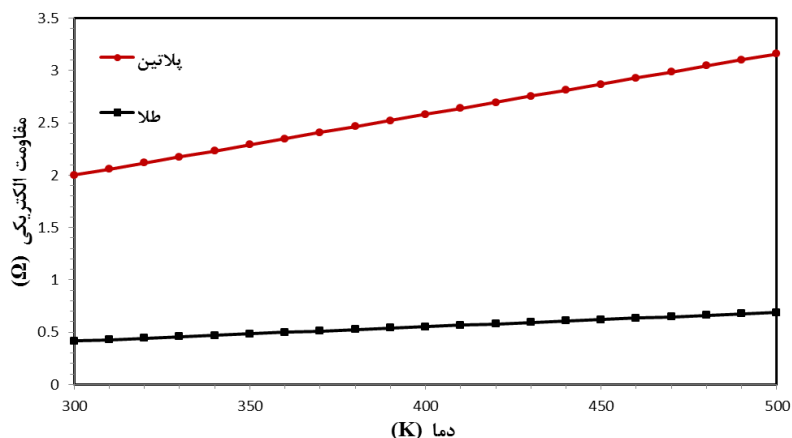
۵-۱- بازپخت^۱ بعد از لایه‌نشانی

طلا از پلاتین ارزاتر است و به راحتی به روش پرتوالکترونی لایه‌نشانی می‌شود؛ ولی بعد از لایه‌نشانی به روش پرتوالکترونی، آسیب‌های x-ray روی وسایل الکترونی دیده می‌شود که سبب افزایش جریان‌های ناشی^۲ می‌شوند. در بیشتر موارد با فرایند بازپخت در دمای 432°C در جو گازی بعد از لایه‌نشانی، این آسیب‌ها برطرف می‌شود [۹]. طلا در دماهای حدود 330°C شروع به نفوذ در لایه سیلیکون یا اکسیدسیلیکون می‌کند [۲۸]؛ اگرچه در میکروهیتر طلایی ساخته شده لایه کروم در زیر لایه طلا وجود داشت و می‌توانست از نفوذ آن به لایه‌های زیرین

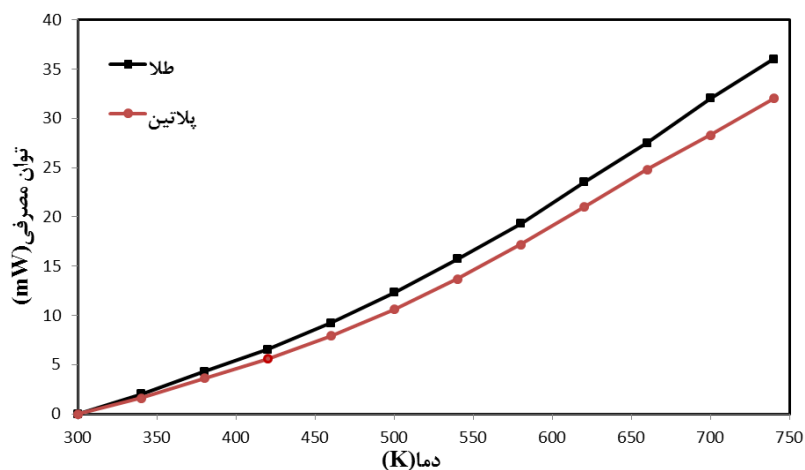
شکل ۸، توان مصرفی میکروهیترها را به عنوان تابعی از دمای آن‌ها نشان می‌دهد. برای به دست آوردن این نمودار، به میکروهیترها ولتاژهای مختلف اعمال شد و تغییرات مقاومت الکتریکی ثبت شد. سپس با استفاده از رابطه ۱۰ و شکل ۷، نمودار تغییرات توان مصرفی در مقابل تغییرات دما رسم شد. همان‌طور که از شکل ۸ می‌توان استنباط کرد، برای رسیدن به دمای بالای 450°C میکروهیترهای طلایی و پلاتینی ساخته شده، به ترتیب 36mW و 30mW توان مصرف می‌کنند که در مقایسه با میکروهیتر گزارش شده پیشین در [۲۴]، توان مصرفی به ترتیب 24% و 35% بهبود یافته است. برای اندازه‌گیری پاسخ زمانی میکروهیترهای ساخته شده، پالس مربعی جریان با دامنه $1/5$ میلی‌آمپر و با مدت زمان 25 میلی‌ثانیه به هیتر اعمال شد و ولتاژ حرارت‌سنج مقاومتی اندازه‌گیری شد. در شکل ۹، ولتاژ حرارت‌سنج میکروهیتر طلایی به عنوان تابعی از زمان، وقتی پالس جریان به هیتر اعمال می‌شود، نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که ثابت زمانی میکروهیتر طلایی در یک سیکل سرد شدن از دمای 450 درجه سیلیسیوس، $1/75$ میلی‌ثانیه است که نسبت به میکروهیتر ساخته شده پیشین در [۲۴]، پاسخ زمانی میکروهیتر 65% بهبود یافته است. هم‌چنین نتایج به-دست آمده نشان می‌دهد که میکروهیتر پلاتینی ساخته شده، دارای پاسخ زمانی $2/1$ میلی‌ثانیه است که در مقایسه با [۲۴] 58% بهبود یافته است.

