

طراحی فرآیند ساخت ساده و کم هزینه جهت پیاده سازی آرایه های از تیرک های یک سر آزاد دو ماده ای بر اساس فناوری MEMS

حسن عبداللهی

استادیار دانشکده برق، دانشگاه هوایی شهید ستاری، H.abd@ssau.ac.ir

چکیده:

هدف این مقاله، معرفی یک طراحی فرآیند ساخت ساده به منظور پیاده سازی آرایه های از میکرو تیرک های یک سر آزاد دو ماده ای از جنس SiO_2/Al است که مبتنی بر پایه فناوری میکرو ماشین کاری حجمی می باشد. به کمک این فرآیند می توان تیرک های دو ماده ای را در آزمایشگاه های تحقیقاتی با امکانات محدود پیاده سازی نمود. از نتایج حاصل از این مقاله می توان برای ساخت حساسه ها بر پایه تیرک های یک سر آزاد از جنس SiO_2/Al استفاده نمود. بزرگ ترین مشکل فنی در ساخت این نوع از تیرک ها به روش میکرو ماشین کاری حجمی، حفاظت از Al در داخل زدایشگرهای سیلیکون از قبیل KOH ، EDP و $TMAH$ است که در این روش از زدایشگر سیلیکون $Dual\ doped\ TMAH$ استفاده شده است. این فرآیند با سه عملیات لیتوگرافی یک طرفه و یک عملیات لیتوگرافی دوطرفه توسط دو ماسک کرمی و یک ماسک پلاستیکی شفاف تحقق یافته است. همچنین با استفاده از معلق سازی تیرک ها به روش رهاسازی تر در دمای محیط از پیچیدگی رهاسازی تیرک ها از لایه قربانی اجتناب شده است. با این فرآیند، آرایه های از تیرک های یک سر آزاد دو ماده ای به طول های $50\ \mu m$ ، $100\ \mu m$ ، $150\ \mu m$ ، $200\ \mu m$ ، $250\ \mu m$ ، $300\ \mu m$ و $350\ \mu m$ و به عرض های $20\ \mu m$ و $40\ \mu m$ با ضخامت $1\ \mu m$ برای SiO_2 و $20\ nm$ برای Al ساخته شده اند.

کلیدواژه:

میکرو ماشین کاری حجمی، تیرک دو ماده ای، رهاسازی تر، MEMS

مقدمه:

داخل زدایشگرهای سیلیکون از قبیل KOH ، EDP و $TMAH$ بزرگ ترین مشکل فنی این نوع از تیرک ها است. هدف از ارائه این مقاله، معرفی روشی کم هزینه با قابلیت پیاده سازی آسان به منظور دستیابی به فناوری ساخت تیرک ها از جنس SiO_2/Al بر پایه میکرو ماشین کاری حجمی است. با روش ارائه شده در این فرآیند ساخت، ساخت تیرک به راحتی و به آسانی قابل پیاده سازی است و از آنجا که تمامی مواد و تجهیزات هر چند اندک آن، در آزمایشگاه های تحقیقاتی میکرو الکترونیک موجود است، لذا می توان از آن به عنوان روشی مؤثر در ساخت آشکارسازهای مادون قرمز [۱۴]، آشکارسازهای ترا هرتر [۱۵]، میکرو آینه ها [۱۶] و ... استفاده کرد. در این روش، تنها به دستگاه های ابتدائی لیتوگرافی، کوره اکسیداسیون و دستگاه لایه نشانی نیاز است و بقیه مراحل کار به طور شیمیایی انجام می شود.

در سال های اخیر، بیشتر ریز حسگرها با ریز فناوری میکرو ماشین کاری (MEMS) مبتنی بر تیرک ها طراحی و ساخته می شوند که برای ساخت آن ها به تجهیزات پیشرفته لایه نشانی و سونش نیاز است. این تجهیزات به دلیل گران قیمت بودن، در بیشتر آزمایشگاه های تحقیقاتی موجود نیست [۱] و [۲].

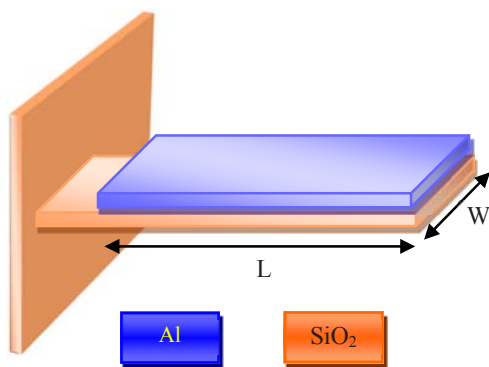
تیرک ها معمولاً از مواد مختلفی ساخته می شوند که می توان تیرک های دو ماده ای از جنس نیتريت سیلیکون/آلومینیوم ($SiNx/Al$) [۳] و [۴]، نیتريت سیلیکون/طلا ($SiNx/Au$) [۵-۷] و هیدروژن آمورف سیلیکون کارباید/طلا ($a-SiC:H/Au$) [۸] و [۹] را نام برد. در جدول ۱ مشخصات مواد مختلف نشان داده شده است.

حسگرهای که مبتنی بر تیرک ها از جنس آلومینیوم/دی اکسید سیلیکون (SiO_2/Al) است از حساسیت بیشتری نسبت به دیگر حسگرهای برخوردار هستند [۱۰-۱۲]؛ اما هنگامی که از روش میکرو ماشین کاری حجمی استفاده می شود، حفاظت از Al در

جدول ۱ خواص برخی از مواد [۱۳].

