

مقاله پژوهشی

DOR: [20.1001.1.24767131.1400.7.1.6.7](https://doi.org/10.1001.1.24767131.1400.7.1.6.7)

درصد همانندی: ۴٪

بهبود حساسیت هیدروفن با استفاده از ترانزیستور گیت معلق دارای Proof Mass در فرکانس‌های پایین

روزبه نگهداری^{۱*}، محمد زارع احتشامی^۲، حسین شاهمیرزایی^۳، محمدرضا کازرانی وحدانی^۴

r.neghahdari@sutech.ac.ir

ehteshami@mut.ac.ir

hshahmirzaee@mut.ac.ir

kazerani@mut.ac.ir

^{۱*} نویسنده مسئول، مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر^۲ مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر^۳ مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر^۴ مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۱۹

چکیده

در این پژوهش یک هیدروفن باند پهن فرکانس پایین طراحی و شبیه‌سازی شده است. هسته اصلی این ساختار را یک ترانزیستور ماسفت نوع n تشکیل می‌دهد. مزیت عمده استفاده از این ترانزیستورها در مبدل‌ها، امیدانس ورودی بالا و خروجی پایین ماسفت‌هاست. گیت این ترانزیستور به صورت معلق و به شکل صفحه مستطیل مسطح دارای Proof Mass، بالای آن قرار گرفته است. اساس کار این هیدروفن تغییر ظرفیت خازن ایجاد شده بین گیت و کانال ترانزیستور در اثر برخورد موج آکوستیکی بر سطح گیت است که به دنبال آن جریان و ولتاژ خروجی ترانزیستور تغییر می‌کند. جریان بالای ترانزیستورها از دیگر مزیت استفاده آن‌هاست، چون جریان خروجی بیشتر، حساسیت بیشتری را به دنبال دارد. در این مقاله، ابتدا به معرفی ساختار هیدروفن و پارامترهای مؤثر آن پرداخته می‌شود، پس از تحلیل مدهای ارتعاشی گیت، پارامترهای اساسی ساختار و تأثیر آن‌ها روی حساسیت ساختار بررسی می‌شود. در آخر نیز پس از بررسی تغییر جنس گیت با مواد مختلف، حساسیت نهایی ساختار با حساسیت گزارش شده در سایر مراجع مقایسه می‌شود. نتایج بیانگر این است که حساسیت هیدروفن طراحی شده در بازه فرکانسی ۱۰-۱۰۱۰۰ Hz ثابت و ۱۶۰ (ref: 1V/1μPa)db است که نسبت به تحقیقات پیشین بهبود چشمگیری نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آکوستیک، هیدروفن، ترانزیستور گیت معلق، ماسفت، سیستم‌های میکروالکترومکانیکی

۱. مقدمه

فرکانس‌های پایین، امپدانس الکتریکی افزایش می‌یابد. در این ساختارها با استفاده از ترانزیستور می‌توان بر این محدودیت‌ها غلبه کرد. ترانزیستورهای ماسفت امپدانس ورودی بالا و امپدانس خروجی پایینی دارند و تقویت سیگنال نیز از بارزترین ویژگی این ترانزیستورهاست و در نتیجه در ساخت حس‌گر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند.

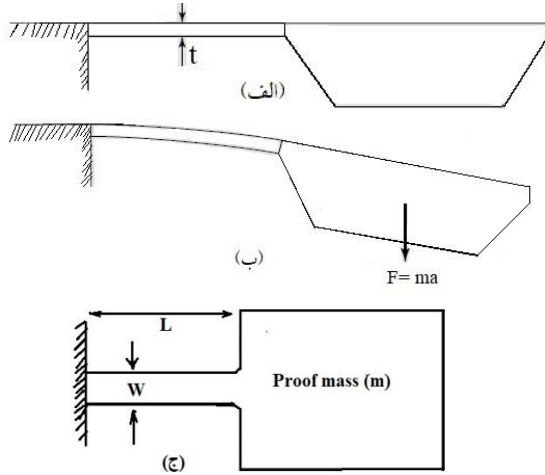
خروجی هیدروفن‌ها [۱۵] اغلب از جنس بار الکتریکی بوده و استفاده از تقویت‌کننده بار الکتریکی در نزدیکی آن الزامی است. مثلاً در مبدل‌های پیزوالکتریک، اعمال موج آکوستیکی بر سطح ماده پیزوالکتریک، سبب ایجاد بارهای تجمع یافته می‌شود که برای انتقال آن در تحلیل موج فرودی به تقویت بارهای الکتریکی تجمع نیاز دارد [۱۵]. ویژگی اصلی هیدروفن ارائه شده در این پژوهش نسبت به ساختارهای مشابه پیشین، آن است که در ساختار پیشنهادی به تقویت‌کننده بار الکتریکی نیاز ندارند، زیرا هسته ساختار ارائه شده در این مقاله از یک ترانزیستور ماسفت تشکیل شده است. از آنجا که خروجی ترانزیستور «جریان الکتریکی» است و نه بار، نیاز به تقویت‌کننده بار الکتریکی وجود ندارد. کمیتی که در این مقاله به عنوان خروجی هیدروفن بررسی می‌شود از جنس جریان بوده و برای تقویت آن می‌توان از تحلیل پارامترهای ساختار (که در ادامه در متن آورده شده است) به منظور بهبود حساسیت بهره برد. حساسیت بالای این ساختار و اندازه کوچک آن در مقایسه با ساختارهای مشابه پیشین [۱۴-۲۰] از برجسته‌ترین ویژگی ساختار پیشنهادی در این مقاله است.