¹ Annealing

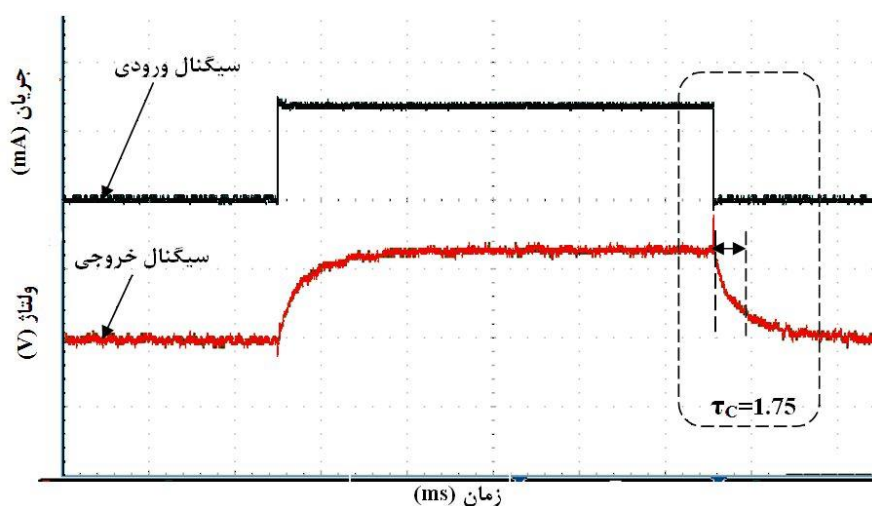
² Leakage Currents



شکل ۷- منحنی تغییرات مقاومت با تغییر دما در میکروهیترهای ساخته شده



شکل ۸- نمودار توان مصرفی میکروهیترهای ساخته شده به عنوان تابعی از تغییرات دمای آن‌ها



شکل ۹- ولتاژ حرارت‌سنج میکروهیتر طلایی به عنوان تابعی از زمان، با اعمال پالس مربعی جریان به هیتر

است؛ بنابراین همان‌طور که نتایج آنالیز تئوری نشان می‌دهد، اتلاف توان در میکروهیتر طلائی، $13/5\%$ بیشتر از میکروهیتر پلاتینی است.

بعلاوه نتایج آزمایشگاهی به دست آمده در شکل ۸ نشان می‌دهد که میکروهیتر ساخته شده از پلاتین برای رسیدن به دمای بالای 450°C فقط 30mW توان نیاز دارد؛ در حالیکه میکروهیتر ساخته شده از طلا برای رسیدن به این دما 36mW توان مصرف می‌کند. این نتایج نشان می‌دهد که با ساختن میکروهیترهایی از جنس پلاتین، اتلاف توان $18/1\%$ بهبود خواهد یافت.

باید توجه کرد که نتایج تئوری و آزمایشگاهی فقط در حدود $4/5\%$ با هم تفاوت دارند و این نشان می‌دهد که روش آنالیز تئوری بیان شده، از اطمینان کافی برخوردار است.