خصوصیات	واحد	Si	SiO ₂	Si ₃ N ₄	Al	Au	Ni
(E) مدول یانگ	GPa	۱۳۰	۷۰	۱۳۰	۷۰	۷۹	۲۰۰
نسبت پواسون	---	۰/۲۸	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۳۵	۰/۴۴	۰/۳۱
چگالی (ρ)	g/cm ³	۲/۳۲	۲/۳	۲/۶	۲/۷	۱۹/۳	۸/۹
(α) ضرایب انبساط گرمایی	um/(m·k) (25 ⁰ C)	۲/۶	۰/۴	۱/۶	۲۳/۱	۱۴/۲	۱۳/۴
(G) هدایت گرمایی در ۳۰۰k	W/(m·K)	۱۴۹	۱/۱	۲/۹	۲۳۷	۳۱۸	۹۰/۹
(c) گرمای ویژه	J/g·K	۰/۷	۱/۶۶	۰/۷	۰/۹	۰/۲۳	۰/۴۵
دمای ذوب	⁰ C	۱۴۱۵	۱۷۱۳	۱۹۰۰	۹۳۳	۱۳۳۷	۱۷۲۸

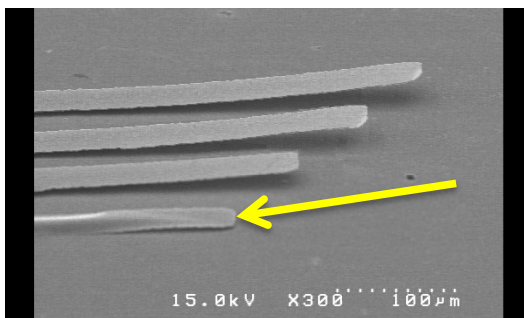
رابطه مستقیم دارد. لیکن این افزایش سبب افزایش میزان نوین مکانیکی نیز خواهد شد [۲۱].



شکل ۱. شکل یک تیرک ساده دو ماده‌ای از جنس Al/SiO₂ که یک سر آن ثابت است.

فرآیند ساخت

طراحی فرآیند ساخت تیرک یک سر آزاد به روش میکرو ماشین‌کاری حجمی پیشنهادی، ساده، جدید، کم‌هزینه و تعداد ماسک‌های لازم برای ساخت آن کاهش یافته است و فرآیند معلق سازی این تیرک‌ها نیز به روش بسیار ساده انجام می‌پذیرد؛ زیرا در روش میکرو ماشین‌کاری سطحی، فرآیند معلق سازی تیرک مشکل است و امکان دارد با کوچک‌ترین اشتباه تیرک به کف ویفر بچسبد و از آن جدا نگردد. در شکل ۲، کوچک‌ترین تیرک که با بردار به رنگ زرد نشان داده شده است به کف ویفر چسبیده است.



شکل ۲ تصویر روبشی از تیرک‌ها که با فرآیند میکرو ماشین‌کاری سطحی به حالت معلق در آمده است. کوچک‌ترین تیرک به کف ویفر چسبیده است که با بردار زرد رنگ نشان داده شده است.

محاسبه میزان خمش تیرک یک سر آزاد دو ماده‌ای

شکل ۱ مدل یک تیرک یک سر آزاد را نشان می‌دهد که از دو ماده مختلف تشکیل شده است. اگر فرض شود که ماده یک از جنس SiO₂ و ماده ۲ از جنس Al است؛ در این صورت با تغییر دما، میکرو تیرک یک سر آزاد به علت اختلاف ضریب انبساط حرارتی دو ماده خم می‌شود. این پدیده همانند اثر بی متال است؛ بنابراین اختلاف ضریب انبساط حرارتی در دو ماده سبب ایجاد استرس در بین دو ماده سازنده تیرک یک سر آزاد یعنی SiO₂ و Al خواهد شد. رابطه میزان خمش تیرک یک سر آزاد دو ماده‌ای برحسب تغییر دمای آن از رابطه ۱ به دست می‌آید [۱۷].

$$\Delta z = 3(\alpha_1 - \alpha_2) \frac{(t_2 + t_1)}{t_2^2 K} J_b^2 \Delta T \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$K = 4 + 6r + 4r^2 + \frac{E_1}{E_2} r^3 + \frac{E_2}{E_1 r} \quad r = \frac{t_1}{t_2}$$

که در این رابطه:

l_b : طول تیرک یک سر آزاد دو ماده‌ای

t_1 : ضخامت لایه فلزی

t_2 : ضخامت لایه جاذب تیرک یک سر آزاد

α_1, α_2 : ضریب انبساط حرارتی لایه فلزی و لایه جاذب

E_1, E_2 : ضریب مدول یانگ لایه فلزی و لایه جاذب

همان‌طور که از شکل ۱ مشخص است Δz میزان خمش عمودی تیرک یک سر آزاد در انتهای سمت راست به علت استرس حرارتی است. رابطه (۱) را به شکل‌های مختلفی نیز می‌توان نوشت [۲۰-۱۷]. از جمله:

$$\Delta z = \frac{5}{4} (\alpha_1 - \alpha_2) \frac{t_1 + t_2}{t_2^2 K} \frac{l_b^3}{G_1 t_1 + G_2 t_2} P \quad \text{رابطه (۲)}$$

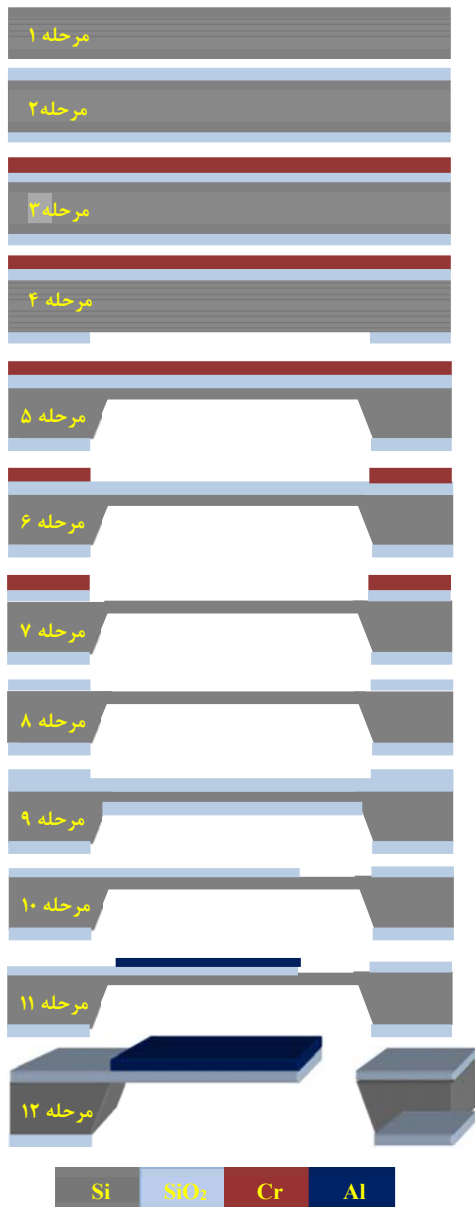
در این رابطه:

G_1, G_2 : ضریب انبساط حرارتی لایه فلزی و لایه جاذب

P : توان جذب شده در تیرک

همان‌طور که از رابطه خمش مشخص است با انتخاب مواد مناسب، طراحی هندسی خوب و تعیین ضخامت‌های مناسب، می‌توان میزان خمش را ماکزیمم نمود. باید توجه داشت که بهینه‌سازی یک طراحی خوب با افزایش میزان خمش به تنهایی امکان‌پذیر نیست. به‌عنوان مثال میزان خمش با توان دوم طول

- ب. در مدت ۳۰ دقیقه دمای کوره به ۱۰۵۰ درجه می-رسد.
- ج. ۲۰ دقیقه بعد از روشن شدن کوره گاز آرگون قطع و اکسیژن با شار ۲ sccm وارد کوره می‌گردد.
- د. ۳۰ دقیقه بعد از اینکه دما به ۱۰۵۰ درجه رسید، اکسیژن قطع و بخار آب دو بار تقطیر شده وارد کوره می‌شود.
- ه. دمای کوره به مدت ۲۰ ساعت در ۱۰۵۰ درجه باقی می‌ماند.



شکل ۳ توصیف فرآیند ساخت. (۱) انتخاب ویفر، برش و تمیزکاری بستر Si (۲) لایه نشانی SiO₂ (۳) لایه نشانی Cr (۴) حکاکی SiO₂ (۵) حکاکی Si با TMAH (۶) حکاکی Cr (۷) پاک کردن SiO₂ (۸) پاک کردن Cr (۹) اکسیداسیون جهت تشکیل لایه اصلی SiO₂ (۱۰) حکاکی SiO₂ جهت شکل‌دهی به تیرکها (۱۱) لایه نشانه Al و lift off آن (۱۲) حکاکی Si باقی‌مانده (۱۳) عملیات رهاسازی

در این فرایند، از زدایشگر سیلیکون^۱ Dual doped TMAH جهت محافظت از Al در فرآیند ساخت استفاده شده است که شکل ۳ توصیف فرآیند ساخت را نشان می‌دهد. روند ساخت تیرک در ۱۳ مرحله است که مراحل ساخت آن طبق شکل به شرح زیر است:

۱. انتخاب ویفر، برش و تمیزکاری (شکل ۳-مرحله ۱): سیلیکون از نوع P(100) به ضخامت 460 μm با پولیش یک‌طرف به‌عنوان زیر لایه ویفر انتخاب شده است. زیر لایه در این روش تنها به‌عنوان بستر کار بوده و هیچ کارایی دیگری ندارند، تنها هموار بودن سطح آن موضوع پراهمیت است. اندازه ابعاد زیر لایه بریده‌شده به ابعاد نهایی ساختار و پایه دستگاه لایه نشانی چرخشی بستگی دارد. از اینرو نمونه به ابعاد ۱/۲×۱/۲ سانتیمتری برش داده شده است. این ابعاد کاملاً با ابعاد کلی ساختار تناسب دارد و جای قرار گرفتن پنس برای حمل‌ونقل بدون آسیب رساندن به ساختار اصلی را نیز می‌دهد. از آنجاکه در حین مراحل فرآیند ساخت، Si در داخل TMAH زدایش می‌شود و نحوه زدایش نیز تابع جهت برش ویفر است؛ لذا جهت برش ویفر بایستی مدنظر قرار گیرد. در این فرایند، نمونه در جهت <1۰۰> برش داده شد تا شکل مربعی پنجره بعد از زدایش Si حفظ شود.

تمیز سازی زیر لایه مرحله پراهمیتی است زیرا در صورت عدم انجام صحیح آن، لایه‌ها پوسته کرده و از سطح جدا می‌شوند. برای شستشو، ابتدا نمونه آب کشیده می‌شود، سپس سطح آن در محلول آب و صابون با یک مسواک تمیز می‌شود. در مرحله بعد نمونه در محلول سود ۴/۵ درصد جرمی مغروق شده و سطح آن با مسواک دیگری تمیز می‌شود. در ادامه نمونه در آب DI مغروق و سطح آن‌ها کاملاً تمیز می‌شود و در نهایت با باد، خشک می‌شود تا برای اجرای فرآیند ساخت آماده شود.

۲. اکسیداسیون (شکل ۳-مرحله ۲): ویفر سیلیکون در کوره اکسیداسیون قرار می‌گیرد تا دو طرف آن اکسید شود. نسبت خوردگی Si/SiO₂ در TMAH به ترتیب ۱/۴۰۰ است؛ بنابراین ضخامت اکسید بایستی از ضخامت ویفر به نسبت ۱/۴۰۰ بیشتر باشد. روش اکسیداسیون برای ویفرهای ضخامت بالا، اکسیداسیون تر است. در این مرحله نمونه در داخل کوره اکسیداسیون قرار داده شد تا SiO₂ به روش تر تا ضخامت ۲ μm در دو طرف زیر لایه رشد داده شود؛ شکل ۴ نمودار رشد اکسید سیلیکون به روش تر و خشک برای سیلیکون [100] را نشان می‌دهد. تنظیماتی که برای رشد SiO₂ در این فرایند انجام شد به شرح زیر است.

ا. گاز آرگون با فشار ۵ sccm وارد کوره می‌گردد.

^۱ Tetra methyl Ammonium Hydroxide

پنجره برای ساخت غشاء سیلیکونی ایجاد شود. گامهای لازم برای این کار به شرح زیر است.

ا. فتورزیست کاری: فتورزیست Shipley1813 به وسیله دستگاه لایه نشانی چرخشی با دور 3000rpm در مدت ۳۰ ثانیه بر روی ویفر لایه نشانی می شود.

