



ساخت سریع میکرو کانتیلورهای تک‌ماده‌ای از جنس SiO_2 با هزینه کم بر پایه فناوری میکروماشین کاری حجمی

حسن عبداللہی*

استادیار، مهندسی برق، دانشگاه هوایی 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
میکرو کانتیلور
رهای سازی تر و MEMS

چکیده

از آنجائی که کانتیلورها پایه و اساس بیشتر قطعات مبتنی بر ساختارهای MEMS می‌باشند، در این مقاله فرآیند ساخت کانتیلور با فناوری میکروماشین کاری حجمی بیان شده است و از آن فرآیند برای ساخت آرایه‌ای از میکروکانتیلورهای 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 کانتیلور از جنس SiO_2 استوار است. طراحی فرآیند ساخت کانتیلورها در 13 مرحله با 2 ماسک شیشه‌ای و طلقی انجام شده است و معلق‌سازی آن‌ها نیز به روش رهای سازی تر است. از مهم‌ترین مزایای روش ارائه شده می‌توان به عدم نیاز به تجهیزات پیشرفته لایه نشانی، طراحی با حداقل ماسک، سادگی در پیاده‌سازی سریع کانتیلورها، اجتناب از پیچیدگی رهای سازی از لایه قربانی، رهای سازی کانتیلور در دمای محیط، کم هزینه بودن و در نهایت امکان پیاده‌سازی آن در آزمایشگاه‌های میکروالکترونیک با تجهیزات محدود اشاره نمود. کانتیلورهای تک‌ماده‌ای از جنس SiO_2 با طول‌های $150, 100, 50 \mu\text{m}$ ، $200, 250, 300, 350, 400 \mu\text{m}$ به ضخامت‌های $1 \mu\text{m}$ و $2 \mu\text{m}$ و به عرض‌های $20 \mu\text{m}$ و $40 \mu\text{m}$ ساخته شدند. مقادیر فرکانس رزونانس و ثابت فنر آن‌ها نیز برای مواد مختلف $\text{SiO}_2, \text{Al}, \text{Si}_3\text{N}_4, \text{Si}, \text{Au}$ با SU_8 ابعاد متفاوت محاسبه شده‌اند. 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 کانتیلورها 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 $1 \text{ and } 2 \mu\text{m}$ thickness, $50, 100, 150, 200, 250, 300, 350$ and $400 \mu\text{m}$ lengths, and 20 and $40 \mu\text{m}$ widths. The resonant frequency and the spring constant values are also calculated for different materials ($\text{Si}_3\text{N}_4, \text{Si}, \text{Au}, \text{SiO}_2, \text{Al}$ 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 میکروالکترومکانیکال¹ (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:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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 SiO₂ از مواد دیگر کمتر است. لذا SiO₂ ماده مناسبی است که می‌توان به کاربردهای آن در ساخت آشکارسازهای حرارتی، مادون قرمز، تهرتز، میکروهیترها، شتاب‌سنج‌ها، میکروآینه‌ها و... مبتنی بر فناوری میکروماشین کاری اشاره نمود. در این روش، تنها به دستگاه‌های ابتدایی لیتوگرافی، کوره اکسیداسیون و دستگاه لایه نشانی نیاز است. معلق‌سازی 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 حاکم بر کانتیلیورها

ضریب فنریت^۴ و فرکانس رزونانس^۵ 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:

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

در این رابطه

E: مدول یانگ (Pa)

L: طول کانتیلیور (m)

w: پهنای کانتیلیور (m)

t: ضخامت کانتیلیور (m)

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.

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

در این رابطه:

m_{eff} : جرم مؤثر کانتیلیور (kg)

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

$$m_{eff} = \frac{33}{140} \rho w t L \text{ (kg)} \quad (3)$$

در این رابطه:

ρ : چگالی جرمی (kgm^{-3})

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

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

3- طراحی فرآیند ساخت

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

تشکیل می‌شوند 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^۱ پایه و اساس قطعات مبتنی بر ساختارهای MEMS می‌باشند و کاربردهای گسترده‌ای در شتاب‌سنج‌ها [4]، حسگرهای رطوبت [5]، حرارت‌سنج‌ها [6]، فشارسنج‌ها [7]، آشکارساز ذرات مغناطیسی [8]، شیمیایی [9]، گاز [10]، جریان [11]، مواد منفجره [12]، فوتون [13]، مادون قرمز [14، 15]، تراهرتز [16]، سرطان [17] - بایوپچپ‌ها [18] - ساخت میکروپمپ [19]، پروپ [20]، تیپ AFM [21]، میکرو صفحه داغ [22-25]، رزوناتور [26]، فیلترها [27] و تشخیص بیومولکول‌ها [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 (SiO₂، SiO_x، سیلیکات شیشه) عایق‌های الکتریکی و گرمایی خوبی هستند و به‌طور گسترده‌ای در میکروماشین کاری به کار می‌روند. همچنین با انتخاب دقیق آن‌ها روی سیلیکون، می‌توان سیلیکون را در اسید هیدروفلوراید به‌خوبی سونش نمود. دی‌اکسید سیلیکون (SiO₂) به‌وسیله اکسید کردن سیلیکون با گرم کردن در دماهای بالای 800°C رشد می‌کند، در صورتی که 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 SiO₂ 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



Fig. 1 A simple image of cantilever

شکل 1 یک تصویر ساده از کانتیلیور

¹ Cantilever

² Wet-release

³ Dry-release

⁴ Spring constant

⁵ Resonant frequency

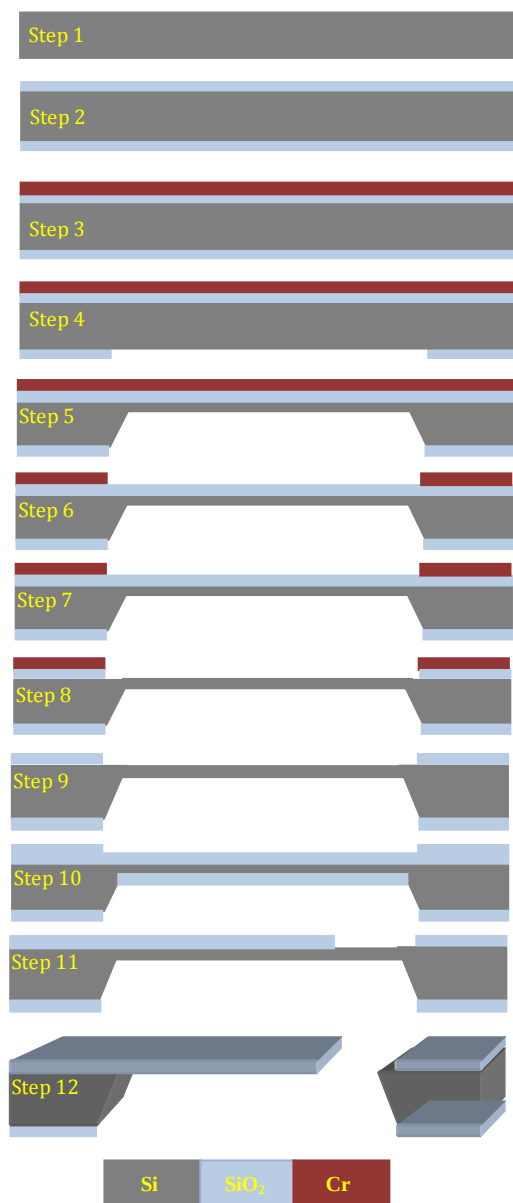


Fig. 2 Description of fabrication process 1) Wafer Selecting, Cutting and Cleaning 2) SiO_2 growing on double side 3) Cr deposition to more protection 4) SiO_2 etching to open window 5) Si etching to make thin membrane 6) Cr etching to open window 7) Second Si etching to make thin membrane 8) SiO_2 removing 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 سیلیکون (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

[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 میکروماشین کاری حجمی، تعداد ماسک‌های کاهش یافته است و فرآیند معلق‌سازی کانتیلیورها نیز به روش بسیار ساده انجام می‌پذیرد. در روش میکروماشین کاری سطحی، فرآیند معلق‌سازی کانتیلیورها 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 $460\mu\text{m}$ به‌عنوان زیر لایه انتخاب می‌شود و در ابعاد موردنظر در جهت $\langle 100 \rangle$ 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 $2\mu\text{m}$ اکسید شود. نسبت خوردندگی 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 $2 \times 2\text{mm}$ برای ساخت غشاء سیلیکونی باز می‌شود. برای انجام عملیات لیتوگرافی از دستگاه ماسک الاینر¹ مدل Karl Suss "شکل 4" و برای فتورزیست کاری از دستگاه لایه‌نشانی چرخشی² "شکل 5" استفاده شده است.

5. حکاکی Si: با کمک TMAH، سیلیکون تا عمق $400\mu\text{m}$ زدوده می‌شود تا یک پوسته به ضخامت $60\mu\text{m}$ 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	Si_3N_4	Si	SiO_2	Al	Au	Pt	Y
مدول یانگ (E)	GPa	130	100	70	70	78	2	
نسبت پواسون	-	0.25	0.28	0.25	0.35	0.44	0.22	
ضریب انبساط حرارتی (α)	10^{-6}K^{-1}	1.6	2.6	0.41	23.1	14.2	52	
هدایت حرارتی (G)	W(mK)^{-1}	29	149	1.1	235	323	0.3	
σ هدایت الکتریکی	Sm^{-1}	10^{-14}	1.56×10^{-3}	10^{-14}	35×10^7	41×10^7	2.8×10^{12}	
چگالی (ρ)	gcm^{-3}	2.6	2.33	2.3	2.7	19.3	1.19	
ظرفیت گرمایی (C)	$\text{Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$	0.69	0.75	0.66	0.897	0.129	1.5	

¹ Mask Aligner

² Spinner

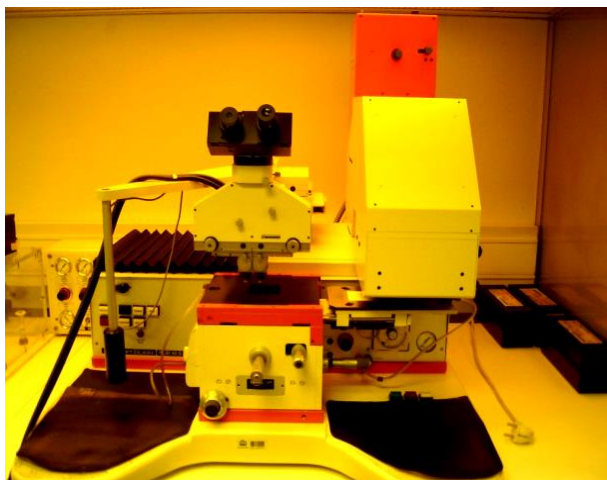


Fig. 4 Mask aligner image

شکل 4 عکس دستگاه ماسک آلاینر

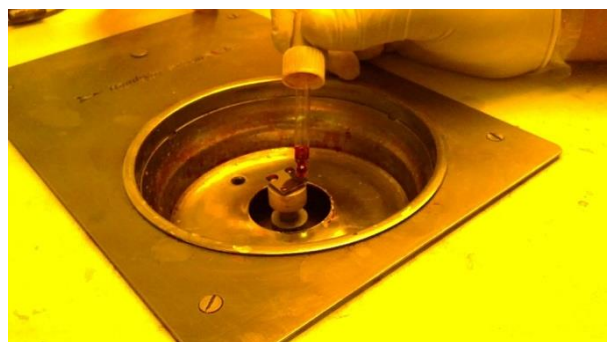


Fig. 5 Spinner image

شکل 5 عکس دستگاه لایه نشانی چرخشی

عملیات رهاسازی میکرو کانتیلیورها از مایع انجام می‌شود.

13. در مرحله پایانی، نمونه‌ها در دمای محیط از محلول TMAH خارج شده 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 به جای 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 به جای آب DI اطمینان حاصل شود. در پایان نمونه‌ها از داخل استون به آرامی خارج شده و به صورت 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 به طور کامل نشان داده شده است.

4- تحلیل نتایج و بحث و نتیجه

4-1- نتایج تئوری

فرکانس رزونانس و ضریب فنریته کانتیلیور از جنس SiO_2 برحسب طول آن با پهنای $20\mu\text{m}$ و با ضخامت‌های $4\mu\text{m}$ ، $3\mu\text{m}$ ، $2\mu\text{m}$ و $1\mu\text{m}$ در "شکل 6" نشان داده شده است. محور افقی نمودار، طول کانتیلیورها از $150\mu\text{m}$ تا $450\mu\text{m}$ است.



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 آنجائی که 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 $\text{TMAH}(25\%)$ را در این مرحله انجام داد. ضخامت پوسته پس از 50 دقیقه در دمای 80°C در حدود $20\mu\text{m}$ می‌گردد.

8. پاک کردن SiO_2 : ساختار اصلی کانتیلیورها از جنس SiO_2 است. از آنجائی که 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 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 با ضخامت موردنظر برای کانتیلیورها در آن رشد یابد؛ زیرا لایه اصلی تشکیل دهنده میکرو کانتیلیورها 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 میکرو کانتیلیور بر روی آن ایجاد شود.

12. حکاکی Si: در این مرحله پوسته ساخته شده از جنس Si حکاکی و

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 خط چین شده با علامت مربع مربوط به ضریب فنریت می‌باشند. این قاعده رسم نمودار برای "شکل 7 و 8" نیز رعایت شده است.	3-4	نوردهی	20"
طبق رابطه (4) فرکانس رزونانس با مجذور طول کانتیلور رابطه عکس و با ضخامت کانتیلور رابطه مستقیم دارد؛ بنابراین با افزایش طول کانتیلور، فرکانس رزونانس کاهش می‌یابد و با افزایش ضخامت کانتیلور، 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 کانتیلور، ضریب فنریت کانتیلور کاهش می‌یابد.	4-4	ظهور در محلول (4.5%) Na_2OH	30"
"شکل 7" فرکانس رزونانس و ضریب فنریت کانتیلور را به ازای پهنای 80 μm ، 60، 40 و 20 نشان می‌دهد. طبق رابطه (4) فرکانس رزونانس با پهنای کانتیلور رابطه‌ای ندارد؛ بنابراین مقدار فرکانس رزونانس با	5-4	پخت سخت	
جدول 2 جزئیات فرآیند ساخت میکرو کانتیلورها	6-4	زمان و دما	125°C at 50'
Table 2 Details of micro cantilever fabrication process	7-4	حکاکي Si در BOE	
مرحله	5	زمان	15'
شرح فعالیت	1-5	پاک کردن فتورزیست در استون	
انتخاب ویفر، برش و تمیزکاری	6	حکاکي Si پشت نمونه	
انتخاب ویفر	1-6	حکاکي Si در (25%) TMAH	
نوع	5-6	زمان و دما	95°C at 7hr
ضخامت	6-6	حکاکي Cr	
برش	7-6	لیتوگرافی همانند مرحله 1-4 تا 4-4	
اندازه	7	پخت سخت	
تمیزکاری دوطرفه	1-7	زمان و دما	125°C at 5'
شستشو مرحله i	8	حکاکي Cr در آمونیم سریم	
شستشو مرحله ii	1-8	زمان	2'
شستشو مرحله iii	9	پاک کردن فتورزیست در استون	
لایه نشانی SiO_2 در دو طرف	10	حکاکي Si پشت نمونه	
لایه نشانی SiO_2 در کوره اکسیداسیون	1-10	حکاکي Si در (25%) TMAH	
فشار تزریق Ar	11	زمان و دما	95°C at 7hr
فشار تزریق Ar	1-11	پاک کردن SiO_2 دو طرف نمونه	
فشار تزریق Ar	12	پاک کردن SiO_2 در (20%) HF	
فشار تزریق Ar	13	زمان	15'
فشار تزریق Ar	14	پاک کردن Cr روی نمونه	
فشار تزریق Ar	15	پاک کردن Cr در آمونیم سریم	
فشار تزریق Ar	16	زمان	2'
فشار تزریق Ar	17	لایه نشانی SiO_2 لایه اصلی	
فشار تزریق Ar	18	لایه نشانی SiO_2 در کوره اکسیداسیون	
فشار تزریق Ar	19	فشار تزریق O و قطع Ar	
فشار تزریق Ar	20	نرخ افزایش دما	
فشار تزریق Ar	21	فشار و زمان تزریق O و قطع Ar	
فشار تزریق Ar	22	زمان تزریق آب DI و قطع O	
فشار تزریق Ar	23	T و t ماندگاری در کوره	
فشار تزریق Ar	24	حکاکي SiO_2 لایه اصلی	
فشار تزریق Ar	25	لیتوگرافی همانند مرحله 1-4 تا 5-4	
فشار تزریق Ar	26	حکاکي Si در BOE	
فشار تزریق Ar	27	زمان	15'
فشار تزریق Ar	28	پاک کردن فتورزیست در استون	
فشار تزریق Ar	29	حکاکي Si باقی مانده در زیر کانتیلور	
فشار تزریق Ar	30	مغروق در (2%) HF	
فشار تزریق Ar	31	زمان مغروق شدن در آب DI	
فشار تزریق Ar	32	زمان مغروق شدن در آب DI تمیز	
فشار تزریق Ar	33	حکاکي Si در (25%) TMAH	
فشار تزریق Ar	34	زمان و دما	80°C at 2hr
فشار تزریق Ar	35	رهاسازی میکرو کانتیلور	
فشار تزریق Ar	36	زمان مغروق شدن در آب DI	
فشار تزریق Ar	37	زمان مغروق شدن در آب DI تمیز	
فشار تزریق Ar	38	زمان مغروق شدن در استون	
فشار تزریق Ar	39	زمان مغروق شدن در استون تمیز	

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- نتایج ساخت

جهت کنترل فرآیند در حین فرآیند ساخت، از مراحل مختلف عکس برداری 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 به خوبی انجام شده است. همچنین این شکل نشان می‌دهد که SiO_2 به خوبی 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 به خوبی

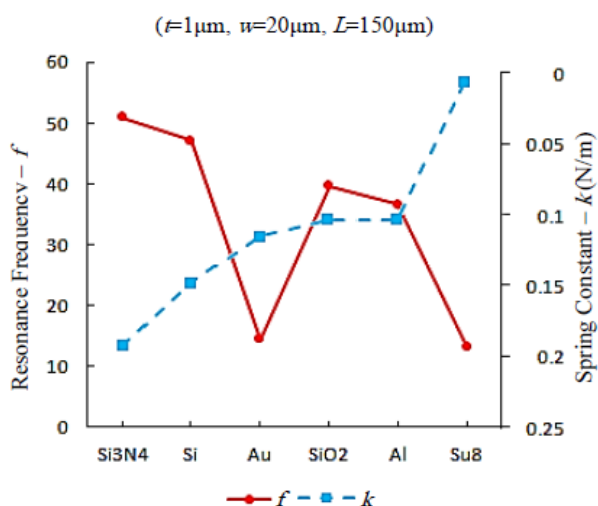


Fig. 8 Resonance frequency and the spring constant for different materials with $t=1\mu\text{m}$, $w=20\mu\text{m}$ and $L=150\mu\text{m}$

شکل 8 نمودار فرکانس رزونانس و ضریب فنریت بر جنس مواد مختلف برای کانتیلیور با مشخصات $L=150\mu\text{m}$ و $t=1\mu\text{m}$, $w=20\mu\text{m}$

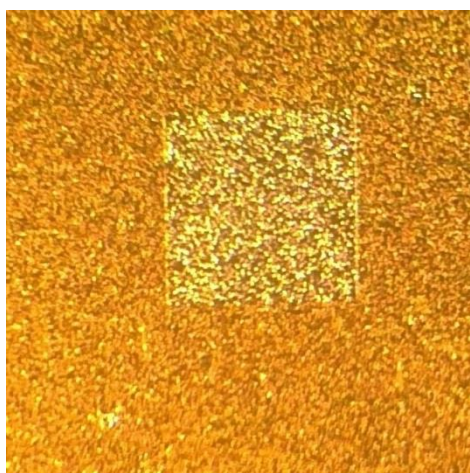


Fig. 9 The optical image of backside SiO_2 etching using BOE etchant in Step 4 to form a square window shape

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

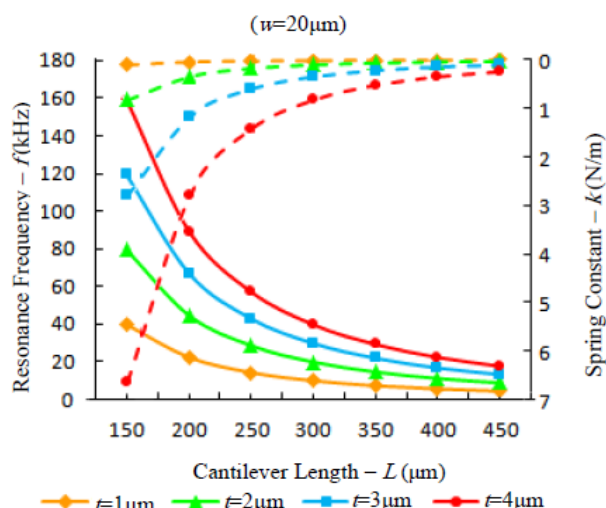


Fig. 6 Numerical analysis results of the resonance frequency (the left vertical axes) and spring constant (the right vertical axes) of the SiO_2 cantilever for the different lengths of 150, 200, 250, 300, 350, 400 and 450 μm with 1, 2, 3 and 4 μm thicknesses and 20 μm width

شکل 6 نمودار فرکانس رزونانس و ضریب فنریت کانتیلیور از جنس SiO_2 برحسب طول آن با پهنای 20 μm و ضخامت‌های 1، 2، 3 و 4 μm محوره‌های عمودی در سمت چپ و راست شکل به ترتیب فرکانس رزونانس و ضریب فنریت می‌باشند.

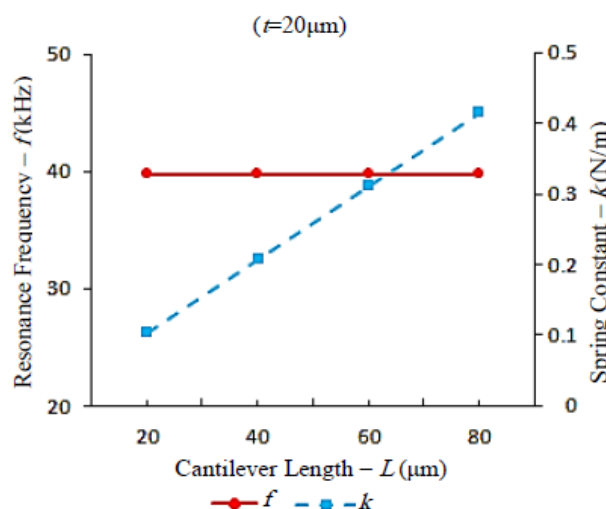


Fig. 7 Numerical analysis results of the resonance frequency and spring constant for the different widths with 1 μm thickness

شکل 7 نمودار فرکانس رزونانس و ضریب فنریت برحسب پهنای مختلف کانتیلیور با ضخامت $t=1\mu\text{m}$

تغییر پهنای مطابق شکل ثابت می‌ماند. ضریب فنریت طبق رابطه (1) با پهنای کانتیلیور رابطه مستقیم دارد لذا با افزایش پهنای کانتیلیور، مقدار ضریب فنریت به صورت 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 SU_8 و Si_3N_4 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 به شدت کاهش یافته است. فرکانس رزونانس با

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 $40\mu\text{m}$ در محور افقی و کانتیلیورها با پهنای $20\mu\text{m}$ در محور عمودی به ترتیب با طول‌های $50\mu\text{m}$ ، 100 ، 150 ، 200 ، 250 ، 300 ، 350 و 400 قرار گرفته است. این شکل نشان می‌دهد که حکاکی و عملیات لیتوگرافی لایه اصلی کانتیلیورها به درستی انجام شده است. نواحی قرمز رنگ 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 به درستی انجام شده است.

تصاویر نهایی کانتیلیورها از جنس SiO_2 به کمک میکروسکوپ الکترونی عکس برداری شده است. ضخامت کانتیلیورهای ساخته شده متفاوت بوده که در ادامه، تصاویر آن‌ها نشان داده خواهد شد.

تصویر نهایی روبشی کانتیلیورهای معلق ساخته شده به ضخامت $1\mu\text{m}$ از روبرو در "شکل 12" نشان داده شده است. عرض کانتیلیورهای باریک $20\mu\text{m}$ و عرض کانتیلیورهای عریض تر نیز $40\mu\text{m}$ است. طول این کانتیلیورها به ترتیب از $50\mu\text{m}$ تا $400\mu\text{m}$ با گام‌های $50\mu\text{m}$ است. ضخامت لایه اکسید با ضخامت سنج به اندازه $1.1\mu\text{m}$ اندازه گیری گردید.

تصاویر دو سری از کانتیلیورها ساخته شده به ضخامت $2\mu\text{m}$ و عرض $20\mu\text{m}$ به طول $50\mu\text{m}$ تا $400\mu\text{m}$ با گام‌های $50\mu\text{m}$ 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 نشان دهنده همین نوع کانتیلیورها با عرض $40\mu\text{m}$ 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 معلق سازی محسوس نباشد.

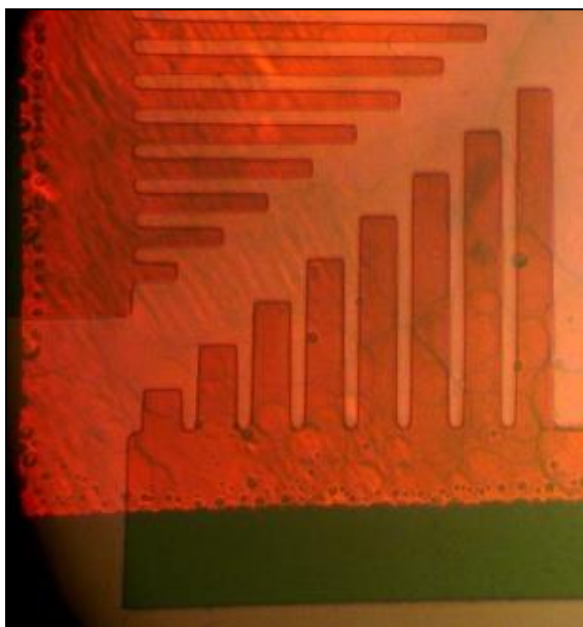


Fig. 11 The images of microcantilever main layer etching in step 11 by an optical microscopy with lighting under the substrate

شکل 11 تصاویر نوری کانتیلیورها بعد از حکاکی لایه اصلی در مرحله 11 توسط

میکروسکوپ نوری با نوردهی از پشت بستر

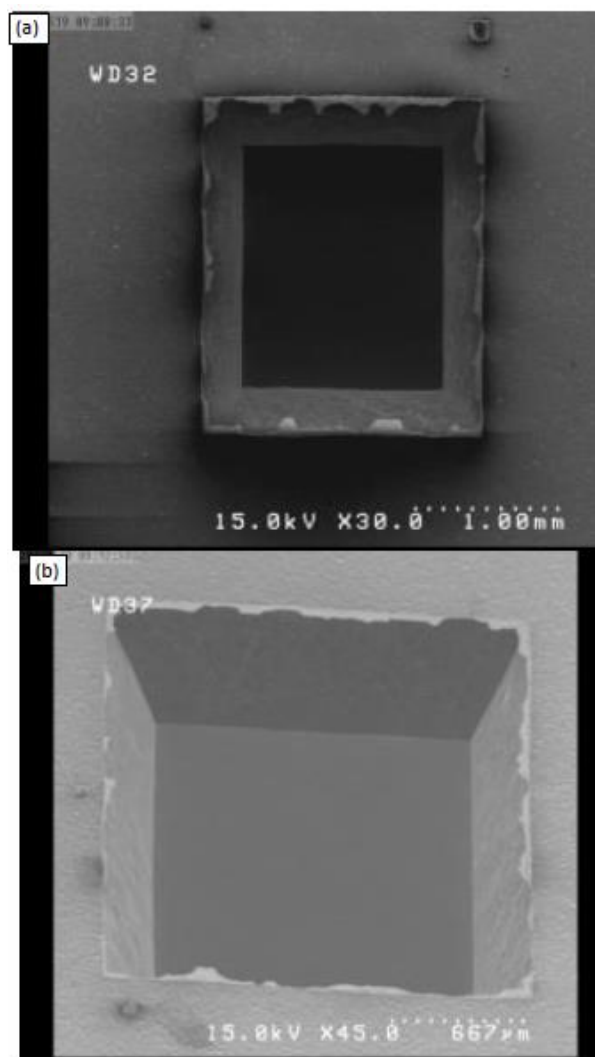


Fig. 10 The SEM image of $400\mu\text{m}$ silicon etching using TMAH (25%) in stage five

شکل 10 تصویر روبشی از حکاکی سیلیکان در مرحله 5 به عمق $400\mu\text{m}$ با TMAH(25%)

دوام آورده است به طوری که سطح SiO_2 در خارج پنجره مربعی شکل صدمه نخورده است.

"شکل 10" تصویر روبشی از سیلیکون حکاکی شده تا عمق $400\mu\text{m}$ 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 به درستی رعایت شده است و کنترل عملیات زدایش Si نیز قابل قبول است (شکل 10 الف)). خراش‌های لبه پنجره، نشان دهنده 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.

عرضی یکی از آن‌ها طبق "شکل 15" بزرگ شد تا ضخامت اندازه‌گیری شود. این شکل نشان می‌دهد که ضخامت کانتیلیورهای ساخته شده در حدود $2.66\mu\text{m}$ 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 $2.2\mu\text{m}$ 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 $160\mu\text{m}$ با عرض $20\mu\text{m}$ به صورت 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 با ضخامت‌های کمتر مشکل است؛ اما سالم ماندن یک کانتیلیور نشان می‌دهد که با بهینه‌سازی و کنترل دقیق‌تر کنترل فرآیند ساخت، می‌توان کانتیلیورهایی با ضخامت کمتر را نیز ساخت.

5- نتیجه‌گیری

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

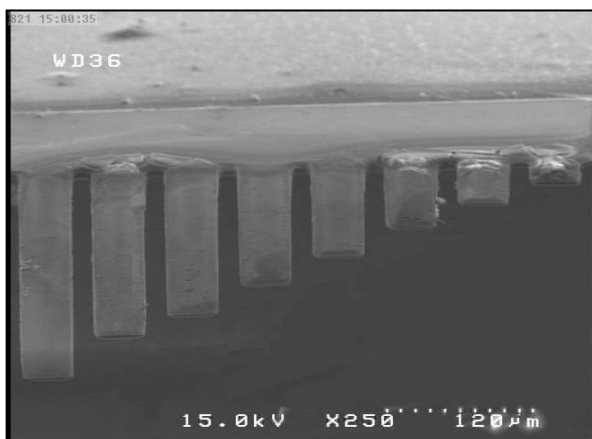


Fig. 14 The SEM image of SiO_2 microcantilever with $1\mu\text{m}$ thickness and $40\mu\text{m}$ width

شکل 14 تصاویر SEM کانتیلیورهای از جنس SiO_2 به ضخامت $2\mu\text{m}$ و عرض $40\mu\text{m}$

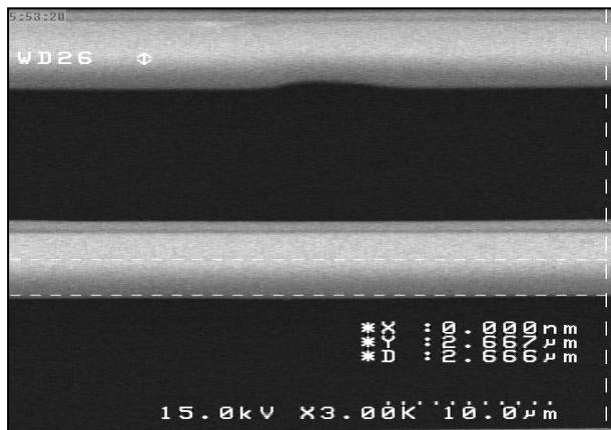


Fig. 15 The thickness measurement of the cantilever with SEM

شکل 15 اندازه‌گیری ضخامت کانتیلیور با SEM

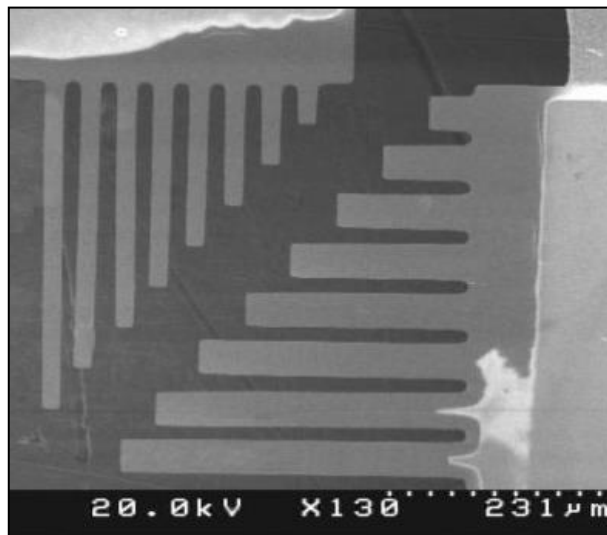


Fig. 12 The final SEM image of microcantilever with $1\mu\text{m}$ thickness

شکل 12 تصویر روبشی نهایی از کانتیلیورها به ضخامت $1\mu\text{m}$

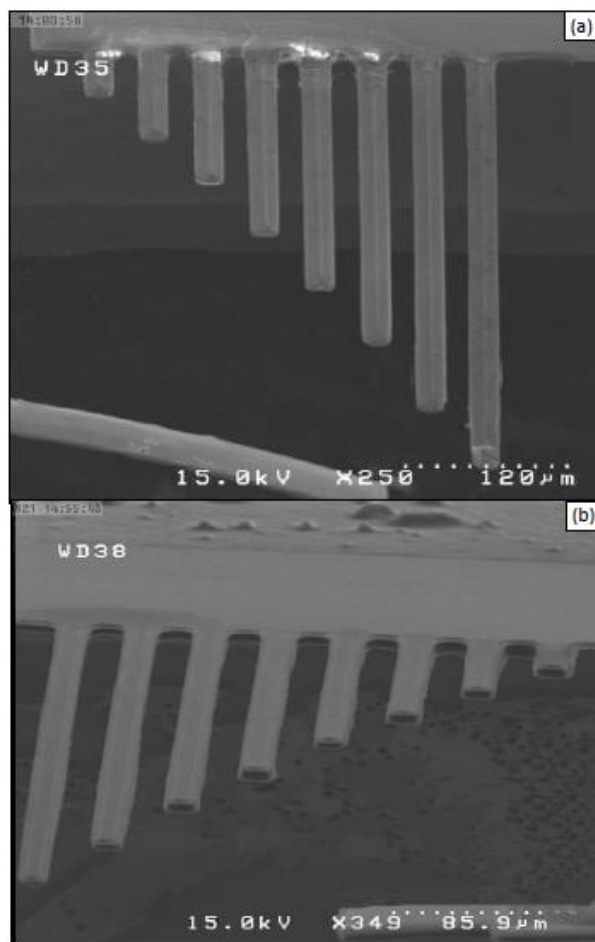


Fig. 13 The SEM images of two series of fabricated microcantilever with $2\mu\text{m}$ thickness A) top view B) tilt view

شکل 13 تصاویر دو سری از کانتیلیورها به ضخامت $2\mu\text{m}$ با عرض $20\mu\text{m}$

(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

- [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. Sirbulu, 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. Eger, 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. Simoes, 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)
- [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)
- [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)
- [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. Rezaezadeh, 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)
- [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.

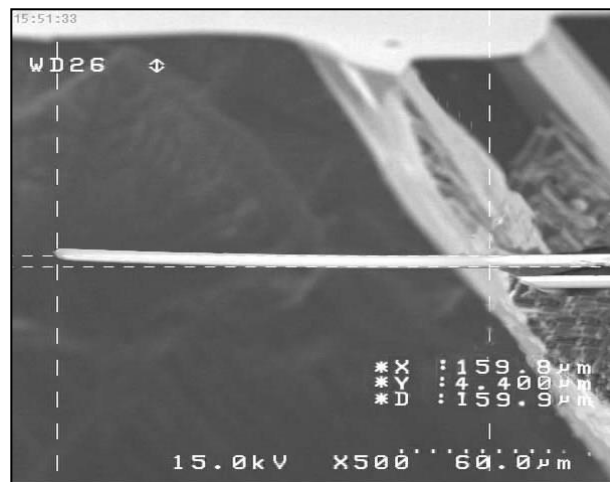


Fig. 16 The tilt SEM image of cantilever with 600 nm thick, 160 μm length and 20 μm width

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

کانتیلورها به طول‌های 400 و 350، 300، 250، 200، 150، 100، 50 μm و به عرض‌های 20 μm و 40 با ضخامت 1 μm و 2 برای SiO_2 ساخته شدند. با طراحی فرآیند ساخت ارائه شده، این کانتیلورها 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 کانتیلورها. 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 طلایی تحقق یافته است. معلق‌سازی کانتیلورها به روش رهاسازی تر است و از پیچیدگی رهاسازی کانتیلورها از لایه قربانی اجتناب شده است. با این روش، می‌توان کانتیلورهایی از جنس SiO_2 با شکل‌های هندسی مختلف را ساخت.

6- تقدیر و تشکر

برای ساخت میکروکانتیلورهای 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-62061ZL, 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. Rezaezadeh, 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)