

بررسی تاثیر شکل سوراخ های جرم آزمون ژيروسکوپ موج آکوستیکی توده ای بر فرکانسی تطبیق مدهای تحریک و حسگری

محمد مهدی علامه^۱ مرتضی فتحی پور^۲

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب- تهران- ایران

st_m_allameh@azad.ac.ir

۲- دانشیار- آزمایشگاه شبیه سازی و مدل سازی افزاره، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران

mfathi@ut.ac.ir

چکیده: در طراحی ژيروسکوپ موج آکوستیکی توده ای BAW عموماً لازم است که فرکانس تطبیق مدهای حسگری و تحریک بیشینه انتخاب گردند. چنین انتخابی فاکتور کیفیت ژيروسکوپ را بهبود می بخشد. در این مقاله تاثیر شکل سوراخ هایی را که در مرحله رهاسازی جرم آزمون ژيروسکوپ BAW ایجاد می شوند بر فرکانس تطبیق مدهای حسگری و تحریک بررسی می کنیم. ژيروسکوپ از نوع حلقه بسته فرض شده است که بر بستر SOI ساخته می شود. بویژه دو وضعیت برای سوراخ های مخروطی شکل مورد مطالعه قرار گرفته است. اگر یال هر سوراخ با بستر، زاویه داخلی منفرد بسازد، اختلاف فرکانس بین مدی کمتر و اگر زاویه داخلی حاده بسازد اختلاف فرکانس بین مدی بیشتر می شود.

واژه های کلیدی: تطبیق فرکانس، جرم آزمون، ژيروسکوپ موج آکوستیکی توده ای BAW، سوراخکاری

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۰۶

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۰۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۱۵

نام نویسنده ی مسئول: مرتضی فتحی پور

نشانی نویسنده ی مسئول: ایران - تهران - خیابان کارگر شمالی - پلاک ۴۲۴ - دانشگاه تهران - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

ژیروسکوپ‌های ارتعاشی MEMS از جمله ژیروسکوپ‌هایی هستند که با استفاده از اصل کوریولیس طراحی می‌شوند. در طراحی ژیروسکوپ‌های ارتعاشی مخصوصاً در ابعاد میکرومتری، یکی از مهمترین مسائل حداقل سازی تاثیرپذیری ارتعاشات مطلوب از ارتعاشات ناخواسته محیطی و کاهش اغتشاش پذیری است. ساده‌ترین راه حل برای کاهش اغتشاش و مخصوصاً اغتشاش مکانیکی استفاده از طراحی ژیروسکوپ چنگالی قابل تنظیم (TFG)^۱ می باشد. این نوع طراحی با استفاده از خاصیت تفاضلی، ارتعاشات محیطی را حذف می‌کند. در اینجا هدف ایجاد نوعی تقارن در شکل ژیروسکوپ است. به عنوان مثال، فرخ ایازی و همکاران از دانشگاه جرجیاتک ژیروسکوپ TFG از نوع مد تطبیق یافته طراحی کرده‌اند که مد تطبیق یافته در این ژیروسکوپ، در محدوده دمایی ۲۰ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد پایداری خوبی دارد [۱-۳]. همچنین ژیزونگو و همکاران از دانشگاه فناوری دفاعی چین، ژیروسکوپ TFG طراحی کرده‌اند که با استفاده از تشخیص تنش برشی کار می‌کند [۴].

نوع دیگری از ژیروسکوپ‌ها، ژیروسکوپ‌های نوع SHELL هستند. این نوع ژیروسکوپ‌ها به لحاظ شکل خود دارای تقارن ذاتی هستند و اغتشاش محیطی را بصورت یکنواخت در تمامی نقاط جرم آزمون خود دریافت می‌کنند. لذا نسبت به انواع دیگر ژیروسکوپ‌ها، این نوع طراحی به خودی خود اغتشاش پذیری بسیار پایین‌تر و امکان حذف اغتشاش ساده‌تری دارد. مایکل ویلیام پوتی و خلیل نجفی از دانشگاه میشیگان برای اولین بار ژیروسکوپ حلقه ارتعاشی معرفی نمودند [۵]. در [۶] فرخ ایازی و خلیل نجفی ژیروسکوپ [۵] را توسعه داده و ژیروسکوپ حلقه ارتعاشی از جنس پلی سیلیسیم ساختند. یکی از انواع طراحی‌های جدید ژیروسکوپ‌های معروف به نوع شیل^۲ که به نوعی مدل توسعه یافته از ژیروسکوپ‌های حلقه ارتعاشی می‌باشند، ژیروسکوپ موج آکوستیکی توده‌ای (BAW)^۳ است. اصول عملکرد این ژیروسکوپ همانند اصول عملکرد نوع حلقه ارتعاشی است، با این تفاوت که ارتعاشات از نوع موج آکوستیک توده‌ای است، در حالیکه در نوع حلقه ارتعاشی، ارتعاشات از نوع نوسان حلقه و با دامنه بسیار بزرگتر است. در ژیروسکوپ BAW جرم آزمون، حرکت ارتعاشی مورد نیاز را از طریق تولید امواج آکوستیکی توده‌ای ایجاد می‌کند؛ این امواج دارای فرکانس بسیار بالاتر و دامنه نوسان بسیار پایین‌تر نسبت به انواع ژیروسکوپ ارتعاشی ذکر شده می‌باشند. در بخش بعدی اثرات مثبت این نوع ارتعاش توضیح داده شده است.

