

طراحی و ساخت میکروهیتر پلاتینی کم مصرف با عملکرد بالا مبتنی بر ساختار غشای معلق

فاطمه سمائی فرا^۱، حسن حاج قاسم^۲، حسن عبداللهی^۳، منصور محتشمی فرا^۴، مجیدرضا علی احمدی^۴

چکیده

با توسعه فناوری میکروماشینی و میکروالکترونیک، میکروهیتر یک مؤلفه کلیدی در میکرو حسگرها به حساب می آید. در این مقاله یک میکروهیتر پلاتینی با ساختار غشای معلق طراحی و ساخته شده است. شبیه سازی با نرم افزار کاونتور به کار گرفته شده است تا طراحی بهینه انتخاب شود. برای به دست آوردن توزیع دمای یکنواخت در سرتاسر ناحیه فعال میکروهیتر و افزایش استقامت غشا، لایه نازک سیلیکون در زیر غشای دی الکتریک قرار داده شده است. یک فرآیند ساده و مطابق با فرآیند استاندارد مدار مجتمع برای ساخت میکروهیتر کم مصرف طراحی شده است. میکروهیتر ساخته شده برای رسیدن به دمای بالا 400°C فقط به توان مصرفی کم ۴۵ میلی وات نیاز دارد. همچنین دارای پاسخ زمانی بسیار سریع در محدوده ۵ میلی ثانیه برای رسیدن به دمای 400°C است.

کلیدواژه

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

مقدمه

برای انجام فرآیند انیل کردن^۷ بعد از بسته بندی بسیار حائز اهمیت است [۹].

در بسیاری از مقالات منتشر شده در زمینه میکروهیتر از کربیدسیلیکون [۱۰]، پلاتین [۱۱ و ۱۵-۱۶]، پلی سیلیکون [۱۶]، طلا [۱۷] و آلومینیوم [۱۸ و ۱۹] به عنوان الکتروود گرم کننده استفاده شده است. همچنین از پلی مید [۲۰]، سیلیکون [۱۵ و ۴] SOI^۸ [۱۷] به عنوان بستر استفاده شده است. برای افزایش حساسیت و دقت یک حسگر گازی که در آن از هیتر استفاده می شود، یکنواختی توزیع دما در ناحیه فعال هیتر بسیار حائز اهمیت است. به منظور عملکرد خوب میکروهیتر اختلاف دما در ناحیه فعال نباید از ۵۰ درجه سیلیسیوس تجاوز کند [۲۱]. همچنین در برخی منابع سفارش شده است که اختلاف دما کمتر از ۲۵ درجه سیلیسیوس باشد [۲۲]. یکنواختی دما در میکروهیتر را می توان از طریق چندین روش از جمله استفاده از لایه سیلیکون در زیر غشای میکروهیتر [۲۲ و ۲۳]، قرار دادن صفحه پلی سیلیکون در زیر غشای میکروهیتر [۲۴] و استفاده هندسه های گوناگون در طراحی میکروهیتر به دست آورد [۲۵]. در این مطالعه، ما یک میکروهیتر با ساختار غشای معلق شده با استفاده از سیلیکون به عنوان بستر، اکسیدسیلیکون به عنوان لایه دی الکتریک و پلاتین به عنوان الکتروود گرم کننده را ارائه می دهیم. پلاتین دارای پاسخ خطی در محدوده ۲۰۰- تا ۸۰۰ درجه سیلیسیوس، دمای ذوب بالا (1768°C)، پایداری دمایی

