ماهنامه علمى پژوهشى



دانگاه ترمیت مدرس

mme.modares.ac.ir

ساخت سریع میکرو کانتیلیورهای تکمادهای از جنس SiO₂ با هزینه کم بر پایه فناوری میکروماشین کاری حجمی

حسن عبداللهى*

استادیار، مهندسی برق، دانشگاه هوائی شهید ستاری، تهران * تهران، صندوق پستی h.abd@ssau.ac.ir ،1384673411

طلاعات مقاله	چکیدہ
ىقالە پژوھشى كامل نريافت: 18 دى 1395 بذيرش: 20 بھمن 1395 رائە در سايت: 09 ارديبھشت 1396	از آنجائیکه کانتیلیورها پایه و اساس بیشتر قطعات مبتنی بر ساختارهای MEMS میباشند، در این مقاله فرآیند ساخت کانتیلیور با فناوری میکروماشین کاری حجمی بیان شده است و از آن فرآیند برای ساخت آرایهای از میکروکانتیلیورهای تکمادهای از جنس SiO2 استفاده شده است. نتایج حاصل از این مقاله میتواند پایه و اساس طراحی و ساخت حسگرهایی باشد که بر پایه کانتیلیور از جنس SiO2 استوار است. طراحی
<i>للید واژکان:</i> بیکروماشین کاری حجمی بیکروکانتیلیور هاسازی تر و MEMS	فرآیند ساخت کانتیلیورها در 13 مرحله با 2 ماسک شیشهای و طلقی انجام شده است و معلق سازی آن ها نیز به روش رهاسازی تر است. از مهم ترین مزایای روش ارائه شده می توان به عدم نیاز به تجهیزات پیشرفته لایه نشانی، طراحی با حداقل ماسک، سادگی در پیاده سازی سریع کانتیلیورها، اجتناب از پیچیدگی رهاسازی از لایه قربانی، رهاسازی کانتیلیور در دمای محیط، کم هزینه بودن و در نهایت امکان پیاده سازی آن در آزمایشگاههای میکروالکترونیک با تجهیزات محدود اشاره منود کانتیلیور در دمای محیط، کم هزینه بودن و در نهایت امکان پیاده سازی آن در آزمایشگاههای میکروالکترونیک با تجهیزات محدود اشاره منود کانتیلیورهای از خاص کی میکروالکترونیک با تجهیزات محدود اشاره نمود کانتیلیورهای تک مادهای از جنس SiO با طول های ۲۵۰۰ مال ای دان از از می میکروالکترونیک با تجهیزات محدود اشاره نمود کانتیلیورهای تک ماده ای از جنس SiO با طول های ۲۵۰۰ مال کان کان در ای دان از می میکروالکترونیک با تجهیزات محدود اشاره نمود کانتیلیورهای تک ماده ای از جنس SiO با مال کی مال کان پیاده سازی آن در از مایشگاه های میکروالکترونیک با تجهیزات محدود اشاره نمود کانتیلیورهای تک ماده ای از حله می مال کان پیاده مال کان با ماله کان پیاده سازی آن در از مایشگاه های میکروالکترونیک با تجهیزات محدود اشاره نمود. کانتیلیورهای تک ماده ای از جنس SiO با مال کان ای از از مال کان پیاده مال کان کان با مال کان ای از مال کان بی مال کان با مال کان ای از این هال کان کان ای از از مال کان از ای از مال کان ای از اینه مال کان کان ای از اینه کان کان از ای مال کان کان ای از مال کان
	200، 250، 300، 300 و 400، به ضخامتهایμμ و 2 و به عرضهای 20μm و 40 ساخته شدند. مقادیر فرکانس رزونانس و ثابت فنر آنها نیز برای مواد مختلف Si3، Au، SiO، Au، SiO، و SUS با ابعاد متفاوت محاسبهشدهاند. نتایج حاصل از تصاویر روبشی نشان میدهند که عملیات لیتوگرافی باوجود ناهمواری در پشت زیر لایه به درستی صورت پذیرفته است، کنترل فرآیند ساخت و کنترل عملیات زدایش Si در حد قابل قبول است و کانتیلیو ها با است بی ناحن به خوبی به حالت معلق درآمدهاند.

Fast and low lost fabrication of SiO_2 microcantilever based on Bulk microelectromechanical system

Hassan Abdollahi^{*}

Department of Electrical Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran * P.O.B. 1384673411, Tehran, Iran, h.abd@ssau.ac.ir

ARTICLE INFORMATION	ABSTRACT
Original Research Paper Received 07 January 2017 Accepted 08 February 2017 Available Online 29 April 2017	We know, cantilevers are based for the most of the MEMS components. In this paper, the fabrication process of SiO_2 micro cantilever array based on bulk micromachining technology is introduced. The results of which can be used to fabricate of SiO_2 micro cantilever sensors. The micro-cantilever fabrication process is implemented in the 13th stage with two glass and talcous masks and it is also
Keywords: Bulk micromachining Micro cantilever Wet release and MEMS	suspend by wet release technique. The main advantages of the proposed method can be expressed no need for advanced deposition equipment, design with minimum mask, fast and simplicity in implementation of the micro cantilever, avoid of complexity release from sacrificial layer, release the micro cantilever at environment temperature, low cost price and finally possible to implement in microelectronics research laboratories with limited equipment. The SiO ₂ micro cantilevers fabricate with 1 and 2μ m thickness, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 and 400 μ m lengths, and 20 and 40 μ m widths. The resonant frequency and the spring constant values are also calculated for different materials (Si ₃ N ₄ , Si, Au, SiO ₂ , Al and SU ₈) with various sizes. The SEM images results show that the lithographic process is correctly done on the roughness of the backside substrate, the fabrication process and Si etching operations controls are performed suitable, and micro-cantilevers are suspended with negligible stress.

الکترونیکی و مکانیکی بسیار ریز میباشند که با استفاده از فنها و فرآیندهای پیچیده ساخت مدارهای مجتمع الکترونیکی (IC) ایجاد میگردند. قطعات MEMS عمدتاً بر روی ویفرهای سیلیکونی و یا ترکیبی از مواد نیمههادی ساخته میشوند [1]. قطعات MEMS معمولاً از چندین قطعه متحرک

1- مقدمه

در حال حاضر یکی از حوزههای تحقیقاتی فعال دنیا، موضوع سامانههای میکروالکترومکانیکال⁽ (MEMS) است. این سامانهها ترکیبی از قطعات

H. Abdollahi, Fast and low lost fabrication of SiO₂ microcantilever based on Bulk microelectromechanical system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 12-20, 2017 (in Persian)

¹ Micro electro mechanical system

تشکیل می شوند که با کوپل کردنشان، میتوان از آنها در ساخت انواع حسگرها و یا عملگرها در اندازههای میکرونی بهره گرفت [2].

