

بررسی و تحلیل رفتاری لایه برداری سطحی ناهمسان گرد سیلیکون در محلول TMAH

حسن عبداللهی*^۱، حسن حاج قاسم^۲

۱- دکترای برق- الکترونیک، گروه برق، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشیار، گروه برق- الکترونیک، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

*Hassan_abdollahi@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۳/۲۰، تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۶/۲۵)

چکیده

این مقاله به بررسی و تحلیل رفتاری لایه برداری سطحی ناهمسان گرد سیلیکون (۱۰۰) در هیدروکسید آمونیم تترامتیل (TMAH) پرداخته است. فرآیند حکاکی در محلول TMAH با غلظت‌های مختلف ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۵٪ و در دماهای مختلف ۷۰ °C، ۸۰ °C و ۹۰ °C انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که نرخ زدایش با افزایش دما، افزایش می‌یابد ولی این نرخ با افزایش غلظت TMAH در غلظت‌های بیشتر از ۱۰٪ کاهش می‌یابد. بیشترین نرخ زدایش برابر با ۶۲ μm/h در غلظت ۱۰٪ و دمای ۹۰ °C است. تصاویر SEM نشان می‌دهد که در سطح سیلیکون برآمدگی‌های شبیه به تپه‌های هرمی شکل کوچک ظاهر می‌شود که تعداد، شکل و نحوه توزیع آنها در روی سطح سیلیکون کاملاً تصادفی است. تعداد ناهمواری با افزایش غلظت TMAH کاهش می‌یابد و سطح سیلیکون حکاکی شده در TMAH با غلظت‌های بالا، صاف‌تر می‌باشد. در ضمن بیشترین مقدار نرخ زدایش در صفحه <۱۰۰> نسبت به صفحه <۱۱۱> برای TMAH با غلظت ۱۰٪ به دست آمده است که مقدار آن ۱۰/۶ است. زدایش سیلیکون با TMAH در این غلظت کمترین زیربریدگی را دارد.

واژه‌های کلیدی:

میکروماشین‌کاری، لایه برداری سطحی ناهمسان گرد سیلیکون، ناهمواری سطح سیلیکون، TMAH.

۱- مقدمه

سیلیکون استفاده می‌شود [۱]. اخیراً از فن حکاکی خشک برای میکروماشین‌کاری سیلیکون با نسبت ابعاد بالا^{۱۱} استفاده شده است اما هنوز فرآیند لایه برداری سطحی شیمیایی مرطوب به دلیل هزینه کم فرآیند، راه‌اندازی ساده، نرخ زدایش بالاتر، صافی سطح بهتر و آلودگی کمتر محیط بر فرآیند لایه برداری سطحی خشک ارجحیت دارد [۲].

محلول‌های HNA^{۱۱}، KOH^{۱۲}، HDP^{۱۳} و TMAH^{۱۵} از متداول‌ترین زدایشگرهای^{۱۶} مرطوب سیلیکون می‌باشند. محلول HNA برای

میکروماشین‌کاری حجمی سیلیکون^۱ یکی از فرآیندهای مهم و اساسی در ریزفن‌آوری MEMS^۲ به حساب می‌آید. فرآیند لایه برداری سطحی سیلیکون به دو روش حکاکی^۳ مرطوب (همسان‌گرد^۴ و ناهمسان‌گرد^۵) و حکاکی خشک (حکاکی یون-فعال^۶ و حکاکی یونی واکنشی عمیق^۷) انجام می‌شود.

از فرآیند حکاکی مرطوب ناهمسان‌گرد سیلیکون به طور گسترده برای شکل‌دادن به ساختارهای کاملاً پیچیده سه‌بعدی از جمله تیرهای یک سرآزاد^۸، غشاهای^۹ سیلیکونی، میکروآئینه‌ها و نازل‌ها^{۱۰} بر روی بستر

TMAH را برای زدایش ناهمسانگرد سیلیکون (۱۰۰) نوع p با ضخامت $460\mu\text{m}$ و مقاومت ویژه $1-20\Omega\cdot\text{cm}$ با تغییر غلظت TMAH از ۵٪ تا ۲۵٪ در پنج گام و دمای زدایش از 70°C تا 90°C در سه گام به طور کامل به دست آمد. لازم به ذکر است که هر گام سه بار تکرار شده است تا از صحت نتایج و قابلیت تکرار آن‌ها اطمینان حاصل شود. در ضمن ناهمواری‌های سطح، نسبت نرخ زدایش صفحه $<100>$ به $<111>$ و میزان زیر بریدگی^{۱۱} نیز بررسی شده است.

۲- مواد و روش انجام آزمایش

۲-۱- شیوه زدایش سیلیکون در محلول TMAH

جهت بلوری سیلیکون یکی از عوامل تأثیرگذار در نرخ زدایش است. چیدمان و تراکم اتم‌ها در جهت‌های مختلف متفاوت می‌باشد، لذا انتظار می‌رود که نرخ زدایش در جهت‌های بلوری مختلف متفاوت باشد.

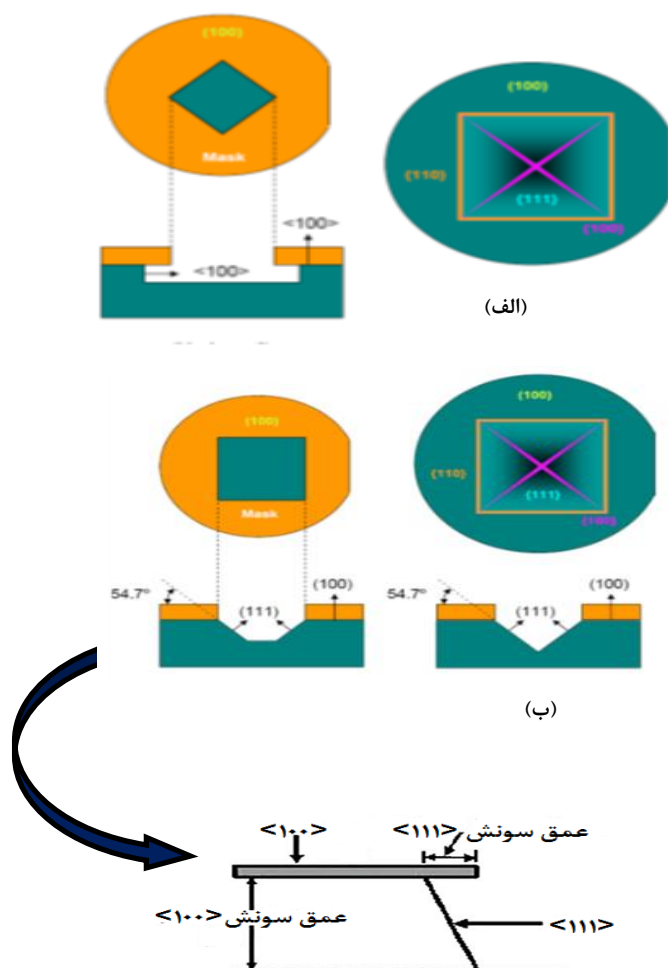
ویفر سیلیکونی (۱۰۰) یکی از پرکاربردترین ویفرها در میکروماشین-کاری است که سرعت نرخ زدایش این نوع ویفر نسبت به دیگر ویفرها (۱۱۰) و (۱۱۱) بیشتر است. در این نوع از ویفرها، نحوه زدایش سیلیکون به جهت لیتوگرافی بستگی دارد. اگر ماسک گذاری به گونه‌ای باشد که امتداد لبه ماسک موازی با جهت $\{100\}$ باشد، لایه برداری سطحی سیلیکون همسان‌گرد و مقدار زیربریدگی تقریباً به اندازه عمق زدایش خواهد بود (شکل ۱-الف). اما اگر ماسک گذاری به گونه‌ای باشد که امتداد لبه ماسک موازی با جهت $\{110\}$ باشد، زدایش سیلیکون ناهمسانگرد و دیواره‌های آن مایل و با زاویه $54.74 = \delta = \arctan\sqrt{2}$ در طی فرآیند حکاکی شکل می‌گیرند. در این حالت علاوه بر زدایش در جهت $<100>$ ، زدایش در جهت $<111>$ نیز وجود دارد که باعث ایجاد زیربریدگی در نمونه‌ها می‌شود. ولی نرخ زدایش در جهت $<111>$ کمتر از زدایش در جهت $<100>$ است. با افزایش نرخ زدایش در جهت $<111>$ زیربریدگی افزایش می‌یابد که مطلوب نیست. نرخ زیر بریدگی در راستای لبه‌های این ماسک در حدود ۱۰٪ عمق زدایش است (شکل ۱-ب). بنابراین این حالت برای حکاکی سیلیکون مطلوب است.

