

SID



ابزارهای
پژوهش



سرویس ترجمه
تخصصی



کارگاه های
آموزشی



بلاگ
مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری
STES



فیلم های
آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی



آموزش مهارت های کاربردی در تدوین و چاپ مقالات ISI

آموزش مهارت های کاربردی
در تدوین و چاپ مقالات ISI



روش تحقیق کمی

روش تحقیق کمی



آموزش نرم افزار Word برای پژوهشگران

آموزش نرم افزار Word
برای پژوهشگران

ICMEMS2014-2256

ساخت غشای سیلیکونی میکرومتری با استفاده از محلول TMAH

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

^۱ دانشجوی دکتری برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر، fsamaeifar@yahoo.com

^۲ هیات علمی دانشکده برق - دانشگاه هوایی شهید ستاری، hassan_abdollahi@yahoo.com

^۳ دانشیار دانشکده برق و الکترونیک - دانشگاه تهران، hahajghassem@gmail.com

^۴ پژوهشگر دانشکده برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر، tah1965_moh@yahoo.com

^۵ پژوهشگر دانشکده برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر، mr_aliahmadi@yahoo.com

چکیده

در این مقاله فرآیند ساخت غشاهای میکرومتری بر روی ویفر سیلیکون با استفاده از محلول هیدروکسید آمونیم تترا متیل (TMAH) بیان شده است. برای محافظت از غشاهای میکرونی در حین فرایند سونش مرطوب سیلیکون، از عملیات حرارتی بر روی ماسک کرومی استفاده شده است. هم‌چنین به منظور ثابت نگه داشتن دما و غلظت TMAH، ابزار آزمایشگاهی مخصوص طراحی و ساخته شده است. فرایند سونش سیلیکون در محلول TMAH با غلظت ۲۵٪ و در دمای ۹۰°C انجام شد و نرخ سونش سیلیکون ۴۵ μm/h به دست آمد. تصاویر SEM گرفته شده از سطح سیلیکون سونش شده نشان می‌دهد که سطح آن صاف و ناهمواری آن کمتر از ۱ μm می‌باشد. هم‌چنین نرخ سونش صفحه <۱۰۰> نسبت به صفحه <۱۱۱> برابر ۵/۴۲ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی

غشای سیلیکونی، سونش ناهمسان‌گرد، میکروماشین‌کاری، TMAH

مقدمه

میکروماشین‌کاری حجمی سیلیکون^۱ یکی از فرایندهای اصلی و مهم ریزفناوری و میکروماشین‌کاری^۲ است. از فرایند سونش مرطوب ناهمسان‌گرد^۳ سیلیکون به‌طور گسترده برای ساخت سازه‌های کاملاً پیچیده سه‌بعدی از جمله تیرهای یک سرگیردار^۴، غشاهای^۵ سیلیکونی و نازل‌ها^۶ بر روی بستر سیلیکون استفاده می‌شود [۱]. در سال‌های اخیر از غشاهای سیلیکونی با ضخامت میکرومتری برای ساخت حسگرهای گازی، حسگرهای فشار، حسگرهای رطوبت، آشکارسازهای مادون قرمز، منابع مادون قرمز و راه اندازه‌ها استفاده می‌شود [۲-۶].

محلولهای^۷ KOH،^۸ HDP و^۹ TMAH از متداول‌ترین سونشگرهای^{۱۰} مرطوب و ناهمسان‌گرد سیلیکون می‌باشند. محلول KOH ارزان قیمت و غیرسمی می‌باشد. ناهمواری^{۱۱} سطح سونش شده با KOH ناچیز است. اما برای سونش سیلیکون در KOH علاوه بر ماسک اکسید سیلیکون احتیاج به یک لایه نیترات سیلیکون می‌باشد. لایه-نشانی نیترات سیلیکون به روش بخار شیمیایی کم فشار^{۱۲} انجام می‌شود که گران قیمت است. بنابراین فرایند سونش سیلیکون در KOH طولانی است. محلول EDP نسبتاً با CMOS سازگار است و برای سونش سیلیکون در محلول EDP ماسک اکسید سیلیکون به‌تنهایی کفایت می‌کند، اما به شدت خطرناک و بخار آن سرطان‌زا است. از این رو باید آن را در چگالنده‌های^{۱۳} کاملاً بسته قرار داد و کار با آن بسیار مشکل است. نرخ سونش سیلیکون در محلول TMAH بالا است و استفاده از یک ماسک اکسید سیلیکون به‌تنهایی برای سونش سیلیکون کفایت می‌کند. هم‌چنین TMAH قابلیت گزینندگی^{۱۴} خوبی دارد و سمی بودن آن نیز اندک می‌باشد. از این رو در سونش مرطوب سیلیکون، استفاده از TMAH نسبت به سایر سونشگرها ترجیح داده می‌شود [۷].