بدیهی است یکی از مزیتهای اصلی قطعات MEMS اندازه کوچک آنها نسبت به قطعات مرسوم است، کوچک بودن سایز به معنی مصرف کمتر انرژی است. با کوچکسازی قطعات می توان تعداد صدها عدد از آنها را بهصورت آرایه در یک چیپ قرار داد تا قیمت تمام شده به ازای هر قطعه به شدت کاهش یابد. با این قابلیت می توان قطعات و حسگرهای یک بار مصرف را با توجيه اقتصادي مناسبي تهيه كرد [3].

کانتیلیورها^۱ پایه و اساس قطعات مبتنیبر ساختارهای MEMS می باشند و کاربردهای گستردهای درشتابسنجها [4]، حس گرهای رطوبت [5]، حرارتسنجها [6]، فشارسنجها[7]، آشكارساز ذرات مغناطيسي [8]، شيميايي [9]، گاز [10]، جريان [11]، مواد منفجره [12]، فوتون [13]، مادون قرمز [15،14]، ترا هرتز [16]، سرطان [17] - بايوچيپها [18]-ساخت ميكرويمب [19]، يروب [20]، تيب AFM [21]، ميكرو صفحه داغ [22-22]، رزوناتور [26]، فيلترها [27] و تشخيص بيوملكولها [28] دارند. برای ساخت کانتیلیورها به تجهیزات پیشرفته لایه نشانی و سونش نیاز است. این تجهیزات بهدلیل گران قیمت بودن، در بعضی از آزمایشگاههای تحقیقاتی موجود نیست.

طبق تعريف، كانتيليور تيغهاي است كه تنها يك سمت آن محكم شده است و سر دیگر آن آزاد است. در "شکل 1" تصویر یک کانتیلیور ساده نشان داده شده است. وقتى از كانتيليور بهعنوان حسكر استفاده مى شود، از تغييرات فرکانس ارتعاش و یا میزان خمش آن بهعنوان مؤلفههای برای اندازه گیری استفاده می شوند. برای مثال، میزان مولکول جذب شده بر روی کانتیلیور باعث تغییر در فرکانس ارتعاش تیغه می گردد. همچنین مؤلفههایی مثل وسیکوسیتی، چگالی و یا نرخ جریان مایعات و یا گازها میتوانند باعث تغییر در فركانس ارتعاش كانتيليور گردند [29].

سیلیکون ماده مطلوبی برای ساخت قطعات نیمه هادی است زیرا دارای اکسید پایدار بوده و از نظر الکتریکی عایق است. شکل های مختلف اکسیدهای سیلیکون (SiO_x ،SiO₂، سیلیکات شیشه) عایقهای الکتریکی و گرمایی خوبی هستند و به طور گستردهای در میکروماشین کاری به کار می روند. همچنین با انتخاب دقیق آنها روی سیلیکون، میتوان سیلیکون را در اسید هیدروفلوراید بهخوبی سونش نمود. دی کسید سیلیکون (SiO₂) بهوسیله اکسید کردن سیلیکون یا گرم کردن در دماهای بالای 800^oC رشد می کند، درصورتی که شکل های دیگر اکسیدها و شیشه با نهشت بخار شیمیایی، اسپاترینگ و اسپین لایه نشانی میشوند.

هدف از این مقاله، ارائه یک فرآیند ساخت ارزان قیمت با قابلیت پیادهسازی آسان در آزمایشگاههای تحقیقاتی با امکانات محدود جهت ساخت میکروکانتیلیورهای از جنس SiO_2 بر پایه میکروماشین کاری حجمی است. با روش ارائهشده، فرآیند ساخت با حداقل ماسک ارائه شده است، رهاسازی کانتیلیور در دماهای پایین انجام میشود و کانتیلیورهای بهراحتی و بهآسانی قابل پیادهسازی هستند. از آنجا که تمامی مواد و تجهیزات هر چند اندک



شکل 1 یک تصویر ساده از کانتیلیور

Fig. 1 A simple image of cantilever

1 Cantilever

آن، در اکثر آزمایشگاهها و شرکتهای میکروالکترونیک موجود است، میتوان از آن بهعنوان روشی مؤثر در ایجاد ساختارهایی استفاده نمود که نیاز به عایقهای الکتریکی و گرمایی خوبی دارند. در چنین مواردی، همان طور که از جدول 1 ملاحظه می شود، ضریب انبساط حرارتی، هدایت حرارتی و هدایت الکتریکی ${
m SiO}_2$ از مواد دیگر کمتر است. لذا ${
m SiO}_2$ ماده مناسبی است که می توان به کاربردهای آن در ساخت آشکارسازهای حرارتی، مادون قرمز، تراهرتز، میکروهیترها، شتابسنجها، میکروآینهها و... مبتنیبر فناوری میکروماشین کاری اشاره نمود. در این روش، تنها به دستگاههای ابتدائی ليتوگرافي، كوره اكسيداسيون و دستگاه لايه نشاني نياز است. معلقسازي کانتیلیور، با رهاسازی آن از مایع به روش تر^۲ انجام میشود تا از پیچیدگی فرآیند با رهاسازی خشک^۳ اجتناب شود. بقیه مراحل کار نیز بهطور شیمیایی انجام میشود.

2- روابط حاكم بر كانتيليورها

ضریب فنریت[†] و فرکانس رزونانس⁶ دو پارامتر مهم در کانتیلیورها هستند. در هر نوسان یا ارتعاشی، سختی یا ضریب فنریت یک پارامتر مهم برای جسم است. مقدار ضریب فنریت به انرژی الاستیک جسم بستگی دارد؛ این انرژی در فواصل مشخصی از جسم آزاد و یا ذخیره می شود نسبت میان نیرو و نتيجه خمش كانتيليور با رابطه (F= -kz) مشخص می شود كه در آن:

$$k = \frac{Ewt^3}{4L^3} (\mathrm{Nm}^{-1}) \tag{1}$$

در این رابطه

مدول یانگ (Pa) E: طول كانتيليور (m) یهنای کانتیلیور (m) یهنای نخامت كانتيليور (m) ضخامت در معادله فوق، تأثير ابعاد كانتيليور در ضريب فنريت را مي توان ديد. فرکانس رزونانس fres برای یک کانتیلیور ساده با رابطه (3) بهدست می آید. $f_{\rm res} = \frac{1}{2\pi} \left| \frac{k}{m_{\rm eff}} \right|$ (Hz)

