

طراحی هیدروفون حساسیت بالا با بهره‌گیری از لایه‌نازک پیزوالکتریک روی ترانزیستور ماسفت

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

ehteshami@mut.ac.ir

hshahmirzaee@mut.ac.ir

^۱نویسنده مسئول، مجتمع هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۲مجتمع هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۲۶

چکیده:

در این مقاله یک حس‌گر هیدروفون در ابعاد میکرومتر با حساسیت بالا معرفی، طراحی و مدل‌سازی شده است. ساختار پیشنهادی با استفاده از فناوری مرسوم MEMS به‌طور کامل قابل پیاده‌سازی است. ساختار مکانیکی این حس‌گر از دو بازو در ابعاد میکرومتر بهره می‌گیرد که یک صفحه را معلق نگه می‌دارند. در طول هر یک از بازوها با ایجاد ناخالصی روی سیلیکون ترانزیستور ماسفت جاسازی شده که روی گیت آن‌ها لایه بسیار نازک از ماده پیزوالکتریک PZT-5A قرار داده شده است. استرس ناشی از موج آکوستیکی برخوردی، باعث ایجاد بارهای سطحی بر لبه لایه پیزوالکتریک شده و به گیت ترانزیستور منتقل می‌شود. این بارها به‌صورت مستقیم باعث تغییر مقاومت کانال ترانزیستور شده و در نهایت تغییرات جریان الکتریک به‌وسیله مبدل الکترونیکی به تغییرات ولتاژ الکتریکی تبدیل می‌شود. طبق نتایج شبیه‌سازی به‌دست‌آمده حساسیت مبدل پیشنهادی ۱۶۰ dB- در فرکانس‌های بسیار پایین‌تر از رزونانس است.

واژه‌های کلیدی: سونار، هیدروفون، حس‌گر، سامانه‌های میکروالکترومکانیکی

۱. مقدمه

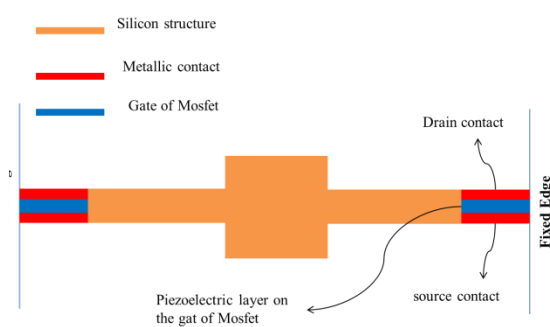
در سالیان اخیر، طراحی، ساخت و مدل‌سازی مبدل‌های الکتروآکوستیکی سوناری، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است [۱-۳]. کاربردهای گسترده این ادوات در زمینه‌های تجاری [۴]، زمین‌شناسی [۵] و نظامی [۶] باعث شده تا نیاز به ادواتی با ویژگی‌های متفاوت ایجاد شود. طراحی حسگرهای هیدروفون با ویژگی‌های مطلوب همواره چالشی جدی بر سر راه طراحان بوده است [۳]. حسگر هیدروفون همان‌طور که باید حساسیت زیادی داشته باشد، پهنای باند فرکانسی عریضی نیز باید داشته باشد تا بتواند تمامی سیگنال‌های ارسالی را بدون تخریب آشکارسازی کند. از طرف دیگر تلاش بسیار زیادی برای کوچک‌سازی ابعاد این حسگرها صورت گرفته است. به‌طور سنتی از مواد پیزوالکتریک و پیزورزیستو به‌عنوان ماده اصلی آشکارساز موج آکوستیکی استفاده شده است [۷-۹]. در [۱۰] یک هیدروفون جدید طراحی و ساخته شد که اساس کار بسیاری از تحقیقات دیگر شد، که در آن از مواد پیزورزیستو استفاده شده بود. این مبدل توانایی تشخیص جهت انتشار موج آکوستیکی را دارد. در ادامه تلاش‌های بسیاری صورت گرفت تا این امکان ایجاد شود تا بتوان در سه جهت اصلی موج اعمالی را آشکار کرد [۱۱، ۱۲]. در سال ۲۰۰۲ در تحقیقی برای نخستین بار از ماده پیزوالکتریک در کنار ترانزیستور ماسفت استفاده شد [۱۳]، هرچند حساسیت بسیار کمی داشت. پس از آن تا امروز ساختارهای مختلفی برای بهبود عملکرد این قبیل مبدل‌ها پیشنهاد شده است [۱۴، ۱۵].