حکاکی مرطوب و همسانگرد به کار می‌رود. این ماده ترکیبی از فلورید هیدروژن (HF)، اسیدنیتریک (HNO_3) و اسید استیک (CH_3COOH) می‌باشد. معمولاً با این ماده به سختی می‌توان میزان عمق زدایش و یکنواختی سطح را کنترل کرد [۳]. محلول KOH مقرون به صرفه و غیرسمی می‌باشد و ناهمواری^{۱۷} سطح زدوده شده با آن ناچیز است [۴-۵]. اما برای زدایش سیلیکون در KOH علاوه بر ماسک اکسید سیلیکون احتیاج به یک لایه نترات سیلیکون نیز می‌باشد زیرا نرخ زدایش اکسید سیلیکون در KOH بالاست. لایه‌نشانی نترات سیلیکون به روش بخار شیمیایی کم فشار (LPCVD)^{۱۸} انجام می‌شود که گران قیمت است. هم‌چنین فرآیند لایه برداری سطحی سیلیکون در KOH طولانی است.

محلول EDP نسبتاً با CMOS سازگار است و برای زدایش سیلیکون در این محلول، ماسک اکسید سیلیکون به تنهایی کفایت می‌کند. اما به شدت خطرناک و بخار آن سرطان‌زا است. از این رو باید آن را در چگالنده‌های^{۱۹} کاملاً بسته قرار داد، بنابراین کار با آن بسیار مشکل است [۶].

نرخ زدایش سیلیکون در محلول TMAH بالا است و استفاده از یک ماسک اکسیدسیلیکون به تنهایی برای زدایش سیلیکون کفایت می‌کند. هم‌چنین TMAH قابلیت گریندگی^{۲۰} خوبی دارد و سمی بودن آن نیز اندک می‌باشد. از این رو حکاکی مرطوب سیلیکون توسط TMAH به سایر زدایشگرهای ترجیح داده می‌شود [۷-۱۱].

اگرچه تاکنون نرخ زدایش سیلیکون در محلول TMAH در تعدادی از مقالات گزارش شده است ولی در نتایج ارائه شده تناقضاتی وجود دارد [۷، ۱۲-۱۴]. این مسئله شاید به این دلیل است که هر کدام از آن‌ها ابزار آزمایشگاهی خاصی برای فرآیند حکاکی مرطوب سیلیکون راه‌اندازی کرده‌اند که نتایج به دست آمده از فرآیند حکاکی با استفاده از آن ابزار خاص امکان‌پذیر است و در جای دیگر نتایج به دست آمده تکرارپذیر نمی‌باشد. از این رو در این مقاله ابتدا یک ابزار آزمایشگاهی ساده برای بررسی لایه برداری سطحی ناهمسان‌گرد سیلیکون طراحی شده است. ابزار طراحی شده قابلیت ثابت نگه داشتن دما و غلظت TMAH در طی فرآیند زدایش سیلیکون را دارا می‌باشد و راه‌اندازی آن بسیار آسان است. از آنجائیکه لازم است برای بهبود کیفیت دستگاه‌های ساخته شده به روش میکروماشین‌کاری حجمی سیلیکون پایگاه داده جامعی در زمینه نرخ زدایش سیلیکون در محلول TMAH با شرایط مختلف جمع‌آوری شود، مشخصه رفتاری



شکل (۱): ماسک گذاری روی ویفر (۱۰۰): (الف) در راستای {۱۰۰}، (ب) در راستای {۱۱۰}

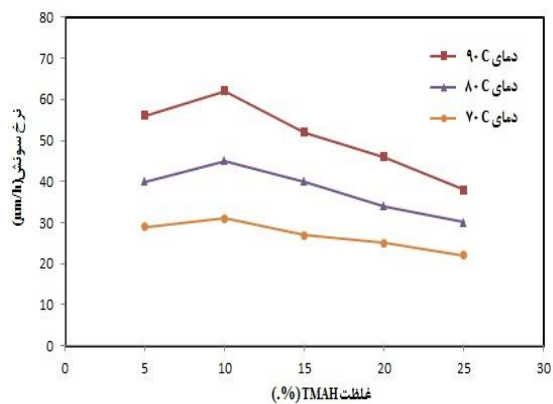
فلورید آمونیوم ۴۰٪ با ۱ واحد HF ۳۸٪) به مدت ۱۰ دقیقه زدوده و یک پنجره در لایه اکسید سیلیکون ایجاد شد. این اکسید سیلیکون نقش ماسک را در حین فرآیند حکاکی سیلیکون در TMAH دارد. بعد از زدایش اکسید، نمونه‌ها را با آب مقطر شسته شده و بلافاصله بدون خشک کردن، به مدت ۴ ساعت در داخل محلول‌های TMAH قرار داده شدند تا حکاکی سیلیکون داخل پنجره‌ها انجام شود. محلول‌های TMAH با غلظت‌های ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ با رقیق کردن TMAH با غلظت ۲۵٪ آماده شدند. سپس TMAH با غلظت‌های گوناگون در ظروف مخصوص خود با درپوش مارپیچ، در ابزار آزمایشگاهی طراحی شده، قرار داده شدند شکل (۲). این فرآیند برای دماهای مختلف از ۷۰°C تا ۹۰°C تکرار گردید. در ضمن برای اطمینان از صحت نتایج و قابلیت تکرار آن‌ها، هر آزمایش سه بار تکرار گردید.