در این رابطه:

(2)

$$m_{
m eff}$$
: (kg) جرم مؤثر کانتیلیور (2) به دست میآید.
جرم مؤثر یک کانتیلیور نیز از رابطه (2) به دست میآید.
 $m_{
m eff} = rac{33}{140}
howtL (
m kg)$ (3)

در این رابطه:

ρ: (kgm⁻³) چگالی جرمی

با جایگذاری رابطه (1) و رابطه (2) در رابطه (3) مقدار فرکانس رزونانس برابر با رابطه زير خواهد شد [30].

$$f_{\rm res} = 0.162 \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$
(Hz) (4)

3- طراحي فرآيند ساخت

جهت ساخت کانتیلیور، از مواد گوناگونی در فرآیندهای ماشین کاری استفاده می شود تا بتوان قطعات پیچیده سهبعدی و دقیقی ساخت. جنس كانتيليورهاى تجارى معمولاً از سيليكون (Si) [31]، نيتريت سيليكون (SiN)

² Wet-release

Dry-release ⁴ Spring constant ⁵ Resonant frequency

[32] یا اکسید سیلیکون (SiO₂) [33] میباشند که در اندازهها و شکلهای مختلف و با حساسیتهای مختلف عرضه می گردند. در جدول 1 برخی از موارد مورد استفاده برای ساخت کانتیلیورها بیان شده است.

در روش معرفی شده برای طراحی ساخت کانتیلیور به روش میکروماشینکاری حجمی، تعداد ماسکهای کاهش یافته است و فرآیند معلقسازی کانتیلیورها نیز به روش بسیار ساده انجام میپذیرد. در روش میکروماشینکاری سطحی، فرآیند معلقسازی کانتیلیور ها مشکل است و امکان دارد با کوچکترین اشتباه، کانتیلیورها به کف ویفر بچسبند و از آن جدا نگردند. روند ساخت کانتیلیورهای پیشنهادی در 13 مرحله به شرح زیر است که مراحل ساخت آن به ترتیب در "شکل 2" نشان داده شده است:

- انتخاب ویفر، برش و تمیزکاری: ویفر سیلیکون از نوع (P(110 به ضخامت 460μm بهعنوان زیر لایه انتخاب میشود و در ابعاد موردنظر در جهت <100> برش داده و تمیزسازی سطح ویفر با عملیات معمول انجام میشود.
- 2. لایه نشانی SiO2: ویفر سیلیکون در کوره اکسیداسیون قرار می گیرد تا دو طرف آن به ضخامت 2μm اکسید شود. نسبت خورندگی Si/SiO₂ در TMAH به ترتیب 1/400 است؛ بنابراین ضخامت اکسید از ضخامت ویفر به نسبت 1/400 بایستی بیشتر باشد. روش اکسیداسیون برای لایههای ضخامت بالا، ترکیبی از اکسیداسیون خشک و تر است. در "شکل 3" کوره اکسیداسیون مورد استفاده برای رشد SiO₂ نشان داده شده است.
- 3. لایه نشانی Cr: کرم به ضخامت 400nm بهعنوان ماسک و جهت محافظت بیشتر از ویفر و اکسید نشانی میشود و نمونهها تحت عملیات حرارتی قرار می گیرند تا استحکام کرم در طی فرآیند بیشتر شود.
- 4. حکاکی SiO₂: پشت ویفر را لیتوگرافی و با زدودن SiO₂ یک پنجره به ابعاد SiO₂: پشت ویفر را لیتوگرافی از میشود. برای انجام معملیات لیتوگرافی از دستگاه ماسک الاینر¹ مدل Karl Suss "شکل
 4" و برای فتورزیست کاری از دستگاه لایهنشانی چرخشی^۲ "شکل استفاده شده است.
- 5. حکاکی Si: با کمک TMAH، سیلیکون تا عمق 400μm زدوده می شود تا یک پوسته به ضخامت 60μm روی ویفر ایجاد شود.

6. حکاکی Cr: با انجام لیتوگرافی دوطرفه، روی ویفر را لیتوگرافی و یک

جدول 1 خواص برخی از مواد [1]

Table 1 Some of materials properties							
$\rm Si_3N_4$	Si	SiO_2	Al	Au	Su_8	واحد	خواص مواد
130	100	70	70	78	2	GPa	مدول يانگ(E)
0.25	0.28	0.25	0.35	0.44	0.22	-	نسبت پواسون
1.6	2.6	0.41	23.1	14.2	52	10^{-6} K ⁻¹	ضريب انبساط حرارتي(α)
29	149	1.1	235	323	0.3	$W(mK)^{-1}$	هدایت حرارتی(G)
10-14	1.56 ×10 ⁻³	10-14	35×10^7	$\begin{array}{c} 41 \\ \times 10^7 \end{array}$	$\begin{array}{c} 2.8 \\ \times 10^{\text{-12}} \end{array}$	Sm^{-1}	هدايت الكتريكى σ
2.6	2.33	2.3	2.7	19.3	1.19	gcm ⁻³	چگالی(م)
0.69	0.75	0.66	0.897	0.129	1.5	$Jg^{-1}K^{-1}$	ظرفیت گرمائی(C)

¹ Mask Aligner

² Spinner



Fig. 2 Description of fabrication process 1) Wafer Selecting, Cutting and Cleaning 2) SiO₂ growing on double side 3) Cr diposition to more protection 4) SiO₂ etching to open window 5) Si etching to make thin membrane 6) Cr etching to open window 7) Second Si etching to make thin membrane 8) SiO₂ removing 9) Cr removing 10) Fresh SiO₂ growing to make the main layer of cantilevers 11) SiO₂ etching to form the main layers of cantilevers 12) Rest Si etching to suspend micro cantilevers

شكل 2 توصيف فرآيند ساخت. 1) انتخاب ويفر، برش و تميزكارى بستر سيليكون 2) اكسيداسيون جهت ايجاد ماسك سيليكون 3) لايهنشانى كرم جهت محافظت بيشتر 4) حكاكى اكسيد سيليكون جهت ايجاد پنجره 5) حكاكى سيليكون جهت ساخت پوسته نازك 6) حكاكى كرم جهت ايجاد پنجره 7) حكاكى مجدد سيليكون جهت نازكسازى بيشتر 8) پاك كردن اكسيد سيلييكون 9) پاك كردن كرم 10) لايهنشانى لايه اصلى ميكروكانتيليور با اكسيد سيليكون 11) حكاكى اكسيد سيليكون جهت شكل دهى به كانتيليورها 21) حكاكى سيليكون باقىمانده در زير كانتيليورها و

پنجره همانند پنجره پشت در روی ویفر ایجاد میگردد، سپس کرم داخل پنجره از روی ویفر برداشته میشود. با برداشتن کرم در این مرحله، امکان نازکسازی بیشتر مهیا میشود، زیرا نور از سیلیکون با



Fig. 3 Oxidation oven image

شکل 3 تصویر کوره اکسیداسیون مورد استفاده

ضخامتهای نازک عبور میکند ولی با وجود کرم، نور از داخل سیلیکان عبور نمیکند. همچنین، از آنجائیکه کانتیلیورها بایستی در روی پوسته باشند، با ایجاد پنجره در این مرحله، امکان پترن صحیح کانتیلیورها بر روی پوسته میسر میشود.

