

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک
گرایش الکترونیک
پایان نامه کارشناسی ارشد

تحلیل و طراحی فیلتر MEMS با فرکانس مرکزی و ضریب کیفیت بالا

عبدالله صادق کوهستانی

استاد راهنما:

دکتر بهرام عزیزالله گنجی

بهمن ۱۳۹۳

تعهدنامه

اینجانب **عبدالله صادق کوهستانی** دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی برق-گرایش الکترونیک دانشگاه شاهرود نویسنده‌ی پایان‌نامه‌ی **تحلیل و طراحی فیلتر MEMS با فرکانس مرکزی و ضریب کیفیت بالا**، تحت راهنمایی دکتر بهرام عزیزالله گنجی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه شاهرود» و یا «Shahrood University» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه‌ی اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه‌ی حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

چکیده

تکنولوژی MEMS در ساخت انواع ادوات الکترونیکی در زمینه های مختلف کاربرد دارد. از این جمله می توان ساخت سنسورهای مختلف در صنعت خودرو سازی ، ساخت سنسورهای Bio MEMS ، سنسورهای زیر آب و ... نام برد.

یکی از زمینه هایی که این تکنولوژی به آن وارد شده است حوزه فرکانسهای بالا (RF) می باشد که با اسم RF MEMS شناخته می شود. در این حوزه ادوات مختلفی چون آنتن ، تشدیدگر ، نوسان ساز، فیلتر و ... ساخته می شوند.

تشدیدگرها اصلی ترین بخش ساخت فیلترهای MEMS به حساب می آیند هرچند خود نیز عمل فیلتر را انجام می دهند و می توان از آنها به عنوان فیلترهایی با پهنای باند کمتر نام برد.

در این پایان نامه، تشدیدگری طراحی و شبیه سازی شده است که دارای محدوده فرکانسی UHF بوده و همچنین از ضریب کیفیت بالاتری نسبت به تشدیدگرهایی که تا کنون معرفی شده اند برخوردار می باشد. این ساختار نیز همانند دیگر تشدیدگرهای MEMS ، یک ساختار خازنی است که از دو بخش قابل حرکت و ساکن تشکیل شده است که این دو بخش با کنار هم قرار گرفتن، تشکیل خازن می دهند. بخش ساکن محل ورود سیگنال می باشد که باعث تحریک ساختار می شود. زمانیکه فرکانس سیگنال ورودی در محدوده فرکانس طبیعی بخش قابل حرکت قرار داشته باشد، این بخش شروع به نوسان کرده ، باعث تغییر فاصله هوایی شده در نتیجه خازن متغیری ایجاد می شود که موجب تولید جریانی هم فرکانس با سیگنال ورودی در خروجی خواهد شد. به عبارتی دیگر زمانی در خروجی سیگنال خواهیم داشت، که تغییرات خازن داشته باشیم و تغییرات خازن نیز با نوسان بخش قابل حرکت بوجود می آید که این نوسان نیز خود حاصل از قرار گرفتن فرکانس سیگنال ورودی در محدوده فرکانس طبیعی بخش قابل حرکت می باشد. بنابراین می توان گفت این ساختار در محدوده فرکانسی مشخصی به سیگنال ورودی اجازه عبور می دهد و در واقع آن را فیلتر می کند.

اما فرکانس نوسان، دامنه جابجایی و ضریب کیفیت ساختار به جنس ، ابعاد و شکل هندسی ساختار وابسته است، بنابراین با تغییر این پارامترها می توان به فرکانس تشدید و ضریب کیفیت مناسب دست پیدا کرد. در این ساختارها اگر بتوان ضریب کیفیت بالای آنها را حفظ کرد، می توان با این نوع رزوناتورها فیلترهایی بسیار کوچک با بازدهی عالی و با هزینه کم درست کرد.

در تشدیدگر ارائه شده از موادی استفاده شده است که دارای سرعت صوتی بالاتری در میان مواد قابل لایه نشانی می باشد. از طرفی شعاع ساختار را نیز کاهش داده ایم که این دو امر سبب بالا رفتن فرکانس تشدید ساختار تا $1/9$ گیگا هرتز شده و همچنین با استفاده از دو جنس متفاوت برای بدنه اصلی و پایه ساختار، باعث ایجاد یک عدم تطبیق امپدانس شده و مانع از انتقال حداکثری انرژی به خارج از سیستم شده ایم که این کار باعث کاهش تلفات ناشی از پایه شده و ضریب کیفیت ساختار را افزایش داده است.

واژه‌های کلیدی: فیلتر فرکانس بالا MEMS ، تشدیدگر (رزوناتور) حلقه‌ای ، تشدیدگر (رزوناتور) دیسکی ،

ضریب کیفیت بالا

فهرست مطالب

۱	فصل اول: مقدمه‌های بر تکنولوژی MEMS، رزوناتورها و فیلترهای MEMS	۱
۲	مقدمه	۱-۱
۴	سیستم‌های میکروالکترومکانیکی MEMS	۲-۱
۵	رزوناتورهای MEMS	۳-۱
۶	فیلترهای MEMS	۴-۱
۹	فصل دوم: بررسی رزوناتورها و فیلترهای MEMS	۲
۹	مقدمه	۱-۲
۱۰	تقسیم بندی رزوناتورهای MEMS	۲-۲
۱۰	براساس تحریک	۱-۲-۲
۱۷	براساس نوع ارتعاش	۲-۲-۲
۲۱	تحلیل رزوناتورهای دوسرگیردار	۳-۲
۲۱	تعریف و نحوه عملکرد رزوناتورهای دوسرگیردار	۱-۳-۲
۲۲	مدار معادل مکانیکی	۲-۳-۲
۲۶	مدار معادل الکتریکی	۳-۳-۲
۳۱	تحلیل رزوناتورهای دیسکی تک پایه	۴-۲
۳۱	تعریف و نحوه عملکرد رزوناتورهای دیسکی تک پایه	۱-۴-۲
۳۶	مدار معادل مکانیکی	۲-۴-۲
۳۷	مدار معادل الکتریکی	۳-۴-۲
۴۳	فصل سوم: مروری بر کارهای گذشته	۳
۴۳	مقدمه	۱-۳
۴۴	فیلترهای MEMS ساخته شده	۲-۳
۴۴	فیلترهایی که در آنها از یک یا چند قطعه MEMS استفاده شده است	۱-۲-۳
۴۷	فیلترهای میکروالکترومکانیکی	۲-۲-۳
۶۳	فصل چهارم: تحلیل و طراحی رزوناتورهای پایه حلقوی	۴

۶۳.....	تحلیل و مدل‌سازی رزوناتور دیسکی پایه حلقوی.....	۱-۴
۶۶.....	تأثیر جنس مواد بر فرکانس رزونانس و ضریب کیفیت.....	۲-۴
۶۹.....	مدار معادل مکانیکی و الکتریکی.....	۳-۴
۷۰.....	شبیه‌سازی و بررسی نتایج.....	۴-۴
۷۰.....	بوسیله نرم‌افزار متلب.....	۱-۴-۴
۷۱.....	شبیه‌سازی بوسیله نرم‌افزار ADS.....	۲-۴-۴
۷۳.....	شبیه‌سازی بوسیله نرم‌افزار Ansys.....	۳-۴-۴
۷۷.....	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....	۵
۷۷.....	جمع بندی.....	۱-۵
۷۸.....	پیشنهادها.....	۲-۵
۷۹.....	مراجع.....	۶

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: یک رزوناتور MEMS ۶
- شکل ۲-۱: تابع انتقال یک فیلتر ۷
- شکل ۱-۲: رزوناتور ممزی با تحریک مغناطیسی ۱۲
- شکل ۲-۲: تصویر رزوناتور ساخته شده با استفاده از تکنولوژی با تحریک مغناطیسی ۱۳
- شکل ۳-۲: طرح کلی از رزوناتور ممزی با تحریک گرمایی ۱۳
- شکل ۴-۲: ساختار و عملکرد رزوناتور خازنی با تحریک الکترواستاتیک ۱۴
- شکل ۵-۲: لرزش مود اول و دوم رزوناتور میکروتیر یک سرگیردار ۱۵
- شکل ۶-۲: ارتعاش موجی رزوناتور میکرومکانیکی [۷] ۱۷
- شکل ۷-۲: حالت ارتعاش موجی رزوناتورهای دوسرگیردار و دوسرآزاد [۸] ۱۷
- شکل ۸-۲: ارتعاش پیچشی یک رزوناتور میکرومکانیکی [۷] ۱۹
- شکل ۹-۲: ارتعاش حجمی رزوناتور میکرومکانیکی [۷] ۱۹
- شکل ۱۰-۲: شکلهای مختلف ارتعاش رزوناتور در حالت حجمی [۷] ۲۰
- شکل ۱۱-۲: شماتیک یک رزوناتور دوسرگیردار ۲۲
- شکل ۱۲-۲: مدار معادل مکانیکی رزوناتور دوسرگیردار ۲۳
- شکل ۱۳-۲: بیم معلق قابل نوسان ۲۳
- شکل ۱۴-۲: جسم نمونه در صفحه مختصات ۲۳
- شکل ۱۵-۲: مدار معادل الکتریکی بیم معلق ۲۸
- شکل ۱۶-۲: شبکه دو دهانه معرف خازن ۲۹
- شکل ۱۷-۲: اثر فنر تعادل در رزوناتورهای دوسرگیردار ۳۰
- شکل ۱۸-۲: مدار معادل الکتریکی خازن بین بیم معلق و الکتروود زیر آن ۳۱
- شکل ۱۹-۲: مدار معادل الکتریکی کلی رزوناتور دوسرگیردار ۳۱
- شکل ۲۰-۲: حالت های نوسان بیضوی (سمت راست) و شعاعی (سمت چپ) ۳۲
- شکل ۲۱-۲: رزوناتور دیسکی تک پایه ۳۲
- شکل ۲۲-۲: فرکانس رزونانس برحسب شعاع دیسک ۳۵
- شکل ۲۳-۲: مدار معادل مکانیکی رزوناتور دیسکی ۳۶
- شکل ۲۴-۲: مقایسه شکل رزوناتور دیسکی با مدار معادل الکتریکی آن ۳۷
- شکل ۲۵-۲: شبکه دو دهانه معادل خازن بین دیسک و الکتروود در رزوناتور دیسکی ۳۸
- شکل ۲۶-۲: اضافه کردن فنربه مدار معادل خازن ۳۹
- شکل ۲۷-۲: مدار معادل الکتریکی خازن مبدل الکترو مکانیکی ۴۰

- شکل ۲-۲۸: مدار معدل الکتريکی خازن مبدل در رزوناتورهای دیسکی ۴۰
- شکل ۲-۲۹: کل مدار معادل الکتريکی رزوناتور دیسکی در یک سمت مبدل ۴۱
- شکل ۳-۱: فیلتری که در آن از سوئیچ MEMS استفاده شده است ۴۴
- شکل ۳-۲: سوئیچ MEMS مورد استفاده در فیلتر ۱ و مدار معادل آن ۴۵
- شکل ۳-۳: نتایج حاصل از شبیه سازی و اندازه گیری فیلتر شماره ۱ ۴۵
- شکل ۳-۴: مدل کلی فیلتر ۲ ۴۶
- شکل ۳-۵: لیاوت یکی از فیلترها (سمت چپ) و لیاوت کل فیلترها در کنار هم (سمت راست) ۴۶
- شکل ۳-۶: نتایج حاصل از شبیه سازی فیلتر ۲ ۴۷
- شکل ۳-۷: ارتعاش دو رزوناتور به هم متصل شده ۴۷
- شکل ۳-۸: رزوناتور دوسرگیردار میکرومکانیکی ۴۸
- شکل ۳-۹: نتیجه حاصل از اعمال سیگنال به رزوناتور دوسرگیردار ۴۹
- شکل ۳-۱۰: نمودار ضریب کیفیت فیلتر و درصد پهنای باند بر حسب محل اتصال بیم در طول رزوناتور ۴۹
- شکل ۳-۱۱: تصویر SEM از فیلتر ساخته شده با استفاده از رزوناتورهای دوسرگیردار ۵۰
- شکل ۳-۱۲: نمودار تابع انتقال فیلتر متشکل از رزوناتورهای دوسرگیردار ۵۰
- شکل ۳-۱۳: فیلتر میکروالکترومکانیکی با استفاده از رزوناتور دیسکی با چهار پایه کناری ۵۱
- شکل ۳-۱۴: طیف فرکانسی رزوناتور دیسکی با چهار پایه کناری ۵۱
- شکل ۳-۱۵: شبیه سازی اول فیلتر دیسکی با پایه های کناری ۵۳
- شکل ۳-۱۶: شبیه سازی دوم فیلتر دیسکی با پایه های کناری ۵۴
- شکل ۳-۱۷: شبیه سازی سوم فیلتر دیسکی با پایه های کناری ۵۴
- شکل ۳-۱۸: نتایج بدست آمده از شبیه سازی فیلتر دیسکی با پایه های کناری ۵۴
- شکل ۳-۱۹: قرار دادن پایه حلقه های جای پایهی مرکزی ۵۵
- شکل ۳-۲۰: نمودار تحلیلی و شبیه سازی نوسان رزوناتور دیسکی با پایه وسط (چپ) و حلقه های (راست) ۵۵
- شکل ۳-۲۱: اتصال بیم به شعاع رزوناتور و ایجاد عدم تقارن (الف) غیرهمفاز (ب) همفاز ۵۶
- شکل ۳-۲۲: ایجاد برش در رزوناتور جهت نزدیک شدن به شعاع گرهای که باعث عدم تقارن شده است ۵۷
- شکل ۳-۲۳: تقسیم پایه حلقه های به سه قسمت ۵۷
- شکل ۳-۲۴: مدار معادل بیم اتصال ۵۹
- شکل ۳-۲۵: ارتعاش شعاعی غیرهمفاز فیلتر دیسکی با پایه حلقوی ۶۰
- شکل ۳-۲۶: ارتعاش شعاعی همفاز فیلتر دیسکی با پایه حلقوی ۶۰
- شکل ۳-۲۷: پاسخ فرکانسی فیلتر دیسکی با پایه حلقوی $f_o = 940MHz$, $BW = 187KHz$ ۶۰
- شکل ۴-۱: حذف پایه مرکزی و قرار دادن پایه حلقوی در شعاع گرهای رزوناتور ۶۳
- شکل ۴-۲: جزء دیفرانسیلی از رزوناتور دیسکی در مختصات استوانه ای ۶۴

- شکل ۳-۴: جابجایی شعاعی بر حسب شعاع در حل تحلیلی بوسیله متلب ۶۸
- شکل ۴-۴: مدار معادل الکتریکی و مکانیکی رزوناتور دیسکی ۶۹
- شکل ۵-۴: مقایسه تابع انتقال رزوناتور طراحی شده با تابع انتقال رزوناتور مرجع ۷۰
- شکل ۶-۴: فرکانس نوسان، پهنای باند و ضریب کیفیت رزوناتور طراحی شده ۷۱
- شکل ۷-۴: فرکانس نوسان، پهنای باند و ضریب کیفیت رزوناتور مرجع ۷۱
- شکل ۸-۴: پارامترهای پراکندگی رزوناتور مرجع ۷۲
- شکل ۹-۴: پارامترهای پراکندگی رزوناتور طراحی شده ۷۲
- شکل ۱۰-۴: شبیه سازی ساختار طراحی شده در Ansys ۷۳
- شکل ۱۱-۴: نمودار نوسان ساختار در نرمافزار Ansys ۷۳
- شکل ۱۲-۴: نمودار نوسان رزوناتور مرجع در نرمافزار Ansys ۷۴

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲: مقایسه رزوناتورهای ممزی با انواع تحریک ۱۰
- جدول ۲-۲: رزوناتورهایی که دارای ارتعاش موجی می باشند ۱۷
- جدول ۳-۲: رزوناتورهایی که دارای ارتعاش پیچشی می باشند ۱۹
- جدول ۴-۲: رزوناتورهایی که دارای ارتعاش حجمی می باشند ۲۰
- جدول ۵-۲: مقایسه المانهای الکتریکی و مکانیکی ۲۷
- جدول ۶-۲: شار و نیرو محرکه در سیستم های مختلف ۲۷
- جدول ۷-۲: مقادیر λ برای ۴ مد اول ۳۵
- جدول ۱-۳: نتایج حاصل از فیلتر شماره ۱ ۴۵
- جدول ۲-۳: نتایج حاصل از شبیهسازی فیلتر ۲ ۴۷
- جدول ۳-۳: پارامترهای مکانیکی پلیسیلیکون ۵۰
- جدول ۴-۳: نتایج بدست آمده از فیلتر متشکل از رزوناتورهای دوسرگیردار ۵۰
- جدول ۵-۳: نتایج بدست آمده از شبیهسازی فیلتر دیسکی با پایه های کناری ۵۵
- جدول ۶-۳: نتایج حاصل از شبیهسازی فیلتر دیسکی با پایه حلقوی ۶۰
- جدول ۱-۴: مقایسه ویژگیهای مکانیکی مواد ۶۷
- جدول ۲-۴: مقادیر المانهای مدار معادل مکانیکی و الکتریکی ۶۹
- جدول ۳-۴: مقایسه مقادیر شبیه سازی شده رزوناتور طراحی شده با نمونه مشابه قبلی در متلب ۷۰
- جدول ۴-۴: مقایسه نتایج شبیه سازی با ADS ۷۲

فصل اول

مقدمه‌ای بر تکنولوژی MEMS، رزوناتورها و

فیلترهای MEMS

۱ فصل اول: مقدمه‌ای بر تکنولوژی MEMS، رزوناتورها و

فیلترهای MEMS

۱-۱ مقدمه

همانطور که می‌دانیم رزوناتورها از اصلی‌ترین اجزای فیلترها می‌باشند. رزوناتورهای مکانیکی مانند کریستال کوآرتز^۱ یا رزوناتورهای شانه‌ای قابل تنظیم می‌توانند به ضریب کیفیت^۲های نزدیک ۱۰۰۰۰ دست پیدا کنند. رزوناتورهای پیزوالکتریک^۳ مرسوم (کریستال کوآرتز) به صورت گسترده در فرکانسهای بیش از ۱۰۰ مگاهرتز استفاده می‌شوند. رزوناتورهای شانه‌ای قابل تنظیم که با آنها فیلتر ساخته می‌شود به صورت گسترده در سیستم‌های تلفن سیمی آنالوگ قدیمی در فرکانسهای حوالی ۱۰۰ کیلو هرتز مورد استفاده قرار می‌گرفتند.

امروزه باندهای فرکانسی اختصاص داده شده به سیستم‌های تلفن همراه در کشورهای مختلف ممکن است متفاوت باشد، اما به طور کلی در محدوده ۴۰۰ مگاهرتز تا ۲/۲ گیگاهرتز با پهنای باند ۲۰-۷۵ مگاهرتز می‌باشند. همچنین شرکت‌های ساخت تلفن همراه همواره در پی بالابردن بازدهی و کاهش هزینه بیشتر هزینه‌های خود هستند.

در رزوناتورهای مکانیکی علاوه بر جنس مواد، ابعاد هندسی ادوات نیز تأثیر بسزایی در تعیین فرکانس رزونانس آنها دارد، بنابراین تکنولوژی^۴ MEMS قادر به گسترش رزوناتورهای MEMS به محدوده گیگاهرتز می‌باشد. در نتیجه می‌توان گفت فیلترهای MEMS فرکانس بالا^۵ به زودی جای فیلترهای معمولی را در تلفن‌های همراه خواهند گرفت، زیرا درعین دارا بودن بازدهی بالا هزینه ساخت کمتری نیز دارند. در میان رزوناتورهای MEMS، رزوناتورهای دیسکی دارای فرکانس ارتعاش و ضریب کیفیت بالایی هستند و از طرفی فیلترهای ساخته شده در این حوزه بسیار اندک‌اند به همین دلیل این نوع رزوناتورها برای تحقیق در این پایان نامه انتخاب شده‌اند. همچنین در میان پارامترهایی که بر فرکانس رزوناتورهای MEMS تأثیرگذارند، نوع مواد مورد استفاده نقش اساسی دارد، بنابراین در این پایان نامه روی این موضوع تمرکز شده است.

در فصل دوم به تقسیم بندی رزوناتورهای MEMS بر اساس نوع ارتعاش و انواع مختلف تحریک پرداخته ایم و در ادامه همان فصل، رزوناتورهای دوسرگردار و دیسکی را به صورت کامل تحلیل کرده و مدار معادل

¹quartz crystals

²Quality factor

³piezoelectric resonators

⁴Micro Electro Mechanical Systems

⁵ RF-MEMS filters

مکانیکی و الکتریکی هریک را بدست آورده ایم.

در فصل سوم اشاره‌ای به کارهای انجام شده در این زمینه، که تا کنون انجام شده‌اند داشته ایم و این کارها را باهم مقایسه کرده ایم.

در فصل چهارم به تحلیل و طراحی یک رزوناتور جدید با فرکانس و ضریب کیفیت بالا خواهیم پرداخت و سپس آن را در سه نرم افزار ADS،MATLAB و ANSYS شبیه سازی خواهیم کرد.
در بخش انتهایی نیز به نتیجه گیری و پیشنهاد کارهای آینده خواهیم پرداخت.

۲-۱ سیستم‌های میکروالکترومکانیکی MEMS

واژه سیستم‌های میکروالکترومکانیکی معرف یک تکنولوژی است که برای ساخت سیستمها و ادوات یکپارچه (مجتمع) با ترکیب ویژگیهای الکتریکی و مکانیکی به کار می‌رود [۱]. این سیستمها عموماً در ابعاد میکرومتر ساخته میشوند.

در حالی که قطعات الکترونیکی با استفاده از روال ساخت مدار مجتمع IC ساخته می‌شوند (همانند CMOS^۱, Bipolar, و یا BICMOS^۲), عناصر میکروماشین‌ها از طریق فرآیند های ماشین کاری میکرونی^۳ تولید می‌شوند، به این ترتیب که بر حسب مورد، قسمت‌هایی از ویفر^۴ برداشته شده یا لایه‌های جدیدی به آن اضافه می‌شود. این تکنولوژی به عنوان یکی از آینده دارترین تکنولوژی‌ها در قرن ۲۱ شناخته شده است که قادر است با یکپارچه سازی میکروالکترونیک و تکنولوژی میکروماشین کاری، تحولی شگرف در صنعت و محصولات مصرفی ایجاد کند. اگر پروسه ساخت میکرو نیمه هادیها را به عنوان اولین انقلاب در تولیدات میکرو در نظر بگیریم، بدون شک MEMS دومین انقلاب در این زمینه است.

علوم مهندسی مختلفی بصورت مستقیم یا غیر مستقیم با این تکنولوژی مرتبط هستند که از آنجمله میتوان به مهندسی مکانیک، علم مواد، مهندسی برق، شیمی و مهندسی شیمی اشاره نمود.

اگرچه ادوات MEMS در اندازه های بسیار کوچک ساخته می‌شوند اما اهمیت فناوری MEMS فقط

به ابعاد آن محدود نمی‌شود بلکه ضریب کیفیت بالا، هزینه کم، بازدهی بالا، مصرف کم انرژی، قابلیت اطمینان بالا، امکان مجتمع سازی با سایر اجزای الکترونیکی و مکانیکی و در دسترس بودن آزمایشگاه های این فناوری بخصوص در کشور ما از اهمیت بالایی برخوردار است.

در حال حاضر تکنولوژی MEMS در صنایعی چون مخابرات، صنعت خودرو، پزشکی و بیوتکنولوژی، محیط زیست، سیستمهای دفاعی، دارویی و... دارای کاربردهای متنوع می‌باشد. بخصوص می‌توان به مواردی نظیر سروسوزنهای استفاده شده در حافظه های کامپیوتری، اسپری جوهر در پرینتر های جوهر افشان، سنسورهای فشار خون، کلیدهای نوری، بیوسنسورها، شتاب سنج ها، فشارسنجها و... اشاره نمود که برای نمونه از یک شتابسنج دقیق ممزی می‌توان برای فعال کردن کیسه هوا در تصادفات رانندگی یا در ترمزهای ABS خودرو استفاده کرد. امروزه در یک خودروی معمولی بطور متوسط از ۵۰ سنسور و در یک خودروی اتوماتیک صدها سنسور استفاده می‌شود که حدود یک سوم از آنها با فناوری MST^۵ ساخته می‌شوند [۲]. تجربیات بدست آمده از کاربردهای اخیر MEMS، این تکنولوژی را قادر ساخته که در زمینه های جدیدی چون Bio MEMS^۶، مخابره بدون سیم اطلاعات شامل مخابرات نوری^۷ MOEMS و مخابرات

^۱Complementary metal-oxide-semiconductor

^۲Bipolar Complementary Metal Oxide Semiconductor

^۳Micromachining

^۴Wafer

^۵Micro System Technology

^۶Biomedical (or biological) Microelectromechanical systems

^۷Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems

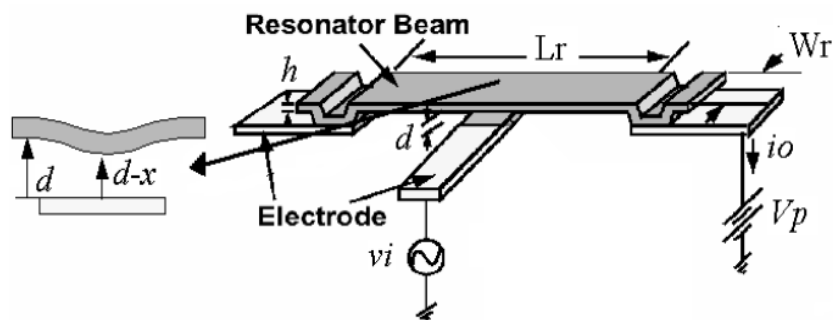
فرکانس رادیویی RF MEMS هم وارد شود.

اولین مقالات مرتبط با کاربرد MEMS در فرکانس های رادیویی^۱ در حدود یک ربع قرن پیش منتشر شد. برای نمونه می توان به مقاله ای اشاره نمود که در ژورنال شرکت IBM و در ارتباط با سوئیچ های الکترواستاتیکی MEMS با بیم خازنی به چاپ رسید [۳].

یکی از عرصه های سریع پیشرفت تکنولوژی MEMS، حوزه RF MEMS می باشد که برای کاربرد در الکترونیک و به ویژه موبایل، وسایل انتقال اطلاعات بیسیم مثل رادار، سیستم های ماهواره ای موقعیت-یابی جهانی^۲ GPS و سایر وسایل ارتباطی مفید می باشد [۴ و ۵ و ۶]. عناصر MEMS که با میکرو ماشین کاری سطحی تولید شده اند، در میکرو سوئیچ های مجتمع استفاده می شوند. این قطعات که با فرکانس های بالا کار می کنند، با داشتن ولتاژ تحریک کم، امکان مجتمع سازی با مدارهای مجتمع را دارند.

