مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1396، دوره 17، شماره 5، ص‌ص 12-20

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

ساخت سریع میکرو کانتیلیورهای تک‌ماده‌ای از جنس SiO_2 با هزینه کم بر پایه فناوری میکروماشین‌کاری حجمی

حسن عبداللهی*

استادیار، مهندسی برق، دانشگاه هوائی شهید ستاری، تهران

* تهران، صندوق پستی 1384673411، h.abd@ssau.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 18 دی 1395
پذیرش: 20 بهمن 1395
ارائه در سایت: 09 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:
میکروماشین کاری حجمی
میکروکانتیلیور
رهاسازی تر و MEMS

چکیده

از آن‌جائی‌که کانتیلیورها پایه و اساس بیشتر قطعات مبتنی بر ساختارهای MEMS می‌باشند، در این مقاله فرآیند ساخت کانتیلیور با فناوری میکروماشین‌کاری حجمی بیان شده است و از آن فرآیند برای ساخت آرایه‌ای از میکروکانتیلیورهای تک‌ماده‌ای از جنس SiO_2 استفاده شده است. نتایج حاصل از این مقاله می‌تواند پایه و اساس طراحی و ساخت حسگرهایی باشد که بر پایه کانتیلیور از جنس SiO_2 استوار است. طراحی فرآیند ساخت کانتیلیورها در 13 مرحله با 2 ماسک شیشه‌ای و طلقی انجام‌شده است و معلق‌سازی آن‌ها نیز به روش رهاسازی‌تر است. از مهم‌ترین مزایای روش ارائه‌شده می‌توان به عدم نیاز به تجهیزات پیشرفته لایه نشانی، طراحی با حداقل ماسک، سادگی در پیاده‌سازی سریع کانتیلیورها، اجتناب از پیچیدگی رهاسازی از لایه قربانی، رهاسازی کانتیلیور در دمای محیط، کم هزینه بودن و در نهایت امکان پیاده‌سازی آن در آزمایشگاه‌های میکروالکترونیک با تجهیزات محدود اشاره نمود. کانتیلیورهای تک‌ماده‌ای از جنس SiO_2 با طول‌های 50μm، 100، 150، 200، 250، 300، 350 و 400، به ضخامت‌های1μm و 2 و به عرض‌های 20μm و 40 ساخته شدند. مقادیر فرکانس رزونانس و ثابت فنر آن‌ها نیز برای مواد مختلف Si_3N_4، Si، Au، SiO_2، Al و SU_8 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 کانتیلیورها با استرس ناچیز 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

Original Research Paper
Received 07 January 2017
Accepted 08 February 2017
Available Online 29 April 2017

Keywords:
Bulk micromachining
Micro cantilever
Wet release and MEMS

ABSTRACT

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 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 1and 2μm thickness, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 and 400μm lengths, and 20 and 40μm widths. The resonant frequency and the spring constant values are also calculated for different materials (Si_3N_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.

1- مقدمه

در حال حاضر یکی از حوزه‌های تحقیقاتی فعال دنیا، موضوع سامانه‌های میکروالکترومکانیکال[1] (MEMS) است. این سامانه‌ها ترکیبی از قطعات 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] Micro electro mechanical system

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. Abdollahi, Fast and low lost fabrication of SiO_2 microcantilever based on Bulk microelectromechanical system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 12-20, 2017 (in Persian)

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 می‌توان تعداد صدها عدد از آن‌ها را به‌صورت آرایه در یک چیپ قرار داد تا قیمت تمام شده به ازای هر قطعه به‌شدت کاهش یابد. با این قابلیت می‌توان قطعات و حسگرهای یک‌بار مصرف را با توجیه اقتصادی مناسبی تهیه کرد [3].

کانتیلیورها[1] پایه و اساس قطعات مبتنی‌بر ساختارهای MEMS می‌باشند و کاربردهای گسترده‌ای درشتاب‌سنج‌ها [4]، حس‌گرهای رطوبت [5]، حرارت‌سنج‌ها [6]، فشارسنج‌ها[7]، آشکارساز ذرات مغناطیسی [8]، شیمیایی [9]، گاز [10]، جریان [11]، مواد منفجره [12]، فوتون [13]، مادون‌قرمز [14،15]، ترا هرتز [16]، سرطان [17] - بایوچیپ‌ها [18]– ساخت میکروپمپ [19]، پروب [20]، تیپ AFM [21]، میکرو صفحه داغ [22-25]، رزوناتور [26]، فیلترها [27] و تشخیص بیوملکول‌ها [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 تعریف، کانتیلیور تیغه‌ای است که تنها یک سمت آن محکم شده است و سر دیگر آن آزاد است. در "شکل 1" تصویر یک کانتیلیور ساده نشان داده شده است. وقتی از کانتیلیور به‌عنوان حسگر استفاده می‌شود، از تغییرات فرکانس ارتعاش و یا میزان خمش آن به‌عنوان مؤلفه‌های برای اندازه‌گیری استفاده می‌شوند. برای مثال، میزان مولکول جذب شده بر روی کانتیلیور باعث تغییر در فرکانس ارتعاش تیغه می‌گردد. همچنین مؤلفه‌هایی مثل وسیکوسیتی، چگالی و یا نرخ جریان مایعات و یا گازها می‌توانند باعث تغییر در فرکانس ارتعاش کانتیلیور گردند [29].