یکی از مهم‌ترین اجزاء ژیروسکوپ BAW جرم آزمون می‌باشد و برای آنکه جرم آزمون بتواند ارتعاش نماید باید بصورت معلق در آید. برای معلق سازی، جرم آزمون را سوراخکاری می‌کنند تا امکان زدایش فضای زیرین آن فراهم آید. در حین ساخت ممکن است سوراخ‌ها به شکل استوانه‌ای درنیایند. هندسه سوراخ‌های جرم آزمون یکی

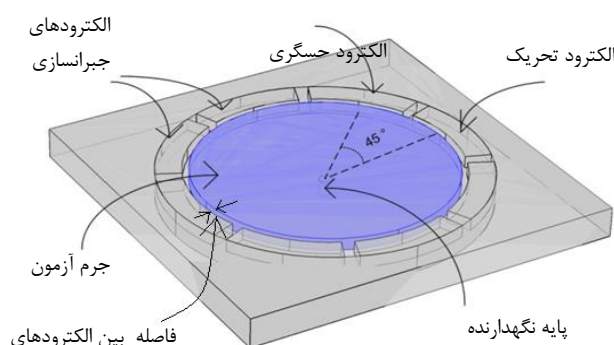
از عوامل موثر در کاهش تطبیق فرکانس مدهای تحریک و حسگری می‌باشد. بررسی شکل سوراخ‌های جرم آزمون، به پیش بینی دقیق‌تر میزان تطبیق فرکانسی بین مدی کمک می‌کند.

در مرجع [۷] برای ساخت جرم آزمون ژیروسکوپ BAW، از سوراخ‌هایی استفاده شده است. در عمل ممکن است شکل این سوراخ‌ها به جای اینکه استوانه‌ای گردد، به شکل مخروط درآید. زاویه داخلی یال مخروط با بستر ممکن است منفرجه یا حاده باشد. در این مقاله به تاثیر این شکل سوراخکاری بر روی اختلاف فرکانس بین مدهای تحریک و حسگری پرداخته شده است.

در بخش دوم این مقاله اصول عملکرد ژیروسکوپ BAW توضیح داده شده است. در بخش سوم مدهای ارتعاشی یک دیسک مرتعش بررسی شده است. در بخش چهارم شبیه سازی دیسک مرتعش آورده شده و اثرات مرتبط با شکل سوراخ‌های جرم آزمون مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. سرانجام این مقاله را در بخش پنجم با ارایه نتیجه گیری به پایان می‌بریم.

۲- اصول عملکرد ژیروسکوپ BAW

در شکل ۱ تصویری از یک ژیروسکوپ BAW نشان داده شده است. در اینجا نیز همانند ژیروسکوپ حلقه ارتعاشی دو نوع الکتروتد تحریک و حسگری برای اعمال و کنترل ارتعاشات در طراحی بکار می‌رود. الکتروتد تحریک وظیفه اعمال سیگنال ورودی و اعمال ارتعاش اولیه در راستای تحریک را به جرم آزمون به عهده دارد. پس از اعمال چرخش به ژیروسکوپ، به واسطه پاسخ کوریولیس، جرم آزمون در راستای الکتروتدهای حسگری نیز به ارتعاش در می‌آید. الکتروتد حسگری وظیفه اندازه‌گیری این ارتعاشات را بر عهده دارد. همانطور که در شکل مشخص است بیش از دو الکتروتد در اطراف دیسک نوسان کننده قرار دارد. باقی الکتروتدها الکتروتدهای جبران ساز الکترونیکی هستند که برای تطبیق دو مد تحریک و حسگری و بیشینه سازی ضریب کیفیت مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نوع ژیروسکوپ از نوع حلقه بسته است و چون هدف از طراحی آن دستیابی به ضریب کیفیت بالاست، باید فرکانس تشدید مدهای تحریک و حسگری برابر باشد (مد تطبیق یافته فرکانسی).