۱-۳ رزوناتورهای MEMS

رزوناتورها بخش مهمی از مدارات الکترونیکی می باشند. ساده ترین و ابتدایی ترین نوع رزوناتور، تانک LC می باشد که معایب بسیاری دارد که به همین دلیل امکان استفاده در مدارات دقیق الکترونیکی برای آن وجود ندارد، از جمله: حساسیت به دما، تلفات بسیار زیاد توان، عدم قابلیت مجتمع سازی، دقت پایین در ساخت و ... امروزه رزوناتورهای کریستال کوارتز، ترانزیستوری و میکروالکترومکانیکال در صنعت میکروالکترونیک استفاده میشود. رزوناتور کریستال کوارتز قابلیت مجتمع شدن با دیگر مدارات الکترونیکی را ندارد. رزوناتور ترانزیستوری تلفات توان زیاد، حساسیت زیاد به دما و هزینه طراحی و ساخت زیادی دارد. رزوناتور ممزی خازنی (الکترواستاتیک) با تکنولوژی ساخت IC سازگار بوده و میتواند همراه با دیگر مدارات الکترونیکی مجتمع شود. از مزایای دیگر رزوناتور ممزی خازنی مصرف توان بسیار کم، تغییرات ناچیز خروجی در شرایط محیطی و دمایی مختلف و عدم حساسیت به نویز الکتریکی میباشد. یک رزوناتور MEMS دوسرگردار^۳ را در شکل ۱-۱ می بینیم.



¹Radio Frequency (RF)

²Global Positioning System

³Clamp-Clamp resonator (C-C)

شکل ۱-۱: یک رزوناتور MEMS

روش کار در رزوناتور های MEMS به این صورت می باشد که یکی از دو صفحه ی خازن ثابت بوده و صفحه ی دیگر در فرکانس خاص شروع به لرزش می کند که این لرزش به دلیل جابجایی فاصله ی صفحات خازن، باعث تغییر در ظرفیت خازن خواهد شد و در نتیجه این فرکانس، فرکانس تشدید خواهد بود و با تغییر مقدار خازن، اندازه ی جریان نیز تغییر می کند. پارامترهای مهم رزوناتور، فرکانس تشدید، ضریب کیفیت، تلفات عبوری^۱ و ... می باشند. فرکانس کار بستگی به موارد استفاده دارد ولی بدیهی است هر چه ضریب کیفیت بیشتر باشد مناسب تر است.

خروجی رزوناتور به، روش تحریک، ساختار، ابعاد، مواد به کار رفته و تکنولوژی ساخت بستگی دارد. بنابراین با تغییر دادن این پارامترها می توان فرکانس تشدید و ضریب کیفیت مناسب را به دست آورد. در یک روش تحریک، مواد به کار رفته و تکنولوژی ساخت خاص می توان با تغییر ابعاد و ساختار، خروجی را تغییر داد.

۴-۱ فیلترهای MEMS

امروزه مهندسی و دانشمندان در صدد ساختن دستگاهها و مدارهایی هستند که دارای ابعادی در حد میکرو یا نانو باشند، که نه تنها از نظر کارایی چیزی کمتر از مدارها و دستگاهها در ابعاد معمولی ندارند بلکه کارایی بهتری نیز خواهند داشت. در حالت کلی مواردی را که در بهینه سازی مدار باید به آن توجه کرد عبارتند از: اندازه یا حجم مدار، توان مصرفی مدار، ولتاژ تغذیه، نویز مدار و تلاشهای مهندسی و دانشمندان در راستای بهینه نمودن تمامی مشخصات فوق صورت می گیرد. از جمله ادواتی که در تکنولوژی MEMS ساخته شده است، فیلتر MEMS می باشد.

تابع انتقال یک فیلتر در شکل ۱-۲ نمایش داده شده است. همانطور که از این شکل بر می آید

پارامترهای مهم فیلتر عبارتند از:

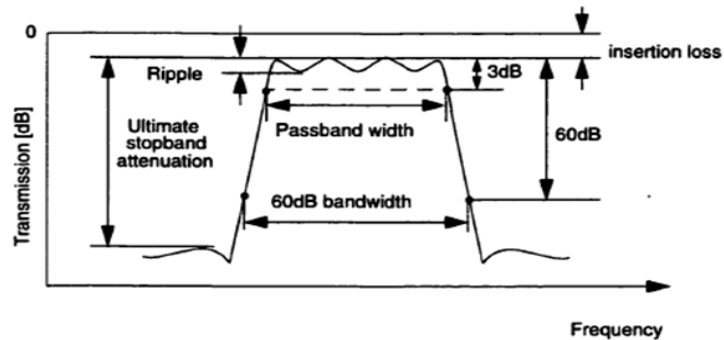
• فرکانس مرکزی: فرکانسی که در حوالی آن دامنه تابع انتقال بیش از نقاط دیگر است و در این محدوده ورودی را صفر یا بیش از حد تضعیف نمی کند.

• پهنای باند عبور: گستره ای از فرکانس که در آن دامنه از مقدار حداکثر به اندازه ۳ دی بی

(۳dB) کمتر است. در این فرکانس ها ورودی به خروجی انتقال می یابد.

• Insertion Loss: مقدار اختلاف حداکثر دامنه تابع تبدیل فیلتر از مقدار صفر دی بی (۰ dB).

¹ Insertion loss(IL)



شکل ۱-۲: تابع انتقال یک فیلتر

یک فیلتر MEMS از تلفیق دو یا چند رزوناتور MEMS تشکیل می‌شود بنابراین همانطوری که یک رزوناتور MEMS دارای ضریب کیفیت بالایی است، یک فیلتر MEMS نیز ضریب کیفیت بالایی دارد در نتیجه نویز فاز بسیار پایینی خواهد داشت و بازدهی بالایی از خود نشان خواهد داد. این در حالی است که هر رزوناتور MEMS خود به تنهایی یک فیلتر محسوب می‌شود و برای کاربردهایی که نیاز به پهنای باند زیادی ندارند می‌توان با اضافه کردن مدارهای تطبیق از این رزوناتورها بعنوان فیلتر استفاده کرد. در فصل‌های آینده به صورت مفصل‌تر در باره این موضوع بحث خواهد شد.

فصل دوم

بررسی رزوناتورها و فیلترهای MEMS

۲ فصل دوم: بررسی رزوناتورها و فیلترهای MEMS

۱-۲ مقدمه

همانطوری که در فصل قبل نیز گفته شد رزوناتورها از اساسی ترین بخش فیلترها می باشند، بر این اساس در این فصل به بررسی دقیق رزوناتورها و فیلترهای MEMS می پردازیم.

ابتدا در بخش دوم از این فصل انواع مختلف رزوناتورها را براساس نوع تحریک و همچنین نحوه ارتعاش بررسی می کنیم. که براساس نوع تحریک به چهار بخش، تحریک با استفاده از پیزوالکتریک، با روش الکترواستاتیک، با روش الکتروترمال و تحریک با استفاده از روش مغناطیسی تقسیم می شوند. این چهار روش تحریک در یک جدول با هم مقایسه شده و مزایا و معایب هر کدام به صورت مختصر گفته شده، سپس در ادامه هر یک را تعریف کرده و مثالی از هر کدام ارائه می کنیم.

براساس نوع ارتعاش نیز در سه دسته، حالت موجی، حالت پیچشی و حالت توده ای قرار می گیرند که هر کدام را جداگانه تعریف کرده و رزوناتورهای MEMS را که در آن دسته مورد نظر قرار می گیرند، معرفی می کنیم.

از آنجاییکه همه رزوناتورهای MEMS عملکردی خازنی و یکسان دارند، در ادامه به تحلیل دقیق رزوناتورهای دوسرگردار پرداخته، ابتدا تعریفی از آنها ارائه داده و پس از آن مدار معادل مکانیکی و سپس مدار معادل الکتریکی آنها را بدست می آوریم. پس از این بخش، در بخش پایانی این فصل به تحلیل و بررسی رزوناتورهای دیسکی تک پایه، که موضوع اصلی پایان نامه می باشد، می پردازیم و همانند بخش قبلی با ارائه تعریفی از آنها، مدار معادل مکانیکی و الکتریکی آنها را بدست آورده تا در ادامه از آنها استفاده کنیم.

۲-۲ تقسیم بندی رزوناتورهای MEMS

۱-۲-۲ براساس تحریک

یکی از مولفه های اصلی در سیستم های در ابعاد میکرو نحوه تحریک می باشد که معمولا پس از طراحی بخش RF مشخص می شود. انتخاب مکانیزم تحریک به فاکتورهای زیادی بستگی دارد و در نهایت مشخصات سیستم را تعیین می نماید. در این بخش چهار مکانیزم عمده تحریک سیستم های میکرو، شامل تحریک گرمایی، مغناطیسی، الکترواستاتیکی و پیزوالکتریک شرح داده می شود.

نقطه شروع در مقایسه مکانیزم های اصلی تحریک سیستم های میکرو، در نحوه مقیاس گذاری می باشد. با کاهش یکسان ابعاد یک سیستم، تغییرات شیمیایی و فیزیکی، تغییرات متفاوتی را ایجاد می کنند. بعنوان مثالی ساده، تغییر سطح مساحت به نسبت حجم به منظور کوچک تر نمودن یک شی مرسوم می باشد. خوشبختانه، ماتریس هایی برای مقیاس بندی نیرو بر مبنای ابعاد موجود می باشد. بنابراین باید در انتخاب فرض اولیه درست، دقت شود و رفتار های غیر خطی با تغییر در ابعاد به خوبی محاسبه و لحاظ شود. تحریک سیگنال در رزوناتور بر اساس چندین مکانیزم مختلف روی می دهد. این مکانیزمها به همراه مزایا و معایب هر کدام در جدول ۱-۲ آورده شده است.

جدول ۱-۲: مقایسه رزوناتورهای ممزی با انواع تحریک

معایب	مزایا	بازیابی	تحریک
نیاز به تجهیزات تطبیق IC	محدوده دینامیکی زیاد	پیزو الکتریک	پیزو الکتریک
پیچیدگی با ماشینکاری حجمی	ساخت ساده با تکنولوژی لایه نازک، تطبیق با ساخت IC	خازنی	الکترواستاتیک
توان تولید گرما، پهنای باند	ساخت ساده و آسان	پیزورزیستو	الکتروترمال
مواد مغناطیسی، میدان مغناطیسی در سیستم	سادگی و راههای مختلف تحریک	مغناطیسی	مغناطیسی

۱-۱-۲-۲ پیزوالکتریک

رزوناتورهای پیزوالکتریک می توانند به عنوان سنسور یا عملگر^۱ به کار برده شوند. در این مدل یک پتانسیل

^۱ actuator

الکتریکی، کشش مکانیکی ایجاد میکند که باعث خمش رزوناتور می‌شود. به طور مشابه فشار مکانیکی روی ماده پیزوالکتریک تولید شارژ الکتریکی می‌کند. مواد بسیاری ساخته شدند که خاصیت پیزوالکتریکی دارند. مواد پیزو که بیشتر برای ساخت ساختارهای میکرو استفاده می‌شوند تیتانیوم-زیرکونیوم-سرب^۱، اکسید روی (ZnO)، و نیتراید آلومینیوم (AlN) می‌باشند. اغلب رزوناتورهای آکوستیکی از این نوع می‌باشند. از معایب این مدل اینست که قابلیت یکپارچه (مجموع) شدن با دیگر مدارات الکترونیکی را دارا نمی‌باشد.

۲-۱-۲-۲ مغناطیسی

تحریک مغناطیسی وسایل ممزی با مکانیزم های مختلفی انجام می‌پذیرد. اصلی ترین آن القای الکترومغناطیسی [10]، نیروی لورنتس [11] و جذب فرومغناطیسی می‌باشد. ترانسدیوسر مغناطیسی در برابر میدان مغناطیسی متغیر با زمان با فرکانسی برابر فرکانس تشدید مدار، مرتعش می‌شود. رابطه بین نیرو و میدان الکتریکی و مغناطیسی به صورت رابطه ۱-۲ بیان میشود.

$$F = q(E + v \times B) \quad 1-2$$

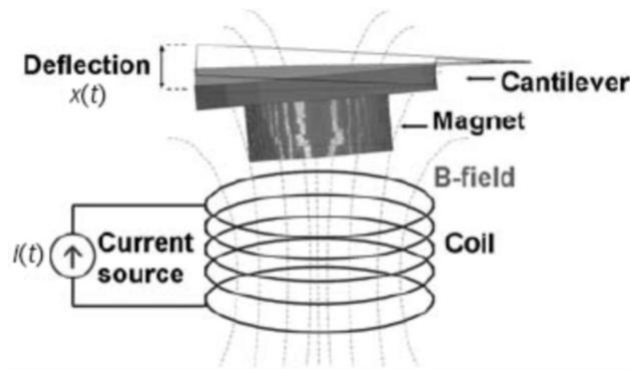
F نیرو، E میدان الکتریکی، B میدان مغناطیسی، q بار الکتریکی، v سرعت ذره و \times ضرب خارجی می‌باشد. نیروی مغناطیسی در رابطه بالا به صورت رابطه ۲-۲ می‌باشد.

$$F = q(v \times B) \quad 2-2$$

وقتی سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد به آن نیرو وارد میشود. این موضوع پایه طراحی وسایل مغناطیسی ممزی می‌باشد. در این مدل ساختار ممزی با یک فلز پوشانده میشود، و از فلز جریان عبور داده می‌شود. وقتی این ساختار در برابر یک میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد در فرکانس تشدید خود مرتعش میشود. با این روش میتوان وجود میدان مغناطیسی را مشخص نمود. در روش دیگر ترانسدیوسر ممزی با یک ماده فرومغناطیس ساخته میشود. این مدل به نام مدل فرومغناطیسی میباشد که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. در این مدل فرکانس تشدید به وسیله میدان مغناطیسی خارجی تغییر می‌کند. از این روش می‌توان برای مشخص نمودن اندازه و جهت میدان مغناطیسی استفاده کرد. نیروی خارجی در این مدل نیروی جذب فرومغناطیس F_M می‌باشد.

$$F_M = \vec{m} \cdot \nabla B \quad 3-2$$

¹ lead-zirconium - titanate (PZT)



شکل ۲-۱: رزوناتور ممزی با تحریک مغناطیسی

که m مومنت مغناطیسی و B میدان مغناطیسی متغیر با زمان می‌باشد. اگر میدان اطراف رزوناتور پایدار باشد رابطه بالا به صورت رابطه ۲-۴ نوشته میشود.

$$F_M = m \cdot \frac{\partial B(x, t)}{\partial x} \quad ۴-۲$$

مانند یک مدل الکترواستاتیکی نیروی ذخیره شد F_X در این مدل را میتوان از طریق قانون هوک به دست آورد.

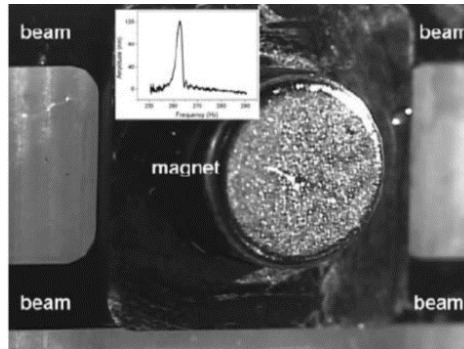
$$F_X = -k \cdot x \quad ۵-۲$$

نیروی مغناطیسی F_M مخالف نیروی فنر است تا سیستم بالانس شود.

$$F_X = -F_M \quad ۶-۲$$

ثابت فنر K در یک رزوناتور به ابعاد، ساختار و جنس ماده بستگی دارد و با تغییر هر کدام میتوان فرکانس تشدید را تغییر داد. شکل ۲-۲ یک ساختار میکرو الکترومکانیکی با یک ستون متحرک چهارگوش^۱ رانشان میدهد. این ساختار در یک میدان مغناطیسی تولید شده با یک جریان متناوب در فرکانس ۲۷۰ هرتز نوسان میکند.

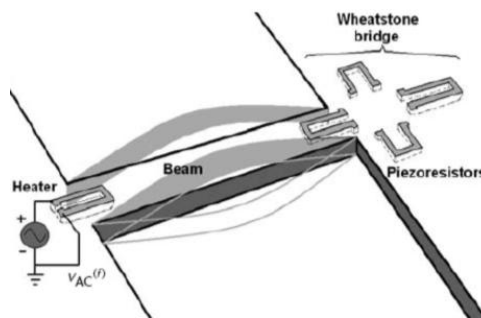
^۱ - quad-beam



شکل ۲-۲: تصویر رزوناتور ساخته شده با استفاده از تکنولوژی با تحریک مغناطیسی

۳-۱-۲-۲ الکتروترمال

در تحریک الکتروترمال یک مقاومت گرمایشی^۱ به وسیله عبور جریان گرم می‌شود. سیگنال گرما مطابق سیگنال جریان عبوری از مقاومت می‌باشد که به بیم متحرک انتقال میابد و اگر فرکانس سیگنال برابر با فرکانس تشدید بیم باشد، بیم در فرکانس تشدید مرتعش می‌شود. این ارتعاش مکانیکی توسط پل وتسون به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌شود. این مراحل در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲: طرح کلی از رزوناتور ممزی با تحریک گرمایی

توان مصرف شده در مقاومت به صورت زیر می‌باشد.

$$P = \frac{V^2}{R}$$

۷-۲

ولتاژ از مجموع دو ولتاژ ثابت و متناوب تشکیل شده است. بنابراین راوبط زیر را خواهیم داشت.

^۱heating resistor

$$V^2 = (V_{DC} + v_{AC} \sin 2\pi ft)^2 = (V_{DC}^2 + \frac{v_{AC}^2}{2}) \quad 8-2$$

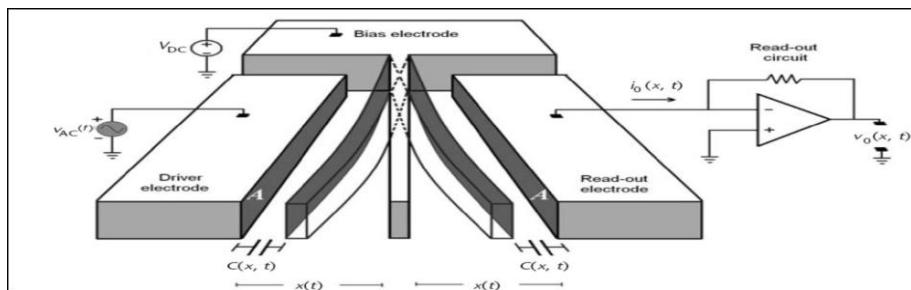
$$+ 2V_{DC} \cdot v_{AC} \cdot \sin 2\pi ft - v_{AC}^2 \cos 4\pi ft$$

اگر فرکانس در این رابطه با یکی از فرکانسهای تشدید بیم برابر باشد، بیم مرتعش می‌شود. برای تبدیل ارتعاش مکانیکی به سیگنال الکتریکی می‌توان از پیزورزیستو استفاده کرد. برای این ماده رابطه زیر موجود است

$$\Delta R \propto \frac{1}{2} \Pi \sigma \quad 9-2$$

که ΔR تغییر مقاومت، Π ثابت پیزورزیستو و σ فشار به وجود آمده به وسیله گرما می‌باشد. در MEMS سیلیکونی^۱ مقاومت گرمایی و پیزورزیستور با روشهای کاشت یون روی بستر که در تکنولوژی ساخت IC استفاده می‌شود، ساخته می‌شود. برای کاشت یون می‌توان از مواد فسفر، برم و مواد مناسب طبق امکانات استفاده کرد. برای تنظیم سیگنال ولتاژ خروجی معمولاً از پل و تسون استفاده می‌شود.

$$v_{OUT}(t) = \frac{\Delta R(t)}{R_p} V_{BIAS} \quad 10-2$$



شکل ۴-۲: ساختار و عملکرد رزوناتور خازنی با تحریک الکترواستاتیک

۴-۱-۲-۲ الکترواستاتیک

در شکل ۴-۲ روش کار رزوناتور خازنی (تحریک الکترواستاتیکی) نشان داده شده است. این ساختار دو الکتروود دارد که یکی به عنوان محرک^۲ و دیگری به عنوان خروجی استفاده شده است. تیر متحرک^۳ با یک

^۱ siliconMEMS

^۲ driver

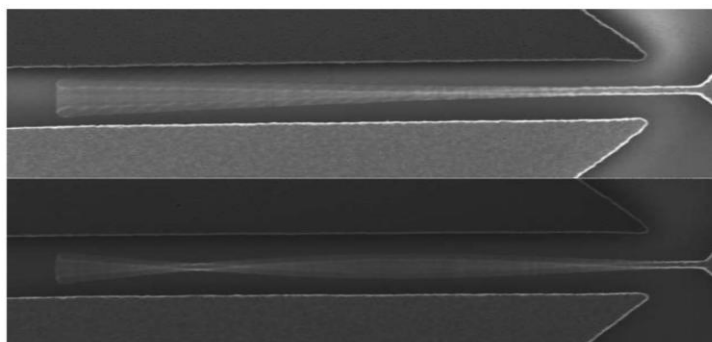
^۳ cantilever beam

ولتاژ DC بایاس شده است که با الکترودها تشکیل خازن می‌دهد. وقتی یک ولتاژ AC به الکتروود تحریک وارد می‌شود ستون متحرک جابه‌جا شده و یک شارژ الکتریکی ایجاد می‌شود که به صورت جریان از الکتروود دیگر خارج خواهد شد. این مدل یک مدل دو قطبی است برای اینکه از دو الکتروود استفاده شده است، در مدل ساده‌تر از یک الکتروود استفاده می‌شود و از ستون تحریک برای الکتروود دوم استفاده می‌شود. خازن متغیر که به وسیله الکترودها و ستون تحریک ایجاد می‌شود به صورت رابطه ۱۱-۲ مدل خواهد شد.

$$C(x, t) = \frac{\epsilon A}{(d_0 - x(t))} \quad 11-2$$

که A مساحت صفحات موازی بین ستون متحرک و الکتروود، d فاصله بین ستون متحرک و الکتروود و x(t) تغییر فاصله بین ستون متحرک و الکتروود به خاطر تحریک می‌باشد. ولتاژ تحریک یک نیروی الکترواستاتیکی F_E به وجود می‌آورد که باعث تحریک ستون متحرک و کار الکتریکی W_E می‌شود.

$$F_E(x) = \frac{\partial W_E}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} C V^2 \right) = \frac{1}{2} \frac{\epsilon A V^2}{(d_0 - x)^2} \quad 12-2$$



شکل ۲-۵: لرزش مود اول و دوم رزوناتور میکروتیر یک سرگردار

V مجموع دو ولتاژ بایاس و تحریک $(V_{DC} + v_{AC})$ می‌باشد. و C مجموع دو خازن استاتیکی و دینامیکی $(C_0 + C(x))$ می‌باشد. رابطه بین F_E ، v_{AC} ، V_{DC} و $C(x)$ به صورت رابطه ۱۳-۲ است

$$F_E(x) = V_{DC} \frac{\partial C(x)}{\partial x} v_{AC} \quad 13-2$$

با توجه به رابطه بار الکتریکی، ولتاژ و ظرفیت در خازن رابطه جریان خروجی به صورت رابطه ۱۴-۲ می‌باشد.

$$i_o(t) = \frac{\partial}{\partial t} (C(x, t) V) \quad 14-2$$

جریان $i_o(t)$ از رابطه ۱۵-۲ محاسبه می‌شود

$$i_o(t) = (C_0 + C(x)) \frac{\partial v_{AC}}{\partial t} + (V_{DC} + v_{AC}) \frac{\partial C(t)}{\partial t} \quad 15-2$$

رابطه ۱۶-۲ اصلاح می شود
 در برابر C_0 و V_{DC} خیلی کوچک هستند، بنابراین رابطه ۱۵-۲ به صورت

$$i_o(t) = C_0 \frac{\partial v_{AC}}{\partial t} + V_{DC} \frac{\partial C(t)}{\partial t} \quad 16-2$$

قسمت دوم در سمت راست رابطه ۱۶-۲ بر دیگری غالب است زیرا مقدار V_{DC} بسیار بزرگتر از اندازه v_{AC} می باشد (در حد میلی ولت می باشد). بنابراین در صورت نیاز می توان باز هم معادله را ساده تر کرد شکل ۵-۲ تصویری از ستون متحرک بین دو الکتروود در حالت ارتعاش در فرکانس تشدید پایه (تصویر بالا) و فرکانس تشدید مد دوم (تصویر پایین) نشان می دهد. روابط گذشته نشان می دهد با کاهش فاصله بین الکتروودها و ستون متحرک، افزایش مساحت مقابل هم و افزایش ولتاژ بایاس، جریان خروجی افزایش میابد.

۲-۲-۲ براساس نوع ارتعاش

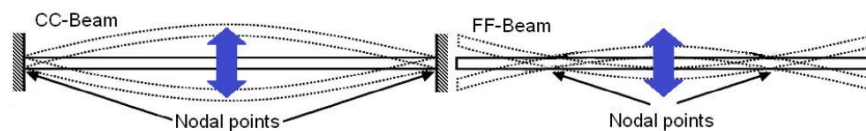
یکی از پارامترهای مهم تعیین کننده نوع ارتعاش، ضریب کیفیت و فرکانس نوسان رزوناتورهای میکروالکترومکانیکی شکل هندسی آنها می باشد. این رزوناتورها در شکلهای مختلفی همچون، بییم، صفحه مربعی، دیسکی، حلقه‌ای، شانهای و... ساخته می‌شوند. در نتیجه می‌توان آنها را براساس حالت های عملکردشان به سه گروه زیر تقسیم کرد:

۱-۲-۲-۲ حالت موجی ۱

این حالت نمایشگر امواج ایستای عرضی می باشد. در این ادوات جابجایی ساختار بر استرس خمشی عمود است. در شکل ۲-۶ و شکل ۲-۷ این نوع ارتعاش نشان داده شده است.