۲. اصول عملکرد ساختار پیشنهادی

اصول عملکرد هیدروفن پیشنهادی (شکل ۱ الف) بر مبنای تغییرات ظرفیت خازنی است که بین گیت و کانال ترانزیستور تشکیل می‌شود. با برخورد امواج آکوستیکی به سطح گیت، فاصله بین گیت و کانال ترانزیستور تغییر می‌کند. تغییر فاصله بین گیت و کانال ترانزیستور موجب تغییر ظرفیت خازن می‌شود. مبدل‌های ارائه شده در مراجع [۱۸ و ۱۹] بر همین اساس طراحی شده‌اند، در این مقاله تلاش شده تا با تغییر پارامترهای ساختاری، پارامترهایی مانند حساسیت را بهبود دهیم.

مناطق اقیانوسی جهان حدود ۳۶۲ میلیون کیلومتر مربع، یعنی حدود ۷۱ درصد از سطح زمین را پوشش داده است. در طول تاریخ، بشر همواره در پی استفاده بیشتر از دریاها و اقیانوس‌ها بوده و به مرور زمان اهمیت این امر رو به فزونی بوده است. از این رو استفاده از حس‌گرهای زیرآبی جایگاه گسترش فوق‌العاده‌ای پیدا کرده است [۱]. این مسئله به‌ویژه برای کشوری مانند ایران که حدود ۲۷۰۰ کیلومتر مرز آبی در دریای عمان، خزر و خلیج فارس دارد، اهمیت زیادی دارد. سامانه‌های سوناری^۱ یکی از مهم‌ترین عناصر سامانه‌های ناوبری و سازه‌های دریایی است که یکی از بخش‌های اصلی آن‌ها حس‌گرهای آکوستیکی یا هیدروفن‌ها می‌باشد. کاربرد اصلی هیدروفن‌ها آشکارساز امواج آکوستیکی در زیر آب است. هیدروفن‌ها در سامانه‌های سوناری باید توانایی آشکارساز امواج آکوستیکی از فرکانس چند هرتز تا چند صد کیلوهرتز را داشته باشند [۲-۴]. اما به‌طور کلی هر هیدروفن متناسب با کاربردی که دارد؛ مثلاً در ماهیگیری [۵]، ماشین‌های زیرآبی هوشمند [۶ و ۷] و مانند این، پهنای باند فرکانسی متفاوتی دارد. به عنوان نمونه هیدروفن استفاده شده به منظور TAS^۲ (سونار آرایه‌ای یکپارچه)، احتیاج به حساسیت و ماندگاری بالا و سیگنال خروجی قابل اعتماد دارند؛ زیرا عملکرد این نوع سونارها باید در اعماق زیاد و حتی زمانی که در معرض نویز هستند، پایدار بماند [۸ و ۹]. در عوض هیدروفن‌های مورد استفاده سونوبوی‌ها^۳ باید علاوه بر حساسیت بالا، در عمق کم عملکرد مطلوبی داشته باشند [۱۰]. علاوه بر این، توان مصرفی و هزینه پایین نقش مهمی در استفاده از هیدروفن‌ها دارد. پیش‌تر اکثر هیدروفن‌ها با موادی مثل سرامیک‌های پیزوالکتریک یا پلیمرهای پیزوالکتریک از قبیل PVDF^۴ ساخته می‌شدند [۱۱-۱۳]. پیشرفت در فناوری سامانه‌های میکروالکترومکانیکی (MEMS^۵) برای دانشمندان و محققان این امکان را فراهم کرده تا ابعاد حس‌گرها را تا حد میکرومتر کاهش دهند [۱۴]. در سال‌های اخیر ساخت هیدروفن با فناوری MEMS به کمک مواد پیزوالکتریک بسیار گسترش یافته است. اما در هیدروفن‌های پیزوالکتریک با کاهش ابعاد فیزیکی و کوچک‌سازی، حساسیت کاهش و در