۵-۴- پاسخ زمانی

طبق رابطه ۶، پاسخ زمانی با اتلاف توان رابطه معکوس دارد و همان‌طور که در بالا ذکر شد، اتلاف توان در میکروهیتر طلائی، $13/5\%$ بیشتر از میکروهیتر پلاتینی است؛ در نتیجه چنانچه نتایج تحلیل تئوری نشان می‌دهد، پاسخ زمانی میکروهیتر طلائی، $15/8/1\%$ کمتر از میکروهیتر پلاتینی است. هم‌چنین نتایج آزمایشگاهی به دست آمده در شکل ۹ نشان می‌دهد که پاسخ زمانی میکروهیتر ساخته شده از طلا در یک سیکل سرد شدن از دمای 450 درجه سلیسیوس، $1/75\text{ms}$ است؛ در حالیکه پاسخ زمانی میکروهیتر ساخته شده از پلاتین $2/1\text{ms}$ اندازه‌گیری شد و می‌توان اذعان کرد که با ساختن میکروهیترهایی از جنس طلا، ثابت زمانی $16/1\%$ بهبود خواهد یافت.

۵-۵- ضریب مقاومت الکتریکی (TCR)

ضریب مقاومت الکتریکی، یکی از شاخص‌های مهم در ارزیابی میکروهیترها است؛ بطوریکه با افزایش مقدار آن، حساسیت میکروهیتر نیز بیشتر می‌شود. میکروهیتر پلاتینی، دارای 1°C^{-1} ، 29×10^{-4} و میکروهیتر طلائی، دارای 1°C^{-1} ، 33×10^{-4} است. این نتایج نشان می‌دهد که TCR به دست آمده برای میکروهیتر طلائی، $12/12\%$ بیشتر از میکروهیتر پلاتینی است که دلیل آن کمتر بودن مقاومت R_0 طلا، نسبت به پلاتین است.

ممانعت کند، ولی بازهم بازپخت در دمای 432°C مخاطره-آمیز به نظر می‌رسید. از این‌رو، عملیات بازپخت در دمای 320°C انجام شد تا از مشکل نفوذ طلا در لایه سیلیکون اجتناب شود. در نهایت با وجود انجام عملیات حرارتی در میکروهیتر طلائی، از آن‌جا که دمای آن برای بهبود آسیب-های ایجاد شده مطلوب نمی‌باشد، احتمال وجود جریان‌های ناشی باقی می‌ماند.

۵-۲- مقاومت الکتریکی

مقادیر تئوری برای مقاومت الکتریکی میکروهیترهای طلائی و پلاتینی طراحی شده به ترتیب، 437Ω و $211\text{K}\Omega$ محاسبه شدند. این تفاوت در مقادیر مقاومت الکتریکی میکروهیترها به دلیل اختلاف در مقاومت ویژه آن‌هاست؛ زیرا طبق رابطه ۷، مقاومت الکتریکی نسبت مستقیم با مقاومت ویژه دارد و طبق جدول ۲، مقاومت ویژه پلاتین $4/8$ برابر مقاومت ویژه طلا است؛ بنابراین در دو میکروهیتر طلائی و پلاتینی با طراحی یکسان، مقدار مقاومت الکتریکی میکروهیتر پلاتینی، $4/8$ برابر بیشتر از میکروهیتر طلائی است.

در ضمن مقادیر مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده در دمای اتاق برای میکروهیترهای طلائی و پلاتینی ساخته شده به ترتیب، 415Ω و $2\text{K}\Omega$ است که به مقادیری که با توجه به محاسبات تئوری انتظار می‌رفت، بسیار نزدیک هستند.

۵-۳- توان مصرفی

رابطه ۱ نشان می‌دهد که انتقال حرارت رابطه مستقیم با هدایت حرارتی از طریق هوا و پایه‌های ایزوله کننده دارد. در ضمن طبق رابطه ۳، هدایت حرارتی از طریق هوا به خصوصیات مواد سازنده میکروهیتر بستگی ندارد؛ بنابراین مقدار هدایت حرارتی از طریق هوا برای هر دو میکروهیتر طلائی و پلاتینی یکسان است، اما هدایت حرارتی از طریق پایه‌ها طبق رابطه ۲، به خصوصیات مواد سازنده میکروهیتر وابسته است. طبق این رابطه، هدایت حرارتی از طریق پایه‌ها نسبت مستقیم با ضریب هدایت حرارتی الکتروود فلزی دارد. به‌طوریکه استفاده از مواد با ضریب هدایت حرارتی کم، سبب کاهش آن و در نتیجه کاهش اتلاف توان می‌شود.

