

بهبود حساسیت هیدروفن با استفاده از ترانزیستورگیت معلق دنداننه شانهای در فرکانسهای پایین

روزبه نگهداری^{۱*}، محمد زارع احتشامی^۲، حسین شاهمیرزایی^۳

r.negahdari@sutech.ac.ir

ehteshami@mut.ac.ir

hshahmirzaee@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

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۳/۰۷

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۷/۲۴

چکیده

در این مقاله با استفاده از ترانزیستور گیت معلق دنداننه شانهای، یک هیدروفن در فرکانسهای پایین، طراحی و شبیه‌سازی شده است. مکانیزم عملکرد این مبدل بر اساس تغییر خازن گیت-سورس در ترانزیستور ماسفت است که در آن گیت ترانزیستور با دو میله به صورت معلق بالای کانال ترانزیستور قرار گرفته است. در پاسخ به موج آکوستیکی ورودی، گیت ترانزیستور دچار خمش شده و به تغییر ظرفیت خازن گیت-سورس می‌انجامد. در نتیجه موج آکوستیکی به تغییر جریان ترانزیستور منجر می‌شود. برخلاف تحقیقات پیشین که از گیت مستطیلی مسطح استفاده شده است، در اینجا از ساختار دنداننه شانهای استفاده شده تا بتوان ظرفیت خازن گیت-سورس را افزایش داد. به این منظور در ابتدا ساختار و پارامترهای آن معرفی شده است. پس از تحلیل مدهای ارتعاشی ساختار، تأثیر پارامترهایی مانند فشار، استرس و ضخامت گیت بر حساسیت بررسی خواهد شد. در انتها نیز با تغییر جنس گیت با مواد مختلف، حساسیت هیدروفون محاسبه و حساسیت نهایی ساختار با منابع مرجع مقایسه شده است. در این مقاله محاسبات حساسیت و پهنای باند با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای المان محدود انجام شده است. نتایج به دست آمده حاکی از افزایش حساسیت هیدروفن، در این ساختار تا حدود $1V/1\mu Pa$ (ref) -۱۶۵ db در فرکانسهای پایین است. علاوه بر این پاسخ فرکانسی ساختار پیشنهادی در بازه ۱۰-۱۱۴۰۰ هرتز هموار است.

واژه‌های کلیدی: هیدروفن، حس‌گر، دنداننه شانهای، گیت معلق، آکوستیک، سیستم‌های میکروالکترومکانیک ماسفت

۱. مقدمه

مبدل الکتروآکوستیکی، وسیله‌ای است که انرژی الکتریکی را به انرژی آکوستیکی یا برعکس تبدیل می‌کند. اگر یک مبدل فقط به عنوان یک گیرنده استفاده شود و ارتعاشات آکوستیکی

را به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل نماید، به عنوان هیدروفن یا گیرنده شناخته می‌شود [۱].

هیدروفن یا میکروفون زیرآبی، دستگاهی است که برای دریافت امواج صوتی در زیر آب طراحی شده است. واژه هیدروفن مشتق از واژگان یونانی «هیدرو» به معنای آب و

الکترونیک و مکانیک را محقق ساخته (MEMS) که سیستم‌های الکترومکانیکی در ابعاد میکرومتری، همگی بیانگر این دانش هستند. برتری این حسگرها نسبت به حسگرهای پیشین در اندازه کوچک، هزینه ساخت پایین، توان مصرفی اندک، دقت بالا و امکان مجتمع‌سازی آن با فناوری‌های دیگر مانند CMOS است [۸]. در هیدروفن‌های پیزوالکتریک کوچک‌سازی ابعاد، با کاهش حساسیت و افزایش امپدانس در فرکانس‌های پایین همراه است [۹]. تمرکز در کوچک‌سازی ابعاد هیدروفن‌ها از یک سو و محدودیت در کوچک‌سازی هیدروفن‌های پیزوالکتریک از سوی دیگر، نیاز به معرفی ساختارهایی غیر از پیزوالکتریک‌ها را الزامی کرده است. در سال‌های اخیر حس‌گرهای متفاوتی با کاربردهای مختلف با استفاده از ترانزیستورها ساخته شده‌اند [۹]. از مزایای ساختار ارائه‌شده در این مقاله نیز همین ویژگی است. از دیگر دلایل ارایه این ساختار می‌توان به امپدانس ورودی بالا و امپدانس خروجی پایین در ترانزیستورهای ماسفت اشاره کرد. علاوه‌براین، تقویت اولیه سیگنال توسط ماسفت نیز از مزیت‌های استفاده از ترانزیستور است [۱۰-۱۲]. استفاده از گیت معلق برای ترانزیستورها تنوع تازه‌ای در طراحی حس‌گرها ایجاد و کمک کرده تا پارامترهای مکانیکی مانند فشار، به طور مستقیم روی ترانزیستورها اعمال شود. در واقع بخش مکانیکی سیستم درون ترانزیستور نهادینه شد. این امر باعث شد استفاده از ترانزیستورهای گیت معلق در ساختارهای میکروالکترومکانیکی بیش از پیش مورد استفاده قرار گیرد [۱۳، ۱۶، ۱۹].