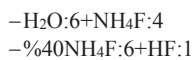
ب. پخت نرم: نمونه به مدت ۶۰ ثانیه در دمای ۹۵ درجه روی اجاقک قرار می گیرد تا فتورزیست خشک شود.

ت. نوردی: نمونه به مدت ۲۰ ثانیه توسط دستگاه نوردی در معرض نور ماوراءبنفش قرار می گیرد. ماسک مورد استفاده طلای (ورق پلاستیکی شفاف) است و در روی آن یک مربع و دو نوع نشانگر^۵ مختلف قرار دارد که اندازه یک ضلع مربع ۲۲۰۰ μm است. در هنگام لیتوگرافی نمونه، امتداد لبه ماسک، موازی با جهت {۱۱۰} است تا در حین سونش سیلیکون میزان زیر بریدگی ناچیز شود.

ث. ظهور: نمونه را به مدت ۳۰ ثانیه در ماده ظهور (سود ۴/۵ گرم در لیتر) غوطه ور و سپس با آب DI شسته می شود تا پنجره در پشت زیر لایه ایجاد شود.

ج. پخت سخت: بعد از باد گرفتن نمونه و خشک کردن آن، نمونه به مدت ۵۰ دقیقه در دمای ۱۲۰ درجه روی اجاقک قرار می گیرد. در این مرحله، زمان پخت سخت اهمیت دارد زیرا هرچه قدر زمان پخت دهی افزایش یابد، دوام فتورزیست در زدایشگر BOE نیز افزایش می یابد. لازم به ذکر است جهت محافظت بیشتر، می توان سطح و لبه های نمونه را نیز فتورزیست کاری نمود.

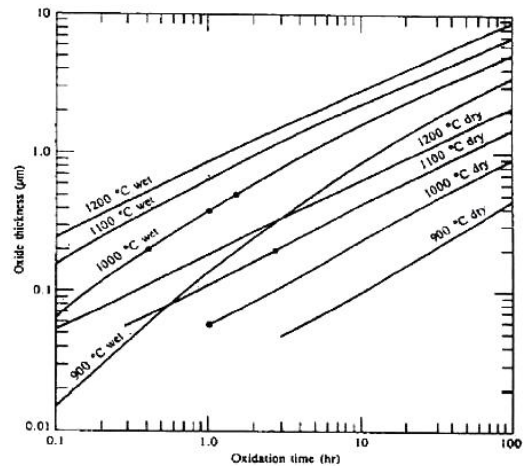
ح. حکاکی SiO₂: اکسید سیلیکون پشت زیر لایه در دمای محیط به مدت ۲۵ دقیقه با زدایشگر BOE حکاکی می شود. این زدایشگر محلولی است که از مخلوط مواد زیر به دست می آید.



خ. پاک کردن فتورزیست: در این مرحله فتورزیستهای باقی مانده در روی سطح زیر لایه با استون پاک می شود.

۵. حکاکی Si (شکل ۳-مرحله ۵): نمونه در داخل TMAH(25%) قرار داده شده تا یک پوسته نازک ساخته شود. در این مرحله سیلیکون در دمای ۸۰ درجه تا عمق 400 μm خورده می شود، یعنی ضخامت پوسته در حدود 60 μm می شود. لازم به ذکر است که انجام لیتوگرافی مراحل بعدی با پوسته نازک تر مشکل است.

۶. حکاکی Cr (شکل ۳-مرحله ۶): در این مرحله با انجام لیتوگرافی دوطرفه، یک پنجره در روی سطح زیر لایه متناسب با



شکل ۴. نمودار رشد اکسید تر و خشک سیلیکون

و. در پایان، کوره خاموش و بخار آب قطع می شود تا نمونه خنک شوند.

۳. لایه نشانی Cr (شکل ۳-مرحله ۳): کروم بعد از رشد SiO₂ در قسمت بالای نمونه لایه نشانی می شود. با جابجایی نمونه توسط پنس در طول اجرای فرآیند ساخت، SiO₂ رشد داده شده صدمه خورده و خراش برمی دارد لذا کروم از لایه SiO₂ محافظت بیشتر می کند. از طرفی کروم ماسک SiO₂ نیز است. همچنین کروم باعث محافظت بیشتر SiO₂ روی نمونه در داخل TMAH نیز می شود.

کروم در دمای محیط به روش PVD و به ضخامت ۴۰۰ nm در خلأ و با نرخ ۱ A/s لایه نشانی می گردد. مقاومت کروم لایه نشانی شده به روش PVD^۴ در داخل BOE^۳ و TMAH مطلوب نیست زیرا کروم ساختار بلوری خوبی را در این روش ندارد، با تزریق آرگون با شار ۵ sccm به داخل کوره اکسیداسیون، نمونه ها تحت عملیات حرارتی قرار می گیرند تا کروم در TMAH مقاومت کند. مراحل عملیات حرارتی به شرح زیر است.

ا. دما در مدت ۳۰ دقیقه تا ۴۰۰ درجه افزایش می یابد.

ب. نمونه به مدت یک ساعت در این دما باقی می ماند.

ج. سپس کوره خاموش می شود تا اینکه دمای نمونه به دمای محیط کاهش یابد.

۴. حکاکی SiO₂ (شکل ۳-مرحله ۴): در این مرحله پشت ویفر لیتوگرافی گردیده و اکسید آن برداشته می شود تا

۴ - Anneal

۴ - Physical Vapor Deposition

۵ - marks

۳ - Buffered Hydrofluoric Acid

ابتدا، عملیات لیتوگرافی انجام می‌شود و سپس Al به روش PVD بر روی نمونه‌ها لایه نشانی می‌گردد. در پایان Al با عملیات Lift off بر روی لایه اصلی الگودهی می‌شود.