در این مقاله فرایند ساخت غشاهای سیلیکونی با استفاده از محلول TMAH به‌طور کامل توضیح داده شده است.

آزمایش

برای سونش مرطوب ناهمسان‌گرد سیلیکون از ویفرهای سیلیکون (۱۰۰) نوع p با ضخامت ۴۶۰ μm و مقاومت ویژه ۲-۲۰ Ω.cm استفاده گردید. ویفر (۱۰۰) یکی از پرکاربردترین صفحات در میکروماشین‌کاری می‌باشد و اگر ماسک گذاری به گونه‌ای باشد که امتداد لبه ماسک موازی جهت {۱۱۰} باشد، دیواره‌های مایل با زاویه

⁷ Potassium Hydroxide

⁸ Ethylenediamine-Pyrocatechol

⁹ Tetramethyl Ammonium Hydroxide

¹⁰ Etchant

¹¹ Roughness

¹² Low Pressure Chemical Vapor

¹³ Condensers

¹⁴ Selectivity

¹ Bulk Silicon Micromachining

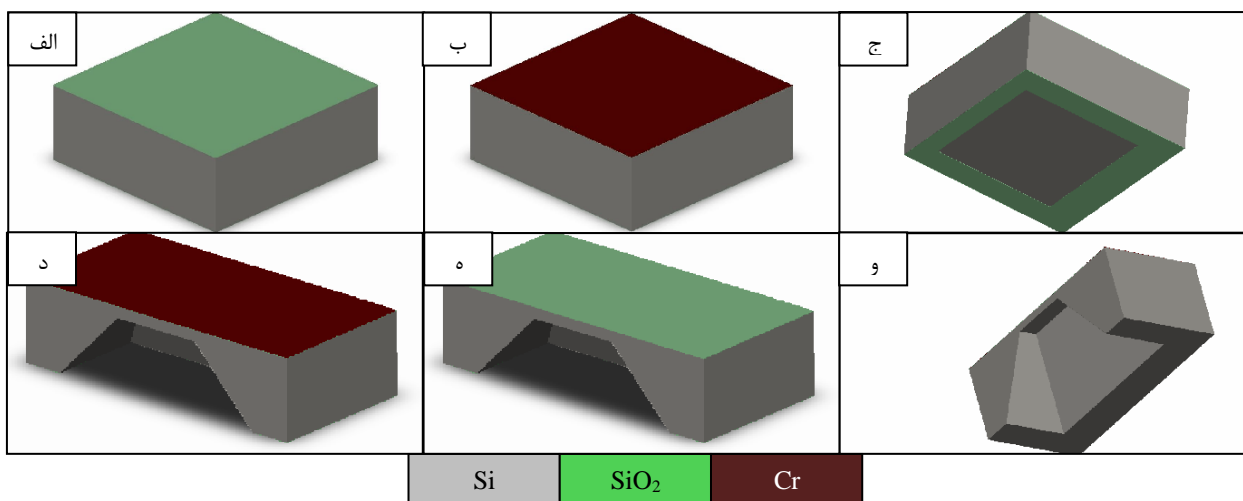
² Microelectromechanical Systems (MEMS)