سیلیکون ماده مطلوبی برای ساخت قطعات نیمه‌هادی است زیرا دارای اکسید پایدار بوده و از نظر الکتریکی عایق است. شکل‌های مختلف اکسیدهای سیلیکون (SiO_2، SiO_X، سیلیکات شیشه) عایق‌های الکتریکی و گرمایی خوبی هستند و به‌طور گسترده‌ای در میکروماشین‌کاری به‌کار می‌روند. همچنین با انتخاب دقیق آن‌ها روی سیلیکون، می‌توان سیلیکون را در اسید هیدروفلوراید به‌خوبی سونش نمود. دی‌اکسید سیلیکون (SiO_2) به‌وسیله اکسید کردن سیلیکون یا گرم کردن در دماهای بالای $800^{o}C$ رشد می‌کند، درصورتی‌که شکل‌های 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 میکروماشین‌کاری 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

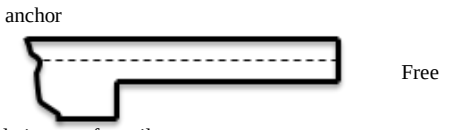

Fig. 1 A simple image of cantilever

شکل 1 یک تصویر ساده از کانتیلیور

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، همان‌طور که از جدول 1 ملاحظه می‌شود، ضریب انبساط حرارتی، هدایت حرارتی و هدایت الکتریکی SiO_2 از مواد دیگر کمتر است. لذا SiO_2 ماده مناسبی است که می‌توان به کاربردهای آن در ساخت آشکارسازهای حرارتی، مادون قرمز، تراهرتز، میکروهیترها، شتاب‌سنج‌ها، میکروآینه‌ها و... مبتنی‌بر فناوری میکروماشین‌کاری اشاره نمود. در این روش، تنها به دستگاه‌های ابتدائی لیتوگرافی، کوره اکسیداسیون و دستگاه لایه نشانی نیاز است. معلق‌سازی کانتیلیور، با رهاسازی آن از مایع به روش تر[2] انجام می‌شود تا از پیچیدگی فرآیند با رهاسازی خشک[3] اجتناب شود. بقیه مراحل کار نیز به‌طور شیمیایی انجام می‌شود.

2- روابط حاکم بر کانتیلیورها

ضریب فنریت[4] و فرکانس رزونانس[5] 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 می‌شود نسبت میان نیرو و نتیجه خمش کانتیلیور با رابطه (F= -kz) مشخص می‌شود که در آن:

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

در این رابطه

E: (Pa) مدول یانگ

L: (m) طول کانتیلیور

w: (m) پهنای کانتیلیور

t: (m) ضخامت کانتیلیور

در معادله فوق، تأثیر ابعاد کانتیلیور در ضریب فنریت را می‌توان دید. فرکانس رزونانس f_{res} برای یک کانتیلیور ساده با رابطه (3) به‌دست می‌آید.

$$f_{\mathrm{res}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m_{\mathrm{eff}}}}\ (\mathrm{Hz}) \tag{2}$$

در این رابطه:

m_{eff}: (kg) جرم مؤثر کانتیلیور

جرم مؤثر یک کانتیلیور نیز از رابطه (2) به دست می‌آید.

$$m_{\mathrm{eff}} = \frac{33}{140}\rho wtL\ (\mathrm{kg}) \tag{3}$$

در این رابطه:

ρ: (kgm^{-3}) چگالی جرمی

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

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

3- طراحی فرآیند ساخت

جهت ساخت کانتیلیور، از مواد گوناگونی در فرآیندهای ماشین‌کاری استفاده می‌شود تا بتوان قطعات پیچیده سه‌بعدی و دقیقی ساخت. جنس کانتیلیورهای تجاری معمولاً از سیلیکون (Si) [31]، نیتریت سیلیکون (SiN)

[1] Cantilever

[2] Wet-release
[3] Dry-release
[4] Spring constant
[5] Resonant frequency

[32] یا اکسید سیلیکون (SiO_2) [33] می‌باشند که در اندازه‌ها و شکل‌های مختلف و با حساسیت‌های مختلف عرضه می‌گردند. 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:

1. 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 SiO_2: ویفر سیلیکون در کوره اکسیداسیون قرار می‌گیرد تا دو طرف آن به ضخامت 2µm اکسید شود. نسبت خورندگی Si/SiO_2 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 SiO_2 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 می‌گیرند تا استحکام کرم در طی فرآیند بیشتر شود.
4. حکاکی SiO_2: پشت ویفر را لیتوگرافی و با زدودن SiO_2 یک پنجره به ابعاد 2×2mm برای ساخت غشاء سیلیکونی باز می‌شود. برای انجام عملیات لیتوگرافی از دستگاه ماسک الاینر[1] مدل Karl Suss "شکل 4" و برای فتورزیست‌کاری از دستگاه لایه‌نشانی چرخشی[2] "شکل 5" 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

خواص مواد	واحد	Su8	Au	Al	SiO_2	Si	Si_3N_4
مدول یانگ(E)	GPa	2	78	70	70	100	130
نسبت پواسون	-	0.22	0.44	0.35	0.25	0.28	0.25
ضریب انبساط حرارتی(α)	$10^{-6}K^{-1}$	52	14.2	23.1	0.41	2.6	1.6
هدایت حرارتی(G)	$W(mK)^{-1}$	0.3	323	235	1.1	149	29
σهدایت الکتریکی	Sm^{-1}	2.8×10^{-12}	41×10^{7}	35×10^{7}	10^{-14}	1.56×10^{-3}	10^{-14}
چگالی(ρ)	gcm^{-3}	1.19	19.3	2.7	2.3	2.33	2.6
ظرفیت گرمائی(C)	$Jg^{-1}K^{-1}$	1.5	0.129	0.897	0.66	0.75	0.69