۲-۱- روش انجام آزمایش

برای حکاکی مرطوب ناهمسانگرد سیلیکون از ویفرهای سیلیکون (۱۰۰) نوع p با ضخامت ۴۶۰ μm و مقاومت ویژه ۱-۲۰ Ω.cm استفاده گردید.

ابتدا ویفر به ابعاد ۱/۲cm×۱/۲cm در جهت {۱۰۰} برش داده شد، سپس این ویفرها به روش استاندارد RCA تمیز گردیدند. در ادامه اکسید سیلیکون در دو طرف نمونه‌ها به ضخامت ۵۰۰nm به روش حرارتی رشد داده شد.

بعد از آن اکسید پشت نمونه‌ها با فتورزیست مثبت Shipley1813 الگودهی شد تا یک پنجره به ابعاد ۲/۲×۲/۲mm² ایجاد شود. باید توجه داشت که در هنگام لیتوگرافی نمونه‌ها، امتداد لبه ماسک موازی با جهت {۱۱۰} باشد تا در حین حکاکی سیلیکون میزان زیر بریدگی ناچیز شود. سپس اکسید پشت نمونه‌ها در BHF^{۱۱} (۶ واحد محلول



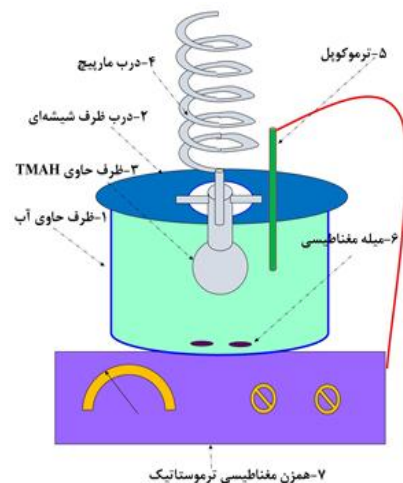
شکل (۳): تاثیر غلظت و دما در نرخ زدایش سیلیکون (۱۰۰)

شکل ۴ تصاویر سیلیکون‌های حکاکی شده در پنجره الگودهی شده را نشان می‌دهد تا شکل هندسی، نحوه زدایش و میزان زیربریدگی سیلیکون در TMAH نشان داده شوند. در ستون اول این شکل از سمت راست، تصاویر دوبعدی را نشان می‌دهد که مربوط به حکاکی سیلیکون در پنجره‌های الگودهی شده است. در ستون دوم، تصاویر سه بعدی همین پنجره‌ها نشان داده شده و در ستون سوم، تصاویر ۳ بعدی از گوشه‌های پنجره با بزرگنمایی بزرگتر از ستون دوم نشان داده شده‌اند تا اندازه زیربریدگی، عمق زدایش و نحوه حکاکی سیلیکون نشان داده شوند. خرابی‌های زیربریدگی در هنگام خشک کردن نمونه‌ها بر اثر باد گرفتن ایجاد شده است. در ضمن غبارهای موجود در شکل ۴ (د-۳) مربوط به آلودگی‌های ایجاد شده در اثر حمل و نقل نمونه‌ها جهت قرارگیری آنها در میکروسکوپ الکترونی است. در شکل ۵ تصاویر ۲ بعدی SEM از ناهمواری ایجاد شده در سیلیکون زدایش شده در کف پنجره‌ها با دقت‌های ۱ μm در ستون اول از سمت راست و ۱۰ μm در ستون دوم نشان داده شده‌اند.

در شکل ۶ نیز تصاویر ۳ بعدی SEM از ناهمواری‌های کف پنجره-های همین ویفرها به صورت ۳ بعدی با دقت‌های تصویربرداری ۱۵۰ μm در ستون اول، ۵۰ μm در ستون دوم و ۱۰ μm در ستون سوم از سمت چپ نشان داده شده‌اند تا شکل هندسی واقعی ناهمواری نشان داده شوند.

در این مقاله نسبت زدایش صفحه <۱۰۰> به صفحه <۱۱۱> نیز مورد بررسی قرار گرفت. در ستون سوم از سمت چپ در شکل ۴، تصاویر SEM از برش‌های زیرین برای غلظت‌های مختلف TMAH نشان داده شده‌اند. با استفاده از این تصاویر SEM که در این شکل نشان داده شده، نسبت زدایش صفحه <۱۰۰> به صفحه <۱۱۱> اندازه-

عمق حکاکی سیلیکون به کمک میکروسکوپ نوری اندازه‌گیری شد. همچنین میزان ناهمواری سطح، نسبت حکاکی صفحه <۱۰۰> به <۱۱۱> و میزان زیر بریدگی با استفاده از تصاویر SEM تعیین شد.