- 7. حکاکی مجدد Si: امکان نازک سازی پوسته در مرحله پنجم وجود نداشت، زیرا با وجود کرم، امکان رویت پوسته نازک سیلیکون در روی ویفر وجود نداشت. لذا با برداشته شدن کرم در مرحله ششم، میتوان نازک سازی مرحله دوم Si توسط (TMAH(25%) را در این مرحله انجام داد. ضخامت پوسته پس از 50 دقیقه در دمای 80 درجه در حدود μμΩ می گردد.
- 8. پاک کردن SiO₂: ساختار اصلی کانتیلیورها از جنس SiO₂ است. از آنجائی که SiO₂ رشد داده شده، کیفیت مطلوب خود را در طی انجام فرآیندهای مختلف از دست داده است؛ لازم است که SiO₂ روی جدید با کیفیت مناسب رشد داده شود. به همین جهت SiO₂ روی ویفر با HF پاک می شود تا با پدیدار شده سیلیکون، زمینه برای رشد سیلیکون جدید مهیا می شود.
- 9. پاک کردن Cr: در این مرحله کرم روی ویفر با آمونیم سریم برداشته میشود.
- 10. لایه نشانی SiO₂: مجدداً ویفر در کوره قرار میگیرد تا اکسید تازه و باضخامت موردنظر برای کانتیلیورها در آن رشد یابد؛ زیرا لایه اصلی تشکیلدهنده میکروکانتیلیورها در این مرحله ایجاد میشود.
- 11. حکاکی SiO₂: در این مرحله روی نمونهها لیتوگرافی میشوند و اکسید از روی آن برداشته میشود تا لایه اصلی میکروکانتیلیور بر روی آن ایجاد شود.
- 12. حكاكي Si: در اين مرحله پوسته ساخته شده از جنس Si حكاكي و



Fig. 4 Mask aligner image

Fig. 5 Spinner image

شکل 5 عکس دستگاه لایه نشانی چرخشی

شکل 4 عکس دستگاه ماسک آلاینر

عملیات رهاسازی میکروکانتیلیورها از مایع انجام میشود.

TMAH از محلول المعانی، نمونهها در دمای محیط از محلول TMAH خارجشده و به مدت 5 دقیقه در داخل آب ID غوطهور می شوند تا آب جایگزین محلول TMAH گردد. مجدداً نمونهها به مدت 5 دقیقه در داخل آب ID غوطهور شده تا از معلقه دیگر در داخل آب ID تازه دیگری غوطهور شده تا از جایگزینی آب ID بهجای محلول TMAH اطمینان حاصل شود. در ماخل استون غوطهور می شوند تا استون جایگزینی آب ID شود. محدداً نمونهها از آب ID خارج شده و به مدت 5 دقیقه در محدداً نمونهها به مدت 5 دقیقه در محلول TMAH اطمینان حاصل شود. در محلول TMAH المینان حاصل شود. در فوطهور می شوند تا استون جایگزین آب ID شود. محدداً نمونهها به مدت 5 دقیقه دیگر در داخل استون تازه دیگری فوطهور می شوند تا از جایگزینی استون بهجای آب ID اطمینان حاصل شود. در پایان نمونهها از داخل استون بهجای آب ID اطمینان حاصل شود. در پایان نمونهها از داخل استون بهجای آب ای اطمینان توجه داشت که عملیات رهاسازی در دمای محیط انجام می شود و بناید از باد تمیز برای خشک کردن استفاده نمود.

جزئیات 13 مرحله فرآیند ساخت در جدول 2 بهطور کامل نشان داده شده است.

4- تحليل نتايج و بحث و نتيجه 1-4- نتايج تئورى

فرکانس رزونانس و ضریب فنریت کانتیلیور از جنس SiO₂ برحسب طول آن با پهنای 20μm و باضخامتهای 4μm، 3، 2 و 1 در "شکل 6" نشان داده شده است. محور افقی نمودار، طول کانتیلیورها از 150μm تا 450μm.

محور عمودی در سمت چپ و راست نمودار به ترتیب فرکانس رزونانس برحسب KHz و ضریب فنریت برحسب N/m است. نمودارهای ممتد با علامت دایره مربوط به فرکانس رزونانس و نمودارهای خطچین شده با علامت مربع مربوط به ضریب فنریت میباشند. این قاعده رسم نمودار برای "شکل 7 و 8" نیز رعایت شده است.

طبق رابطه (4) فرکانس رزونانس با مجذور طول کانتیلیور رابطه عکس و با ضخامت کانتیلیور رابطه مستقیم دارد؛ بنابراین با افزایش طول کانتیلیور، فرکانس رزونانس کاهش مییابد و با افزایش ضخامت کانتیلیور، فرکانس رزونانس افزایش مییابد. طبق رابطه (1) نیز ضریب فنریت با توان سوم طول رابطه عکس و با توان سوم ضخامت رابطه مستقیم دارد؛ بنابراین طبق "شکل 3" با افزایش طول و کاهش ضخامت کانتیلیور، ضریب فنریت کانتیلیور کاهش مییابد.