[1] Mask Aligner
[2] Spinner

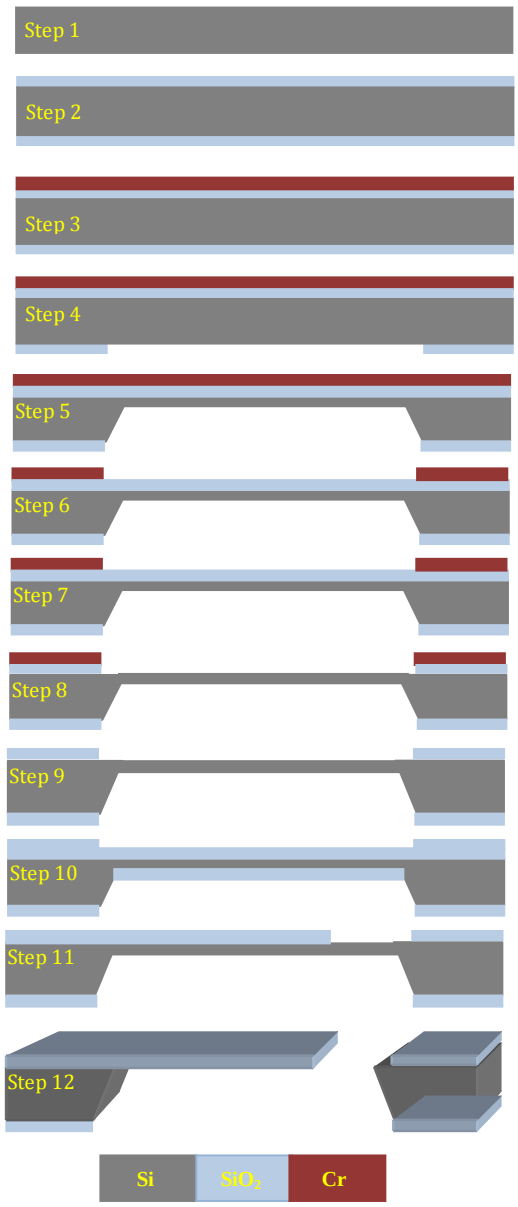

Fig. 2 Description of fabrication process 1) Wafer Selecting, Cutting and Cleaning 2) SiO_2 growing on double side 3) Cr diposition to more protection 4) SiO_2 etching to open window 5) Si etching to make thin membrane 6) Cr etching to open window 7) Second Si etching to make thin membrane 8) SiO_2 removing 9) Cr removing 10) Fresh SiO_2 growing to make the main layer of cantilevers 11) SiO_2 etching to form the main layers of cantilevers 12) Rest Si etching to suspend micro cantilevers

شکل 2 توصیف فرآیند ساخت. 1) انتخاب ویفر، برش و تمیزکاری بستر سیلیکون 2) اکسیداسیون جهت ایجاد ماسک سیلیکون 3) لایه‌نشانی کرم جهت محافظت بیشتر 4) حکاکی اکسید سیلیکون جهت ایجاد پنجره 5) حکاکی سیلیکون جهت ساخت پوسته نازک 6) حکاکی کرم جهت ایجاد پنجره 7) حکاکی مجدد سیلیکون جهت نازک‌سازی بیشتر 8) پاک کردن اکسید سیلییکون 9) پاک کردن کرم 10) لایه‌نشانی لایه اصلی میکروکانتیلیور با اکسید سیلیکون 11) حکاکی اکسید سیلیکون جهت شکل دهی به کانتیلیورها 12) حکاکی سیلیکون باقی‌مانده در زیر کانتیلیورها و عملیات رهاسازی

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 20µm می‌گردد.
8. پاک کردن SiO_2: ساختار اصلی کانتیلیورها از جنس SiO_2 است. از آن‌جائی‌که SiO_2 رشد داده شده، کیفیت مطلوب خود را در طی انجام فرآیندهای مختلف از دست داده است؛ لازم است که SiO_2 جدید با کیفیت مناسب رشد داده شود. به همین جهت SiO_2 روی ویفر با HF پاک می‌شود تا با پدیدار شده سیلیکون، زمینه برای رشد سیلیکون جدید مهیا می‌شود.
9. پاک کردن Cr: در این مرحله کرم روی ویفر با آمونیم سریم برداشته می‌شود.
10. لایه نشانی SiO_2: 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 SiO_2: در این مرحله روی نمونه‌ها لیتوگرافی می‌شوند و اکسید از روی آن برداشته می‌شود تا لایه اصلی میکروکانتیلیور بر روی آن ایجاد شود.
12. حکاکی Si: در این مرحله پوسته ساخته‌شده از جنس Si حکاکی و

