

## معرفی و بررسی عملکرد تشدیدگرهای میکرومکانیکی

مجید باقری

کارشناس ارشد مهندسی مکانیک  
دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند  
majid.bagheri@birjand.ac.ir

محمد ایمان پرست\*

مریی گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی  
شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان  
imanparast@eng.usb.ac.ir

مهدی راغبی

استادیار گروه مهندسی مکانیک  
دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند  
raghebi@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۰۷

### چکیده

امروزه با پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه ساخت سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، قطعات میکرومکانیکی کاربردهای گسترده‌تری یافته‌اند. از جمله این قطعات پرکاربرد، تشدیدگرهای میکرومکانیکی است. تشدیدگرهای میکرومکانیکی ابعادی کوچک و فرکانس‌های تشدید بالایی دارند. امروزه از این تشدیدگرها در سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم و ناوبری، فیلترها، میکروسکوپ اتمی، ژيروسکوپ‌های ارتعاشی، حسگرهای جرم، فشار، کرنش، نیرو، شتاب، دما و زیستی استفاده می‌شود. با توجه به اهمیت و کاربرد گسترده تشدیدگرها، در این مقاله، نخست انواع تشدیدگرها، کاربردها، مزایا، نحوه عملکرد آنها در سیستم‌های ارتعاشی، مواد سازنده و انواع روش‌های تحریک و تشخیص در آنها معرفی پس از آن پارامتر ضریب کیفیت و نحوه محاسبه آن تشریح می‌شود. در ادامه انواع سازوکارهای اتلاف انرژی، مدهای ارتعاشی و پارامتر مقاومت حرکتی در تشدیدگرها توضیح داده می‌شود و در نهایت مشخصات انواع تشدیدگرهای متداول ارائه می‌گردد.

**واژگان کلیدی:** تشدیدگر میکرومکانیکی، ضریب کیفیت، سازوکار اتلاف انرژی، تحریک و تشخیص، مد ارتعاشی

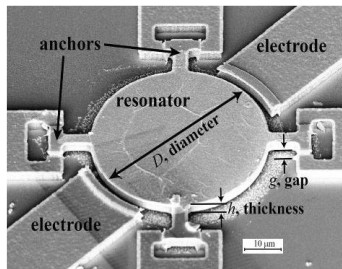
### ۱. مقدمه

کوتاه‌نوشت MEMS<sup>۱</sup> به معنای سیستم میکروالکترومکانیک است. تشدیدگرهای<sup>۲</sup> میکروالکترومکانیکی پتانسیل زیادی برای جایگزینی با کریستال کوآرتز برای کاربردهای زمانی و فرکانسی دارند [۱]. فراتر از کاربردهای فرکانسی، تشدیدگرهای میکروالکترومکانیکی را می‌توان در فیلترها و میکسرها [۲-۳]، میکروسکوپ‌های اتمی [۴]، حسگرهای جرم (بخار، شیمیایی، پروتئین و جز این‌ها) [۵-۹]، حسگرهای فشار [۱۰-۱۱]، حسگرهای کرنش، نیرو و

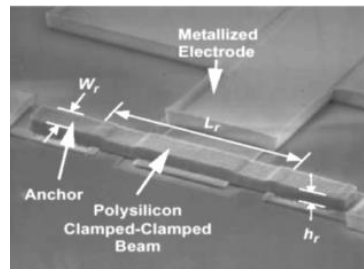
شتاب‌سنج [۱۲-۱۴] و حسگرهای دما [۱۵] استفاده کرد. همچنین این تشدیدگرها در ژيروسکوپ‌های ارتعاشی و حسگرهای زیستی به کار می‌روند [۱۶]. به طور کلی می‌توان گفت تقریباً تمام ابزارهای الکترونیک و سیستم‌های ارتباطی از انواع مراجع زمانی و فرکانسی استفاده می‌کنند که تشدیدگرهای میکرومکانیکی با مزایایی چون اندازه کوچک، ایجاد فرکانس‌های بالا با ضریب کیفیت بالا، هزینه ساخت پایین، قابلیت اطمینان و قابلیت ساخت بالا

تشدیدگرهای میکروالکترومکانیکی اغلب سیلیکون‌های یک و چند کریستاله است [۱۸]. سیلیکون دارای خواصی چون عمر مفید طولانی، مقاومت خوب در برابر خستگی، اثر مخرب ناچیز بر طبیعت و حساسیت متوسط به دما می‌باشد [۱۹]. تشدیدگرهای میکرومکانیکی شکل‌های متنوع تیر، دیسک دایره‌ای<sup>۳</sup>، صفحه مربعی<sup>۴</sup>، رینگ حلقوی<sup>۵</sup>، شانه<sup>۶</sup> و جز این‌ها دارند [۱۷]. در شکل‌های ۱ تا ۷ نمونه‌هایی از تشدیدگرهای میکرومکانیکی نمایش داده شده است.

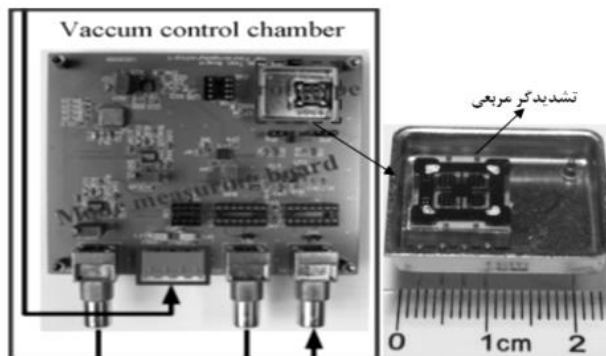
می‌توانند گزینه بسیار مناسبی در این کاربردها باشند. از جمله مزایای عمده تشدیدگرهای میکرومکانیکی توان مصرفی پایین و پاسخ دینامیکی گرمایی مناسب است. توان مصرفی پایین و پاسخ دینامیکی گرمایی خوب این تشدیدگرها به علت اندازه کوچک آنهاست [۱]. جنس مواد استفاده شده در سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، سیلیکون، پلیمر، طلا، نیکل، آلومینیوم، مس، کروم، تیتانیوم، تنگستن، پلوتونیم و نقره است، اما جنس مواد مورد استفاده در



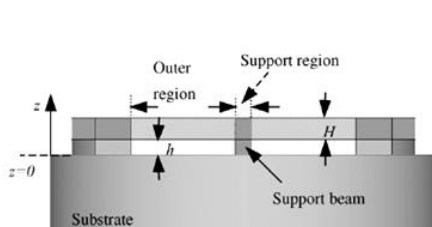
شکل ۲. تشدیدگر دیسکی میکرومکانیکی [۲۱]



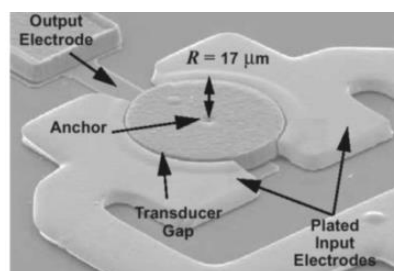
شکل ۱. تشدیدگر تیر گیردار - گیردار سیلیکونی چند کریستاله [۲۰]



شکل ۳. تشدیدگر مربعی میکرومکانیکی با چهار تیر نگهدارنده و نحوه قرارگیری آن [۲۲]

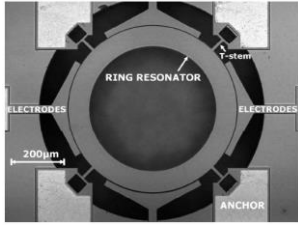


(ب)

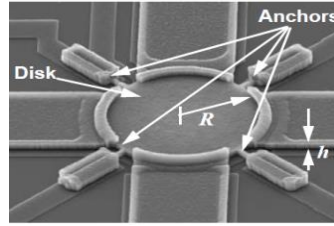


(الف)