شکل (۱): ژیروسکوپ BAW. جرم آزمون از جنس سیلیسیم تک بلور همسانگرد با جهت بلوری <۱۱۱> است [۷]

به همین دلیل از الکترودهای جبرانسازی برای تصحیح اختلاف فرکانس تشدید دو مد استفاده می‌شود. پس از ساخت به دلایلی نظیر نقص‌های ناشی از مراحل ساخت، فرکانس تشدید دو مد یکسان نخواهد بود، به همین دلیل باید برای ساده سازی مراحل جبرانسازی حتی الامکان، مراحل ساخت بگونه ای بهینه سازی شوند که اختلاف فرکانس دو مد حداقل باشد.

در این نوع ژيروسکوپ جرم آزمون بر روی پایه‌ای عایق بصورت معلق در می‌آید. ولتاژ پلاریزاسیون از طریق یکی از الکترودها به جرم آزمون منتقل می‌شود [۸]. الکترودهای تحریک با ولتاژ راه اندازی متناوب در فرکانس تشدید مورد نظر بایاس می‌شوند و جرم آزمون با استفاده از تحریک الکترواستاتیک مرتعش می‌شود. فضای بین الکترودها و جرم آزمون بسته به نوع طراحی ممکن است از هوا تخلیه یا حاوی هوا باشد. اگر فضای بین الکترودها و جرم آزمون با هوا پر شده باشد میرایی ترموالاستیک از روی فشار هوا در این ناحیه تعیین می‌شود.

به واسطه پاسخ کوریولس، دیسک در راستای دیگری به ارتعاش در می‌آید. بنابراین الکترودهای حسگری نیز در همین راستا طراحی می‌شوند (توضیحات بیشتر در بخش ۳ آورده شده است). اغتشاش براونی از عبارت زیر تبعیت می‌کند [۷]:

$$\Omega_{z(Brownian)} \propto \frac{1}{q_{drive}} \sqrt{\frac{4K_B T}{\omega_0 M Q_{Effect-Sense}}} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، q دامنه ارتعاش مد تحریک، ω_0 فرکانس تشدید، M جرم آزمون، Q ضریب کیفیت مربوط به مد حسگری می‌باشد. T دما و K ضریب بولتزمن است.

محدوده فرکانس ارتعاش این نوع ژيروسکوپ ۴ تا ۸ مگاهرتز می‌باشد. این محدوده فرکانسی تاثیر بسزایی در کاهش سطح اغتشاش مکانیکی دارد. اغتشاش براونی یکی از مصادیق اغتشاش مکانیکی در ژيروسکوپ‌های کوریولیسی است و نقش مهمی در تعیین سطح اغتشاش دارد. هرچقدر اغتشاش پذیری ژيروسکوپ کمتر باشد دقت در اندازه گیری سرعت زاویه ای آن بالاتر است. در ژيروسکوپ حلقه ارتعاشی محدوده فرکانس کاری ۳ تا ۳۰ کیلوهرتز است. برای کاهش اغتشاش پذیری، جرم آزمون و یا دامنه مد تحریک را افزایش می‌دهند. دستکاری جرم آزمون و یا دامنه مد تحریک تبعاتی دارد. مثلاً دامنه ارتعاشات تا حدی قابل افزایش است و افزایش بیش از حد می‌تواند باعث ایجاد اثرات غیر خطی در پاسخ فرکانسی شود [۹].

همان گونه که در بالا ذکر شد، فرکانس کاری ژيروسکوپ BAW نسبت به ژيروسکوپ حلقه ارتعاشی بالاتر است، این خود موجب افزایش ضریب کیفیت بزرگتری می‌گردد، بنابراین طبق رابطه (۱)

سطح نویز پایین تری حاصل می‌آید. این نوع ارتعاش در توده جرم آزمون انجام می‌شود و برخلاف ژيروسکوپ‌های حلقه ارتعاشی که ارتعاش خمشی با دامنه نوسان و میرایی ترموالاستیک بالایی دارند، ژيروسکوپ BAW دامنه نوسان و میرایی پایین تری دارد. به همین دلیل، خازن کوچکتری بین جرم آزمون و الکترودها به وجود می‌آید.

حساسیت، نسبت ولتاژ تولید شده در الکترودها حسگری به ازای سرعت چرخش معینی می‌باشد [۹]. حساسیت با مربع فاصله هوایی خازن حد فاصل الکترودها و جرم آزمون نسبت عکس دارد. لذا هرچقدر این فاصله کمتر باشد، ژيروسکوپ حساسیت بیشتری خواهد داشت. به همین دلیل در طراحی ژيروسکوپ BAW فاصله خازنی را در محدوده چند ۱۰۰ نانومتر در نظر می‌گیرند.