که در آن E مدول یانگ، l طول بیم و I تکانه اینرسی^۶ است. از آنجاکه در ساختار هیدروفن ارائه شده از دو بیم برای معلق نگه داشتن Proof Mass استفاده شده است، پس ضریب سختی فنر دو برابر رابطه (۴) خواهد بود [۲۱].



شکل ۲. مدل گیت معلق به منظور تحلیل دینامیکی الف) گیت معلق بدون اعمال نیرو، ب) خمش گیت در اثر اعمال نیرو، ج) نمای سطح بالای گیت

$$k = 2 \times \frac{12 E I}{l^3} \quad (5)$$

در این حال X اندازه جابه جایی Proof Mass بر اثر اعمال نیروی F حاصل از برخورد موج آکوستیکی برابر خواهد بود با [۲۱]:

$$X = \frac{F}{k} \quad (6)$$

اگر جرم Proof Mass برابر با m باشد، طبق قانون دوم نیوتون (۳) داریم [۲۱]:

$$X = \frac{ma}{\frac{12 E I}{l^3}} = \frac{m a l^3}{24 E I} \quad (7)$$

همان طور که از رابطه (۷) نمایان است، جرم Proof Mass و مقدار جابه جایی بیم با یکدیگر رابطه مستقیم دارد. پس با افزایش جرم بیم، جابه جایی آن نیز افزایش می یابد. در واقع طبق رابطه ۶، افزایش جرم (در نتیجه افزایش جابه جایی) معادل این است که تأثیر نیروی اعمالی توسط بیم بیشتر حس می شود. پس اگر تمام پارامترها ثابت باشند و فقط جرم گیت را متغیر فرض کنیم، با افزایش جرم، تأثیر نیرو یا فشار حس شده از سوی گیت طبق:

$$P = \frac{F}{A} \quad (8)$$

جریان ترانزیستور و ظرفیت خازن تشکیل شده بین گیت و سورس از رابطه زیر به دست می آید [۱۶ و ۱۷].

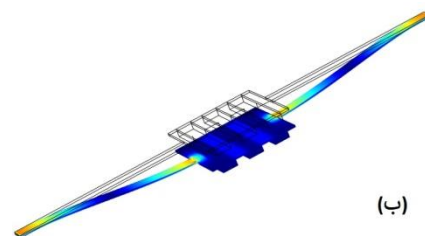
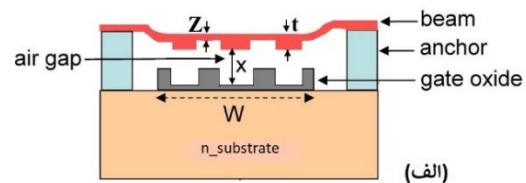
$$I_{ds} = \left(\frac{1}{2}\right) \mu_n C_{ox} eq \left(\frac{W}{L}\right) (V_{gs} - V_T)^2 \quad (1)$$

که نشانگر یک رابطه مستقیم است. از سوی دیگر حساسیت حس گر نیز (رابطه ۲) با تغییرات جریان خروجی یا تغییرات ولتاژ خروجی رابطه مستقیم دارد:

$$S = 20 \log\left(\frac{V}{P}\right) \text{ dB ref } \frac{V}{\mu Pa} @ 1m \quad (2)$$

بنابراین با افزایش ظرفیت خازن می توان حساسیت ساختار را افزایش داد.

ایجاد یک ساختار دندان دندانه ای با شانه های توپُر (Proof Mass) موجب افزایش جرم بیم می شود. ساختار اولیه هیدروفن و گیت معلق که Proof Mass دارد، در شکل ۱ آورده شده است. به دلیل اینکه گیت به صورت معلق بالای کانال ترانزیستور است و بین گیت و اکسید گیت، هوا قرار دارد از عبارت «گیت معلق» برای این ساختار استفاده شد.