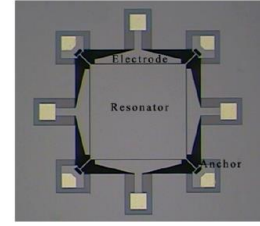
شکل ۴. الف) تشدیدگر میکروالکترومکانیکی دیسکی ساخته شده از سیلیکون چند کریستاله تحت مد محیطی با تکیه‌گاه مرکزی [۲۰]، ب) نمای جانبی تشدیدگر دیسکی [۲۳]



شکل ۷. نمایی از تشدیدگر حلقوی میکرومکانیکی [۲۶]



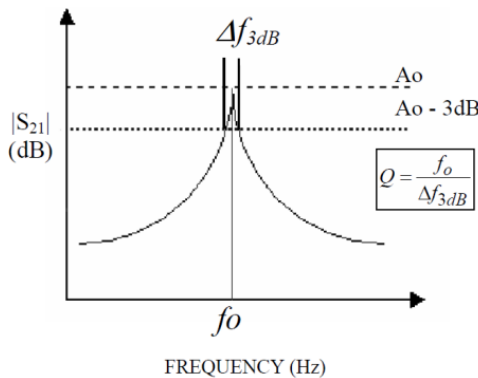
شکل ۶. تشدیدگر دیسکی میکرومکانیکی با تکیه‌گاه‌های جانبی [۲۵]



شکل ۵. تشدیدگر مربعی میکروالکترومکانیکی با تیرهای نگهدارنده‌ی مایل T شکل [۲۴]

## ۲. ضریب کیفیت

خروجی  $S_{21}$  روی محور  $\gamma$  مشخص می‌گردد و برحسب دسی‌بل اندازه‌گیری می‌شود. در بسیاری از حالت‌ها، پارامتر  $S_{21}$  با استفاده از رابطه  $|S_{21}|_{dB} = 20 \log |S_{21}|$  به دسی‌بل تبدیل می‌شود. ماکزیمم فرکانس به‌عنوان فرکانس تشدید در نظر گرفته شده و با  $f_0$  مشخص می‌گردد. نقاط نصف توان که برابر با  $\max |S_{21}| \cdot 2^{-0.5}$  است در دو طرف فرکانس تشدید می‌باشند و اختلاف موقعیت‌های فرکانسی آنها، پهنای باند  $\Delta f$  نام دارد. اگر مقدار  $|S_{21}|$  در واحد دسی‌بل به صورت  $|S_{21}|_{dB}$  نشان داده شود، نقاط نصف توان در دو نقطه از منحنی که ۳ دسی‌بل از مقدار ماکزیمم فاصله دارند، قرار می‌گیرند [۲۸].



شکل ۸. نحوه‌ی محاسبه‌ی ضریب کیفیت

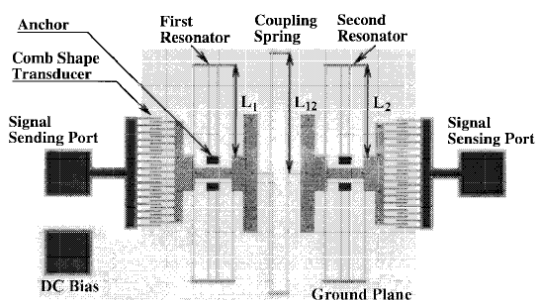
براساس اطلاعات موجود در نمودار [۲۸]

عبارت کلی محاسبه‌ی ضریب کیفیت به‌صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود [۱۶]:

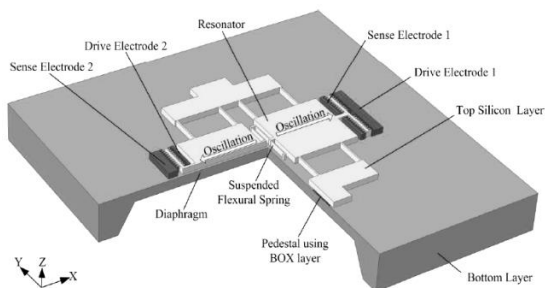
$$\frac{1}{Q_{total}} = \sum \frac{1}{Q_{ind}} \quad (1)$$

ضریب کیفیت  $Q$  شاخصی از سیستم‌های تشدید می‌ماند مدارهای RLC است. در چنین مدارهایی انرژی به‌صورت متناوب تبادل می‌شود که این تبادل به‌علت وجود مقاومت، با اتلاف انرژی همراه است. در مکانیک، ضریب کیفیت معیاری برای تلفات انرژی یک تشدیدگر است [۲۷]. ضریب کیفیت به‌صورت نسبت بین انرژی ذخیره‌شده به انرژی تلف شده در سیستم طی هر سیکل ارتعاش تعریف می‌شود. در فرایندها یا سیستم‌هایی که میزان اتلاف انرژی زیاد است ضریب کیفیت کاهش می‌یابد. تشدیدگرهایی با ضریب کیفیت بالا برای کاربردهای RFMEMS<sup>۸</sup> و حسگرها ضروری هستند. در کاربردهای حسگری اگر تشدیدگر در معرض ماده‌ی شیمیایی باشد، که سبب تغییر در جرم آن شود، تغییری در فرکانس تشدید به‌وجود می‌آید که می‌توان از آن برای شناسایی ماده‌ی شیمیایی استفاده کرد. تغییر در فرکانس تشدید نیازمند تشخیص یا احساس تغییر جرم است و زمانی که تشدیدگر دارای ضریب کیفیت بالا باشد به‌طور دقیق‌تر تعیین می‌شود. بنابراین حساسیت حسگرها با افزایش ضریب کیفیت افزایش می‌یابد. همچنین ضریب کیفیت بالا برای کاربردهای نوسان‌سازی و فیلتراسیون؛ یعنی جایی که لازم است تا فرکانس به‌خوبی کنترل شود مطلوب می‌باشد [۲۸]. سیم‌پیچ‌های رایج دارای ضریب کیفیتی بین ۲۰ تا ۸۰ هستند، در حالی که خازن‌ها دارای ضریب کیفیت بسیار بیشتر، در حد چندهزار هستند [۲۷]. ضریب کیفیت را می‌توان از روش‌های مختلفی به‌دست آورد. با توجه به شکل ۸، وقتی تحریک و تشخیص الکترواستاتیک باشد، پارامتر

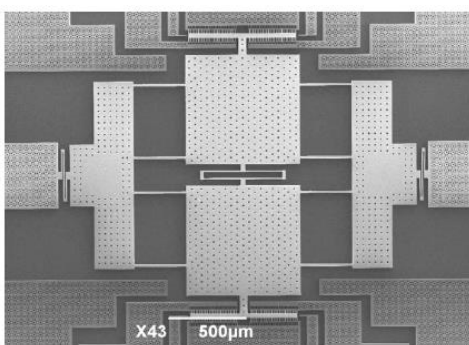
میکرومکانیکی در نظر گرفت. بنابراین برای ارزیابی یک ژيروسکوپ نیاز است تا مشخصات تشدیدگر به خوبی بررسی شود. با توجه به این موضوع افزایش ضریب کیفیت باعث بهبود عملکرد ژيروسکوپ خواهد شد [۳۰]. در شکل ۱۲ یک ژيروسکوپ میکرومکانیکی و دو مد تحریک و تشخیص آن نمایش داده شده است.



شکل ۹. نمای شماتیک فیلتر میکرومکانیکی [۲]



شکل ۱۰. نمای شماتیک از حسگر فشار [۲۹]



شکل ۱۱. حسگر فشار [۲۹]

#### ۴. روش‌های تحریک و تشخیص

دو روش معمول برای تحریک<sup>۱۳</sup> و تشخیص<sup>۱۴</sup> در تشدیدگرهای میکرومکانیکی وجود دارد. روش اول روش

اگر تشدیدگر دارای اتلاف تکیه‌گاه<sup>۹</sup>، اتلاف هوا<sup>۱۰</sup>، اتلاف ترموالاستیک<sup>۱۱</sup> و اتلاف سطح<sup>۱۲</sup> و سایر اتلاف‌ها باشد، رابطه ضریب کیفیت به صورت ۲ نوشته خواهد شد [۱۶]:

$$\frac{1}{Q_{total}} = \frac{1}{Q_{anchor}} + \frac{1}{Q_{TED}} + \frac{1}{Q_{air}} + \frac{1}{Q_{surface}} + \frac{1}{Q_{others}} \quad (2)$$

به طوری که در این رابطه ضریب کیفیت اتلاف تکیه‌گاه،  $Q_{TED}$  ضریب کیفیت اتلاف ترموالاستیک،  $Q_{air}$  ضریب کیفیت اتلاف هوا،  $Q_{surface}$  ضریب کیفیت اتلاف سطح و سایر اتلاف‌ها با  $Q_{others}$  نشان داده می‌شوند.