"شکل 7" فرکانس رزونانس و ضریب فنریت کانتیلیور را به ازای پهناهای 80μm ، 60، 40 و 20 نشان میدهد. طبق رابطه (4) فرکانس رزونانس با پهنای کانتیلیور رابطهای ندارد؛ بنابراین مقدار فرکانس رزونانس با

جدول 2 جزئيات فرآيند ساخت ميكروكانتيليورها

Table 2 Details of micro cantilever fabrication	n process
---	-----------

		Tuble 2 Details of fillero ea	indicited indifferential process	
~	7		شرح فعاليت	مرحله
	1-7		انتخاب ويفر، برش و تميزكاري	1
			انتخاب ويفر	1-1
ڸ	8	P(100)+ پوليش يکطرفه	نوع	
	1-8	460µm	ضخامت	
			برش	2-1
پا	9	1.2×1.2 cm	اندازه	
	1-9		تمیزکاری دوطرفه	3-1
		آب DI	شستشو مرحله i	
لا	10	Na ₂ OH (4.5%)	شستشو مرحله ii	
	1-10	آب DI	شستشو مرحله iii	
			لایه نشانی SiO ₂ در دو طرف	2
			لایه نشانی SiO ₂ در کوره اکسیداسیون	1-2
		5sccm	فشار تزریق Ar	
		1050°C / 30´	نرخ افزایش دما	
		20´ - 2sccm	فشار و زمان تزریق O و قطع Ar	
~	11	1hr	زمان تزریق آب DI و قطع O	
	1-11	1050°C at 20hr	t و T ماندگاری نمونه در کوره	
	6-11		لایه نشانی Cr درروی نمونه	3
			لايه نشانی Cr	1-3
	7-11	PVD	روش	
~	12	400nm	ضخامت لايه	
	1-12	1A/s	نرخ لایه نشانی	
			عمليات حرارتي	2-3
		5sccm	فشار تزریق Ar	
	2-12	400°C / 30´	نرخ افزایش دما	
		400°C at 1hr	t و T ماندگاری در کوره	
رە	13		حکاکی SiO ₂ پشت نمونه	4
			فتورزیستکاری با Shipley1813	1-4
		3000 rpm at 30"	دور و زمان لایه نشانی	
			پخت نرم	- ·
		95°C at 1'	زمان و دما	2-4

	نوردهی	3-4
20"	زمان	
	ظهور در محلول((4.5%) Na ₂ OH	4-4
30"	زمان	
	پخت سخت	5-4
125°C at 50'	زمان و دما	
	حکاکی SiO ₂ در BOE	6-4
15'	زمان	
	پاک کردن فتورزیست در استون	7-4
	حکاکی Si پشت نمونه	5
	حکاکی Si در (۲۸۵۹ TMAH)	1-5
95°C at 7hr	زمان و دما	
	حکاکی Cr	6
	ليتوگرافي همانند مرحله 4-1 تا 4-4	1-6
	پخت سخت	5-6
125°C at 5'	زمان و دما	
	حکاکی Cr در آمونیم سریم	6-6
2'	زمان	
	پاک کردن فتورزیست در استون	7-6
	حکاکی Si پشت نمونه	7
	حکاکی Si در (۳۵%) TMAH	1-7
95°C at 7hr	زمان و دما	
	پاک کردن SiO ₂ دو طرف نمونه	8
	پاک کردن SiO ₂ در (HF(20%)	1-8
15'	زمان	
	پاک کردن Cr روی نمونه	9
	پاک کردن Cr در آمونیم سریم	1-9
2'	زمان	
	لایه نشانی SiO ₂ لایه اصلی	10
	لایه نشانی SiO ₂ در کوره اکسیداسیون	1-10
5sccm	فشار تزریق Ar	
1050°C / 30′	نرخ افزایش دما	
20´ - 2sccm	فشار و زمان تزریق O و قطع Ar	
1 hr	زمان تزريق أب DI و قطع O	
1050°C at 8hr	t و T ماندگاری در کوره	
	حکاکی SiO ₂ لایه اصلی	11
	لیتوگرافی همانند مرحله 4-1 تا 4-5	1-11
1.57	حکاکی SiO ₂ در BOE	0-11
15'	زمان	
	پاک دردن فتورزیست در استون عامی iS اتبیانی	/-11
1.1.1	حکاکی ۵۱ باقیمانده در زیر کانتیلیور ۲۰۰۰ یا ۲۰۰۰ LIE	12
لحطفاي	معروق در (۳/۵۳ باید : تشفید در آ	1 12
5	رمان معروق سدن در آب DT	
5	رمان معروق سدن در آب DI تمیز حکاکه Si د (۳۵۵/۲۵۲	2-12
80°C at 2hr		2 12
ou C at 2nr	زمان و دما حلب ایم بر کریکان ^ی ایم	13
51	ر هاساری میکرو تانیییور ۱۰۰۰ - ۲۰۰۰ میکرو تانی DL	10
5	زمان معروق سدن در آب اط ۱۰ ۰ ۰ ۰ ۰ ۰ ۰ ۰ ۰ آب DI تو ۰	
5	زمان معروق شدن در آب ۲۰ تمیر	
5	زمان معروق سدن در استون	
5'	زمان معروق شدن در استون تمیر	



Fig. 6 Numerical analysis results of the resonance frequency (the left vertical axes) and spring constant (the right vertical axes) of the SiO₂ cantilever for the different lengths of 150, 200, 250, 300, 350, 400 and 450 μ m with 1, 2, 3 and 4 μ m thicknesses and 20 μ m width

شکل 6 نمودار فرکانس رزونانس و ضریب فنریت کانتیلیور از جنس SiO₂ برحسب طول آن با پهنای 20um و ضخامتهای 1um، 2 ،3 و 4. محورهای عمودی در سمت چپ و راست شکل به ترتیب فرکانس رزونانس و ضریب فنریت میباشند.



Fig. 7 Numerical analysis results of the resonance frequency and spring constant for the different widths with 1µm thickness شکل 7 نمودار فرکانس رزونانس و ضریب فنریت برحسب پهناهای مختلف کانتیلیور با ضخامت t=1um

تغییر پهنا مطابق شکل ثابت میماند. ضریب فنریت طبق رابطه (1) با پهنای کانتیلیور رابطه مستقیم دارد لذا با افزایش پهنای کانتیلیور، مقدار ضریب فنریت بهصورت خطی افزایش خواهد یافت.

در "شکل 8" نمودار فرکانس رزونانس و ضریب فنریت برای مواد مختلف ترسیم شده است. مواد مختلف در محور افقی این شکل به ترتیب از بیشترین مقدار مدول یانگ به کمترین مقدار مرتب شده است که Si₃N₄ و SU₈ به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار مدول یانگ را دارند. براساس رابطه (1) و (4) ضریب فنریت و فرکانس رزونانس با مدول یانگ رابطه مستقیم دارد؛ بنابراین با کم شدن مدول یانگ، مقدار فرکانس رزونانس و ضریب فنریت کاهش مییابد؛ اما نمودار فرکانس رزونانس در Iu از پیوستگی منظم برخوردار نیست و مقدار آن بهشدت کاهش یافته است. فرکانس رزونانس با

ریشه دوم جرم حجمی مواد رابطه عکس دارد و از آنجائی که جرم حجمی طلا طبق جدول 1 حدوداً 10 برابر بیشتر از مواد مشابه دیگر است؛ بنابراین مقدار فرکانس رزونانس کانتیلیور از جنس طلا حدوداً 3 برابر کمتر از مواد دیگر خواهد شد.