³ Anisotropic Wet Etching

⁴ Cantilever

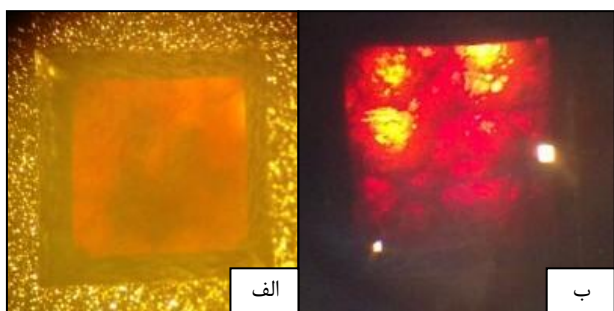
⁵ Diaphragm

⁶ Nozzles



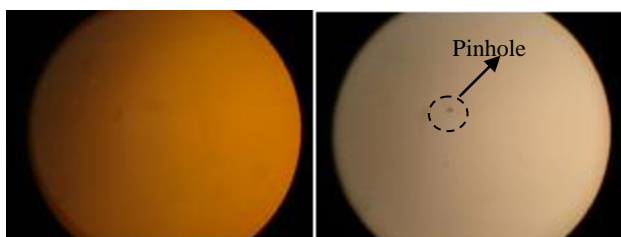
شکل ۱. روندنما فرایند ساخت غشای سیلیکونی میکرومتری (الف) لایه نشانی SiO_2 (ب) لایه نشانی Cr در روی نمونه‌ها (ج) الگودهی پشت نمونه‌ها جهت ایجاد پنجره (د) سونش سیلیکون (ه) زدایش کامل Cr روی نمونه‌ها (و) ادامه سونش سیلیکون جهت نازک سازی

می‌دهد که نور از زیر نمونه‌ها تابیده شده است. عبور نور مرئی به رنگ قرمز از سیلیکون نشان دهنده ضخامت کم سیلیکون است.



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ نوری از پوسته الف (تصویر از روی نمونه ب) تصویر از زیر نمونه.

هم‌چنین در فرایند ساخت غشا، برای افزایش پایداری کروم در TMAH، نمونه‌ها تحت عملیات حرارتی^{۱۷} در دمای ۴۵۰ درجه در محیط نیتروژن قرار گرفتند. تصاویر شکل ۳ سطح لایه کروم را قبل و بعد از عملیات حرارتی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است رنگ لایه کروم عوض شده است و حفره‌های کوچک^{۱۸} روی سطح کروم کاهش یافته است. با بهبود ناهمواری‌های سطح لایه کروم، پایداری آن در TMAH افزایش می‌یابد.



شکل ۳: تصاویر میکروسکوپ نوری از لایه کروم، تصویر راست قبل از عملیات حرارتی و تصویر چپ بعد از عملیات حرارتی لایه کروم

۵۴/۷۴ در طی پروسه سونش شکل می‌گیرند. بنابراین نرخ زیر بریدگی^{۱۵} در راستای این لبه‌های ماسک بسیار پایین است. شکل ۱ فرایند ساخت غشای سیلیکونی میکرومتری را نشان می‌دهد. ابتدا ویفر به ابعاد $1/2\text{cm} \times 1/2\text{cm}$ در جهت $\{100\}$ برش داده می‌شود، سپس این ویفرها به روش استاندارد RCA تمیز می‌گردیدند. در ادامه اکسید سیلیکون در دو طرف نمونه‌ها به ضخامت $2\mu\text{m}$ به روش حرارتی رشد داده می‌شود (شکل ۱-الف). اکسید سیلیکون نقش ماسک را در حین فرایند سونش سیلیکون در TMAH دارد. برای محافظت بیشتر اکسید روی نمونه‌ها در طی فرایند سونش مرطوب سیلیکون، 150 نانومتر کروم بر روی نمونه‌ها لایه نشانی می‌شود (شکل ۱-ب). بعد از آن اکسید پشت نمونه‌ها با فتورزیست مثبت Shipley1813 الگودهی می‌شود تا یک پنجره به ابعاد $2/2 \times 2/2\text{mm}^2$ ایجاد شود. باید توجه داشت که در هنگام لیتوگرافی نمونه‌ها، امتداد لبه ماسک موازی با جهت $\{110\}$ باشد تا در حین سونش سیلیکون میزان زیر بریدگی ناچیز شود. سپس اکسید پشت نمونه‌ها در BHF^{16} (۶ واحد محلول فلورید آمونیوم ۴۰٪ با ۱ واحد HF ۳۸٪) به مدت ۱۰ دقیقه سونش می‌شود تا یک پنجره در لایه اکسید سیلیکون ایجاد شود (شکل ۱-ج). بعد از سونش اکسید، نمونه‌ها را با آب مقطر شسته شده و بلافاصله به مدت ۹ ساعت در داخل محلول TMAH با غلظت ۲۵٪ و در دمای 90°C قرار می‌گیرند تا سونش سیلیکون داخل پنجره‌ها انجام شود (شکل ۱-د). در این مرحله سیلیکون تا عمق $400\mu\text{m}$ سونش شده و سپس کرم روی نمونه‌ها با محلول آمونیوم سریم $80\% \text{H}_2\text{O} : \text{Ce}(\text{NO}_3)_2 : (\text{NH}_4)_2$ ۲۰٪ به طور کامل زدوده می‌شود (شکل ۱-ه). بعد از زدایش کرم، سونش سیلیکون ادامه می‌یابد تا نور مرئی از پوسته عبور کند (شکل ۱-و). در شکل ۲ دو تصویر با میکروسکوپ نوری از پشت و روی نمونه‌ها را نشان