۲. اصول عملکرد ساختار پیشنهادی

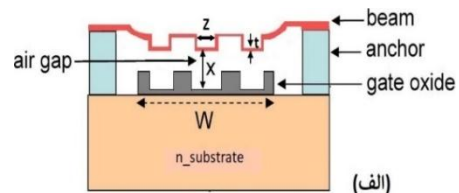
همان گونه که بیان شد ساختار هیدروفن پیشنهادی (شکل ۱ الف) شامل ترانزیستوری با گیت معلق (شکل ۱ ب) است. علت ایجاد گیت معلق روی ترانزیستور، ایجاد فاصله و در نتیجه ایجاد خازن بین گیت و کانال ترانزیستور است. با برخورد امواج آکوستیکی بر سطح گیت، فاصله بین گیت و لایه اکسید گیت تغییر می‌کند که به تغییر در ظرفیت خازن ایجاد شده منجر می‌شود. در نتیجه جریان و ولتاژ خروجی

«فون» به معنای صوت است [۲]. یکی از مهم‌ترین پارامترهای مورد بررسی در هیدروفن‌ها، «حساسیت» است، که به صورت نسبت میزان ولتاژ تولیدی در خروجی، به فشار موج آکوستیکی اعمالی بر حسگر (هیدروفون) سنجیده می‌شود و اغلب بر حسب دسی‌بل (dB) بیان می‌شود [۳]:

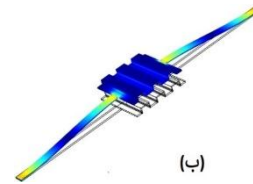
$$S = 20 \log\left(\frac{V}{P}\right) \quad 0db = 1V/1\mu Pa \quad (1)$$

که در آن V ولتاژ خروجی حسگر (بر حسب ولت)، P نیز فشار صوت وارده به حسگر (بر حسب میکرو پاسکال) است. محدوده عملکرد فرکانسی هیدروفن‌ها متناسب با کاربرد آن‌ها، متفاوت است. هیدروفن‌ها کاربردهای بسیار وسیعی از قبیل ادوات حل‌کننده، میکرو حسگرها برای آشکارسش تغییرات معین فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی از قبیل دما، فشار، نیرو، صدا، نور، تشعشعات هسته‌ای، شار مغناطیسی و ... دارند [۴]. بنابراین بازه فرکانس کاری انتخاب‌شده برای هر نوع هیدروفن متفاوت است که می‌تواند بازه بین یک تا چند مگاهرتز را در بر بگیرد. به عنوان مثال برای ایجاد ارتباط آکوستیکی زیرآبی در مسافت‌های زیاد (در حد هزاران کیلومتر) اغلب هیدروفن‌هایی با عملکرد فرکانسی زیر ۱۰۰ هرتز انتخاب می‌شوند. علت این امر رابطه مستقیم بین میزان جذب امواج صوتی در آب و فرکانس صوت است. این در حالی است که در بردهای پایین هیدروفن‌هایی تا فرکانس چند مگاهرتز نیز استفاده می‌شود [۵]. برای تبدیل فشار صوتی به سیگنال الکتریکی سازوکارهای گوناگونی وجود دارد؛ ولی بیشتر هیدروفن‌های ساخته‌شده به علت خواص مناسب مواد پیزوالکتریک از این نوع هستند. وقتی ماده پیزوالکتریکی تحت تأثیر فشار مکانیکی (به صورت انبساط یا انقباض) قرار گیرد، مقداری بار الکتریکی در سطح آن ظاهر می‌شود [۶]. برای تبدیل این تغییرات بار به یک سیگنال قابل پردازش در خروجی، دو طرف ماده پیزوالکتریک لایه نازکی از فلز قرار می‌دهند که با تشکیل خازن، ولتاژی متناسب با بار تولیدشده که بر اساس فشار اعمالی به وجود آمده است، تولید نماید [۷]. از آنجاکه در سال‌های اخیر تمرکز عمده در زمینه رشته مهندسی، مربوط به سیستم‌های در ابعاد میکرومتری (حتی کوچک‌تر از آن) است؛ شاخه‌ای از دانش، پیوند بین علم

ترانزیستور تغییر و موجب آشکارسازی امواج آکوستیکی می‌شود.



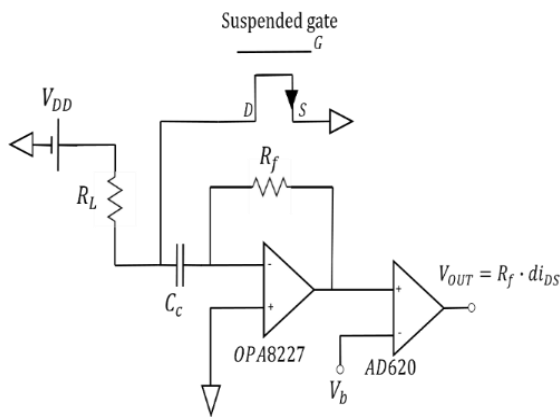
(الف)



(ب)

شکل ۱. الف: ترانزیستور ماسفت با گیت معلق؛ امواج آکوستیکی به صفحه گیت معلق برخورد می‌کند و اندازه x کاهش و ظرفیت خازن افزایش می‌یابد. ب: شکل بیم دندان‌شانه‌ای

تنظیم مقدار $R_L \cdot C_C$ می‌توان فرکانس قطع را تنظیم نمود.