2-4- نتايج ساخت

جهت کنترل فرآیند در حین فرآیند ساخت، از مراحل مختلف عکسبرداری شده است که در ادامه به بررسی برخی از آنها پرداخته خواهد شد.

"شكل 9" تصویر نوری حاصل از میكروسكوپ نوری از نتیجه حكاكی SiO₂ پشت زیر لایه توسط محلول BOE در مرحله 4 را نشان می دهد. لبههای صاف پنجره مربعی شكل در این تصویر نشان می دهد كه عملیات لیتوگرافی باوجود ناهمواری در پشت زیر لایه به خوبی انجام شده است. همچنین این شكل نشان می دهد كه 1) SiO₂ به خوبی زدوده شده است و شكل پنجره مربعی شكل بعد از عملیات زدایش حفظ شده است. 2) فتورزیست ماسك خوبی برای SiO₂ بوده است؛ زیرا در داخل BOE به خوبی



Fig. 8 Resonance frequency and the spring constant for different materials with $t=1\mu$ m, $w=20\mu$ m and $L=150\mu$ m

شکل 8 نمودار فرکانس رزونانس و ضریب فنریت بر جنس مواد مختلف برای کانتیلیور با مشخصات *μ*=1μm, w=20μm و *L*=150μm



Fig. 9 The optical image of backside SiO_2 etching using BOE etchant in Step 4 to form a square window shape

شکل 9 تصویر نوری با میکروسکوپ نوری از حکاکی SiO₂ پشت زیرلایه در مرحله 4 با BOE جهت ایجاد پنجره مربعی شکل



Fig. 10 The SEM image of 400 μm silicon etching using TMAH (25%) in stage five

شکل 10 تصویر روبشی از حکاکی سیلیکان در مرحله 5 به عمق 400μm با (TMAH(25%)

دوام آورده است بهطوریکه سطح SiO₂ در خارج پنجره مربعی شکل صدمه نخورده است.

"شکل 10" تصویر روبشی از سیلیکون حکاکی شده تا عمق 400µμ با محلول (%TMAH(25 در مرحله 5 را نشان میدهد. حفظ شکل مربع بیرونی روی زیر لایه و مربع داخلی بعد از حکاکی، نشان میدهد که جهت لیتوگرافی برای ایجاد پنجره در عملیات لیتوگرافی مرحله 5 بهدرستی رعایت شده است و کنترل عملیات زدایش Si نیز قابلقبول است (شکل 10 (الف)). خراشهای لبه پنجره، نشاندهنده زیر بریدگی سیلیکون است. این شکل نشان میدهد که دور مربع خارجی ماسک SiO در اثر خشک کردن با باد در حین فرآیند ساخت صدمه خورده و شکل خود را از دست داده است. همچنین تصویر روبشی نشان میدهد که ناهمواری سطح در عمق سیلیکون ناچیز و نامحسوس است.

"شکل 10 (ب)" تصویر روبشی مورب از سیلیکون حک شده را نشان میدهد. این تصویر نشان میدهد که شکل شیب زدایش Si در محلول TMAH حفظ شده است و همچنین نشان دهنده کنترل صحیح فرآیند ساخت است.

در "شکل 11" تصاویر حکاکی لایه اصلی کانتیلیورها در مرحله 11 به کمک میکروسکوپ نوری با تابش نور از زیر بستر نشان داده شده است. کانتیلیورها با پهنای 40µm در محور افقی و کانتیلیورها با پهنای 20µm در محور عمودی به ترتیب با طولهای 50µmt، 100، 100، 200، 200، 200 قرو 400 قرار گرفته است. این شکل نشان میدهد که حکاکی و عملیات لیتوگرافی لایه اصلی کانتیلیورها بهدرستی انجام شده است. نواحی قرمزرنگ تصویر نشان میدهد که ضخامت پوسته سیلیکونی بسیار نازک است، زیرا نور از سیلیکون عبور کرده است. همچنین قرار گرفتن کانتیلیورها در نواحی قرمز رنگ نشان میدهد که لیتوگرافی دوطرفه نیز بهدرستی انجام شده است.

تصاویر نهایی کانتیلیورها از جنس SiO₂ به کمک میکروسکوپ الکترونی عکسبردرای شده است. ضخامت کانتیلیورهای ساخته شده متفاوت بوده که در ادامه، تصاویر آنها نشان داده خواهد شد.

تصویر نهائی روبشی کانتیلیورهای معلق ساختهشده به ضخامت 1μm از روبرو در "شکل "12 نشان داده شده است. عرض کانتیلیورهای باریک 20μm و عرض کانتیلیورهای عریض تر نیز 40μm است. طول این کانتیلیورها به ترتیب از 50μm تا 400μm با گامهای 50μm است. ضخامت لایه اکسید باضخامتسنج بهاندازه 1.1μm اندازه گیری گردید.

تصاویر دو سری از کانتیلیورها ساخته شده به ضخامت 2μm و عرض 20µm به طول 50µm تا 400µμ با گامهای 50µm در "شکل 13" نشان داده شده است. شکل الف، تصویر روبشی از بالا را نشان میدهد و شکل ب، تصویر روبشی مورب از کانتیلیورها را نشان میدهد. این اشکال نشان میدهند که کانتیلیورها معلق شدهاند.

"شکل 14" نیز نشاندهنده همین نوع کانتیلیورها با عرض 40μm است. این شکل، تصویر روبشی مورب از کانتیلیورها را نشان میدهد که کانتیلیورها به حالت معلق درآمده و استرس آنها نیز ناچیز است.

عملیات رهاسازی کانتیلیورها از مایع در دمای پایین انجام میشود؛ بنابراین انتظار میرود که استرس آنها بعد از معلقسازی محسوس نباشد.