۳- مدهای ارتعاشی دیسک مرتعش

برای توجیه کامل عملکرد ارتعاشی ژيروسکوپ BAW ابتدا باید نحوه ارتعاش یک دیسک مرتعش بررسی گردد. چون ژيروسکوپ مورد بررسی در این مقاله از نوع تک محوره می‌باشد، در این بخش صرفاً به بررسی ارتعاشات دیسک همسانگرد مرتعش در صفحه پرداخته شده و از ارتعاشات خارج صفحه صرفنظر گردیده است.

ارتعاشات یک دیسک از دو حرکت شعاعی (موج فشاری) در راستای شعاع و یک حرکت مماسی (موج برشی) در راستای مماس بر دیسک تشکیل می‌شود. u بردار جابجایی ارتعاشات یک دیسک برحسب مقدار اسکالر پتانسیل موج فشاری Φ و بردار پتانسیل موج برشی Ψ از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۰]:

$$\vec{u} = \nabla \Phi + \nabla \times \vec{\Psi} \quad (2)$$

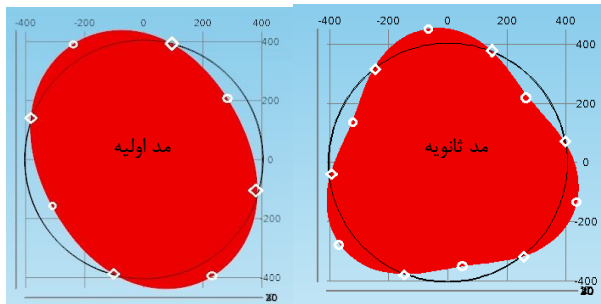
از جایگذاری (۲) در رابطه الاستیسیته دو بعدی [۱۰]، مقادیر پتانسیل هریک از موج های فشاری و سطحی محاسبه می‌شود. این دو کمیت به بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\Phi_m = A_m \cdot J_m \left(\frac{k_m r}{R} \right) \cdot \cos(m\theta) \cdot e^{i\omega_m t} \quad (3.a)$$

$$\Psi_m = B_m \cdot J_m \left(\frac{h_m r}{R} \right) \cdot \sin(m\theta) \cdot e^{i\omega_m t} \quad (3.b)$$

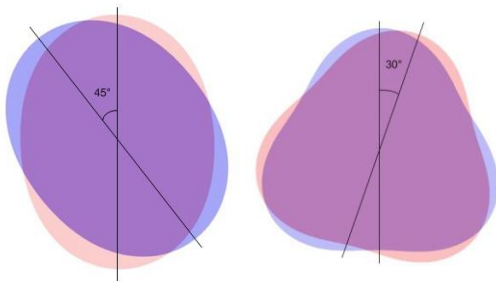
شکل ارتعاشی یا همان تابع شکل مد دیسک بر حسب تابع بسل نوع یک (J_m) بیان می‌شود. m شماره مد تابع بسل است. ω_m فرکانس تشدید مد m ام می‌باشد. A_m, B_m ضرایب ثابت امواج الاستیک بر حسب متر مربع و k_m, h_m پارامترهای بدون بعد فرکانس می‌باشند.

در ژيروسکوپ BAW چون ارتعاشات متقارن است و حول پایه نگهدارنده انجام می‌شود، از ارتعاشات دیسک در مد های $m=0,1$ صرفنظر می‌گردد (در $m=0$ ارتعاشات دیسک صرفاً از نوع شعاعی است و در $m=1$ مرکز دیسک دچار تغییر شکل می‌شود که هیچ یک معادل با ارتعاشات واقعی ژيروسکوپ BAW نمی‌باشد).



شکل (۲): شکل مدهای اولیه و ثانویه دیسک مرتعش به ازای $m=2,3$ (علائم مربع شکل نقاط گره و علائم دایره ای نقاط پاد گره را نشان می‌دهند)

نکته حائز اهمیت آن است که به ازای هر m ، دو شکل مد یکسان وجود دارد که با یکدیگر اختلاف زاویه $\alpha = 90^\circ/m$ دارند. از دیدگاه نظری فرکانس هر دو شکل در یک دیسک یکسان است. اما در عمل این دو فرکانس به لحاظ ماده استفاده شده در ساخت دیسک و نیز نقص‌هایی که در مراحل ساخت ممکن است بوجود آیند، متفاوت اند. عملکرد ژيروسکوپ BAW دقیقاً بر اساس الگوی ارتعاش دیسک در یک فرکانس خاص طراحی می‌شود. بدین صورت که پس از انتخاب فرکانس عملکرد و مد مورد نظر، جرم آزمون به واسطه الکترودهای تحریک به ارتعاش در می‌آید و پس از اعمال چرخش (و تاثیر نیروی کوریولیس)، جرم آزمون به حالت دوم از همان مد که حسگری شکل ۳ اختلاف زاویه مدهای تحریک و حسگری به ازای $m=2,3$ را نشان می‌دهد.