شکل ۱. الف) سطح مقطع هیدروفن پیشنهاد شده، ب) گیت معلق ترانزیستور

با افزایش جرم گیت، طبق شکل ۲ اندازه نیروی اعمالی به بیم مطابق قانون دوم نیوتن:

$$F = ma \quad (3)$$

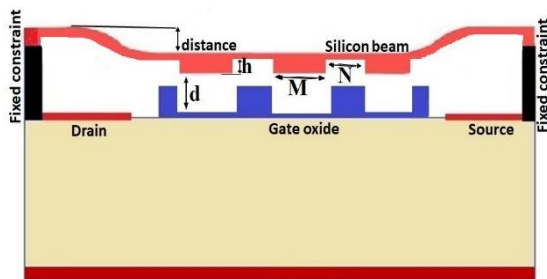
افزایش می یابد.

برای تحلیل فیزیکی این ساختار، جابه جایی بیم را با یک فنر مدل می کنیم که در آن ضریب سختی فنر از رابطه زیر به دست می آید [۲۱]:

$$k = \frac{12 E I}{l^3} \quad (4)$$

جریان‌دهی بیشتر این نوع ماسفت است. هدف قسمت الکترونیکی، بررسی نسبت تغییرات جریان خروجی ترانزیستور به فشار اعمالی به گیت آن است. ترانزیستور در ناحیه اشباع کار می‌کند تا از وابستگی جریان خروجی به دیگر پارامترها (ولتاژ درین-سورس) ممانعت شود [۱۶].

در این ساختار، گیت ترانزیستور، شامل یک صفحه ۵۰۰ میکرومتر مربعی است که به وسیله دو میله که طول هر کدام ۱۰۰۰ میکرومتر است؛ بالای کانال ترانزیستور معلق نگه داشته شده است. پهنای هر میله ۸۰ میکرومتر و ضخامت صفحه و میله نیز ۱۲ میکرومتر است. نمایی از سطح مقطع جانبی ترانزیستور به همراه پارامترهای آن در شکل ۴ نشان داده شده که پارامترهای ساختاری مورد استفاده در آن مشخص شده است.



شکل ۴. نمایی از سطح مقطع جانبی ترانزیستور گیت معلق و پارامترهای آن

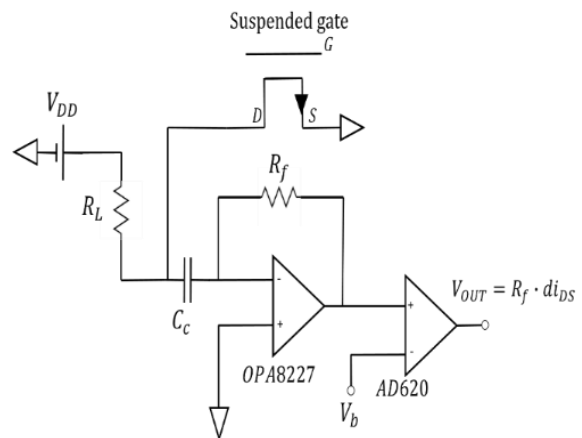
جرمی که به بیم افزوده و Proof Mass نامیده شده شامل سه برجستگی روی بیم است. اگر هر برجستگی را یک سلول بنامیم؛ پارامترهای M و h به ترتیب عرض و ارتفاع یک سلول Proof Mass است. پارامتر N فاصله یک سلول Proof Mass از سلول کناری است. پارامتر d فاصله بیم و کانال ترانزیستور است.

۴. تحلیل فرکانسی ساختار

مهم‌ترین معیارهای انتخاب هر هیدروفن به منظور کاربرد آن، بازه فرکانس کاری آن است. عملکرد خطی هیدروفن، مشروط به آن است که در فرکانس بسیار پایین‌تر از نخستین فرکانس رزونانس کار کند. جابه‌جایی بیم مبدل در نخستین چهار فرکانس تشدید گیت ساختار ارائه شده، در شکل ۵ نمایش داده شده است.

بیشتر خواهد بود که در آن P فشار موج آکوستیکی و A نشان‌دهنده مساحت سطحی است که نیرو به آن وارد می‌شود.

به منظور تقویت جریان می‌توان از مدار معادل پیشنهادی شکل ۳ استفاده کرد [۱۸] و در خروجی، یک سیگنال AC مشاهده کرد. طبقه اول شکل ۳ نقش تقویت‌کننده جریان را دارد و خروجی طبقه دوم در واقع سیگنال AC تقویت شده است.