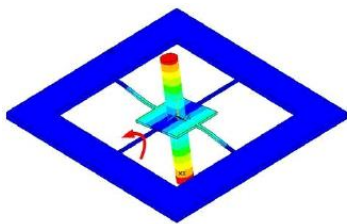
#### ۳. نحوه عملکرد تشدیدگرها در سیستم‌های ارتعاشی

زمانی که از تشدیدگر به صورت حسگر جرم استفاده می‌شود، به محض قرارگرفتن جرم روی آن، در نمودار مربوط به فرکانس تغییر مکان به وجود می‌آید. با توجه به تغییر مکان صورت گرفته در نمودار مشخص می‌شود که فرکانس سیستم تغییر کرده است و با توجه به ثابت بودن سختی، تشدیدگر مورد نظر به عنوان حسگر جرم عمل می‌کند [۲۱]. فیلترهای میکرومکانیکی از دو تشدیدگر که توسط تیر به هم متصل شده‌اند ساخته می‌شوند. ضریب کیفیت این تشدیدگرها در نحوه عملکرد فیلتر تأثیرگذار است. یک نمونه از این فیلترها در شکل ۹ نمایش داده شده است [۲]. در شکل ۱۰ نمای شماتیک از حسگر فشار و در شکل ۱۱ یک حسگر فشار از نمای دیگر نمایش داده شده است.

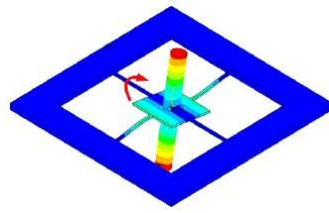
در حسگرهای فشار نیاز است تا تشدیدگر دارای بالاترین ضریب کیفیت ممکن باشد. بالابودن ضریب کیفیت، حساسیت و وضوح حسگر فشار را افزایش داده و همچنین به دلیل ساده کردن مدار کنترل بازخورد و کاهش نفوذ دخالت‌های خارجی ناخواسته اهمیت بسیاری دارد. برای حذف اثر آشفتگی مدار کنترل بازخورد ضریب کیفیتی بیشتر از ۱۰۰۰ مورد نیاز است [۲۹]. ژيروسکوپ‌های میکرومکانیکی دارای دو مد تحریک و تشخیص هستند. در واقع می‌توان این دو مد را دو مد ارتعاشی یک تشدیدگر

خازنی (تحریک و تشخیص الکترواستاتیک) و دومین روش ترکیبی از تحریک مکانیکی (تحریک پیزوالکتریک) و تشخیص نوری است. در روش الکترواستاتیک از تغییر در جریان خروجی برای تشخیص حرکت استفاده می‌شود. در روش مکانیکی از تغییر سیگنال نوری (لیزری) منعکس شده از روی سطح تشدیدگر برای تشخیص حرکت استفاده می‌شود. اما وقتی ابعاد کوچک یا هندسه پیچیده‌تر می‌شود، سختی استفاده از این دو روش برای تشخیص حرکت اهمیت می‌یابد. مشکل تشخیص نوری، حداقل اندازه نقطه

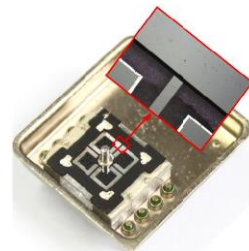
لیزر است. اگر اندازه نقطه لیزر از ۱ میکرومتر بیشتر شود، اندازه‌گیری سیگنال منعکس شده از سطح تشدیدگر با ابعاد کوچکتر از ۱ میکرومتر با مشکل مواجه خواهد شد. همچنین لیزر سبب اختلالی مثل ایجاد گرما می‌شود. روش‌های خازنی با مشکلاتی چون پارازیت خازنی مواجه هستند. همچنین در روش خازنی با توجه به اینکه مواد باید رسانا باشند در طراحی دستگاه‌ها و ماده‌ای که در ساخت سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد محدودیت وجود دارد [۲۸].



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۱۲. نمایی از (الف) ژيروسکوپ میکرومکانیکی، (ب) مد تحریک ژيروسکوپ، (ج) مد تشخیص ژيروسکوپ [۳۰]

#### ۴-۱. تحریک الکترواستاتیک

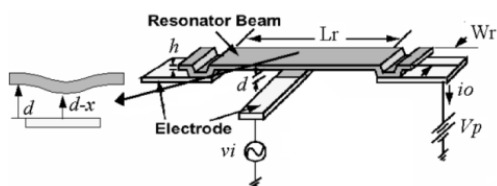
در شکل ۱۳ یک تشدیدگر تیر نمایش داده شده است. وقتی نیروی الکترواستاتیک استفاده می‌شود، ولتاژ  $V_p$  و ولتاژ با یاس dc به تیر اعمال می‌شود و ولتاژ ac ورودی  $v_i = V_m \sin \omega t$  به الکتروود زیر تیر اعمال می‌گردد. بنابراین پتانسیل الکترواستاتیک در سراسر تیر برابر با  $V = V_p + v_i$  است. در یک تشدیدگر ارتعاشی ظرفیت خازنی بین الکتروود پایینی و تیر با زمان تغییر می‌کند. در نتیجه بار ذخیره شده در خازن با زمان تغییر می‌کند که گردش جریان را به وجود می‌آورد و با استفاده از همین امر می‌توان حرکت تشدیدگر را تشخیص داد [۲۸]. در شکل ۱۴ نمونه تحریک الکترواستاتیک تشدیدگر دیسکی میکرومکانیکی نمایش داده شده است.

#### ۴-۲. تحریک پیزوالکتریک و تشخیص نوری

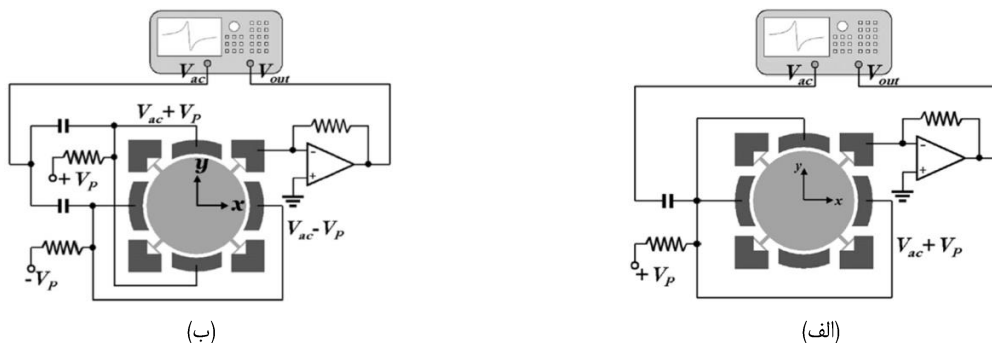
ایده اصلی در روش تحریک پیزوالکتریک تماس فیزیکی تشدیدگر به مبدل پیزو است. برای تشخیص لیزر، لیزر روی

تیر مرتعش متمرکز می‌گردد و سیگنال منعکس شده برای تعیین فرکانس ارتعاش استفاده می‌شود. تحریک و تشخیص پیزوالکتریک در شکل ۱۵ نمایش داده شده است [۲۸]. فرکانس یک منبع نور با تغییر سرعت منبع نور تغییر می‌کند. سطح بازتابی تشدیدگر را می‌توان به صورت یک منبع نقطه‌ای در نظر گرفت. این اثر می‌تواند برای تعیین ارتعاشات تشدیدگر به کار رود. لیزر از نقطه‌ای از سازه تشدیدگر، که دارای دامنه حرکت ماکزیمم است، منعکس می‌شود و به سمت دیود حساس به نور هدایت می‌گردد. برای مثال این نقطه، در یک تیر یک سر درگیر در نوک تیر قرار دارد، بسته به زاویه بین سطح تیر و پرتو لیزر، موقعیت نور منعکس شده در آشکارساز تغییر می‌کند. دیود حساس به نور از این روش وقتی دستگاه ارتعاش می‌کند برای آشکارسازی استفاده می‌نماید. نیروی لازم برای به حرکت درآوردن تشدیدگر در این روش از مبدل پیزو که باعث لرزش مکانیکی در تشدیدگر می‌شود، تأمین می‌گردد.