در سال های اخیر با گسترش فناوری MEMS^۵ به طور گسترده از میکروهیترها در کاربردهایی مثل حسگرهای گازی، حسگرهای فشار، حسگرهای رطوبت، آشکارکننده های فروسرخ، منابع فروسرخ و راه اندازها استفاده می شود [۱-۵]. استفاده از میکروهیترها در حسگرها به دلیل جرم حرارتی کم آن، پاسخ دینامیکی را افزایش داده و توان مصرفی را به طور قابل توجهی کاهش می دهد [۶]. همچنین استفاده از آن ها می تواند پیچیدگی فرآیند ساخت [۷] و قیمت در تولید انبوه را کاهش دهد [۸]. به منظور پاسخگویی به نیازهای سیستم های الکترونیکی مدرن انتظار می رود که میکروهیتر دارای توزیع دمای یکنواخت در سرتاسر ناحیه فعال میکروهیتر، توان مصرفی پایین، استحکام حرارتی و مکانیکی بالا برای افزایش استقامت میکروهیتر در محیط های خشن و مطابقت با فرآیند استاندارد IC (مدار مجتمع) برای توانایی در مجتمع شدن با مدارات الکتریکی و کاهش قیمت در تولید انبوه باشد. همچنین توانایی در رسیدن به دمای بالاتر از ۷۰۰ درجه سیلیسیوس

^۱ دانشگاه صنعتی مالک اشتر، fsamaei@yaho.com

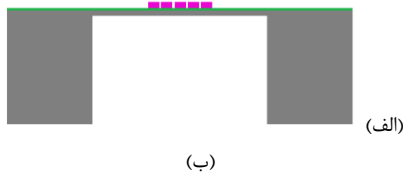
^۲ دانشیار دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

^۳ دانشگاه شهید ستاری

^۴ دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۵ Microelectromechanical Systems
Integrated Circuit

Annealing^۷
Silicon on Insulator^۸



شکل ۲. انواع میکروهیتر. الف- ساختار غشای معلق شده، ب- ساختار غشای معلق نشده

با استفاده از نرم‌افزار کاونتور دو نوع میکروهیتر را از نظر توان مصرفی با هم مقایسه کردیم. در تمامی شبیه‌سازی‌ها طول هیتر $400\ \mu\text{m}$ ، طول غشا $1000\ \mu\text{m}$ ، ضخامت لایه سیلیکون $5\ \mu\text{m}$ ، ضخامت لایه اکسید سیلیکون $0.4\ \mu\text{m}$ ، ضخامت لایه پلاتین $0.12\ \mu\text{m}$ و دمای محیط 300°K در نظر گرفته شده است. در ضمن جدول ۱ خصوصیات فیزیکی مواد استفاده شده در طراحی میکروهیتر را نشان می‌دهد [۲۴]. از این خصوصیات در شبیه‌سازی میکروهیتر با نرم‌افزار کاونتور استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی به خصوصیات مواد مورد استفاده در ساختار میکروهیتر وابسته می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۳ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای رسیدن به دمای مطلوب 400 کلون میکروهیتر با ساختار غشای معلق شده فقط به 12 میلی‌وات نیاز دارد در حالیکه میکروهیتر با ساختار غشای معلق نشده برای رسیدن به این دما 14 میلی‌وات نیاز دارد. از این رو ساختار مورد علاقه ما در طراحی-ها میکروهیتر با ساختار غشای معلق شده می‌باشد.

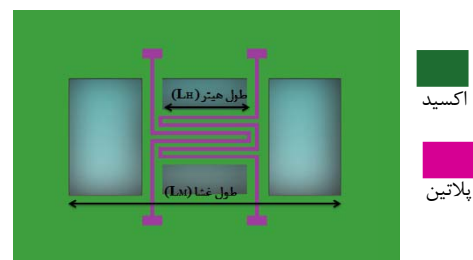
برای افزایش حساسیت و دقت یک حسگر گازی که در آن از هیتر استفاده می‌شود، یکنواختی توزیع دما در ناحیه فعال هیتر بسیار حائز اهمیت است. همان‌طور که در بالا ذکر شد یکنواختی دما در میکروهیتر از طریق چندین روش به دست می‌آید. در این مقاله روش قرار دادن لایه نازک سیلیکون در زیر غشای دی‌الکتریک را مورد بررسی قرار دادیم. به کمک نرم‌افزار کاونتور دو میکروهیتر با ساختار غشای معلق شده، یکی با قرار دادن لایه سیلیکون و دیگری بدون لایه سیلیکون در زیر غشای دی‌الکتریک را مقایسه کردیم. به هر دو میکروهیتر تا دمای 750°K گرم داده شد. شکل ۴ نتایج این شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. میکروهیتر بدون لایه سیلیکون دارای گرادیان دمای بیش از 100°K می‌باشد که مطلوب نیست. ولی میکروهیتر با لایه سیلیکون در زیر غشای دی‌الکتریک دارای یکنواختی توزیع دمای خوبی می‌باشد.