شکل (۲): ابزار آزمایشگاهی طراحی شده برای زدایش

۳- نتایج و بحث

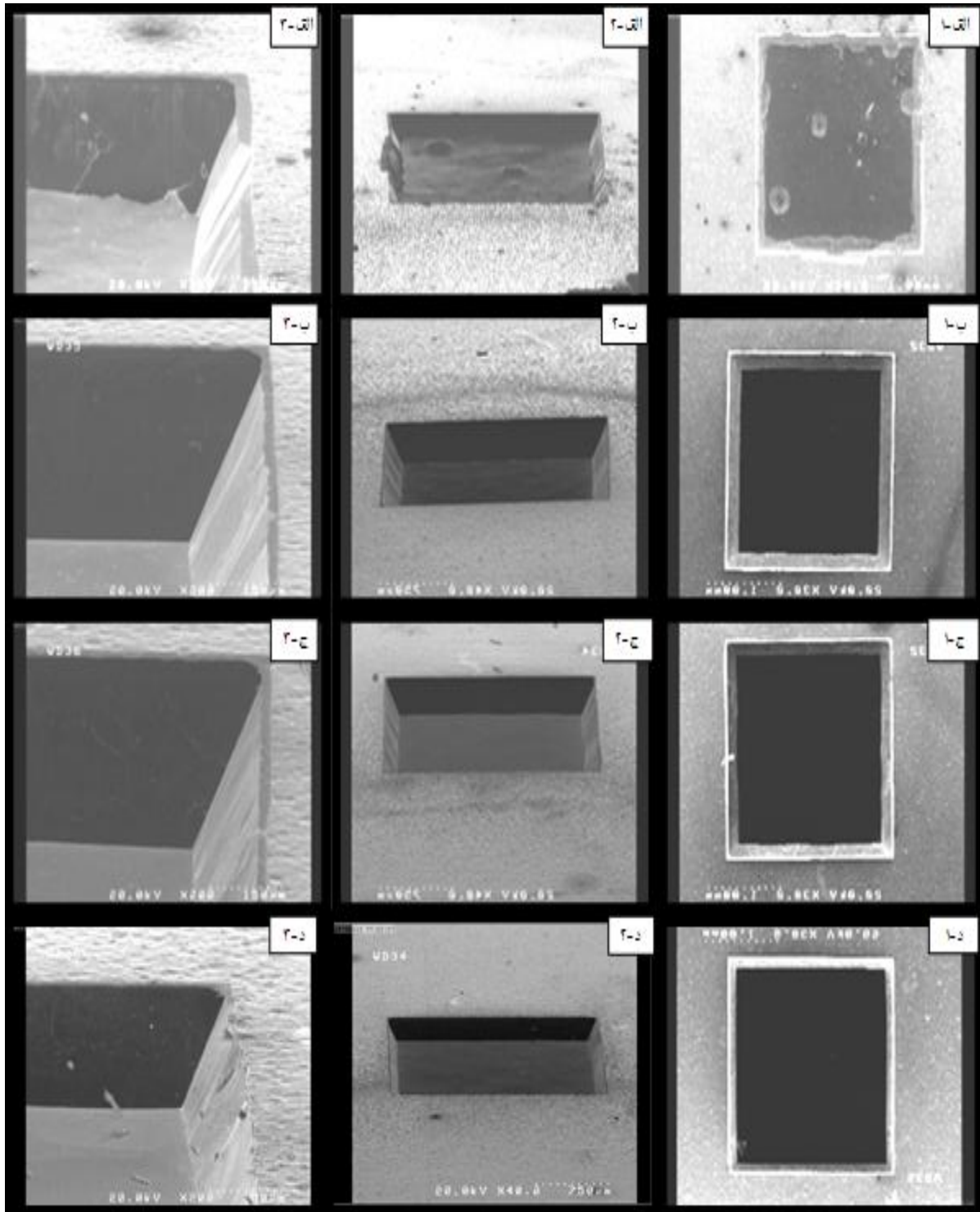
۳-۱- نتایج حاصل از آزمایش

در این مقاله تاثیر تغییرات دو پارامتر غلظت محلول TMAH و دمای فرآیند در نرخ زدایش سیلیکون مورد بررسی قرار گرفتند. برای بررسی تاثیر این پارامترها در نرخ زدایش سیلیکون، فرآیند حکاکی در محلول TMAH با غلظت‌های ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۵٪ و در دماهای ۷۰°C، ۸۰°C و ۹۰°C اجرا شد. از آن جا که آقای جن و همکارانش در [۱۲] گزارش داده بودند که ناهمواری سطح سیلیکون (۱۰۰) در TMAH بعد از ۲۰ دقیقه به مقدار اشباع می‌رسد و گروه آقای یان نیز در [۱۵] این زمان را یک ساعت اعلام کرده بودند، فرآیند زدایش در مدت زمان ۴ ساعت انجام گردید تا علاوه بر میزان ناهمواری سطح سیلیکون، میزان زیربریدگی را نیز بررسی گردد.

شکل ۳ تغییرات نرخ زدایش برای غلظت‌های مختلف TMAH در دمای‌های مختلف را نشان می‌دهد. از آنجائیکه که حداکثر مقدار نرخ زدایش سیلیکون در دمای ۹۰°C است، در اشکال ۴ تا ۶ تصاویر SEM سیلیکون‌های حکاکی شده با غلظت‌های مختلف بعد از ۴ ساعت در این دما می‌باشند. در این اشکال، تصاویر واقع در هر سطر به ترتیب از بالا به سمت پایین مربوط به سیلیکون حکاکی شده در محلول TMAH با غلظت‌های مختلف ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۵٪ می‌باشند.

مقدار نرخ زدایش صفحه 100 نسبت به صفحه 111 تغییر می- کند که در ادامه نتایج حاصل از آنها بیان خواهد شد.

گیری گردید. تصاویر رویشی نشان می-دهند که با تغییر غلظت TMAH و تغییر دمای زدایش، نرخ زدایش سیلیکون، شکل هندسی پنجره سیلیکون حکاکی شده، ناهمواری سطح سیلیکون زدایش شده و



شکل (۴): تصاویر دوبعدی و سه بعدی SEM از سیلیکون-های زدایش شده در TMAH با غلظت-های مختلف بعد از ۴ ساعت در دمای ۹۰C (الف): غلظت ۵٪، (ب): غلظت ۱۰٪، (ج): غلظت ۱۵٪، (د): غلظت ۲۵٪

۳-۲- تغییر نرخ زدایش با تغییر غلظت TMAH و دمای زدایش

شکل ۳ نشان می‌دهد که مقدار نرخ زدایش به میزان غلظت محلول TMAH و دمای زدایش وابسته است. نتایجی که از این شکل حاصل می‌شوند عبارتند از:

۱- بیشترین نرخ زدایش سیلیکون نوع p در TMAH با غلظت ۱۰٪ در دمای ۹۰°C برابر با ۶۲ μm/h می‌باشد و کمترین مقدار زدایش، در TMAH با غلظت ۲۵٪ در دمای ۷۰°C برابر با ۲۲ μm/h می‌باشد.

۲- میزان نرخ زدایش سیلیکون تابع دما است و مقدار آن با افت دما کاهش می‌یابد به طوریکه به ازای ۱۰°C افت دما از ۹۰°C به ۸۰°C، مقدار نرخ زدایش در TMAH با غلظت ۱۰٪ از ۶۲ μm/h به ۴۵ μm/h که معادل با ۷۲/۵٪ کاهش در نرخ زدایش است و با افت دما از ۸۰°C به ۷۰°C، مقدار نرخ زدایش به ۳۱ μm/h کاهش می‌یابد که معادل با ۵۰٪ کاهش در نرخ زدایش می‌باشد.

۳- این شکل نشان می‌دهد که برای TMAH با غلظت‌های بالاتر از ۱۰٪، نرخ زدایش با افزایش غلظت TMAH کاهش می‌یابد به طوریکه می‌توان رفتار کاهش نرخ زدایش سیلیکون به صورت خطی تخمین زد و آن را با یک رابطه خطی مدل کرد. بنابراین می‌توان رفتار زدایش سیلیکون در TMAH را با روابط زیر پیش‌بینی نمود:

(۱) دمای ۹۰°C

$$R_{90^{\circ}\text{C}} = 1/6 - C + 78 \quad (\mu\text{m/h})$$

(۲) دمای ۸۰°C

$$R_{80^{\circ}\text{C}} = -C + 55 \quad (\mu\text{m/h})$$

(۳) دمای ۷۰°C

$$R_{70^{\circ}\text{C}} = -0/6C + 37 \quad (\mu\text{m/h})$$

در این روابط R نرخ زدایش سیلیکون و C غلظت TMAH از ۱۰٪ تا ۲۵٪ می‌باشند.

۴- طبق این روابط، با افزایش غلظت TMAH از ۱۰٪ تا ۲۵٪، مقدار افت نرخ زدایش سیلیکون در دما ۹۰°C برابر با ۲۴ μm/h، در دمای ۸۰°C برابر با ۱۵ μm/h و در دمای ۷۰°C برابر با ۹ μm/h می‌باشد که به ترتیب معادل با ۳۸٪، ۳۴٪ و ۳۰٪ افت در مقدار نرخ زدایش سیلیکون می‌باشند.