ضریب هدایت حرارتی طلا و پلاتین در جدول ۲ بیان شده است. ضریب هدایت حرارتی طلا، حدوداً 4 برابر پلاتین

هدایت حرارتی از طریق پایه‌ها در میکروهیتر طلایی، ۱۴/۲۸٪ بیشتر از میکروهیتر پلاتینی است که سبب می‌شود، میکروهیتر طلایی پاسخ زمانی کمتر و اتلاف توان بیشتری نسبت به میکروهیتر پلاتینی داشته باشد. نتایج آزمایشگاهی به دست آمده به نتایج حاصل از تحلیل تئوری بسیار نزدیک است و نشان می‌دهد که پاسخ دمایی هر دو میکروهیتر خطی و TCR آن‌ها پایدار است؛ ولی برای رسیدن به دمای بالای ۴۵۰°C، میکروهیتر طلایی دارای ۱/۱۶/۶٪، پاسخ زمانی کمتر و ۱۸٪، توان الکتریکی بیشتری نسبت به میکروهیتر پلاتینی است.

با توجه نتایج به دست آمده، در کاربردهایی که سریع بودن میکروهیتر اهمیت دارد، می‌توان از میکروهیتر طلایی در دماهای زیر ۷۰۰°C استفاده کرد. هم‌چنین در کاربردهایی که کم‌مصرف بودن میکروهیتر از اهمیت بیشتری برخوردار است، می‌توان از میکروهیتر پلاتینی استفاده کرد.

۷- سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند که از گروه الکترونیک دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر به‌خصوص، آقای مهندس منصور محتشمی‌فر برای حمایت‌های مالی و کمک‌های ارزشمندشان در تمام مراحل این پروژه تشکر کنند.

۵-۶- عملکرد بعد از یک ساعت در دمای ۷۰۰°C میکروهیترهای طلایی هنگام عملکرد در دمای ۷۰۰°C بعد از یک ساعت به آرامی شروع به ذوب شدن می‌کردند، ولی میکروهیترهای پلاتینی در این دما، عملکرد خوبی داشتند. نقطه ذوب پلاتین ۱۷۷۴°C است؛ در حالیکه نقطه ذوب طلا ۱۰۶۳°C است. پایین‌تر بودن نقطه ذوب طلا نسبت به پلاتین سبب این پدیده می‌شود. در ضمن نتایج تست به ما نشان داد که میکروهیترهای طلایی برای دماهای زیر ۷۰۰°C عملکرد خوبی دارند. خلاصه نتایج به دست آمده از مقایسه میکروهیتر پلاتینی و طلایی، در جدول ۳ آورده شده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، میکروهیتر با ساختار و ابعاد بهبود یافته، طراحی شده است و دو میکروهیتر با طراحی بهینه و با استفاده از سیلیکون به عنوان بستر و اکسیدسیلیکون به عنوان لایه دی‌الکتریک ساخته و مشخصه‌یابی شده‌اند. تفاوت دو میکروهیتر، در جنس الکتروود گرم‌کننده است. در میکروهیتر اول از طلا و در میکروهیتر دوم، از پلاتین به عنوان الکتروود گرم‌کننده استفاده شده است. آنالیز تئوری میکروهیترها نشان می‌دهد که هدایت حرارتی از طریق هوا برای هر دو میکروهیتر طلایی و پلاتینی برابر است، ولی