و شیمیایی، ضریب دمایی مقاومت^۱ (TCR) پایدار و مطابقت با فرآیند CMOS می‌باشد [۸]. برای دست آوردن توزیع دمایی یکنواخت در سرتاسر ناحیه فعال میکروهیتر و افزایش استقامت غشا، لایه نازک سیلیکون در زیر غشای دی‌الکتریک قرار داده شده است. این ساختار مشخصه‌هایی هم‌چون بازدهی گرمایی بالا، عایق‌بندی الکتریکی خوب، توان مصرفی کم و پاسخ زمانی سریع را نشان می‌دهد.

در این مقاله ابتدا با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار کاونتور^۱، ساختار با بهترین بازدهی گرمایی و یکنواختی دمایی را انتخاب کردیم. سپس مطابق با اصول طراحی و شرایط آزمایشگاه، یک فرآیند ساده برای ساخت میکروهیتر پلاتینی طراحی شد. تعدادی از فرآیندهای استاندارد مدار مجتمع هم-چون تبخیر پرتوالکترونی طلا و پلاتین، سونش مرطوب و فوتولیتوگرافی برای ساخت حسگر به خدمت گرفته شدند. در نهایت میکروهیتر پلاتینی با ساختار غشای معلق ساخته و مشخصه‌یابی شد.

طراحی و شبیه‌سازی

ساختار مورد نظر ما در این مقاله، دو مقاومت مارپیچ پلاتینی که بر روی یک غشای مستطیل شکل قرار گرفته‌اند، می‌باشد. غشا از طریق ۴ پایه به بستر سیلیکون وصل شده است (شکل ۱). یکی از مقاومت‌های پلاتینی به عنوان هیتر و مقاومت دیگری به عنوان حرارت‌سنج استفاده می‌شود. هیتر با پایه-هایش می‌تواند بر روی یک غشا قرار گیرد (ساختار غشای معلق نشده^۱) و یا به طور کامل معلق شود (ساختار غشای معلق شده^۲). شکل ۲ این دو نوع ساختار میکروهیتر را نشان می‌دهد.



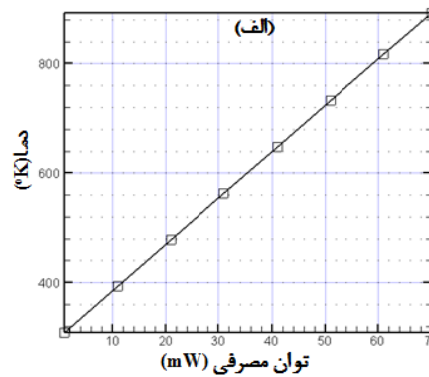
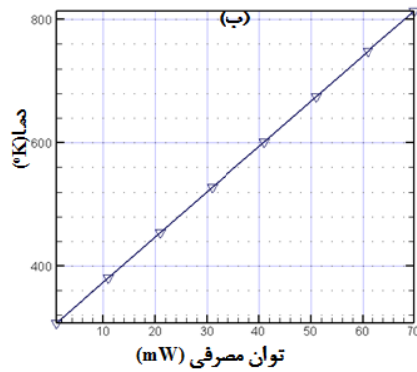
شکل ۱. نمای بالای میکروهیتر