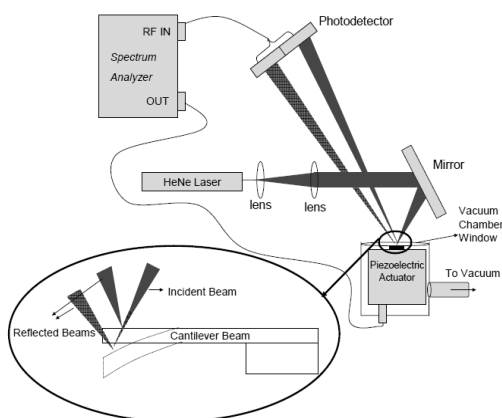
تشخیص توسط آشکارسازی نور منعکس شده از لیزری می باشد که روی تشدیدگر متمرکز شده است. در این روش گردش جریان الکتریکی وجود ندارد و در نتیجه لازم نیست تا نمونه رسانا باشد [۲۸].



شکل ۱۳. تشدیدگر تیر که توسط تحریک الکترواستاتیک مورد آزمایش قرار می‌گیرد [۲۸]



شکل ۱۴. الف) مدار شماتیک برای تحریک و تشخیص الکترواستاتیک مد شعاعی - محیطی تشدیدگر صفحه‌ای دیسکی میکرو [۳۱] ب) مدار شماتیک برای تحریک و تشخیص الکترواستاتیک مد wine glass تشدیدگر صفحه‌ای دیسکی میکرو [۳۱]



شکل ۱۵. تحریک و تشخیص پیزوالکتریک [۲۸]

### ۵. انواع اتلاف انرژی

اتلاف انرژی را می‌توان به دو قسمت داخلی و خارجی تقسیم کرد.

#### ۵-۱. سازوکارهای خارجی

دو نوع سازوکار خارجی اصلی وجود دارد که عبارتند از اتلاف هوا و اتلاف تکیه‌گاه. اتلاف تکیه‌گاه از این واقعیت

نشأت می‌گیرد که در هنگام تغییر شکل‌های محلی و لغزش‌های میکرو، انرژی می‌تواند از تشدیدگر به سازه تکیه‌گاه منتقل شود. هرچه بتوان صلبیت تکیه‌گاه را افزایش داد، حرکت تشدیدگر در این ناحیه کمتر می‌شود. نتیجه این کاهش حرکت، کاهش اتلاف تکیه‌گاه است. اغلب نمی‌توان صلبیت تکیه‌گاه را افزایش داد، اما اتلاف انرژی می‌تواند با

بهینه‌سازی ساختار کاهش یابد [۲۸]. مقدار  $Q_{\text{support}}$  را می‌توان به صورت رابطه ۳ محاسبه کرد [۳۲]. در این رابطه  $U$  انرژی ناشی از ارتعاشات،  $\Delta U$  کل انرژی تلف شده در هر سیکل نوسان،  $\omega$  فرکانس تشدید و  $II$  توان خالص جریان انرژی خروجی از تشدیدگر است.

$$Q_{\text{support}} = 2\pi \frac{U}{\Delta U} = \frac{\omega U}{\Pi} \quad (3)$$

اتلاف هوا از انتقال انرژی مکانیکی به گاز اطراف تشدیدگر رخ می‌دهد. بسته به سطح فشاری که در حین تست تشدیدگر وجود دارد، ممکن است اتلاف هوا بر ضریب کیفیت اثر بگذارد. در فشار زیر ۱۰ mtorr اتلاف هوا در مقایسه با اتلاف داخلی تشدیدگر قابل صرف نظر کردن است. چون در این سطح فشار، سازوکارهای داخلی باعث کاهش ضریب کیفیت می‌شوند این رژیم فشار، ناحیه اتلاف درونی نامیده می‌شود. وقتی فشار بین ۱۰ mtorr و ۴ torr باشد، ناحیه مولکولی وجود دارد. در فشار بالاتر از ۴ torr ناحیه ویسکوز است. در این ناحیه هوا به صورت یک سیال ویسکوز عمل می‌کند و اتلاف هوا یک عامل مهم برای کاهش ضریب کیفیت خواهد بود [۲۸].

## ۵-۲. سازوکارهای داخلی

اتلاف ترموالاستیک و اصطکاک داخلی می‌توانند به عنوان سازوکارهای اتلاف انرژی داخلی مورد بحث قرار گیرند. سازوکار اتلاف انرژی بر اثر اصطکاک داخلی به نقص در شبکه کریستالی ارتباط دارد. اگر ماده‌ای با ضریب انبساط گرمایی مثبت تحت تأثیر تنش‌های فشاری قرار گیرد، در آن افزایش دما به وجود می‌آید و وقتی تحت تنش کششی باشد، کاهش دما در آن رخ می‌دهد. وقتی تشدیدگر در مدهای ارتعاشی به غیر از مد ارتعاشی پیچشی خالص ارتعاش می‌کند هر دو تنش کششی و فشاری در آن به طور همزمان ایجاد می‌شود که سبب ایجاد دو ناحیه می‌گردد که در یک ناحیه افزایش دما و در ناحیه دیگر کاهش دما رخ می‌دهد. با توجه به ایجاد دو ناحیه سردتر و گرم‌تر در تشدیدگر، گرما از ناحیه با دمای بالا به سمت ناحیه با دمای

پایین منتقل می‌شود. مقداری از انرژی مکانیکی تشدیدگر در حین انتقال جریان دما از دست می‌رود که این پدیده به عنوان اتلاف ترموالاستیک شناخته می‌شود [۳۳]. همچنین سازوکارهای اتلاف انرژی وجود دارند که به سطح تشدیدگر مرتبط است که به خوبی درک نشده است. در بسیاری از موارد ارتباط خطی بین اتلاف انرژی و نسبت مساحت سطح به حجم مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد ضریب کیفیت با اتلاف سطح محدود می‌گردد [۳۴-۳۶].

## ۶. مقاومت حرکتی

در محدوده فرکانسی گیگاهرتز تشدیدگرهای میکرومکانیکی با ضریب کیفیت بالا در سیستم‌های ارتباطی، که برای فیلتر فرکانس استفاده می‌شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در میان مسائل مهم یک مسئله باقی می‌ماند که مانع کاربرد تشدیدگرها در کاربردهای RF می‌شود و آن وجود امیدانس بزرگتر از حد معمول است. به طور خاص این امیدانس بزرگ که معمولاً مقاومت حرکتی<sup>۱۵</sup> نامیده می‌شود مانع از این می‌شود که تشدیدگرها در محدوده وی. اچ. اف.<sup>۱۶</sup> و یو. اچ. اف.<sup>۱۷</sup> برای کوپلینگ مستقیم آنتن‌ها در کاربردهای ارتباطی بی‌سیم کاربرد داشته باشند؛ زیرا امیدانس لازم در حدود ۵۰ تا ۳۳۰ اهم است [۳۷]. روش‌هایی برای کاهش مقاومت حرکتی در تشدیدگرهایی که تحریک الکترواستاتیک دارند، وجود دارد که عبارت‌اند از [۲۸]:

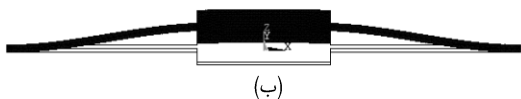
۱. کاهش شکاف بین الکتروود و تشدیدگر
۲. افزایش ولتاژ بایاس  $dc$
۳. جمع خروجی‌های آرایه تشدیدگرهای یکسان با هم

## ۷. شکل مدهای ارتعاشی

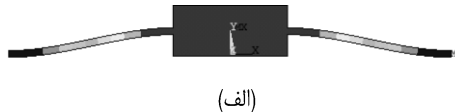
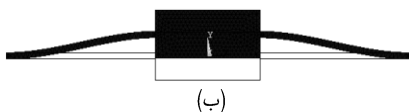
می‌توان تشدیدگرها را براساس شکل مدارتعالشی آنها نیز دسته‌بندی کرد: دسته مدهای خمشی<sup>۱۸</sup>، پیچشی<sup>۱۹</sup> و حجمی<sup>۲۰</sup> [۱۷]. در شکل‌های ۱۶ تا ۱۹ بعضی از انواع مدهای ارتعاشی خمشی تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با دو تیر افقی نگهدارنده نمایش داده شده است. در مد ارتعاشی لغزشی خارج صفحه (شکل ۱۶)، تشدیدگر فقط در

راستای محور  $y$  شده است. قسمت ب از شکل ۱۸ نشان می‌دهد که ابعاد تشدیدگر در این مد ارتعاشی نیز تغییر نمی‌کند. در مد ارتعاشی تکان‌دهنده داخل صفحه شکل ۱۹، تیرهای نگاه‌دارنده در صفحه  $x-y$  دچار خمش شده‌اند و این خمش سبب دوران تشدیدگر در راستای محور  $z$  شده است. قسمت ب از شکل ۱۹ نشان می‌دهد ابعاد تشدیدگر در این مد ارتعاشی هم تغییر نمی‌کند. در شکل ۲۰ مد پیچشی تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با دو تیر افقی نگاه‌دارنده نمایش داده شده است.

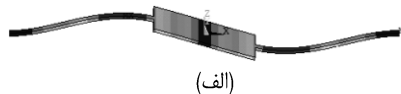
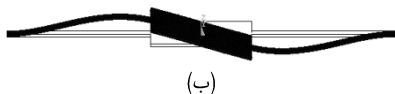
راستای محور  $z$  تغییر مکان می‌دهد و همچنان که در قسمت ب از شکل ۱۶ مشخص است ابعاد آن تغییر نمی‌کند. در مد ارتعاشی لغزشی داخل صفحه شکل ۱۷، تشدیدگر در راستای محور  $z$  تغییر مکان ندارد و تغییر مکان آن در صفحه  $x-y$  رخ می‌دهد و همچنان که در قسمت ب از شکل ۱۷ نمایش داده شده، ابعاد تشدیدگر در این مد ارتعاشی تغییر نمی‌کنند. در مد ارتعاشی تکان‌دهنده خارج صفحه شکل ۱۸، تیرهای نگاه‌دارنده در صفحه  $x-z$  دچار خمش شده‌اند و این خمش سبب دوران تشدیدگر در



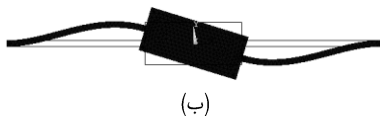
شکل ۱۶. الف) مد ارتعاشی لغزشی خارج صفحه<sup>۲۱</sup> (مد شناور) تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با دو تیر افقی نگاه‌دارنده (نمای جانبی) ب) نحوه تغییر شکل در مد ارتعاشی لغزشی خارج صفحه (نمای جانبی) [۳۸]



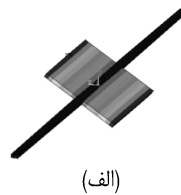
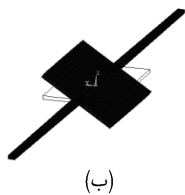
شکل ۱۷. الف) مد ارتعاشی لغزشی داخل صفحه<sup>۲۲</sup> تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با دو تیر افقی نگاه‌دارنده (نمای بالا) ب) نحوه تغییر شکل تشدیدگر در مد ارتعاشی لغزشی داخل صفحه (نمای بالا) [۳۸]



شکل ۱۸. الف) مد ارتعاشی تکان‌دهنده خارج صفحه<sup>۲۳</sup> تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با دو تیر افقی نگاه‌دارنده (نمای جانبی) ب) نحوه تغییر شکل تشدیدگر در مد ارتعاشی تکان‌دهنده خارج صفحه (نمای جانبی) [۳۸]



شکل ۱۹. الف) مد ارتعاشی تکان‌دهنده داخل صفحه<sup>۲۴</sup> تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با دو تیر افقی نگاه‌دارنده (نمای بالا) ب) نحوه تغییر شکل تشدیدگر در مد ارتعاشی تکان‌دهنده داخل صفحه (نمای بالا) [۳۸]



شکل ۲۰. الف) مد ارتعاشی پیچشی تشدیدگر مستطیلی میکرومکانیکی با دو تیر افقی نگاه‌دارنده (نمای جانبی) ب) نحوه تغییر شکل تشدیدگر در مد ارتعاشی پیچشی (نمای جانبی) [۳۸]



### ۹-۱. تشدیدگر شانه‌ای

این تشدیدگر به‌گونه‌ای طراحی شده است که ضریب کیفیت بالایی دارد؛ به‌طوری‌که حتی ضریب کیفیت آن از تشدیدگر تیر دو سر آزاد نیز بیشتر است (مانند ضریب کیفیت ۱۰۰۰۰۰ در فشار هوای ۱ mtorr). اما این نوع تشدیدگر تمایل دارد تا در محدوده فرکانسی پایین (در حدود کیلوهرتز) ارتعاش کند. این امر به‌دلیل ساختار بزرگ این تشدیدگرها و جرم بالاست. به‌دلیل ساختار پیچیده این تشدیدگر امکان کاهش جرم آن راحت نیست [۲۸].

### ۹-۲. تشدیدگر تیر گیردار - گیردار

ایده استفاده از تشدیدگر تیر گیردار - گیردار افزایش فرکانس تشدید با داشتن ضریب کیفیت بالای ۱۰۰۰ می‌باشد. دو طرف تشدیدگر، گیردار است و تشدیدگر از طریق الکتروودی که در زیر تیر قرار گرفته است به‌صورت الکترواستاتیک تحریک می‌شود [۴۱].

### ۹-۳. تشدیدگر خمشی تیر آزاد - آزاد

سختی بزرگ تیر گیردار - گیردار سبب افزایش اتلاف تکیه‌گاه می‌شود که نتیجه آن کاهش ضریب کیفیت است. برای رفع این مشکل تشدیدگر خمشی تیر آزاد - آزاد استفاده شده است که دارای محدوده فرکانسی ۳۰ تا ۹۰ مگاهرتز و ضریب کیفیت بالای ۸۴۰۰ است [۴۱]. این تشدیدگر شامل یک تیر آزاد - آزاد است که در چهار نقطه خمشی توسط چهار تیر پیچشی نگهداری می‌شود و هر کدام از تیرها به زیرلایه متصل‌اند. تشدیدگر تیر آزاد - آزاد در نقاط گرهی تیر نگهداری می‌شود. در نقاط گرهی حرکت وجود ندارد. ضریب کیفیت در حالت گیردار با کاهش طول تیر کاهش می‌یابد. اگر سازوکار اصلی اتلاف انرژی اتلاف تکیه‌گاه باشد، در تیر یک‌سر گیردار مقدار ضریب کیفیت با افزایش فرکانس تشدید کاهش می‌یابد. در تشدیدگر تیر آزاد - آزاد مقدار ضریب کیفیت با فرکانس تغییر نمی‌کند.