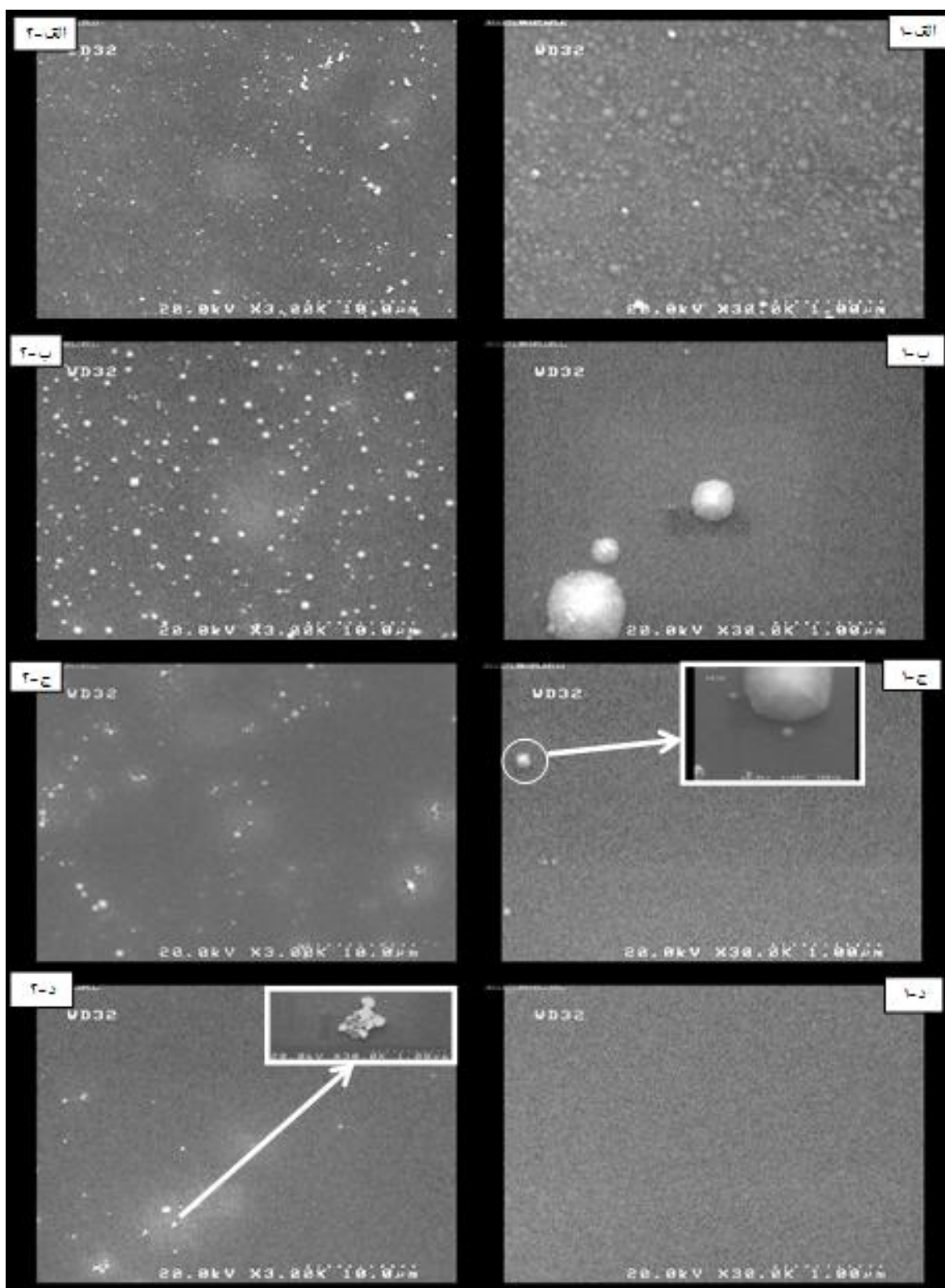
۵- ملاحظه می‌شود که میزان تغییرات نرخ زدایش با کاهش دما کم می‌شود. به عبارت دیگر، تغییرات نرخ زدایش برای تمامی غلظت‌های TMAH در دماهای پایین از حساسیت کمتری نسبت به دماهای بالاتر برخوردار است.

۶- در غلظت‌های کمتر از ۱۰٪ تغییرات نرخ زدایش با افزایش غلظت افزایش می‌یابد. اما باید توجه داشت که محلول TMAH در غلظت‌های کمتر از ۵٪ به آلودگی‌های ارگانیکی به شدت حساس است [۱۷] و هم‌چنین این محلول با حل شدن سیلیکون در آن به سرعت اشباع می‌شود، از این رو بررسی فرآیند زدایش در غلظت‌های پایین بسیار سخت و کنترل آن دشوار می‌باشد.

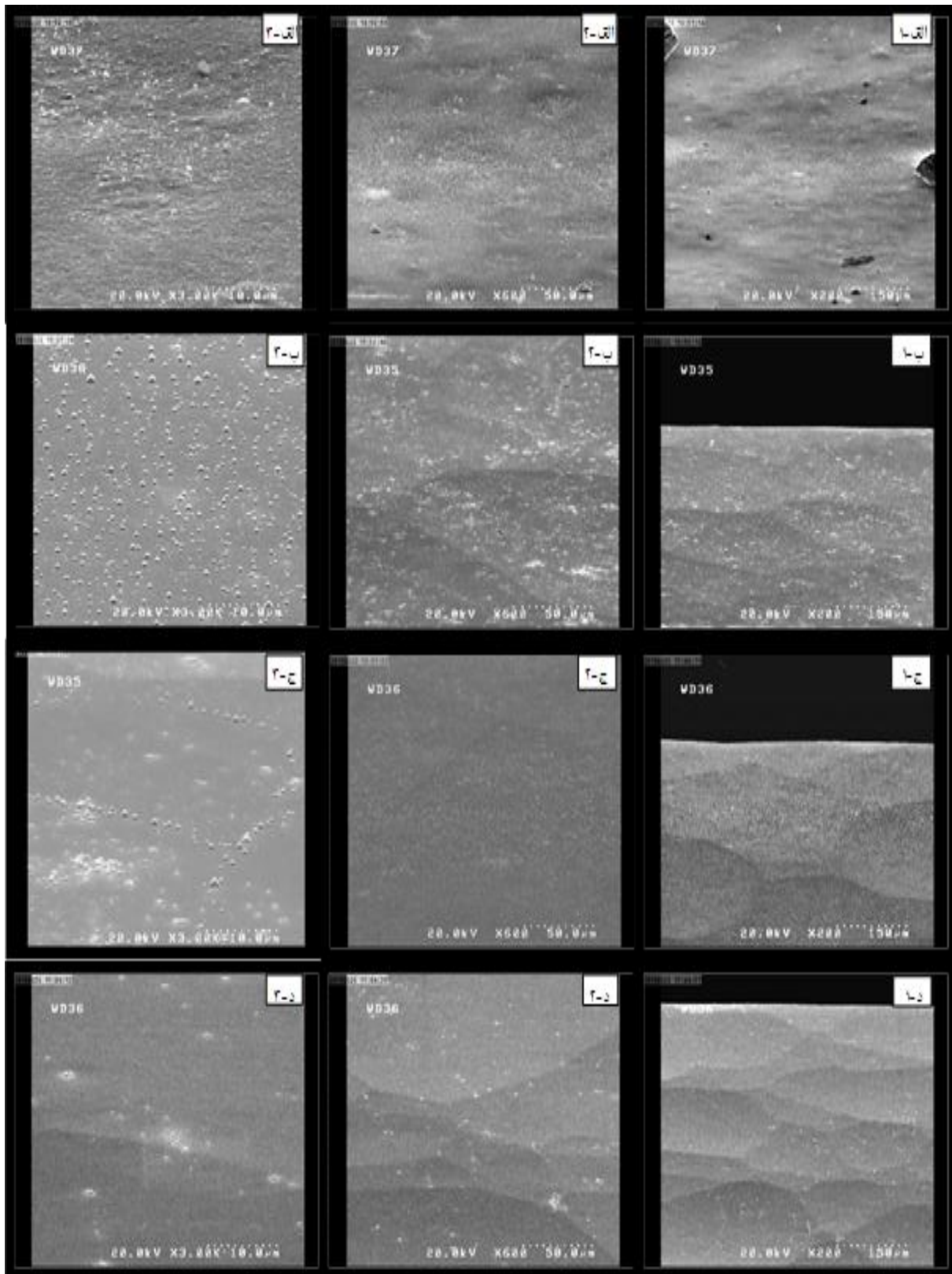
۷- نرخ زدایش اکسید سیلیکون در دماهای بیشتر از ۹۰°C به شدت افزایش می‌یابد [۱۲]. هم‌چنین حباب‌های ناشی از زدایش سیلیکون به علت فعل و انفعالات شیمیایی در داخل محلول TMAH نیز به شدت افزایش می‌یابد که می‌تواند به ساختارهای معلق ایجاد شده در ریز فناوری MEMS صدمه وارد می‌کند.