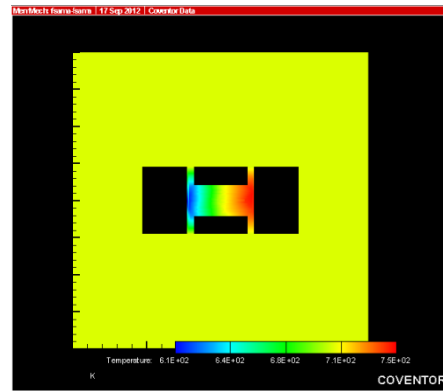
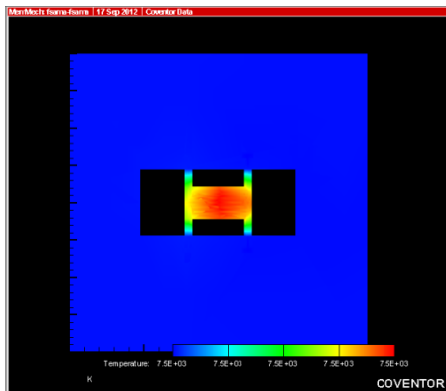
¹Temperature Coefficient of Resistance
¹CoventorWare
¹¹Closed Membrane
¹²Suspended Membrane

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

ضریب پواسن	مدول یانگ (Mpa)	هدایت الکتریکی (s/m)	رسانندگی گرمایی (W/m-k)	ظرفیت گرمای ویژه (J/kg-k)	چگالی (kg/m ³)	ماده
۰/۱۷	۱/۵×۱۰ ^۵	-	۱۵۰	۷۰۰	۲۳۳۰	سیلیکون
۰/۲	۰/۷×۱۰ ^۵	-	۷۳	۱۰۰۰	۲۲۰۰	اکسید سیلیکون
۰/۳۸	۱/۶×۱۰ ^۵	۰/۰۹۴	۳۱۵	۱۳۲/۵۱	۲۱۴۴۰	پلاتین
۰/۴۴	۷/۸×۱۰ ^۴	۰/۴۵	۲۹۷	۱۲۸/۷۴	۱۹۲۸۰	طلا



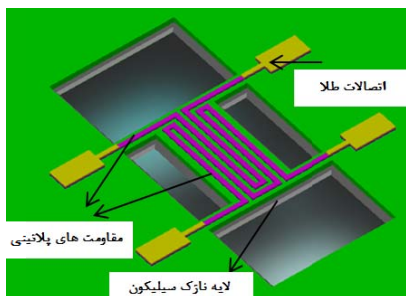
شکل ۳. نمودار دمای به عنوان تابعی از توان مصرفی میکروهیتر. الف- میکروهیتر با ساختار غشای معلق شده، ب- میکروهیتر با ساختار غشای معلق نشده



(ب)

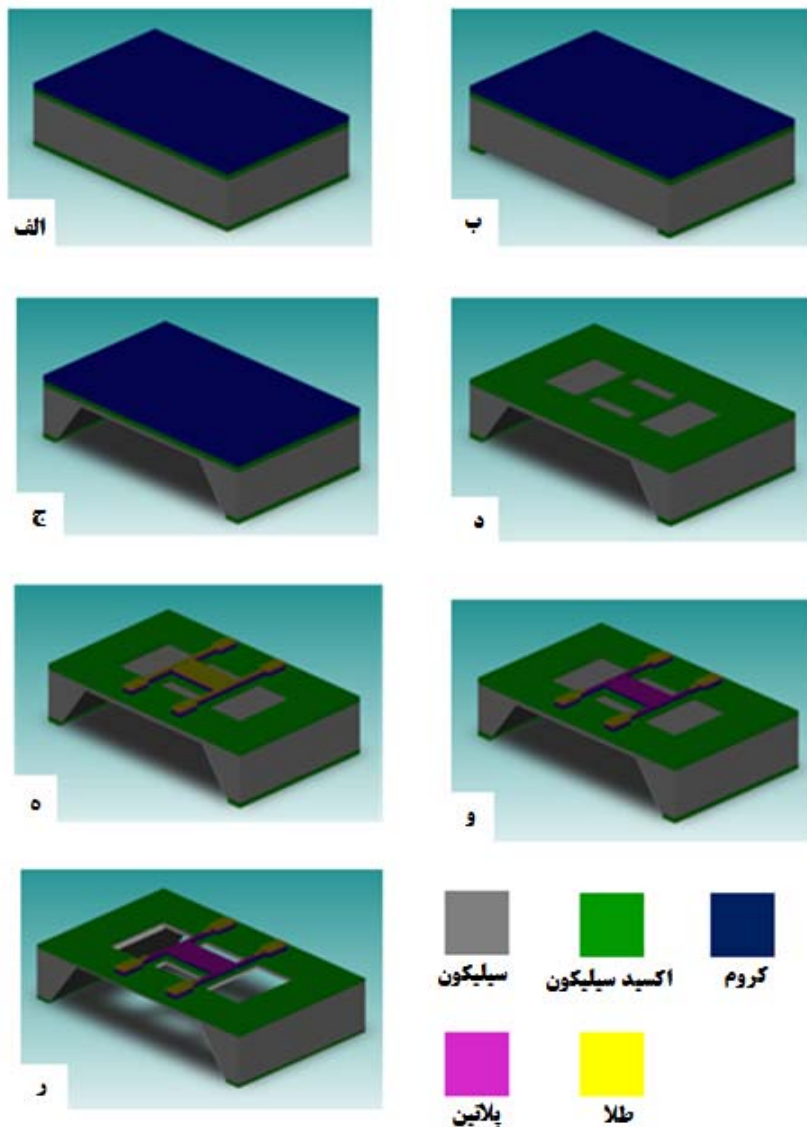
(الف)