شکل (۳): اختلاف زاویه مدهای اولیه (تحریک) و ثانویه (حسگری) به ازای $m=2,3$

۴- شبیه سازی دیسک مرتعش و بررسی اثرات شکل هندسی سوراخ های جرم آزمون

ساخت ژيروسکوپ BAW بر روی قرص SOI انجام می‌شود. بدین صورت که جرم آزمون و الکترودها با زدایش لایه سیلیسیم و فرآیند معلق سازی جرم آزمون با زدایش لایه عایق ایجاد می‌گردد [۹]. ایجاد جرم آزمون بصورت یک دیسک معلق نیاز مستلزم زدایش لایه زیرین آن است. در روشی موسوم به SCREAM، قرص سیلیسمی

بردار جابجایی دیسک مرتعش عبارت است از:

$$U_m = \left[A_m \cdot \frac{d}{dr} J_m \left(\frac{k_m r}{R} \right) + \frac{m}{r} B_m \cdot J_m \left(\frac{h_m r}{R} \right) \right] \cdot \cos(m\theta) \quad (\text{الف. ۴})$$

$$V_m = \left[A_m \cdot \frac{-m}{r} J_m \left(\frac{k_m r}{R} \right) - B_m \cdot \frac{d}{dr} J_m \left(\frac{h_m r}{R} \right) \right] \cdot \sin(m\theta) \quad (\text{ب. ۴})$$

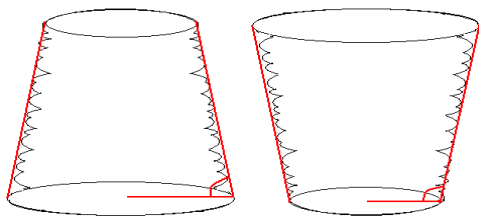
U_m جابجایی شعاعی و V_m جابجایی مماسی است در یک دیسک مرتعش با لبه های آزاد، R برابر با شعاع دیسک می‌باشد. r و θ مولفه های مختصات استوانه ای هستند.

مقادیر k_m برای دیسک مرتعش با محاسبه مقدار ویژه ماتریس ضرایب ثابت امواج الاستیک از (۴) محاسبه می‌شود. فرکانس تشدید مد m ام دیسک عبارت است از [۱۰]:

$$f_m = \frac{k_m}{2\pi R} \sqrt{\frac{E}{\rho \cdot (1-\nu^2)}} \quad (۵)$$

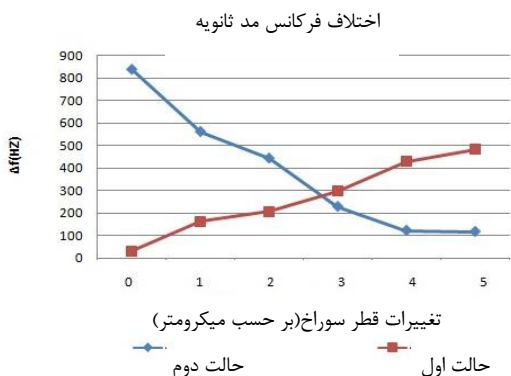
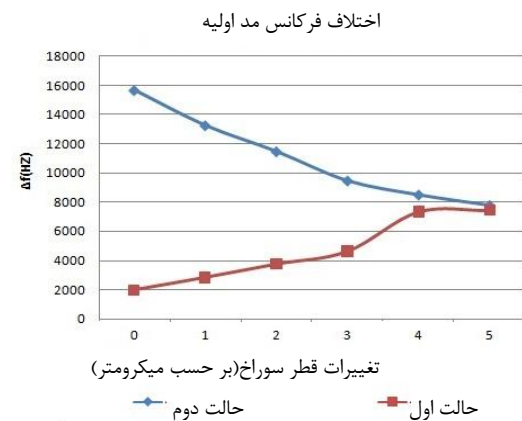
E ضریب یانگ، ν ضریب پواسن و ρ چگالی دیسک می‌باشد. همانطور که در رابطه ۵ نشان داده شده است، فرکانس تشدید با شعاع، چگالی دیسک و ضریب پواسن نسبت عکس و با ضریب یانگ و پارامتر بدون بعد فرکانس k_m نسبت مستقیم دارد.

شکل ۲ تابع شکل مد دیسک مرتعش را به ازای $m=2,3$ نشان می‌دهد که در این مقاله به ترتیب مدهای اولیه و ثانویه نامیده شده اند. هریک از این شکل مدها در فرکانس خاصی تشکیل می‌شوند. بدین صورت که با افزایش m فرکانس نیز افزایش می‌یابد. یعنی برای تشکیل شکل مدهایی با m بزرگتر، باید دیسک را در فرکانس بالاتری تحریک کرد. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شد است علائم مربع شکل نقاط گره^۴ و علائم دایره ای شکل نقاط پاد گره^۵ را نشان می‌دهند. نقاط گره نقطه‌ای از دیسک هستند که کمترین جابجایی و تغییر را در هنگام ارتعاش دارند و نقاط پاد گره برعکس. برای رسیدن به بیشینه ضریب کیفیت باید بیشینه دامنه نوسان را در هر مد داشته باشیم، لذا الکترودهای تحریک در راستای خطوط پاد گره (راستایی که از اتصال قطری نقاط پاد گره حاصل می‌شود)، و الکترودهای حسگری در راستای خطوط گره (راستایی که از اتصال قطری نقاط گره حاصل می‌شود) قرار داده شده اند. با افزایش m ، خطوط گره و پاد گره افزایش می‌یابند و بنابراین تعداد الکترودها بیشتر و عرض هر کدام از آنها باید کوچکتر انتخاب شود.



شکل (۵): دو نوع سوراخکاری با زوایای داخلی منفرجه و حاده با یال های غیر راست و با غیر یکنواختی

شکل ۶ وابستگی اختلاف فرکانس تشدید دو مد تحریک و حسگری را نسبت به تغییرات قطر سوراخ (از حالت استوانه ای) نشان می دهد. در حالت اول با افزایش اختلاف قطر در هر دو مد اولیه و ثانویه، اختلاف فرکانس کاهش می یابد. اختلاف فرکانس تشدید در حالت دوم این اختلاف افزایش می یابد. اختلاف فرکانس تشدید در مد اولیه برای هر دو حالت زاویه یال منفرجه و حاده از ۲ تا ۱۶ کیلوهرتز تغییر می کند، اگرچه این مقدار اختلاف، نسبت به مد ثانویه بسیار بیشتر است ولی نسبت به محدوده فرکانس کاری ۴ تا ۵ مگاهرتزی برای جبران سازی الکترونیکی قابل قبول است. این شبیه سازی با تغییرات پله ای ۱ میکرومتری در سوراخکاری بررسی شده است. بدیهی است با افزایش دقت سوراخکاری در مراحل ساخت این اختلاف فرکانس کاهش می یابد.

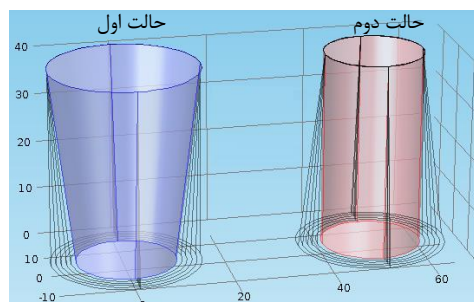


شکل (۶): اختلاف فرکانس در مدهای اولیه و ثانویه. اعداد ۵ تا ۵ محور افقی نمایانگر میزان اختلاف قطر بالایی و قطر پایینی سوراخ (بر حسب میکرومتر)

را بصورت ناهمسانگرد تا رسیدن به لایه عایق می زدایند، سپس لایه عایق بصورت همسانگرد زدوده می شود [۱۱].

سوراخکاری دیسک باعث ایجاد اختلاف فرکانس بین دو مد تحریک و حسگری می شود. به منظور انتخاب شکل هندسی بهینه ای برای سوراخکاری در [۹] با استفاده از شبیه سازی ۲ بعدی تأثیرات شکل هندسی سوراخهای جرم آزمون بر فرکانس تشدید بررسی شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی های متعدد حاکی از آن است که بهترین الگو برای ایجاد سوراخ های ریز آن است که این سوراخ ها همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است بصورت دواپر متحدالمرکز انتخاب شوند [۹]. از آنجا که الگوهای ایجاد شده روی دیسک نسبت منظر بالایی دارند، شکل سوراخهای جرم آزمون در تعیین فرکانس تشدید حائز اهمیت است. برای بررسی این موضوع، ارتعاشات دیسک سوراخکاری شده را با استفاده از نرم افزار COMSOL MULTIPHYSICS در سه بعد انجام داده ایم. بررسی سه بعدی این مسئله اگرچه نسبت به مسئله دو بعدی زمان برتر است ولی نتایج دقیق تر و واقعی تری ارائه می دهد. در مراحل سوراخکاری باید سوراخهایی مساوی با ضخامت دیسک سیلیسیمی ایجاد شود.

چنانکه اشاره شد، در عمل ضمن اجرای فرآیند زدایش، این سوراخ ها بصورت استوانه ای و با قطر ثابت ایجاد نمی شوند. این نوع غیر یکنواختی، در این مقاله در دو حالت بررسی شده است. نتایج در شکل ۶ نشان داده شده اند. در حالت اول قطر سوراخ در بالای دیسک را ثابت و مساوی ۱۵ میکرومتر و قطر سوراخ در زیر دیسک را از ۱۵ میکرومتر (استوانه ای) تا ۱۰ میکرومتر (مخروط ناقص) تغییر داده ایم. در حالت دوم قطر سوراخ در بالای دیسک را ثابت و مساوی ۱۰ میکرومتر و قطر سوراخ در زیر دیسک را از ۱۰ تا ۱۵ میکرومتر تغییر داده ایم. بدین ترتیب در دو حالت سوراخ های مخروطی شکل مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت اول زاویه داخلی یال هر سوراخ با بستر، منفرجه و در حالت دوم حاده است. این دو نوع سوراخکاری در شکل ۴ نشان داده شده اند. در شکل ۴ یال ها خط راست و بدون هیچگونه غیر یکنواختی در نظر گرفته شده اند ولی در شکل ۵ که وضعیت واقعی تری را نشان می دهد خطوط پلکانی (غیر یکنواخت) نشان داده شده اند.

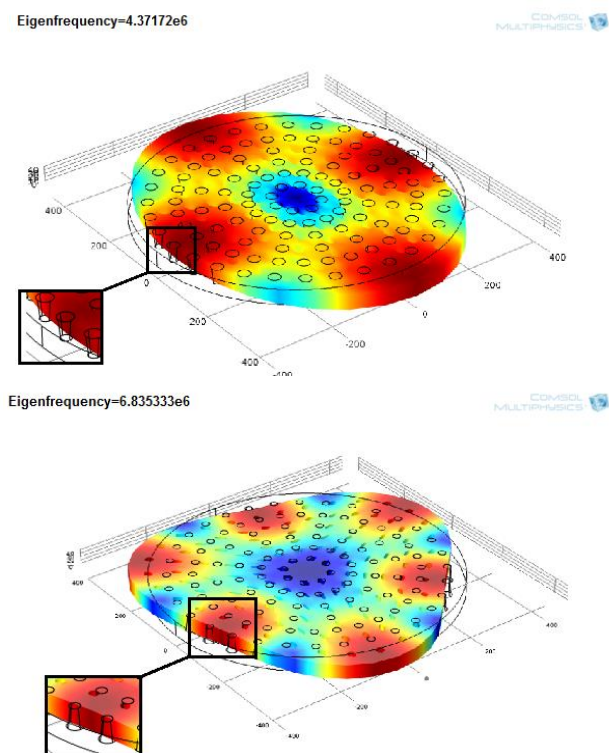


شکل (۴): دو نوع سوراخکاری با زوایای داخلی منفرجه و حاده با یال های راست و بدون غیر یکنواختی

افزایش می‌یابد، در مقابل در حالت دوم، افزایش قطر در قسمت تحتانی سوراخ اختلاف فرکانس را افزایش و فرکانس تشدید را می‌کاهد. در فرآیندهای ساخت واقعی ممکن است یال شیارها خط راستی نباشد، بلکه بصورت پلکانی تغییر کند. نتایج ما به طور متوسط رفتاری را که در عمل انتظار می‌رود نشان می‌دهد.

با دقت در شکل ۶ متوجه می‌شویم که اختلاف فرکانس بین مدی در مد ثانویه نسبت به مد اولیه بسیار کمتر است، یعنی با تنظیم فرکانس عملکرد زیروسکوپ در حالت ثانویه اختلاف فرکانس بین مدی کمتری در عملکرد آن وجود خواهد داشت.

هرچقدر قطر سوراخ ها کوچکتر باشد اختلاف فرکانس بین دو مد کمتر می‌شود. این مطلب منطقی است زیرا تحت این شرایط شکل جرم آزمون به وضعیت اولیه (قبل از سوراخ کاری) شباهت بیشتری دارد.

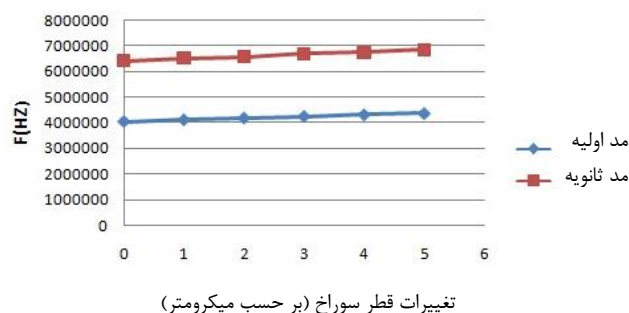


شکل (۸): مد اولیه مربوط به حالت اول و مد ثانویه مربوط به حالت دوم در دیسک با سوراخکاری غیر یکنواخت (شکل بالا حالت اول و شکل پایین حالت دوم)