شکل ۲-۶: ارتعاش موجی رزوناتور میکرومکانیکی [۷]



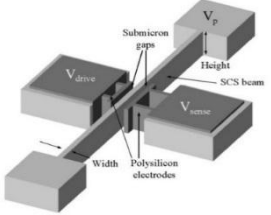
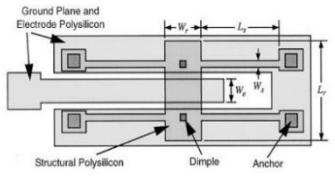
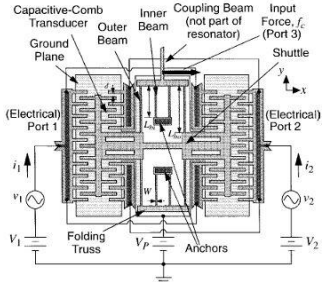
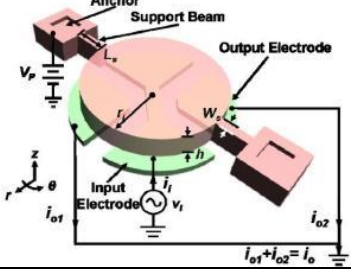
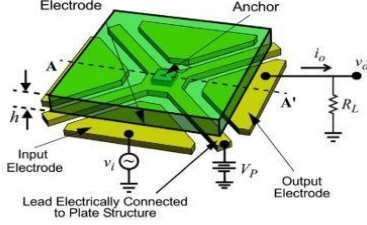
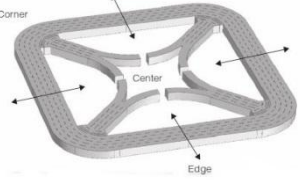
شکل ۲-۷: حالت ارتعاش موجی رزوناتورهای دوسرگیردار و دوسرآزاد [۸]

در ادامه نمونه هایی از این نوع رزوناتورها که در مقالات مختلف به آنها اشاره شده است را معرفی می‌کنیم.

جدول ۲-۲: رزوناتورهایی که دارای ارتعاش موجی می باشند

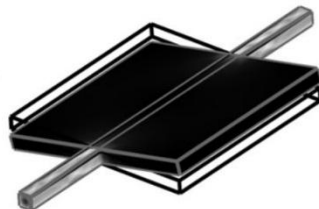
نوع و مرجع	جنس مواد	ابعاد	فرکانس و ضریب کیفیت	شکل هندسی
دوسرگیردار C-C [۹]	Polysi	$L_r=40\mu\text{m}$ $W_r=8\mu\text{m}$	9.34 MHz و 3100	

¹ Flexural mode

دوسرگیردار C-C [۱۰]	Single crystal silicon	Beam length=200um Width=10um	3.2 MHz و 4500	
دوسر آزاد F-F [۱۱]	Polysi	$L_r=13.1 \text{ um}$ $W_r=6 \text{ um}$ $L_s=10.1 \text{ um}$ $W_s=1 \text{ um}$	92 MHz و 7450	
شانه‌ای Comb drive [۱۲]	Single crystal silicon	No. of comb fingers = 500 finger length = 10um finger overlap = 4 um	32 KHz و 50000	
دیسک دوسرگیردار [۱۳]	Nickel	Disk radius = 15 um	11.6 MHz و 1651	
صفحه مربعی [۱۴]	Polysi	Side length = 16 um	68 MHz و 15000	
رزوناتور مربعی [۱۵]	Single crystal silicon	size: 0.8mm × 0.6 mm 0.15 mm thick	5.1 MHz و 80000	

۲-۲-۲-۲ حالت پیچشی ۱

در این حالت استرس برشی، استرس غالب است و جابجایی به صورت پیچش می‌باشد.



شکل ۲-۸: ارتعاش پیچشی یک رزوناتور میکرومکانیکی [۷]

برای این حالت می‌توان به رزوناتور بیم مثلثی اشاره کرد.

جدول ۲-۳: رزوناتورهایی که دارای ارتعاش پیچشی می‌باشند

بیم مثلثی [۱۶]	Single crystal silicon	Beam length = 100um $W_r = 4.25 \text{ um}$ High(tr) = 3 um	20 MHz و 220000	
-------------------	------------------------------	---	--------------------------	--

۳-۲-۲-۲ حالت توده‌ای^۲ (انبساط و انقباض حجمی)

در این حالت ارتعاش را می‌توان به صورت امواج طولی ایستاده توصیف کرد. توصیف این نوع ارتعاش

در شکل ۲-۹ نشان داده شده است.



شکل ۲-۹: ارتعاش حجمی رزوناتور میکرومکانیکی [۷]

این نوع ارتعاش نیز بسته به اینکه پایه ساختار در کجا قرار گرفته باشد خود دارای حالت‌های مختلفی

¹Torsional mode

²Bulk mode

است که در شکل ۱۰-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۰-۲: شکل‌های مختلف ارتعاش رزوناتور در حالت حجمی [۷]

نمونه‌هایی از این نوع رزوناتورها که در مقالات مختلف دیده شده اند را در جدول ۴-۲ می بینیم.

جدول ۴-۲: رزوناتورهایی که دارای ارتعاش حجمی می باشند

صفحه‌ای میدانی گسترده [۱۷]	Single crystal silicon	Side length = 2 mm	2.18 MHz و 1160000	
رزوناتور دیسکی با پایه وسط [۱۸]	Polysi	Disk radius = 16.7um	156 MHz و 9290	
رزوناتور دیسکی با چهار پایه کناری [۱۹]	Polysi	Disk radius = 32um	60 MHz و 48000	
صفحه‌ای میدانی لنگ [۲۰]	Poly silicon carbide	Side length ≈ 35um	173 MHz و 9300	

به طور کلی، حالت ارتعاش حجمی رزوناتورهای میکروالکترومکانیکی به دلیل داشتن سختی

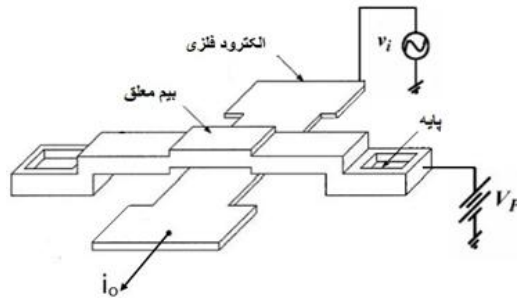
ساختاری بیشتر نسبت به دیگر حالت‌های ارتعاش، برای تولید فرکانس بالا مناسب تر هستند. علاوه بر این، حالت‌های ارتعاش حجمی نسبت به حالت‌های موجی، در فرکانس‌های برابر، ضریب کیفیت بالاتری از خود نشان می‌دهند. این مسأله ناشی از این حقیقت است که حالت‌های موجی در مقایسه با حالت‌های حجمی دارای نسبت سطح به حجم بزرگتری هستند، که این امر موجب افزایش تلفات از طریق اثرات سطحی برای حالت‌های موجی خواهد شد [۲۱ و ۲۲].

۳-۲ تحلیل رزوناتورهای دوسرگیردار

۱-۳-۲ تعریف و نحوه عملکرد رزوناتورهای دوسرگیردار

همان طور که در شکل ۱۱-۲ نشان داده شده است، این رزوناتور شامل یک بیم معلق می باشد که در دو انتهای خود بر روی دو پایه قرار گرفته است. یک الکتروود فلزی در زیر این بیم معلق قرار دارد که با آن تشکیل خازن می دهد.

برای راه اندازی این رزوناتور ابتدا یک ولتاژ DC به عنوان بایاس به یکی از پایه ها داده تا کمی بیم را به سمت پایین خم کرده و از سختی آن بکاهد، سپس به الکتروود زیر آن یک سیگنال ac بعنوان ورودی اعمال می کنیم که اگر فرکانس این سیگنال در محدوده فرکانس تشدید طبیعی بیم معلق باشد، آنگاه با ایجاد یک نیروی الکترواستاتیک (رابطه ۲-۱۸) متغیر باعث لرزش بیم معلق با فرکانس طبیعی خود می شود، این لرزش سبب تغییر فاصله هوایی بین بیم و الکتروود شده و یک خازن متغیر با زمان را بوجود می آورد در نتیجه یک جریان در خروجی (رابطه ۲-۱۹) با فرکانسی برابر با فرکانس سیگنال ورودی بوجود خواهد آمد که می توان با عبور دادن آن از یک مقاومت آن را به ولتاژ تبدیل کرد.



شکل ۱۱-۲: شماتیک یک رزوناتور دوسرگیردار

$$E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} C(V_p^2 + 2v_i V_p + v_i^2) \quad ۱۷-۲$$

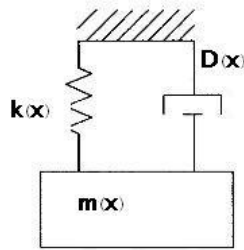
$$F = \frac{\partial E}{\partial x} = \frac{1}{2} V^2 \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{2} C(V_p^2 + 2v_i V_p + v_i^2) \quad ۱۸-۲$$

$$i_o = C \frac{\partial v_i}{\partial t} + V_p \frac{\partial C}{\partial t} \quad ۱۹-۲$$

با توجه به اینکه هر رزوناتور یک فیلتر با پهنای باند اندک می باشد، در یک رزوناتور MEMS در واقع سیگنال الکتریکی ورودی ابتدا به حوزه مکانیکی رفته و به نیرو تبدیل می شود، در این حوزه فیلتر شده و سپس دوباره توسط خازن موجود، به حوزه الکتریکی برگردانده می شود و در خروجی به صورت یک سیگنال جریان یا ولتاژ فیلتر شده دریافت می شود.

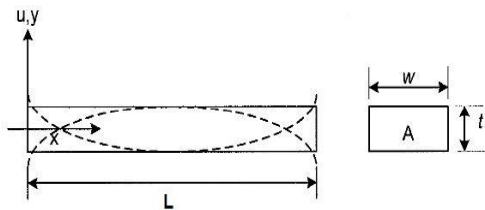
۲-۳-۲ مدار معادل مکانیکی

هر رزوناتور در حال نوسان را می توان با یک سیستم جرم و فنر معادل کرد، مانند شکل ۱۲-۲. همانطور که در یک رزوناتور در صورت عدم وجود مقاومت، انرژی الکتریکی و مغناطیسی پیوسته به هم تبدیل شده و این کار تا بینهایت ادامه خواهد داشت، در یک سیستم جرم و فنر نیز در صورت در نظر نگرفتن دمپینگ هوا، انرژی پتانسیل و جنبشی پیوسته به هم تبدیل می شوند و این سیکل برای همیشه تکرار خواهد شد. در یک رزوناتور MEMS نیز قسمت متحرک بیم معلق نقش جرم و بازوهای که این بیم را به پایه ها وصل می کنند نقش فنر را دارند، بنابراین یک سیستم جرم و فنر را می توان بعنوان مدار معادل مکانیکی آن در نظر گرفت.



شکل ۱۲-۲: مدار معادل مکانیکی رزوناتور دوسرگیردار

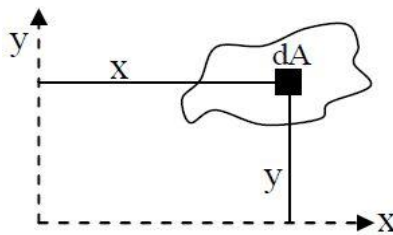
قدم اول برای تحلیل و سپس بدست آوردن مقادیر مدار معادل مکانیکی و الکتریکی، نوشتن معادلات دیفرانسیل جزئی یا همان معادلات موج در حوزه مکانیکی می باشد. با توجه به شکل ۱۳-۲ معادله موج مکانیکی برای یک بیم به صورت زیر می باشد



شکل ۱۳-۲: بیم معلق قابل نوسان

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \left(\frac{EI}{\rho A} \right) \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} \quad ۲۰-۲$$

در اینجا u جابجایی در جهت y ، E و ρ به ترتیب ضریب یانگ مدولوس و چگالی می باشند. I ممان اینرسی نسبت به محور X می باشد که در حالت کلی با توجه به شکل ۱۴-۲ به صورت زیر بدست می آید.



شکل ۱۴-۲: جسم نمونه در صفحه مختصات

$$I_x = \int_s y^2 ds = \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} dx \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} y^2 dy = w \left[\frac{y^3}{3} \right]_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} = \frac{wt^3}{12} \quad ۲۱-۲$$

در این رابطه w و t به ترتیب پهنا و ضخامت بیم می باشند.
برای از بین بردن وابستگی به زمان در رابطه ۲۰-۲ رابطه ۲۲-۲ را تعریف می کنیم.

$$u = u_1 e^{j\omega t} \quad ۲۲-۲$$

با قرار دادن رابطه ۲۲-۲ در رابطه ۲۰-۲ خواهیم داشت

$$\frac{\partial^4 u_1}{\partial x^4} = \left(\omega^2 \frac{\rho A}{EI} \right) u_1 \quad ۲۳-۲$$

معادله مشخصه این معادله دیفرانسیل دارای چهار ریشه می باشد

$$k = \sqrt[4]{\omega^2 \frac{\rho A}{EI}} \quad ۲۴-۲$$

$$s = \pm k, \pm ik \quad ۲۵-۲$$

بنابراین شکل کلی جواب به صورت رابطه ۲۶-۲ خواهد بود.

$$u_1(x) = A \cosh(kx) + B \sinh(kx) + C \cos(kx) + D \sin(kx) \quad ۲۶-۲$$

برای بدست آوردن ضرایب و حل نهایی معادله لازم است از شرایط مرزی استفاده کنیم. می دانیم برای یک بیم دوسرگیردار جابجایی $u_1(x)$ و سرعت $\frac{\partial u_1}{\partial x}$ در ابتدا و انتهای بیم صفر است.

$$u_1(0) = u_1(l) = 0 \quad ۲۷-۲$$

$$\left. \frac{\partial u_1}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial u_1}{\partial x} \right|_{x=l} = 0$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$(u_1)_{x=0} = A + C = 0 \Rightarrow A = -C \quad ۲۸-۲$$

$$\left(\frac{\partial u_1}{\partial x} \right)_{x=0} = k(B + D) = 0 \Rightarrow B = -D$$

در انتهای بیم $x = l$ نیز می توان معادلات را به صورت ماتریسی مرتب کرد:

$$\begin{bmatrix} \cosh(kl) - \cos(kl) & \sinh(kl) - \sin(kl) \\ \sinh(kl) + \sin(kl) & \cosh(kl) - \cos(kl) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = 0 \quad ۲۹-۲$$

این ماتریس در صورتی دارای جواب می باشد که دترمینان آن برابر صفر باشد که با این شرط به

رابطه ۲-۳۰ می‌رسیم.

$$\cos(kl) = \frac{1}{\cosh(kl)} \quad ۳۰-۲$$

این معادله باید به صورت عددی حل شود. سه ریشه اول آن در زیر نشان داده شده اند:

$$k_1 l = 4.730$$

$$k_2 l = 7.853 \quad ۳۱-۲$$

$$k_3 l = 10.996$$

از رابطه ۲-۲۴ می‌توان رابطه فرکانس رزونانس بیم را بدست آورد

$$f_n = \frac{(k_n l)^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad ۳۲-۲$$

در اینجا n نشان دهنده عدد مد لرزش می باشد.

با قرار دادن اولین ریشه از روابط ۲-۳۱ در این معادله به فرکانس اصلی تشدید خواهیم رسید.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad ۳۳-۲$$

از روابط ۲-۲۹ می‌توان به نسبت زیر رسید.

$$\frac{A}{B} = \frac{\sinh(kl) - \sin(kl)}{\cosh(kl) - \cos(kl)} \quad ۳۴-۲$$

بنابراین با توجه به روابط قبلی می‌توان نوشت

$$u_1(x) = B \left[\frac{A}{B} (\cosh(kx) - \cos(kx)) + \sinh(kx) - \sin(kx) \right] \quad ۳۵-۲$$

با دخیل کردن پارامتر زمان به این جواب به حل نهایی می‌رسیم.

$$u(x, t) = u_1(x) e^{j\omega t} = B \left[\frac{A}{B} (\cosh(kx) - \cos(kx)) + \sinh(kx) - \sin(kx) \right] e^{j\omega t} \quad ۳۶-۲$$

حال با استفاده از جابجایی $u(x, t)$ می‌توان جرم معادل رزوناتور در حال تشدید را بدست آورد. برای

این کار لازم است ابتدا سرعت آن را بدست آورده و سپس با استفاده از انرژی جنبشی بیم، جرم معادل آن را محاسبه کنیم.

$$V(x) = \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = j\omega u(x, t) \quad ۳۷-۲$$

$$E_{tot} = \frac{1}{2} m_{eq} V^2(x) = \frac{1}{2} \rho A \int_0^l V^2(x) dx \quad 38-2$$

$$m_{eq} = \frac{E_{tot}}{\frac{1}{2} V^2(x)} = \frac{\rho A \int_0^l V^2(x) dx}{V^2(l/2)} \quad 39-2$$

اگر $k(x)$ و $m(x)$ را به ترتیب سختی موثر و جرم موثر ساختار در نظر بگیریم آنگاه می توان از رابطه ۲-۳۳ برای رسیدن به سختی موثر ساختار استفاده کرد.

$$k(x) = (2\pi f)^2 m(x) \quad 40-2$$

دمپینگ موثر را نیز می توان به صورت زیر نوشت.

$$D(x) = \frac{\sqrt{k(x)m(x)}}{Q_{res}} \quad 41-2$$

Q_{res} در اینجا ضریب کیفیت رزوناتور می باشد.

۳-۳-۲ مدار معادل الکتریکی

یک رزوناتور ممزی دوسرگيردار از دو بخش اصلی تشکیل شده است: الف-بیم معلق ب-خازن بین

بیم معلق و الکتروود ثابت که نقش یک مبدل را دارد. بنابراین برای داشتن یک مدار معادل الکتریکی با المانهای فشرده از یک رزوناتور MEMS، لازم است مدار معادل این دو بخش را بدست آورده و سپس مدار معادل الکتریکی کل را رسم کنیم.

مدار معادل الکتریکی بیم معلق را می توان از روی مدار معادل مکانیکی آن بدست آورد به این طریق که برای سیستم مکانیکی موجود یک مدار معادل الکتریکی تعریف کنیم. این موضوع از شباهت در روابط ریاضی بین پدیده های الکتریکی و مکانیکی ناشی می شود. برای مثال قانون دوم نیوتن در رابطه با حرکت برای نیرو F ، جرم m ، سرعت u و جابجایی X به صورت رابطه ۲-۴۲ تعریف میشود.

$$F = m \frac{du}{dt} = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad 42-2$$

همچنین برای یک سلف با مقدار L که دو سر آن دارای ولتاژ V باشد و از آن جریان i بگذرد نیز رابطه ۲-۴۳ برقرار است.

$$43-2$$

$$V = L \frac{di}{dt} = L \frac{d^2q}{dt^2}$$

با مقایسه این دو رابطه می بینیم نیرو F نقشی شبیه به ولتاژ V ، سرعت u نقش جریان i و جابجایی X نقش بار q را دارند بنابراین سیستم های مکانیکی و الکتریکی مطابق جدول ۲-۵ معادل می شوند.

جدول ۲-۵: مقایسه المانهای الکتریکی و مکانیکی

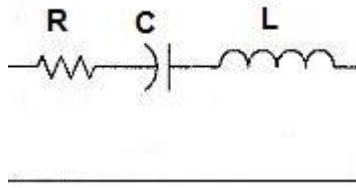
المانهای مکانیکی	المانهای الکتریکی
Mass, M	Inductance, L
Damping, D	Resistance, R
Compliance, 1/K	Capacitance, C
Velocity, u	Current, i
Displacement, x	Charge, q
Force, F	Voltage, v

بنابراین یک بیم معلق را با یک مدار RLC معادل می کنند، اما این مدار باید سری باشد یا موازی؟ برای فهمیدن این موضوع، برای هر سیستمی دو پارامتر نیرو و محرکه (effort) و شار (flow) تعریف می کنند که این پارامترها برای سیستم های مختلف در جدول ۲-۶ آورده شده اند. حال اگر در سیستمی عناصر دارای شار (flow) برابر باشند این عناصر سری و اگر دارای نیرو و محرکه (effort) برابر باشند موازی خواهند بود.

جدول ۲-۶: شار و نیرو و محرکه در سیستم های مختلف

Energy Domain	Effort	Flow
Mechanical translation	Force F	Velocity \dot{x}, v
Fixed-axis Rotation	Torque τ	Angular Velocity ω
Electric Circuits	Voltage V, v	Current I, i
Magnetic circuits	Magnetomotive Force MMF	Flux rate $\dot{\phi}$

بنابراین مدار معادل الکتریکی بیم معلق را می توان به صورت شکل ۲-۱۵ نشان داد.



شکل ۲-۱۵: مدار معادل الکتریکی بیم معلق

برای محاسبه مقادیر المانها نیز میتوان با مقایسه سیستم های مکانیکی و الکتریکی و محاسبه انرژی ذخیره شده در آنها و معادل کردن آنها باهم به این مقادیر پی برد.

$$V = \frac{1}{c}q \quad , \quad w(q) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{c}\right)q^2 \quad ۴۴-۲$$

$$F = kx \quad , \quad w(x) = \frac{1}{2} kx^2 \quad ۴۵-۲$$

با مقایسه روابط ۴۴-۲ و ۴۵-۲ می توان نتیجه گرفت

$$C = \frac{1}{k} \quad , \quad L = m \quad ۴۶-۲$$

برای دمپر نیز می توان نوشت

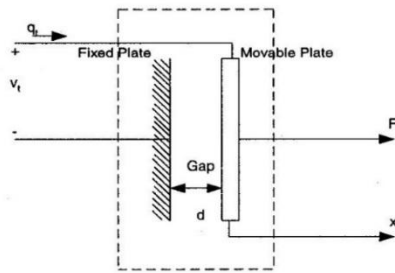
$$V = RI = R \frac{dq}{dt} \quad , \quad F = bv = b \frac{dx}{dt} \quad ۴۷-۲$$

در نتیجه

$$R = b \quad ۴۸-۲$$

بنابراین تا اینجا مدار معادل بیم معلق ، که بخش قابل حرکت رزوناتور می باشد را به صورت یک مدار RLC سری بدست آورده و مقادیر آنها را نیز از روی مدار معادل مکانیکی حساب کرده ایم. حال به سراغ مدار معادل خازن بین بیم معلق و الکتروود زیر آن می رویم.

این خازن نقش یک مبدل را دارد که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می کند. یکی از صفحات آن الکتروود ثابت و صفحه دیگر آن بیم معلق است که قابلیت حرکت دارد. این مبدل را همانند شکل ۲-۱۶ یک سیستم دو دهانه در نظر می گیریم که از یک طرف ولتاژ v و شارژ q (یا جریان i) وارد شده و از طرف دیگر نیروی f و جابجایی x (یا سرعت v) خارج می شوند.



شکل ۲-۱۶: شبکه دو دهانه معرف خازن

برای مدل کردن این سیستم، $v(t)$ و $f(t)$ را بعنوان متغیر وابسته تعریف کرده و بعنوان تابعی از متغیر های حالت $q(t)$ و $x(t)$ بیان می کنیم.

میدانیم انرژی الکتریکی موجود در مبدل الکترواستاتیکی از رابط زیر بدست می آید

$$w_e = w_e(q_t, x_t) = \frac{q_t^2}{2C(x_t)} = \frac{q_t^2 (d + x_t)}{2\epsilon_0 A_e} \quad ۴۹-۲$$

A_e مساحت صفحات خازن، d فاصله هوایی بین صفحات و $C(x_t) = \frac{\epsilon_0 A_e}{(d + x_t)}$ ظرفیت خازنی تابعی

از X_t می باشد. جزء دیفرانسیلی این انرژی به صورت زیر تعریف می شود.

$$dw_e = \left(\frac{\partial w_e}{\partial q_t}\right)_{x=cons} dx_t + \left(\frac{\partial w_e}{\partial x_t}\right)_{q=cons} dx_t \quad ۵۰-۲$$

میزان انرژی که از طریق پورت های مکانیکی و الکتریکی درون مبدل قرار می گیرد برابر است با

$$dw_e = V_t dx_t + F_t dx_t \quad ۵۱-۲$$

با استفاده از روابط ۲-۵۰ و ۲-۵۱ می توان نوشت

$$V_t(q_t, x_t) = \left(\frac{\partial w_e}{\partial q_t}\right)_{x=cons} = \frac{q_t (d + x_t)}{\epsilon_0 A_e} \quad ۵۲-۲$$

$$F_t(q_t, x_t) = \left(\frac{\partial w_e}{\partial x_t}\right)_{q=cons} = \frac{q_t^2}{2\epsilon_0 A_e} \quad ۵۳-۲$$

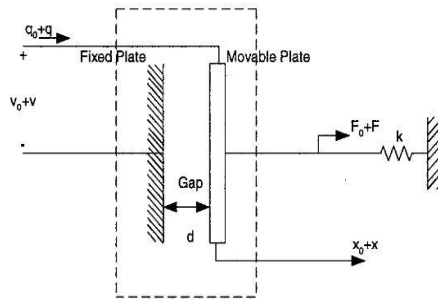
معادلات ترکیب کننده، بیان کننده روابط بین سیگنال کوچک قسمت ورودی و متغیرهای حالت

می باشند که برای مبدل الکترواستاتیکی به صورت زیر تعریف می شوند.

$$V_t(q_t, x_t) = \left(\frac{\partial V_t}{\partial q_t}\right)_{x=0} \cdot q + \left(\frac{\partial V_t}{\partial x_t}\right)_{q=0} \cdot x = \frac{(d+x_0)}{\epsilon_0 A_e} q + \frac{q_0}{\epsilon_0 A_e} x = \frac{1}{C_0} q + \frac{V_0}{d+x_0} x \quad ۵۴-۲$$

$$F_t(q_t, x_t) = \left(\frac{\partial F_t}{\partial q_t}\right)_{x=0} \cdot q + \left(\frac{\partial F_t}{\partial x_t}\right)_{q=0} \cdot x = \frac{q_0}{\epsilon_0 A_e} q + 0 = \frac{V_0}{d+x_0} q \quad ۵۵-۲$$

V_0 ولتاژ بایاس و C_0 ظرفیت خازن در حالت استاتیک و بدون حرکت می باشند. برای داشتن پایداری در سیستم، یک فنر با ثابت K به قسمت مکانیکی اضافه می کنیم (شکل ۲-۱۷) این فنر یک انرژی مکانیکی به سیستم اضافه می کند در نتیجه فقط روی قسمت مکانیکی اثر می گذارد.



شکل ۲-۱۷: اثر فنر تعادل در رزوناتورهای دوسرگردار

$$F_t(q_t, x_t) = \left(\frac{\partial w_e}{\partial x_t}\right)_{q=cons} = \frac{q_t^2}{2\epsilon_0 A_e} + k(x_t - x_r) \quad ۵۶-۲$$

Xr مکان فنر در حالت پایدار می باشد.