در این مقاله با استفاده از لایه نازک پیزوالکتریک روی گیت ترانزیستور ماسفت حسگر هیدروفون طراحی شده است. لایه پیزوالکتریک و ترانزیستور خود روی یک تیر قرار گرفته‌اند. بیم از دو طرف از لحاظ مکانیکی ثابت شده است و در مرکز آن صفحه‌ای مربعی شکل با ضخامت مشابه بیم‌ها قرار گرفته

است. نقش صفحه مرکزی ایجاد استرس بیشتر روی لبه‌های بیم است تا ولتاژ ایجادی با لایه پیزوالکتریک افزایش یابد. ولتاژ ایجادشده به وسیله لایه پیزو به صورت مستقیم روی میدان الکتریکی عمودی در کانال ترانزیستور اثر گذاشته و باعث تغییر جریان ترانزیستور متناظر با موج آکوستیکی می‌شود. در بخش اول این مقاله، روابط حاکم در این حسگر معرفی می‌شود. سپس در بخش بعد نتایج شبیه‌سازی ارائه و مورد بحث قرار گرفته است، همچنین نتایج با سایر مقاله‌های اخیر مقایسه شده است. در نهایت در بخش پایانی نتیجه‌گیری صورت گرفته است.

۲. اصول عملکرد و طراحی مبدل پیشنهادی

در شکل ۱ مبدل آکوستیکی پیشنهادی ترسیم شده است و در جدول ۱ ابعاد آن مشاهده می‌شود. در این حسگر از لایه پیزوالکتریک ترکیب‌شده با ترانزیستور ماسفت استفاده شده است. لایه پیزوالکتریک در لبه‌های میله‌ای در ابعاد میکرومتر قرار گرفته است که نقش تقویت‌کننده مکانیکی و متمرکز کننده استرس را ایفا می‌کند. میله نیروی ناشی از موج آکوستیکی را دریافت کرده و به محلی که لایه پیزوالکتریک قرار دارد، انتقال می‌دهد. استفاده از میله میکرومتری مزیتی دیگری نیز دارد؛ بدین صورت که به علت نازک بودن این میله باعث افزایش تطبیق امپدانس آکوستیکی بین لایه پیزوالکتریک و آب می‌شود [۱۶].



شکل ۱. نمای سه‌بعدی از ساختار مکانیکی حسگر پیشنهادی

جدول ۱. ابعاد مبدل پیشنهادی

طول بازوها	۱۰۰۰ μm
عرض بازوها	۱۰۰ μm
ضخامت بازوها	۱۰ μm
طول و عرض صفحه مرکزی	۵۰۰ μm
ضخامت صفحه مرکزی	۱۰ μm

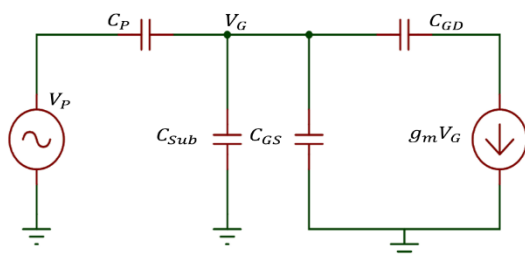
با فرض مدل سیگنال کوچک و عملکرد ترانزیستور در ناحیه اشباع می‌توان حساسیت مبدل را به صورت زیر تعریف کرد:

$$\frac{\partial V_{out}}{\partial P_i} = \frac{\partial V_P}{\partial P_i} \cdot \frac{\partial V_G}{\partial V_P} \cdot \frac{\partial i_{DS}}{\partial V_G} \cdot \frac{\partial V_{out}}{\partial i_{DS}} \quad (1)$$

رابطه (۱) از چهار جمله تشکیل شده است. جمله اول بیانگر تغییرات ولتاژ ایجاد شده با لایه نازک پیزوالکتریک ناشی از موج آکوستیکی است که در این مقاله با نرم افزار شبیه ساز المان محدود محاسبه می‌شود. جمله دوم تغییرات ولتاژ گیت ترانزیستور ناشی از ولتاژ پیزوالکتریک را نشان می‌دهد. جمله سوم تغییرات جریان ترانزیستور ناشی از ولتاژ گیت را نشان می‌دهد. در نهایت جمله سوم به وسیله مدار الکترونیکی مبدل جریان به ولتاژ تعیین می‌شود.