Fig. 11 The images of microcantilever main layer etching in step 11 by an optical microscopy with lighting under the substrate شکل 11 تصاویر نوری کانتیلیورها بعد از حکاکی لایه اصلی در مرحله 11 توسط میکروسکوپ نوری با نوردهی از پشت بستر



Fig. 12 The final SEM image of microcantilever with 1 µm thickness شکل 12 تصویر روبشی نهائی از کانتیلیورها به ضخامت 14 شکل 12



Fig. 13 The SEM images of two series of fabricated microcantilever with 2μm thickness A) top view B) tilt view

شکل 13 تصاویر دو سری از کانتیلیورها به ضخامت 2μm با عرض 20μm الف) تصویر از بالا ب) تصویر مورب

همان طور که از "شکل 10 و 11" ملاحظه می شود، میزان خمیدگی کانتیلیورها کم است بنابراین استرس کانتیلیورها بعد از رهاسازی ناچیز است. برای این که بتوان ضخامت کانتیلیورها را با SEM اندازه گرفت، تصویر

عرضی یکی از آنها طبق "شکل 15" بزرگ شد تا ضخامت اندازه گیری شود. این شکل نشان میدهد که ضخامت کانتیلیورهای ساخته شده در حدود 2.66µm است. متأسفانه، خطای اندازه گیری زیاد و مقادیر قابل قبول نیست؛ زیرا زاویه عکسبرداری از نمونه ⁰⁰0 نبود؛ به همین جهت ضخامت کانتیلیورها توسط دستگاه ضخامتسنج اندازه گیری شد که مقدار آن در حدود 2.2µm گردید که با در نظر گرفتن خطای اندازه گیری تقریباً با مقدار اندازه گیری شده از طریق تصویر روبشی مطابقت دارد.

در "شکل 16" تصویر روبشی از یک کانتیلیور به ضخامت 600nm به طول 160µm با عرض 20µm به صورت زاویه دار (مورب) نشان داده شده است. برای اندازه گیری ضخامت از دستگاه ضخامت سنج استفاده شد که مقدار ضخامت در حدود 590nm اندازه گیری شد. این شکل نشان می دهد که تنها یکی از کانتیلیورها سالم مانده است و بقیه آنها در طول فرآیند ساخت کنده شده است. همچنین این شکل نشان می دهد که کنترل فرآیند ساخت کانتیلیورها باضخامت های کمتر مشکل است؛ اما سالم ماندن یک کانتیلیور نشان می دهد که با بهینه سازی و کنترل دقیق تر کنترل فرآیند ساخت، می توان کانتیلیورهایی باضخامت کمتر را نیز ساخت.

5- نتیجه گیری

در این مقاله، فرآیند ساخت کانتیلیورها از جنس SiO₂ شرح دادهشده است.



Fig. 14 The SEM image of SiO_2 microcantilever with 1 μ m thickness and 40 μ m width

شکل 14 تصاویر SEM کانتیلیورهای از جنس SiO₂ به ضخامت 2µm و عرض 40µm



Fig. 15 The thickness measurement of the cantilever with SEM شکل 15 اندازه گیری ضخامت کانتیلیور با SEM

- [8] H. J. Cho, H. A. Chong, A bidirectional magnetic microactuator using electroplated permanent magnet arrays, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 1, No. 1, pp. 78-84, 2002.
- [9] N. Abedinov, C. Popov, Z. Yordanov, I.W. Rangelow, Investigations of the sorption behaviour of amorphous nitrogen-rich carbon nitride films as sensitive layers for cantilever-based chemical sensors, *Applied Physics A*, Vol. 79, No. 3, pp. 531-536, 2004.
- [10] A. Loui, D. J. Sirbuly, S. Elhadj, S. K. McCall, Detection And Discrimination Of Pure Gases And Binary Mixtures Using A Single Microcantilever, *Sensors and Actuator*, Vol. 159, No. 1, pp. 58-63, 2009.
- [11] C. Y. Lee, C. Y. Wen, H. H. Hou, R. J. Yang, Design and characterization of MEMS-based flow-rate and flow-direction microsensor, *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 6, No. 3, pp. 363-371, 2009.
 [12] J. Yinon, Peer reviewed: detection of explosives by electronic noses,
- [12] J. Yinon, Peer reviewed: detection of explosives by electronic noses, Analytical Chemistry, Vol. 75, No. 5, pp. 98-A, 2009.
- [13] P.G. Datskos, S. Rajic, C.M. Egert, I. Datskou, Detection of Infrared Photons Using the Electronic Stress in Metal-semiconductor Interfaces, *Infrared Technology and Applications XXV*, Orlando, Proceeding of SPIE, pp. 151-160, 1998
- [14] H. Abdollahi, H. Hajghassem, S. Mohajerzadeh, Simple fabrication of an uncooled Al/SiO₂ microcantilever IR detector based on bulk micromachining, *Microsystem Technologies*, Vol. 20, No. 3, pp. 387-396, 2014.
- [15] C.N. Chen, Fully quantitative characterization of CMOS-MEMS polysilicon/titanium thermopile infrared sensors, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 161, No. 1, pp. 892-900, 2012.
- [16] D. T. Nguyen, F. Simoens, J. L. Ouvrier-Buffet, J. Meilhan, J. L. Coutaz, Broadband THz uncooled antenna-coupled microbolometer array electromagnetic design, simulations and measurements, *IEEE Transactions* on *Terahertz Science and Technology*, Vol. 2, No. 3, pp. 299-305, 2012.
- [17] Y. Xiang, J. Tian, Z. Zhang, Y. Dai, Diagnosis of endometrial cancer based on back-propagation neural network and near-infrared spectroscopy of tissue, *In Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, Sixth International Conference*, Tianjin, China, IEEE, Vol. 3, pp. 508-512, 2009
- Tianjin, China, IEEE, Vol. 3, pp. 508-512, 2009
 [18] C. A. Rowe, L. M. Tender, M. J. Golden, S. B. Scruggs, Array biosensor for simultaneous identification of bacterial, viral, and protein analytes, *Analytical Chemistry*, Vol. 71, No. 17, pp. 3846-3852, 1999.
- [19] H. Kim, A. A. Astle, K. Najafi, L. P. Bernal, An Integrated Electrostatic Peristaltic 18-Stage Gas Micropump With Active Microvalves. *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 24, No. 1, pp. 192-206, 2015.
- [20] R. Kassing, E. Oesterschulze, Sensors for scanning probe microscopy, *Micro/Nanotribology and Its Applications, Springer Netherlands*, Vol. 76, No. 6, pp. 907–911, 2003.
- [21] A. K. mohammadi, M. Abbasi, Nonlinear vibration analysis of a dynamic atomic force microscope microcantilever in the tapping mode based on the modified couple stress theory, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 11, pp. 9-17, 2015. (in Persian فارسي)
- [22] F. Samaeifar, A.Afifi, H. Abdollahi, The effect of the using a thin silicon island underneath the micro-hotplate membrane on the MEMS micro-heater performance, *Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, Vol. 9, No. 3, pp. 93-106, 2015. (in Persian فارسی)
- [23] F. Samaeifar, H. Hajghassem, H. Abdollahi, M. Mohtashamifar, Design and Fabrication of high temperature MEMS platinum micro-heater based on suspended membrane structure, *Journal of Electronics Industries*, Vol. 4, No. 1, pp. 25-32, 2014 (in Persian فارسى)
- [24] F. Samaeifar, H. Hajghassem, A. Afifi, H. Abdollahi, Implementation of high-performance MEMS platinum micro-hotplate, *Sensor Review*, Vol. 35, No. 1, pp. 116-124, 2015.
- [25] F. Samaeifar, A. Afifi, H. Abdollahi, Simple Fabrication and Characterization of a Platinum Microhotplate Based on Suspended Membrane Structure, *Experimental Techniques*, 2014.
- [26] M. Ghanbari, S. Hossainpour, G. Rezazadeh, Effect of fluid media on vibration of a microbeam resonator using micropolar theory, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 205-210, 2015. (in Persian فارسى)
- [27] H. Mao, K.D. Silva, M. Martyniuk, J. Antoszewski, J. Bumgarner, B.D. Nener, J.M. Dell, L. Faraone, MEMS-Based Tunable Fabry–Perot Filters for Adaptive Multispectral Thermal Imaging, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 25, No. 1, pp. 277-235, 2016.
 [28] S. L. Biswal, D. Raorane, A. Chaiken, A. Majumdar, Using a microcantilever
- [28] S. L. Biswal, D. Raorane, A. Chaiken, A. Majumdar, Using a microcantilever array for detecting phase transitions and stability of DNA, *Clinics in laboratory medicine*, Vol. 27, No. 1, pp. 163-171, 2007.
- [29] D. Arecco, R. Pryputniewicz, Design and analysis of MEMS chemical sensor, *Proceeding. 4th International Symposium on MEMS and Nanotechnology*, Arlington: IEEE, pp. 211-216, 2003.
 [30] F. M. Battiston, J-P. Ramseyer, H. P. Lang, M. K. Baller, Güntherodt, A
- [30] F. M. Battiston, J-P. Ramseyer, H. P. Lang, M. K. Baller, Güntherodt, A chemical sensor based on a microfabricated cantilever array with simultaneous resonance-frequency and bending readout, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 77, No. 1, pp. 122-131, 2001.[31] S. R. Manalis, S. C. Minne, C. F. Quate, G. G. Yaralioglu, Two-dimensional
- [31] S. R. Manalis, S. C. Minne, C. F. Quate, G. G. Yaralioglu, Two-dimensional micromechanical bimorph arrays for detection of thermal radiation, *Applied Physics Letters*, Vol. 70, No. 24, pp. 3311-3313, 1997.
- Physics Letters, Vol. 70, No. 24, pp. 3311-3313, 1997.
 [32] D. Zhi-Hui, Z. Qing-Chuan, W. Xiao-Ping, P. Liang, Uncooled Optically Readable Bimaterial Micro-Cantilever Infrared Imaging Device, *Chinese Physics Letters*, Vol. 20, No. 12, pp. 2130, 2003.
- [33] S.R. Hunter, G. Maurer, L. Jiang, G. Simelgor, High sensitivity Uncooled microcantilever infrared imaging arrays, *Infrared Technology and Applications XXIX*, Orlando, Proceeding of SPIE, pp. 469-480, 2006.