۱۲. حکاکی Si (شکل ۳-مرحله ۱۲): در این مرحله، پوسته ساخته‌شده از جنس Si حکاکی و عملیات رهاسازی تیرک از مایع انجام می‌شود. از آنجائی که فلز Al در داخل محلول THAM خورده می‌شود لذا در این مرحله از زدایشگر محلول Dual-doped TMAH استفاده می‌شود که فلز Al در داخل آن خورده نمی‌شود. این محلول از حل ۱۵g/l سیلیکون آمورف در محلول (5%) TMAH به دست می‌آید [۲۲] [۲۳]. از طرفی دیگر اکسید سیلیکون نیز در داخل این محلول مقاوم بوده و زدوده نمی‌شود. از آنجائی که سیلیکون که در معرض هوا است، همواره یک اکسید نازک به ضخامت حدوداً ۱۰nm بر روی قرار دارد؛ لازم است این اکسید از روی نمونه برداشته و سپس در داخل محلول قرار گیرد. به همین منظور، ابتدا تیرک به مدت خیلی کوتاه در ظرف محلول HF(2%) قرار می‌گیرند و بلافاصله از ظرف محلول HF خارج و در ظرف آب DI قرار می‌گیرند تا آب جایگزین HF شود. در ادامه تیرک از ظرف آب خارج و با آب DI تمیز دیگری شسته می‌شود تا از جایگزین شدن آب به جای HF اطمینان حاصل شد. در ادامه نمونه بدون خشک شدن در محلول Dual-doped TMAH غوطه‌ور می‌شود تا عملیات حکاکی Si انجام شود. بعد از حکاکی Si، تیرک‌ها در داخل مایع به حالت معلق درمی‌آیند. از این لحظه به بعد، نمونه بایستی به آهستگی و به‌صورت عمودی وارد محلول و از آن خارج شوند.

۱۳. عملیات رهاسازی (شکل ۳-مرحله ۱۳): در آخرین مرحله، عملیات رهاسازی تیرک‌ها از مایع صورت می‌پذیرد. در این مرحله، نمونه در دمای محیط از محلول Dual-doped TMAH خارج‌شده و به مدت ۵ دقیقه در داخل آب DI غوطه‌ور می‌شوند تا آب جایگزین محلول Dual-doped TMAH گردد. مجدداً نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه دیگر در داخل آب DI تازه دیگری غوطه‌ور شده تا از جایگزینی آب DI به‌جای محلول Dual-doped TMAH اطمینان حاصل شود. در آخرین مرحله، نمونه از آب DI خارج‌شده و به مدت ۵ دقیقه در داخل استون غوطه‌ور می‌شوند تا استون جایگزین آب DI شود. مجدداً نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه دیگر در داخل استون تازه دیگری غوطه‌ور می‌شوند تا از جایگزینی استون به‌جای آب DI اطمینان حاصل شود. در پایان نمونه از داخل استون به‌آرامی خارج‌شده و به‌صورت عمودی در هوای آزاد قرار می‌گیرند تا خشک شوند. باید توجه داشت که عملیات رهاسازی در دمای محیط انجام می‌شود و نباید از باد تمیز برای خشک‌کردن استفاده نمود.

پنجره پشت زیر لایه ایجاد می‌شود و Cr روی زیر لایه متناسب با پنجره لیتوگرافی شده برداشته می‌شود. SiO₂ در مدت ۲ دقیقه با زدایشگر آمونیم سریم رقیق‌شده با آب مقطر دو بار تقطیرشده زدوده می‌شود و در نهایت فوتورزیست‌های باقی‌مانده با استون پاک می‌شوند.

۷. پاک کردن SiO₂ (شکل ۳-مرحله ۷): SiO₂ روی نمونه کیفیت خود را در طی انجام چندین عملیات از دست داده است و نمی‌توان از آن به‌عنوان لایه اصلی تیرک استفاده نمود، به همین دلیل این لایه با HF در مدت ۱۵ دقیقه پاک می‌شود. زدایش SiO₂ با BOE در این مرحله به Si صدمه می‌زند، زیرا BOE خاصیت خوردگی سیلیکون را دارد درحالی‌که HF به‌هیچ‌عنوان سیلیکون را نمی‌زداید.

۸. پاک کردن Cr (شکل ۲-مرحله ۸): Cr روی نمونه در مدت ۲ دقیقه با آمونیم سریم پاک می‌شود تا نمونه آماده‌سی قرار گرفتن در کوره اکسیداسیون شوند.

۹. لایه نشانی SiO₂ (شکل ۳-مرحله ۹): لایه اصلی تشکیل‌دهنده تیرک‌ها در این مرحله ایجاد می‌شود. بنا به نحوه طراحی، می‌توان ضخامت‌های متنوعی را برای این لایه در نظر گرفت. در این مرحله نمونه در داخل کوره اکسیداسیون قرار داده می‌شود تا SiO₂ جدید به روش تر رشد داده شود. در این مرحله تنظیمات کوره بر مبنای ضخامت تیرک‌ها تعیین شده است. ضخامت SiO₂ با تنظیمات انجام‌شده به شرح زیر در حدود ۱μm می‌گردد.

ا. گاز آرگون با فشار ۵ sccm وارد کوره می‌گردد.

ب. در مدت ۳۰ دقیقه دمای کوره به ۱۰۵۰ درجه می‌رسد.

ج. گاز آرگون ۲۰ دقیقه بعد از روشن شدن کوره قطع و اکسیژن با شار ۲sccm وارد کوره می‌شود.

د. ۳۰ دقیقه بعدازاینکه دما به ۱۰۵۰ درجه رسید، اکسیژن قطع و بخار آب DI وارد کوره می‌شود.

ه. به مدت ۸ ساعت دمای کوره در ۱۰۵۰ درجه باقی می‌ماند. در نیم ساعت آخر، بخار آب قطع و اکسیژن با شار ۲sccm وارد کوره می‌شود.

و. در نهایت کوره خاموش و بخار آب قطع می‌شود تا دمای نمونه به دمای محیط کاهش یابد.