شکل ۳. مدار پیشنهادی به منظور تقویت تغییرات جریان خروجی ترانزیستور (شکل ۱) و تبدیل آن به ولتاژ

برای تعیین ولتاژ بیم و زیر لایه باید به نیروهای الکتروستاتیکی بین گیت و زیر لایه توجه کرد. اختلاف پتانسیل بین گیت و زیر لایه و از طرف دیگر وجود نیروی الکتروستاتیکی بین بارهای تجمع یافته مؤثر از این اختلاف پتانسیل، باعث ایجاد جابه‌جایی غیرخطی بیم می‌شود. پس به منظور کاهش و از بین بردن این نیروی الکتروستاتیکی مزاحم، مقدار ولتاژ گیت و ولتاژ زیر لایه یکسان قرار داده می‌شود و به منظور جلوگیری از خاموش شدن ترانزیستور، ولتاژ آستانه مقداری منفی می‌گیرد. برای انتخاب نوع ترانزیستور ماسفت نیز باید به راندمان ترانزیستورها توجه کرد و از آنجا که مقدار جریان‌دهی ترانزیستور ماسفت نوع n (به علت موبیلیته بالاتر) بیشتر است (رابطه ۱)، در اینجا از ماسفت نوع n استفاده شد. نوع ماده بخش غیر متحرک ترانزیستور می‌تواند سیلیکون، ژرمانیوم یا مواد مشابه آن باشد. از آنجا که هدف فقط تغییرات جریان خروجی نسبت به فشار اعمالی به گیت است، پس ترانزیستور در ناحیه اشباع کار می‌کند تا از وابستگی جریان خروجی به پارامترهایی مانند ولتاژ درین-سورس جلوگیری شود [۱۶].

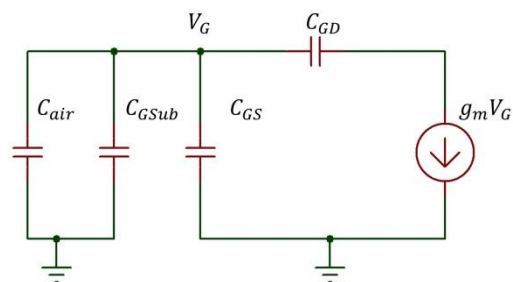
۳. شبیه‌سازی و نتایج آن

ساختار هیدروفن پیشنهاد شده در دو قسمت مکانیکی و الکتریکی توسط نرم‌افزار کامسول با روش المان محدود شبیه‌سازی شد. قسمت مکانیکی شامل یک صفحه است که با دو بازوی تعبیه شده در دو طرف آن در بالای ترانزیستور معلق نگه داشته شده است. مشخصات بیم در جدول ۱ نشان داده

تغییرات جریان خروجی ترانزیستور را می‌توان به صورت رابطه زیر نشان داد [۲۰]:

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

که در آن μ_n موبیلیته الکترون‌ها، W پهنای ترانزیستور، L طول گیت ترانزیستور، V_{gs} اختلاف پتانسیل گیت و سورس، V_T ولتاژ آستانه ترانزیستور و C_{oxeq} خازن اکسید معادل گیت است. شکل ۲ نشان‌دهنده مدار معادل خازن‌های این ساختار است. $(C_{oxeq} = C_{GS} \parallel C_{air} \parallel C_{Gsub})$.



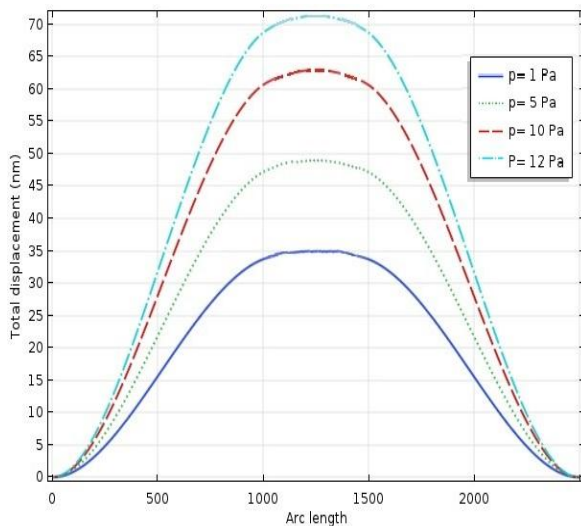
شکل ۲. مدار معادل سیگنال ترانزیستور

تغییرات جریان خروجی این ترانزیستور ماسفت (شکل ۱) با مدار تقویت کننده تبدیل به ولتاژ می‌شود. همانند مدار معادل ارائه شده در مرجع [۱۴]، در اینجا نیز یک مدار معادل به منظور تقویت تغییرات جریان ارائه می‌شود (شکل ۳). عبور تغییرات جریان از مقاومت R_f موجب تقویت آن می‌شود. در ادامه بایاس dc از خروجی طبقه اول مدار گرفته می‌شود تا در خروجی نهایی یک سیگنال AC مشاهده شود. ضمن آن که با

در مورد فرکانس‌های رزونانس و شکل ۵ هیچ مطلبی در متن آورده نشده است.