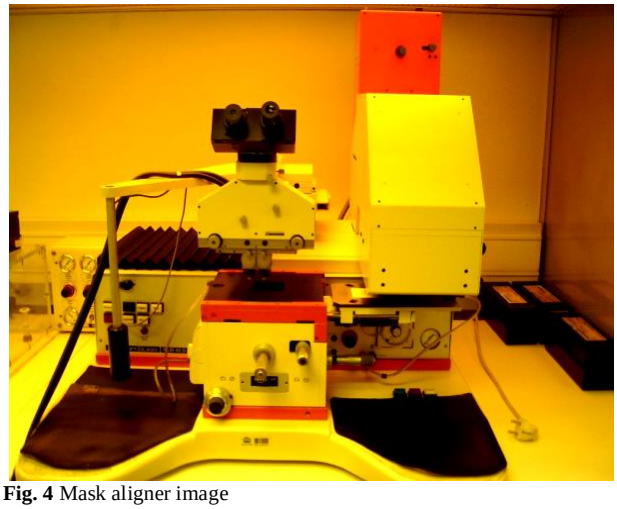

Fig. 4 Mask aligner image

شکل 4 عکس دستگاه ماسک آلاینر

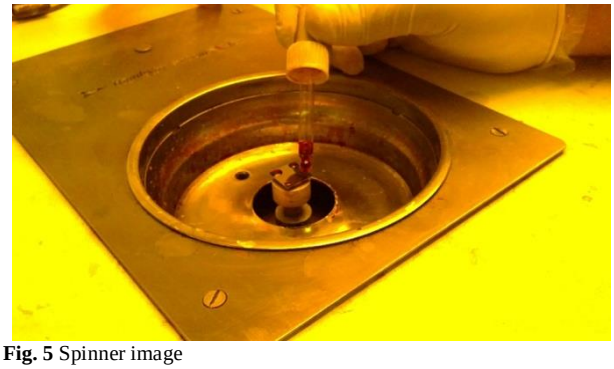

Fig. 5 Spinner image

شکل 5 عکس دستگاه لایه نشانی چرخشی

عملیات رهاسازی میکروکانتیلیورها از مایع انجام می‌شود.

13. در مرحله پایانی، نمونه‌ها در دمای محیط از محلول TMAH خارج‌شده و به مدت 5 دقیقه در داخل آب DI غوطه‌ور می‌شوند تا آب جایگزین محلول TMAH گردد. مجدداً نمونه‌ها به مدت 5 دقیقه دیگر در داخل آب DI تازه دیگری غوطه‌ور شده تا از جایگزینی آب DI به‌جای محلول TMAH اطمینان حاصل شود. در آخرین مرحله، نمونه‌ها از آب DI خارج شده و به مدت 5 دقیقه در داخل استون غوطه‌ور می‌شوند تا استون جایگزین آب DI شود. مجدداً نمونه‌ها به مدت 5 دقیقه دیگر در داخل استون تازه دیگری غوطه‌ور می‌شوند تا از جایگزینی استون به‌جای آب DI اطمینان حاصل شود. در پایان نمونه‌ها از داخل استون به‌آرامی خارج شده 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 خشک کردن استفاده نمود.

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

4- تحلیل نتایج و بحث و نتیجه

4-1- نتایج تئوری

فرکانس رزونانس و ضریب فنریت کانتیلیور از جنس SiO_2 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 است.

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 جزئیات فرآیند ساخت میکروکانتیلیورها

Table 2 Details of micro cantilever fabrication process

مرحله	شرح فعالیت	
1	انتخاب ویفر، برش و تمیزکاری	
1-1	انتخاب ویفر	
	نوع	P(100)+ پولیش یک‌طرفه
	ضخامت	460μm
2-1	برش	
	اندازه	1.2×1.2 cm
3-1	تمیزکاری دوطرفه	
	شستشو مرحله i	آب DI
	شستشو مرحله ii	Na_2OH (4.5%)
	شستشو مرحله iii	آب DI
2	لایه نشانی SiO_2 در دو طرف	
1-2	لایه نشانی SiO_2 در کوره اکسیداسیون	
	فشار تزریق Ar	5sccm
	نرخ افزایش دما	1050°C / 30´
	فشار و زمان تزریق O و قطع Ar	20´ - 2sccm
	زمان تزریق آب DI و قطع O	1hr
	t و T ماندگاری نمونه در کوره	1050°C at 20hr
3	لایه نشانی Cr درروی نمونه	
1-3	لایه نشانی Cr	
	روش	PVD
	ضخامت لایه	400nm
	نرخ لایه نشانی	1A/s
2-3	عملیات حرارتی	
	فشار تزریق Ar	5sccm
	نرخ افزایش دما	400°C / 30´
	t و T ماندگاری در کوره	400°C at 1hr
4	حکاکی SiO_2 پشت نمونه	
1-4	فتورزیست‌کاری با Shipley1813	
	دور و زمان لایه نشانی	3000 rpm at 30"
2-4	پخت نرم	
	زمان و دما	95°C at 1′
3-4	نوردهی	
	زمان	20"
4-4	ظهور در محلول Na_2OH (4.5%)	
	زمان	30"
5-4	پخت سخت	
	زمان و دما	125°C at 50′
6-4	حکاکی SiO_2 در BOE	
	زمان	15′
7-4	پاک کردن فتورزیست در استون	
5	حکاکی Si پشت نمونه	
1-5	حکاکی Si در TMAH (25%)	
	زمان و دما	95°C at 7hr
6	حکاکی Cr	
1-6	لیتوگرافی همانند مرحله 4-1 تا 4-4	
5-6	پخت سخت	
	زمان و دما	125°C at 5′
6-6	حکاکی Cr در آمونیم سریم	
	زمان	2′
7-6	پاک کردن فتورزیست در استون	
7	حکاکی Si پشت نمونه	
1-7	حکاکی Si در TMAH (25%)	
	زمان و دما	95°C at 7hr
8	پاک کردن SiO_2 دو طرف نمونه	
1-8	پاک کردن SiO_2 در HF(20%)	
	زمان	15′
9	پاک کردن Cr روی نمونه	
1-9	پاک کردن Cr در آمونیم سریم	
	زمان	2′
10	لایه نشانی SiO_2 لایه اصلی	
1-10	لایه نشانی SiO_2 در کوره اکسیداسیون	
	فشار تزریق Ar	5sccm
	نرخ افزایش دما	1050°C / 30´
	فشار و زمان تزریق O و قطع Ar	20´ - 2sccm
	زمان تزریق آب DI و قطع O	1hr
	t و T ماندگاری در کوره	1050°C at 8hr
11	حکاکی SiO_2 لایه اصلی	
1-11	لیتوگرافی همانند مرحله 4-1 تا 4-5	
6-11	حکاکی SiO_2 در BOE	
	زمان	15′
7-11	پاک کردن فتورزیست در استون	
12	حکاکی Si باقی‌مانده در زیر کانتیلیور	
1-12	مغروق در HF(2%)	لحظه‌ای
	زمان مغروق شدن در آب DI	5′
	زمان مغروق شدن در آب DI تمیز	5′
2-12	حکاکی Si در TMAH(25%)	
	زمان و دما	80°C at 2hr
13	رهاسازی میکروکانتیلیور	
	زمان مغروق شدن در آب DI	5′
	زمان مغروق شدن در آب DI تمیز	5′
	زمان مغروق شدن در استون	5′
	زمان مغروق شدن در استون تمیز	5′