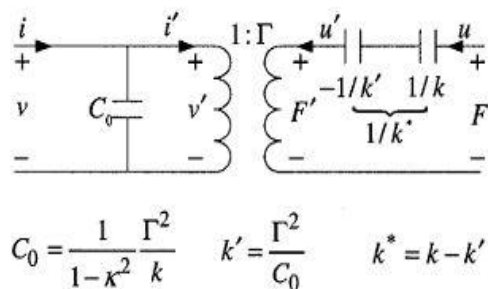
روابط ۲-۵۴ و ۲-۵۵ توابعی از متغیرهای حالت (q, x) می باشند. از این روابط استفاده کرده و روابط بین V و F با متغیرهای حالت $i = \dot{q}$ و $u = \dot{x}$ را بدست می آوریم که به صورت زیر خواهد شد.

$$\begin{bmatrix} v \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\Gamma} & \frac{-1}{j\omega}(k-k') \\ \frac{j\omega C_0}{\Gamma} & \frac{-kC_0}{\Gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ u \end{bmatrix} \quad ۵۷-۲$$

$$\Gamma = \frac{q_0}{d+x_0} = \frac{\epsilon_0 A_e V_0}{(d+x_0)^2} \text{ در اینجا}$$

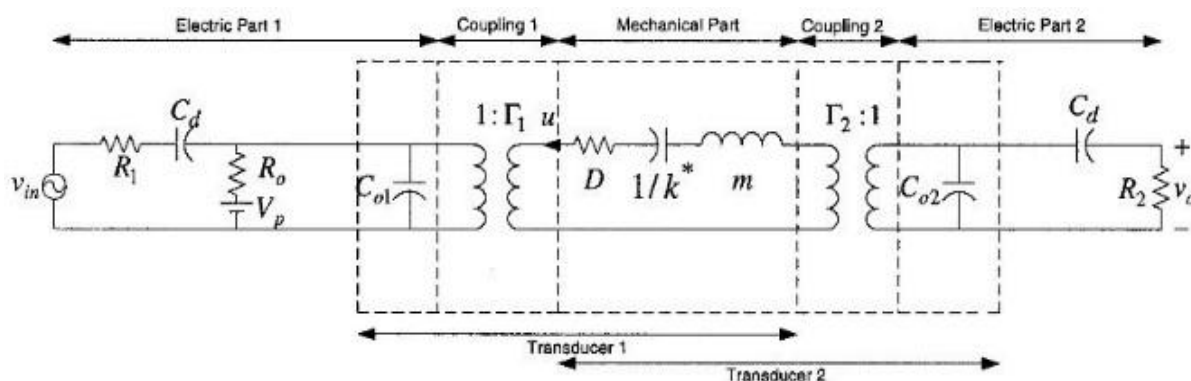
$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\Gamma} & \frac{-1}{j\omega}(k-k') \\ \frac{j\omega C_0}{\Gamma} & \frac{-kC_0}{\Gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C_0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\Gamma} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\Gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{j\omega}(k-k') \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad ۵۸-۲$$

هریک از ماتریسهای بدست آمده در واقع معرف یک شبکه دودهانه می باشند که در مجموع با هم سری شده اند.



شکل ۲-۱۸: مدار معادل الکتریکی خازن بین بیم معلق و الکتروود زیر آن

تا وقتی که $k^* > 0$ باشد سیستم پایدار خواهد بود. براین اساس می توانیم مدار معادل الکتریکی کلی رزوناتور را رسم کنیم.



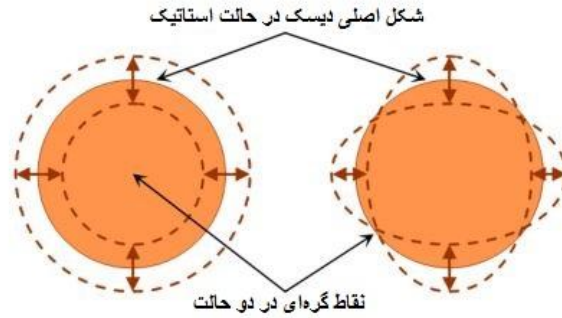
شکل ۲-۱۹: مدار معادل الکتریکی کلی رزوناتور دوسرگيردار

۲-۴ تحلیل رزوناتورهای دیسکی تک پایه

۲-۴-۱ تعریف و نحوه عملکرد رزوناتورهای دیسکی تک پایه

همانطور که در بخشهای قبلی گفته شد رزوناتورهای دیسکی در حالت توده‌ای (Bulk mode) نوسان می کنند. این حالت نوسان خود به دو قسمت نوسان شعاعی^۱ و بیضوی^۲ تقسیم می شود. این دو حالت نوسان رزوناتورهای دیسکی در شکل نشان داده شده است.

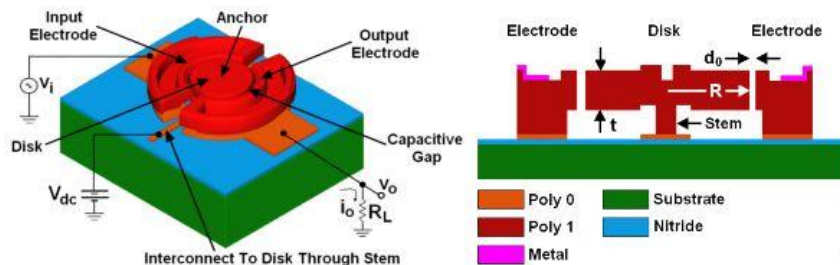
^۱radial-contour
^۲elliptical



شکل ۲۰-۲: حالت های نوسان بیضوی (سمت راست) و شعاعی (سمت چپ)

همانگونه که در شکل ۲۰-۲ نشان داده شده است حالت شعاعی دارای یک نقطه گره‌ای^۱ در مرکز می‌باشد و تمام نقاط شعاع به صورت یکسان منبسط و منقبض می‌شوند، اما حالت بیضوی دارای چهار نقطه گره‌ای است که نوسان آن به این صورت می‌باشد که وقتی در راستای افقی منبسط می‌شود در راستای عمودی منقبض شده و برعکس.

رزوناتورهای دیسکی تک پایه دارای فرکانس رزونانس بیشتر و همچنین ضریب کیفیت بیشتری نسبت به رزوناتورهای دیسکی چهارپایه می‌باشند، از این رو به تحلیل این رزوناتورها می‌پردازیم. همانطور که در شکل ۲۱-۲ نشان داده شده است، یک رزوناتور دیسکی دو دهانه، شامل یک دیسک دایره ای معلق توسط یک پایه استوانه‌ای در مرکز آن می‌باشد. دیسک توسط الکترودهای ورودی و خروجی در طول محیط آن که به فاصله کمی از آن قرار گرفته‌اند، محصور شده است، این فاصله اندک باعث ایجاد خازن شده و بعنوان یک مبدل الکترو مکانیکی عمل می‌کند. این ساختارهای تک پایه نسبت به ساختارهای چند پایه در اطراف، بهتر عمل می‌کنند چرا که در حالت توده‌ای حجمی (bulk mode)، رزوناتورهای دارای یک پایه در وسط، فقط یک نقطه گره‌ای خواهند داشت در نتیجه تلفات ناشی از پایه‌های آنها نیز کمتر خواهد بود.



شکل ۲۱-۲: رزوناتور دیسکی تک پایه

^۱Nodal point

برای راه اندازی ساختار ابتدا یک ولتاژ DC (همانطور که در شکل ۲-۲۱ نشان داده شده است) به پایه دیسک داده ، سپس یک ولتاژ ac که همان ورودی ما می باشد به یکی از دهانه ها که آن را الکتروود ورودی^۱ می نامیم اعمال می کنیم حال اگر فرکانس سیگنال اعمالی به الکتروود ورودی برابر با فرکانس طبیعی دیسک باشد باعث به نوسان در آمدن دیسک می شود که این نوسان به صورت انبساط و انقباض شعاعی و با کمی اغماض به صورت متقارن صورت می گیرد. این جابجایی شعاعی باعث تغییر فاصله هوایی بین دیسک و الکترودهای دو طرف شده، در نتیجه خازن متغیری ایجاد می کند که تغییرات این خازن موجب ایجاد یک جریان هم فرکانس با سیگنال ورودی در الکتروود خروجی^۲ خواهد شد.

در واقع عمل فیلتر کردن توسط این ساختار به این گونه است که لازمه داشتن سیگنال در خروجی ، وجود خازن متغیر و لازمه داشتن خازن متغیر ، وجود فاصله هوایی متغیر و عامل ایجاد تغییر در فاصله هوایی، نوسان دیسک می باشد. نوسان دیسک نیز در صورتی اتفاق خواهد افتاد که فرکانس سیگنال ورودی برابر فرکانس طبیعی دیسک باشد، بنابراین فقط زمانی خروجی خواهیم داشت که فرکانس ورودی برابر فرکانس طبیعی دیسک باشد و این یعنی انتخاب بازه مشخصی از فرکانس و حذف بقیه فرکانس ها که همان معنای فیلتر کردن می باشد.

حال اگر بخواهیم عمل فیلتر کردن را به صورت روابط ریاضی بیان کنیم باید بگوییم، با اعمال ولتاژ DC به پایه دیسک و ولتاژ ac به الکتروود ورودی، یک نیروی الکترواستاتیک شعاعی در دیسک ایجاد می شود که باعث یک انبساط و انقباض تقریباً متقارن خواهد شد. این نیروی الکترواستاتیکی تولید شده F_c دارای دو بخش ثابت (F_0) و متغیر (F_i) در جهت شعاعی می باشد که با رابطه ۲-۵۹ تعریف می شود

$$F_c = \frac{\partial w}{\partial r} = \frac{\partial(\frac{1}{2}cv^2)}{\partial r} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial C_1}{\partial r}\right)(V_{dc} - v_i)^2 = F_0 + F_i \quad ۵۹-۲$$

در اینجا C_k به خازن بین الکتروود و رزوناتور در K امین پورت اشاره دارد. $K=1,2$ منظور به ترتیب پورت های ورودی و خروجی می باشند.

نیروی متغیر با زمان F_i از رابطه ۲-۶۰ بدست می آید

$$F_i \cong -V_{dc} \left(\frac{\partial C_1}{\partial r}\right)v_i \quad (\text{for, } V_{dc} \gg v_i) \quad ۶۰-۲$$

¹ Input electrode
² output electrode

$\partial C_1 / \partial r$ تغییرات خازن بین دیسک و الکتروود بر واحد جابجایی دیسک، در قسمت ورودی می باشد. می توان رابطه ۶۱-۲ را برای آن تعریف کرد

$$C_1(r) = C_0 \left(1 - \frac{r}{d_0}\right)^{-1} \Rightarrow \frac{\partial C_1}{\partial r} = \frac{C_0}{d_0} \left(1 - \frac{r}{d_0}\right)^{-2} \quad ۶۱-۲$$

در اینجا C_0 خازن در حالت استاتیکی بین دیسک و الکتروود راه انداز می باشد و از رابطه ۶۲-۲ بدست می آید

$$C_0 \cong \frac{\varepsilon_0 \phi R t}{d_0} \quad ۶۲-۲$$

R و t به ترتیب شعاع و ضخامت دیسک می باشند، ε_0 گذردهی خلأ، d_0 فاصله بین الکتروود و رزوناتور در حالت استاتیک و ϕ زاویه ایجاد شده با لبه الکتروود ورودی (برای الکتروود خروجی نیز این گونه است). بنابراین می توان نوشت

$$\frac{\partial C_1}{\partial r} \cong \frac{\varepsilon_0 \phi R t}{d_0^2} \quad ۶۳-۲$$

صفر تا پیک دامنه جابجایی شعاعی در هر نقطه (r, θ) از دیسک ناشی از لرزش حالت radial-

contour از رابطه ۶۴-۲ بدست می آید

$$D(r, \theta) = A h j_1(hr) \quad ۶۴-۲$$

$j_1(hr)$ تابع بسل نوع یک از مرتبه اول می باشد.

بنابراین در محیط دیسک ($r=R$) خواهیم داشت

$$D(R, \theta) = \frac{Q F_i}{j k_{re}} \quad ۶۵-۲$$

در اینجا، Q ضریب کیفیت رزوناتور، k_{re} سختی موثر در محیط دیسک، A یک نسبت وابسته به نیروی راه انداز و h یک ثابت برابر با مقدار زیر می باشند:

$$h = \sqrt{(\omega_0^2 \rho) \left(\frac{E}{1+\sigma} + \frac{E\sigma}{1-\sigma^2} \right)} \quad ۶۶-۲$$

لرزش شعاعی دیسک، یک خازن متغیر بین دیسک و الکتروود خروجی ایجاد می کند، که باعث ایجاد

یک جریان در خروجی می شود، که این جریان از رابطه ۶۷-۲ بدست می آید

$$i_o = V_{dc} \frac{\partial C_2}{\partial t} \quad ۶۷-۲$$

این رابطه نشان می دهد که جریان خروجی فقط در صورتی تولید می شود که ولتاژ بایاس V_{dc} بین

دیسک و الکتروود وجود داشته باشد، بنابراین می توان با قطع یا وصل کردن ولتاژ بایاس ، رزوناتور را روشن یا خاموش نمود.

برای توصیف رزوناتورهای دیسکی از مختصات استوانه‌ای استفاده می‌شود. فرکانس رزونانس این رزوناتور می تواند با جملاتی از تابع بسل به صورت زیر بیان شود

$$\frac{J_0\left(\frac{A}{B}\right)}{J_1\left(\frac{A}{B}\right)} = (1 - \sigma) \quad 68-2$$

که در آن

$$A = \omega_0 R \sqrt{\frac{\rho(2+2\sigma)}{E}}, \quad B = \sqrt{\frac{2}{1-\sigma}} \quad 69-2$$

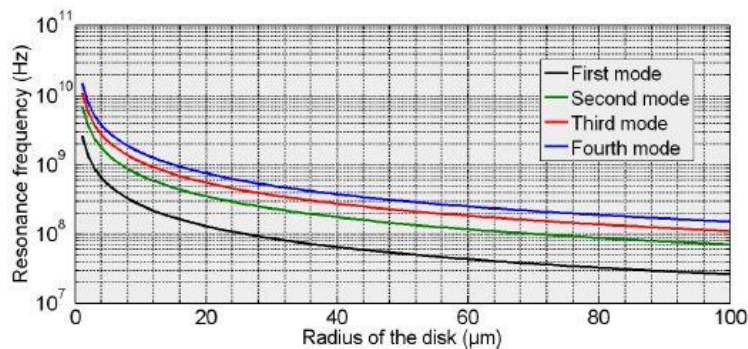
در اینجا J_α تابع بسل نوع اول از مرتبه α می باشد، $\omega_0 (= 2\pi f_0)$ فرکانس زاویه ای، R شعاع دیسک ، E ، ρ و σ به ترتیب یانگ مدولوس، چگالی جرمی و نسبت پواسن مواد تشکیل دهنده دیسک می‌باشند. با ساده کردن روابط ۶۸-۲ و ۶۹-۲ می‌توان به رابطه فرکانس رزونانس رزوناتور دیسکی برای مد i ام رسید.

$$\frac{A}{B} = \omega_0 R \sqrt{\frac{\rho(1-\sigma^2)}{E}} = \lambda_i \Rightarrow f_0 = \frac{\lambda_i}{2\pi R} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)}} \quad 70-2$$

λ_i پارامتر فرکانسی برای مدهای خاص می باشد که مقادیر آن به صورت تجربی بدست می‌آید. این مقادیر برای ۴ مد اول حالت radial-contour برای سیلیکون در جدول ۷-۲ آمده است.

جدول ۷-۲: مقادیر λ_i برای ۴ مد اول

شماره مد	λ_i
۱	۱,۹۹
۲	۵,۳۷
۳	۸,۴۲
۴	۱۱,۵۲

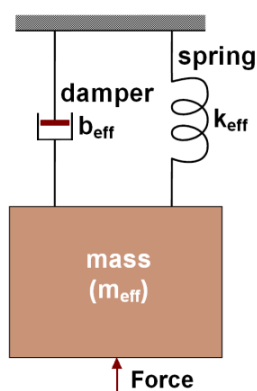


شکل ۷-۲: فرکانس رزونانس بر حسب شعاع دیسک

تغییرات فرکانس رزونانس برای ۴مد اول حالت radial-contour نسبت به شعاع دیسک در شکل ۲۲-۲ رسم شده است.

۲-۴-۲ مدار معادل مکانیکی

هر رزوناتور در حال نوسان را می‌توان با یک سیستم جرم، فنر و دمپر معادل کرد. همانطور که در یک رزوناتور در صورت عدم وجود مقاومت، انرژی الکتریکی و مغناطیسی پیوسته به هم تبدیل شده و این کار تا بی‌نهایت ادامه خواهد داشت، در یک سیستم جرم و فنر نیز در صورت در نظر نگرفتن میرایی هوا انرژی پتانسیل و جنبشی پیوسته به هم تبدیل می‌شوند و این سیکل برای همیشه تکرار خواهد شد.



شکل ۲۳-۲: مدار معادل مکانیکی رزوناتور دیسکی

حال برای بدست آوردن مقادیر جرم معادل، ثابت فنر و ضریب دمپینگ از انرژی جنبشی کلی دیسک در حال نوسان استفاده می‌کنیم.

$$E_k = \frac{1}{2} \rho t \int_0^R \int_0^{2\pi} r u^2(r) dr d\theta \quad ۷۱-۲$$

طبق رابطه‌ای که انرژی جنبشی با جرم و سرعت جسم دارد می‌توان برای جرم جسم رابطه ۷۲-۲ را

نوشت

$$m_{eff} = \frac{2E_k}{u^2(R)} = \frac{2\rho t \int_0^R r J_1(hr)^2 dr}{J_1(hR)^2} = \pi \rho t R^2 \left[1 - \frac{J_0(hR) J_2(hR)}{J_1(hR)^2} \right] \quad ۷۲-۲$$

$$\text{with, } h = \omega_o \sqrt{\frac{\rho}{\left(\frac{E}{1+\sigma}\right) + \left(\frac{E\sigma}{1-\sigma^2}\right)}} = \frac{\lambda_i}{R} \quad ۷۳-۲$$

برای ثابت فنر از روش انرژی رایلی می توان نوشت

$$\omega_o = \sqrt{k_{eff} / m_{eff}} \quad ۷۴-۲$$

این فرمول رابطه بین سختی موثر فنر و فرکانس رزونانس ω_o را نشان می دهد.

همچنین ضریب میرایی سیستم از رابطه زیر بدست می آید(همانند رزوناتورهای دوسرگردار).

$$b_{eff} = \frac{\omega_o m_{eff}}{Q} = \frac{\sqrt{k_{eff} m_{eff}}}{Q} \quad ۷۵-۲$$

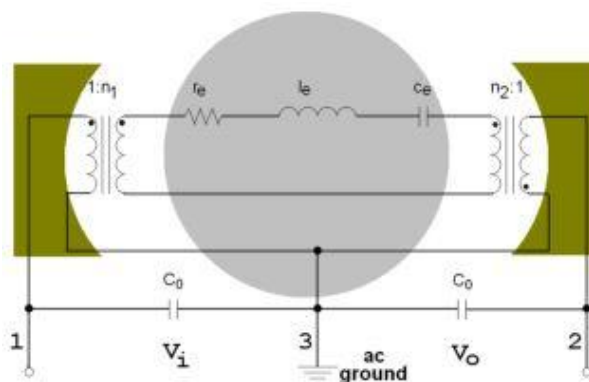
رزوناتورهای MEMS ضریب دمپینگ پایینی دارند، زیرا با ضریب کیفیت نسبت عکس دارد و می- دانیم این رزوناتورها از ضریب کیفیت بالایی برخوردار هستند.

۳-۴-۲ مدار معادل الکتریکی

این کار را می توان با تبدیل کردن مدار معادل مکانیکی به الکتریکی انجام داد. این کار از شباهت

معادلات دیفرانسیل حاکم بر رفتار مکانیکی و الکتریکی امکان پذیر است. با مقایسه بین روابط نیرو و ولتاژ در اینجا، نیرو، جابجایی و سرعت به ترتیب با ولتاژ، شارژ(بار) و جریان متناسب اند.

در ابتدا m_{eff} ، k_{eff} و b_{eff} را از روابط گفته شده قبلی بدست می آوریم آنگاه یک دیسک را می توان با یک مدار معادل الکتریکی RLC سری با مقادیر زیر نشان داد.



شکل ۲-۲۴: مقایسه شکل رزوناتور دیسکی با مدار معادل الکتریکی آن

$$l_e = m_{eff}$$

$$r_e = b_{eff}$$

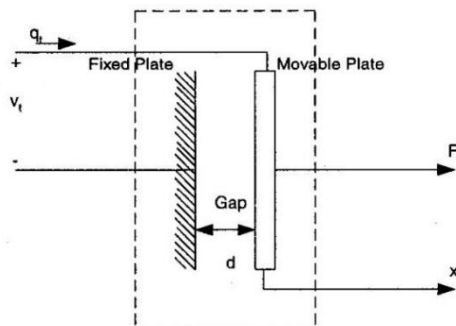
$$c_e = (1/k_{eff})$$

۷۶-۲

برای بدست آوردن مدار معادل الکتریکی کلی یک رزوناتور لازم است برای خازن ایجاد شده بین دیسک و الکتروود یک مدار معادل الکتریکی بدست آوریم که برای اینکار جزء کوچکی از این خازن را در نظر می گیریم که می توان آن را به صورت خازن با صفحات تخت موازی در نظر گرفت که بعنوان یک مبدل، سیگنالهای الکتریکی و مکانیکی را به هم تبدیل می کند.

یکی از صفحات آن الکتروود ثابت و صفحه دیگر آن بیم معلق است که قابلیت حرکت دارد. این مبدل را همانند شکل زیر یک سیستم دو دهانه در نظر می گیریم که از یک طرف ولتاژ v و شارژ q (یا جریان i) وارد شده و از طرف دیگر نیروی f و جابجایی x (یا سرعت v) خارج می شوند.

برای مدل کردن این سیستم $v(t)$ و $f(t)$ را بعنوان متغیر وابسته تعریف کرده و بعنوان تابعی از متغیرهای حالت $x(t)$ و $q(t)$ بیان میکنیم.



شکل ۲-۲۵: شبکه دو دهانه معادل خازن بین دیسک و الکتروود در رزوناتور دیسکی

میدانیم انرژی الکتریکی موجود در مبدل الکترواستاتیکی از رابطه زیر بدست می آید

$$w_e = w_e(q_t, x_t) = \frac{q_t^2}{2C(x_t)} = \frac{q_t^2(d + x_t)}{2\epsilon_0 A_e} \quad ۷۷-۲$$

A_e مساحت صفحات خازن، d فاصله هوایی بین صفحات و $C(x_t) = \frac{\epsilon_0 A_e}{(d + x_t)}$ ظرفیت خازنی تابعی از

X_t می باشد. جزء دیفرانسیلی این انرژی به صورت زیر تعریف می شود.

$$dw_e = \left(\frac{\partial w_e}{\partial q_t}\right)_{x=cons} dx_t + \left(\frac{\partial w_e}{\partial x_t}\right)_{q=cons} dx_t \quad ۷۸-۲$$

میزان انرژی که از طریق پورت های مکانیکی و الکتریکی درون مبدل قرار می گیرند عبارتند از

$$dw_e = V_t dx_t + F_t dx_t \quad ۷۹-۲$$

با استفاده از دو رابطه ۷۸-۲ و ۷۹-۲ می توان نوشت

$$V_t(q_t, x_t) = \left(\frac{\partial w_e}{\partial q_t} \right)_{x=cons} = \frac{q_t(d+x_t)}{\epsilon_0 A_e} \quad ۸۰-۲$$

$$F_t(q_t, x_t) = \left(\frac{\partial w_e}{\partial x_t} \right)_{q=cons} = \frac{q_t^2}{2\epsilon_0 A_e} \quad ۸۱-۲$$

معادلات ترکیب کننده، بیان کننده روابط بین سیگنال کوچک قسمت ورودی و متغیرهای حالت می باشد که برای مبدل الکترواستاتیکی به صورت زیر تعریف می شوند.

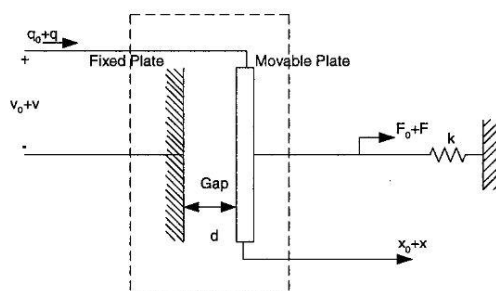
$$V_t(q_t, x_t) = \left(\frac{\partial V_t}{\partial q_t} \right)_{x=0} \cdot q + \left(\frac{\partial V_t}{\partial x_t} \right)_{q=0} \cdot x = \frac{(d+x_0)}{\epsilon_0 A_e} q + \frac{q_0}{\epsilon_0 A_e} x = \frac{1}{C_0} q + \frac{V_0}{d+x_0} x \quad ۸۲-۲$$

$$F_t(q_t, x_t) = \left(\frac{\partial F_t}{\partial q_t} \right)_{x=0} \cdot q + \left(\frac{\partial F_t}{\partial x_t} \right)_{q=0} \cdot x = \frac{q_0}{\epsilon_0 A_e} q + 0 = \frac{V_0}{d+x_0} q \quad ۸۳-۲$$

V_0 ولتاژ بایاس و C_0 ظرفیت خازن در حالت استاتیک و بدون حرکت می باشد. برای داشتن پایداری در سیستم ، یک فنر با ثابت K به قسمت مکانیکی اضافه می کنیم.

این فنر یک انرژی مکانیکی به سیستم اضافه می کند، در نتیجه فقط روی قسمت مکانیکی اثر می -

گذارد.



شکل ۲-۲۶: اضافه کردن فنر به مدار معادل خازن

$$F_t(q_t, x_t) = \left(\frac{\partial w_e}{\partial x_t} \right)_{q=cons} = \frac{q_t^2}{2\epsilon_0 A_e} + k(x_t - x_r) \quad ۸۴-۲$$

Xr مکان فنر در حالت پایدار می باشد.