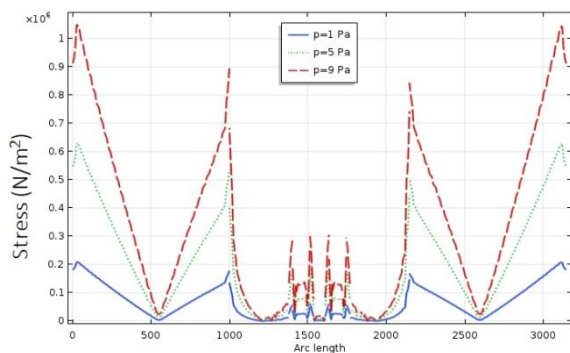
۵. محاسبه حساسیت

فشار وارده بر بیم ارتباط مستقیمی با میزان جابه‌جایی بیم دارد (شکل ۶). با افزایش فشار، جابه‌جایی بیشتری در بیم اتفاق می‌افتد. همان‌طور که انتظار می‌رود به دلیل محدود شدن جابه‌جایی در لبه‌های گیت، مرکز گیت شاهد حداکثر جابه‌جایی است. انتظار می‌رود فشار وارده بر سطح بیم با حساسیت نیز ارتباط مستقیم داشته باشد که موضوع در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



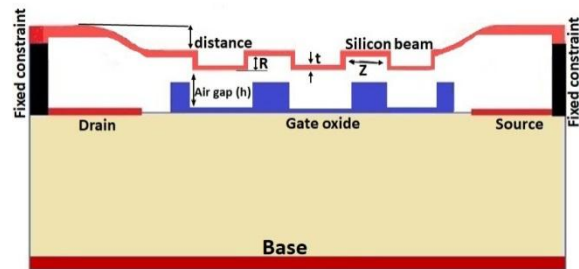
شکل ۶. میزان جابه‌جایی در طول بیم به ازای فشارهای مختلف

همان‌طور که گفته شد جابه‌جایی در لبه‌های گیت محدود شده است در نتیجه بیشترین استرس در لبه‌های گیت مشاهده می‌شود. با افزایش فشار، گیت استرس بیش‌تری را متحمل می‌شود (شکل ۷).



شکل ۷. استرس در طول بیم به ازای فشارهای مختلف

شده است. فاصله بین بیم و اکسید که در شکل ۲ به اسم Air gap(h) نشان داده شده است ۸۰ نانومتر است؛ یعنی حداکثر جابه‌جایی بیم دندان‌ه‌شانه‌ای می‌تواند ۸۰ نانومتر باشد. در ادامه تأثیر جنس بیم بر حساسیت نیز بررسی خواهد شد.



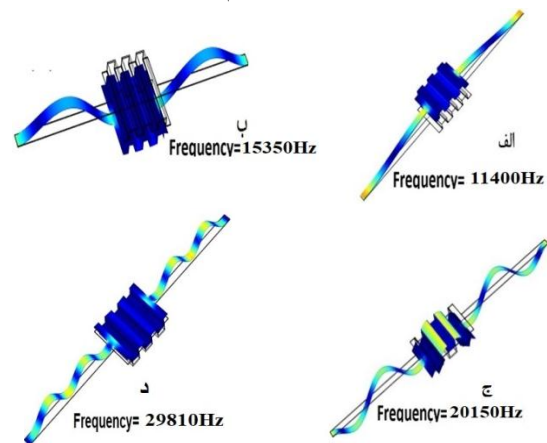
شکل ۴. نمایش پارامترهای ساختار ارائه‌شده در این مقاله

جدول ۱. مشخصات فیزیکی ساختار ارائه‌شده در این مقاله

طول بیم	۱۰۰۰ میکرومتر
مساحت صفحه میانی متصل به بیم	۵۰۰ × ۵۰۰ میکرومتر
پهنای بیم	۸۰ میکرومتر
ضخامت بیم و صفحه میانی (t)	۱۲ میکرومتر
R_f	۱۰۰۰ kΩ
پهنای هر دندان از صفحه شانه دندان‌ه‌ای (z)	۷۰ میکرومتر

۴. تحلیل مودی مبدل

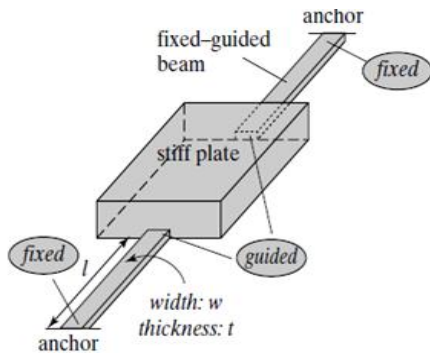
هیدروفن‌ها کاربردهای مختلفی دارند و یکی از مهم‌ترین فاکتورها در انتخاب هر هیدروفن، بازه‌ی عملکرد فرکانسی، یعنی فرکانس‌های زیر اولین فرکانس رزونانس، آن است. زیرا که هیدروفن‌ها در فرکانس‌هایی پایین‌تر از اولین فرکانس رزونانس عملکرد خطی مناسبی دارند [۱۷]. به منظور تحلیل قسمت دینامیکی ساختار هیدروفن ارائه‌شده، در ابتدا فرکانس رزونانس‌های آن را بررسی می‌کنیم.