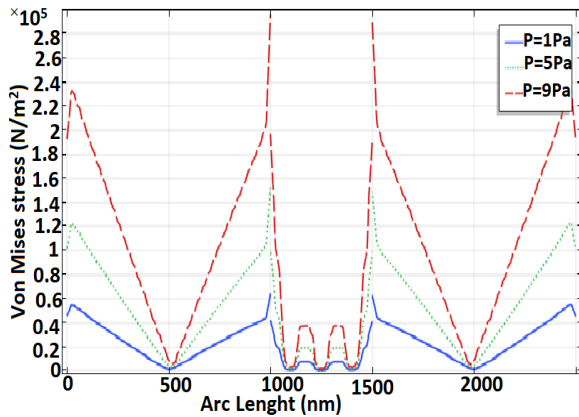
شکل ۳. مدار پیشنهادی [۱۸]، در طبقه اول جریان تقویت می‌شود، خروجی طبقه دوم سیگنال AC را نتیجه می‌دهد

از آن جا که بین گیت و زیر لایه اختلاف پتانسیل وجود دارد، مقداری بار مؤثر ناشی از همین اختلاف پتانسیل روی این صفحات تجمع پیدا کرده و باعث غیرخطی شدن جابه‌جایی بیم می‌شود. برای حذف این اثر مزاحم، اختلاف پتانسیل بین گیت و زیر لایه صفر قرار داده می‌شود. و از سوی دیگر، ولتاژ آستانه مقداری منفی قرار داده می‌شود تا ترانزیستور در حالت خاموش قرار نگیرد.

۳. شبیه‌سازی و نتایج آن

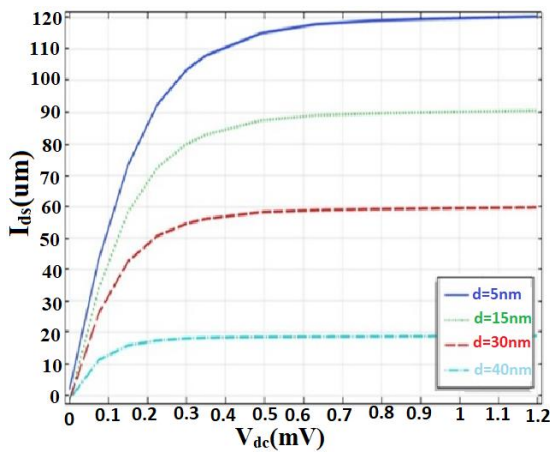
شبیه‌سازی ساختار پیشنهادی این مقاله (شکل ۱) با استفاده از روش المان محدود^۲ به کمک نرم‌افزار کامسول در دو بخش مکانیکی و الکتریکی انجام می‌شود. در بخش مکانیکی، بخش متحرک ساختار، که شامل گیت معلق ترانزیستور ماسفت است و میزان جابه‌جایی گیت بر اثر برخورد موج آکوستیکی بررسی می‌شود. در بخش الکتریکی میزان تغییرات جریان خروجی ترانزیستور ماسفت نوع n بر اثر جابه‌جایی گیت بررسی می‌شود. علت استفاده از ماسفت نوع n ، موصلیت بالاتر و

در شکل ۷ نمایش داده شده که نشان می‌دهد استرس با فشار رابطه مستقیم دارد.



شکل ۷. استرس ایجاد شده در طول گیت بر اثر اعمال موج آکوستیکی با فشارهای متفاوت

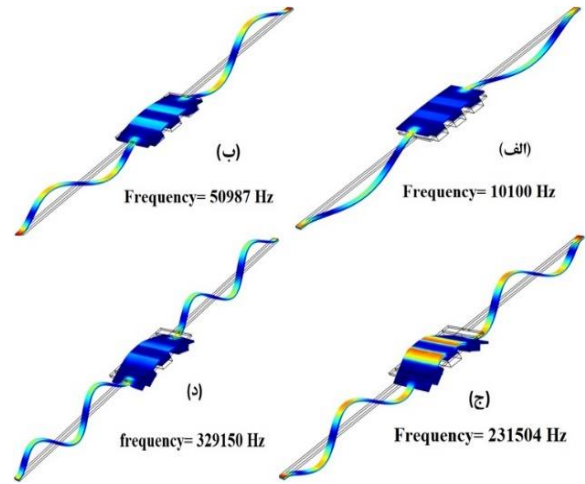
میزان تغییرات جریان خروجی ترانزیستور با تغییر فاصله بیم و سطح عایق بین بیم و کانال ترانزیستور d ، در شکل ۴ نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل نمایش داده شده با کاهش فاصله بین گیت و کانال ترانزیستور ظرفیت خازن درین - سورس افزایش یافته و طبق رابطه ۱، جریان ترانزیستور نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۸. وابستگی جریان ترانزیستور به میزان جابه‌جایی بیم