شکل ۴. الف- میکروهیتر بدون قرار دادن لایه سیلیکون، ب- با لایه سیلیکون در زیر ناحیه فعال



شکل ۵. شماتیک ساختار میکروهیتر

با مشاهده نتایج شبیه‌سازی ما ساختار غشای معلق شده را برای ساخت میکروهیتر انتخاب کردیم. هم‌چنین برای یکنواختی توزیع گرما در ناحیه فعال میکروهیتر، قرار دادن لایه نازک سیلیکون را در زیر غشای دی‌الکتریک را برگزیدیم. شماتیک ساختار مورد نظر ما در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۶. روندنما فرآیند ساخت میکروهیتر

فرآیند ساخت میکروهیتر

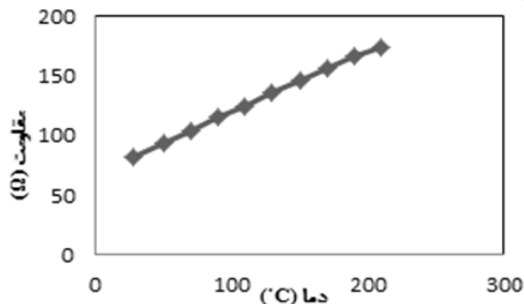
ساخت میکروهیتر با ساختار غشای معلق یک فرآیند با ۴ ماسک است که با استفاده از لیتوگرافی نوری و اتاق تمیز استاندارد انجام می‌شود. میکروهیتر بر روی بستر ویفر سیلیکون {۱۰۰} نوع P با ضخامت ۴۶۰ میکرومتر ساخته شد. ویفر {۱۰۰} یکی از پرکاربردترین صفحات در میکروماشین-کاری می‌باشد و اگر ماسک‌گذاری به گونه‌ای باشد که امتداد لبه ماسک موازی جهت <۱۱۰> باشد، دیواره‌های مایل با زاویه ۵۴/۷۴ در طی پروسه سونش شکل می‌گیرند. بنابراین نرخ زیر بریدگی^{۱۳} در راستای این لبه‌های ماسک بسیار پایین است. شکل ۶ فرآیند 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 ۳۰۰ نانومتر به روش حرارتی رشد داده شد. سپس ۲۵۰ نانومتر کروم بر روی نمونه‌ها لایه نشانی شد. برای افزایش پایداری کروم در TMAH نمونه‌ها در دمای ۴۵۰ درجه سیلیسیوس و عبور گاز نیتروژن انیل شدند (شکل ۶-الف).
- (۲) اکسید پشت نمونه الگودهی و سونش^{۱۴} شد و یک پنجره در لایه اکسید ایجاد شد (شکل ۶-ب).
- (۳) سیلیکون در TMAH با غلظت ۲۵٪ در دمای ۸۵°C سونش شد تا عمق سونش سیلیکون به ۴۵۰ μm رسید (شکل ۶-ج). بعد از سونش سیلیکون، کروم