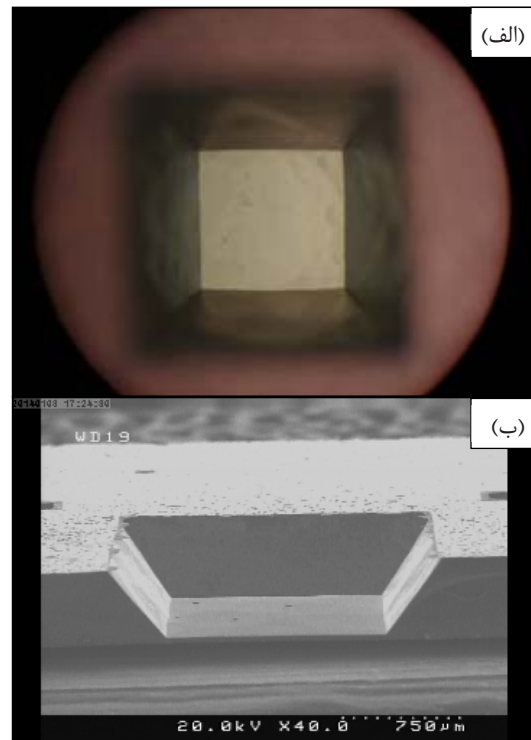
۱۰. حکاکی SiO₂ (شکل ۳-مرحله ۱۰): در این مرحله روی نمونه مطابق بند ۴ لیتوگرافی می‌شود و اکسید از روی آن توسط محلول زدایشگر BOE برداشته می‌شود تا لایه اصلی تیرک‌های یک سر آزاد بر روی آن ایجاد شود.

۱۱. لایه نشانی و Lift off کردن Al (شکل ۳-مرحله ۱۱): در این مرحله لایه تشکیل‌دهنده ناحیه دو ماده‌ای ایجاد می‌شود.

- Ammonium Cerium(IV) Nitrate ((NH₄)₂Ce(NO₃)₆)^۶

نتایج فرآیند ساخت

در شکل ۵ تصویر نوری و روبشی از غشای ساخته شده در پایان مرحله ۵ نشان داده شده است. شکل ۵-الف تصویر دوبعدی از کف غشاء را بعد از زدایش سیلیکون در داخل TMAH نشان می‌دهد که با میکروسکوپ نوری عکس برداری شده است. شکل ۵ ب تصویر روبشی از غشاء را به صورت مایل نشان می‌دهد.



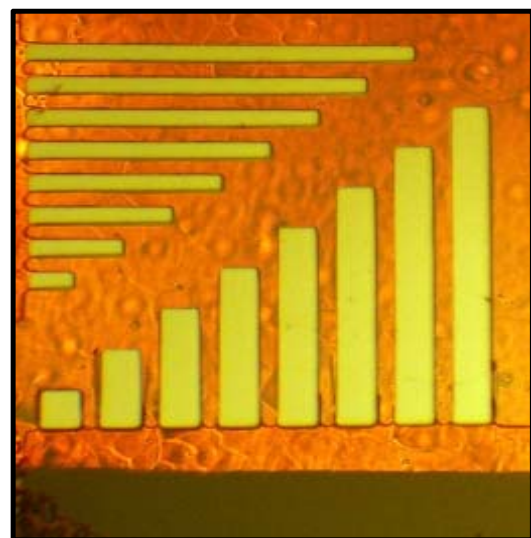
شکل ۵ تصویر روبشی زدایش سیلیکون در TMAH (الف) تصویر دوبعدی از کف سیلیکون با میکروسکوپ نوری (ب) تصویر روبشی از پوسته ساخته شده که لبه آن جهت عکس برداری برداشته شده است.

جهت اندازه‌گیری ضخامت و مشاهده یکنواختی شکل غشاء ساخته شده، یک لبه پنجره مربعی شکل از سیلیکون شکسته شد. طبق تصویر ملاحظه می‌شود که کف پوسته نسبتاً صاف است و ناهمواری در آن مشاهده نمی‌شود و ضخامت پوسته در نواحی مختلف نیز یکنواخت است. زدایش در دیواره‌های سیلیکون در جهت $<110>$ به خوبی انجام شده است و خرابی و ناهمواری در آن مشاهده نمی‌شود.

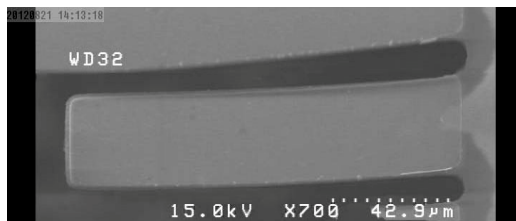
شکل ۶ تصویر پترن Al بر روی لایه اصلی SiO_2 بعد از انجام فرآیند Lift off را نشان می‌دهد که با میکروسکوپ نوری عکس برداری شده است. جهت عکس برداری از تیرک‌ها، نور از زیر به نمونه تابیده شده است. عبور نور قرمز رنگ از بستر سیلیکونی نشان می‌دهد که ضخامت غشای ساخته شده بسیار نازک است. نواحی که نور از بستر عبور نمی‌کند لایه فلزی Al قرار دارد که مربوط به نواحی دو ماده‌ای تیرک‌ها است. ناحیه مشکی رنگ پایین تصویر نیز مربوط بستر ضخیم Si است که خارج از ناحیه پنجره است. این شکل نشان می‌دهد که فرآیند Lift off و عملیات لیتوگرافی با دقت قابل قبول انجام شده است. تصویر چندین تیرک دو ماده‌ای ساخته شده از جنس SiO_2/Al در شکل ۷ نشان داده شده است که در آن‌ها Al بر روی SiO_2 لایه نشانی شده است. این شکل، تصویر SEM دو سری از تیرک‌های دو ماده‌ای ساخته شده را نشان می‌دهد که Al در قسمت بالا و SiO_2 در قسمت زیر قرار دارد و با بردارهایی به رنگ آبی مشخص شده است. طول‌های آن‌ها از چپ به راست در محور افقی و از پایین به بالا در محور عمودی، به ترتیب ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰ و $400 \mu\text{m}$ می‌باشند. عرض آن‌ها نیز در محور عمودی و افقی به ترتیب ۲۰ و $40 \mu\text{m}$ می‌باشند. انتهای تیرک‌ها به یک بستر از جنس SiO_2 متصل شده است که از جنس لایه اصلی تیرک‌ها است. ضخامت آن‌ها نیز مانند ضخامت لایه اصلی است؛ که در شکل با بردارهای به رنگ زرد نشان داده شده است. مجموعه تیرک‌ها و بستر بر روی زیر لایه قرار گرفته است که محل آن با بردارهای به رنگ قرمز مشخص شده است.