¹⁷ Anneal

¹⁸ Pinhole

¹⁵ Undercut

¹⁶ Buffered Hydrofluoric Acid

آن برش داده شده است تا تصویر از وضوح بیشتر برای بررسی برخوردار باشد و همچنین بتوان ضخامت غشاء را اندازه‌گیری نمود. شکل ۵-الف تصویر غشاء از بالا، شکل ۵-ب تصویر غشاء از پایین و شکل ۵-ج تصویر شیب سونش با زاویه $54/74^\circ$ درجه را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۵-د ضخامت غشاء را نشان می‌دهد. همان‌طور که این تصویر نشان می‌دهد، ضخامت اندازه‌گیری شده غشا در حدود $30\mu\text{m}$ گردیده است.

در شکل ۶ تصویر SEM ۲ بعدی از ناهمواری‌های^{۲۱} ایجاد شده در سیلیکون سونش شده در کف پنجره بعد از $9/5$ ساعت با دقت $1\mu\text{m}$ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است در TMAH با غلظت 25% ، سطح سیلیکون سونش شده کاملاً صاف و بدون ناهمواری است.

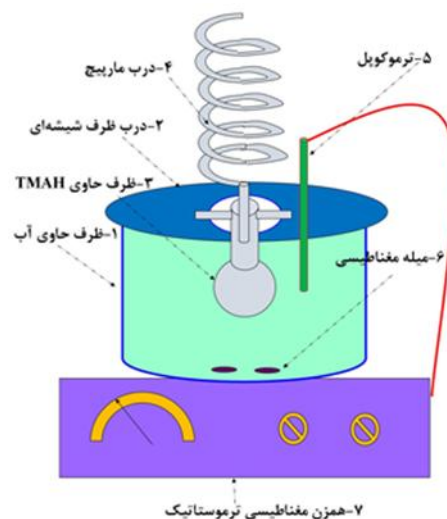
سونش سیلیکون در صفحه $<100>$ نسبت به صفحه $<111>$ ، مورد دیگری است که مورد بررسی قرار گرفت. در طی پروسه سونش علاوه بر سونش در جهت $<100>$ ، سونش در جهت $<111>$ نیز وجود دارد که باعث ایجاد زیربریدگی در نمونه‌ها می‌شود. ولی نرخ سونش در جهت $<111>$ کمتر از سونش در جهت $<100>$ است. با افزایش نرخ سونش در جهت $<111>$ زیربریدگی افزایش می‌یابد که مطلوب نیست. در شکل ۷ اندازه زیربریدگی بعد از $9/5$ ساعت نشان داده شده است. میزان سونش سیلیکون در TMAH با غلظت 25% بعد از $9/5$ ساعت در جهت $<100>$ برابر $430\mu\text{m}$ و در جهت $<111>$ $79/33\mu\text{m}$ گردید که نسبت سونش صفحه $<100>$ به $<111>$ $5/42$ می‌باشد.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله غشاهای سیلیکونی میکرومتری ساخته شده است. به منظور کنترل فرایند سونش و بهبود ناهمواری‌های سطح سیلیکون سونش شده، ابزار آزمایشگاهی مخصوصی طراحی و ساخته شد تا دما و غلظت TMAH را در مدت انجام فرایند ثابت نگه دارد. هم‌چنین نرخ سونش صفحه $<100>$ نسبت به صفحه $<111>$ و زیر بریدگی غشای سیلیکونی ایجاد شده، به طور کامل بررسی شد.