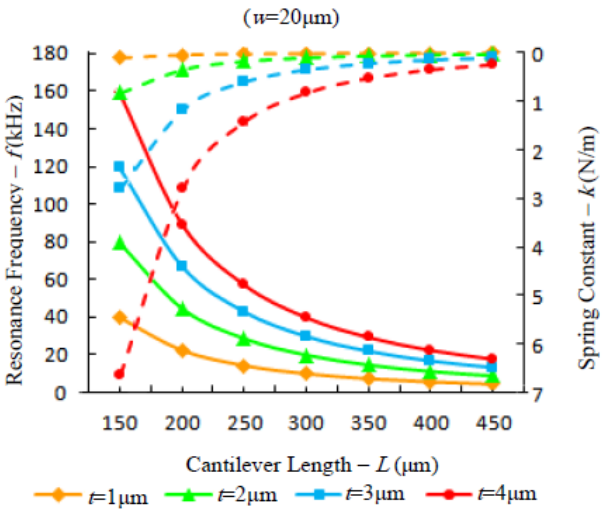

Fig. 6 Numerical analysis results of the resonance frequency (the left vertical axes) and spring constant (the right vertical axes) of the SiO_2 cantilever for the different lengths of 150, 200, 250, 300, 350, 400 and 450μm with 1, 2, 3 and 4μm thicknesses and 20μm width

شکل 6 نمودار فرکانس رزونانس و ضریب فنریت کانتیلیور از جنس SiO_2 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.

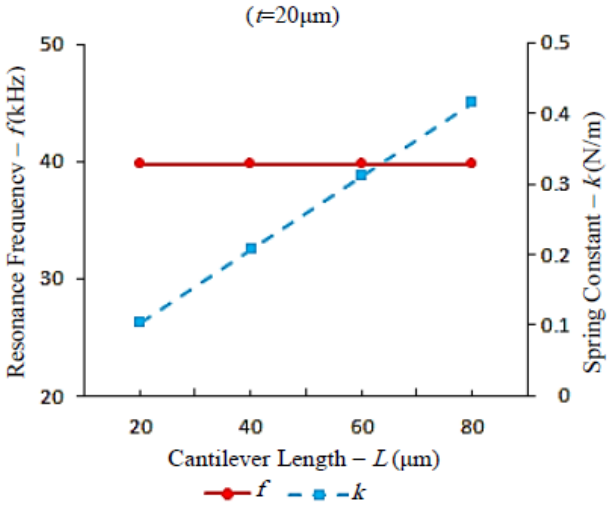

Fig. 7 Numerical analysis results of the resonance frequency and spring constant for the different widths with 1μm thickness

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 Si_3N_4 و SU_8 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 Au 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.

4-2- نتایج 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.

"شکل 9" تصویر نوری حاصل از میکروسکوپ نوری از نتیجه حکاکی SiO_2 پشت زیر لایه توسط محلول BOE در مرحله 4 را نشان می‌دهد. لبه‌های صاف پنجره مربعی شکل در این تصویر نشان می‌دهد که عملیات لیتوگرافی باوجود ناهمواری در پشت زیر لایه به‌خوبی انجام شده است. همچنین این شکل نشان می‌دهد که 1) SiO_2 به‌خوبی زدوده شده است و شکل پنجره مربعی شکل بعد از عملیات زدایش حفظ شده است. 2) فتورزیست ماسک خوبی برای SiO_2 بوده است؛ زیرا در داخل BOE به‌خوبی