بنابراین زدایش سیلیکون در محلول TMAH در دماهای بالاتر از ۹۰°C برای میکروماشین‌کاری حجمی جهت معلق‌سازی ساختارهای ریز مطلوب نمی‌باشد.

۸- مرجع [۱۲] بیشترین نرخ زدایش برای TMAH با غلظت ۸٪ و در مراجع [۱۳ و ۱۴] این نرخ زدایش برای TMAH با غلظت کمتر از ۵٪ بیان شده است. ولی در تحقیق حاضر بیشترین نرخ زدایش سیلیکون برای TMAH با غلظت ۱۰٪ اتفاق افتاد. همان‌طور که بخش‌های قبلی ذکر شد، این مسئله شاید به این دلیل است که هر کدام ابزار آزمایشگاهی خاصی برای فرآیند لایه برداری مرطوب سیلیکون راه‌اندازی کرده‌اند که نتایج به دست آمده از فرآیند حکاکی با استفاده از آن ابزار خاص امکان‌پذیر است و در جای دیگر نتایج به دست آمده تکرارپذیر نمی‌باشد. در جدول ۱ نتایج ارائه شده از بیشترین مقدار نرخ زدایش در مقالات آورده شده است.



شکل (۵): تصاویر دوبعدی SEM با دقت $1\ \mu\text{m}$ و $10\ \mu\text{m}$ از سطح سیلیکونهای زدایش شده در کف پنجره در TMAH با غلظت‌های مختلف بعد از ۴ ساعت در دمای $90\text{ }^\circ\text{C}$: (الف): غلظت ۵٪، (ب): غلظت ۱۰٪، (ج): غلظت ۱۵٪، (د): غلظت ۲۵٪.



شکل (۶): تصاویر ۳ بعدی SEM با دقتهای تصویربرداری $150\ \mu\text{m}$ ، $50\ \mu\text{m}$ و $10\ \mu\text{m}$ از ناهمواری سطح سیلیکون‌های زدایش شده در TMAH با غلظت‌های مختلف بعد از ۴ ساعت در دمای 90°C : (الف): غلظت ۵٪، (ب): غلظت ۱۰٪، (ج): غلظت ۱۵٪، (د): غلظت ۲۵٪.

۳-۳- بررسی شکل هندسی پنجره سیلیکون حکاکی شده

تصاویر شکل ۴ نشان می‌دهند که حفظ شکل هندسی پنجره سیلیکون حکاکی شده در TMAH به میزان غلظت محلول وابسته است. نتایجی که از این شکل حاصل می‌شود عبارتند از:

۱- از تصاویر ۴(الف) (TMAH با غلظت ۵٪) مشاهده می‌شود که شکل هندسی پنجره ایجاد شده بعد از ۴ ساعت صدمه خورده و حالت خود را از دست می‌دهد. بنابراین با ادامه حکاکی، شکل هندسی پنجره از بین خواهد رفت.

جدول (۱): بیشترین نرخ زدایش سیلیکون در TMAH در مقالات و مقایسه

آن با نتایج این مقاله

مرجع	بیشترین نرخ زدایش ($\mu\text{m/h}$)	بستر سیلیکون ($\Omega.\text{cm}$)	دما	غلظت (%) (بیشترین نرخ زدایش)
[۱۴]	۶۰	۱۰-۴۰	۹۰	۵-۲
[۱۳]	۷۰	۵-۱۰	۹۰	۴
[۲]	۶۰/۲	۱۰-۴۰	۸۰	۳
[۱۲]	۷۱	۱-۱۰	۹۰	۸
کار ارائه شده	۶۲	۱-۱۰	۹۰	۱۰

همچنین این تصاویر نشان می‌دهند که سطح سیلیکون زدوده شده ناهموار است و در داخل آن حفره ایجاد شده است. بنابراین کاملاً مشخص است که روند حکاکی با پدیدار شدن حفره در کف پنجره قابل کنترل نیست. در ضمن با مشاهده این تصویر مشخص می‌شود که اکسید ماسک نیز صدمه خورده است که نتیجه آن زدایش سیلیکون زیر ماسک است. بنابراین کنترل پذیری و حفظ سطح زیرین ماسک با ادامه زدایش بر اثر گذشت زمان در محلول TMAH با غلظت ۵٪ بسیار مشکل و سخت است.

۲- با بررسی تصاویر واقع در ستون اول از راست در شکل ۴ ملاحظه می‌شود که هرچه محلول TMAH غلیظ‌تر شود، شکل هندسی پنجره بهتر حفظ شده و روند حکاکی نیز در غلظت‌های بالاتر قابل کنترل‌تر است. تصاویر واقع در ستون دوم شکل ۴ نیز نشان دهنده این موضوع است که شکل هندسی پنجره‌ها در غلظت‌های بالاتر بهتر است بطوریکه شکل این پنجره در محلول TMAH با غلظت ۲۵٪ خیلی بهتر از بقیه، حالت خود را حفظ کرده است.

۳- تصاویر ستون سوم از سمت راست، نحوه زدایش سیلیکون در لبه‌های پنجره را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که شکل شیب زدایش در TMAH با غلظت ۲۵٪ نسبت به بقیه بهتر است.