ابزار آزمایشگاهی طراحی شده

به منظور ثابت نگه داشتن دما و غلظت TMAH در مدت فرایند سونش، ابزار آزمایشگاهی ساده‌ای طراحی و ساخته شده است (شکل ۴). این ابزار آزمایشگاهی از بخش‌های زیر تشکیل شده است که عبارتند از: ۱) ظرف محتوی آب ۲) درب ظرف شیشه‌ای ۳) ظرف محتوی TMAH ۴) درب ظرف محلول TMAH ۵) دماسنج ۶) مغنت ۷) اجاق حرارتی با تنظیم‌کننده حرارت و همزن مغناطیسی. ظرف شیشه‌ای بزرگ این ابزار، حاوی آب به مقدار یک لیتر است، به طوری‌که ظرف محلول TMAH در داخل آن به حالت معلق قرار می‌گیرد. این مجموعه بر روی یک تنظیم‌کننده درجه حرارت^{۱۹} قرار می‌گیرد که می‌تواند دما را از محدوده دمای اتاق تا 100°C درجه گرم و ثابت نگه می‌دارد. آب داخل ظرف توسط یک همزن مغناطیسی^{۲۰} با سرعت 100rpm می‌چرخد تا دمای آب داخل ظرف یکنواخت شود. با این روش دمای داخل ظرف TMAH ثابت باقی می‌ماند. جهت کنترل غلظت محلول TMAH، محلول در ظرف‌هایی شیشه‌ای با درپوش ماریچ قرار می‌گیرد. اگر محلول در حین فرایند سونش بخار شود، بخارات توسط لوله ماریچ به مایع تبدیل شده و به داخل ظرف بازگردانده می‌شود، به این ترتیب غلظت TMAH در حین فرایند سونش ثابت نگه داشته می‌شود. هم‌چنین برای عایق بندی حرارتی بهتر، پتوی نسوز در اطراف این مجموعه قرار گرفت. دمای محلول در حین فرایند سونش نیز به وسیله ترموکوپل با دقت $0/1$ درجه سلسیوس اندازه‌گیری و کنترل می‌شود.