شکل ۵. چهار فرکانس رزونانس اول ساختار پیشنهادی

با استفاده از مدل‌سازی فنر ضریب سختی بیم به شکل زیر حاصل می‌شود:

$$K = \frac{F}{X} \quad (۳)$$



شکل ۱۰. پارامترهای بیم به منظور تحلیل عددی [۱۷]

ضریب سختی گیت با دو بیم که معلق نگه داشته شده است (شکل ۱۰)، نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P = \frac{F}{A} \quad (۴)$$

طبق روابط (۱)، (۳) و (۴) ضریب سختی (K) با نیرو (F) و فشار (P) رابطه مستقیم دارد. همچنین فشار نیز با حساسیت (S) رابطه عکس دارد [۲۲]. در نتیجه، ضریب سختی با حساسیت رابطه عکس دارد. اگر رابطه (۵) جایگزین پارامتر جابه‌جایی بیم (x) در رابطه (۳) شود، آنگاه رابطه (۶) حاصل می‌شود:

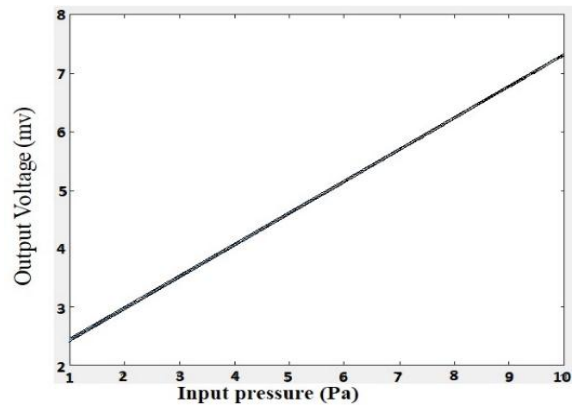
$$x = \frac{Fl^3}{3EI} \quad (۵)$$

$$k = 4 \frac{Ewt^3}{l^3} \quad (۶)$$

که در آن K ضریب سختی فنر، F نیروی وارده بر بیم (برحسب نیوتون N)، X جابه‌جایی بیم (برحسب متر m)، w پهنای بیم، l طول بیم، t ضخامت بیم، I ممان اینرسی 1 و E ماژول یانگ است. طبق رابطه (۶) پارامترهای w ، t و l تأثیر بسزایی در جابه‌جایی بیم و در نتیجه در حساسیت دارند. پارامتر K نشان‌دهنده میزان سختی بیم است. به این معنا که با افزایش K میزان انعطاف‌پذیری و در نتیجه جابه‌جایی بیم کاهش می‌یابد. هر اندازه انعطاف‌پذیری بیم کمتر باشد، حساسیت هیدروفن نیز کمتر خواهد بود. طبق رابطه (۶) پارامتر w با K نسبت مستقیم و در نتیجه با حساسیت رابطه عکس دارد. همچنین در این ساختار، w با بازه فرکانس کاری رابطه مستقیم دارد. این نتایج

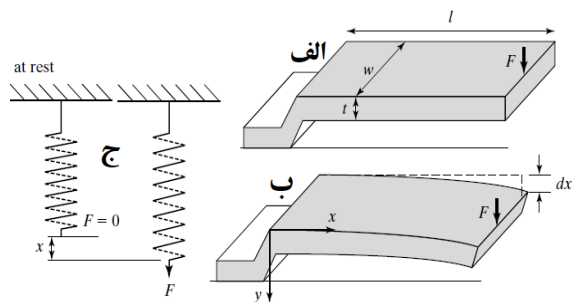
افزایش فشار به جابه‌جایی بیشتر گیت، کم شدن فاصله بین گیت و بیم، افزایش ظرفیت خازن ترانزیستور و افزایش جریان (رابطه ۲) و ولتاژ خروجی ترانزیستور منجر می‌شود (شکل ۸).

در شکل ۸، تغییرات ولتاژ خروجی ترانزیستور نسبت به تغییرات فشار موج آکوستیکی اعمالی در فرکانس ۱۰۰ هرتز محاسبه شده است. از آنجا که حساسیت این ساختار در فرکانس‌های بسیار پایین‌تر از فرکانس رزونانس خطی است؛ پس این مقدار در تمام فرکانس‌های زیر اولین فرکانس رزونانس، یکسان خواهد بود.



شکل ۸. ولتاژ خروجی ترانزیستور به ازای فشارهای مختلف

بازه فرکانسی پاسخ خطی ساختار ارائه شده از فرکانس‌های بسیار کم (۱۰ هرتز) تا حدود ۱۱۴۰۰ Hz است. حساسیت ساختار ارائه شده به پارامترهای ساختاری بسیاری وابسته است. برای بهبود میزان حساسیت، برخی از این پارامترها در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند. به منظور بررسی تأثیر هر چه بیشتر پارامترها، ابتدا به مدل‌سازی بیم می‌پردازیم. بیم را می‌توان مانند شکل ۹ با استفاده از یک فنر مدل‌سازی نمود [۲۲].

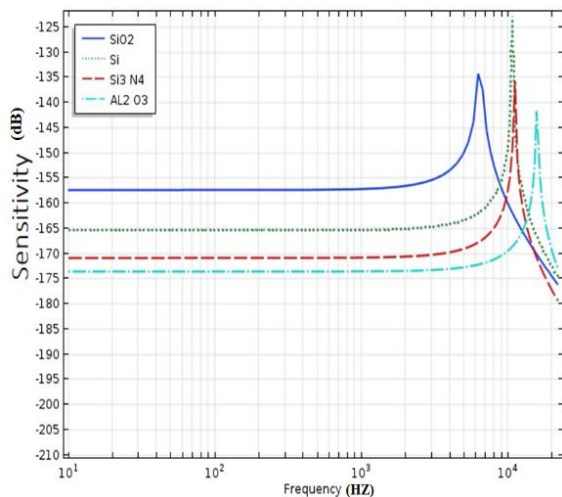


شکل ۹. الف: اعمال فشار صفر است. ب: اعمال فشار موجب جابه‌جایی بیم می‌شود. ج: مدل‌سازی یک بازوی بیم با فنر

دو برابر بیشتر است. با توجه به کاربردهای بسیار متنوع و مختلف هیدروفن‌ها، پیشنهاد می‌شود به منظور استفاده از ساختار ارائه شده در این مقاله بسته به کاربرد از یکی از این دو ماده در بیم استفاده شود؛ SiO_2 برای هیدروفن‌هایی که حساسیت بالایی نیاز است و بازه فرکانس کاری زیر ۶۰۰۰ هرتز باشد، کاربرد دارند. اما اگر فرکانس کاری هیدروفن مورد نیاز زیر ۱۲۰۰۰ هرتز باشد، نیاز به حساسیت مطلوبی است و می‌توان از Si در بیم استفاده کرد.

جدول ۲. مشخصات مواد استفاده شده بیم

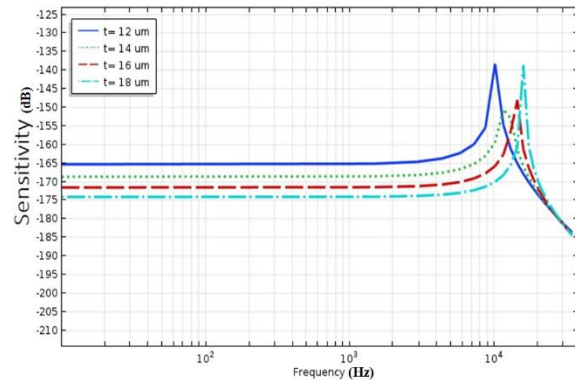
نام ماده	چگالی ماده	ماژول یانگ	نرخ پواسون
سیلیکون دی‌اکسید (SiO_2)	۲۲۰۰ [kg/m^3]	۷۰ ^۹ [Pa]	۰/۱۷
سیلیکون (Si)	۲۳۲۹ [kg/m^3]	۱۷۰ ^۹ [Pa]	۰/۲۸
سیلیکون نیتريد (Si_3N_4)	۳۱۰۰ [kg/m^3]	۲۵۰ ^۹ [Pa]	۰/۲۳
آلومنیوم اکسید (Al_2O_3)	۳۹۶۵ [kg/m^3]	۴۰۰ ^۹ [Pa]	۰/۲۲



شکل ۱۲. حساسیت ساختار به ازای مواد مختلف بیم

ساختار جدید ارائه شده در این مقاله در بازه فرکانسی ده تا چهار کیلوهرتز مورد بررسی قرار گرفت و حساسیت حاصل با حساسیت مراجع [۱۴-۱۵] مقایسه شد. چون مقاله‌هایی که مرجع قرار گرفتند از Si استفاده کرده بودند؛ در اینجا نیز به منظور مقایسه، با در نظر گرفتن Si به عنوان ماده بیم،

در شکل زیر مشاهده می‌شود که نتایج آورده نشده است. طبق رابطه (۶)، برای بهبود حساسیت، پارامتر ضخامت بیم (t) نیز بررسی شد. این پارامتر با حساسیت و بازه فرکانس کاری به ترتیب نسبت عکس و نسبت مستقیم دارد. به شکل ۱۱ اشاره نشده است.



شکل ۱۱. حساسیت ساختار به ازای ضخامت‌های مختلف بیم

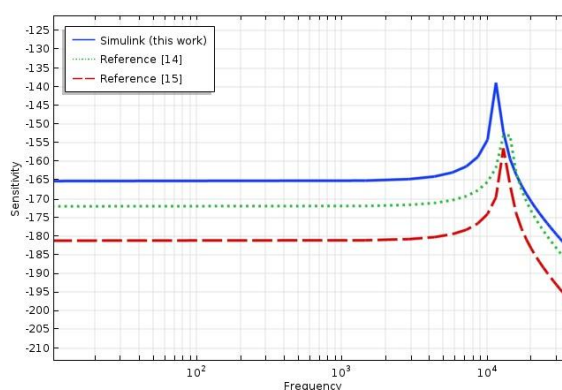
در خلال بررسی پارامترها، به منظور بهبود حساسیت، میزان تأثیر نوع ماده بیم بر میزان تغییرات حساسیت نیز بررسی شد. خصوصیات مواد مورد بررسی در جدول زیر آورده شده است. علت انتخاب این مواد کاربرد زیاد و متداول آن‌ها در فناوری MEMS^۲ است. طبق رابطه (۶) پارامتر K با مقدار ماژول یانگ رابطه مستقیم و با مقدار حساسیت حس گر رابطه عکس دارد. در جدول ۲ اگر از بالا به پایین حرکت کنیم چگالی مواد و مقدار ماژول یانگ افزایش می‌یابد. در شکل ۱۲ که حساسیت هیدروفن ارائه شده را بر اساس تغییر جنس بیم نشان می‌دهد، با افزایش چگالی مواد، حساسیت کمتر شده اما بازه فرکانس کاری ساختار افزایش یافته است. دو ماده مهم که باعث می‌شود ساختار حساسیت خوبی داشته باشد Si و SiO_2 هستند. SiO_2 حساسیت بهتری نسبت به سایر مواد مورد استفاده در ساختار را ارائه می‌دهد. اما استفاده از این ماده، بازه فرکانسی ساختار را به زیر ۶۱۰۰ Hz کاهش می‌دهد. Si نیز بعد از SiO_2 حساسیت بهتری را ارائه می‌دهد؛ اما استفاده از Si در بیم مزیت خیلی مهمی نسبت به استفاده SiO_2 دارد و آن اینکه بازه فرکانس کاری ساختار متشکل از Si خیلی بیشتر است (۱۲۱۰۰ Hz). به همین دلیل استفاده از Si ترجیح داده می‌شود؛ زیرا هر چند حساسیت ساختار در این حالت نسبت به حالت SiO_2 کمتر است، اما بازه فرکانس کاری ساختار حدود

پیشنهادی در قیاس با ساختارهای سنتی پیشین اندازه بسیار کوچک تری دارد که برای استفاده به صورت آرایه مطلوب است و مجتمع‌پذیری ساخت را نیز ساده‌تر می‌کند. برخی مبدل‌های پیشین مثل مبدل‌های پیزوالکتریک به علت ایجاد بار الکتریکی تجمع یافته در دو طرف، نیاز به تقویت‌کننده بار در نزدیکی مبدل‌ها دارند. اما در این ساختار پیشنهادی، مدار الکترونیکی مبدل تغییرات جریان به تغییرات ولتاژ را می‌توان در فاصله دورتری قرار داد و امکان پردازش و انتقال سیگنال را ساده‌تر کرد. علت این امر مستقل بودن جریان خروجی ترانزیستور از مسیر انتقال است.

مراجع

- [1] Rijnja HA. Small sensitive hydrophones. Acta Acustica united with Acustica. 1972 Oct 1;27(4):182-8.
- [2] D'amico A, Pittenger R. A brief history of active sonar. SPACE AND NAVAL WARFARE SYSTEMS CENTER SAN DIEGO CA; 2009 Jan.
- [3] Wong KT, Zoltowski MD. Closed-form underwater acoustic direction-finding with arbitrarily spaced vector hydrophones at unknown locations. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1997; (22)4:649-58. doi: 10.1109/48.650831.
- [4] Hodges RP. Underwater acoustics: Analysis, design and performance of sonar. John Wiley & Sons; 2011 Jun 28.
- [5] Leslie CB, Kendall JM, Jones JL. Hydrophone for measuring particle velocity. The Journal of the Acoustical Society of America. 1956 Jul; 28(4): 711-5.
- [6] Arnau A, Soares D. Fundamentals of piezoelectricity. Piezoelectric transducers and applications. Springer, Berlin, Heidelberg; 2009.
- [7] Yaacob MI, Arshad MR, Manaf AA. Theoretical characterization of square piezoelectric micro ultrasonic transducer for underwater applications. 7th International Symposium on Mechatronics and its Applications; 2010 Apr 20; Sharjah. IEEE; 2010.
- [8] 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.
- [9] Thuau D, Abbas M, Wantz G, Hirsch L, Dufour I, Ayela C. Piezoelectric polymer gated OFET: Cutting-edge electro-mechanical transducer for

حساسیت ساختار ارائه شده نسبت به مرجع [۱۸]، ۱۶ db و نسبت به مرجع [۱۴]، ۷ db بهبود یافته است. اما بازه فرکانس کاری مبدل حدود ۲۰۰۰ هرتز کاهش یافت (شکل ۱۳). با توجه به نتایج شبیه‌سازی ارائه شده، این افزایش حساسیت امکان ساخت مبدل هیدروفن با کیفیت بالاتر را در مقایسه با موارد موجود، ارائه می‌دهد.