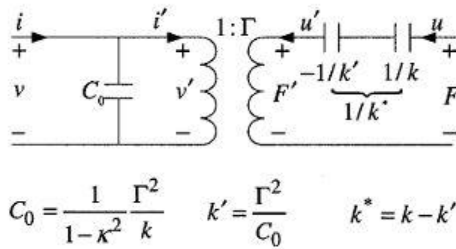
روابط بین V و F با متغیرهای حالت $i = \dot{q}$ و $u = \dot{x}$ را می توان به صورت زیر نوشت

$$\begin{bmatrix} v \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\Gamma} & \frac{-1}{j\omega} (k - k') \\ \frac{j\omega C_0}{\Gamma} & \frac{-kC_0}{\Gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ u \end{bmatrix} \quad ۸۵-۲$$

در اینجا $\Gamma = \frac{q_0}{d+x_0} = \frac{\epsilon_0 A_e V_0}{(d+x_0)^2}$

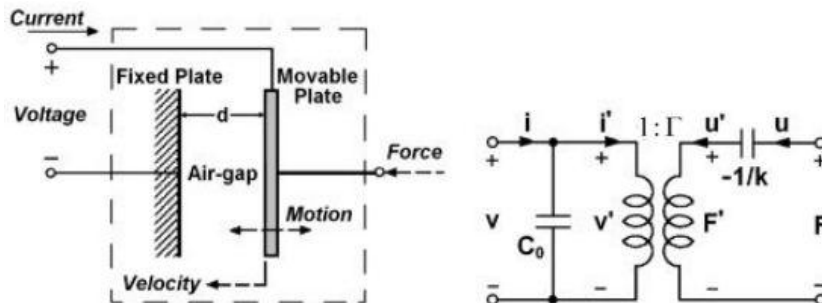
$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\Gamma} & \frac{-1}{j\omega} (k-k') \\ \frac{j\omega C_0}{\Gamma} & \frac{-kC_0}{\Gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C_0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\Gamma} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\Gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{j\omega} (k-k') \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad ۸۶-۲$$

هریک از ماتریسهای بدست آمده در واقع معرف یک شبکه دودخانه می باشند که در مجموع با هم سری شده اند.



شکل ۲-۲۷: مدار معادل الکتریکی خازن مبدل الکترو مکانیکی

تا وقتی که $k^* > 0$ باشد سیستم پایدار خواهد.



شکل ۲-۲۸: مدار معادل الکتریکی خازن مبدل در رزوناتورهای دیسکی

حال اگر بخواهیم مدار معادل بدست آمده از صفحات تخت را به صفحات منحنی شکل تعمیم دهیم، شکلها و روابط زیر را خواهیم داشت.

$$\Gamma_k = V_{dc} \frac{\partial C_k}{\partial r} = V_{dc} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\epsilon A_k}{d_0 - r} \right) \approx V_{dc} \left(\frac{\epsilon A_k}{d_0^2} \right) \quad (for, r \ll d_0) \quad ۸۷-۲$$

در اینجا C_k به خازن بین دیسک و k امین الکتروود اشاره دارد ($k=1,2$)، A_k مساحت صفحات روبروی هم در خازن می باشد که از رابطه $A_k = \phi_k R t$ بدست می آید. (ϕ_k زاویه قطاعی از دایره که الکتروود روبروی آن قرار گرفته است) و r جابجایی جانبی را نشان می دهد (در واقع میزان تغییرات شعاع نسبت به شعاع اصلی دیسک)

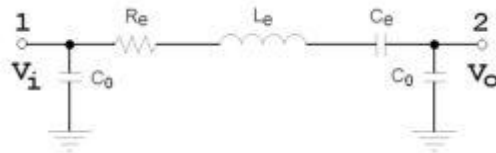
حال با استفاده از مفهوم انعکاس المانها می توان مقادیر زیر را بدست آورد

$$L_e = \frac{l_e}{\Gamma^2}$$

$$R_e = \frac{r_e}{\Gamma^2}$$

$$C_e = (\Gamma^2 c_e)$$

۸۸-۲



شکل ۲-۲۹: کل مدار معادل الکتریکی رزوناتور دیسکی در یک سمت مبدل

باید توجه شود که C_e در اینجا به صورت رابطه ۲-۸۹ تعریف می شود

$$C_e = \Gamma^2 / k_{eff} - 2k$$

۸۹-۲

که k ثابت موثر فنر حاصل از ترانس می باشد. اما از آنجاییکه K_{eff} بسیار بزرگتر از K می باشد، از K صرف نظر می کنیم.

فصل سوم

مروری بر کارهای گذشته

۳ فصل سوم: مروری بر کارهای گذشته

۳-۱ مقدمه

در این فصل، تمامی فیلترهای MEMS را به دو بخش کلی تقسیم می‌کنیم. الف) فیلترهایی که در آنها از یک یا چند قطعه MEMS استفاده شده است ب) فیلترهایی که به صورت کامل با استفاده از تکنولوژی میکروالکترومکانیکی ساخته شده‌اند.

در بخش اول، چند نمونه از این نوع فیلترها که متناسب با موضوع بخش می‌باشند آورده شده و در مورد آنها اندکی بحث می‌کنیم، در این نوع از فیلترها، از یک یا چند قطعه MEMS برای بالا بردن بازدهی فیلتر استفاده شده است، زیرا قطعات MEMS دارای بازدهی بالایی می‌باشند و عموماً برای بالا بردن کیفیت یک مدار، در آنها از این قطعات استفاده می‌شود. این نوع فیلترها نیز صرفاً به جهت استفاده از قطعه یا قطعات MEMS در آنها به فیلترهای MEMS شهرت یافته‌اند. نقص عمده این فیلترها اندازه بزرگ و همچنین ضریب کیفیت پایین آنها می‌باشد.

در بخش بعدی از فیلترهای تمام MEMS مثالهایی آورده می‌شود. این فیلترها به صورت کامل با استفاده از تکنولوژی MEMS ساخته شده‌اند، به همین دلیل در عین داشتن ضریب کیفیت بسیار بالا، تلفات مسیر پیشرو مناسب، تلفات DC صفر و فرکانس بالا، دارای اندازه کوچک در حد میکرومتر می‌باشند، در نتیجه بازدهی بالایی دارند و برای استفاده در صنعت بسیار مناسب و به صرفه می‌باشند. اولین فیلتری که در این بخش از آن نام برده می‌شود، یک فیلتر MEMS است که با استفاده از دو رزوناتور MEMS دوسرگردار در سال ۲۰۰۰ طراحی و ساخته شده است. این فیلتر جزء اولین فیلترهای MEMS می‌باشد که ساخته شده است به همین دلیل ویژگیهای چندان مناسبی ندارد، هرچند نسبت به فیلترهای غیر MEMS از ضریب کیفیت و تلفات مسیر پیشرو مناسبی برخوردار می‌باشد. فیلتر بعدی فیلتری است که از ترکیب رزوناتورهای MEMS دیسکی با چهار پایه کناری تشکیل شده است. در مورد این فیلتر باید بگوییم که کار اصلی، طراحی بیم اتصال بین دو رزوناتور می‌باشد زیرا فیلترها از قبل طراحی شده فرض شده‌اند.

فیلتر بعدی جدیدترین فیلتر MEMS است که تا کنون طراحی شده است. این فیلتر از رزوناتورهای دیسکی تک پایه تشکیل شده است که فرکانس کاری و ضریب کیفیت بالایی دارند. در طراحی این فیلتر، طراح برای اینکه بتواند از این فیلتر در فرکانسهای بالاتر استفاده کند، پایه مرکزی رزوناتورهای آن را حذف کرده و رزوناتورها را به شکل حلقه ای با پایه حلقه ای تبدیل می‌کند. مراحل طراحی رزوناتورها و بیم متصل کننده آنها در این بخش به صورت کامل بحث شده است.

۲-۳ فیلترهای MEMS ساخته شده

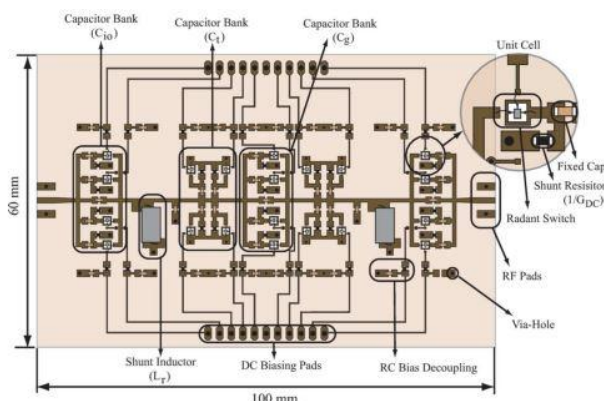
۱-۲-۳ فیلترهایی که در آنها از یک یا چند قطعه MEMS استفاده شده است

فیلترهای MEMS که تاکنون ساخته شده‌اند را به دو قسمت زیر تقسیم می‌کنیم:

- فیلترهایی که در آنها از یک یا چند قطعه MEMS استفاده شده است
- فیلترهایی که کاملاً با استفاده از تکنولوژی MEMS ساخته شده‌اند (فیلترهای میکروالکترومکانیکی)

۱-۱-۲-۳ فیلتر شماره ۱ (استفاده از سوئیچ MEMS)

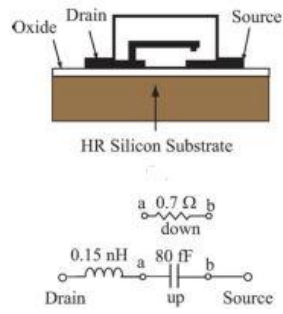
در این مقاله [۲۳] با استفاده از سلف و خازن اقدام به ساخت فیلتر کرده‌اند. هر یک از خازن‌های استفاده شده در این فیلتر در واقع یک بانک خازنی تشکیل شده از چهار سلول می‌باشند که هر سلول خود شامل یک سوئیچ MEMS و یک مدار بایاس می‌باشد. این فیلتر در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.



شکل ۱-۳: فیلتری که در آن از سوئیچ MEMS استفاده شده است

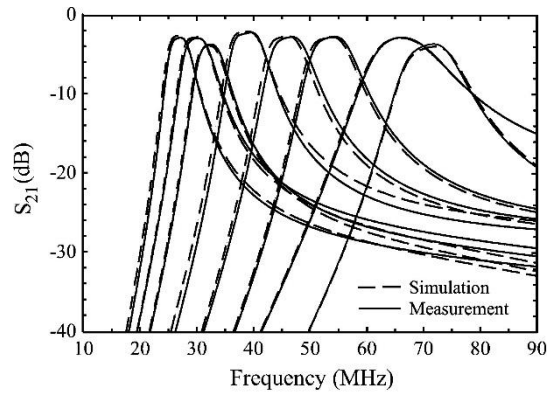
متناسب با روشن یا خاموش بودن هر سوئیچ چندین حالت بوجود می‌آید که در هر حالت اندازه خازن دیده شده از دو سر بانک خازنی مقدار متفاوتی خواهد بود و بر این اساس در هر حالت، فیلتر فرکانس مرکزی متفاوتی از خود نشان خواهد داد.

نوآوری که در این مقاله مشاهده می‌شود، سوئیچ MEMS پیشرفته‌ای است که در حالت وصل با یک مقاومت سری 0.7 اهمی و در حالت قطع با یک سلف و خازن سری به ترتیب 0.15 نانو هانری و 80 فمتوفاراد مدل می‌شود. که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.

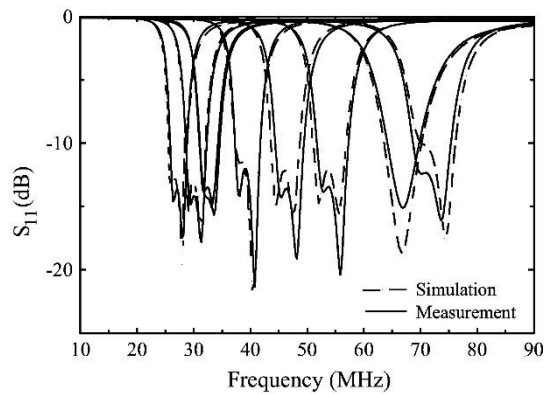


شکل ۲-۳: سوئیچ MEMS مورد استفاده در فیلتر ۱ و مدار معادل آن

نتایجی که از اندازه گیری‌ها بدست آمده است، به صورت زیر می باشد.



(a)



(b)

شکل ۳-۳: نتایج حاصل از شبیه سازی و اندازه گیری فیلتر شماره ۱

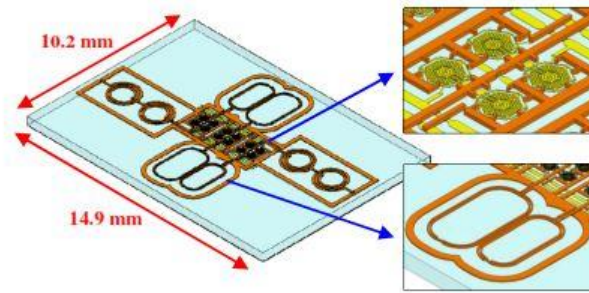
نتایج حاصله را در جدول ۱-۳ مشاهده می کنیم.

جدول ۱-۳: نتایج حاصل از فیلتر شماره ۱

Freq	Insertion Loss(IL)	Q	Size	Vp
25-75 MHz	3-5	60-100	100*60mm ²	90 v

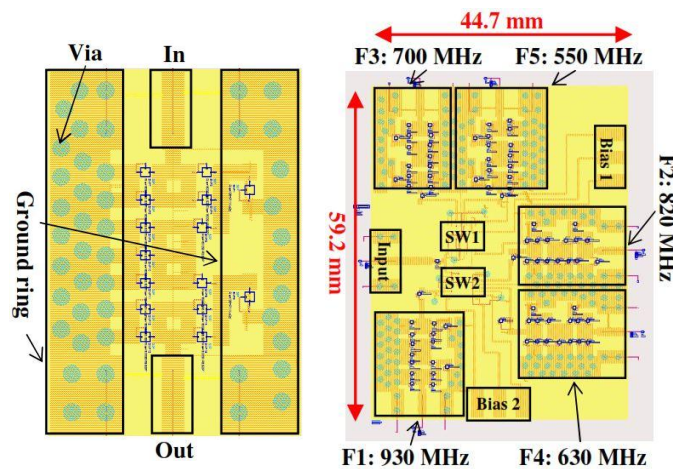
۲-۱-۲-۳ فیلتر شماره ۲ (استفاده از سلف و خازن MEMS)

در این مقاله [۲۴] با استفاده از سلف و خازنهای MEMS چند فیلتر درست کرده و آنها را با سوئیچهایی به هم متصل می‌کند. هر یک از این فیلترها برای باند خاصی طراحی شده اند در نتیجه جهت کار در فرکانسی مشخص توسط سوئیچها، فیلتر مورد نظر انتخاب می‌شود. بنابراین در مجموع می‌توان گفت یک فیلتر قابل تنظیم فرکانسی خواهیم داشت. شکل ۳-۴ مدل کلی این فیلتر را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴: مدل کلی فیلتر ۲

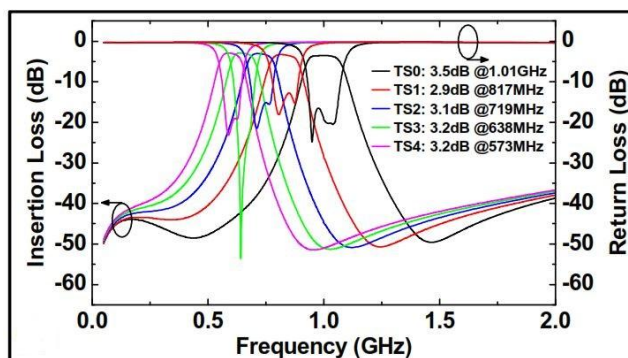
لی اوت^۱ فیلتر در حالت کلی و برای یک فیلتر نیز در شکل ۳-۵ نشان داده شده است.



شکل ۳-۵: لی اوت یکی از فیلترها (سمت چپ) و لی اوت کل فیلترها در کنار هم (سمت راست)

نتایج حاصل از شبیه سازی این فیلتر قابل تنظیم در نرم افزار HFSS به صورت شکل ۳-۶ می‌باشد.

^۱layout



شکل ۳-۶: نتایج حاصل از شبیه سازی فیلتر ۲

نتایج حاصل از شبیه سازی را می توان به صورت جدول ۳-۲ نشان داد.

جدول ۳-۲: نتایج حاصل از شبیه سازی فیلتر ۲

Freq	IL	Q	Size	Vp
600-1000 MHZ	3-3.6 dB	9	44.7*59.2 mm ²	?

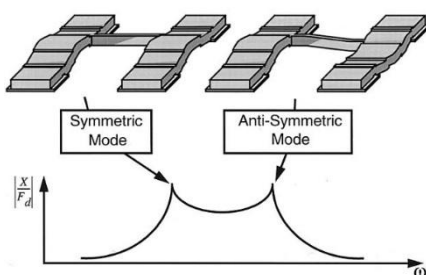
می توان گفت این نوع از فیلترها عموماً ضریب کیفیت پایین، ولتاژ بایاس و IL زیاد و اندازه بزرگ دارند.

برای حل این مشکلات در فیلترها، محققان به سراغ فیلترهای میکروالکترومکانیکی رفته اند که دارای اندازه بسیار کوچکتر، ضریب کیفیت بسیار بزرگتر، IL کمتر و عموماً ولتاژ بایاس کمتری نیز هستند و همچنین در حالت DC تلفات ندارند.

۲-۲-۳ فیلترهای میکروالکترومکانیکی

۱-۲-۲-۳ با استفاده از دو رزوناتور دوسرگیردار

برای بدست آوردن پهنای باند بیشتر در این مقاله [۲۵]، دو یا چند رزوناتور را با یک بیم کوپل کننده به هم متصل می کند. این امر سبب می شود تا انرژی نوسان ایجاد شده در رزوناتور اول بوسیله بیم کوپل کننده به رزوناتور دوم منتقل شود و آن را به ارتعاش درآورد.



شکل ۳-۷: ارتعاش دو رزوناتور به هم متصل شده

از آنجاییکه در این نوع ساختارها از دو یا چند رزوناتور استفاده می شود، بنابراین چند حالت ارتعاش ممکن است بوجود بیاید. حالت‌های ارتعاش، نسبت به قله مثبت و قله منفی رزوناتور در حال ارتعاش سنجیده می‌شوند. به این صورت که اگر هر دو رزوناتور هم‌زمان به‌قله مثبت و سپس هم‌زمان به قله منفی بروند می‌گوییم در مد هم‌فاز و اگر یکی در قله مثبت و دیگری در قله منفی باشد و برعکس، می‌گوییم در مد غیرهم‌فاز ارتعاش می‌کنند. که در شکل ۳-۷ نشان داده شده است. برای اساس در نمودار گین^۱ خروجی بر حسب فرکانس، دو قله خواهیم داشت، یک قله در فرکانسی که ارتعاش هم‌فاز دارند و دیگری در فرکانسی که ارتعاش غیر هم‌فاز دارند، که این دو فرکانس عموماً به صورت متقارن در اطراف فرکانس تشدید رزوناتور اصلی قرار می‌گیرند، یعنی فرکانس مرکزی فیلتر برابر با فرکانس ارتعاش رزوناتورهای است که از آنها تشکیل شده است.

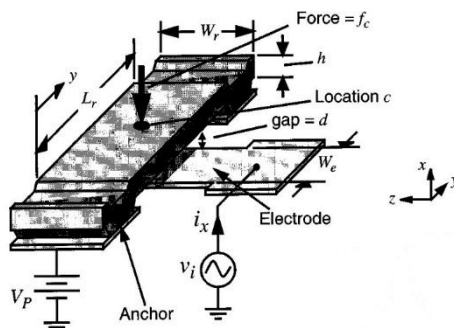
بنابراین می‌توان گفت مراحل طراحی یک فیلتر MEMS به دو بخش تقسیم می‌شود:

(۱) طراحی رزوناتورها

(۲) طراحی بیم اتصال^۲ بین رزوناتورها

ابتدا طراحی رزوناتور دوسرگیردار

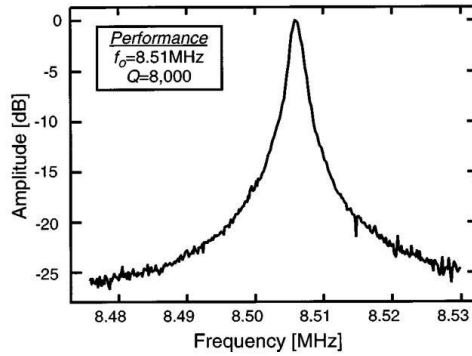
در این مقاله یک رزوناتور دوسرگیر دار با طول (Lr) 40.8 میکرومتر، عرض (Wr) 8 میکرومتر و فاصله هوایی بین بیم معلق و الکتروود زیر آن (d) 1300 آنگستروم طراحی شده است که در شکل ۳-۸ آن را می‌بینیم.



شکل ۳-۸: رزوناتور دوسرگیردار میکرومکانیکی

نتایج حاصل از اندازه‌گیری این رزوناتور نشان می‌دهد که این رزوناتور در فرکانس ۸,۵۱ مگاهرتز به ارتعاش در می‌آید و دارای ضریب کیفیت ۸۰۰۰ می‌باشد که در شکل ۳-۹ نشان داده شده است.

¹gain
²Coupling beam



شکل ۳-۹: نتیجه حاصل از اعمال سیگنال به رزوناتور دوسرگیردار

برای بیم اتصال نیز علاوه بر ابعاد بیم، محل اتصال بیم با رزوناتورها نیز در مقادیر خروجی و کیفیت فیلتر مؤثر است.

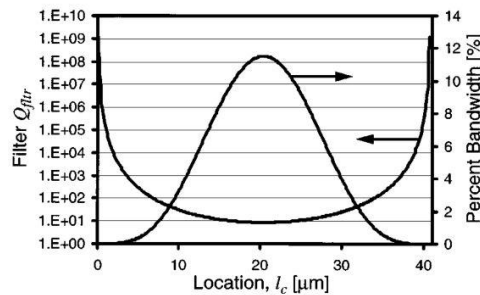
از آنجایی که جرم مؤثر رزوناتورها بر فرکانس رزونانس آنها اثر می‌گذارد، باید طول بیم را طوری انتخاب کنیم که در حال نوسان میزان تأثیر جرم بیم بر جرم رزوناتورها حداقل باشد. برای این منظور لازم است طول بیم ضریب فردی از طول موج فرکانس رزونانس فیلتر باشد.

در این مقاله طول بیم (L_s) برابر با 20.35 میکرومتر و عرض آن (W_s) برابر با 0.75 میکرومتر می‌باشد.

برای تعیین محل بهینه اتصال بیم به رزوناتورها، ابتدا نمودار تغییرات ضریب کیفیت و پهنای باند را بر

حسب محل اتصال بیم رسم کرده و سپس محل مناسب را تعیین کرده است. این نمودار را در شکل

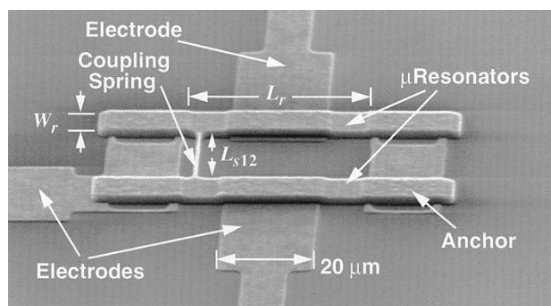
۳-۱۰ می‌بینیم.



شکل ۳-۱۰: نمودار ضریب کیفیت فیلتر و درصد پهنای باند بر حسب محل اتصال بیم در طول رزوناتور

براین اساس محل اتصال بیم به رزوناتور را در فاصله یک‌دهم از پایه رزوناتور در نظر گرفته است.

تصویر SEM از فیلتر ساخته شده را در شکل ۳-۱۱ مشاهده می‌کنیم.



شکل ۳-۱۱: تصویر SEM از فیلتر ساخته شده با استفاده از رزوناتورهای دوسرگیردار

جنس رزوناتورها و بیم اتصال بینشان از پلی سیلیکون می باشد که پارامترهای مکانیکی آن در جدول

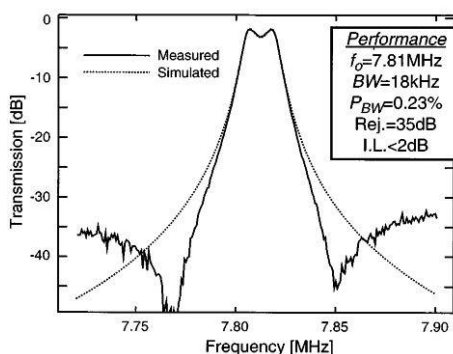
۳-۳ نشان داده شده است.

جدول ۳-۳: پارامترهای مکانیکی پلی سیلیکون

Material	Young's modulus(GPa)	Density (kg/m ³)	Poisson's ratio
Polysi	150	2300	0.22

نتایج حاصل از شبیه سازی و اندازه گیری این فیلتر در شکل ۳-۱۲ نشان داده شده است و همچنین

در جدول ۳-۴ مرتب شده اند.



شکل ۳-۱۲: نمودار تابع انتقال فیلتر متشکل از رزوناتورهای دوسرگیردار

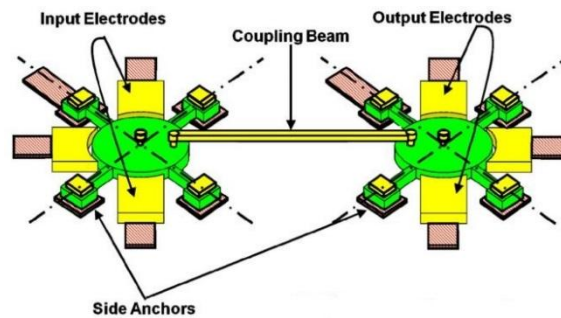
جدول ۳-۴: نتایج بدست آمده از فیلتر متشکل از رزوناتورهای دوسرگیردار

Parameter	Measured	Simulated
Coupling location	4.08	4.48
Center frequency	7.81 MHz	7.81 MHz
Bandwidth	18 KHz	18 KHz
Insertion loss	1.8 dB	1.8 dB
Resonator Q	8000	6000

۳-۲-۲-۲ فیلتر دیسکی با چهار پایه کناری

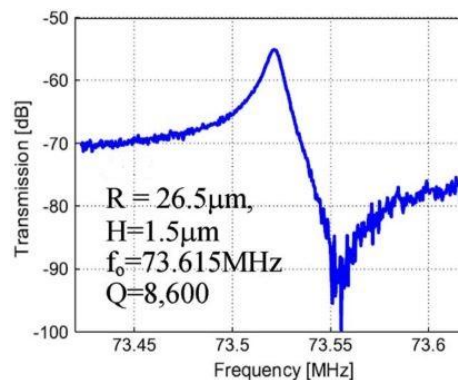
مقاله [۲۶] با اتصال دو رزوناتور دیسکی با چهار پایه کناری، که از قبل طراحی شده بودند، بوسیله

یک بیم اتصال اقدام به ساخت یک رزوناتور میکروالکترومکانیکی کرده است. در واقع هدف اصلی این مقاله طراحی یک بیم اتصال در محلی مناسب روی رزوناتور می باشد تا بهترین بازدهی را داشته باشد. فیلتر طراحی شده در این مقاله در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۳: فیلتر میکروالکترومکانیکی با استفاده از رزوناتور دیسکی با چهار پایه کناری

همانطور که گفته شد این مقاله از رزوناتوری که در مقالات دیگر طراحی شده بود استفاده کرده و فیلتر ساخته است. رزوناتور مورد نظر دارای طیف فرکانسی مطابق شکل ۳-۱۴ می باشد.



شکل ۳-۱۴: طیف فرکانسی رزوناتور دیسکی با چهار پایه کناری

هدفی که این مقاله برای کارش مشخص می کند، طراحی بیم اتصال به نحوی است که فیلتر نهایی دارای پهنای باند 100KHz باشد.

با توجه به رابطه ۳-۳ که در آن f_0 فرکانس مرکزی فیلتر که عموماً برابر با فرکانس ارتعاش رزوناتورها می باشد، ضریب کوپلینگ نرمالیزه (برابر با [۲۷] 0.7225)، k_c سختی بیم اتصال و k_f سختی محل اتصال بیم متصل کننده می باشد و با توجه به اینکه f_0 و k_{ij} مقادیری ثابت هستند، در نتیجه مقدار پهنای باند به میزان سختی بیم اتصال و سختی رزوناتور در محل اتصال بستگی دارد.

$$m_r = \frac{\rho\pi H \int_0^R r \left[\frac{\zeta}{2R\xi} J_1\left(\frac{\zeta r}{\xi R}\right) - \frac{\zeta}{2R\xi} J_3\left(\frac{\zeta r}{\xi R}\right) + \frac{B}{rA} J_2\left(\frac{\zeta r}{R}\right) \right]^2 dr}{\left[\frac{\zeta}{2R\xi} J_1\left(\frac{\zeta r_c}{\xi R}\right) - \frac{\zeta}{2R\xi} J_3\left(\frac{\zeta r_c}{\xi R}\right) + \frac{B}{r_c A} J_2\left(\frac{\zeta r_c}{R}\right) \right]^2} \quad 1-3$$

$$k_r = \omega_0^2 m_r \quad 2-3$$

$$BW = \frac{f_o k_c}{k_{ij} k_r} \quad 3-3$$

بنابراین محل اتصال بیم به رزوناتورها، نقش بسیار مهمی در تعیین میزان پهنای باند فیلتر نهایی خواهد داشت.

همانطور که از رابطه ۲-۳۹ مشخص است، جرم مؤثر با سرعت ارتعاش رابطه عکس دارد (البته در رابطه ۱-۳ مقدار نوشته شده در مخرج برابر با سرعت ارتعاش می باشد که به صورت گسترده شده نوشته شده است)، بنابراین هرچه سرعت ارتعاش در محل اتصال کمتر باشد جرم مؤثر در آن نقطه بیشتر، همچنین سختی آن نقطه نیز بیشتر خواهد بود و در نتیجه طبق رابطه ۳-۳ باعث کاهش پهنای باند خواهد شد. همانطور که در بالا توضیح داده شده است، از رابطه ۳-۳ استنباط شده که پهنای باند فیلتر به سختی رزوناتور و سختی بیم اتصال وابسته است.

روابط ۱-۳ و ۳-۳ نشان می دهند که سختی رزوناتور با کنترل ضخامت دیسک (H) و محل اتصال بیم متصل کننده (r_c) قابل کنترل است. سختی بیم اتصال نیز توسط ابعاد بیم قابل کنترل است (طول بیم l و پهنای بیم w و فاصله محل اتصال از مرکز دیسک r_c)، از آنجاییکه ضخامت دیسک توسط پروسه ساخت مشخص می شود، بنابراین آن را ثابت در نظر می گیریم. در نتیجه متغیرهای قابل تنظیم عبارتند از l, w, r_c .

$$k_c = \omega A \sqrt{\rho E} \quad 4-3$$

$$k_c = \frac{EI\alpha^3 (\sin \alpha + \sinh \alpha)}{L^3 (\cos \alpha \cosh \alpha - 1)} \quad , \quad \alpha = \sqrt[4]{\frac{\rho A \omega^2}{EI}} L \quad 5-3$$

محدوده پهنای بیم نیز بوسیله پروسه ساخت مشخص می شود. از طرفی محل اتصال بیم نیز مکانی درون دیسک و نزدیک به مرکز است. بنابراین طول بیم باید حداقل برابر با قطر دیسک باشد و علاوه بر این نباید زیاد بزرگ هم باشد، چرا که روابط ۳-۴ و ۳-۵ به دلیل رفتار غیر خطی شان غیر قابل حل خواهند شد.

به این ترتیب محدوده بالا و پایین طول بیم نیز بدست خواهد آمد.
 برای محل اتصال بیم نیز کاملاً مشخص است که محدوده بالایی آن شعاع دیسک خواهد بود.
 بنابراین خواهیم داشت:

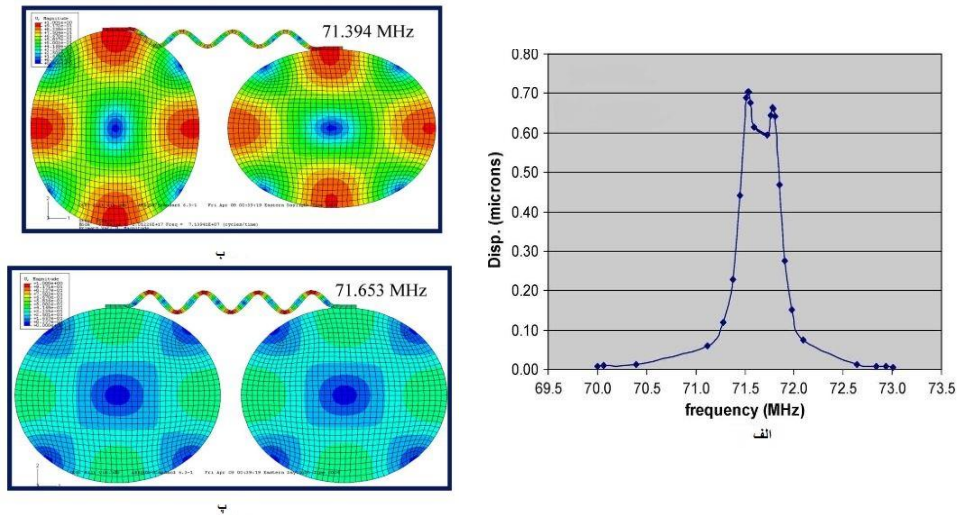
$$0.75 \leq w \leq 2.0 \mu m$$

$$55 \leq l \leq 90 \mu m$$

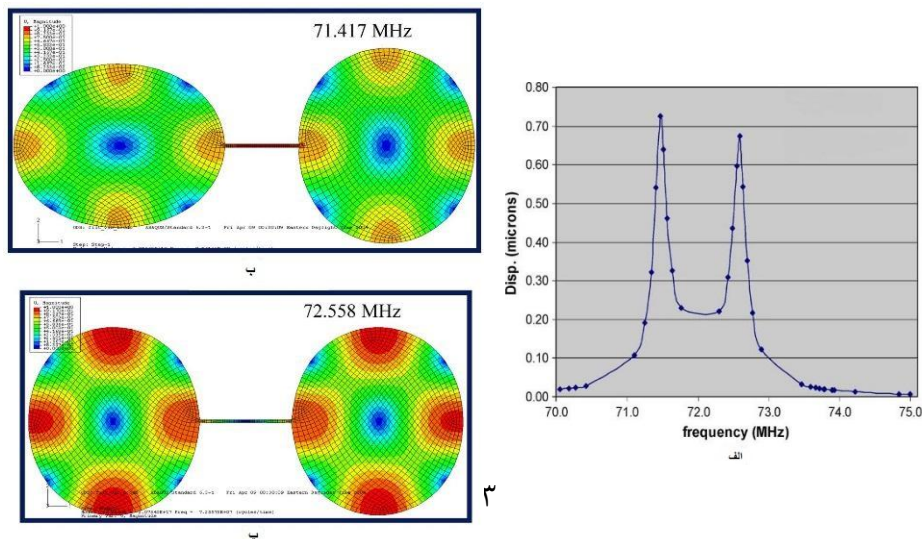
$$10 \leq r_c \leq 26.5 \mu m$$

با محدوده های مشخص شده در بالا شبیه سازی های مختلفی انجام شده که در انتها مقادیر بهینه شده برای سه پارامتر بالا بدست آمده است.

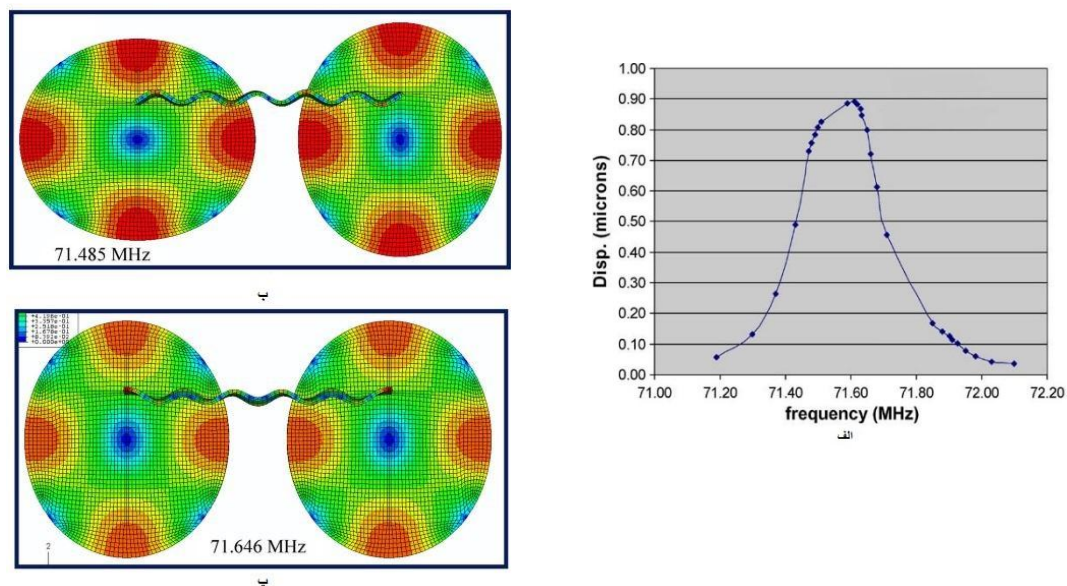
تصاویر شبیه سازیها در شکل ۳-۱۵ و شکل ۳-۱۶ و شکل ۳-۱۷ نشان داده شده اند.



شکل ۳-۱۵: شبیه سازی اول فیلتر دیسکی با پایه های کناری
 (الف) پاسخ فرکانسی (ب) حالت غیر همفاز (پ) حالت همفاز

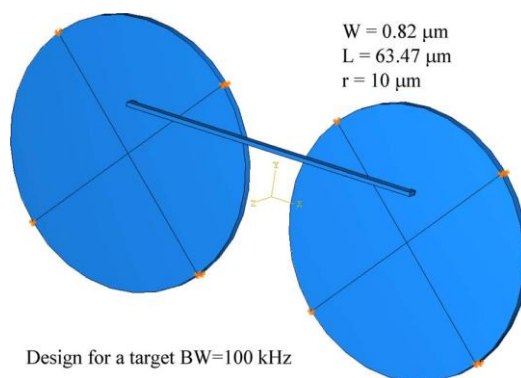


شکل ۳-۱۶: شبیه سازی دوم فیلتر دیسکی با پایه های کناری
الف) پاسخ فرکانسی ب) حالت غیر همفاز پ) حالت همفاز



شکل ۳-۱۷: شبیه سازی سوم فیلتر دیسکی با پایه های کناری
الف) پاسخ فرکانسی ب) حالت غیر همفاز پ) حالت همفاز

در این سه شکل اخیر می بینیم با تغییر مکان بیم اتصال توانسته است مقدار ریزل را در پاسخ فرکانسی ساختار کاهش داده و سپس از بین ببرد. نتایج بدست آمده از این شبیه سازی ها در شکل ۳-۱۸ و جدول ۳-۵ نشان داده شده است.



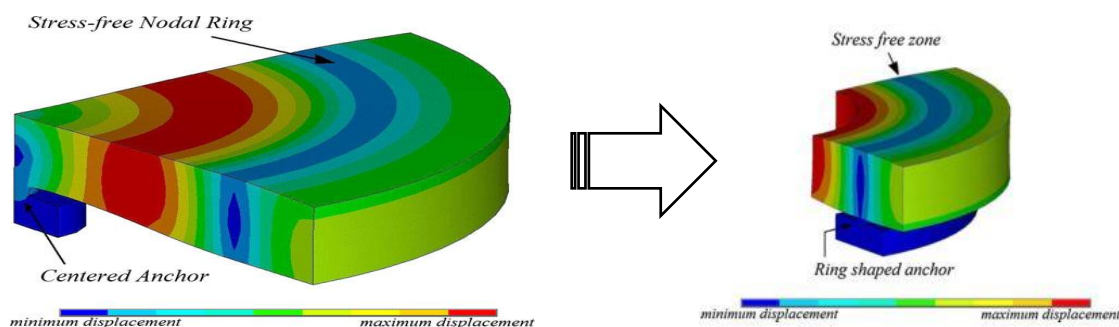
شکل ۳-۱۸: نتایج بدست آمده از شبیه سازی فیلتر دیسکی با پایه های کناری

جدول ۳-۵: نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی فیلتر دیسکی با پایه های کناری

material	f_0	BW	W	L	r
polysi	71.6MHz	100kHz	0.82um	63.47um	10um

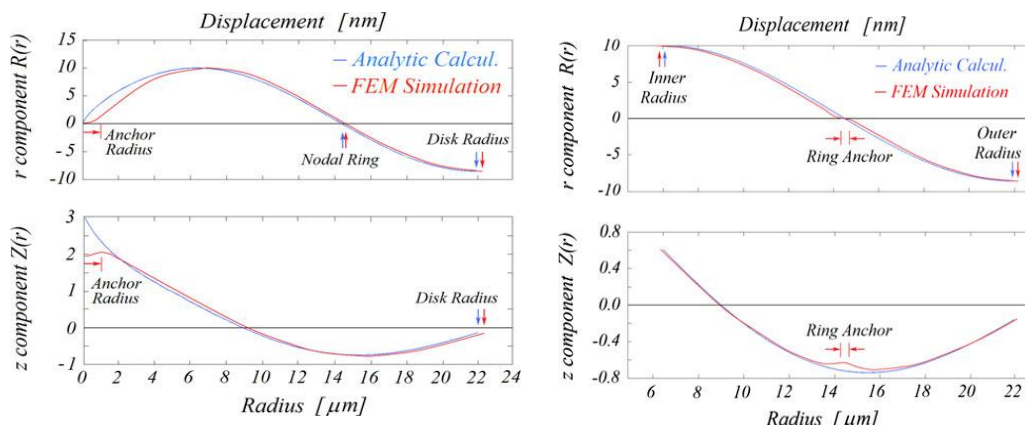
۳-۲-۲-۳ فیلتر دیسکی با تک پایه وسط

در این مقاله [۲۸] پایه وسط رزوناتور دیسکی حذف شده و جای آن یک پایه حلقه‌ای در شعاع گره-ای رزوناتور قرار گرفته است. همانند آنچه در شکل ۳-۱۹ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۹: قرار دادن پایه حلقه‌ای جای پایه‌ی مرکزی

با این کار ادعا شده است که میزان فشار وارد شونده به پایه کم می‌شود. برای اثبات این مدعا ساختار مورد نظر را در مختصات استوانه‌ای تحلیل کرده، با استفاده از استرس و استرین وارده بر یک جزء دیفرانسیلی و تعیین میزان نیروی وارده به این جزء دیفرانسیلی، معادله حاکم بر نوسان شعاعی و همچنین جابجایی های اندک عمودی رزوناتور را بدست آورده و با حل آنها در شرایط مرزی مناسب منحنی حاصل از این معادلات را با منحنی حاصل از شبیه‌سازی ساختار در یک صفحه مختصات، مقایسه کرده است که این نمودارها را در شکل ۳-۲۰ می‌بینیم.



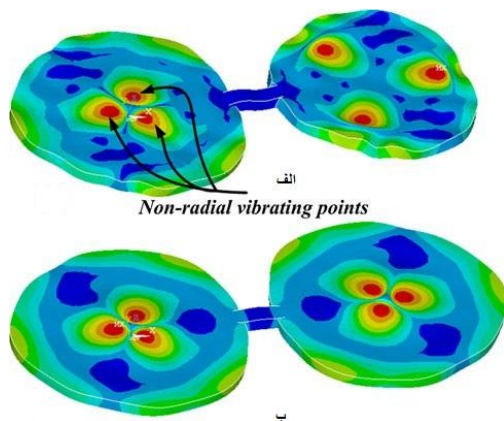
شکل ۳-۲۰: نمودار تحلیلی و شبیه‌سازی نوسان رزوناتور دیسکی با پایه وسط (چپ) و حلقه‌ای (راست)

هر اندازه منحنی حاصل از شبیه سازی (قرمز رنگ) به منحنی حاصل از تحلیل (آبی رنگ) نزدیک باشد، به این معنی است که ارتعاش دیسک به حالت ایده آل نزدیک تر است بنابراین میزان اختلاف این دو منحنی نشان دهنده میزان انحراف از حالت ایده آل می باشد.

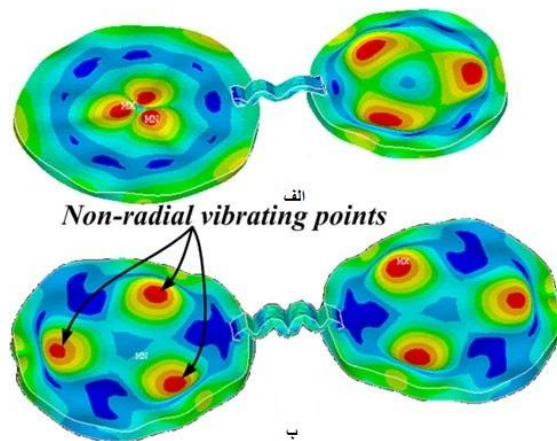
همانطور که در شکل ۳-۲۰ دیده می شود، میزان اختلاف دو منحنی در شکل سمت چپ در شعاع $R = 0 \mu m$ یعنی در مکان پایه، در مقایسه با اختلاف این دو منحنی در شکل سمت راست در شعاع $R \approx 15 \mu m$ که مکان پایه حلقه ای می باشد، بسیار بیشتر است که به معنی اختلاف ارتعاش پایه مرکزی از حالت ایده آل می باشد.

در ادامه به طراحی بیم اتصال و تعیین محل اتصال این بیم به رزوناتورها می پردازد. با توجه به وابستگی پهنای باند به سختی رزوناتور در محل اتصال بیم متصل کننده و سختی بیم اتصال (رابطه ۳-۳)، و همچنین رابطه معکوس پهنای باند با ضریب کیفیت، لازم است نسبت این دو پارامتر برای داشتن پهنای باند مناسب با ضریب کیفیت بالا، مشخص شود. برای حل این مشکل در [۱۲] و [۳۰] برای رزوناتورهای شانه ای و رزوناتورهای بیم روشی ارائه شده است که عبارت است از اتصال بیم در مکانی که در زمان ارتعاش سرعت ارتعاش بسیار پایینی دارد، که این امر موجب سختی بیشتر در محل اتصال شده و باعث می شود ضریب کیفیت بالاتر و پهنای باند باریکتر داشته باشیم.

لرزش رزوناتورهای دیسکی در یک حالت بسیار متقارن اتفاق می افتد از این رو استفاده از هر شی غیر متقارن در ساختار آن، باعث نقص جدی در ارتعاش آن می شود که موجب کاهش Q و افزایش IL خواهد شد. بنابراین انتخاب محل اتصال بیم متصل کننده علاوه بر اینکه باید حداقل سرعت ارتعاش را در زمان ارتعاش دارا باشد، باید طوری انتخاب شود که حالت تقارن رزوناتور نیز حفظ شود. نمونه هایی از محل اتصال نامناسب که در این مقاله شبیه سازی شده اند در شکل ۳-۲۱ و شکل ۳-۲۲ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۱: اتصال بیم به شعاع رزوناتور و ایجاد عدم تقارن (الف) غیر همفاز (ب) همفاز



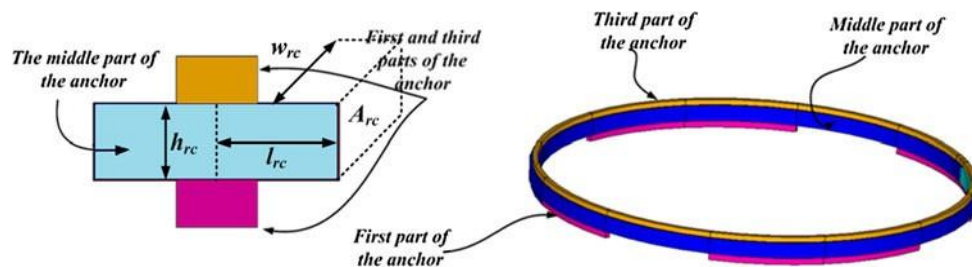
شکل ۳-۲۲: ایجاد برش در رزوناتور جهت نزدیک شدن به شعاع گره‌ای که باعث عدم تقارن شده است

در شکل‌های بالا نقاطی که به دلیل عدم تقارن در ساختار رزوناتور ارتعاش غیر شعاعی داشتند، مشخص شده‌اند.

بنابراین برای انتخاب مکانی برای اتصال بیم متصل کننده، باید به دو نکته توجه کنیم: الف) این مکان باید طوری انتخاب شود که تقارن رزوناتورها از بین نرود ب) در عین حال کمترین سرعت ارتعاش را در زمان ارتعاش دارا باشد.

با توجه به این توضیحات، مکانی که در این مقاله پیشنهاد می‌شود، روی پایه حلقه‌ای می‌باشد که هم خارج از دیسک بوده و تقارن را از بین نمی‌برد و هم بعلت قرار گرفتن در محل شعاع گره‌ای دیسک، کمترین سرعت و به موجب آن بیشترین سختی را خواهد داشت.

برای اتصال بیم به پایه، پایه را مطابق آنچه در شکل ۳-۲۳ نشان داده شده است، به سه قسمت تقسیم می‌کند.



شکل ۳-۲۳: تقسیم پایه حلقه‌ای به سه قسمت

ابعاد قسمت اول و سوم یکسان و پهنایی برابر با شعاع گره‌ای رزوناتور دارند، اما قسمت دوم طوری

طراحی شده است که برای محل اتصال مناسب باشد.

بنابراین سختی محل اتصال که طبق رابطه ۳-۳ از پارامترهای تأثیر گذار در پهنای باند فیلتر خواهد بود، سختی قسمت دوم پایه است که می توان آن را از رابطه ۳-۶ بدست آورد.

$$k_{rc} = \frac{\pi^2 EA_{rc}}{l_{rc}} \quad ۶-۳$$

در اینجا A_{rc} مساحت قسمتی از بخش دوم پایه که از پهلو دیده می شود که به پهنای محل اتصال و ارتفاع بخش دوم پایه وابسته است و l_{rc} نصف طول بیم می باشد. با توجه به طول بسیار کوتاه این بیم لرزشی طولی، می توان فهمید که سختی این قسمت از محل کوپل بسیار زیاد است. در ادامه مقاله به طراحی بیم اتصال می پردازد.

این بیم به صورت موجی ارتعاش می کند و روابط توصیف کننده برای آن به صورت زیر است [۳۱]:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ M_1 \\ V_1 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} H_9 & -H_8(\frac{\alpha}{l}) & -H_7(\frac{k\alpha^3}{j\omega l^3}) & -H_{10}(\frac{k\alpha^2}{j\omega l^2}) \\ H_7(\frac{l}{\alpha}) & H_9 & H_{10}(\frac{k\alpha^2}{j\omega l^2}) & -H_8(\frac{k\alpha}{j\omega l}) \\ H_8(\frac{j\omega l^3}{k\alpha^3}) & H_{10}(\frac{j\omega l^2}{k\alpha^2}) & H_9 & -H_7(\frac{l}{\alpha}) \\ -H_{10}(\frac{j\omega l^2}{k\alpha^2}) & -H_7(\frac{j\omega l}{k\alpha}) & H_8(\frac{\alpha}{l}) & H_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_2 \\ M_2 \\ V_2 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad ۷-۳$$

در اینجا F, M, V, θ به ترتیب نیرو، خمش لحظه ای، سرعت و سرعت زاویه ای می باشند. H_i ها تابعی از α هستند، l طول بیم، ω فرکانس زاویه ای می باشند. k, α از روابط ۳-۸ و ۳-۹ بدست می آیند.

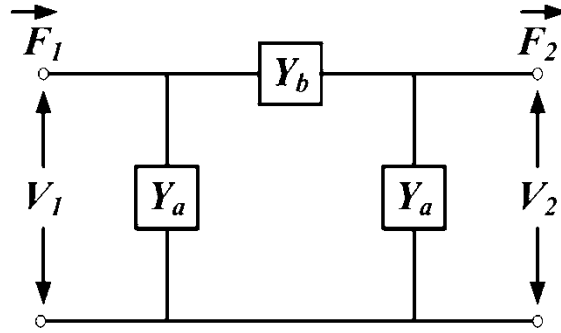
$$\alpha = l_s \left(\frac{\rho_0 W_s h \omega^2}{EI_s} \right)^{0.25} \quad ۸-۳$$

$$K = EI_s = E \frac{W_s h^3}{12} \quad ۹-۳$$

چون بیم در محل اتصال خمش لحظه ای و سرعت زاویه ای ندارد، رابطه ۳-۷ به صورت زیر ساده می شود.

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ V_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{H_6}{H_7} & -j \left(\frac{\omega l^3}{\alpha^3 K} \right) \frac{H_3}{H_7} \\ \frac{1}{-j} \left(\frac{\alpha^3 K}{\omega l^3} \right) \left(\frac{2H_1}{H_7} \right) & \frac{H_6}{H_7} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_2 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad ۱۰-۳$$

مدار معادل بیم اتصال بوسیله پارامترهای Y در شکل ۳-۲۴ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۴: مدار معادل بیم اتصال

در شکل ۳-۲۴ مقادیر به صورت روابط ۳-۱۱ و ۳-۱۲ تعریف می شوند.

$$\begin{cases} Y_a = j \left(\frac{K \alpha^3}{\omega l^3} \right) \left(\frac{H_6 - H_7}{H_3} \right) \\ Y_b = j \left(\frac{K \alpha^3}{\omega l^3} \right) \left(\frac{H_7}{H_3} \right) \end{cases} \quad 11-3$$

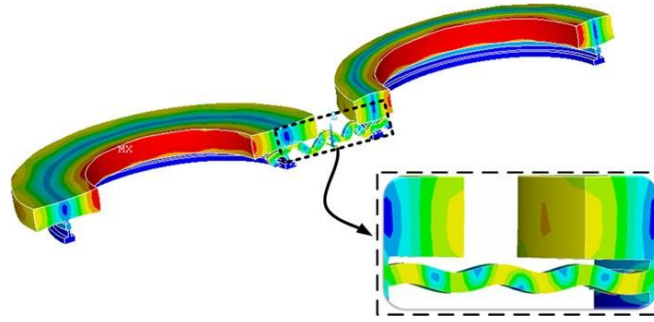
$$\begin{cases} H_3 = \cos \alpha \cdot \cosh \alpha - 1 \\ H_6 = \sin \alpha \cosh \alpha + \cos \alpha \sinh \alpha \\ H_7 = \sin \alpha + \sinh \alpha \end{cases} \quad 12-3$$

برای جلوگیری از اثر بارگذاری جرم بیم اتصال و ارضای معیار ربع طول موج باید شرط $Y_a = -Y_b$ را داشته باشیم و از این رو $H_6 = 0$.

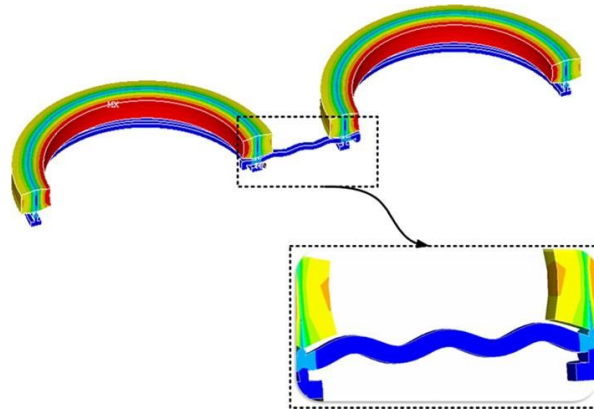
سختی بیم اتصال، که می تواند برای محاسبه پهنای بیم اتصال برای تعریف طول و ضخامت مورد استفاده قرار گیرد، به صورت زیر می باشد [۳۲]:

$$k_c = \frac{EI_s \alpha^3 (\sin \alpha + \sinh \alpha)}{l^3 (\cos \alpha \cosh \alpha - 1)} \quad 13-3$$

بنابراین باتوجه به اینکه h از طریق محدودیت های ساخت بدست می آید و طول بیم l نیز باید ضریب فردی از طول موج فرکانس مرکزی فیلتر باشد، و با مشخص شدن α از معادله $H_6 = 0$ می توان سایر پارامترها از جمله W_s, I_s, K را بدست آورد و به این ترتیب طراحی بیم اتصال نیز به پایان می رسد. در ادامه مقاله مورد نظر ساختار نهایی را که در آن از بیم اتصال طراحی شده در محل تعیین شده، استفاده شده بود شبیه سازی کرده و در دو حالت همفاز و غیرهمفاز مشاهده شده که هیچ عدم تقارنی در ارتعاش دیسکها ایجاد نشده و به صورت کاملاً شعاعی ارتعاش می کنند. که این موضوع در شکل ۳-۲۵ و شکل ۳-۲۶ نشان داده شده است.



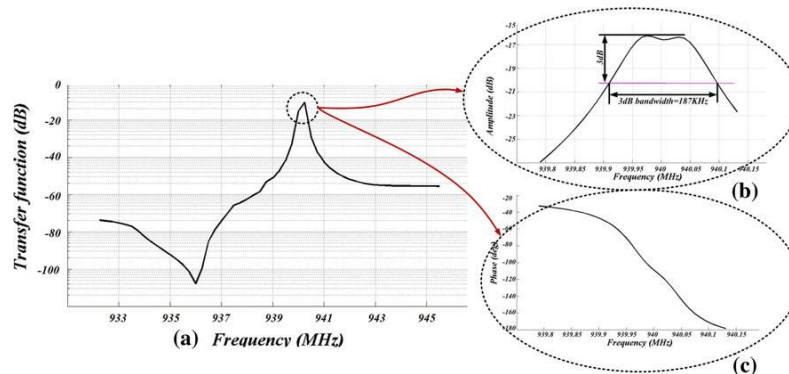
شکل ۳-۲۵: ارتعاش شعاعی غیرهمفاز فیلتر دیسکی با پایه حلقوی



شکل ۳-۲۶: ارتعاش شعاعی همفاز فیلتر دیسکی با پایه حلقوی

در پایان با شبیه‌سازی ساختار به نتایج نشان داده شده در شکل ۳-۲۷ و جدول ۳-۶ دست پیدا کرده

است.



شکل ۳-۲۷: پاسخ فرکانسی فیلتر دیسکی با پایه حلقوی $f_o = 940\text{MHz}$, $BW = 187\text{KHz}$

جدول ۳-۶: نتایج حاصل از شبیه‌سازی فیلتر دیسکی با پایه حلقوی

material	Q_{filter}	f_o	BW	delay time	IL
polysi	5027	940MHz	187KHz	<500ns	<17dB

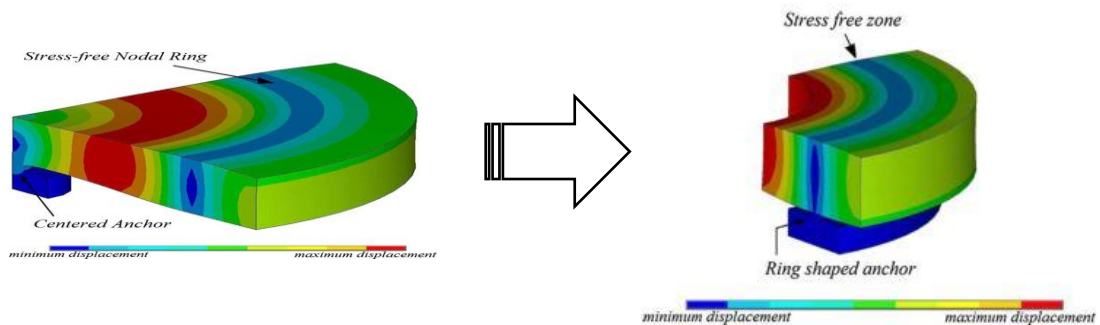
فصل چهارم

تحلیل و طراحی رزوناتورهای پایه حلقوی

۴ فصل چهارم: تحلیل و طراحی رزوناتورهای پایه حلقوی

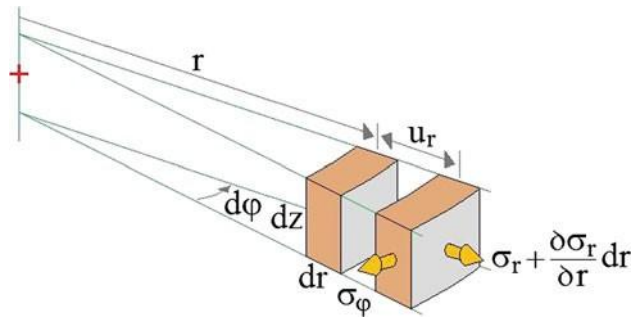
۴-۱ تحلیل و مدلسازی رزوناتور دیسکی پایه حلقوی

براساس آنچه تا کنون گفته شده، طراحی یک فیلتر میکروالکترومکانیکی دو بخش اصلی دارد که عبارتند از طراحی رزوناتور و طراحی بیم اتصال بین رزوناتورها. هرچند یک رزوناتور به تنهایی نیز یک فیلتر می‌باشد و عمل فیلترینگ را انجام می‌دهد. ما در این بخش به تحلیل کامل یک رزوناتور دیسکی با پایه حلقوی پرداخته و نحوه بدست آوردن معادله دیفرانسیل توصیف کننده آن را نشان می‌دهیم. برای شروع مقاله باقلانی و همکاران که در سال ۲۰۱۰ به چاپ رسیده است را در نظر می‌گیریم. در این مقاله مراحل کامل طراحی یک رزوناتور دیسکی با پایه حلقه‌ای توضیح داده شده است. در این مقاله با حذف پایه مرکزی و قرار دادن پایه حلقوی در شعاع گره‌ای رزوناتور، در واقع فرکانس ارتعاش مد دوم رزوناتور در حالت پایه مرکزی، فرکانس ارتعاش اصلی رزوناتور با پایه حلقوی به حساب می‌آید.



شکل ۴-۱: حذف پایه مرکزی و قرار دادن پایه حلقوی در شعاع گره‌ای رزوناتور

برای طراحی این رزوناتور بخش اصلی کار محاسبه شعاع خارجی و محاسبه شعاع قرار گرفتن پایه حلقوی می‌باشد و لازمه این کار نیز داشتن یک معادله دیفرانسیل است که بتواند ارتعاش شعاعی دیسک را توصیف کند. بنابراین ابتدا باید معادله دیفرانسیل توصیف کننده ارتعاش دیسک را بدست آوریم. برای این کار با توجه به شکل دایره‌ای رزوناتور، با استفاده از مختصات استوانه‌ای و در نظر گرفتن یک جزء دیفرانسیلی از این رزوناتور به تحلیل آن می‌پردازیم. همانند آنچه در شکل ۴-۲ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲: جزء دیفرانسیلی از رزوناتور دیسکی در مختصات استوانه‌ای

فاصله حجم دیفرانسیلی از محور Z قبل از هرگونه جابجایی، r می باشد و u_r جابجایی شعاعی آن است. به دلیل تقارن، استرس (σ) و استرین (ε) کلی با جهت‌های سیستم مختصات استوانه‌ای مطابقت دارند، بنابراین هیچ استرس و استرین برشی (غیر از جهت‌های اصلی) نمی‌تواند وجود داشته باشد و هیچ استرسی در جهت Z انتظار نداریم.

دامنه استرس نرمال اعمال شده به هر دو سطح دیفرانسیلی در جهت ϕ یکسان (σ_ϕ) اما در جهت های مخالف هستند، بنابراین یکدیگر را حذف می‌کنند. علاوه بر این استرس اعمال شده به هر دو سطح دیفرانسیلی در جهت r متفاوت اند و تفاوتشان باعث ایجاد شتاب خواهد شد.

با توجه به همه توضیحات گفته شده می‌توان نیروی اعمال شده به سطح بیرونی جزء دیفرانسیلی را به صورت روابط ۴-۱ نوشت.

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta f_r = \left[\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} dr \right] ds = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} (r + u_r) dr d\phi dz \\ \delta f_r = \rho_0 \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} dV = \rho_0 \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} (r + u_r) dr d\phi dz \end{array} \right. \Rightarrow \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = \rho_0 \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} \quad 1-4$$

استرین در جهت های ϕ و r به صورت رابطه ۴-۲ می‌باشد (نسبت تغییرات طول به طول اولیه):

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_\phi = \frac{(r + u_r) d\phi - r d\phi}{r d\phi} = \frac{u_r}{r} \\ \varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r} \end{array} \right. \quad 2-4$$

رابطه بین استرس و استرین در صفحه $r\phi$ را نیز می‌توان به صورت رابطه ۴-۳ نوشت.

$$\begin{bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\phi \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu \\ \nu & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\phi \end{bmatrix} \quad 3-4$$

در اینجا E و ν به ترتیب ضریب یانگ مدولوس و نسبت پواسن مواد دیسک را معرفی می‌کنند. با استفاده از روابط ۴-۳ می‌توان استرس در جهت r و ϕ را به صورت معادلات ۴-۴ باز نویسی کرد:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{E}{1-v^2} \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + v \frac{u_r}{r} \right) \\ \sigma_\varphi = \frac{E}{1-v^2} \left(v \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} \right) \end{cases} \quad 4-4$$

حال اگر از رابطه 4-4 یک مشتق جزئی نسبت به r بگیریم به رابطه 5-4 می‌رسیم.

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = \frac{E}{1-v^2} \left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{v}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{v}{r^2} u_r \right) \quad 5-4$$

با جایگزین کردن رابطه 1-4 در رابطه 5-4 به رابطه 6-4 خواهیم رسید.

$$\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{v}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{v}{r^2} u_r = \frac{1}{v_s} \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} \quad 6-4$$

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{\rho_0(1-v^2)}}$$

در اینجا v_s سرعت موج صوتی (فاز) در مواد دیسک می باشد.

یکی از روشهای حل معادلات دیفرانسیل جزئی، روش تفکیک می باشد. در اینجا تابع جابجایی را به

قسمت دامنه و فاز که به ترتیب تابعی از شعاع و زمان می باشند تفکیک می‌کنیم. مانند معادله 7-4.

$$u_r(r, t) = R(r)T(t) \quad 7-4$$

با توجه به مستقل بودن متغیرها نسبت به هم، با قرار دادن معادله 7-4 در رابطه 6-4 به رابطه 8-4 برای

بخش وابسته به زمان خواهیم رسید:

$$\frac{d^2 T(t)}{dt^2} = -k_r^2 v_s^2 T(t) \quad 8-4$$

$$k_r = \frac{2\pi}{\lambda_s}$$

k_r, λ_s به ترتیب معرف عدد موج و طول موج می‌باشند.

می دانیم:

$$f = \frac{v_s}{\lambda_s} \Rightarrow \lambda_s = \frac{v_s}{f} \quad 9-4$$

بنابراین:

$$k_r = \frac{2\pi}{\lambda_s} \Rightarrow k_r = \frac{2\pi f}{v_s} \Rightarrow \omega_r = k_r v_s \quad 10-4$$

در نتیجه رابطه ۴-۸ را می توان به صورت رابطه ۴-۱۱ نوشت:

$$\frac{d^2 T(t)}{dt^2} = -\omega_r^2 T(t) \quad 11-4$$

$$\omega_r = 2\pi f_r = k_r v_s = k_r \sqrt{\frac{E}{\rho_0(1-v^2)}} \quad 12-4$$

v نسبت پواسن ماده به کار رفته می باشد.

برای بخش وابسته به شعاع نیز به معادله ۴-۱۳ خواهیم رسید:

$$r^2 \frac{d^2 R(r)}{dr^2} + rv \frac{dR(r)}{dr} + (k_r^2 r^2 - v)R(r) = 0 \quad 13-4$$

بنابراین به معادله دیفرانسیل توصیف کننده نوسان شعاعی دیسک دست پیدا خواهیم کرد و از این پس می توانیم محاسبات طراحی را با استفاده از آن انجام دهیم.

۴-۲ تأثیر جنس مواد بر فرکانس رزونانس و ضریب کیفیت

همانطور که از رابطه ۳-۷۰ در فصل ۳ مشخص است، فرکانس ارتعاش رزوناتور دیسکی به شعاع دیسک و جنس مواد بکار رفته در ساخت آن بستگی دارد. این رابطه برای رزوناتورهای دیسکی با پایه حلقوی به صورت رابطه ۴-۱۴ تعریف می شود که در آن فرکانس ارتعاش به اختلاف شعاع خارجی و داخلی آن وابسته می باشد.

$$f_0 = \frac{\lambda_i}{2\pi(r_{out} - r_{in})} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-v^2)}} = \frac{\lambda_i}{2\pi(r_{out} - r_{in})} v_s \quad 14-4$$

بنابراین فرکانس ارتعاش یک رزوناتور دیسکی، با تغییر شعاع و جنس مواد تغییر می کند. با توجه به اینکه تغییر شعاع دیسک، با محدودیتهای تکنولوژی ساخت روبرو می باشد، تغییر جنس مواد رزوناتور، روش مناسبی برای افزایش فرکانس ارتعاش آن به حساب می آید. برای هر ماده پارامتری به نام سرعت موج (v_s) صوتی یا سرعت فاز، به صورت رابطه ۴-۶ تعریف می شود که طبق رابطه ۴-۱۴ ارتباط مستقیمی با فرکانس ارتعاش دیسک دارد. بنابراین برای داشتن یک رزوناتور با فرکانس ارتعاش بالا، لازم است در ساخت آن از موادی استفاده کنیم که دارای سرعت صوتی بیشتری در بین مواد باشد.

در میان مواد قابل لایه نشانی^۱، الماس^۲ در حالت چند کریستالی دارای بیشترین سرعت صوتی می- باشد. ویژگی این ماده برای مقایسه با مواد دیگر در جدول ۴-۱ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱: مقایسه ویژگیهای مکانیکی مواد

material	Young's Modulus(GPa)	Density (kg/m ³)	Poisson's ratio	Acoustic velocity
Silicon Carbide[27]	410	3100	0.14	11615
Single crystal silicon[28]	165	2330	0.22	8626
Poly diamond[29]	1143	3512	0.07	18076

همچنین برای هر ماده یک امپدانس صوتی^۳ به صورت رابطه ۴-۱۵ تعریف می شود [۳۵]

$$Z = \rho \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\rho E} \quad ۴-۱۵$$

از طرفی می دانیم برای انتقال حداکثر توان از یک مدار به مدار دیگر باید تطبیق امپدانس وجود داشته باشد، وقتی برای ساخت دیسک و پایه متصل به آن از دو نوع ماده متفاوت استفاده می کنیم و با توجه به اینکه این دو نوع ماده دارای امپدانس صوتی متفاوت می باشند، در مرز اتصال این مواد یک عدم تطبیق امپدانس ایجاد می شود که مانع از انتقال حداکثری توان خواهد شد، در نتیجه توان کمتری از طریق پایه ها به بستر و از آنجا به خارج از سیستم منتقل می شود و این یعنی ضریب کیفیت بالاتر.

بنابراین با مشخص شدن مواد مورد استفاده و ویژگیهای مکانیکی آنها، معادله دیفرانسیل توصیف

کننده رزوناتور را برای فرکانس پیش بینی شده و ضریب کیفیت مناسب طراحی می کنیم.

در اینجا فرکانس را ۱٫۹ گیگاهرتز و ضریب کیفیت را برابر با ۲۰۰۰۰ در نظر گرفته ایم.

پس از حل معادله دیفرانسیل ۴-۱۳، برای پیدا کردن ثوابت آن لازم است از شرایط مرزی در شعاع

داخلی یا خارجی دیسک استفاده کنیم، بنابراین لازم است یک مقدار دلخواه برای شعاع داخلی و همچنین

حداکثر دامنه ارتعاش R_0 ، متناسب با محدودیت های موجود، فرض کنیم تا بتوانیم با تعریف شرایط مرزی

¹Deposition

²Diamond

³Acoustic impedance (میزان مخالفتی که یک سیستم به جریان صوتی نشان می دهد، زمانیکه یک فشار صوتی به آن اعمال می شود).

معادله را به صورت کامل حل کنیم.

با توجه به مشخص بودن فرکانس ارتعاش و در دست بودن رابطه فرکانس با شعاع دیسک (رابطه

$$15-4) \text{ می توان اختلاف شعاع خارجی و داخلی را بدست آورد } (r_{out} - r_{in}).$$

جواب معادله دیفرانسیل ۴-۱۳ تا چند نوسان اول تقریباً به صورت سینوسی تغییر می کند، بنابراین

$$\text{می توان } \frac{r_{out} - r_{in}}{2} \text{ را بعنوان شعاع داخلی در نظر گرفت.}$$

جهت تعیین مقداری برای حداکثر دامنه ارتعاش نیز یک محدوده بالا و یک محدوده پایین وجود

دارد.

حداکثر مقدار R_0 باید کمتر از یک سوم فاصله هوایی بین رزوناتور و الکتروود باشد ($R_0 < d_0/3$)، زیرا

اگر در یک خازن MEMS با یک صفحه متحرک دامنه ارتعاش از این مقدار عبور کند، صفحه متحرک به

صورت آنی به صفحه ثابت می چسبد که این امر در رزوناتورها موجب ناپایداری آنها خواهد شد.

برای مقدار حداقل R_0 نیز باید آن را طوری در نظر بگیریم که تغییرات خازن ایجاد شده حاصل از تغییرات

فاصله هوایی قابل شناسایی باشد.

برای مثال در مقاله مورد بحث که فاصله هوایی بین رزوناتور و الکتروود را $d_0 = 100nm$ در نظر گرفته است،

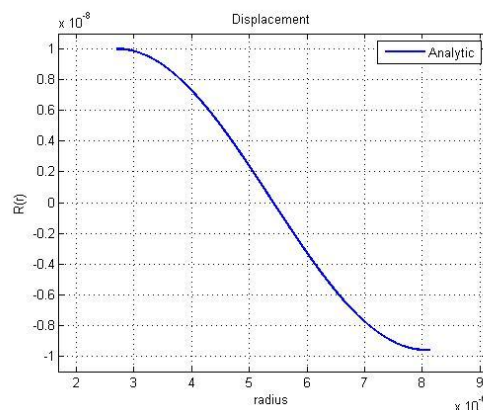
R_0 را $10nm$ فرض کرده است.

پس از فرض شعاع داخلی و حداکثر دامنه ارتعاش، شرایط مرزی را مطابق روابط ۴-۱۶ در نظر می گیریم .

$$R(r_{in}) = R_0, \quad \left. \frac{dR(r)}{dr} \right|_{r=r_{in}} = 0 \quad 16-4$$

ما در طراحی خود با فرض $r_{in} = 2.71\mu m$ و $d_0 = 90nm$ و $R_0 = 10nm$ با استفاده از نرم افزار متلب معادله

دیفرانسیل ۴-۱۳ را حل کرده و منحنی ارتعاش دیسک بر حسب شعاع را در شکل ۴-۳ رسم کرده ایم.



شکل ۴-۳: جابجایی شعاعی بر حسب شعاع در حل تحلیلی بوسیله متلب

در این نمودار مشاهده می شود میزان دامنه ارتعاش در شعاع خارجی اندکی کمتر از دامنه ارتعاش در شعاع

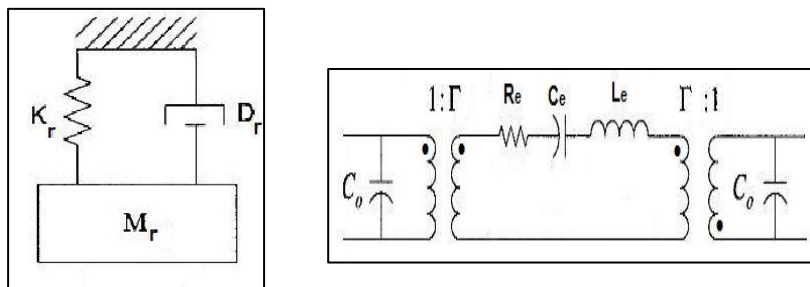
داخلی می باشد که در شبیه سازی ساختار در Ansys نیز این مسأله کاملاً قابل مشاهده است. (به صورت رنگ بندی شده در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است)

۳-۴ مدار معادل مکانیکی و الکتریکی

نحوه بدست آوردن مدار معادل مکانیکی و الکتریکی این نوع از رزوناتورها و همچنین روابط لازم برای بدست آوردن مقادیر این مدارهای معادل در بخش ۳-۴ به صورت کامل گفته شده است. این مقادیر با استفاده از نرم افزار متلب بدست آمده و در جدول ۴-۲ نمایش داده شده اند. در شکل ۴-۴ نیز مدار معادل مکانیکی و الکتریکی آن را مشاهده می کنیم.

جدول ۲-۴: مقادیر المانهای مدار معادل مکانیکی و الکتریکی

Mechanical	m_r	0.16194 pg
	k_r	18.477 MN/m
	D_r	$8.6489 * 10^{-8}$
Electrical	R_e	0.086489 $\mu\Omega$
	L_e	0.16194 pH
	C_e	54.123 pF
	C_0	5.5787 fF
	Γ	$1.2397 * 10^{-6}$

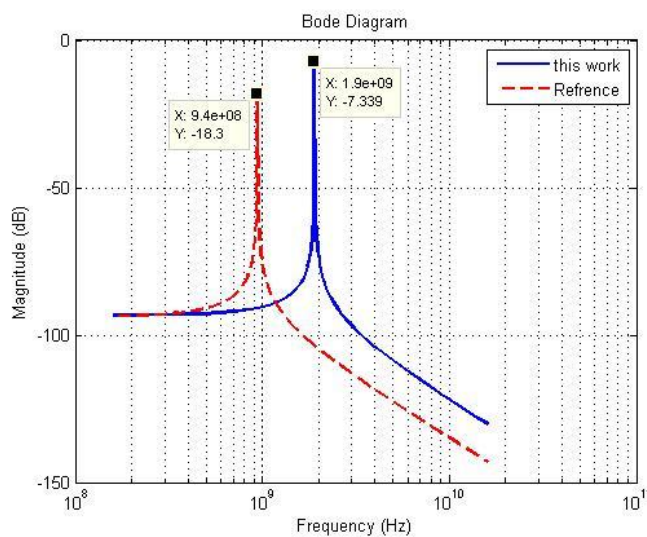


شکل ۴-۴: مدار معادل الکتریکی و مکانیکی رزوناتور دیسکی

۴-۴ شبیه سازی و بررسی نتایج

۱-۴-۴ بوسیله نرم افزار متلب

پس از محاسبه مقادیر المانهای مدار معادل مکانیکی و الکتریکی بوسیله نرم افزار متلب (جدول ۴-۲)، و رسم مدار معادل مکانیکی و الکتریکی (شکل ۴-۴)، تابع انتقال مدار الکتریکی معادل را با استفاده از این نرم افزار در شکل ۴-۵ رسم کرده و با تابع انتقال رزوناتور مرجع مقایسه کرده ایم.



شکل ۴-۵: مقایسه تابع انتقال رزوناتور طراحی شده با تابع انتقال رزوناتور مرجع

این مقایسه را به طور دقیق تر در جدول ۴-۳ آورده ایم.

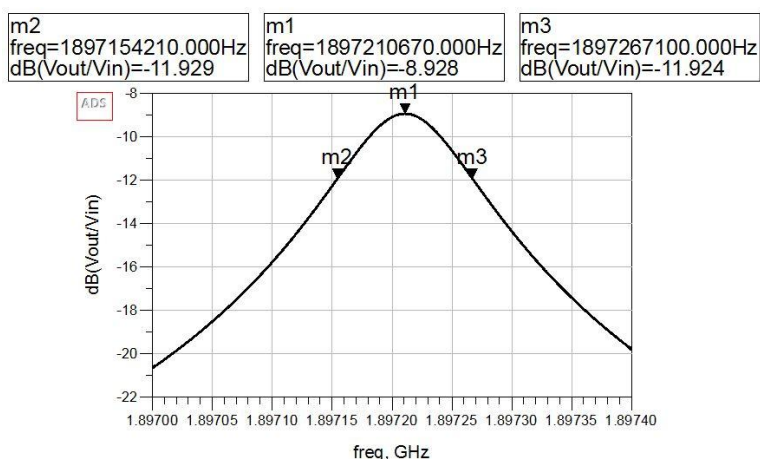
جدول ۴-۳: مقایسه مقادیر شبیه سازی شده رزوناتور طراحی شده با نمونه مشابه قبلی در متلب

	F_0	Q	V_p	K_r	IL
طرح پیشنهادی	1.9GHz	20000	25 v	17.8 MN/m	7.39
مرجع	940MHz	6000	12 v	9.5 MN/m	18.3

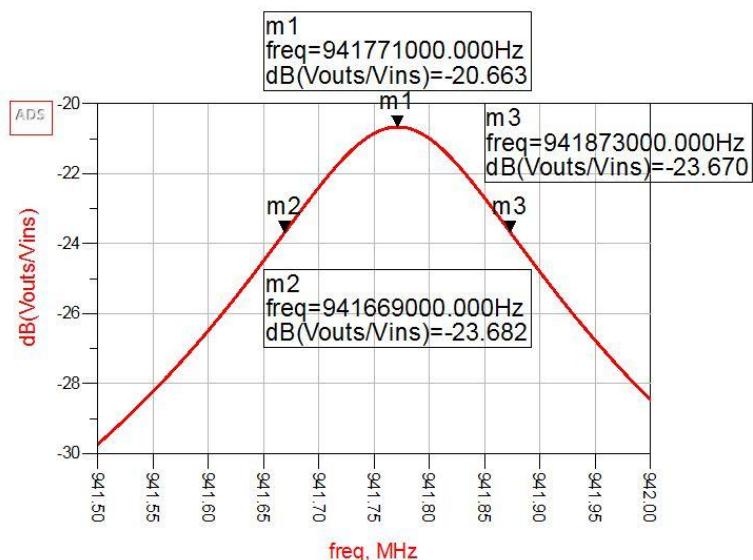
در اینجا مشاهده می شود که در ساختار طراحی شده در این پایان نامه، فرکانس ارتعاش، ضریب کیفیت و IL بهبود قابل ملاحظه ای پیدا کرده اند اما ولتاژ بایاس کمی بالاتر از ساختار قبلی شده است که علت آن، با توجه به تغییر جنس ماده از سیلیکون به الماس و بالا بودن میزان سختی (K_r) الماس نسبت به سیلیکون می باشد.

شبيهه سازى بوسيله نرم افزار ADS ۲-۴-۴

با استفاده از مقادير المان هاى مدار معادل الكتريكي كه با استفاده از نرم افزار متلب بدست آمده اند، مدار معادل ساختار را در نرم افزار ADS شبيهه سازى مى كنيم. با شبيهه سازى اين مدار، پاسخى شبيهه به پاسخ نرم افزار متلب بدست مى آيد. با مقايسه اين نتايج با مقادير بدست آمده از شبيهه سازى مدار معادل رزوناتور كاملاً سيليكونى، مشاهده مى شود رزوناتور طراحي شده از نظر فرکانس رزونانس، ضريب كيفيت و پارامترهاى پراكنده گى شرايط مناسب ترى نسبت به نمونه طراحي شده در مقاله مرجع دارد.



شکل ۴-۶: فرکانس نوسان، پهناى باند و ضريب كيفيت رزوناتور طراحي شده



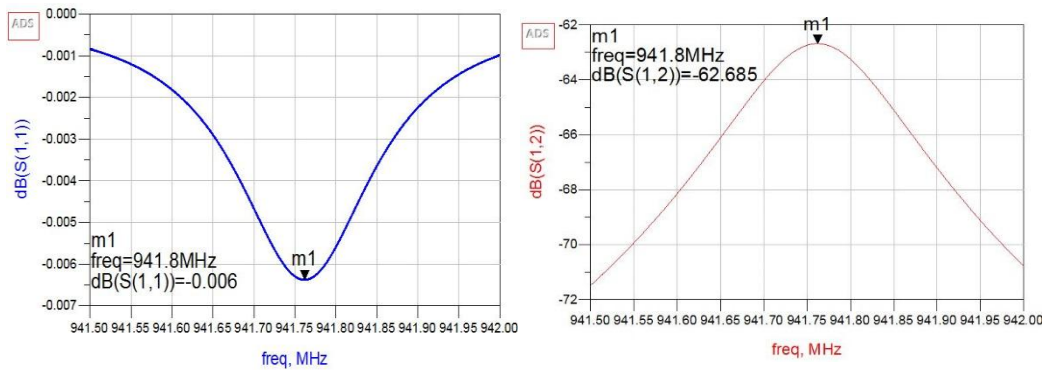
شکل ۴-۷: فرکانس نوسان، پهناى باند و ضريب كيفيت رزوناتور مرجع

مقايسه اين مقادير را در جدول ۴-۴ مشاهده مى كنيم.

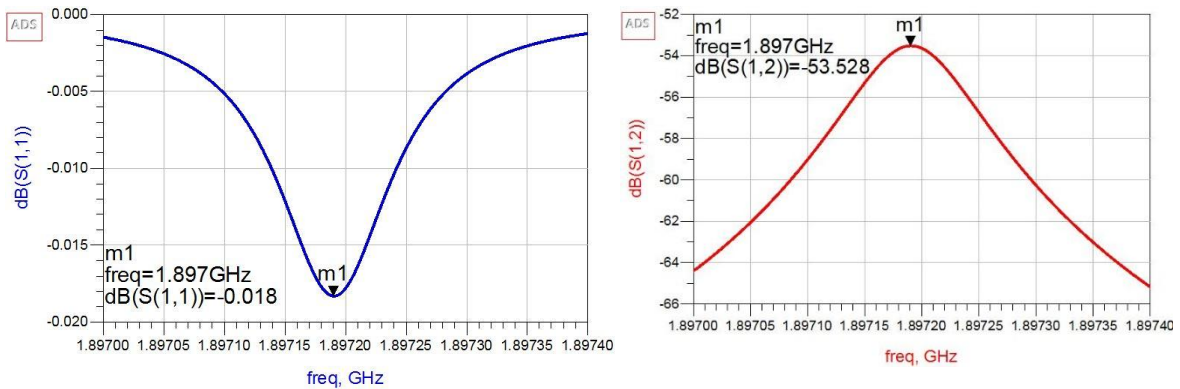
جدول ۴-۴: مقایسه نتایج شبیه سازی با ADS

ضریب کیفیت	پهنای باند	فرکانس رزونانس	رزوناتور طراحی شده در پایان نامه
۱۶۸۰۳	۱۱۲,۸۹ کیلوهرتز	۱,۸۹۷ گیگاهرتز	رزوناتور طراحی شده در پایان نامه
۴۶۱۶	۲۰۴ کیلوهرتز	۹۴۱ مگا هرتز	رزوناتور مرجع

در پارامترهای پراکندگی نیز طرح پیشنهادی در مقایسه با رزوناتور مرجع وضعیت مناسب تری دارد. هرچند اگر بخواهیم از این رزوناتور به علت داشتن ضریب کیفیت بالا، پهنای باند مناسب و فرکانس محدوده UHF بعنوان فیلتر استفاده کنیم، لازم است از مدارهای تطبیق استفاده شود.



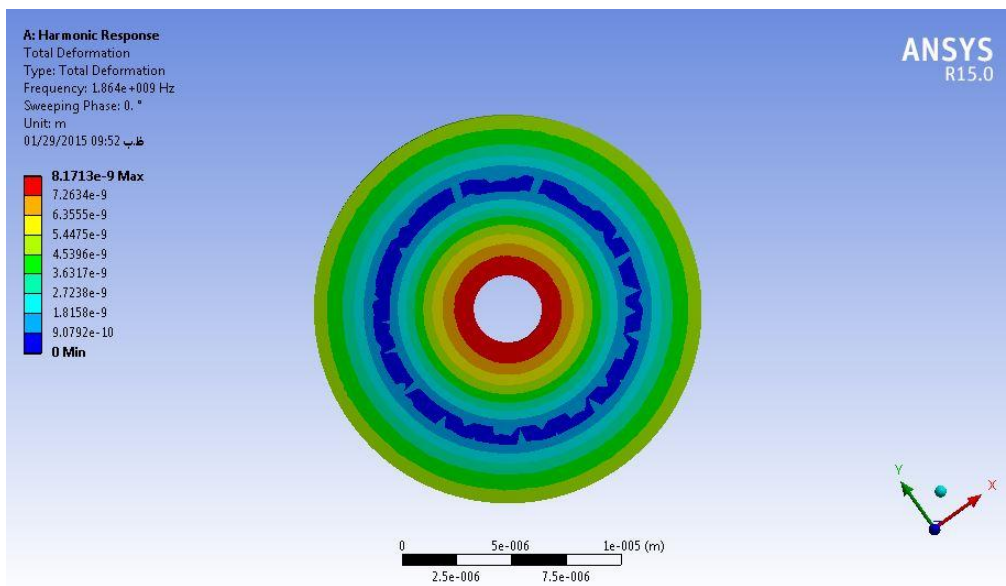
شکل ۴-۸: پارامترهای پراکندگی رزوناتور مرجع



شکل ۴-۹: پارامترهای پراکندگی رزوناتور طراحی شده.

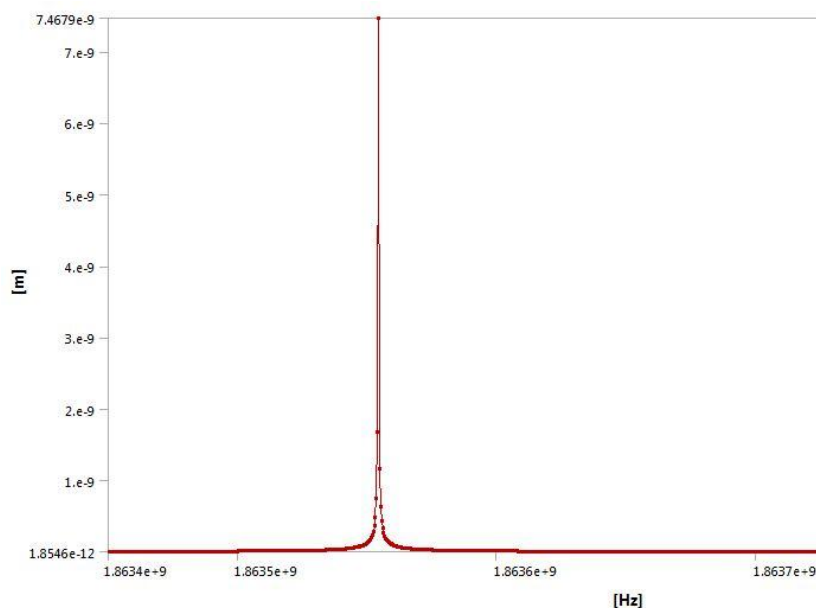
۳-۴-۴ شبیه سازی بوسیله نرم افزار Ansys

در انتها ساختار مورد مطالعه را در نرم افزار Ansys که یک نرم افزار المان محدود می باشد شبیه سازی می کنیم
با استفاده از این شبیه سازی، فرکانس نوسان و میزان دامنه جابجایی مشخص می شود. البته از روی نمودار رسم شده می توان حدوداً در مورد ضریب کیفیت ساختار نیز قضاوت کرد.



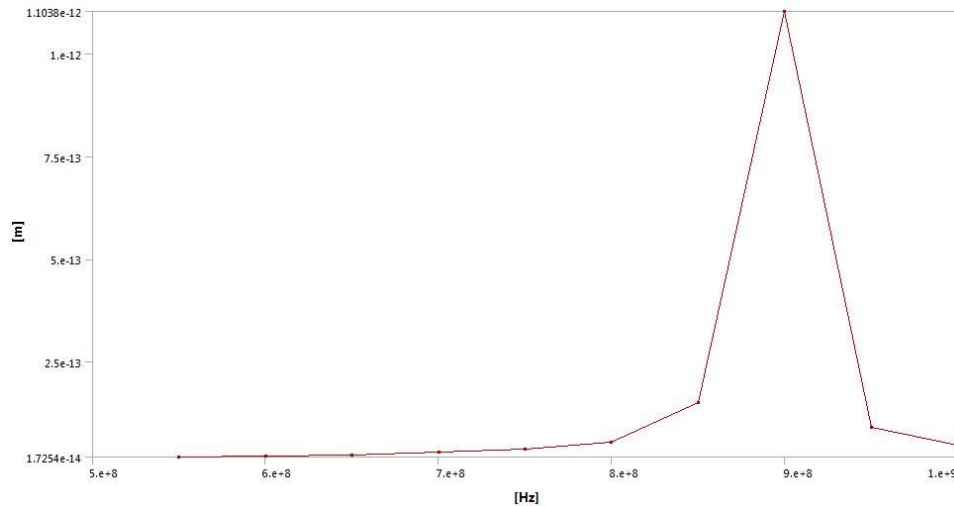
شکل ۴-۱۰: شبیه سازی ساختار طراحی شده در Ansys

همانطور که در شکل ۴-۱۰ می بینیم نوسانات کاملاً شعاعی می باشد. نمودار میزان نوسان بر حسب فرکانس برای این ساختار، فرکانس نوسان ساختار را به ما می دهد.



شکل ۴-۱۱: نمودار نوسان ساختار در نرم افزار Ansys

این شبیه‌سازی در فاصله ۱,۸۶۳۴ گیگاهرتز تا ۱,۸۶۳۷ گیگاهرتز با ۱۰۰۰ نمونه، انجام شده است. فرکانس نوسان ۱,۸۶۳۵۵ گیگاهرتز می‌باشد. حال اگر این نمودار را با نمودار نوسان رزوناتور مرجع در همین نرم‌افزار مقایسه کنیم، می‌توان به میزان بالا بودن ضریب کیفیت این ساختار پی برد. (میزان نازک بودن باند عبور از روی نمودار).



شکل ۴-۱۲: نمودار نوسان رزوناتور مرجع در نرم‌افزار Ansys

از شکل ۴-۱۲ مشخص است که فرکانس نوسان در حوالی ۹۰۰ مگاهرتز می‌باشد. همچنین ضریب کیفیت این رزوناتور نسبت به شکل ۴-۱۱ باید بسیار کمتر باشد

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادها

۵ فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۱-۵ جمع بندی

در این پژوهش با تغییر ابعاد و جنس مواد رزوناتور دیسکی و با استفاده از شکل خاصی از این نوع از رزوناتورهای میکروالکترومکانیکی (رزوناتور دیسکی با پایه حلقوی) موفق به افزایش فرکانس رزونانس و در عین حال افزایش ضریب کیفیت ساختار شده ایم.

از آنجایی که فرکانس رزونانس این نوع از رزوناتورها با جنس مواد مورد استفاده و در واقع با سرعت صوتی مواد ارتباط مستقیم دارند، در این ساختار از جنس الماس در حالت چند کریستالی آن استفاده شده است. زیرا این ماده علاوه بر اینکه جزء مواد قابل لایه نشانی و در دسترس می باشد، از طرفی در مقایسه با سایر مواد قابل لایه نشانی، دارای سرعت صوتی بالاتری است.

از دیگر کارهایی که در این پایان نامه انجام شده است، استفاده از دو جنس متفاوت برای دیسک و پایه زیر آن می باشد. این کار سبب می شود، به دلیل متفاوت بودن مقدار امپدانس صوتی مواد، یک عدم تطبیق امپدانس در مرز دو ماده ایجاد شود و از این طریق از انتقال انرژی از طریق پایه به خارج از سیستم جلوگیری کرده و باعث بالا رفتن ضریب کیفیت و در نتیجه افزایش بازدهی ساختار می شود.

ساختار طراحی شده در این پژوهش یک دیسک حلقه ای دارای شعاع داخلی ۲,۷ میکرومتر و شعاع خارجی ۸,۱۳ میکرومتر می باشد.

این ساختار در فرکانس نزدیک به ۱,۹ گیگاهرتز نوسان می کند، دارای پهنای باند ۱۱۲ کیلوهرتز می باشد و ضریب کیفیتی در محدوده ۲۰۰۰۰ دارد. از این رو می توان با اضافه کردن یک مدار تطبیق امپدانس از این ساختار بعنوان فیلتر در کاربردهایی که نیاز به پهنای باند بالا ندارند استفاده کرد، مانند سیستم های تلفن همراه که از فرکانس های ۳۰۰ کیلوهرتز تا ۲ گیگاهرتز را پوشش می دهند و به پهنای باند بالایی هم نیاز ندارند.

همچنین این رزوناتور طوری طراحی شده است که بتوان برای نیازهای پهنای باند بالاتر، بوسیله آن فیلترهایی با ابعاد کم، و فرکانس و بازدهی بالاتر درست کرد.

برای تحلیل این ساختار از نرم افزار متلب استفاده شده است. همچنین برای شبیه سازی مدار معادل الکتریکی آن از نرم افزار ADS استفاده کرده ایم و ساختار مکانیکی آن نیز با استفاده از نرم افزار Ansys شبیه سازی شده است.

۵-۲ پیشنهادها

در موضوع رزوناتورهای MEMS دیسکی به دلیل پیچیده بودن معادلات مورد استفاده، کار کمتری نسبت به دیگر ادوات MEMS صورت گرفته است از این رو روابط بیان کننده پارامترهای مختلف از جمله فرکانس ارتعاش بسیار دقیق نمی‌باشد و همچنین تأثیر بخشهای مختلف رزوناتور مانند ضخامت دیسک و ارتفاع و پهنای پایه، در آن مشاهده نمی‌شود همچنین تاکنون فرمول بسته‌ای برای محاسبه مستقیم ضریب کیفیت ارائه نشده است، در نتیجه کار در این زمینه ها می‌تواند بسیاری از موانع پیشرو را بردارد و راه را برای پیشرفت بیشتر در این زمینه باز کند.

علاوه بر این برای اینکه فیلترهایی با پهنای باند بیشتر داشته باشیم، لازم است دو یا چند عدد از این رزوناتورها را بوسیله بیم های اتصال به هم متصل کنیم. طراحی بیم اتصال و همچنین طراحی محل اتصال بیم نیازمند محاسبات دقیق می باشد که خود می تواند موضوع مناسبی برای کارهای آینده باشد.

٦ مراجع

- [1] Maluf N., an introduction to Micro Electromechanical Systems Engineering, Artech House,2000, ISBN 0-89006-581-0
- [2] Krueger S., Müller-Fiedler R., Finkbeiner S., Trah, H.-P., MST News, January 2005, pp. 8-10.
- [3] Peterson K.E., “Micromechanical membrane switches on silicon”, IBMJ. Res. Dev., 1979, 23, (4), pp.376– 385
- [4] Tanenhaus M.; Carhoun,D.; Geis T.; Wan E.; Holland A., Miniature IMU/INS with optimally fused low drift MEMS gyro and accelerometers for applications in GPS-denied environments, IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium (PLANS), 2012, pp 259 – 264
- [5] Schoebel J.; Buck T.; Reimann M.; Ulm M.; Schneider M.; Jourdain A.; Carchon G.J.; Tilmans H.A.C., Design considerations and technology assessment of phased-array antenna systems with RF MEMS for automotive radar applications, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Volume:53, Issue:6, Part:2, 2005, pp 1968 – 1975
- [6] Cai X.; Wang A.; Chen W., A circular disc-shaped antenna with frequency and pattern reconfigurable characteristics, China-Japan Joint Microwave Conference Proceedings (CJMW), 2011, pp 1- 4
- [7] Chandorkar S.A.; Agarwal M.; Melamud R.; Candler R,N.; Goodson K,E.; Kenny T,W.:(2008) Limits of quality factor in bulk-mode micromechanical resonators. In: Proceedings of the 21st IEEE International Conference on MicroElectroMechanical Systems, Tucson, Arizona, Jan 2008, pp. 74–77
- [8] Joydeep, B.; Tarun ,K.B.; Microelectromechanical Resonators for Radio Frequency Communication Applications , Springer , published in Microsystem Technologies , vol. 17(10–11) , pp. 1557–1580
- [9] Li S,S.; Lin Y,W.; Xie Y.; Ren Z.; Nguyen C,T,C.; Micromechanical “hollow-disk” ring resonators. In: Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Maastricht, The Netherlands, Sept 2004, pp. 821–824
- [10] Pourkamali S.; Hashimura A.; Abdolvand R.; Ho G,K.; Erbil A.; Ayazi F.; “High-Q single crystal silicon HARPSS capacitive beam resonators with self-aligned sub-100-nm transduction gaps”. (2003)J Microelectromech Syst 12(4):487–496
- [11] Wang K.; Wong A,C.; Nguyen C,T,C.; “VHF free-free beam high-Q micromechanical resonators”. (2000) J Microelectromech Syst 9(3);347–360

- [12] Wang K.; Nguyen C,T,C.; “High-order medium frequency micromechanical electronic filters”. (1999) *J Microelectromech Syst* 8(4):534–557
- [13] Huang W,L.;” fully monolithic cmos nickel micromechanical resonator oscillator for wireless communication”, 2008, A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy
- [14] Demirci MU, Nguyen CTC “Mechanically corner-coupled square microresonator array for reduced series motional resistance” (2006) *J Microelectromech Syst* 15(6):1419–1436
- [15] Tabatabaei S, Partridge A “Silicon MEMS oscillators for high-speed digital systems”. (2010) *IEEE Micro* 30(2):80–89
- [16] Naito Y., Helin P., Nakamura K., De Coster J., Guo B., Haspeslagh L., Onishi K., Tilmans HAC “High-Q torsional mode Si triangular beam resonators encapsulated using SiGe thin film”. In: *Technical Digest of 2010 IEEE International Electron Devices Meeting*, San Francisco, CA, Dec 2010, pp. 7.1.1–7.1.4
- [17] Lee JEY, Bahreyni B, Zhu Y, Seshia AA “A single-crystal-silicon bulk-acoustic-mode microresonator oscillator”. (2008) *IEEE Electron Dev Lett* 29(7):701–703
- [18] Clark JR, Hsu WT, Abdelmoneum MA, Nguyen CTC “High-Q UHF micromechanical radial-contour mode disk resonators”. (2005) *J Microelectromech Syst* 14 (6):1298–1310
- [19] Y. W. Lin, S. Lee, S. S. Li, Y. Xie, Z. Ren, and C. T. C. Nguyen, “60-MHz wine glass micromechanical disk reference oscillator,” *Digest of Technical Papers*, 2004 IEEE International Solid-State Circuits Conference, San Francisco, California, Feb. 15-19, 2004, pp. 322-323.
- [20] Bhave S.A, Di G, Maboudian R, Howe R.T, “Fully-differential poly-SiC Lamé mode resonator and checkerboard filter”. In: *Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, Miami, Florida, Jan–Feb 2005, pp. 223–226
- [21] Lee JEY, Seshia AA “5.4-MHz single-crystal silicon wine glass mode disk resonator with quality factor of 2 million”. (2009) *Sens Actuators A* 156:28–35
- [22] Hao Z, Pourkamali S, Ayazi F “VHF single-crystal silicon elliptic bulk-mode capacitive disk resonators–part I: design and modeling”. (2004) *J Microelectromech Syst* 13(6):1043–1053
- [23] Entesari K, Obeidat KH, Brown A.R, Rebeiz G.M, “A 25–75-MHz RF MEMS Tunable Filter”.2007, *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES*, VOL. 55, NO. 11
- [24] Shim Y, Ruan J, Wu Zh, Rais-Zadeh M, “An integrated RF MEMS tunable”*IEEE , MEMS 2012*, Paris, FRANCE

- [25] Bannon III , F. D., Clark J. R., Nguyen C. T.-C.”High-Q HF Microelectromechanical Filters” 2000 IEEE J. Solid State Circuits , 35(4):512-526
- [26] Shalaby M,M, Abdelmoneum M, Saitou K, “Design of Spring Coupling for High-Q High-Frequency MEMS Filters for Wireless Applications”. 2009 IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 56, NO. 4,
- [27] Whitfield M.D, Audic B, Flannery C.M, Kehoe L.P, Crean G.M, Jackman R.B, “Acoustic wave propagation in free standing CVD diamond: Influence of film quality and temperature” 1999 , Elsevier Science S.A. All rights reserved.pp 732–737
- [28] Baghelani M, Ghavifekr HB, Ebrahimi A, “A new approach for the design of low velocity coupling for ring shape anchored contour mode disk resonators” , Microsyst Technol (2012) 18:2003–2016
- [29] Johnson RA ,“Mechanical filters in electronics, Wiley Series on Filters”. John Willey & Sons, New York (1983)
- [30] <http://accuratus.com/silicar.html>
- [31] <https://www.memsnet.org>
- [32] Whitfield M.D, Audic B, Flannery C.M, Kehoe L.P, Crean G.M, Jackman R.B, “Acoustic wave propagation in free standing CVD diamond: Influence of film quality and temperature” 1999 , Elsevier Science S.A. All rights reserved.pp 732–737
- [33] Baghelani M, Ghavifekr HB, Ebrahimi A “Analysis and suppression of spurious modes of the ring shape anchored RF MEMS contour mode disk resonator”. (2011) Microsyst Technol (Springer) 17:1599–1609
- [34] Baghelani M, Ghavifekr HB “Ring shape anchored RF MEMS contour mode disk resonator for UHF communication applications”. (2010) Microsyst Technol (Springer) 16(12):2123–2130
- [35] <http://en.wikipedia.org>

Abstract:

The MEMS technology applications in the manufacture of electronic devices in different fields. Examples of this can be making various sensors in the automobile industry, making Bio MEMS sensors, underwater sensors, etc.

One area where this technology has been entered in to is the field of Radio-frequency (RF) that known by name of RF MEMS. In this scope, various devices are made such as antennas, resonator, oscillator, filter, etc.

Resonators are the most important part of the MEMS filters, although the operation of the filter are doing and they can be named as filters with less bandwidth.

In this thesis, one resonator is designed and simulated which have a UHF frequency range and have higher quality factor than resonators that has been in traduced, too. This structure as well as other MEMS resonators is a capacitive structure which is composed of two parts: movable and stationary that with these two get together, forming a capacitor. The stationary part is the entry signal that stimulate the structure. When the frequency of the input signal in natural frequency of movable part, this part has begun to swing, change the air gap, thereupon a variable capacitor that produces a current with same frequency of input signal in output. In other word, when will the output signal that have capacitance changes and changes in capacitance caused by oscillation of the movable part, that this in natural frequency range of movable part. So we can say this structure in a certain frequency range allow the input signal to passes, in fact it is filtered. But oscillation frequency, displacement, amplitude and quality factor of structure dependent to material, size and geometry of the structure, so we can with change this parameters achieved to suitable oscillation frequency and quality factor. To this structures if can maintain their high quality factor, we can build very small filters with high efficiency and low cost by these kind of resonators.

In proposed resonator used the materials that have a higher sound velocity among the deposition material. On the other hand, we have reduced the radius of structure that these two result, high resonant frequency up to 1.9GHz and also by using two different material for the main body and anchor causes an impedance mismatch and prevent transmission of the maximum energy out of the system, that this work causes reduce anchor losses and higher quality factor .

Key words: MEMS high frequency filter, Ring resonator, Disk resonator, high quality factor



University of Shahrood

Electrical Engineering Faculty

Analysis and design of mems filter with a high quality factor and high Central frequency

Abdollah sadegh koohestani

Supervisor:
Dr. Bahram Azizollah Ganji

February 2015