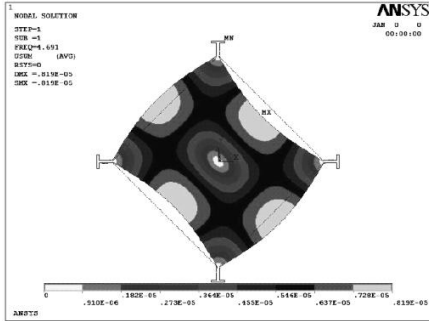
مدهای حجمی در مقایسه با سایر مدها فرکانس‌های بالاتری دارند و این امر به‌علت بزرگ‌تر بودن سختی این مدها نسبت به سایر مدهاست. همچنین مدهای حجمی در فرکانس یکسان ضریب کیفیت بالاتری نسبت به مدهای خمشی دارند. نرخ سطح به حجم در مدهای خمشی نسبت به مدهای حجمی بالاتر است و بالاتر بودن نرخ سطح به حجم سبب افزایش اتلاف انرژی از طریق سطح می‌شود. لذا مدهای خمشی ضریب کیفیت پایین‌تری نسبت به مدهای حجمی دارند. یک مثال معمول مدهای حجمی در تشدیدگر دیسکی میکرومکانیکی مشاهده می‌شود. تشدیدگر دیسکی می‌تواند در دو مد مجزا حجمی ارتعاش کند. اول مد شعاعی - محیطی<sup>۲۵</sup> (یا مد کششی<sup>۲۶</sup> یا مد تنفس<sup>۲۷</sup>). این مد زمانی اتفاق می‌افتد که ابعاد سطح به‌طور مساوی یکدیگر و در تمام جهات تغییر کند. دوم مد بیضوی<sup>۲۸</sup> یا wine glass. این مد زمانی رخ می‌دهد که ابعاد تشدیدگر فقط در یک جهت تغییر کند و در این مد تشدیدگر به صورت دو بیضی متناوب و عمود بر هم که دارای چهار نقطه گرهی<sup>۲۹</sup> هستند در یک سیکل ارتعاش می‌کند. این دو مد تشدیدگر دیسکی میکرومکانیکی در شکل ۲۱ نمایش داده شده است [۱۷]. در شکل‌های ۲۲ تا ۲۸ نیز چند نوع مد حجمی تشدیدگرهای مختلف نمایش داده شده است.

### ۸. سازه تشدیدگر میکرومکانیکی

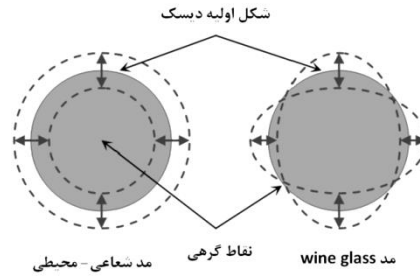
سه روش برای افزایش فرکانس تشدید و ضریب کیفیت یک تشدیدگر میکرومکانیکی وجود دارد که عبارت‌اند از [۲۸]: استفاده از موادی با خواص الاستیک بالاتر، استفاده از هندسه تشدیدگر و کاهش ابعاد تشدیدگر. محققان از ترکیب این سه روش استفاده می‌کنند تا به تشدیدگری با عملکرد منحصر به‌فرد دست یابند.

### ۹. خصوصیات تشدیدگرها

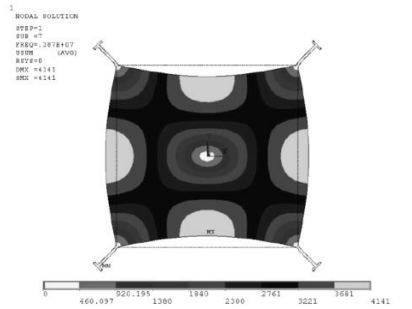
در این قسمت برخی از انواع تشدیدگرها و خصوصیات آنها مورد بحث قرار می‌گیرد.



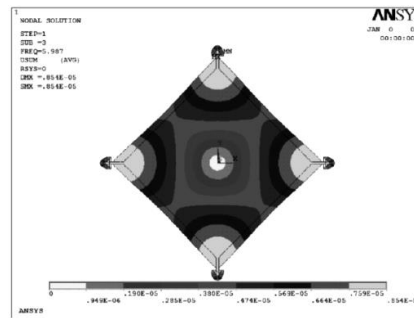
شکل ۲۲. مد wine glass تشدید گر مربعی میکرومکانیکی دارای تیرهای T شکل [۳۹]



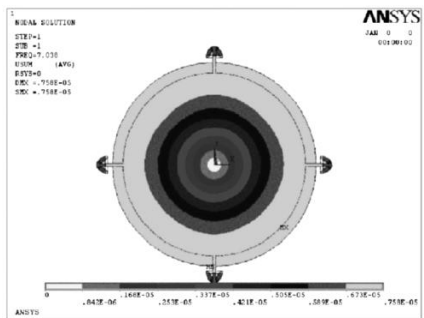
شکل ۲۱. دو نوع مد حجمی تشدید گر دیسکی میکرومکانیکی [۱۷]



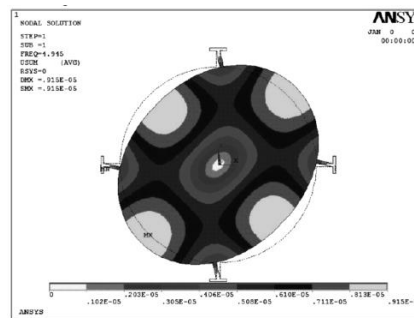
شکل ۲۴. مد Lamé تشدید گر مربعی میکرومکانیکی دارای تیرهای T شکل [۲۴]



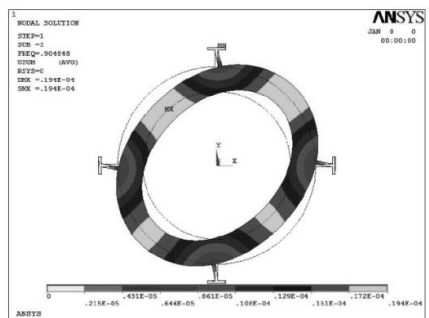
شکل ۲۳. مد کششی تشدید گر مربعی میکرومکانیکی دارای تیرهای T شکل [۴۰]



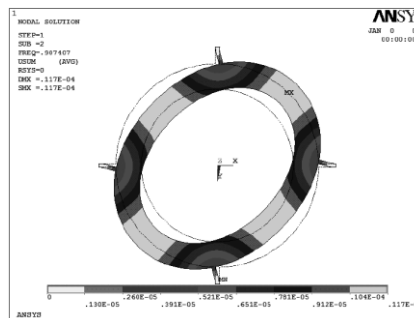
شکل ۲۶. مد کششی تشدید گر دیسکی میکرومکانیکی دارای تیرهای T شکل [۴۰]



شکل ۲۵. مد wine glass تشدید گر دیسکی میکرومکانیکی دارای تیرهای T شکل [۴۰]



شکل ۲۸. مد بیضوی تشدید گر حلقوی میکرومکانیکی دارای تیرهای T شکل [۲۶]



شکل ۲۷. مد بیضوی تشدید گر حلقوی میکرومکانیکی دارای تیرهای مستقیم [۲۶]