۳-۴- بررسی ناهمواری در سطح سیلیکون حکاکی شده

تصاویر روبشی دو بعدی شکل ۵ و تصاویر روبشی سه بعدی شکل ۶ نشان می‌دهند که ناهمواری سطح سیلیکون زدایش شده به میزان غلظت محلول TMAH بستگی دارد. نتایج حاصل از این تصاویر عبارتند از:

۱- لکه‌های سفید رنگ مشاهده شده در ستون اول از سمت چپ، در تصاویر دوبعدی روبشی شکل ۵ نشان می‌دهند که سطح سیلیکون زدایش شده، ناهموار است. هم‌چنین با مقایسه تصاویر روبشی سه بعدی در شکل ۶ مشاهده می‌شود که شکل هندسی این لکه‌ها به صورت برآمدگی‌های هرمی شکل است. در ضمن تعداد، اندازه، شکل هندسی و پراکندگی این برآمدگی‌های، کاملاً به صورت تصادفی در سطح سیلیکون حکاکی شده ظاهر شده‌اند.

۲- تصویر شکل (۵-الف-۱) نشان می‌دهد که سطح سیلیکون حکاکی شده در محلول TMAH با غلظت ۵٪ کاملاً ناهموار است و بررسی ناهمواری‌های سطح آن از نظر کیفی (تعداد و اندازه ناهمواری) ممکن نیست. ولی در مقایسه ناهمواری‌های سطح سیلیکون زدایش شده در TMAH با غلظت‌های ۱۰٪ تا ۲۵٪، همان‌طور که در سطر دوم تصاویر اشکال ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، بیشترین تعداد برآمدگی مربوط به TMAH با غلظت ۱۰٪ است و کمترین تعداد برآمدگی مربوط به TMAH با غلظت ۲۵٪ می‌باشد. هم‌چنین با مقایسه تصاویر ملاحظه می‌شود اندازه برآمدگی‌ها با افزایش غلظت کاهش می‌یابد بطوریکه اندازه آنها در TMAH با غلظت ۲۵٪ قابل رویت نیست.

۳- برآمدگی‌های بوجود آمده در سطح سیلیکون زدایش شده در محلول TMAH با غلظت ۱۵٪ در سطر سوم تصاویر روبشی اشکال ۵ و ۶ نشان داده شده است. پراکندگی لکه‌ها در این سطح نسبتاً کم است. شکل (۵-ج-۱) تصویر یکی از برآمدگی‌ها را با بزرگنمایی $1\mu\text{m}$ نشان می‌دهد. اندازه برآمدگی نشان داده شده با مقیاس بزرگ‌تر در این تصویر در حدود 300nm مشاهده می‌شود.

۴- تصاویر روبشی واقع در سطر چهارم اشکال ۵ و ۶، حکاکی سیلیکون در داخل TMAH با غلظت ۲۵٪ را نشان می‌دهد که برآمدگی‌های ناشی از ناهمواری در آن مشاهده نمی‌شود. لکه‌های

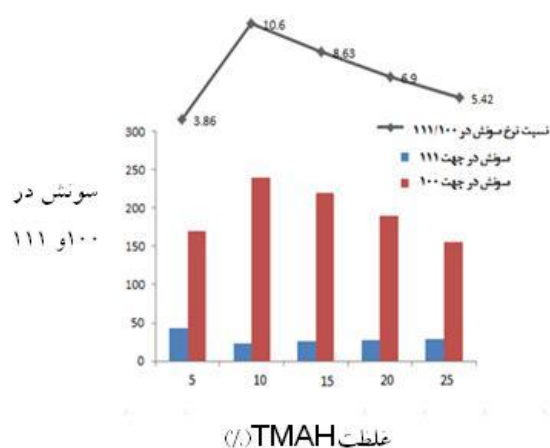
نشان داده شده است. نتایجی که از روی شکل ۴ می‌توان در مورد زیربریدگی‌ها دریافت عبارتند از:

۱- بیشترین مقدار زدایش سیلیکون در جهت <۱۰۰> برای TMAH با غلظت ۱۰٪ و به اندازه $248\mu\text{m}$ می‌باشد. هم‌چنین کمترین مقدار زدایش در این جهت برای TMAH با غلظت ۲۵٪ و به اندازه $153\mu\text{m}$ رخ داده است.

۲- بیشترین مقدار زدایش سیلیکون در جهت <۱۱۱> برای TMAH با غلظت ۵٪ و به اندازه $43\mu\text{m}$ می‌باشد. هم‌چنین کمترین مقدار زدایش در این جهت برای TMAH با غلظت ۱۰٪ و به اندازه $23/4\mu\text{m}$ است.

۳- بیشترین مقدار نسبت زدایش صفحه <۱۰۰> به <۱۱۱> در TMAH با غلظت ۱۰٪ و به اندازه ۱۰/۶ می‌باشد که نشان می‌دهد در TMAH با غلظت ۱۰٪ کمترین زیر بریدگی به وجود خواهد آمد. هم‌چنین کمترین مقدار این نسبت مربوط به TMAH با غلظت ۵٪ و به اندازه ۳/۸۶ می‌باشد.

۴- همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، نسبت زدایش صفحه <۱۰۰> به <۱۱۱> برای غلظت‌های بالاتر از ۱۰٪ به صورت خطی کاهش می‌یابد.



شکل (۷): نسبت نرخ زدایش صفحه <۱۰۰> به <۱۱۱> در TMAH با غلظت‌های متفاوت در دمای 90°C

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه، تاثیر تغییر غلظت TMAH و دما در نرخ زدایش سیلیکون (۱۰۰) مورد بررسی قرار گرفت. بیشترین نرخ زدایش در TMAH با غلظت ۱۰٪ و دمای 90°C به دست آمد. برای غلظت‌های

سفید رنگ مشاهده شده در این تصویر، ناشی از برآمدگی نمی‌باشد بلکه مربوط به ذرات معلق است که در حین جابجائی بر روی سطح سیلیکون قرار گرفته است. یکی از این ذرات معلق با مقیاس بزرگ‌تر در داخل یک کادر سفید رنگ در تصویر شکل (۵-د-۲) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که لکه سفید رنگ، برآمدگی ناشی از فرآیند حکاکی نمی‌باشد بلکه ناشی از آلودگی است. در تصاویر روبشی با مقیاس $1\mu\text{m}$ نیز برآمدگی مشاهده نمی‌شود.

۵- با بررسی تصاویر روبشی اشکال ۵ و ۶ از بالا به سمت پایین، مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت TMAH، میزان ناهمواری‌های سطح کاهش می‌یابد. بطوریکه در TMAH با غلظت ۲۵٪، سطح سیلیکون حکاکی شده صاف و بدون ناهمواری است، در حالیکه میزان ناهمواری در TMAH با غلظت ۵٪ نسبت به بقیه غلظت‌ها بیشترین مقدار را دارا است.

۶- با بررسی تصاویر روبشی شکل ۶ مشاهده می‌شود که ارتفاع برآمدگی‌های که شبیه به تپه‌ها کوچک است و با افزایش غلظت TMAH اندازه آنها کاهش می‌یابد.