Etch^{۱۴}

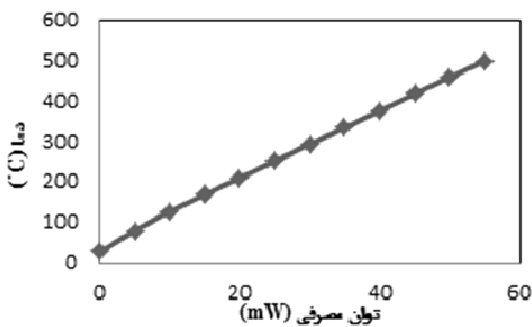
Undercut^{۱۳}

مقالات منتشر شده که بر اساس المان پلاتینی هستند مطابقت دارد.



شکل ۸. منحنی تغییرات مقاومت با تغییر دما در میکروهیتر پلاتینی

در شکل ۹ دمای میکروهیتر به عنوان تابعی از توان مصرفی نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل می‌توان استنباط کرد میکروهیتر ساخته شده برای رسیدن به دمای 400°C فقط 45mW توان نیاز دارد که بسیار کم مصرف می‌باشد.



شکل ۹. تغییرات دمای میکروهیتر به عنوان تابعی از توان مصرفی آن

پاسخ زمانی میکروهیتر نیز اندازه‌گیری شد. شکل ۱۰ ولتاژ میکروهیتر به عنوان تابعی از زمان وقتی پالس مربعی جریان 10mA می‌آید مدت زمان 30ms میلی‌ثانیه به آن وارد می‌شود را نشان می‌دهد. ثابت زمانی میکروهیتر در یک سیکل گرم شدن و سرد شدن از دمای اتاق تا 400°C درجه سیلیسیوس به ترتیب $5/43$ و $5/21$ میلی‌ثانیه اندازه‌گیری شد.

میکروهیتر ساخته شده دارای پاسخ زمانی سریع و بازدهی گرمایی بالا می‌باشد که قابل مقایسه یا برتر از مقالات قبلی منتشر شده در زمینه میکروهیتر پلاتینی می‌باشد [۱۱۴-۱۱۵]. در جدول ۲ مقایسه عملکرد و مشخصات میکروهیتر ساخته شده با سایر میکروهیترهای پلاتینی با ساختار غشای معلق گزارش شده در دیگر مقالات آورده شده است [۱۱۴-۱۱۵]. هم‌چنین انتظار می‌رود میکروهیتر ساخته شده به دلیل رسانندگی گرمایی لایه سیلیکون که در زیر غشای دی الکتریک قرار داده شده است، از نظر یکنواختی گرما در ناحیه فعال میکروهیتر بهتر از سایر میکروهیترهای ارائه شده باشد.

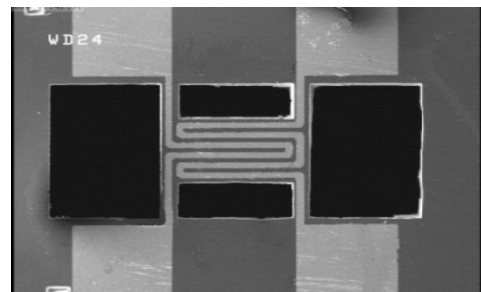
با $80\% \text{H}_2\text{O} : 20\% (\text{NH}_4)_2\text{Ce}(\text{NO}_3)_2$ به طور کامل برداشته شد.

(۴) اکسید روی نمونه الگودهی و سونش شد (شکل ۶-د).
(۵) با استفاده از فرآیند 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 ضخامت های 20nm ، 120nm و 150nm نانومتر لایه‌نشانی شدند. پلاتین به دلیل ویژگی‌های حرارتی خوب و مطابقت با فناوری MEMS سیلیکون به عنوان الکتروود گرم‌کننده انتخاب شد [۲۶]. 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).