جدول ۱. مواد استفاده شده در ساختار بیم و مشخصات آن‌ها

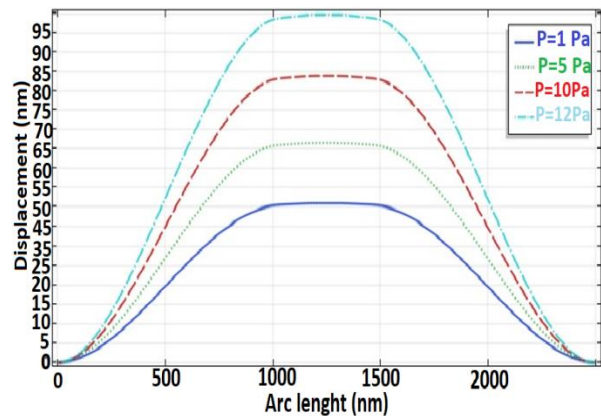
نام ماده	چگالی ماده	ماژول یانگ	نرخ پواسون
آلومینیوم اکسید (Al_2O_3)	$3965 [kg/m^3]$	$400^9 [Pa]$	0.22
سیلیکون نترید (Si_3N_4)	$3100 [kg/m^3]$	$250^9 [Pa]$	0.23
سیلیکون (Si)	$2329 [kg/m^3]$	$170^9 [Pa]$	0.28
سیلیکون دی‌اکسید (SiO_2)	$2200 [kg/m^3]$	$70^9 [Pa]$	0.17



شکل ۵. جابه‌جایی گیت مبدل در نخستین چهار مد ارتعاشی تشدیدی (الف) نخستین فرکانس رزونانس = $10100 Hz$ ، (ب) دومین فرکانس رزونانس = $50987 Hz$ ، (ج) سومین فرکانس رزونانس = $231504 Hz$ ، (د) چهارمین فرکانس رزونانس = $329150 Hz$

۵. تحلیل استاتیک

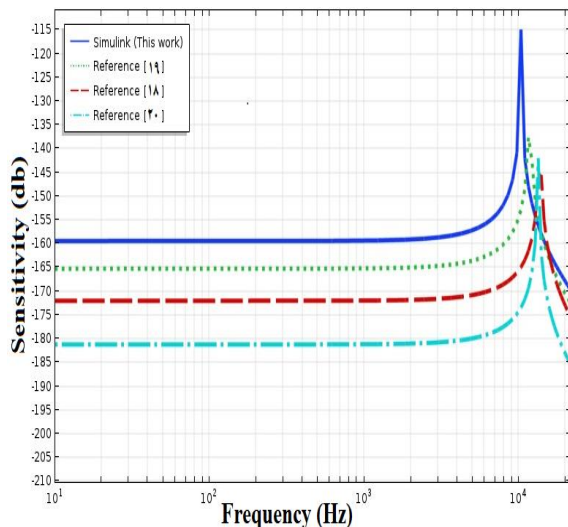
همان‌طور که گفته شد؛ فشار امواج آکوستیکی بر سطح گیت تعیین‌کننده تغییرات جریان خروجی ترانزیستور است. طبق شکل ۶ فشار وارد بر بیم و میزان جابه‌جایی بیم رابطه مستقیمی دارند. به دلیل آنکه لبه‌های بیم کاملاً ثابت نگه داشته شده‌اند، در این لبه‌ها کمترین جابه‌جایی مشاهده می‌شود. در عوض همان‌طور که در شکل ۷ نمایش داده شده، استرس در این لبه‌ها بیشینه است.



شکل ۶. جابه‌جایی گیت بر اثر اعمال موج آکوستیکی با فشارهای مختلف در طول گیت

بدیهی است هر چه میزان فشار اعمالی به سطح گیت بیشتر باشد، گیت نیز باید استرس بیشتری را تحمل کند. این مسئله

[۱۸] 12dB بهبود داشته، ضمن اینکه بازه فرکانس کاری کاهش یافته است.