شکل ۸، تصویر بزرگ شده SEM از تیرک ساخته شده به طول $50 \mu\text{m}$ و عرض $20 \mu\text{m}$ را نشان می‌دهد. لبه‌های تیرک که با علامت رنگی در این شکل مشخص شده است، نشان می‌دهد که لیتوگرافی و فرآیند Lift off با دقت قابل قبول انجام شده است و همچنین فلز Al به لایه اصلی تیرک SiO_2 به خوبی چسبیده است.

تصویر SEM بزرگ شده از تیرک ساخته شده به طول $100 \mu\text{m}$ و عرض $20 \mu\text{m}$ در شکل ۹ نشان داده شده است و در شکل ۱۰ نیز تصویر بزرگ شده SEM از تیرک ساخته شده به طول $150 \mu\text{m}$



شکل ۶ تصویر پترن Al بر روی SiO_2 بعد از انجام Lift off در مرحله ۱۱



شکل ۱۰ تصویر روبشی تیرک یک سر آزاد دو ماده‌ای از جنس SiO₂/Al به عرض 20µm و طول 150µm

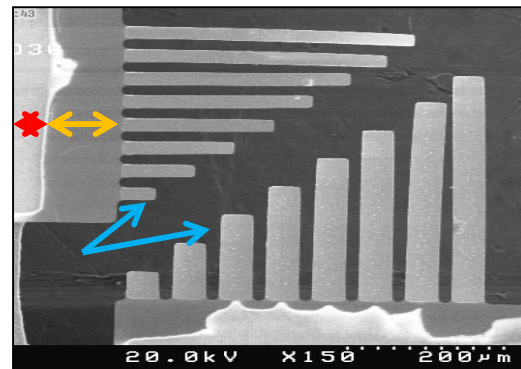
نتیجه‌گیری:

- در این مقاله، فرآیند ساخت آرایه‌ای از تیرک‌ها از جنس SiO₂/Al شرح داده شده است که می‌توان آن‌ها را در آزمایشگاه‌های میکروالکترونیک با تجهیزات محدود با یک روش ساده و کم‌هزینه ساخت. در این مقاله تیرک‌های به طول‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ و به عرض‌های ۲۰µm و ۴۰µm با ضخامت ۲µm برای SiO₂ و ۲۰۰nm برای Al ساخته شده‌اند. مزایای روش ارائه شده برای ساخت آن‌ها به شرح زیر است.
- فرآیند ساخت تیرک‌ها ساده است و آن‌ها در آزمایشگاه‌های میکروالکترونیک با تجهیزات محدود مانند لیتوگرافی، کوره اکسیداسیون و لایه نشانی قابل پیاده‌سازی است.
 - این فرآیند با حداقل عملیات لیتوگرافی و با حداقل تعداد ماسک ساخته شده است به طوری که ساخت آن با سه عملیات لیتوگرافی یک‌طرفه و یک عملیات لیتوگرافی دوطرفه به وسیله دو ماسک کرمی و یک ماسک شفاف پلاستیکی تحقق یافته است.
 - معلق سازی تیرک‌ها در دمای محیط به روش رهاسازی تر است و از پیچیدگی رهاسازی تیرک‌ها از لایه قربانی اجتناب شده است.
 - از Al در برابر زدایشگرهای Si نظیر KOH، EDP، TMAH و غیره محافظت شده است زیرا از زدایشگر سیلیکون Dual doped TMAH استفاده شده است
 - با این روش، می‌توان تیرک‌های دو ماده‌ای از جنس SiO₂/Al با شکل‌ها و ابعاد هندسی مختلف را ساخت.

سپاسگزاری:

برای ساخت تیرک‌ها از امکانات آزمایشگاه لایه نازک دانشگاه مالک اشتر استفاده شده است که بر خود لازم می‌دانم از زحمات آقای دکتر حسن حاج قاسم از دانشگاه تهران و آقایان مهندس منصور محتشمی‌فر و مجیدرضا علی‌احمدی از دانشگاه مالک اشتر که در انجام این تحقیق، بنده را یاری نموده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را بنمایم.

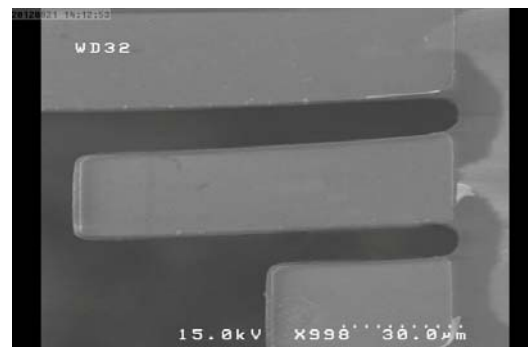
عرض ۲۰µm نشان داده شده است. این اشکال نشان می‌دهند که کانتیلیورها معلق شده‌اند و استرس آن‌ها نیز ناچیز است. از آنجاکه لایه نشانی Al در دمای پایین می‌شود و عملیات رهاسازی تیرک‌ها از مایع نیز در دمای محیط انجام می‌شود؛ لذا انتظار می‌رود که استرس آن‌ها بعد از معلق‌سازی محسوس نباشد. همانطور که اشکال ۷ تا ۱۰ نشان می‌دهند، میزان خمش تیرک‌ها ناچیز است. بنابراین استرس تیرک‌ها بعد از رهاسازی ناچیز است. البته روشهایی نیز برای کاهش بیشتر استرس وجود دارند که می‌توان به روش‌های عملیات حرارتی [۲۴] و بمباران یونی [۲۵] اشاره نمود.



شکل ۷ این شکل تصویر روبشی تیرک‌های دو ماده‌ای ساخته شده را نشان می‌دهد که طول‌های آن‌ها به ترتیب ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰µm از چپ به راست در محور افقی و از پایین به بالا در محور عمودی می‌باشند و عرض آن‌ها نیز در محور عمودی و افقی به ترتیب ۲۰ و ۴۰µm می‌باشند.