(۶) طلا الگودهی شده و با $75\% \text{H}_2\text{O} : 10\% \text{KI} : 15\% \text{I}_2$ سونش شد (شکل ۶-و).

(۷) در نهایت برای معلق کردن میکروهیتر، نمونه‌ها در TMAH با غلظت 25% و دمای 85°C قرار گرفت (شکل ۶-ز).

شکل ۷ تصویر SEM از میکروهیتر معلق شده را نشان می‌دهد.



شکل ۷. تصویر SEM از میکروهیتر ساخته شده.

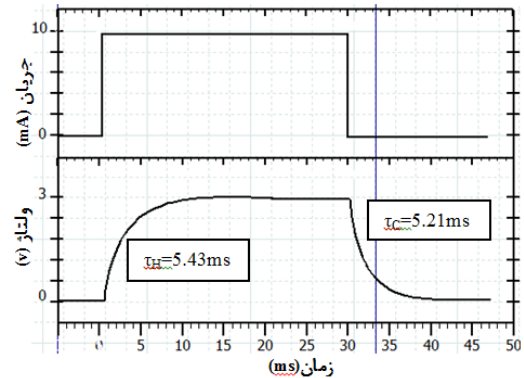
نتایج آزمایش

میکروهیتر ساخته شده از دو مقاومت پلاتینی تشکیل شده است. از یکی از مقاومت‌ها به عنوان هیتر و از مقاومت دیگر به عنوان حرارت‌سنج استفاده کردیم و مشخصات دمایی هیتر، توان مصرفی و پاسخ زمانی دستگاه را به دست آوردیم. برای تعیین TCR، میکروهیتر پلاتینی به همراه یک حسگر دمای مرجع داخل کوره قرار داده شدند و تغییرات مقاومت برای گام‌های دمایی مختلف اندازه‌گیری شد (شکل ۸). همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است پاسخ دمایی خطی و مقدار TCR برابر 10^{-3}C^{-1} می‌باشد. این مقدار TCR با

مصرفی و پاسخ زمانی از بسیاری از میکروهیترهای پلاتینی گزارش شده بهتر می‌باشد. به علاوه از نظر استقامت و یکنواختی دما به دلیل قرار دادن لایه سیلیکون در زیر غشای میکروهیتر بهبود یافته است.

مراجع

- [1] J. Courbat, M. Canonica, D. Teyssieux, D. Briand, and 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, p. 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] I. Elmi, S. Zampolli, E. Cozzani, F. Mancarella, and 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, and S.-H. Choa, "Development of micro-heaters with optimized temperature compensation design for gas sensors," *Sensors*, vol. 11, pp. 2580-2591, 2011.
- [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*, 2005, pp. 540-548.
- [6] C. Tao, C. Yin, M. He, and S. Tu, "Thermal analysis and design of a micro-hotplate for Si-substrated micro-structural gas sensor," in *Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, 2008. NEMS 2008. 3rd IEEE International Conference on, 2008, pp. 284-287.



شکل ۱۰. ولتاژ هیتر به عنوان تابعی از زمان با اعمال پالس مربعی جریان به آن

جدول ۲. مشخصات میکروهیترهای پلاتینی معلق گزارش شده در مقالات

مرجع	بازدهی گرمایی (mW/°K)	ثابت زمانی (ms)	طول هیتر (μm)	طول غشای L _M (μm)
[۴]	۲۵۰ mW برای ۴۶۰°C	۲۰	۱۱۰۰	۱۶۰۰ × ۱۴۰۰
[۱۱]	۵۰ mW برای ۴۰۰°C	۱۰ (برای ۴۰۰°C)	۴۰۰	۱۰۰۰
[۱۲]	۱۸/۲ (۱۵/۵ mW) برای ۳۵۰°C	-	۱۹۰	۴۰۰
[۱۳]	۸/۴۳ (۳۰ mW) برای ۵۵۰°C	-	۱۵۰	۴۰۰
[۱۴]	۱۰۰ mW برای ۴۰۰°C	-	۶۴۰ × ۲۴۰	-
[۱۵]	۳/۲۲	۶-۱۰	۲۰۰	۲۵۰
کار ارائه شده	۸/۳۳ (۴۵ mW) برای ۴۰۰°C	۵/۲-۵/۴	۴۰۰	۱۰۰۰

نتیجه گیری

در این مقاله یک میکروهیتر با ساختار غشای معلق شده بر روی بستر سیلیکون و با استفاده از پلاتین به عنوان الکترود گرم‌کننده طراحی، ساخته و مشخصه‌یابی شده است. شبیه‌سازی با نرم‌افزار کوانتور نشان می‌دهد که میکروهیتر با ساختار غشای معلق شده دارای بازدهی گرمایی بالا می‌باشد. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد با قرار دادن لایه سیلیکون در زیر غشای دی‌الکتریک، توزیع دمای یکنواخت در ناحیه فعال میکروهیتر به دست می‌آید. برای ساخت میکروهیتر یک فرآیند ساده و مطابق با فرآیند استاندارد مدار مجتمع ارائه شده است. میکروهیتر ساخته شده برای رسیدن به دمای بالا ۴۰۰°C فقط به ۴۵ میلی‌وات نیاز دارد و همچنین پاسخ زمانی آن در محدوده ۵ میلی‌ثانیه می‌باشد. مشخصه‌های الکتریکی و حرارتی اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که میکروهیتر ما از نظر توان

- and Microengineering, vol. 19, p. 115011, 2009.
- [16] M. Ehmann, P. Ruther, M. von Arx, and 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, p. 397, 2001.
- [17] X. Yi, J. Lai, H. Liang, and X. Zhai, "Fabrication of a MEMS micro-hotplate," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2011, p. 012098.
- [18] T. A. Kunt, T. J. McAvoy, R. E. Cavicchi, and 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, and N. Chomnawang, "Fabrication and control of thin-film aluminum microheater and nickel temperature sensor," in *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2011 8th International Conference on*, 2011, pp. 14-17.
- [20] M. Aslam, C. Gregory, and 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, and 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, and N. De Rooij, "Thermal management of micro-hotplates using MEMCAD as simulation tool," *Power (mW)*, vol. 1, p. 5mm2, 2000.
- [23] P. Ruther, M. Ehmann, T. Lindemann, and O. Paul, "Dependence of the temperature distribution in micro hotplates on heater geometry and heating mode," in *TRANSDUCERS, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 12th International Conference on*, 2003, pp. 73-76.
- Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 142, pp. 284-291, 2008.
- [8] G.-S. Chung and 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, and J.-P. Raskin, "Micromachined thin-film sensors for SOI-CMOS co-integration," *Micromachined Thin-Film Sensors for SOI-CMOS Co-Integration*, by J. Laconte, D. Flandre, and J.-P. Raskin. 2006 XIII, 292 p. 0-387-28842-2. Berlin: Springer, 2006., vol. 1, 2006.
- [10] J.-C. Shim and G.-S. Chung, "Fabrication and characteristics of Pt/ZnO NO sensor integrated SiC micro heater," in *Sensors, 2010 IEEE*, 2010, pp. 350-353.
- [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, and 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] I. 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, and Y.-T. Kim, "A microsensor array with porous tin oxide thin films and microhotplate 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, and W.-K. Seong, "A high-temperature MEMS heater using suspended silicon structures," *Journal of Micromechanics*

- (ASQED), 2011 3rd Asia Symposium on, 2011, pp. 100-104.
- [26] A. Mayadas and M. Shatzkes, "Electrical-resistivity model for polycrystalline films: the case of arbitrary reflection at external surfaces," *Physical review B*, vol. 1, p. 1382, 1970.
- [24] J. O. Dennis, A. Y. Ahmed, and 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.
- [25] O. Sidek, M. Ishak, M. Khalid, M. Abu Bakar, and M. Miskam, "Effect of heater geometry on the high temperature distribution on a MEMS micro-hotplate," in *Quality Electronic Design*