برای محاسبه جمله دوم نیاز به مدل الکتریکی سیگنال کوچک مبدل داریم که در شکل ۳ ترسیم شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، لایه نازک پیزوالکتریک با یک منبع ولتاژ ایده آل و یک خازن مدل شده است. ترانزیستور و خازن‌های مربوطه نیز در شکل آورده شده‌اند. رابطه کلی این جمله به صورت زیر است [۱۵]:

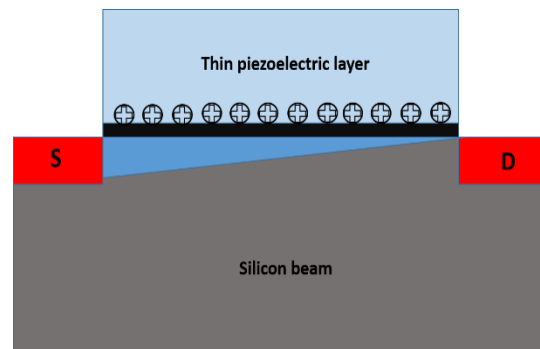
$$\frac{\partial V_G}{\partial V_P} = \frac{C_P}{C_P + C_{sub} + C_{GS} + C_{GD}(1 + g_m R_D)} \quad (2)$$



شکل ۳. مدل سیگنال کوچک مبدل پیشنهادی [۱۵]

که در آن C_P خازن لایه پیزوالکتریک، C_{sub} خازن بدنه، C_{GS} خازن گیت-سورس، C_{GD} خازن گیت-درین، g_m

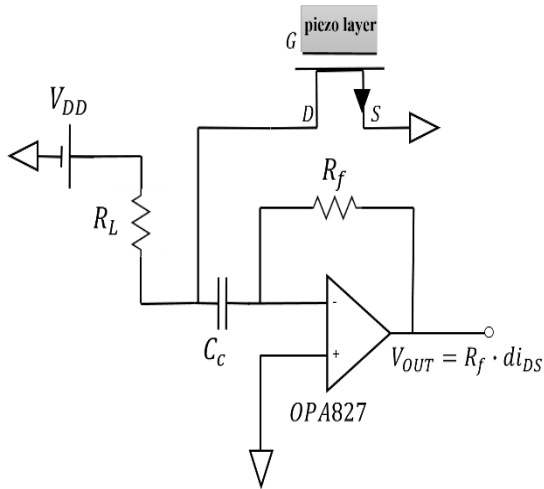
اصول عملکرد مبدل در شکل ۲ نمایش داده شده است. در پاسخ به برخورد موج آکوستیکی با میله، نیروی مکانیکی به لایه نازک پیزوالکتریک منتقل می‌شود. سپس تغییرات در چگالی بارهای سطحی باعث تغییر میدان الکتریکی عمودی در ترانزیستور ماسفت شده که خود موجب ماژوله شدن کانال ماسفت می‌شود. در نهایت با تجزیه و تحلیل تغییرات جریان درین-سورس^۱ می‌توان موج آکوستیکی را آشکار سازی کرد. برای به حداقل رساندن نویز ناشی از منابع انرژی الکتریکی در طراحی ترانزیستور باید این نکته در نظر گرفت شود که ترانزیستور در ناحیه اشباع بایاس شود.



شکل ۲. سطح مقطع یکی از بازوها به همراه ترانزیستور جا سازی شده

$$\frac{\partial i_{DS}}{\partial V_G} = -\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} V_t \quad (۹)$$

در اینجا μ_n موبیلیته الکترون‌ها $\frac{W}{L}$ نسبت پهنا به طول کانال ترانزیستور و V_t ولتاژ آستانه ترانزیستور است. در انتها تغییرات ولتاژ خروجی نسبت به تغییرات جریان ترانزیستور با استفاده از مدار الکترونیکی مبدل جریان به ولتاژ که در شکل ۴ آورده شده است، به دست خواهد آمد.