۷- در مرجع [۱۲] اشاره شده است که در غلظت‌های مساوی یا بیشتر از ۲۰٪، سطح سیلیکون صاف خواهد شد که مشابه با نتایج تحقیق حاضر می‌باشد. ولی در مرجع [۷] گزارش کرده‌اند که برای TMAH با غلظت‌های مساوی یا بیشتر از ۲۲٪ هیچ‌گونه ناهمواری بر روی سطح سیلیکون حکاکی شده وجود ندارد. به هر حال، نتایج به دست آمده شبیه می‌باشند و می‌توان گفت که ناهمواری‌ها برای TMAH با غلظت‌های مساوی یا بیشتر از ۲۰-۲۲٪ در سطح سیلیکون مشاهده نمی‌شود.

۳-۵- نسبت نرخ زدایش صفحه <۱۰۰> به <۱۱۱> در TMAH

اندازه زیربریدگی‌ها در ستون سوم از سمت راست در شکل ۴ نشان داده شده است که اندازه این زیربریدگی‌ها با تغییر غلظت محلول TMAH تغییر می‌کند. میزان زیربریدگی در غلظت‌های مختلف اندازه‌گیری شده است که شکل ۷ نتایج به دست آمده را نشان می‌دهد. در این شکل میزان زدایش سیلیکون در صفحه <۱۰۰> و صفحه <۱۱۱> و هم‌چنین نسبت زدایش صفحه <۱۰۰> به صفحه <۱۱۱> برای غلظت‌های مختلف TMAH پس از ۴ ساعت در دمای 90°C

- بیشتر از ۱۰٪، نرخ زدایش با افزایش غلظت TMAH، کاهش می‌یابد. در تمامی آزمایش‌ها، با افزایش دما، نرخ زدایش سیلیکون افزایش می‌یافت، ولی در دماهای بالاتر از ۹۰°C زدایش اکسید سیلیکون نیز به شدت افزایش می‌یابد که مطلوب نمی‌باشد. در ضمن ناهمواری سطح سیلیکون (۱۰۰) بعد از ۴ ساعت زدایش اندازه‌گیری شد. تصاویر SEM گرفته شده از سطح سیلیکون زدایش شده نشان می‌دهد که برای غلظت‌های بیشتر از ۲۰٪ هیچ گونه ناهمواری مشاهده نمی‌شود. در ضمن سیلیکون زدایش شده در TMAH با غلظت ۱۰٪ بیشترین نرخ زدایش صفحه <۱۰۰> به <۱۱۱> و کمترین زیربریدگی را دارد.
- [9] K. Lian, S. Smith, A. J. Walton, A. M. Gundlach & J. T. M. Stevenson, "Characterisation of aluminium passivation for TMAH based anisotropic etching for MEMS applications", in: Proceedings of the IEEE International Conference on Microelectronic Test Structures (ICTMS00), Monterey, CA, USA, , pp. 210–214, 2000.
- [10] P. M. Sarro, D. Brida, W. V. D. Vlist & S. Brida, "Effect of surfactant on surface quality of silicon microstructures etched in saturated TMAH solutions, Sensors and Actuators A, Vol. 85, pp. 340–345, 2000.
- [11] Merlos, M. Acero, J. Bausells & J. Esteve, "TMAH/IPA anisotropic etching characteristics", Sensors and Actuators A, Vol. 37-38, pp. 737-743, 1993.
- [12] P. H. Chen, H. Y. Peng, C. M. Hsieh & M. K. Chyu, "The characterize behavior of TMAH water solution for anisotropic etching on both Silicon substrate and SiO₂ layer", Sensors and Actuators A, Vol. 93, pp. 132-137, 2001.
- [13] J. T. L. Thong, W. K. Choi & C. W. Chong, "TMAH etching of silicon and the interaction of etching parameters, Sensors and Actuators A, Vol. 63, pp. 243-249, 1997.
- [14] K. Biswas, S. Das, D. K. Maurya, S. Kal & S. K. Lahiri, "Bulk micromachining of silicon in TMAH-based etchants for aluminum passivation and smooth surface", Microelectronics Journal, Vol. 37, pp. 321–327, 2006.
- [15] G. Yan, P. C. H. Chan, I. Hsing & R. K. Sharma, "An improved TMAH Si-etching solution without attacking exposed aluminum", Sensors and Actuators A, Vol. 89, pp. 135-141, 2001.
- [16] Y. K. Bhatnagar & A. Nathan, "On pyramidal protrusions in anisotropic etching of <100> silicon", Sensors and Actuators A, Vol. 36, pp. 233-240, 1993.
- [17] E. H. Klaassen, R. J. Reasy, C. Storumt & G. T. Kovacs, "Micromachined thermally isolated circuits", Sensors and Actuators A, Vol. 58, pp. 43–50, 1997.
- [1] H. Seidel, L. Csepregi, A. Heuberger & H. Baumgartel, "Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solutions", J. Electrochem. Soc, Vol. 137, No. 11, pp. 3612–3625, 1990.
- [2] K. Biswas & S. Kal, "Etch characteristics of KOH, TMAH and dual doped TMAH for bulk micromachining of silicon", Microelectronics Journal, Vol. 37, pp. 519–525, 2006.
- [3] G. T. Kovacs, N. I. Maluf & K. E. Petersen, "Bulk micromachining of silicon", Proceedings of the IEEE Integrated sensors, microactuators and microsystems (MEMS), Vol. 86, pp. 1536–1551, 1998.
- [4] Barycka, I. Zobel, "Silicon anisotropic etching in alkali solutions": Sensors and Actuators A, Vol. 70, pp. 250-259, 1998.
- [5] K. E. Petersen, "Silicon as a mechanical material", Proc. IEEE, Vol. 70, No. 5, 1982, pp. 420–457.
- [6] R. M. Finne & D. L. Klein, "A water-amine complexing agent system foretching in silicon", J. Electrochem. Soc, Vol. 114, No. 9, pp. 965–970, 1967.
- [7] O. Tabata, R. Asahi, H. Funabashi, K. Shimaoka & S. Sugiyama, "Anisotropic etching of silicon in TMAH solutions", Sensors and Actuators A, Vol. A34, No. 1, pp. 51-57, 1992.
- [8] 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.

۷- مراجع

۸- پی نوشت

- [1] Bulk Silicon Micromachining

-
- [2] Microelectromechanical Systems
 - [3] Etch
 - [4] Isotropic
 - [5] Anisotropic
 - [6] Reactive Ion Etching
 - [7] Deep Reactive Ion Etching
 - [8] Cantilever
 - [9] Diaphragm
 - [10] Nozzles
 - [11] High Aspect Ratio
 - [12] Hydrofluoric Acid, Nitric Acid, Acetic Acid
 - [13] Potassium Hydroxide
 - [14] Ethylenediamine-Pyrocatechol
 - [15] Tetramethyl Ammonium Hydroxide
 - [16] Etchant
 - [17] Roughness
 - [18] Low Pressure Chemical Vapor
 - [19] Condensers
 - [20] Selectivity
 - [21] Undercut
 - [22] Buffered Hydrofluoric Acid