



Local Stresses Effect on Micro-machined Silicon Diaphragm on Zinc oxide Nanowires Piezoelectric Sensors

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Kavand H.¹,
Koohsorkhi J.^{1*},
Askari Moghadam R.²

How to cite this article

Kavand H, Koohsorkhi J, Askari Moghadam R. Local Stresses Effect on Micro-machined Silicon Diaphragm on Zinc oxide Nanowires Piezoelectric Sensors. Modares Mechanical Engineering. 2023; 23(01):25-31.

¹ Advanced Micro and Nano Research Lab., Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

² Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: north karegar aven., faculty of new sciences and technologies, university of tehran, tehran, iran

koohsorkhi@ut.ac.ir

Article History

Received: January 27, 2022

Accepted: August 14, 2022

ePublished: January 25, 2023

ABSTRACT

The electrical properties of nanostructured piezoelectric materials have attracted the attention of many researchers in the last decade. These features are used in piezoelectric micro-sensors. Mechanical propulsion is usually the result of contact between a piezoelectric surface and a foreign object. In this paper, the effect of mechanical propulsion using an air wave (sound) or vacuum on a silicon diaphragm is investigated. The local stresses created on the diaphragm due to the impact of an air wave have a significant effect on the peak-to-peak voltage of the piezoelectric sensor, which can be measured by measuring changes in this parameter. To investigate this, a micromachined diaphragm of silicon was examined and it was found that fabricating a piezoelectric sensor on a thin and patterned diaphragm could increase the peak-to-peak voltage by about 1.3 times. Detection of these stresses using piezoelectric material layered on the thin and formable diaphragm can act as a piezoelectric microphone or a barometer that the presence of microstructures on the diaphragm will increase their sensitivity.

Keywords Mechanical stress, Silicon diaphragm, Microstructures, Piezoelectric nanostructures, Zinc oxide nanowires, MEMS

CITATION LINKS

1- PVDF microbelts for harvesting energy from respiration 2- Barium titanate nanorods on micro-machined silicon substrate for performance enhancement of piezoelectric Nanogenerators (NGs) 3- Nanotechnology-enabled energy harvesting for self-powered micro-nanosystems 4- Hydrothermal zinc oxide nanowire growth using zinc acetate dihydrate salt 5- Improvement in piezoelectric performance of a ZnO nanogenerator by modulating interface engineering of CuO-ZnO heterojunction 6- Effects of Polyethylenimine and Its Molecular Weight on the Chemical Bath Deposition of ZnO Nanowires 7- Advanced energy harvesting using nanogenerator based on zinc oxide nanosheet embedded in photonic crystal 8- Energy efficient routing protocol for energy harvesting wireless networks 9- Growth of ZnO nanorods on rotating and co-centered silicon microstructures for making nanogenerators 10- Hierarchical ZnO Nanorods on Si Micropillar Arrays for Performance Enhancement of Piezoelectric Nanogenerators

بررسی تاثیر تنش‌های موضعی بر روی دیافراگم سیلیکانی طرح دار روی حسگرهای پیزوالکتریک نانو سیم‌های اکسید روی

حامد کاوند^۱، جواد کوهسرخ^{۱*}، رضا عسکری مقدم^۲

^۱ آزمایشگاه تحقیقاتی ساخت ادوات پیشرفته میکرو و نانو، دانشکده علوم و

فنون نوین، دانشگاه تهران

^۲ دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

چکیده

خواص الکتریکی مواد پیزوالکتریک نانو ساختاری توجه بسیاری از محققین را در دهه گذشته به خود جلب کرده است. این ویژگی‌ها در ریزحسگرهای پیزو الکتریک استفاده می‌شود. نیروی محرکه مکانیکی معمولاً نتیجه تماس بین سطح پیزوالکتریک و یک جسم خارجی است. در این مقاله، تاثیر نیروی محرکه مکانیکی با استفاده از یک موج هوایی (آکوستیک) و یا خلاء بر روی دیافراگم سیلیکانی، مورد بررسی قرار گرفته شده است. تنش‌های موضعی ایجاد شده روی دیافراگم در اثر برخورد یک موج هوایی، تاثیر قابل توجهی روی ولتاژ پیک تا پیک حسگر پیزوالکتریک دارد که با اندازه‌گیری تغییرات این عامل می‌توان شدت موج هوایی را به دست آورد. برای بررسی این موضوع، دیافراگم بدون طرح و طرحدار که شامل ریزساختارهای سیلیکانی است مورد بررسی قرار گرفته شد و مشخص شد که ساخت یک حسگر پیزوالکتریک روی یک دیافراگم نازک و طرح دار می‌تواند باعث افزایش ولتاژ اوج تا اوج تا حدود ۱/۳ برابر گردد. آشکارسازی این تنش‌ها با استفاده از ماده پیزوالکتریک لایه نشانی شده روی دیافراگم نازک و منعطف، می‌تواند به عنوان یک میکروفن پیزوالکتریک و یا یک فشار سنج عمل کند که وجود ریزساختارها روی دیافراگم باعث افزایش حساسیت آنها خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: تنش مکانیکی، دیافراگم سیلیکانی، میکرو ساختارها، نانو ساختارهای پیزوالکتریک، نانوسیم‌های اکسید روی، ادوات میکرو الکترومکانیکی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۳

* نویسنده مسئول: koohsorkhi@ut.ac.ir

۱- مقدمه

اخیراً استفاده از حسگرهای بی‌سیم و ابزارهای الکترونیکی پوشیدنی که حاوی انواع نانودستگاه‌های چند منظوره هستند، به‌طور پیوسته افزایش یافته است. همه این دستگاه‌ها انرژی مورد نیاز خود را از باتری‌های الکتروشیمیایی می‌گیرند که عملی نیستند. بنابراین، تعدادی از دستگاه‌های خود تغذیه پایدار که انرژی خود را از محیط اطراف خود به دست می‌آورند مورد مطالعه قرار گرفته است. برداشت انرژی مکانیکی تلف شده (مانند فعالیت‌های انسانی، ارتعاش‌های ماشین‌آلات، امواج صوتی، جریان هوا و جریان آب) همیشه رویای بشریت بوده و به‌طور گسترده‌ای برای سامانه‌های پایدار و خود نیرو مورد توجه قرار گرفته است [1].

استفاده از سیلیکان به عنوان بستر نانو ژنراتورهای پیزوالکتریک دارای مزایایی مانند کاهش هزینه، انعطاف پذیری، ساخت در مقیاس بزرگ و کنترل دوپینگ است که امکان استفاده از آنها به عنوان الکترون رسا و قابلیت ادغام آنها با فناوری‌های دیگر مانند باتری را فراهم می‌کند [2,3]. با ایجاد ریزساختارهای سیلیکانی بر روی دیافراگم سیلیکانی، می‌توان به مساحت بیشتری برای رشد نانو ساختارهای پیزوالکتریک فراهم کرد که به کارایی بالاتری دست یافت.

اکسید روی به عنوان یکی از مواد پیزو الکتریک معروف به حساب می‌آید که به علت تنوع ساختاری مورد توجه قرار گرفته است. این ماده با روش‌های گوناگونی قابل ساخت و لایه‌نشانی است که از مهمترین آنها می‌توان به روش رشد با کوره‌های میکروویو، رسوب شیمیایی بخار و روش هیدروترمال اشاره کرد. روش هیدروترمال به دلایلی مثل عدم نیاز به کاتالیست‌های فلزی، غیر سمی بودن بودن و سادگی روش تولید، از مهمترین و مقرون به صرفه ترین روش به حساب می‌آید [4,5]. پارامترهای موثری در فرایند رشد نانوسیم‌های اکسید روی به روش هیدروترمال از جمله زمان رشد، دفعات لایه نشانی بذر و همچنین مواد افزودنی وجود دارد که باعث کنترل قطر و طول نانو سیم‌ها می‌شود. ماده پلیمری پلی‌اتیلن‌ایمین (PEI Polyethylenimine) تاثیر به سزایی روی قطر و طول نانوسیم‌ها دارد [6]. در سال‌های اخیر برداشت انرژی از نانو ساختارهای پیزوالکتریک و همچنین از ارتعاش‌های محیطی مورد توجه قرار گرفته شده است [7,8].

در این مقاله، تاثیر مورفولوژی بستر یک حسگر پیزوالکتریک مورد بررسی قرار گرفته می‌شود و به جای اعمال نیروی مکانیکی مستقیم از فشار وارده به دیافراگم توسط خلاء استفاده شده است. برای بررسی این موضوع، ابتدا تنش‌های موضعی ایجاد شده روی دیافراگم سیلیکان که نیرو محرکه مکانیکی لازم را روی نانوسیم‌های اکسید روی ایجاد می‌کند، در نرم افزار COMSOL شبیه سازی می‌شود. مراحل ساخت یک حسگر پیزوالکتریک بر پایه نانوسیم‌های اکسید با استفاده از روش هیدروترمال که یکی از معروفترین روش‌ها است، معرفی می‌شود و برای بررسی تنش‌های موضعی، چند ریزساختار مشخص روی بستر ایجاد و همچنین یک چیدمانی برای بررسی تاثیر آنها روی عملکرد حسگر، معرفی می‌گردد. تنش‌های موضعی ممکن است با برخورد یک موج هوایی (موج صوتی) ایجاد شد که امکان استفاده آنها را برای ساخت میکروفن‌های پیزو الکتریک هموار می‌سازد.

۲- دیافراگم سیلیکانی ساده و طرح دار

اجرای شبیه‌سازی‌ها در نرم افزار کامسول، دید مناسبی برای تاثیر بستر روی عملکرد نهایی حسگرها از جمله حسگرهای پیزو

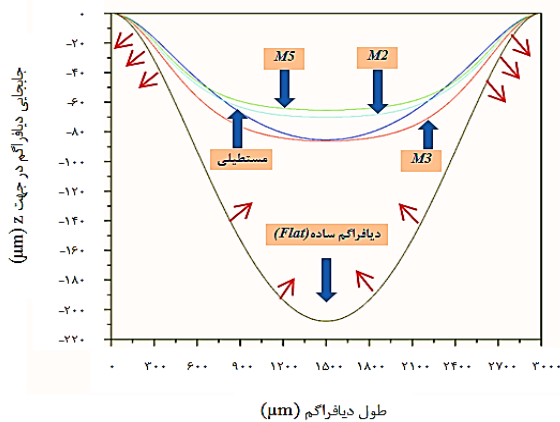
جدول ۱) مشخصات پیکربندی ها مختلف از میکرو ساختارها روی دیافراگم های سیلیکانی.

نوع	ضخامت		فاصله	سطح موثر (mm ²)
	(μm)	(μm)		
دیافراگم بدون طرح	-	-	-	۹
دندانه شانه ای مستطیلی	۳۰	۳۰	۳۰	۱۴/۸۸
دندانه شانه ای دایره ای M۲	۳۰	۳۰	۳۰	۱۴/۳
دندانه شانه ای دایره ای M۳	۵	۵	۱۰	۲۳/۶۹
دندانه شانه ای دایره ای M۵	۵	۵	۳	۳۶/۴۸

۳- شبیه سازی ساختار

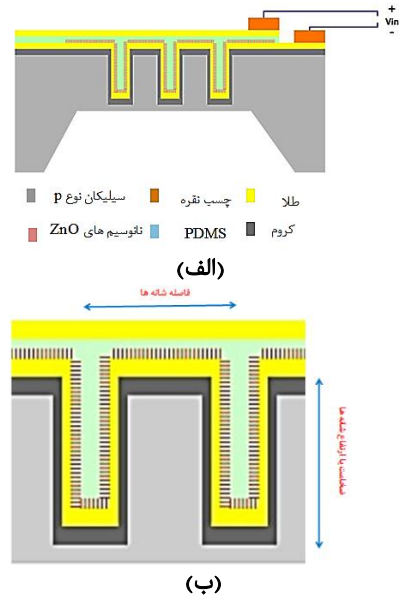
۳-۱- هندسه ساختارها

در شبیه سازی کامسول از یک دیافراگم ۳×۳ میلی متر مربعی با ضخامت ۲۰ میکرون استفاده شد که نیروی مکانیکی ۲۵۰ کیلو نیوتن (فشار خلاء و یا فشار یک موج صوتی)، روی آن اعمال شد. جابجایی دیافراگم در محور z برای همه موارد مطالعه شده است. شکل ۲ میزان خیز ۵ پیکربندی مختلف از دیافراگم های معرفی شده در جدول ۱ را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود بیشترین خیز مربوط به دیافراگم ساده و بدون طرح است که مقدار جابجایی دیافراگم ۲۰۷ میکرون است که در مقایسه با دیگر مدل ها خیلی بیشتر است. در بین تمام پیکربندی های دایره ای، مدل M۳ بیشترین جابه جایی را دارد که حدود ۸۶ میکرومتر است که تقریباً برابر با طرح شانه های مستطیلی است. فلش های قرمز رنگ در این شکل نواحی فشرده شده دیافراگم را نشان می دهد همانطور که مشاهده می شود، نواحی فشرده سازی شده روی سطح دیافراگم متفاوت است و برای کاربردهای خلاء و برخورد موج صوتی، از نواحی از دیافراگم باید استفاده شود که دارای تنش فشاری باشد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، ناحیه فشرده سازی مورد نظر در محدوده وسط قرار دارد و در نتیجه ریزساختارها می بایست روی این ناحیه قرار گیرند. در ۳ طرح دندانه شانه ای دایره ای، بیرونی ترین رینگ دارای قطر ۲۱۳۰ میکرون است که طوری طراحی شده است که در این ناحیه قرار گیرد.



شکل ۲) جابجایی دیافراگم سطح صاف و نواحی فشرده سازی برای پیکربندی های مختلف، فلش های قرمز جهت تنش را روی دیافراگم نشان می دهد.

الکترونیک می دهد. شکل ۱ ساختاری را که برای بررسی تاثیر ریز-ساختارهای روی عملکرد یک حسگر پیزوالکتریک استفاده شده است، نشان می دهد.



شکل ۱) الف) شماتیکی از برش مقطعی یک حسگر ساختار روی دیافراگم ماشینکاری شده سیلیکانی برای بررسی تاثیرات تنش های موضعی و ب) نمایش ابعاد

وجود ساختارهای میکرونی روی هر بستر ساخت از جمله دیافراگم، از طرفی باعث افزایش سطح برای رشد ماده پیزوالکتریک و از طرفی باعث استحکام بیشتر دیافراگم و کاهش خیز آن می شود. برخورد یک نیروی مکانیکی مستقیم مانند یک ضربه به دیافراگم و یا برخورد یک موج هوایی مثل موج صوتی به دیافراگم باعث ایجاد تنش های موضعی روی سطح دیافراگم خواهد شد که این تنش-های موضعی روی ماده پیزوالکتریک حسگر تاثیر بسزایی دارند. برای بررسی تاثیر موفولوژی دیافراگم روی خروجی یک حسگر پیزوالکتریک چند پیکربندی مختلف مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این مقاله دیافراگم با سطح صاف (بدون طرح و الگو)، دیافراگم با ریزساختارهای مستطیلی و دیافراگم با ریزساختارهای دایره ای مورد مطالعه قرار گرفتند. جدول ۱ پنج پیکربندی مختلف را نشان می دهد که یکی از آنها بدون طرح و بقیه دارای ساختارهای میکرونی است. در سه پیکربندی که دارای ریزساختارهای دایره ای هم مرکز است، تنش ها یکنواخت تر خواهد بود که در عمل نیز از آنها استفاده شد. سطح موثر بستر، از دیگر عوامل مهم است که طبق داده های جدول ۲، پیکربندی M۵ دارای سطح موثر بیشتری نسبت به دیگر پیکربندی ها است که منجر به افزایش چگالی نانوسیم ها و در نهایت افزایش عملکرد حسگر از لحاظ این عامل می شود ولی از آنجایی که میزان خیز در این پیکربندی کمتر است، می بایست تاثیر همه عوامل بررسی و سپس نقطه بهینه ای پیدا شود.

۳-۲- تنش وارد شده به دیافراگم سیلیکانی ساده و طرح دار

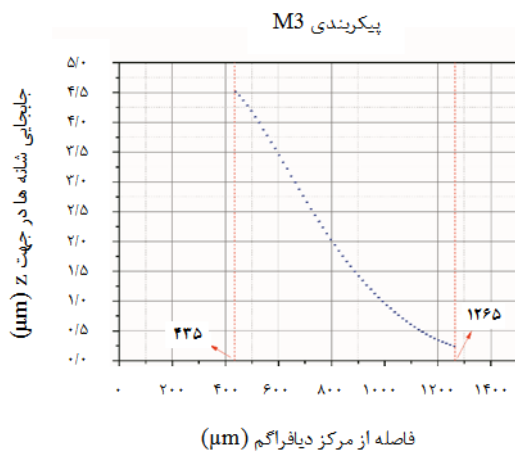
تنش وارد شده بر دیافراگم سیلیکانی یک عامل تعیین کننده در انتخاب الگوی مناسب ریزساختارها است. دیافراگم سیلیکانی می تواند بیش از ۱۰۰ گیگاپاسکال تنش را بسته به جهت کریستالی تحمل کند. شکل ۳ تنش اعمال شده بر غشای سیلیکانی را در پیکربندی مدل های M_2 و M_3 نشان می دهد. جدول ۲ مقادیر مربوط به حداکثر و حداقل تنش را مطابق با داده های شکل ۳ برای سه پیکربندی دایروی نشان می دهد. بر طبق این داده ها، بیشترین تنش وارد شده مربوط به پیکربندی M_0 است. بنابراین هرچه فاصله بین شانه ها کمتر می شود، تنش بیشتری به شانه ها وارد می شود. بنابراین، با کاهش فاصله بین شانه ها، از طرفی انعطاف پذیری دیافراگم کاهش پیدا می کند و طرفی دیگر تنش وارد شده بر شانه ها افزایش می یابد. فضای بین شانه ها در مدل M_0 مساوی ۳ میکرون است و از آنجایی که طول نانوسیم ها حدود چند میکرون است این پیکربندی می تواند مناسبترین پیکربندی باشد ولی با توجه به اینکه رشد نانوسیم های اکسید روی در این فضای اندک به خوبی اتفاق نمی افتد، در عمل از پیکربندی M_0 استفاده نشده است.

۳-۳- جابجایی شانه ها در جهت محور x

میزان جابجایی شانه ها در راستای محور افقی x، نشان دهنده این است که چه میزان شانه ها در هنگام انحراف دیافراگم، به هم نزدیک شده اند. با توجه به اندازه طول دیافراگم مربعی که ۳۰۰۰ میکرون است، شانه ها در تمام پیکربندی های دایروی، از مکانی به شعاع ۴۳۵ میکرون شروع و در مکانی به شعاع ۱۳۰۵ میکرون در گسترده شده اند. شکل ۴ مقدار این جابجایی را برای پیکربندی M_3 نشان می دهد. میزان جابجایی شانه ها به دلیل تقارن، برای نصف دیافراگم آورده شده است. جابجایی بین شانه ها در جهت محور x نشان می دهد که در طول جابجایی دیافراگم در محور z، چقدر شانه ها به هم نزدیک شده اند. این مقدار جابجایی به این دلیل اینکه فشار نانوسیم های پیزوالکتریک بر یکدیگر را نشان می دهد، از اهمیت بالایی برخوردار است. هرچه این مقدار جابجایی بیشتر باشد، نیروی وارده بر نانوسیم ها بیشتر است.

جدول ۲) مقادیر تنش در سطوح مختلف

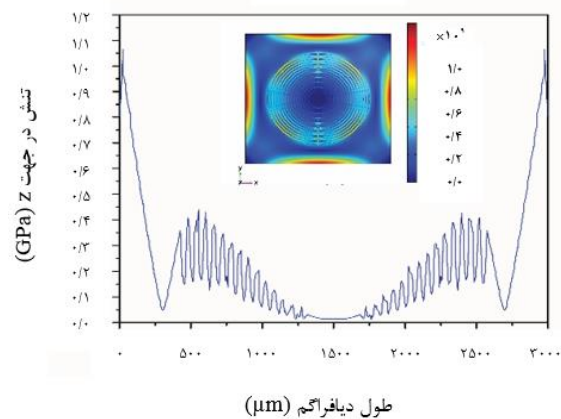
تنش (GPa)	دندانه شانه مستطیلی	M_2	M_3	M_0
حداکثر تنش بر دیافراگم	۰/۸	۱/۰۶	۱/۱	۰/۷۶
حداکثر تنش بر شانه ها	۰/۳	۰/۴۳	۰/۳۸	۰/۴۴
حداقل تنش بر شانه ها	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۴



شکل ۴) جابجایی دیافراگم در محور x برای پیکربندی M_3

شکل ۵ جابجایی بین هر دو شانه ها را برای پیکربندی M_2 نشان می دهد. شکل سهموی این نمودار نشان می دهد که با پیشروی نمودار از نقطه اولیه (محل بزرگترین دایره) به نقطه نهایی در مرکز دیافراگم (محل کوچکترین دایره)، جابجایی بین شانه ها افزایش می یابد و نمودار به اوج خود می رسد و سپس شروع به کاهش می کند. مقدار جابجایی بین شانه ها به مکان آنها نسبت به مرکز

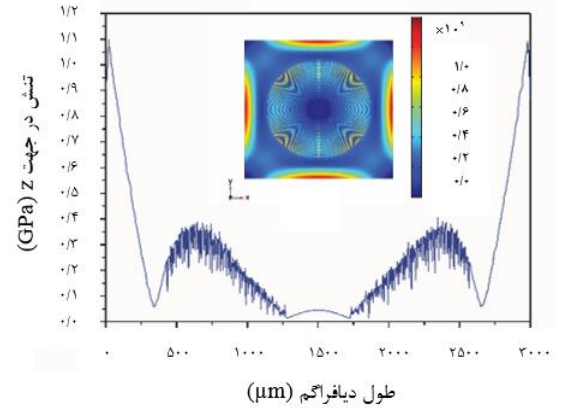
پیکربندی M_2



طول دیافراگم (µm)

(الف)

پیکربندی M_3



طول دیافراگم (µm)

(ب)

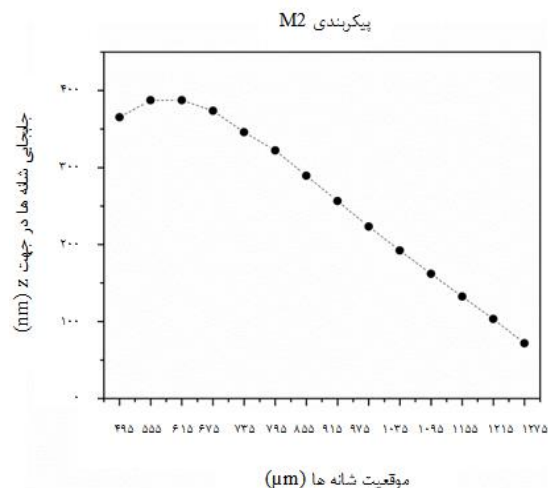
شکل ۳) فشار وارد شده به دیافراگم در پیکربندی های مختلف در جهت محور x، (الف) M_2 ، (ب) M_3

۴- ساخت و تحلیل داده های تجربی

۴-۱- فرآیند ساخت

شکل ۶ تصاویر از مهمترین مراحل فرآیند ساخت را به همراه چیدمان آزمون نشان می‌دهد که از طریق آن می‌توان، میزان تفاوت بین پیکربندی‌های مختلف را بررسی کرد. سمت راست این شکل، تصاویر میکروسکوپی از مراحل مختلف ساخت را نشان می‌دهد. فرآیند ساخت، شامل مراحل ایجاد دیافراگم سیلیکانی با جهت کریستالی (۱۰۰) به روش زدایش همسان‌گرد محلول هیدروکسید پتاسیم است (شکل ۶- الف). بعد از اینکه طرح مدنظر شانه‌های دایروی با پیکربندی‌های M_2 ، M_3 و M_0 روی سطح بالایی سیلیکان با استفاده از فرآیند لیتوگرافی ایجاد شد، نمونه در دستگاه زدایش یونی برای زدایش عمیق و عمودی سیلیکان قرار داده می‌شود تا ارتفاع حدود ۳۵ میکرون زدایش شود (شکل ۶- ب). بعد از زدایش شانه‌های دایروی، یک لایه کروم و طلا به عنوان الکتروود پایینی روی میکرو ساختارها لایه نشانی می‌شود و سپس با استفاده از روش هیدروترمال نانوسیم‌ها اکسید روی، روی بستر سیلیکان رشد داده می‌شود (شکل ۶- ج). به منظور رشد نانو میله‌های اکسید روی، با توجه به مراجع^[3,9] از محلولی شامل ۲۵ میلی مولار نیترات روی هگزا هیدرات، ۲۵ میلی مولار هگزا متیل تترامین، ۸ میلی مولار هیدروکسید آمونیوم و ۵ میلی مولار پولی اتیلن‌گلیکول در آب یون زدایی شده استفاده شده است. به منظور حلالیت بهتر محلول ابتدا به‌طور جداگانه نیترات روی هگزا هیدرات و هگزا متیل تترامین هر یک در درون ۱۰۰ میلی لیتر آب توسط همزن مغناطیسی به محلولی یکنواختی می‌رسند و سپس هر دو را با هم ترکیب می‌شوند و در نهایت هیدروکسید آمونیوم و پلی‌اتیلن‌ایمین (PEI) اضافه می‌شود و توسط همزن مغناطیسی، محلولی یکنواخت تهیه خواهد شد. برای جلوگیری از رشد نانوسیم‌ها در دیگر جاهای نمونه، قسمتی از الکتروود طلا پایینی با تفلون پوشانده می‌شود. بعد از لایه‌نشانی بذریه، نمونه در یک ظرف حاوی ۲۰۰ میلی لیتر از محلول رشد قرار داده شد. ظرف حاوی محلول به منظور پایداری حرارتی بیشتر در درون یک حمام روغن قرار داده شد و توسط هیتر دمای محلول را ۹۰ درجه سانتیگراد ثابت نگه داشته و به مدت ۴ ساعت رشد داده شد. شکل سمت راست (۶- ج) تصویر میکروسکوپ الکترونی از رشد نانوسیم‌های اکسید روی را به روش هیدروترمال نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود رشد به خوبی روی تمام سطوح از جمله دیوارها اتفاق افتاده است و تمام بستر میکرو ماشین‌کاری شده از ماده پیزوالکتریک اکسید روی پوشیده شده است. بعد از اتمام مراحل رشد، یک لایه نازک از پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS) به عنوان هم عایق و هم انتقال دهنده نیروی مکانیکی روی سطح با استفاده از اسپینر لایه‌نشانی شد که ضخامت این لایه حدود ۱۰ میکرون است. پس از عایق سازی ساختار، یک لایه طلا

دیافراگم بستگی دارد و از آنجایی که مقدار تنش در مکانهای مختلف دیافراگم متفاوت است این مقدار نیز متغیر است. با در نظر گرفتن نواحی فشردگی دیافراگم، مشاهده می‌شود که هر چه به شانه‌های مرکزی نزدیک می‌شویم، تنش افزایش می‌یابد و جابجایی بین شانه‌ها افزایش می‌یابد. برای دیگر پیکربندی‌ها نیز رفتار مشابهی وجود دارد.



شکل ۵) میزان جابجایی شانه‌ها در اثر اعمال تنش برای پیکربندی M_2

جدول ۳ حداکثر و حداقل جابجایی بین شانه‌ها را در جهت محور x برای پیکربندی‌های مختلف نشان می‌دهد. با کاهش ضخامت و فاصله بین شانه‌ها، تعداد شانه‌ها در یک ناحیه ثابت، افزایش می‌یابد که به نوبه خود باعث کاهش حداکثر و حداقل مقدار جابجایی شانه‌ها می‌شود. این عامل به علت اینکه بر نیروی اعمال شده بین نانو سیم‌ها پیزو الکتریک تأثیر می‌گذارد، از اهمیت بالایی برخوردار است. همان‌طور که از داده‌های جدول ۳ مشخص است بیشترین جابجایی بین شانه‌ها در پیکربندی M_2 مشاهده می‌شود ولی از آنجایی که فاصله شانه‌ها در این پیکربندی ۳۰ میکرون است و تمام فاصله بین شانه‌ها را نمی‌توان از نانوسیم‌های اکسید روی پر کرد بنابراین اگر چه در پیکربندی M_0 مقدار جابجایی بین شانه‌ها نسبت به دیگر پیکربندی‌ها کمتر است ولی به علت فاصله اولیه کمتر بین شانه‌ها، این میزان جابجایی تأثیر بیشتری روی نانوسیم‌ها خواهد داشت. البته این نکته مهم است که رشد نانوسیم‌های اکسید روی بین شانه‌های پیکربندی M_0 به خوبی انجام نمی‌شود بنابراین مناسب‌ترین پیکربندی که در آن فاصله شانه‌ها ۱۰ میکرون است، پیکربندی M_3 است.

جدول ۳) میزان جابجایی بین شانه‌ها در پیکربندی‌های مختلف

جابجایی بین شانه‌ها (nm)	M_3	M_2	M_0
بیشترین	۳۸۷	۱۲۷	۵۸/۴
کمترین	۷۱/۸	۲۱/۴	۶/۱۲
فاصله بین شانه‌ها	۳۰(μm)	۱۰(μm)	۳(μm)

حدود ۰/۸۱۴ ولت است که در این مرجع ریزساختارها روی دیافراگم سیلیکانی تست شده‌اند. تفاوت داده‌های تجربی پیکربندی‌های M۲ و M۳ و همچنین داده‌های این مرجع، نشان می‌دهد که تنش‌های موضعی علاوه بر فشار وارده به نانوسیم‌های اکسید روی تاثیر بسزایی در ولتاژ اوج تا اوج دارند. بنابراین هرچه میزان تغییر فاصله بین شانه‌ها افزایش یابد، تاثیر بیشتری روی ولتاژ خروجی خواهد داشت.

جدول ۴) مقایسه نتایج تجربی با نتایج مرجع [۱۰]

مقایسه	نسبت ابعاد کاری (cm ²)	مقدار ولتاژ بدست آمده در مساحت کاری	
		مقدار ولتاژ در مساحت برابر (ولت)	مقدار ولتاژ در مساحت برابر (ولت)
[۱۰]	۶/۴۷	۴/۹۱	۴
پیکربندی (طرح M _۲)	۲۰	۰/۷۸۵	۰/۵۳۶
پیکربندی (طرح M _۳)	۲۰	۰/۷۸۵	۰/۸۳۲

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله تاثیر ریزساختارها روی دیافراگم سیلیکانی در عملکرد حس‌گرهای پیزوالکتریک مورد بررسی قرار گرفت که منجر افزایش کارایی این قبیل حس‌گرها شد. ساخت حس‌گرهای پیزوالکتریک روی دیافراگم و یا هرگونه سطح منعطف، باعث آشکارسازی موج-های ضعیف هوایی از جمله موج‌های ضعیف آکوستیک خواهد بود. برای اعمال نیرو بر روی دیافراگم از یک چیدمان خلاء استفاده شد که قادر است نیرو را به صورت موضعی بر روی نانومیله‌های پیزوالکتریک اعمال کند. نتایج نشان می‌دهد که جابجایی اندکی بین هر دو شانه مجاور برقرار می‌شود که این جابجایی روی نانوسیم‌های اکسید روی، رشد داده بین آنها نیرو وارد کرده و در نتیجه باعث افزایش ولتاژ اوج تا اوج خواهد شد. در بین پیکربندی‌های مورد مطالعه، مدل M_۵ بهترین نتایج تئوری را ارائه داد ولی از آنجایی که فاصله بین شانه‌ها در این پیکربندی ۳ میکرون است و رشد نانوسیم‌ها در این فضا به خوبی صورت نمی‌گیرد، پیکربندی M_۳ بهترین نتایج تجربی را ارائه داد که باعث افزایش ۳۰ درصدی در ولتاژ اوج تا اوج شد. بنابراین با توجه به تجزیه و تحلیل انجام شده در این مقاله، پیکربندی M_۳ بهترین گزینه است.

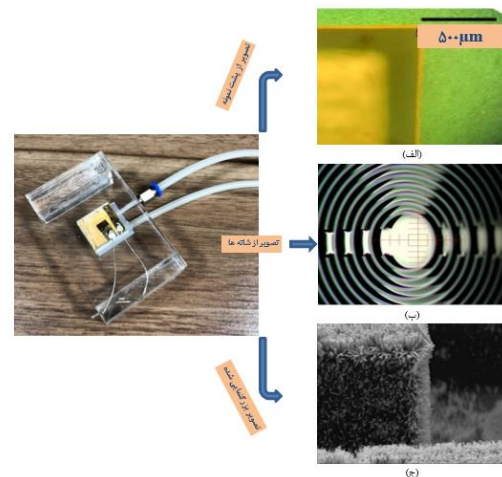
تشکر و قدردانی: نویسندگان بر خود لازم میدانند از همکاران و خدمات آزمایشگاه ساخت ادوات پیشرفته میکرو و نانو و همچنین مجموعه اتاق تمیز دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران تقدیر و تشکر نمایند.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

به عنوان لکتروود بالایی روی پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان با استفاده از روش کندوپاش، لایه نشانی شد.

۲-۴- تحلیل داده های تجربی

برای بررسی تاثیر تنش‌های موضعی ناشی از ریزساختارهای روی دیافراگم سیلیکانی، از دو روش می‌توان استفاده کرد. در روش اول می‌توان چیدمانی مشابه قسمت سمت چپ شکل ۶ ساخت و به کمک آن با بسامد مشخصی به پشت دیافراگم، فشار ۲۵۰ کیلوپاسکال (خلأ) اعمال کرد. این چیدمان به منظور نگهداشتن نمونه و بستری برای انحراف دیافراگم سیلیکانی توسط خلأ مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش دوم همین میزان فشار را می‌توان به طور مستقیم به روی دیافراگم اعمال کرد. از آنجایی که از یک لایه پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان بین الکتروود بالایی و سطح نانوسیم‌ها استفاده شده است. هر دو روش جواب یکسانی را خواهند داد. اگر چه داده‌های تئوری نتایج مناسبتری را برای پیکربندی M_۵ ارائه دادند ولی به دلیل فاصله اندک بین شانه‌ها و رشد ناقص نانوسیم‌ها در این فاصله، پیکربندی M_۵ در عمل موفق نبود بنابراین دیگر پیکربندی‌ها استفاده شدند.



شکل ۶) فرایند ایجاد دیافراگم طرح دار و ساخت یک چیدمان تست، سمت چپ) تصویری از چیدمان تست و سمت راست) تصاویر میکروسکوپ اپتیکی و الکترونی از مراحل ساخت، الف) نمایی از پشت دیافراگم با استفاده از فرایند زدایش محلول هیدروکسید پتاسیم، ب) تصویری از روی دیافراگم با شانه‌های دایروی، ج) تصویر نانوسیم‌های اکسید روی رشد داده شده روی دیواره شانه‌ها.

جدول ۴ نتایج آزمون روی پیکربندی‌های M_۲ و M_۳ را نشان می‌دهد که با ساختار مشابه در مرجع [۱۰] مقایسه شده است. بیشترین ولتاژ اوج تا اوج برای پیکربندی M_۲ و M_۳ را ترتیب ۵۳۶ و ۸۳۲ میلی ولت برای مساحت ۰/۷۸۵ سانتیمتر مربع است که این مقادیر در واحد سطح به ترتیب ۰/۶۸۷ و ۱/۰۶ ولت است. در مرجع [۱۰] ولتاژ اوج تا اوج در نمونه‌ای با میکروساختارهای مشابه سیلیکانی به ارتفاع ۲۰ میکرون ۴ ولت در مساحت حدود ۴/۹۱ سانتیمتر مربع به دست آمده است که این مقدار در واحد سطح

تعارض منافع: در این مقاله از برخی نتایج حاصل از پایان نامه تحت عنوان "بررسی و مشخصه‌یابی رفتار الکتریکی نانومیله‌های اکسید روی در اثر اعمال فشار روی دیافراگم سیلیکانی" آقای حامد کاوند که نویسنده اول این مقاله است، مستخرج شده است.

منابع مالی: هزینه این پژوهش از محل اعتبار پژوهشی تامین شده است.

منابع

- 1- Sun C, Shi J, Bayerl DJ, Wang X. PVDF microbelts for harvesting energy from respiration. *Energy & Environmental Science*. 2011;4(11):4508-12.
- 2- Kordlar AG, Koohsorkhi J, Nejad ET. Barium titanate nanorods on micro-machined silicon substrate for performance enhancement of piezoelectric Nanogenerators (NGs). *Solid-State Electronics*. 2021 Dec 1;186:108168.
- 3- Wang ZL, Wu W. Nanotechnology-enabled energy harvesting for self-powered micro-/nanosystems. *Angewandte Chemie International Edition*. 2012 Nov 19;51(47):11700-21.
- 4- Akgun MC, Kalay YE, Unalan HE. Hydrothermal zinc oxide nanowire growth using zinc acetate dihydrate salt. *Journal of Materials Research*. 2012 Jun;27(11):1445-51.
- 5- Wang Q, Qiu Y, Yang D, Li B, Zhang X, Tang Y, Hu L. Improvement in piezoelectric performance of a ZnO nanogenerator by modulating interface engineering of CuO-ZnO heterojunction. *Applied Physics Letters*. 2018 Jul 30;113(5):053901.
- 6- Parize R, Garnier JD, Appert E, Chaix-Pluchery O, Consonni V. Effects of polyethylenimine and its molecular weight on the chemical bath deposition of ZnO nanowires. *ACS omega*. 2018 Oct 2;3(10):12457-64.
- 7- Heydari A., Darbari S. Advanced energy harvesting, using nanogenerator based on zinc oxide nanosheet embedded in photonic crystal. *Modares Electrical Engineering Iran* 2013; 13(3): 3-9. (in persian)
- 8- Salimi Qadi B., Gol Sorkh Tabar M. Efficient Energy Routing Protocol for Body Energy Harvesting Wireless Networks. *Journal of Biomedical Engineering Iran* 2016; 3. (in persian)
- 9- Ghasemi Kardler A., Koohsorkhi J., Kavand H. Growth of ZnO nanorods on rotating and co-centered silicon microstructures for making nanogenerators. *National Conference of Chemical Engineering and Nanotechnology, Iran, 2019*. (in persian)
- 10- Hasan MR, Baek SH, Seong KS, Kim JH, Park IK. Hierarchical ZnO nanorods on Si micropillar arrays for performance enhancement of piezoelectric nanogenerators. *ACS applied materials & interfaces*. 2015 Mar 18;7(10):5768-74.