شکل ۴. مدار الکترونیکی مبدل جریان به ولتاژ [۱۵]

$$\frac{\partial V_{out}}{\partial i_{DS}} = R_f \quad (۱۰)$$

مقدار R_f یا همان مقاومت فیدبک برابر $910\text{ k}\Omega$ مطابق با مقاله [۱۴] قرار گرفته است.

۳. شبیه‌سازی و نتایج آن

در این پژوهش از نرم‌افزار شبیه‌ساز المان محدود کامسول^۲ برای تحلیل و محاسبه حساسیت مبدل پیشنهادی استفاده شده است. در ابتدا با استفاده از ماژول پیزوالکتریک ولتاژ القاشده در لایه نازک پیزو محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از مدل سیگنال کوچک ترسیم شده حساسیت حس‌گر تعیین می‌شود.

در طراحی نکته‌هایی را باید موردنظر قرار داد از جمله اینکه: تشکیل ترانزیستور روی میله‌ها این نیاز را ایجاد می‌کند که

هدایت انتقالی ترانزیستور و R_D مقاومت الکتریکی درین است. رابطه ظرفیت خازن بدنه در واحد سطح به شکل زیر است:

$$C_{sub} = C_{ox} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ox}}{t_{ox}} \quad (۳)$$

که در آن ϵ_{ox} ضریب گذردهی لایه اکسید و t_{ox} ضخامت لایه اکسید است. خازن پیزوالکتریک در واحد سطح نیز به شکل زیر است:

$$C_{pzt} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{pzt}}{t_{pzt}} \quad (۴)$$

در رابطه بالا ϵ_{pzt} ضریب گذردهی لایه پیزو و t_{pzt} ضخامت لایه پیزو است. طبق [۱۷] می‌توان گفت که در ناحیه اشباع خازن‌های ماسفت به صورت زیر در خواهند آمد:

$$C_{GS} = C_{over} + \left(\frac{2}{3}\right) C_{ox} \quad (۵)$$

$$C_{GD} = C_{over} \quad (۶)$$

که C_{over} خازن هم‌پوشانی ترانزیستور است. به دلیل عدم وجود مقاومت درین و اتصال مستقیم درین به زمین در مدار سیگنال کوچک مقدار این مقاومت برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. پس از جایگذاری و صرف نظر کردن از خازن هم‌پوشانی به رابطه زیر خواهیم رسید:

$$\frac{\partial V_G}{\partial V_P} = \frac{\epsilon_{pzt}/t_{pzt}}{\epsilon_{pzt}/t_{pzt} + (5/3)\epsilon_{ox}/t_{ox}} \quad (۷)$$

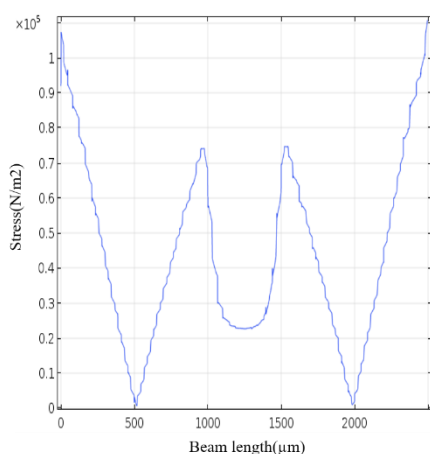
تغییرات جریان ماسفت ناشی از تغییرات ولتاژ گیت را می‌توان با استفاده از رابطه زیر به دست آورد:

$$\frac{\partial i_{DS}}{\partial V_G} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) \Big|_{V_{GS}=0} \quad (۸)$$

(N/m²) آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود بخش اعظم استرس در لبه‌های فیکس شده دیده می‌شود، که بیانگر این نکته است که لبه‌ها بهترین نقطه برای قرار دادن لایه پیزوالکتریک است.