## ۹-۴. تشدیدگر پیچشی

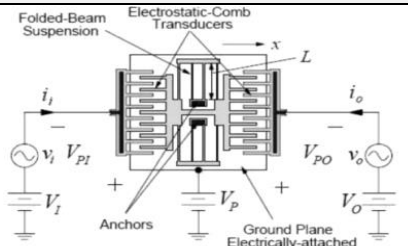
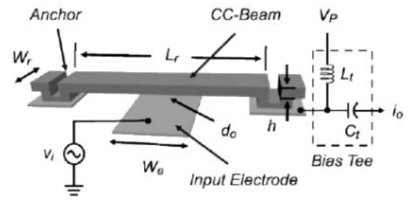
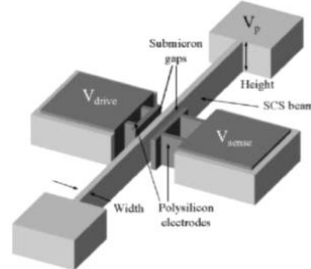
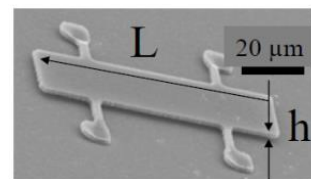
تشدیدگرهای پیچشی می‌توانند در مد پیچشی عمل کنند که این امر سبب می‌شود فرکانس تشدید آنها به‌جای مدول یانگ به مدول برشی بستگی داشته باشد. وقتی این تشدیدگر مرتعش می‌شود، فقط دچار پیچش خالص شده و تنش‌های کششی یا فشاری در این مد اتفاق نمی‌افتد. حذف مناطق کششی و فشاری از ساختار باعث می‌شود جریان گرما از ساختار عبور نکند و در نتیجه در این مد، اتلاف ترموالاستیک رخ نمی‌دهد. محدودیت این تشدیدگر داشتن تنها یک مد ارتعاشی است و اینکه فرکانس‌های تشدید برای یک دستگاه خاص به یک فرکانس محدود شده است. علت بالابودن ضریب کیفیت مد پیچشی نسبت

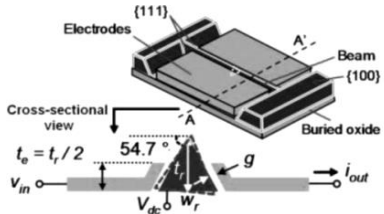
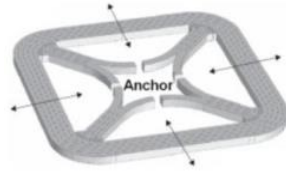
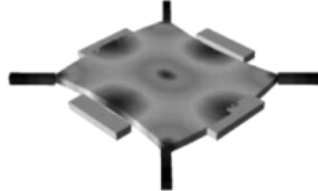
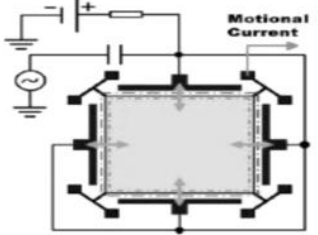
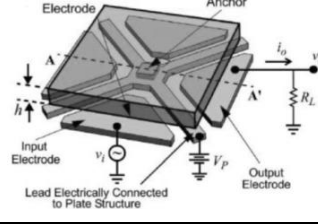
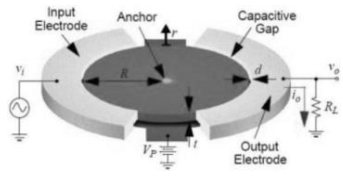
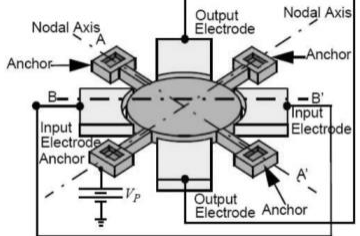
به مد خمشی داشتن اتلاف تکیه‌گاه خیلی پایین و اتلاف فشار فیلم پایین‌تر است [۲۸].

## ۹-۵. تشدیدگر دیسکی مد شعاعی - محیطی

در کاربردهای RF نیاز به فرکانس‌هایی در محدوده یو. اچ. اف. است و این امر مستلزم داشتن تشدیدگرهایی با ابعاد کوچکتر و سختی بیشتر است تا به ضریب کیفیت بالا دست پیدا کنند. با استفاده از تشدیدگر دیسکی مد شعاعی - محیطی می‌توان با حفظ ابعاد نسبتاً بزرگ به فرکانس‌های بالا دست پیدا کرد [۴۱]. در جدول ۱ به‌طور خلاصه برخی از انواع تشدیدگرها، به‌همراه شکل و مشخصات آنها معرفی شده است.

جدول ۱. تصویر، نام و مشخصات برخی از انواع تشدیدگرها

مشخصات [۱۷]	نام	شکل تشدیدگر
در فرکانس ۳۲ کیلوهرتز ضریب کیفیت ۵۰۰۰۰ و مقاومت حرکتی ۴۲۰ کیلو اهم، ولتاژ بایاس dc برابر ۲/۵ ولت و شکاف ۱ میکرومتر می‌باشد	تشدیدگر شانهای	
در فرکانس ۹/۳۴ مگاهرتز دارای ضریب کیفیت ۳۱۰۰، مقاومت حرکتی ۸/۲۷ کیلو اهم، ولتاژ بایاس dc برابر ۸ ولت و شکاف ۱۰۰ نانومتر است	تشدیدگر خمشی تیر گیردار - گیردار	
در فرکانس ۸۰ کیلوهرتز دارای ضریب کیفیت ۷۴۰۰۰ بوده و در نمونه‌ای دیگر در فرکانس ۳/۲ مگاهرتز دارای ضریب کیفیت ۴۵۰۰ می‌باشد. در هر دو نمونه شکاف ۸۰ نانومتر است	تشدیدگر خمشی تیر گیردار - گیردار	
در فرکانس ۹۲ مگاهرتز ضریب کیفیت ۷۴۵۰ بوده و مقاومت حرکتی آن ۱۶۷ کیلو اهم و ولتاژ بایاس dc برابر ۷۶ ولت می‌باشد	تشدیدگر خمشی تیر آزاد - آزاد [۲۸]	

مشخصات [۱۷]	نام	شکل تشدیدگر
<p>در فرکانس ۲۰ مگاهرتز دارای ضریب کیفیت ۲۲۰۰۰۰، مقاومت حرکتی ۱۲ کیلو اهم، ولتاژ بایاس dc برابر ۱ ولت و شکاف ۱۳۰ نانومتر می باشد</p>	<p>تشدیدگر پیتچی که به صورت تیر مثلثی شکل است</p>	
<p>این تشدیدگر در فرکانس ۵/۱ مگاهرتز دارای ضریب کیفیت ۸۰۰۰۰، ولتاژ بایاس dc برابر ۴/۶ ولت می باشد</p>	<p>تشدیدگر مربعی مد خمشی</p>	
<p>این تشدیدگر در فرکانس ۱۷۳ مگاهرتز دارای ضریب کیفیت ۹۳۰۰ و مقاومت حرکتی ۱۸ کیلو اهم و شکاف ۱۹۵ نانومتر است</p>	<p>تشدیدگر مربعی مد خمشی Lamé</p>	
<p>در فرکانس ۲/۱۸ مگاهرتز دارای ضریب کیفیت ۱۱۶۰۰۰۰ ولتاژ بایاس dc برابر ۶۰ ولت و شکاف ۳ میکرومتر می باشد</p>	<p>تشدیدگر مربعی مد خمشی کششی با تیرهای T شکل</p>	
<p>در فرکانس ۶۸ مگاهرتز دارای ضریب کیفیت ۱۵۰۰۰، مقاومت حرکتی ۱۳/۵ کیلو اهم، ولتاژ بایاس dc برابر ۲۵ ولت و شکاف ۹۰ نانومتر می باشد</p>	<p>تشدیدگر ورق مربعی مد خمشی</p>	
<p>در فرکانس ۱۵۶ مگاهرتز دارای ضریب کیفیت ۹۲۹۰، مقاومت حرکتی ۱۰۰ کیلو اهم، ولتاژ بایاس dc برابر ۳۵ ولت و شکاف ۱۰۰ نانومتر است</p>	<p>تشدیدگر دیسکی مد شعاعی - محیطی</p>	
<p>در حالی که ماده سازنده پلی سیلیکون باشد، در فرکانس ۶۰ مگاهرتز دارای ضریب کیفیت ۴۸۰۰۰ است. مقاومت حرکتی آن ۱/۵ کیلو اهم، ولتاژ بایاس dc برابر ۱۲ ولت و شکاف ۸۰ نانومتر است. در حالی که ماده سازنده سیلیکون تک کریستاله باشد، در فرکانس ۵/۴۳ مگاهرتز دارای ضریب کیفیت ۱۹۰۰۰۰۰ بوده، مقاومت حرکتی آن ۱۷ کیلو اهم، ولتاژ بایاس dc برابر ۶۰ ولت و شکاف ۲/۷ میکرومتر است</p>	<p>تشدیدگر دیسکی مد خمشی wine glass</p>	