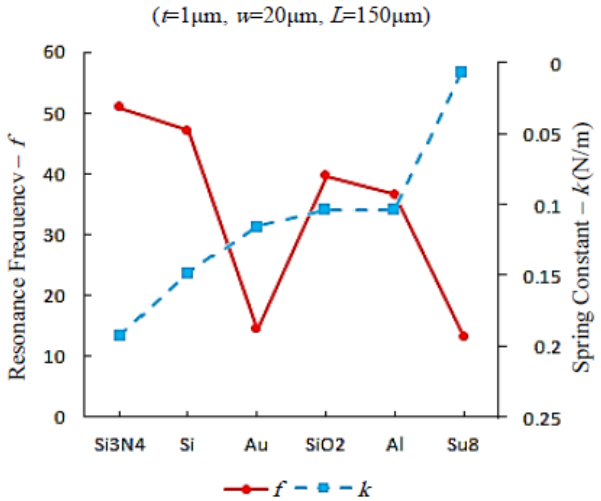

Fig. 8 Resonance frequency and the spring constant for different materials with t=1μm, w=20μm and L=150μm

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

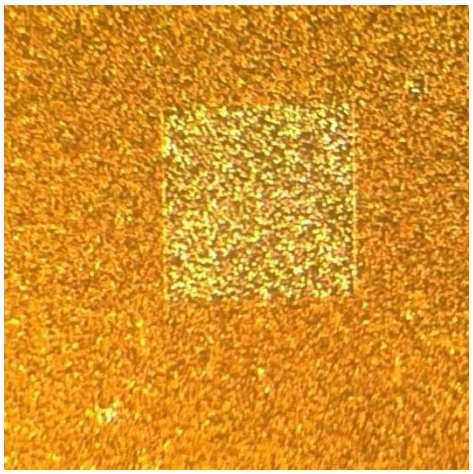

Fig. 9 The optical image of backside SiO_2 etching using BOE etchant in Step 4 to form a square window shape

شکل 9 تصویر نوری با میکروسکوپ نوری از حکاکی SiO_2 پشت زیرلایه در مرحله 4 با BOE جهت ایجاد پنجره مربعی شکل

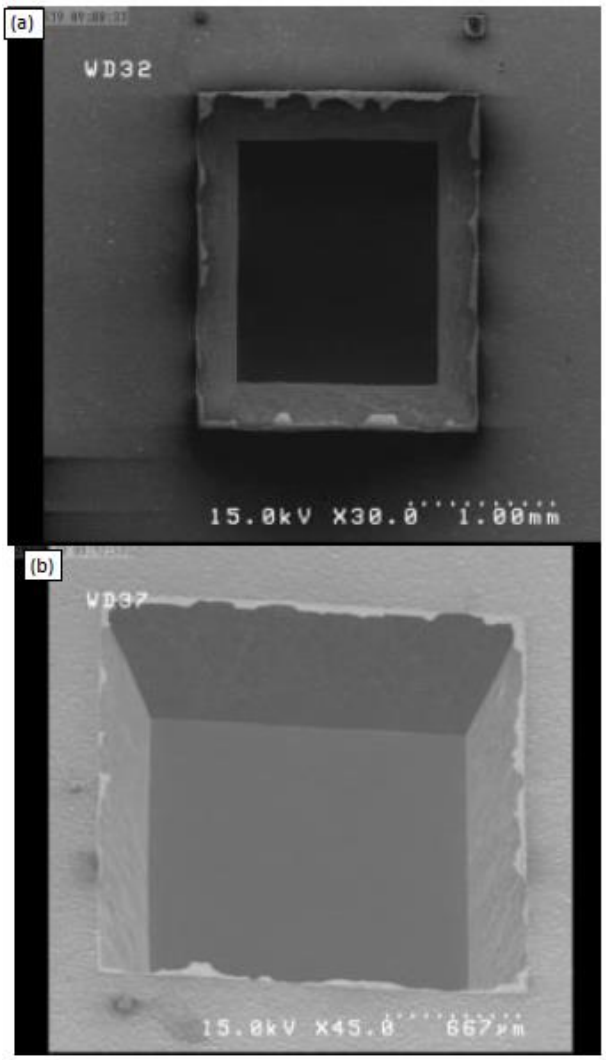

Fig. 10 The SEM image of 400µm silicon etching using TMAH (25%) in stage five

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

دوام آورده است به‌طوری‌که سطح SiO_2 در خارج پنجره مربعی شکل صدمه نخورده است.

"شکل 10" تصویر روبشی از سیلیکون حکاکی شده تا عمق 400µm 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_2 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 50µm، 100، 150، 200، 250، 300، 350 و 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 SiO_2 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 عریض‌تر نیز 40µm است. طول این کانتیلیورها به ترتیب از 50µm تا 400µm با گام‌های 50µm است. ضخامت لایه اکسید باضخامت‌سنج به‌اندازه 1.1µm اندازه‌گیری گردید.

تصاویر دو سری از کانتیلیورها ساخته شده به ضخامت 2µm و عرض 20µm به طول 50µm تا 400µm 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.

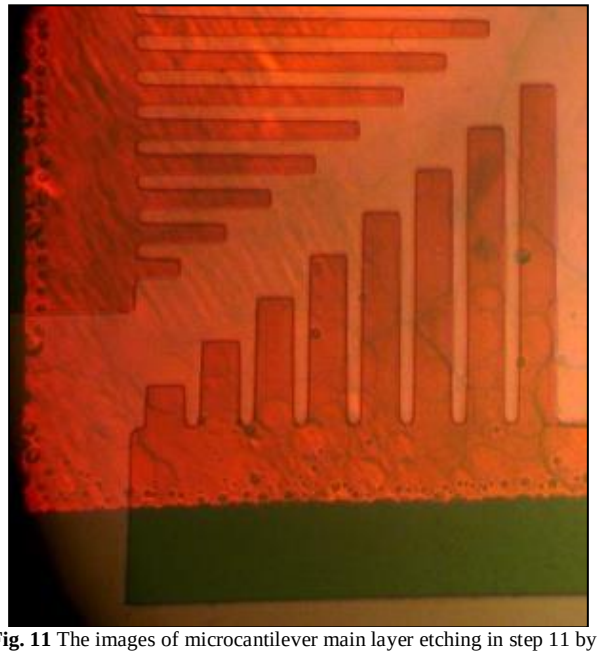

Fig. 11 The images of microcantilever main layer etching in step 11 by an optical microscopy with lighting under the substrate