جدول ۳- مقایسه میکروهیترهای پلاتینی و طلایی

نتایج حاصل از محاسبات تئوری						
جنس هیتر	دمای اندازه‌گیری	پایه‌ها (mW/K)	هدایت حرارتی از طریق هوا (mW/K)	اتلاف توان (mW)	پاسخ زمانی (ms)	مقاومت الکتریکی (KΩ)
پلاتین	۷۰۰ K	۰/۰۶۶	۰/۰۰۴	۲۸	۱/۹	۲/۱
طلا	۷۰۰ K	۰/۰۷۷	۰/۰۰۴	۳۲/۴	۱/۶	۰/۴۳۷
نتایج آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده						
جنس هیتر	دمای اندازه‌گیری	عملکرد بعد از یک ساعت در دمای ۷۰۰°C	TCR (۱۰ ^{-۴} /°C)	توان مصرفی الکتریکی (mW)	پاسخ زمانی (ms)	مقاومت الکتریکی (KΩ)
پلاتین	۴۵۰°C	خوب	۲۹	۳۰	۲/۱	۲
طلا	۴۵۰°C	ضعیف	۳۳	۳۶	۱/۷۵	۰/۴۱۵

- consumption in the low mW range. *J Micromech Microeng* 21: 015014.
- [2] Dai CL (2007) A capacitive humidity sensor integrated with micro heater and ring oscillator circuit fabricated by CMOS-MEMS technique. *Sensor Actuat B-Chem* 122: 375-380.
- [3] Elmi I, Zampolli S, Cozzani E, Mancarella F, Cardinali G (2008) Development of ultra-low-power consumption MOX sensors with ppb-level VOC detection capabilities for emerging applications. *Sensor Actuat B-Chem* 135: 342-351.
- [4] Hwang WJ, Shin KS, Roh JH, Lee DS, Choa SH (2011) Development of micro-heaters with optimized temperature compensation design for gas sensors. *Sensors* 11: 2580-2591.
- [۵] عبداللهی ح، سمائی فر ف، حق نگهدار ا (۱۳۹۴) بررسی اثر به کارگیری SiO₂/Al در بالا بردن حساسیت آشکارسازهای مادون قرمز بر پایه میکروکانتیلیور و مقایسه آن با Si₃N₄/Au. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۵(۳): ۱۵۱-۱۶۳.
- [6] Courbat J, Briand D, Rooij NFD (2008) Reliability improvement of suspended platinum-based micro-heating elements. *Sensor Actuat A-Phys* 142: 284-291.
- [7] Chung GS, Jeong JM (2010) Fabrication of micro heaters on polycrystalline 3C-SiC suspended membranes for gas sensors and their characteristics. *Microelectron Eng* 87: 2348-2352.
- [8] Tao C, Yin C, He M, Tu S (2008) Thermal analysis and design of a micro-hotplate for Si-substrated micro-structural gas sensor. in *Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 3rd IEEE International Conference on NEMS*, 284-287.
- [9] Laconte J, Flandre D, Raskin JP (2006) *Micromachined thin-film sensors for SOI-CMOS co-integration*. Springer, Berlin.
- [10] Fung SK, Tang Z, Chan PC, Sin JK, Cheung PW (1996) Thermal analysis and design of a micro-hotplate for integrated gas-sensor applications. *Sensor Actuat A-Phys* 54: 482-487.
- [11] Lee J, Spadaccini CM, Mukerjee EV, King WP, (2008) Differential scanning calorimeter based on suspended membrane single crystal silicon microhotplate. *J Microelectromech S* 17: 1513-1525.
- [12] Guo B, Bermak A, Chan PC, Yan GZ (2007) A monolithic integrated 4×4 tin oxide gas sensor array with on-chip multiplexing and differential readout circuits. *Solid State Electron* 51: 69-76.
- [13] Hotovy I, Rehacek V, Mika F, Lalinsky T, Hascik S, Vanko G (2008) Gallium arsenide suspended

۸- علایم، نشانه‌ها و اختصارات

k	ضریب هدایت حرارتی، W/m.K
L	طول، m
w	عرض، m
t	ضخامت، m
r	شعاع، m
R	مقاومت الکتریکی، Ω
τ	ثابت زمانی، s
α	ضریب دمایی مقاومت (TCR)، C ⁻¹
Q	اتلاف توان گرمایی، W
P	توان مصرفی الکتریکی، W
ρ	مقاومت ویژه، Ω.m
C	ظرفیت گرمایی، J/K
R _{Th}	مقاومت گرمایی، K/W
I _E	جریان الکتریکی، A
V	ولتاژ ورودی، v
G _{Tethers}	هدایت حرارتی از طریق پایه‌ها، W/K
G _{Air}	هدایت حرارتی از طریق هوا، W/K
K	کلوین
W	وات
Δθ	اختلاف دما
Te	پایه
I	کره فرضی داخلی
O	کره فرضی خارجی
M	کاواک غشا
H	هیتر
e	الکترون فلزی
Pt	پلاتین
Au	طلا
Si	سیلیکون
SiO ₂	دی‌اکسید سیلیکون
Air	هوا