شکل ۱۰. مقایسه حساسیت ساختار ارائه شده با ساختارهای مراجع [۱۸] و [۱۹] و [۲۰]

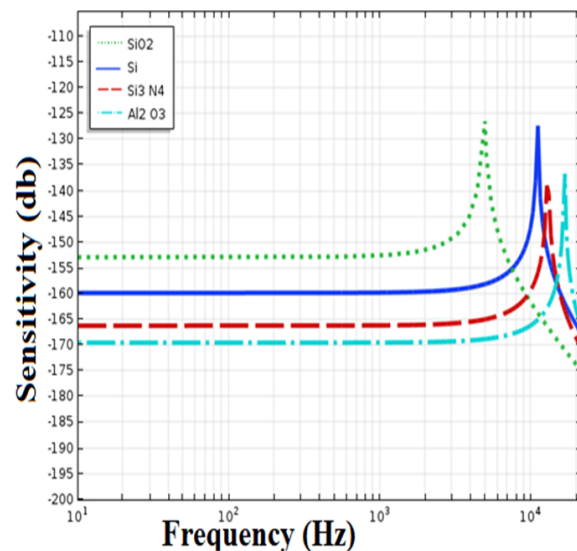
۶. نتیجه گیری

در این مقاله از یک ترانزیستور با گیت معلق به عنوان عنصر اصلی ساختار یک هیدروفن استفاده شد. گیت این ترانزیستور به صورت معلق روی آن قرار گرفته است. با ایجاد گیت با ویژگی Proof Mass حساسیت ساختار نسبت به مرجع [۱۹] 5dB افزایش پیدا کرد؛ ضمن اینکه با تغییر جنس گیت نیز می توان شاهد افزایش 12dB در حساسیت بود. اگر بخواهیم این ساختار را از نظر اندازه با ساختارهای مشابه پیشین مقایسه کنیم، در سطحی یکسان، می توان تعداد بیشتری از ساختار پیشنهادی را جای داد بدون آنکه در میزان حساسیت تغییر حاصل شود. دیگر نقطه قوت این ساختار نسبت به ساختارهای پیشین، استفاده از ترانزیستور ماسفت است، ترانزیستورهای CMOS امکان مجتمع پذیری بیشتری دارند. همچنین برخلاف مبدل های پیشین به منظور انتقال و پردازش سیگنال، نیاز نیست مدار الکترونیکی مبدل در فاصله خیلی نزدیکی قرار گیرد.

سپاسگزاری

این مطالعه با حمایت دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی علوم و فناوری هوادریا انجام شده است. از پشتیبانی مادی و معنوی صورت گرفته کمال تقدیر و تشکر را داریم.

طبق رابطه ۷، حساسیت مبدل با مدول یانگ بیم رابطه عکس دارد. تغییرات حساسیت مبدل با تغییر مدول یانگ بیم در شکل ۹ نمایش داده شده است. مقادیر مدول یانگ مورد استفاده در این شکل بر اساس چهار ماده معرفی شده در جدول ۱ است. همان طور که انتظار می رفت با افزایش مقدار ماژول یانگ، حساسیت ساختار کمتر شده است. Si و SiO_2 نسبت به مواد دیگر حساسیت بهتری را ارائه می دهند. اما بازه عملکرد فرکانسی ساختار با کاهش مدول یانگ کاهش می یابد. مقدار حساسیت Si و SiO_2 به ترتیب برابر با -152db و -160db است، (شکل ۹) و بازه عملکرد فرکانسی آنها نیز به ترتیب حدود 5000 و 10100 هرتز هستند. عواملی مانند طول، جرم، ضخامت، جنس بیم و ابعاد، ضخامت و جنس صفحه Proof Mass از جمله پارامترهای مؤثر در پهنای باند این ساختار است.



شکل ۹. حساسیت ساختار ارائه شده نسبت به تغییرات جنس گیت

حساسیت ساختار هیدروفن ارائه شده در این مقاله در بازه فرکانسی ۱۰ تا ۴۰ کیلوهرتز در شکل ۱۰ بررسی شده است. در این شکل مانند مرجع های [۱۸، ۱۹ و ۲۰]، از Si به عنوان گیت استفاده شده است. حساسیت ساختار ارائه شده در این مقاله و ساختارهای ارائه شده در مراجع [۱۸، ۱۹ و ۲۰] در شکل ۱۰ مقایسه شده است. حساسیت ساختار نسبت به [۱۹] 5dB بهبود یافته؛ اما بازه عملکرد فرکانسی ساختار حدود 1300 هرتز کاهش یافته است. از سوی دیگر حساسیت نسبت به مرجع