Fig. 16 The tilt SEM image of cantilever with 600 nm thick, 160 μ m length and 20 μ m width

شکل 16 تصویر زاویه دار از کانتیلیور به ضخامت 600nm، به طول 160μm و به عرض 20μm

كانتیلیورها به طولهای πμ ب00، 100، 150، 200، 200، 300 و 400 و به عرضهای 20µm و 40 باضخامت 1µm و 2 برای SiO₂ ساخته شدند. با طراحی فرآیند ساخت ارائه شده، این کانتیلیورها را میتوان به سرعت در آزمایشگاههای میکروالکترونیک با تجهیزات محدود مانند لیتوگرافی، کوره اکسیداسیون و لایه نشانی با یک روش ساده و کم هزینه ساخت کانتیلیورها. این فرآیند با حداقل عملیات لیتوگرافی و با حداقل تعداد ماسک ساخته شده است به طوری که ساخت آنها با دو عملیات لیتوگرافی یک طرفه و یک عملیات لیتوگرافی دوطرفه به وسیله یک ماسک شیشه ای و یک ماسک طلقی تحققیافته است. معلق سازی کانتیلیورها به روش رهاسازی تر است و از پیچیدگی رهاسازی کانتیلیورها از لایه قربانی اجتناب شده است. با این روش، می توان کانتیلیورهایی از جنس SiO2 با شکلهای هندسی مختلف را ساخت.

6- تقدير و تشكر

برای ساخت میکروکانتیبورهای ذکر شده در این مقاله از امکانات آزمایشگاه لایه نازک دانشگاه مالک اشتر استفاده شده است. شایسته است از آقای دکتر حسن حاج قاسم از دانشگاه تهران و زحمات آقایان مهندس منصور محتشمیفر و مجیدرضا علیاحمدی از دانشگاه مالک اشتر که در انجام این تحقیق، بنده را یاری نمودهاند، کمال تقدیر و تشکر را بنمایم.

7- مراجع

- S. K. Vashist, A review of microcantilevers for sensing applications, J. of Nanotechnology, Vol. 3, pp. 1-18, 2007.
 C. Hilbert, H. Curtis, C. Anagnostopoulos, R. Finnila, MEMS and
- microsystems in Europe, International Technology Research Institute, 2000; http://www.wtec.org/loyola/mcc/mems_eu/
- W. Wang, V. Upadhyay, C. Munoz, J. Burngarner, FEA simulation, design, and fabrication of an uncooled MEMS capacitive thermal detector for infrared FPA imaging, *Infrared Technology and Applications XXXII*, Orlando, Proceeding of SPIE 6206, pp. 62061L-620612L, 2006.
 A. Albarbar, A. Badri, K. Jyoti, J.K. Sinha, Performance evaluation of
- [4] A. Albarbar, A. Badri, K. Jyoti, J.K. Sinha, Performance evaluation of MEMS accelerometers, *Measurement*, Vol. 42, No. 5, pp. 790-795, 2009.
- [5] L.T. Chen, C.Y. Lee, W.H. Cheng, MEMS-based humidity sensor with integrated temperature compensation mechanism, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 147, No.2, pp. 522-528, 2008.
- [6] B. Wang, J. Lai, E. Zhao, H. Hu, Vanadium oxide microbolometer with gold black absorbing layer, *Optical Engineering*, Vol. 51, No. 7, pp. 0740031-0740037, 2012.
- [7] M. Sadeghi, M. Fathalilou, G. Rezazadeh, Study On the Size Dependent Behavior of a Micro-beam Subjected to a Nonlinear Electrostatic Pressure, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 137-144, 2015. (in Persian فارسی)

DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.5.21.9