جدول ۳. مشخصات فیزیکی لایه پیزوالکتریک مورد استفاده

PZT-5A Thin film	
d_{31} (C/N)	-170×10^{-12}
Poisson's Ratio	0.3
$S_{11}^E \cdot S_m$ (m ² /N)	16.4×10^{-12}
$\epsilon_T^{33} / \epsilon_0$	1700



شکل ۵. توزیع استرس در طول بیم هنگام برخورد موج آکوستیکی

جابه‌جایی در طول بیم نیز محاسبه شده است. در شکل ۶ میزان حداکثر جابه‌جایی در طول بیم به ازای فشار ۱ پاسکال نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود حداکثر جابه‌جایی در مرکز بیم است که برابر با ۰/۰۴ نانومتر است. در لبه‌ها به دلیل ثابت بودن، میزان جابه‌جایی صفر است.

جنس میله از موادی تشکیل شود که بتوان روی آن‌ها ترانزیستور ماسفت ایجاد کرد. از طرفی دیگر باید جنس آن طوری باشد که بتوان ولتاژ آستانه را در نزدیک منفی یک ولت طراحی کرد. همچنین به منظور داشتن حساسیت قابل قبول، قابلیت تحرک^۳ حامل‌ها باید بالا باشد. با توجه به نکات ارائه‌شده از میله‌ای با جنس سیلیکون استفاده شده است تا بتوانیم حسگری با عملکرد خوب داشته باشیم. نکته دیگری که باید مورد توجه قرار داد این است که باید اطمینان حاصل کرد که ترانزیستور در ناحیه اشباع بایاس شده باشد تا احتمال تداخل را به حداقل رساند. مشخصات ترانزیستور طراحی شده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۲. مشخصات ترانزیستور استفاده شده

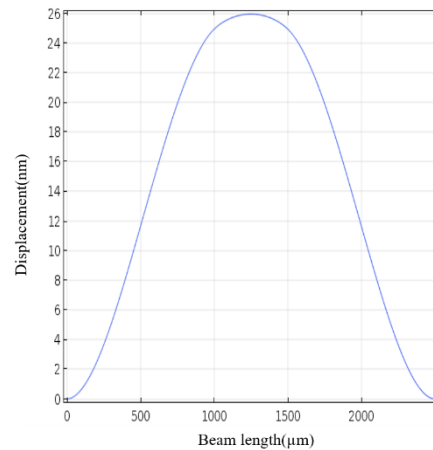
۰/۰۶۰۶ m ² /Vs	مویلیته
-۱/۱۷۱۹ V	ولتاژ آستانه
۰ V	ولتاژ گیت
۱۱۰ μm	طول کانال ترانزیستور
۵ μm	پهنای پین درین یا سورس

در شبیه‌سازی از دو بیم به طول ۱۰۰۰ میکرومتر، پهنای ۱۲۰ میکرومتر و ضخامت ۱۰ میکرومتر استفاده شده است. صفحه وسط به صورت مربعی در ابعاد ۵۰۰ در ۵۰۰ میکرومتر است و از لایه‌نازک PZT-5A استفاده شده است که مشخصات آن به همراه مشخصات مکانیکی میله سیلیکونی در جدول ۲ آورده شده است. ضخامت لایه پیزوالکتریک ۲ میکرومتر در نظر گرفته شده است و در طول مقاله پهنای آن بهینه می‌شود.

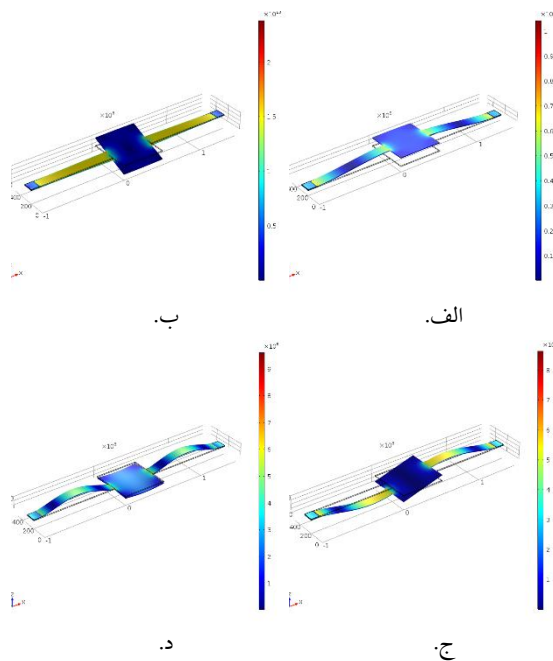
در ابتدا به منظور مشخص کردن بهترین نقطه برای قرار دادن لایه‌نازک پیزوالکتریک توزیع تنش مکانیکی در طول بیم مشخص شده است. در شکل ۴ منحنی استرس مبدل پیشنهادی ترسیم شده است. در این شکل محور افقی بیانگر مکان است و محور عمودی نشانگر میزان استرس در واحد

جدول ۴. تحلیل مدی مبدل پیشنهادی

شماره مد	فرکانس (هرتز)
۱	۱۰۲۶۲
۲	۳۲۲۹۹
۳	۳۵۸۲۰
۴	۷۷۲۰۴



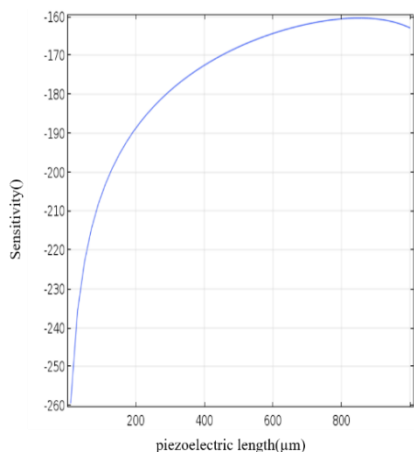
شکل ۶. جابه‌جایی در طول بیم به ازای فشار آکوستیکی ۱ پاسکال



شکل ۷. چهار مد اصلی ساختار مکانیکی حس گر پیشنهادی

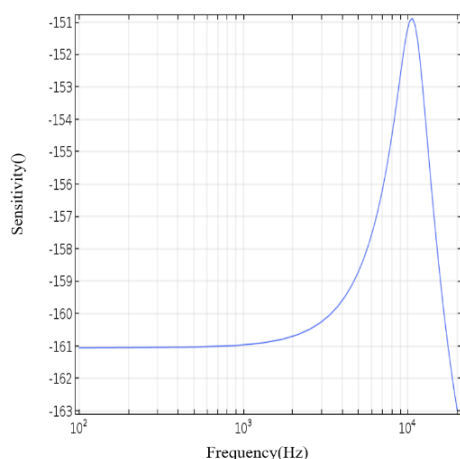
در ادامه موج آکوستیکی با فشار ۱ پاسکال به حس گر اعمال شده است و ولتاژ ایجادی با لایه نازک پیزوالکتریک اندازه‌گیری شده است. گفتنی است که در این مرحله هنوز تأثیر ترانزیستور و مدار مبدل جریان به ولتاژ بررسی نشده است و فقط لایه نازک پیزوالکتریک قرار داده شده است. در شکل ۸ ولتاژ پیزوالکتریک به ازای فشار ۱ پاسکال و در پهنای مختلف لایه پیزو ترسیم شده است. هنگامی که پهنای لایه پیزو به مقدار ۷۹۰ میکرومتر می‌رسد، ولتاژ لایه پیزو به مقدار بهینه خود یعنی ۲۷ میکرو ولت می‌رسد. بر اساس نتایج مدل‌سازی پهنای، شایان ذکر است که هرچند در این پهنای ولتاژ

قدم اول در تحلیل دینامیک، تحلیل مدی است. تحلیل مدی مقدمه تحلیل‌هایی در باب عملکرد، طول عمر و رفتار دینامیکی ساختار است. تحلیل مدال به منظور تعیین فرکانس‌های طبیعی و رفتار متناظر با هر مد فرکانسی صورت می‌گیرد. به‌عنوان نمونه فرض کنید که نیرویی استاتیکی یا دینامیک روی ساختار دو بازویی اعمال شود و موجب انحراف ساختار شود. حال اگر فرکانس نیروی اعمالی برابر با فرکانس طبیعی ساختار باشد، امیدانس مکانیکی ساختار به شدت افت خواهد کرد، در نتیجه شاهد تغییر شکل شدید بر ساختار خواهیم بود. جابه‌جایی زیاد می‌تواند باعث آسیب دیدن ساختار شود. پس می‌توان گفت که تعیین فرکانس طبیعی در طراحی ساختاری با طول عمل بالا و قابل اطمینان اهمیت بسیار زیادی دارد. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های هر حس گر پهنای باند آن است. برای تعیین اولین فرکانس رزونانس که خود بیانگر پهنای باند مبدل است، تحلیل مدی صورت گرفته که نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است. طبق این نتایج اولین رزونانس در فرکانس ۱۰۲۶۲ هرتز اتفاق می‌افتد. شکل متناظر با چهار مد اول ارتعاشی در شکل ۷ دیده می‌شود.



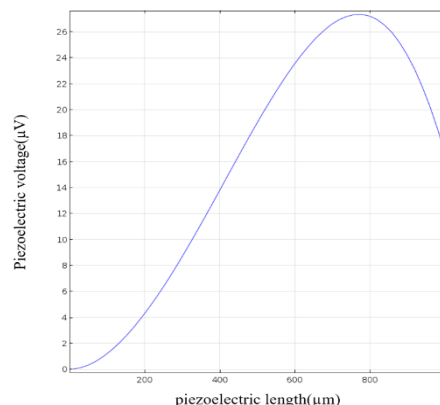
شکل ۹. حساسیت مبدل پیشنهادی به طول لایه پیزوالکتریک

در انتها تحلیل فرکانسی روی حس گر هیدروفون پیشنهادی صورت گرفته است. فرکانس موج آکوستیکی ورودی در بازه ۱۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز تغییر داده شده و حساسیت نسبت به آن به دست آمده است. منحنی پاسخ فرکانسی در شکل ۱۰ ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، در فرکانس رزونانس اول شاهد پیک حساسیت هستیم که پس از عبور از این پیک حساسیت دوباره افت می‌کند. محدوده فرکانسی برای داشتن پاسخ خطی باید فرکانس‌های بسیار پایین‌تر از رزونانس اول باشد (کمتر از ۱ کیلوهرتز).



شکل ۱۰. پاسخ فرکانسی مبدل پیشنهادی

لایه پیزوالکتریک مقدار حداکثر پیدا می‌کند؛ اما لزوماً بدان معنی نیست که در خروجی نهایی این نقطه باز هم بهترین نقطه باشد. بدین دلیل در ادامه تأثیر قرار دادن ترانزیستور بررسی شده است.



شکل ۸. ولتاژ ایجادشده توسط لایه پیزوالکتریک به ازای فشار آکوستیکی ۱ پاسکال

برای تعیین دقیق مقدار بهینه طول لایه پیزو منحنی حساسیت نسبت به طول پیزو در شکل ۹ ترسیم شده است. حساسیت با استفاده از رابط $S = 20 \text{Log} \left(\frac{V_{out}(V)}{P(\mu Pa)} \right)$ محاسبه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حساسیت با افزایش طول لایه پیزوالکتریک و ترانزیستور بهبود پیدا کرده است.

در طول ۸۵۰ میکرومتر حساسیت به بهترین حالت خود یعنی ۱۶۰ dB می‌رسد. نتایج این مدل‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از ساختار لایه پیزوالکتریک بر روی گیت ترانزیستور ماسفت این امکان را فراهم می‌کند تا حس‌گرهای با حساسیت‌های بیشتری طراحی و ساخته شود. از طرف دیگر افزایش حساسیت تا ۱۶۰ dB کمک بسیار زیادی به کوچک‌سازی حس‌گرها خواهد کرد. بدین صورت که با کاهش ابعاد و در نتیجه کاهش حساسیت هنوز می‌توان حساسیت را نزدیک به حساسیت حس‌گرهای تجاری هیدروفون نگه داشت.