مراجع

- [13] Ando Y, Fletcher NH, Schroeder MR. Modern Acoustics and Signal Processing. 2007
- [14] Lee H, Kang D, Moon W. A micro-machined source transducer for a parametric array in air. The Journal of the Acoustical Society of America. 2009 Apr;125(4):1879-93.
- [15] Amiri P, Kordrostami Z. Sensitivity enhancement of MEMS diaphragm hydrophones using an integrated ring MOSFET transducer. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2018 Sep 12;65(11):2121-30.
- [۱۶] میرعشقی علی. مبانی الکترونیک. تهران: نشر شیخ بهایی؛ ۱۳۸۷. جلد اول.
- [17] Application Notes: Introduction to Underwater Acoustic. Demark: B&K: 1986
- [۱۸] نگهداری روزبه، زارع احتشامی محمد، شاهمیرزایی حسین. طراحی، شبیه‌سازی و تحلیل هیدروفون‌های حساس باند پهن فرکانس پایین با استفاده از ترانزیستورهای گیت معلق. هیدروفیزیک. ۱۳۹۷؛۴(۲):۸۵-۹۱.
- [۱۹] نگهداری روزبه، زارع احتشامی محمد، شاهمیرزایی حسین. بهبود حساسیت هیدروفون با استفاده از ترانزیستور گیت معلق دندان‌شانه‌ای در فرکانس‌های پایین. هیدروفیزیک. ۱۳۹۸؛۵(۲):۵۱-۵۸.
- [20] Sung M, Shin K, Moon W. A micro-machined hydrophone employing a piezoelectric body combined on the gate of a field-effect transistor. Sensors and Actuators A: Physical. 2016 Jan 1;237:155-66.
- [21] Liu C. Foundations of MEMS. Pearson Education India; 2012.
- [1] Guan L, Xue C, Zhang G, Zhang W, Wang P. Advancements in technology and design of NEMS vector hydrophone. Microsystem technologies. 2011 Mar;17(3):459-67.
- [2] Lasky M, Doolittle RD, Simmons BD, Lemon SG. Recent progress in towed hydrophone array research. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2004 Jul 19;29(2):374-87.
- [3] Lemon SG. Towed-array history, 1917-2003. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2004 Jul 19;29(2):365-73.
- [4] Caplan-Auerbach J, Fox CG, Duennebieer FK. Hydroacoustic detection of submarine landslides on Kilauea volcano. Geophysical Research Letters. 2001 May 1;28(9):1811-3.
- [5] Mouy X, Rountree RA, Juanes F, Dosso SE. Passive acoustic localization of fish using a compact hydrophone array. The Journal of the Acoustical Society of America. 2017 May;141(5):3863.
- [6] Leonard JJ, Bahr A. Autonomous underwater vehicle navigation. Springer handbook of ocean engineering. 2016:341-58.
- [7] Liu W, Wang J, Zhu J, Wu Y, Ma L, Hu Z. An experimental sonobuoy system based on fiber optic vector hydrophone. Proceedings Volume 10156, Hyperspectral Remote Sensing Applications and Environmental Monitoring and Safety Testing Technology; 2016; Beijing, China. SPIE: 2016 Oct 25;10156: 49-54.
- [8] Kopp L, Cano D, Dubois E, Wang L, Smith B, Coates RF. Potential performance of parametric communications. IEEE Journal of oceanic engineering. 2000 Jul;25(3):282-95.
- [9] Henriquez TA, Ivey LE. Standard Hydrophone for the Infrasonic and Audio-Frequency Range at Hydrostatic Pressure to 10 000 psig. The Journal of the Acoustical Society of America. 1970 Jan;47(1B):276-80.
- [10] Necsoiu T, Chilibon I, Robu M, Cătuneanu V, Stan A. Some aspects of the piezoceramic materials utilized in sensitive hydrophones. Sensors and Actuators A: Physical. 1997 May 1;60(1-3):139-41.
- [11] Ito M, Okada N, Takabe M, Otonari M, Akai D, Sawada K, Ishida M. High sensitivity ultrasonic sensor for hydrophone applications, using an epitaxial Pb (Zr, Ti) O₃ film grown on SrRuO₃/Pt/γ-Al₂O₃/Si. Sensors and Actuators A: Physical. 2008 Jul 1;145:278-82.
- [12] Choi S, Lee H, Moon W. A micro-machined piezoelectric hydrophone with hydrostatically balanced air backing. Sensors and Actuators A: Physical. 2010 Mar 1;158(1):60-71.

پی‌نوشت

1. Sonar systems
2. Towed Array SONAR
3. sonobuoy
4. polyvinylidene fluoride
5. Micro Elrcro Mechanical Systems
6. Moment of inertia
7. Finite-element-method