شکل ۸ تصویر روبشی تیرک ساخته شده به طول ۵۰µm و عرض ۲۰µm که Al بر روی SiO₂ قرار گرفته است.



شکل ۹ تصویر روبشی تیرک یک سر آزاد دو ماده‌ای از جنس SiO₂/Al به عرض 20µm و طول 100µm

using metamaterial structures. Optics express, 21(11), 13256-13271.

- [16] Hui, M., Xia, Z., Liu, M., Dong, L., Liu, X., & Zhao, Y. (2016, May). Fiber faceplate modulation readout in Bi-material micro-cantilever mirror array imaging system. In SPIE Commercial+ Scientific Sensing and Imaging (pp. 98680J-98680J). International Society for Optics and Photonics.
- [17] Datskos PG, Lavrik NV, Rajic S (2004) Performance of uncooled microcantilever thermal detectors. Rev Sci Instrum 75(4): 1134-1148.
- [18] Lavrik, N. V., Sepaniak, M. J., & Datskos, P. G. (2004). Cantilever transducers as a platform for chemical and biological sensors. *Review of scientific instruments*, 75(7), 2229-2253.
- [19] Rosenberger, M. R., Kwon, B., Cahill, D. G., & King, W. P. (2012). Impact of silicon nitride thickness on the infrared sensitivity of silicon nitride-aluminum microcantilevers. *Sensors and Actuators A: Physical*, 185, 17-23.
- [20] Miriyala, N., Khan, M. F., & Thundat, T. (2016). Thermomechanical behavior of a bimaterial microchannel cantilever subjected to periodic IR radiation. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 235, 273-279.
- [21] Abdollahi, H., Sameifar, F., & Hagnehadar, A. (2015). Effect of SiO₂/Al to increase microcantilever infrared detector sensitivity and compare with Si₃N₄/Au. *Journal of solid and fluid mechanics*, 5 (3), 151-163
- [22] Biswas, K., & Kal, S. (2006). Etch characteristics of KOH, TMAH and dual doped TMAH for bulk micromachining of silicon. *Microelectronics journal*, 37(6), 519-525.
- [23] Biswas, K., Das, S., Maurya, D. K., Kal, S., & Lahiri, S. K. (2006). Bulk micromachining of silicon in TMAH-based etchants for aluminum passivation and smooth surface. *Microelectronics Journal*, 37(4), 321-327.
- [24] Lin, I. K., Zhang, Y., & Zhang, X. (2008). The deformation of microcantilever-based infrared detectors during thermal cycling. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 18(7), 075012.
- [25] Bifano, T. G., Johnson, H. T., Bierden, P., & Mali, R. K. (2002). Elimination of stress-induced curvature in thin-film structures. *Journal of microelectromechanical systems*, 11(5), 592-597.
- [1] Sandeep Kumar Vashist, "A Review of Microcantilevers for Sensing Applications," , Journal of Nanotechnology, 2007
- [2] C. Hilbert, H. Curtis, C. Anagnostopoulos, R. Finnila, G. Hawkins, L. Hones, A. Jacobson, E. Leonard, F. Matta, J. Melendez, and J. Ojha, 2000, "MEMS and microsystems in Europe," International Technology Research Institute.
- [3] Su B, Duan G, Zhang C (2010) A detection technology of THz based on surface plasmon resonance. Proc. of SPIE 7854: 78541H1-78541H9.
- [4] B Su, G Duan (2011) A high sensitivity THz detector. Proc. of SPIE 8195: 81951K1-81951K7.
- [5] Gong C, Zhao Y, Dong L, Hui M, Yu X, Liu X (2013) Short-wave infrared, medium-wave infrared, and long-wave infrared imaging study for optical readout microcantilever array infrared sensing system. Opt Eng 52(2): 0264031-0264036.
- [6] Gong C, Zhao Y, Dong L, Hui M, Yu X, Liu X (2013) The tolerable target temperature for bimaterial microcantilever array infrared imaging. Opt Laser Technol 45: 545-550.
- [7] Ma, W., Zhao, R., Wang, S., Yu, X., Feng, Y., & Zhao, Y. (2016). Bimaterial Cantilever Focal Plane Array for Uncooled Infrared Imaging Using Sandwich-Framed Structure. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 25(2), 413-420.
- [8] Hunter SR, Amantea RA, Goodman LA, Kharas Sergey Gershtein DB, Matey JR, Perna SN, Yu Y, Maley N, White LK (2003) High sensitivity uncooled microcantilever infrared imaging arrays. Infrared Technology and Applications XXIX, Proc. of SPIE, 5074: 469-480 .
- [9] Hunter SR, Maurer G (2006) High sensitivity uncooled microcantilever infrared imaging arrays. Proc. of SPIE, 6206: 1-12.
- [10] Toy MF, Ferhanoglu O, Torun H, Urey H (2009) Uncooled infrared thermo-mechanical detector array Design, fabrication and testing. Sensor Actuat A-Phys 156(1): 88-94.
- [11] Huang S, Tao H, Lin IK, Zhang X (2008) Development of double-cantilever infrared detectors fabrication, curvature control and demonstration of thermal detection. Sensor Actuat A-Phys 45(146) 231-240.
- [12] Ma, W., Zhao, R., Wang, S., Yu, X., Feng, Y., & Zhao, Y. (2016). Bimaterial Cantilever Focal Plane Array for Uncooled Infrared Imaging Using Sandwich-Framed Structure. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 25(2), 413-420.
- [13] Wang W, Upadhyay V, Munoz C, Bumgarner J, Edwards O (2006) FEA Simulation, Design and fabrication of uncooled MEMS capacitive thermal detector for infrared FPA imaging. Infrared Phys Techn XXXII Proc of SPIE 6206: 62061L1-62061L12.
- [14] Abdollahi, Hassan, Hassan Hajghassem, and Shams Mohajerzadeh. "Simple fabrication of an uncooled Al/SiO₂ microcantilever IR detector based on bulk micromachining." *Microsystem technologies* 20.3 (2014): 387-396
- [15] Alves, F., Grbovic, D., Kearney, B., Lavrik, N. V., & Karunasiri, G. (2013). Bi-material terahertz sensors

منابع: