Journal of Acoustical Society of Iran, Vol. 13, No. 1, 2025

(Research Article)
Investigation of the Sensitivity of a Micro-Machined Acoustic MEMS Sensor to Input Sound Wave Intensity

Javad Kohsorkhi*[1], Amir Reza Madadi Bandan[1], Mohammad Hossein Hamidzadeh[2]
[1] Department of MEMS and NEMS, Faculty of Intelligent Systems, University of Tehran
[2] Faculty of Aerospace Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Unit
Received: 2024/10/01, Accepted: 2025/10/15

Abstract:

In this article, the sensitivity of a micro-fabricated acoustic sensor for particle velocity measurement is investigated. The sensor was fabricated using a silicon-based micromachining process, and a dedicated readout circuit was designed to fully process its signal. To mitigate thermal power loss through the substrate and reduce interference effects, the two-wire sensing structure was suspended within a short acoustic channel of rectangular cross-section. The direction, intensity, and frequency of the incident sound wave are the three key parameters influencing the sensor's performance; This study focuses on the effect of intensity. The sensor was designed and fabricated for the frequency range of 100–2000 Hz, functioning not only as a directional sensor but also as an intensity-measuring microphone. The results indicate that a 15 dB reduction in the input sound pressure level (SPL) leads to a 50% decrease in the sensor's output at 1 kHz. The sensor exhibits a sensitivity of approximately 3 mV per 10 dB after amplification, making it suitable for acoustic measurement in a wide range of applications.

Keywords: Thermal sensor, Microflown, Micromachining, Silicon, Microphone, Particle speed sensor.

pp. 62-67 (In Persian)

* Corresponding author E-mail: Koohsorkhi@ut.ac.ir

[Downloaded from joasi.ir on 2026-09-06]

مقاله پژوهشی

مجله انجمن علوم صوتی ایران

سال: ۱۴۰۴، دوره: ۱۳، شماره ۱، صفحات: ۶۲-۶۷

بررسی حساسیت حسگر ریزساخت صدا ساخته‌شده با فناوری میکروماشین‌کاری به شدت موج صدای ورودی

جواد کوهسرخی*[۱]، امیررضا مددی بندان[۱]، محمدحسین حمیدزاده[۲]

[۱] دانشکدگان علوم و فناوری‌های بین رشته ای، دانشکده سامانه‌های هوشمند، دانشگاه تهران

[۲] دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۳

چکیده

در این مقاله، حساسیت یک حسگر ریزساخت (میکروحسگر) برای اندازه‌گیری سرعت ذرات بررسی می‌شود. حسگر با استفاده از فرآیند میکروماشین‌کاری بر روی بستر سیلیکونی ساخته شد و مدار خوانش متناظری برای دریافت کامل علامت طراحی گردید. به‌منظور کاهش تلفات توان گرمایی از طریق بدنه و نیز کاهش آثار تداخلی، ساختار دو سیمه روی یک کانال صوتین کوتاه با مقطع مستطیلی معلق شده است. جهت، شدت و بسامد صدای ورودی سه شبه‌سنج کلیدی مؤثر بر عملکرد این حسگر هستند. این مطالعه بر تأثیر شدت تمرکز دارد. حسگر برای بازه بسامدی ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ هرتز طراحی و ساخته شده است. علاوه بر تشخیص جهت صدا، قابلیت اندازه‌گیری شدت صدای ورودی را در نقش یک میکروفون نیز دارد. نتایج نشان می‌دهد با کاهش ۱۵ دسی‌بل شدت موج ورودی، خروجی حسگر در بسامد ۱ کیلوهرتز به میزان ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. حسگر از حساسیت حدود ۳ میلی‌ولت به ازای هر ۱۰ دسی‌بل (پس از تقویت) برخوردار است که امکان استفاده از آن را در اندازه‌گیری صوتین در طیف وسیعی از کاربردها فراهم می‌کند.

کلیدواژه‌ها: حسگر گرمایی، میکروفلاون، میکروماشین‌کاری، سیلیکون، میکروفون ، حسگر سرعت ذرات.

۱. مقدمه

صدا یا موج صدا یک حالتی از انرژی است که از تحریک ذرات یک ماده از جمله هوا به وجود می‌آید. سرعت صدا یک کمیت برداری است که دارای جهت و سرعت است. این سرعت در جامدات به دلیل تراکم زیاد مولکول‌ها، بیش‌تر از مایعات و در مایعات بیش‌تر از یک گاز کامل رفتار می‌کند، سرعت صدا وابسته به فشار هوا نخواهدبود.

در هوای خشک در دمای ۲۰ درجه سلسیوس، سرعت صدا حدود ۳۴۳ متر بر ثانیه است. در دسترس‌بودن اندازه‌گیری‌های دقیق سرعت صدا، مزایای مهمی دارد، از جمله امکان تعیین میزان مشارکت و درصد سهم یک منبع صدا نسبت به دیگر منابع صدا. برای اندازه‌گیری جریان سیال‌ها و یا سرعت نوسان مولکول‌های یک گاز از ۶ روش مختلف از جمله شارش‌سنج[۱]های مبتنی بر فشار، شارش‌سنج حرارتی، شارش‌سنج‌های گردابی، شارش‌سنج‌های الکترومغناطیسی، شارش‌سنج‌های فراآوایی و شارش‌سنج‌های کوریولیس بهره می‌برند [۱-۳].

در شارش‌سنج حرارتی مقدار حرارت اندازه‌گیری‌شده به عنصر گرم‌کننده[۲] حسگر اعمال می‌شود. با افزایش جریان سیال، مقدار بیش‌تری گرما از دست می‌رود که حسگر این میزان کاهش گرما را اندازه‌گیری می‌کند [۳].

از مزایای شارش‌سنج حرارتی می‌توان به عدم نیاز به جبران دما، اندازه‌گیری بسیار دقیق، قابلیت اندازه‌گیری جریان سیال کم‌فشار اشاره کرد. یکی از ابزارها جهت اندازه‌گیری سرعت صدا میکروفلاون است که مبتنی بر

* نویسنده پاسخگو: Koohsorkhi@ut.ac.ir

[1] Flowmeter
[2] Heater

[Downloaded from joasi.ir on 2026-09-06]

شارش‌سنج حرارتی عمل می‌کند. اولین میکروفلاون در سال ۱۹۹۴ توسط بری و همکاران ۱۹۹۶ در دانشگاه توئنته اختراع شد [۴].

در این مقاله یک ساختار دوسیمی معلق‌شده روی یک کانال[1] میکروماشین‌کاری روی یک بستر سیلیکون با استفاده از فن‌آوری[2] میکروماشین‌کاری الکترومکانیکی[3] مورد بررسی قرار می‌گیرد. وجود کانال باعث ایجاد یک موج صدا تخت می‌شود که برای تحلیل شبه‌سنج[4]ها موثر است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. معرفی هندسه ساختار

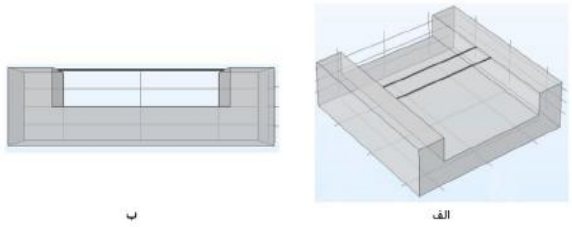
به طور کلی میکروفلاون متشکل از دو سیم فلزی نازک به طول یک میلی‌متر و عرض زیر ۱۰ میکرون است. این سیم‌های مقاومتی با عبور جریان الکتریکی تا دمای ۳۰۰ الی ۵۰۰ درجه سلسیوس گرم می‌شوند. با عبور جریان سیال (ارتعاش ذرات هوا در اثر موج صدا) توزیع دما به صورت نامتقارن در اطراف سیم‌ها تغییر کرده که این امر منجر به اختلاف دما بین دو سیم می‌شود.

از آن‌جایی که مقاومت سیم‌ها به دما بستگی دارد، این اختلاف دما، مقاومت محلی سیم را تغییرداده و با مقدار این تغییر می‌توان سرعت سیال را اندازه‌گیری کرد. در این مقاله جنس سیم‌ها از پلاتین و نیز طول سیم‌ها برابر با ۱۰۰۰ میکرون، عرض آن‌ها ۶ میکرون و ضخامت برابر با ۰٫۳ میکرون انتخاب شده است. مقاوت ویژه پلاتین برابر با $۱٫۱\times۱۰^{-۷}$ و سیال نیز هوا در نظر گرفته‌شده‌است.

پلاتین از دسته موادی است که مقاومت الکتریکی آن با دما تغییر می‌کند. تغییرات مقاومت با دما اساس عملکرد حسگرهای جریان مبتنی بر سیم داغ است. مقاومت سیم وابسته به دما است و دما وابسته به سرعت جریان سیال و جریان الکتریکی است.

بنابراین با معلوم بودن جریان الکتریکی و خوانش مقاومت سیم می‌توان سرعت سیال را سنجش کرد. شکل ۱ هندسه مربوط به ساختار دوسیمی معلق‌شده روی یک کانال را نشان می‌دهد.

با استفاده از رابطه $R_{.}=\rho_{pt}(۱+\Delta T)$ مقاومت پایه سیم برابر با ۲۳۶ اهم و نیز با استفاده از $R=R_{.}\left(۱+\alpha_{pt}\Delta T\right)$ مقاومت سیم در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس برابر با ۶۷۵٫۴ اهم به دست می‌آید. جدول ۱ مقادیر مولفه‌های اولیه طراحی حسگر میکروفلاون را در اختیار می‌گذارد.



شکل **۱** ساختار شبیه‌سازی‌شده حسگر شامل دو سیم موازی معلق‌شده روی یک کانال مستطیلی.

جدول ۱ مقادیر مولفه‌های اولیه طراحی [نویسنده].

ردیف	مولفه	تعریف	مقدار	واحد
۱	$w=۲L$	عرض سیم	۶	میکرومتر
۲	α	فاصله سیم‌ها	۱۰۰	میکرومتر
۳	h_{pt}	ضخامت لایه پلاتین	۱۵۰	نانومتر
۴	h_{SiNi}	ضخامت لایه سیلیکون‌نیتراید	۲۰۰	نانومتر
۵	l_y	طول سیم	۱۰۰۰	میکرومتر
۶	l_z	عمق مجرا از سیم تا دیواره	۳۰۰	میکرومتر
۷	P	توان برقی	۳۰	میلی‌وات
۸	$R_{.}$	مقاومت سیم	۲۳۶	اُهم

۲-۲. تاثیر جریان الکتریکی عبوری از سیم‌ها

گرمای ایجادشده در خود حجم سیم‌ها به جریان بایاس و عبوری از آن‌ها از رابطه $P = RI^{۲}$ به دست می‌آید. در این رابطه، P کل توان تلف‌شده در حجم، R مقاومت و I جریان عبوری است. چون مقدار مقاومت وابسته به دما است، مقدار آن ثابت نیست.

۳. نتایج

۳-۱. نتایج شبیه‌سازی

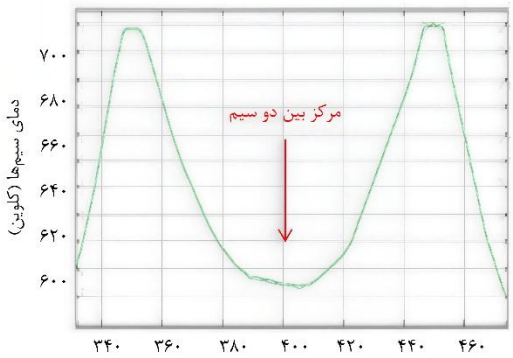
نتایج حاصل از شبیه‌سازی دقیق حسگر شامل دو سیم که ابعاد هر سیم ۰٫۳۵ × ۶ × ۱۰۰۰ میکرومتر است، در

[1] Channel
[2] Technology
[3] MEMS; Micro-Electro Mechanical System
[4] Parameter

[Downloaded from joasi.ir on 2026-09-06]

شکل ۲ نمایش داده شده‌است. فاصله دو سیم ۱۰۰ میکرومتر و جریان هوا به صورت تابع بسامدی و به صورت رابطه $V=۰/۰۰۴\exp(i۲\pi ft)$ تعریف شده‌است و بسامد استفاده‌شده ۲۵۰ هرتز است.

در این شکل تغییرات دمای دو سیم در زمان‌های مختلف نشان داده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در اثر حرکت مولکول‌های هوای بالای سیم‌ها به دلیل برخورد یک موج صدا و یک جریان هوای آرام، اختلاف دمایی در حد چند درجه سلسیوس بین آن‌ها ایجاد می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلاف زمانی بین برخورد موج هوایی باعث اختلاف در دمای دو سیم می‌شود.



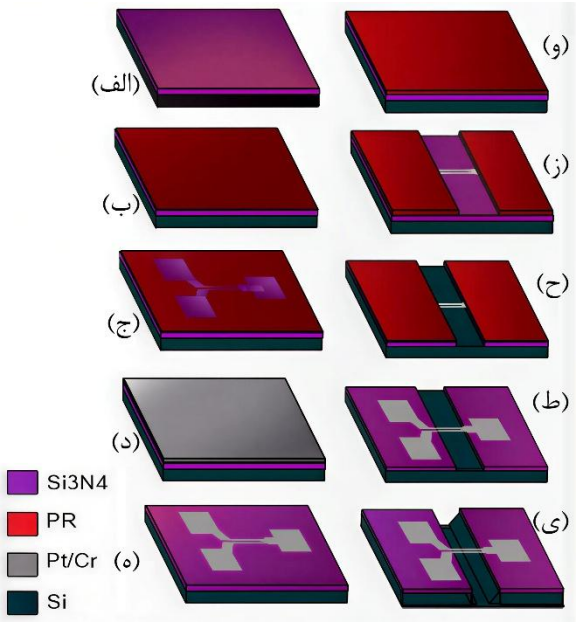
شکل۲ الگوی حرارتی ساختار شبیه‌سازی‌شده در زمان‌های $t_۱=۰$ و $t_۲=۱$ ثانیه.

۳-۲. ساخت حسگر

پس از انجام مراحل شبیه‌سازی و بدست‌آوردن شبه‌سنج‌های طراحی برای ساخت حسگر، سعی شده‌است، با توجه به داده‌های شبیه‌سازی، از دو سیم موازی استفاده شود که مقاومتی معادل ۲۰۰ تا ۲۶۳ اهم دارند. این دو سیم روی ویفر[1] سیلیکون و با استفاده از روش‌های زدایش خشک[2] و زدایش تر[3]، معلق‌سازی شده‌اند.

در اینجا، برای معلق‌سازی در بخش زدایش تر از هر دو محلول تترا متیل آمونیم هیدروکسید[4] و هیدروکسید پتاسیم[5] استفاده شد [۵].

شکل ۳ فرآیند ساخت حسگر صدا را نشان می‌دهد که عملیات ساخت روی ویفر برای معلق‌سازی و ایجاد کانال استفاده شده است.



شکل ۳ شماتیک فرآیندهای ساخت حسگر، مراحل شامل: لایه نشانی فلز پلاتین روی لایه‌های عایق $SiO_۲/Si_۳N_۴$ و معلق‌سازی طرح حسگر دو سیمی روی کانال مستطیلی.

لایه نشانی فلزات کروم و پلاتین، به‌ترتیب، در سامانه لایه نشانی بخار حرارتی و کندوپاش با فشار کم انجام می‌شود. بعد از لایه نشانی و الگو دهی سیم‌های پلاتینی، ویفر درون دستگاه آرآی‌ایی[6] جهت ایجاد کانال مستطیلی قرار داده‌می‌شود و سپس در محلول هیدروکسید پتاسیم زدایش می‌شود.

این محلول زدایش با غلظت ۲۵ درصد وزنی و در دمای ۷۵ درجه سلسیوس، نیترید سیلیکون و فلزات را دست‌نخورده باقی می‌گذارد، اما در مکان‌هایی که سیلیکون توسط نیترید سیلیکون محافظت نشده‌است، سیلیکون را به شکل ذوزنقه‌ای شکل، مورد زدایش قرار می‌دهد.

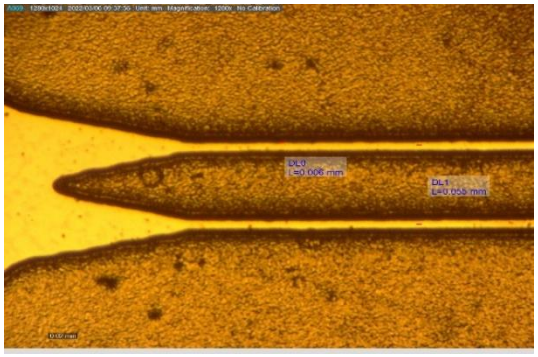
زدایش از بالای ویفر تا جایی جلو می‌رود که سیم‌ها روی ساختار معلق گردد. برای محافظت از پشت ویفر در حین مراحل زدایش، پشت ویفر با یک لایه فلزی از

[1] Wafer
[2] Dry etching
[3] Wet etching
[4] Tetramethylammonium hydroxide
[5] Potassium hydroxide
[6] RIE; Reactive Ion Etching

[Downloaded from joasi.ir on 2026-09-06]

جنس کروم محافظت می‌شود. شکل ۴ تصویری از دو مرحله ساخت را نشان می‌دهد. شکل ۴ (الف) ساختار دوسیمی را قبل از معلق‌سازی و شکل ۴ (ب) ساختار دوسیمی را بعد از معلق‌سازی با استفاده از روش آرآی‌ایی نشان می‌دهد. فرآیند معلق‌سازی در فشار ۱۰ تور و در حضور پلاسمای ترکیب گازی SF_6/O_2 با نسبت ۱ به ۴ و با توان پلاسمایی ۲۰۰ وات انجام شد. در اینجا فاصله سیم‌ها کمتر از ۱۰۰ میکرون است.

(الف)



(ب)

شکل ۴ تصویر میکروسکوپی از مهم‌ترین مراحل ساخت حسگر؛ قبل و بعد از معلق‌سازی، (الف) قبل و (ب) بعد از معلق‌سازی.

۴. بحث

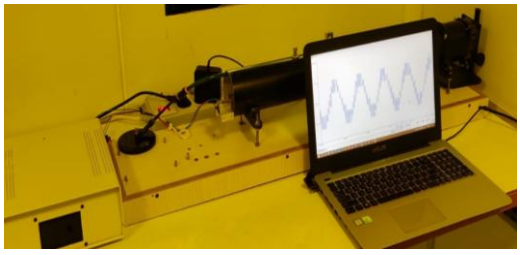
شکل ۵ تصویری از چیدمان مراحل آزمون[1] به همراه تصویر از محفظه نگهدارنده حسگر را نشان‌می‌دهد که توسط یک مدار رابط به مدار اصلی تقویت، منتقل می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، موج صدا ابتدا در یک کانال مستطیل شکل وارد محفظه حسگر می‌شود. این کانال باعث ایجاد یک جبهه موج تخت می‌گردد که نوفه را کاهش می‌دهد (شکل۳).

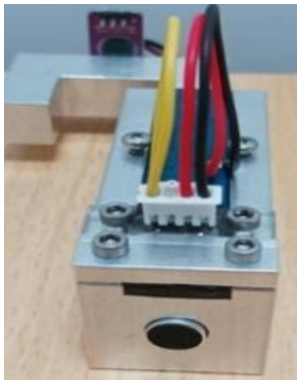
به دلیل کم بودن جریان ناشی از موج صدا، عملا به جریان‌های بالا جهت حرارت‌دهی به سیم‌ها نیازی نیست و معمولا با توجه به ساختار معلق سیم‌ها و بسته به مقاومت آن‌ها جریان در حدود ۲۰ میلی‌آمپر ثابت تنظیم می‌شود و موج‌های صدا بر حسگر اعمال می‌شود.

هرچند با تغییر مقاومت‌های متغیری که بر روی برد تعبیه شده‌است، امکان بالا بردن جریان تا ۴۲ میلی‌آمپر نیز میسر است. اما با توجه به ساختار معلق حسگر در جریان‌های بالا، امکان سوختن سیم‌ها وجود دارد. این مطلب یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های حسگر است که نمی‌توان جریان عبوری از سیم‌ها را نامحدود افزایش داد.

با توجه به مقاومت حسگرها و داده‌های حاصل از شبیه‌سازی، سعی می‌شود با تغییر جریان، حدود ۳۰ میلی‌وات توان در سیم‌ها مصرف شود.



(الف)



(ب)

شکل ۵ تصویری از چیدمان محفظه آزمون و مشخصه‌یابی حسگر، (الف) کانال صدا به همراه بخش‌های آن و (ب) محفظه آزمون حسگر.

[1] Test

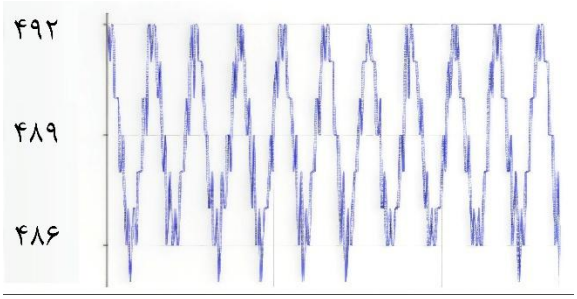
[Downloaded from joasi.ir on 2026-09-06]

۴-۱. حساسیت حسگر در شدت‌های مختلف

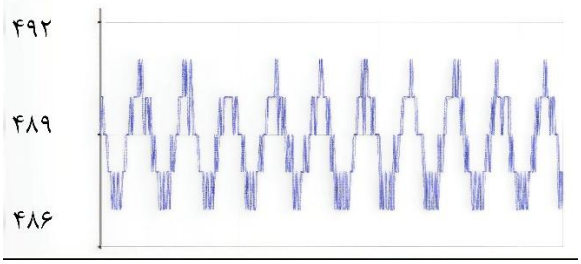
شدت موج صدای فرودی، یکی از شبه‌سنج‌های موثر روی حساسیت این حسگر است که روی عملکرد حسگر تاثیرگذار است. برای بررسی این شبه‌سنج شرایط آزمون فراهم شد. حسگر با یک موج صدا با بسامد ۱۰۰ هرتز و شدت‌های مختلف مورد آزمون قرار گرفت.

نمودارهای شکل ۶ نشان‌دهنده نتایج حاصل از این شبه‌سنج است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با کاهش ۱۵ دسی‌بل حدودا ۵۰ درصد خروجی حسگر کاهش می‌یابد.

پله‌ای بودن نمودارها مربوط به روش نمونه برداری داده‌ها است که با افزایش مدار خوانش این مساله برطرف می‌شود.



(الف)



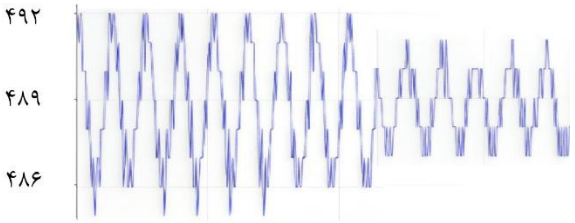
(ب)

شکل ۶ مقایسه میزان حساسیت حسگر در برابر شدت صدا در بسامد ۱۰۰ هرتز، (الف) شدت ۱۱۰ دسی‌بل و (ب) شدت ۸۰ دسی‌بل.

شکل ۷ تاثیر شدت موج صدا را درحین آزمایش نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش شدت موج صدا، حسگر واکنش سریعی از خود نشان می‌دهد.

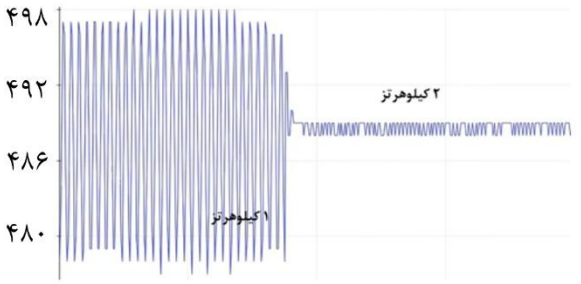
۴-۲. حساسیت حسگر در بسامدهای مختلف

همان‌طور که قبلا اشاره شد، حساسیت این حسگر به شبه‌سنج‌های مختلف بستگی دارد که تاثیر بسامد در مقاله‌ای دیگر، بیش‌تر مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برای نشان‌دادن تاثیر بالای حساسیت به بسامد، شکل ۸ حساسیت را در دو بسامد نشان می‌دهد.



شکل ۷ بررسی تاثیر شدت موج صدا در حین آزمون حسگر؛ شدت حسگر به طور آنی ۱۵ سی بل کاهش پیدا کرده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با تغییر بسامد از ۱ به ۲ کیلوهرتز حساسیت به شدت تغییر می‌کند که نشان‌دهنده وابستگی شدید این حسگر به بسامد موج فرودی است. فاصله بین دو سیم، از شبه‌سنج‌های موثر این حسگر برای قله حساسیت به بسامد است. بنابراین برای یک بازه مشخصی از بسامدها، این حسگر دارای حساسیت قابل قبولی است که متناسب با فاصله سیم‌ها است و با تغییر این فاصله می‌توان بازه بسامدی را تغییر داد.



شکل۸ تاثیر بالای بسامد موج فرودی روی حساسیت حسگر، برای بسامدهای ۱ و ۲ کیلوهرتز.

جدول ۲ مقایسه نتایج حاصل از این حسگر را با موارد مشابه نشان می‌دهد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد حساسیت این حسگر از مورد مشابه [۶] بالاتر است، ولی پاسخ بسامدی این حسگر نسبت به موارد مشابه محدودتر است. یکی از دلایل افزایش حساسیت به علت ایجاد یک کانال، بالای سیم‌ها است که باعث کاهش اثرات تداخلی امواج می‌شود (شکل ۳). بازه اندازه‌گیری شدت نیز در مقایسه با موارد مشابه افزایش را نشان می‌دهد.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-09-06]

جدول ۲ مقایسه حسگرهای ساخته شده مشابه [نویسنده].

مرجع	بازه بالای اندازه‌گیری (دسی‌بل)	بازه بسامدی ۳± دسی‌بل (هرتز)	حساسیت میلی‌ولت/۱۰دسی‌بل (در بسامد ۲۵۰ هرتز)
پژوهش حاضر	۱۳۰	۱۰۰-۲۰۰۰	۳
[۶]	۹۰	۲۰-۱۰۰۰	۱٫۹
[۷]	۱۰۰	۲۵۰-۱۶۰۰۰	۵

۵. نتیجه‌گیری

این مقاله شبیه‌سازی و ساخت یک حسگر صدا را معرفی می‌کند که برای کاهش تداخل امواج ساختار دو سیمی روی یک کانال صدا مستطیلی ساخته شده‌است. مراحل میکروماشین‌کاری شامل لیتوگرافی‌نوری[1]، زدایش خشک و تر، لایه‌نشانی فاز بخار و کندوپاش است تا فرآیند ساخت حسگر کامل شود.

برای جلوگیری از انتقال حرارت بین سیم‌ها و پایه‌ی سیلیسیم، لایه سیلیسیم اکسید که یک عایق حرارتی و الکتریکی است، در نظر گرفته شد. متناسب با حسگر ساخته شده مدار قرائتی[2] طراحی شد تا بتواند علامت[3] را به طور کامل شناسایی کند و آن را برای پردازش روی سامانه به صورت دیجیتالی ارسال کند.

این مدار، قابلیت تقویت خروجی حسگر تا ۱۱۰۰ برابر و تغییر مقدار توان خروجی به منظور وفق‌پذیری با انواع حسگرهای ساخته شده‌است. مقدار تقویت در نظر گرفته‌شده برای این مدار ۳۰۰ برابر خروجی حسگر و توان اعمالی به سیم‌های حسگر ۳۰ میلی‌وات است.

هم‌چنین به کمک نرم‌افزار شبیه‌ساز کامسول مولتی فیزیک حالت بهینه برای حسگر در نظر گرفته‌شده تا بهترین عملکرد از آن گرفته‌شود. پس از انجام مراحل ساخت، حسگر درون لوله یک سر بسته مورد آزمایش قرار گرفت. در نهایت این حسگر در معرض صدا با بسامد ۱۰ تا ۲۰۰۰ هرتز قرار گرفت و حساسیت حسگر ۳ میلی‌ولت به ازای هر ۱۰ دسی‌بل، بعد از تقویت بدست آمد. بسامد قطع بالا ۱ کیلوهرتز و بسامد قطع پایین حدود ۱۰ هرتز است. بنابراین حسگر به خوبی نسبت به بسامدهای پایین صوت حساس است.

تشکر و قدردانی

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

تعارض منافع

موردی توسط نویسندگان گزارش نشده‌است و این مقاله از پایان نامه تحت عنوان «ساخت و مشخصه‌یابی حسگر ریزساخت صدا با استفاده از سیم‌های موازی پلاتینی روی بستر سیلیکون با استفاده از مکانیزم گرمایی» امیر رضا مددی بندان، مستخرج شده است.

فهرست منابع

[1] H. Bree, P. Leussink, T. Korthorst, H. Jansen, T. Lammerink, M. Elwenspoek, "The μ-flown: A novel device measuring acoustical flows," IEEE International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX, 1995.
[2] W, Chang, Z. Li, S. Cheng, S. Sun, C. Gao, Y. Hao, "A gas medium approach to sensitivity improvement of MEMS-based thermal acoustic particle velocity sensors," IEEE International Conference on IC Design and Technology, 2019.
[3] M. Kheirolahi Hossein Abadi, J. Koohsorkhi, A. Ghasemi Kordlar "A four-wire orthogonal structure for accurate measurement of fluid velocity and wind flow direction using silicon micro-machining on silicon nitride memb-ranes." Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 20, no. 1, pp. 1-8, 2023.
[4] H. Bree, P. Leussink, T. Korthorst, H. Jansen, T. Lammerink, M. Elwenspoek, "The μ-flown: A novel device measuring acoustical flows," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 54, no.1-3, pp. 552-557, 1996.
[5] E. Taiedinejad, A. Kordlar, J. Koohsorkhi, G. Sadeghian, "A four-wire micro anemometer in double cross shape with high mechanical stability for high sensitive air flow," Micro-electronic Engineering, vol. 262, pp. 111831, 2022.
[6] V. Svetovoy, I. Winter, "Model of the m-flown microphone," Sensors and Actuators, vol. 86, pp 171–181, 2000.
[7] H. Bree, "An overview of microflown technologies," Acta Acustica united with Acustica, vol. 89, no. 1, pp. 163-172, 2003.

[1] Photolithography
[2] Readout Circuit
[3] Signal

[Downloaded from joasi.ir on 2026-09-06]