شکل ۴. ابزار آزمایشگاهی طراحی شده

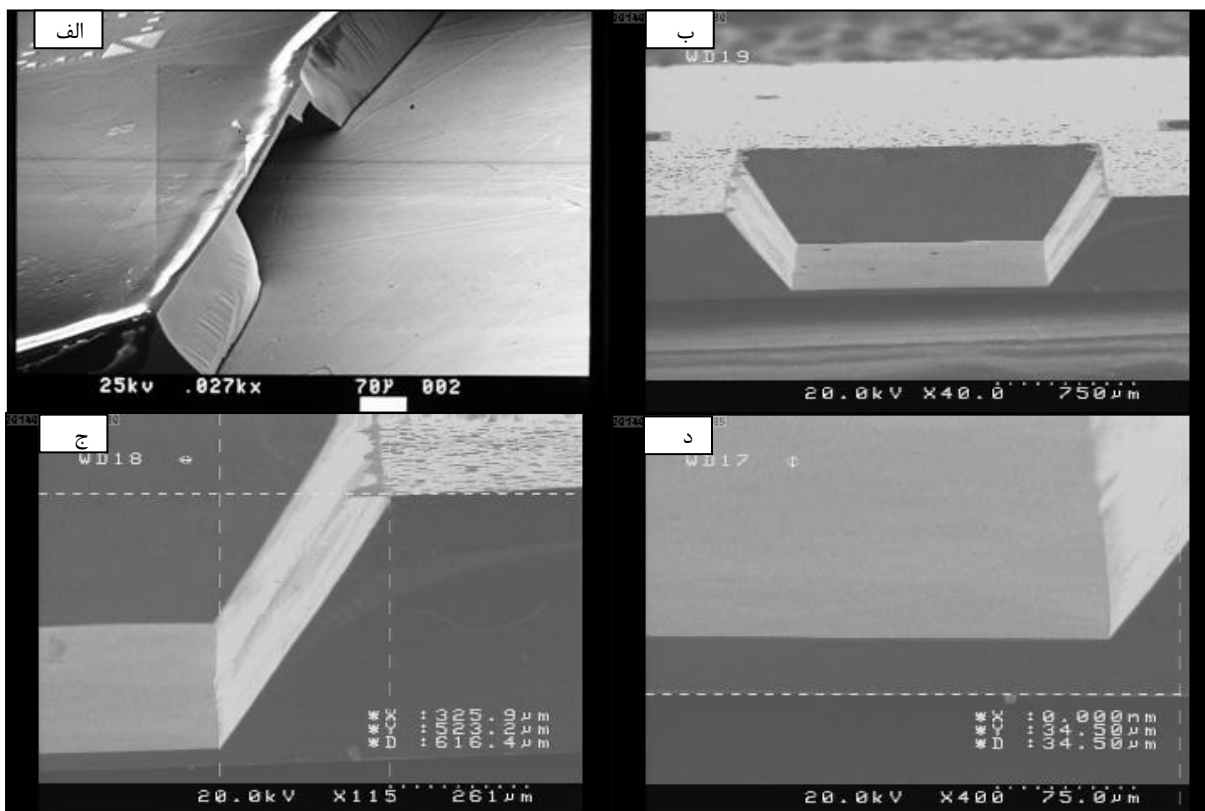
بحث و نتیجه

فرایند سونش ناهمسانگرد سیلیکون در TMAH با غلظت 25% و در دمای 90°C در مدت ۹ ساعت و ۳۰ دقیقه انجام گرفت. نرخ سونش سیلیکون با این شرایط $45\mu\text{m/h}$ به دست آمد. شکل ۵ تصاویر SEM ۳ بعدی از غشای سیلیکونی ساخته شده را نشان می‌دهد که یک لبه

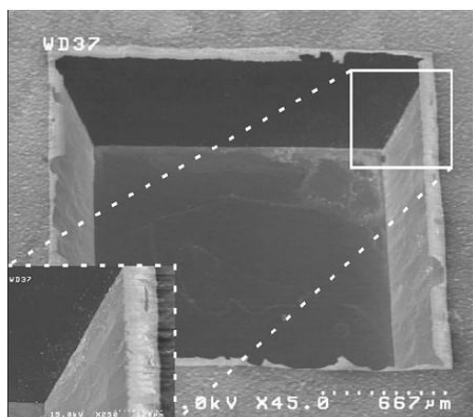
²¹ Roughness

¹⁹Thermostatically Controller

²⁰Magnetic Stirrer



شکل ۵. تصاویر SEM سه بعدی از غشاء ساخته شده در TMAH با غلظت ۲۵٪ و در دمای ۹۰°C در مدت ۹/۵ ساعت (الف) تصویر از بالای غشاء (ب) تصویر از پایین غشاء (د) تصویر از شیب سونش (ه) تصویر از ضخامت غشاء



شکل ۷. تصویر SEM از زیر بریدگی ایجاد شده سیلیکون سونش شده در TMAH با غلظت ۲۵٪ بعد از ۹/۵ ساعت



شکل ۶. تصویر SEM دوبعدی با دقت ۱µm از سطح سیلیکون‌های سونش شده در کف پنجره در TMAH با غلظت ۲۵٪ در دمای ۹۰°C در مدت ۹/۵ ساعت

- Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 135, pp. 342-351, 2008.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] X. Yi, J. Lai, H. Liang, X. Zhai, "Fabrication of a MEMS micro-hotplate", 3rd International Photonics & OptoElectronics Meetings (POEM 2010), *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 276, 2011.
- [1] H. Seidel, L. Csepregi, A. Heuberger, H. Baumgartel, "Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solutions", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 137 (11), pp. 3612-3625, 1990.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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,"

SID



ابزارهای
پژوهش



سرویس ترجمه
تخصصی



کارگاه های
آموزشی



بلاگ
مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری
STES



فیلم های
آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی



تازه های آموزش
آموزش مهارت های کاربردی در تدوین و چاپ مقالات ISI

آموزش مهارت های کاربردی
در تدوین و چاپ مقالات ISI



تازه های آموزش
روش تحقیق کمی

روش تحقیق کمی



تازه های آموزش
آموزش نرم افزار Word برای پژوهشگران

آموزش نرم افزار Word
برای پژوهشگران