مراجع

- [1] H. Nabovati, Mafinezhad, A. Nabovati, H. Keshmir, "Comprehensive Electromechanical Analysis of MEMS Variable Gap Capacitors", in JIAEEE, Journal of Iranian Associations of Electrical and Electronics Engineers, vol. 4, no. 2, pp. 3-9, June 2007.
- [2] Delaram Farimani S, Hajghasem H, Erfanian A R, Aliahmad M R. Design, Simulation and Fabrication of RF MEMS Capacitive Switch on Alumina Substrate. Journal

اختلاف فرکانس حالت اول



تغییرات قطر سوراخ (بر حسب میکرومتر)

اختلاف فرکانس حالت دوم



تغییرات قطر سوراخ (بر حسب میکرومتر)

شکل (۷): فرکانس تشدید در هر یک از دو حالت اول و دوم برای مد های اولیه و ثانویه به ازای تغییر در قطر سوراخ (بر حسب میکرومتر)

در شکل ۷ تغییرات فرکانس تشدید برای هر دو حالت نشان داده شده است. در مدهای اولیه و ثانویه مربوط به حالت اول فرکانس تشدید افزایش می‌یابد، یعنی هرچقدر قطر مقطع پایینی سوراخ که به شکل مخروط ناقص است کوچکتر می‌شود، فرکانس تشدید افزایش می‌یابد و در حالت دوم با عکس این رخداد مواجه می‌شویم. شکل مدهای اولیه و ثانویه در دیسک با سوراخهای به شکل مخروط ناقص در شکل ۸ نشان داده شده است. شکل بالایی سوراخکاری حالت اول و شکل پایینی سوراخکاری حالت دوم را نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به منظور انتخاب شکل هندسی بهینه برای سوراخکاری، با استفاده از شبیه سازی سه بعدی تاثیرات شکل هندسی سوراخهای جرم آزمون بر فرکانس تشدید بررسی شده است. برای معلق سازی جرم آزمون، هرچقدر سوراخ های کوچکتری ایجاد کنیم اختلاف فرکانس تشدید دو مد تحریک و حسگری کمتر می‌شود، درعین حال اختلاف فرکانس بین مدی کمتر می‌گردد. در شبیه سازی ۳ بعدی انجام شده این نکته جدید قابل درک است که هرگاه به دلیل خطا و غیر یکنواختی درزدایش، سوراخکاری از سطح بالایی دیسک به سمت پایین آن کاهش قطر پیدا کند و در ازای کاهش بیشتر شعاع تحتانی سوراخ اختلاف فرکانس دو مد بیشتر کاهش می‌یابد و فرکانس تشدید

- of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 12, no. 2, pp. 15-24, 2015.
- [3] M.F. Zaman, A. Sharma and F. Ayazi, "High Performance Matched-Mode Tuning Fork Gyroscope", Tech. Dig 19th IEEE International Conference on Micro-Electromechanical Systems Conference, Jan.2006.
 - [4] Xuezhong Wu, Liqiang Xie, Jianchun Xing, Peitao Dong, Haoxu Wang, and Jianbin Su, "A Z-Axis Quartz Tuning Fork Micromachined Gyroscope Based on Shear Stress Detection, May 2012.
 - [5] M.Putty and K.Najafi,"A micromachined vibrating ring gyroscope" in Proc. Tech. Digest of Solid State Sens. Actuators Workshop, 1994.
 - [6] F. Ayazi and K.Najafi, "A HARPSS Polysilicon Vibrating Ring Gyroscope, " in IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 10, no. 2,pp. 161-179, June 2001.
 - [7] H. Johari and F. Ayazi, "Capacitive Bulk Acoustic Wave Silicon Disk Gyroscopes," in Tech. Digest of International Electron Device Meeting (IEDM'06), San Francisco, CA, Dec. 2006, pp. 513-516.
 - [8] F.Ayazi and H.Jouhari, "Bulk Acoustic Wave Gyroscope", United States Patent Number 8166816, May 2012.
 - [9] Houri Johari, "Micromachined capacitive silicon bulk acoustic wave gyroscopes," Ph.D. Thesis, Univ. Georgia Institute of Technology, Dec. 2008.
 - [10] Z. Hao, S. Pourkamali, and F. Ayazi, "VHF Single Crystal Silicon Elliptic Bulk-Mode Capacitive Disk Resonators; Part I: Design and Modeling," in IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 13, no. 6, pp. 1043-1053, Dec.2004.
 - [11] Noel C. MacDonald, "SSCREAM MicroelectroMechanical Systems", Journal of Microelectromechanic Engineering, Volume 32, Issues 1-4, September 1996, Pages 49-73.

زیر نویس ها

¹ Tuning Fork Gyroscope

² SHELL

³ Bulk Acoustic Wave

⁴ Nodal

⁵ Anti-node

⁶ WWW.COMSOL.COM