شکل ۱۳. مقایسه حساسیت ساختار این مقاله با حساسیت ساختارهای ارائه شده در مراجع [۱۴] و [۱۵]

۶. نتیجه گیری

عنصر اصلی ساختار در این مقاله، ترانزیستور ماسفت گیت معلق با ابعاد میکرومتری است. جابه‌جایی گیت معلق بر اثر امواج آکوستیکی به تغییر خازن گیت-سورس و در نتیجه به طور مستقیم جریان درین-سورس منجر می‌شود. این تغییرات با مدار الکتریکی به تغییرات ولتاژ تبدیل می‌شود.

ایده اصلی در مبدل پیشنهادی افزایش ظرفیت خازن گیت-سورس در ترانزیستور ماسفت نسبت به مرجع [۱۴] (که در آن گیت ترانزیستور یک صفحه مسطح بود) با ایجاد ساختار دندان‌شانه‌ای ۳ روی بیم افزایش مساحت صفحه‌های خازن است. این تغییر در نهایت افزایش حساسیت مبدل را در پی دارد. افزایش حساسیت از جمله پارامترهای مهم مبدل‌ها برای کاربرد با کیفیت بالاتر است؛ که در اینجا نیز حساسیت ساختار نسبت به مقاله‌های مرجع بهبود چشمگیری نشان داد.

در ساختار پیشنهادی، با به کارگیری بیم از جنس Si حساسیت ۱۶۵ db و پهنای باند ۱۱۴۰۰ هرتز به دست آمد. همچنین با به کارگیری بیم از جنس SiO₂ حساسیت ساختار ۱۵۷ db- در بازه فرکانس کاری ۶۲۰۰ هرتز به دست آمد. ساختار مبدل

- 65th Annual Device Research Conference; 2007 Jun 18; Notre Dame, IN. IEEE;2007. doi: 0.1109/DRC.2007.4373670.
- [۲۰] میرعشقی علی. مبانی الکترونیک. تهران: نشر شیخ بهایی؛ ۱۳۸۷. جلد اول.
- [21] Hodges RP. Underwater acoustics: Analysis, design and performance of sonar. John Wiley & Sons; 2010 Jun 28.
- [22] Liu C. Foundations of MEMS. Pearson Education India; 2012.
- organic MEMS-based sensors. Scientific reports. 2016 Dec 7; 6(1): 1-8.
- [10] Zhu B, Zhang J, Varadan VK, Varadan VV. Solid state MOSFET-based hydrophone. Smart Structures and Materials 2000: Smart Electronics and MEMS; 2000 Jun 21; Newport Beach, CA, United States. International Society for Optics and Photonics; 2000. (Vol. 3990, pp. 368-377).
- [11] A Bradley AT, Jaeger RC, Suhling JC, O'Connor KJ. Piezoresistive characteristics of short-channel MOSFETs on (100) silicon. IEEE Transactions on Electron Devices. 2001 Sep; 48(9):2009-15.
- [12] Dahiya RS, Adami A, Collini C, Lorenzelli L. POSFET tactile sensing arrays using CMOS technology. Sensors and Actuators A: Physical. 2013 Nov 1; 202:226-32.
- [13] Fernández-Bolaños M, Abelé N, Pott V, Bouvet D, Racine GA, Quero JM, Ionescu AM. Polyimide sacrificial layer for SOI SG-MOSFET pressure sensor. Microelectronic engineering. 2006 Apr 1; 83(4-9):1185-8.
- [۱۴] نگهداری روزبه، زارع احتشامی محمد، شاهمیرزایی حسین. طراحی، شبیه سازی و تحلیل هیدروفن های حساس باند پهن فرکانس پایین با استفاده از ترانزیستورهای گیت معلق. هیدروفیزیک. ۹۱-۸۵:(۲)۴؛۱۳۹۷.
- [15] 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.
- [16] Mahfoz-Kotb H, Salaün AC, Bendriaa F, Le Bihan F, Mohammed-Brahim T, Morante JR. Sensing sensibility of surface micromachined suspended gate polysilicon thin film transistors. Sensors and Actuators B: Chemical. 2006 Oct 25; 118(1-2):243-8.
- [17] Zang Y, Zhang F, Huang D, Gao X, Di CA, Zhu D. Flexible suspended gate organic thin-film transistors for ultra-sensitive pressure detection. Nature communications. 2015 Mar 3; 6(1):1-9.
- [18] Ionescu AM, Pott V, Fritschi R, Banerjee K, Declercq MJ, Renaud P, Hibert C, Fluckiger P, Racine GA. Modeling and design of a low-voltage SOI suspended-gate MOSFET (SG-MOSFET) with a metal-over-gate architecture. Proceedings International Symposium on Quality Electronic Design; 2002 Mar 18; San Jose, CA, USA. IEEE; 2002. doi: 10.1109/ISQED.2002.996794.
- [19] Akarvardar K, Eggimann C, Tsamados D, Chauhan Y, Wan GC, Ionescu AM, Wong HP. Analytical Modeling of the Suspended-Gate FET and Design Insights for Digital Logic. 2007

پی نوشت

1. Moment of inertia
2. Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)
3. Comb-Drive