مراجع

- [1] Courbat J, Canonica M, Teyssieux D, Briand D, Rooij ND (2010) Design and fabrication of micro-hotplates made on a polyimide foil: electrothermal simulation and characterization to achieve power

- of single crystalline silicon. in SICE, Annual Conference, 2451-2454.
- [22] Harris J (1976) Autoignition temperatures of military high explosives by differential thermal-analysis. *Thermochim ACTA* 14: 183-199.
- [۲۳] سمائی فر ف، حاج قاسم ح، محتشمی فر م، علی احمدی م (۱۳۹۱) طراحی و شبیه‌سازی میکروهیتر ساخته شده با تکنولوژی MEMS. *مجله صنایع الکترونیک* ۳(۴): ۹۵-۱۱۱.
- [۲۴] سمائی فر ف، حاج قاسم ح، عبداللهی ح، محتشمی فر م، علی احمدی م (۱۳۹۲) طراحی و ساخت میکروهیتر پلاتینی کم- مصرف با عملکرد بالا مبتنی بر ساختار غشای معلق. *مجله صنایع الکترونیک* ۴(۱): ۲۵-۳۲.
- [25] Dennis JO, Ahmed AY, Mohamad NM (2010) Design, simulation and modeling of a micromachined high temperature microhotplate for application in trace gas detection. *Int J Eng Technol* 10: 89-96.
- [26] Yi D, Greve A, Hales JH, Senesac LR, Davis ZJ, Nicholson DM, Boisen A, Thundat T (2008) Detection of adsorbed explosive molecules using thermal response of suspended microfabricated bridges. *Appl Phys Lett* 93: 154102.
- [27] Mayadas AF, Shatzkes M (1970) Electrical-resistivity model for poly-crystalline films: the case of arbitrary reflection at external surfaces. *Phys Rev B* 1 4: 1382.
- [28] Walker P, Tarn W (1991) *Handbook of Metal etchants*. CRC pres. USA.
- microheater for MEMS sensor arrays. *Microsyst Technol* 14: 629-635.
- [14] Zhang F, Tang ZA, Yu J, Jin R (2006) A micro-Pirani vacuum gauge based on micro-hotplate technology. *Sensor Actuat A-Phys* 126: 300-305.
- [15] Ehmann M, Ruther P, Arx M, Paul O (2001) Operation and short-term drift of polysilicon-heated CMOS microstructures at temperatures up to 1200 K. *J Micromech Microeng* 11: 397.
- [16] Afridi M, Suehle J, Zaghoul M, Berning D, Hefner A, Cavicchi R, Seman-cik S, Montgomery C, Taylor C (2002) A monolithic CMOS microhotplate-based gas sensor system. *IEEE Sens J* 2: 644-655.
- [17] Yi X, Lai J, Liang H, Zhai X (2011) Fabrication of a MEMS micro-hotplate. in *Journal of Physics: Conference Series* 012098.
- [18] Kunt TA, McAvoy TJ, Cavicchi RE, Semancik S (1998) Optimization of temperature programmed sensing for gas identification using micro-hotplate sensors. *Sensor Actuat B-Chem* 53: 24-43.
- [19] Phatthanakun R, Deekla P, Pummara W, Sriphung C, Pantong C, Chomnawang N (2011) Fabrication and control of thin-film aluminum microheater and nickel temperature sensor. in *8th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 14-17.
- [20] Bauer D, Heeger M, Gebhard M, Benecke W (1996) Design and fabrication of a thermal infrared emitter. *Sensor Actuat A-Phys* 55: 57-63.
- [21] Kishi N, Hara H (2007) Lifetime evaluation of self-modulated MEMS infrared light source made