شکل 11 تصاویر نوری کانتیلیورها بعد از حکاکی لایه اصلی در مرحله 11 توسط میکروسکوپ نوری با نوردهی از پشت بستر

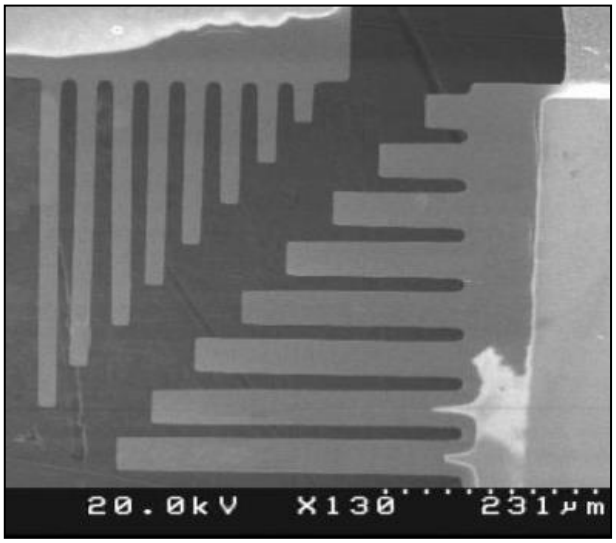

Fig. 12 The final SEM image of microcantilever with 1µm thickness

شکل 12 تصویر روبشی نهائی از کانتیلیورها به ضخامت 1µm

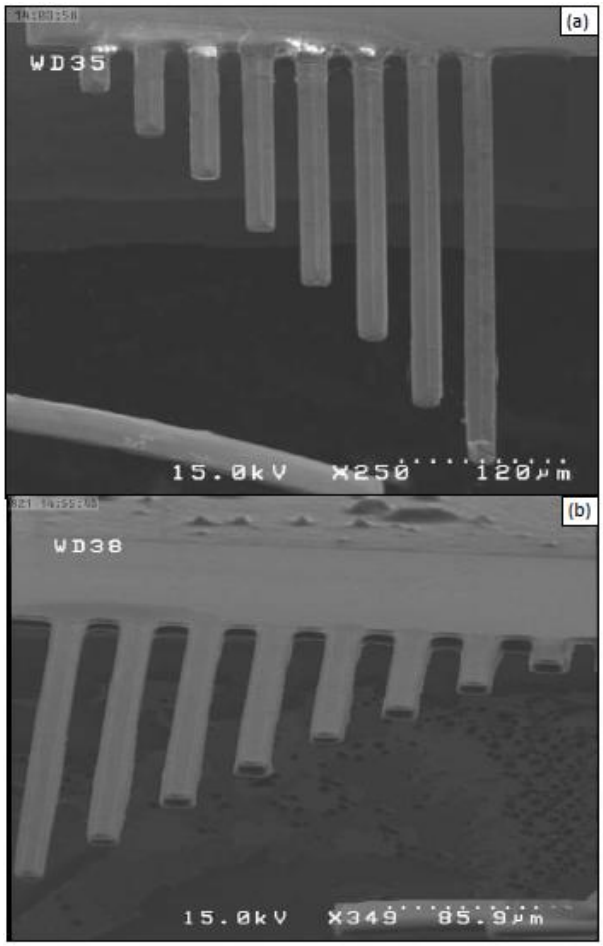

Fig. 13 The SEM images of two series of fabricated microcantilever with 2µm thickness A) top view B) tilt view

شکل 13 تصاویر دو سری از کانتیلیورها به ضخامت 2µm با عرض 20µm

الف) تصویر از بالا ب) تصویر مورب

همان‌طور که از "شکل 10 و 11" ملاحظه می‌شود، میزان خمیدگی کانتیلیورها کم است بنابراین استرس کانتیلیورها بعد از رهاسازی ناچیز است.

برای این‌که بتوان ضخامت کانتیلیورها را با SEM اندازه گرفت، تصویر عرضی یکی از آن‌ها طبق "شکل 15" بزرگ شد تا ضخامت اندازه‌گیری شود. این شکل نشان می‌دهد که ضخامت کانتیلیورهای ساخته شده در حدود 2.66µm است. متأسفانه، خطای اندازه‌گیری زیاد و مقادیر قابل قبول نیست؛ زیرا زاویه عکس‌برداری از نمونه 90° نبود؛ به همین جهت ضخامت کانتیلیورها توسط دستگاه ضخامت‌سنج اندازه‌گیری شد که مقدار آن در حدود 2.2µm گردید که با در نظر گرفتن خطای اندازه‌گیری تقریباً با مقدار اندازه‌گیری شده از طریق تصویر روبشی مطابقت دارد.