۴. نتیجه‌گیری

- [3] Tan YN, Zhang Y, Guan BO. Hydrostatic pressure insensitive dual polarization fiber grating laser hydrophone. *IEEE Sensors Journal*. 2010 Oct 14;11(5):1169-72.
- [4] 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.
- [5] Arshad MR. Recent advancement in sensor technology for underwater applications. 2009;38(3);267-73.
- [6] Leonard JJ, Bahr A. Autonomous underwater vehicle navigation. *Springer handbook of ocean engineering*. 2016:341-58.
- [7] Wang D, Filoux E, Levassort F, Lethiecq M, Rocks SA, Dorey RA. Fabrication and characterization of annular-array, high-frequency, ultrasonic transducers based on PZT thick film. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2014 Sep 1;216:207-13.
- [8] Okada N, Takeuchi S. Robust hydrophone with hydrothermal PZT thick-film vibrator and titanium front layer for use in high-power ultrasound fields. In: 2015 Joint IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectric (ISAF), International Symposium on Integrated Functionalities (ISIF), and Piezoelectric Force Microscopy Workshop (PFM); 2015 May 24.
- [9] Harikrishnan C, Kiran K, Malarkodi A. Finite Element Analysis of underwater acoustic vector sensor. In: 2015 IEEE Underwater Technology (UT); 2015 Feb 23.
- [10] Chen S, Xue C, Zhang B, Qiao H. A novel MEMS based piezoresistive vector hydrophone for low frequency detection. In: 2007 International Conference on Mechatronics and Automation; 2007 Aug 5.
- [11] Mengran L, Guojun Z, Xiaopeng S, Yuan L, Wendong Z. Design of the monolithic integrated array MEMS hydrophone. *IEEE Sensors Journal*. 2015 Oct 30;16(4):989-95.
- [12] Linxian L, Wendong Z, Guojun Z, Chenyang X. Package optimization of the cilium-type MEMS bionic vector hydrophone.

با استفاده از مبدل پیزوالکتریک بر گیت ترانزیستور ماسفت حسگر هیدروفون طراحی شده است. مدل سازی به وسیله نرم افزار شبیه ساز المان محدود صورت گرفته و حساسیت مبدل پیشنهادی محاسبه شده است. با قرار دادن لایه نازک پیزوالکتریک بر روی گیت ترانزیستور ماسفت تلاش برای بهبود حساسیت مبدل های پیشین صورت گرفته است. تأثیر طول لایه پیزوالکتریک بررسی شده است و مشخص شد که در طول ۸۵۰ میکرومتر تغییرات ولتاژ ایجاد شده به مقدار بهینه خود می رسد. از طرفی دیگر پاسخ فرکانسی حسگر پیشنهادی در حالت بهینه به دست آمده است که نشان می دهد که در فرکانس های کمتر از ۲ کیلوهرتز پاسخ فرکانسی خطی است. به علاوه آنچه آورده شد، نتایج نشان می دهند که حسگر پیشنهادی جایگزین مناسبی برای مبدل های حجیم مرسوم در بازار است. حساسیت بالا، پهنای باند عریض و قابلیت مجتمع پذیری از برتری های این حسگر است. ساختار پیشنهادی به طور کامل با فناوری MEMS قابل پیاده سازی است.

۵. سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از محققان پژوهشکده هیدروفیزیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر که ما را در انجام این پژوهش یاری دادند، اعلام کنند.

مراجع

- [1] Bai B, Ren Z, Ding J, Xu W, Zhang G, Liu J, Zhang W, Xue C, Zhang B, Wang R. Cross-supported planar MEMS vector hydrophone for high impact resistance. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2017 Aug 15;263:563-70.
- [2] Vivek K, Rajesh R, Sreehari CV, Santhanakrishnan T, Kumar SS, Praveen TV, Sundar RA, Moosad KP. An improved polymer shell encapsulated fiber laser hydrophone. *IEEE Sensors Journal*. 2017 Nov 27;18(2):589-95.

body combined on the gate of a field-effect transistor. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2016 Jan 1;237:155-66.

- [17] Razavi B. Basic MOS device physics. In: design of analog CMOS integrated circuits, 2nd ed., New WORK, NY, USA: McGraw-Hill; 2016. ch. 2. p. 9-46.

پی‌نوشت

1. Gate-Drain
2. COMSOL
3. Mobility

IEEE Sensors Journal. 2013 Dec 5;14(4):1185-92.

- [13] Zhu B, Varadan VK. Integrated MOSFET-based hydrophone device for underwater applications. In: *Smart Structures and Materials 2002: Smart Electronics, MEMS, and Nanotechnology*; 2002 Jul 11. SPIE. Vol. 4700, p. 101-110 .
- [14] Sung M, Shin K, Moon W. A new transduction mechanism for hydrophones employing piezoelectricity and a field-effect transistor. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2015 Sep 1;233:557-68.
- [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.
- [16] Sung M, Shin K, Moon W. A micro-machined hydrophone employing a piezoelectric