در "شکل 16" تصویر روبشی از یک کانتیلیور به ضخامت 600nm به طول 160µm با عرض 20µm به‌صورت زاویه‌دار (مورب) نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری ضخامت از دستگاه ضخامت‌سنج استفاده شد که مقدار ضخامت در حدود 590nm اندازه‌گیری شد. این شکل نشان می‌دهد که تنها یکی از کانتیلیورها سالم مانده است و بقیه آن‌ها در طول فرآیند ساخت کنده شده است. همچنین این شکل نشان می‌دهد که کنترل فرآیند ساخت کانتیلیورها باضخامت‌های کمتر مشکل است؛ اما سالم ماندن یک کانتیلیور نشان می‌دهد که با بهینه‌سازی و کنترل دقیق‌تر کنترل فرآیند ساخت، می‌توان کانتیلیورهایی باضخامت کمتر را نیز ساخت.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله، فرآیند ساخت کانتیلیورها از جنس SiO_2 شرح داده‌شده است.

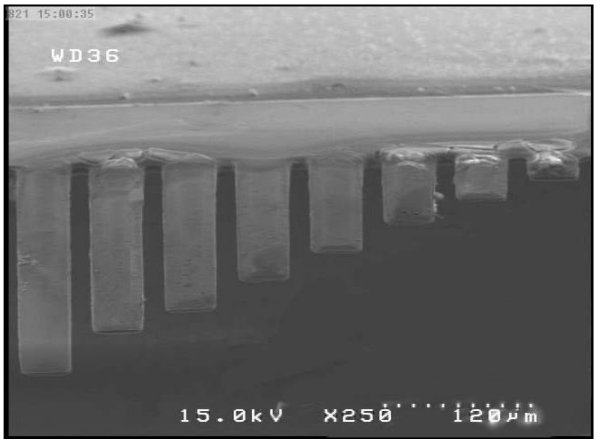

Fig. 14 The SEM image of SiO_2 microcantilever with 1µm thickness and 40µm width

شکل 14 تصاویر SEM کانتیلیورهای از جنس SiO_2 به ضخامت 2µm و عرض 40µm

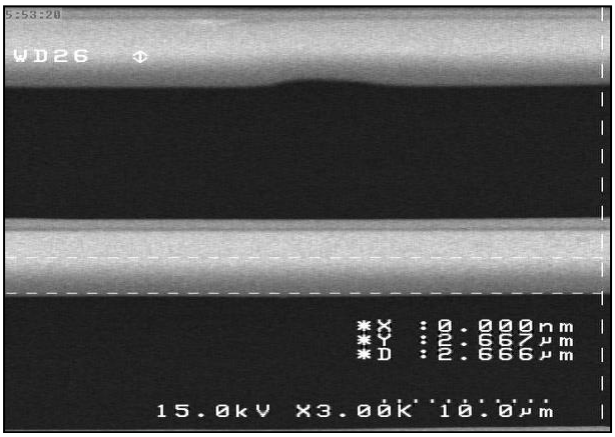

Fig. 15 The thickness measurement of the cantilever with SEM

شکل 15 اندازه‌گیری ضخامت کانتیلیور با SEM

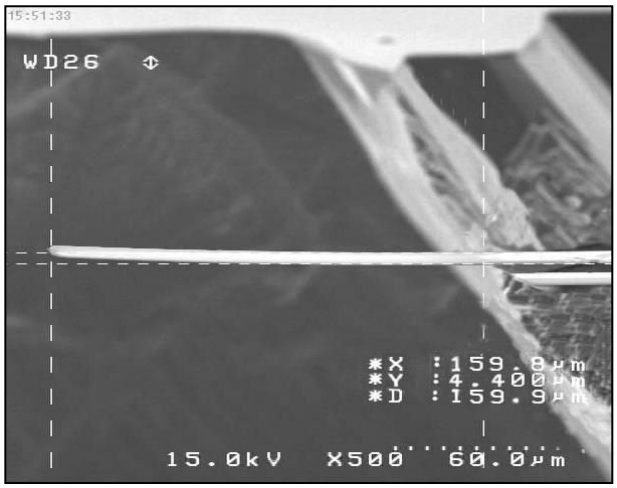

Fig. 16 The tilt SEM image of cantilever with 600 nm thick, 160 µm length and 20 µm width

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

کانتیلیورها به طول‌های 50µm، 100، 150، 200، 250، 300، 350 و 400 و به عرض‌های 20µm و 40 باضخامت 1µm و 2 برای SiO_2 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 به‌طوری‌که ساخت آن‌ها با دو عملیات لیتوگرافی یک طرفه و یک عملیات لیتوگرافی دوطرفه به‌وسیله یک ماسک شیشه‌ای و یک ماسک طلقی تحقق‌یافته است. معلق‌سازی کانتیلیورها به روش رهاسازی تر است و از پیچیدگی رهاسازی کانتیلیورها از لایه قربانی اجتناب شده است. با این روش، می‌توان کانتیلیورهایی از جنس SiO_2 با شکل‌های هندسی مختلف را ساخت.

6- تقدیر و تشکر

برای ساخت میکروکانتییورهای 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

[1] S. K. Vashist, A review of microcantilevers for sensing applications, *J. of Nanotechnology*, Vol. 3, pp. 1-18, 2007.
[2] 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/
[3] W. Wang, V. Upadhyay, C. Munoz, J. Bumgarner, 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.
[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)
[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, *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/SiO_2 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
[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 فارسی)
[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 فارسی)
[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 فارسی)
[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 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 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 micromechanical bimorph arrays for detection of thermal radiation, *Applied 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.