مشخصات [۱۷]	نام	شکل تشدیدگر
<p>در فرکانس ۱۱/۶ مگاهرتز دارای ضریب کیفیت ۱۶۵۱، مقاومت حرکتی ۲۲ کیلو اهم، ولتاژ بایاس dc برابر ۵ ولت و شکاف ۲۰۰ نانومتر می‌باشد</p>	تشدیدگر دیسکی دایره‌ای مد خمشی	
<p>در فرکانس ۱/۲ گیگاهرتز دارای ضریب کیفیت ۱۵۰۰۰، مقاومت حرکتی ۲۷۴ کیلو اهم، ولتاژ بایاس dc برابر ۱۰ ولت و شکاف ۱۰۰ نانومتر است</p>	تشدیدگر حلقوی مد محیطی	

## ۱۰. نتیجه‌گیری

در این مقاله مباحث مختلف در مورد تشدیدگرهای میکرومکانیکی مورد بحث قرار گرفته است. از جمله مباحث مهم در کاربرد این تشدیدگرها، شناسایی آنها، خصوصیات و انواع مدهای ارتعاشی تشدیدگرهای میکرومکانیکی است، که به آن پرداخته شده است. مقاله حاضر در جهت طراحی تشدیدگرها دید خوبی ایجاد می‌کند؛ زیرا گام نخست برای طراحی تشدیدگرها آشنایی با انواع آنها، خصوصیات

فرکانسی و ضریب کیفیت آنهاست. برای مثال در این مقاله نشان داده شد که مدهای حجمی به‌مراتب دارای فرکانس طبیعی بالاتری نسبت به مدهای خمشی و پیچشی هستند. بنابراین اگر طراح بخواهد در محدوده فرکانس‌های ارتعاشی بالا طراحی خود را انجام دهد، بهتر است از مدهای حجمی استفاده کند. استفاده از این مقاله، از منابع متعددی استخراج شده است، برای آشنایی و آغاز تحقیق درباره تشدیدگرهای میکرومکانیکی سودمند خواهد بود.

## ۱۱. مأخذ

- [1] Jha, C. M., "Thermal and mechanical isolation of ovenized MEMS resonator", PhD Thesis, Stanford University, 2008.
- [2] Lin, L., R. T. Howe, A. P. Pisano. "Microelectromechanical filters for signal processing." *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 7, 1998, pp. 286-294,
- [3] Nguyen, C. T.-C. "Microelectromechanical devices for wireless communications." *MEMS 98*, 11<sup>th</sup> Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, Heidelberg, Germany, 1998.
- [4] Zhong, Q., D. Inniss, K. Kjoller, V. B. Elings. "Fractured polymer/silica fiber surface studied by tapping mode atomic force microscopy." *Surface Science*, vol. 290, 1993, pp. 688-692.
- [5] Buser, R. A., N. F. de Rooij. "Resonant silicon structures." *Sensors and Actuators*, vol. 17, 1989, pp. 145-154.

- [6] Stemme, G. "Resonant silicon sensors." *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 1, 1991, pp. 113.
- [7] Kleiman, R. N., G. K. Kaminsky, J. D. Reppy, R. Pindak, D. J. Bishop. "Single-crystal silicon high-Q torsional oscillators." *Review of Scientific Instruments*, vol. 56, 1985, pp. 2088-2091.
- [8] R. T. Howe, R. S. Muller. "Resonant-microbridge vapor sensor." *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 33, 1986, pp. 499-506.
- [9] Burg, T. P., A. R. Mirza, N. Milovic, C. H. Tsau, G. A. Popescu, J. S. Foster, S. R. Manalis. "Vacuum-Packaged Suspended Microchannel Resonant Mass Sensor for Biomolecular Detection." *Journal Microelectromechanical Systems*, vol. 15, 2006, pp. 1466-1476.
- [10] Parsons, P., A. Glendinning, D. Angelidis. "Resonant sensors for highaccuracy pressure measurement using silicon technology." *presented at NationalAerospace and Electronics Conference, NAECON, Proceedings of the IEEE 1992.*
- [11] Stemme, E., G. Stemme. "A Balanced Resonant Pressure Sensor." *Sensors and Actuators A: Physical*, 1990, vol. 21, pp. 336-341.
- [12] Greenwood, J. C. "Silicon in mechanical sensors." *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1988, pp. 1114-1128.
- [13] Roessig, T. A. W. "Integrated MEMS Tuning Fork Oscillators for SensorApplications", thesis in Mechanical Engineering at University of California, Berkeley, 1998.
- [14] Kim, H. C., S. Seok, I. Kim, S.-D. Choi, K. Chun. "Inertial-Grade Out-of- Plane and In-Plane Differential Resonant Silicon Accelerometers (DRXLs)." presented at TRANSDUCERS '05, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Seoul, 2005.
- [15] Hsu, W.T., J. R. Clark, C. T.-C. Nguyen. "A resonant temperature sensor based on electrical spring softening." presented at TRANSDUCERS '01 / Eurosensors XV, The 11<sup>th</sup> International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Munich, Germany, 2001.
- [16] Khine, L., "Performance Parameters of Micromechanical Resonators", PhD Thesis, National University of Singapore, 2010.
- [17] Basu, J., T. K. Bhattacharyya. "Microelectromechanical Resonators for Radio Frequency Communication Applications." *Microsystem Technologies*, vol 17 (10-11), 2011, pp.1557-1580.
- [18] Wikipedia, <http://en.wikipedia.org> (accessed August 30, 2016)
- [19] Kaajakari, V., *Theory and Analysis of MEMS Resonators.*
- [20] Gualdino, A., V. Chu, J. P. Conde. "Multi-modal analysis of out-of-plane vibration modes of thin-film circular resonators for mass sensing applications", *Procedia Engineering* 47, 2012, pp. 1121-1124.
- [21] Wang, X., D. Xiao, Z. Zhou, Z. Chen, X. Wu, S. Li. "Support loss for beam undergoing coupled vibration of bending and torsion in rocking mass resonator." *Sensors and Actuators A* 171, 2011, pp. 199-206.
- [22] Hao, Z., F. Ayazi. "Support loss in the radial bulk-mode vibrations of center-supported micromechanical disk resonators." *Sensors and Actuators A*, vol. 134, 2007, pp. 582-593.

- [23] Wu, G., D. Xu, B. Xiong, Y., Wang. "A high Q micromachined single crystal silicon bulk mode resonator with pre-etched cavity." *Microsystem Technologies*, 2011.
- [24] Abdelmoneum, M. A., M. U. Demirci, C. T. C. Nguyen. "Stemless wine glass mode disk micromechanical resonator", Proceedings of the 16<sup>th</sup> IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Kyoto, Japan, Jan 2003, pp. 698-701.
- [25] Lee, J. E.Y., J. Yan, A. A. Seshia. "Anchor Limited Q in Flexural Mode Resonators", *Ultrasonics Symposium*, 2008.
- [26] Wikipedia, "quality factor", <https://wikipedia.org> (accessed August 30, 2016).
- [27] Alancastro, N. S. "polycrystalline diamond RF MEMS resonator technology and characterization", PhD Thesis, Stanford University, 2005.
- [28] Ren, S., Yuan, W., Qiao D., Deng, J., Sun, X. "A Micromachined Pressure Sensor with Integrated Resonator Operating at Atmospheric Pressure." *Sensors*, vol. 13, 2013, pp. 17006-17024.
- [29] Wang, X., Xiao, D., Zhou Z., Wu, X., Chen, Z., Li, S. "Support Loss and Q Factor Enhancement for a Rocking Mass Microgyroscope." *Sensors*, vol. 11, 2011, pp. 9807-9819.
- [30] Lee, J. E.Y., A. A. Seshia. "5.4-MHz single-crystal silicon wine glass mode disk resonator with quality factor of 2 million." *Sensors and Actuators A: Physical*, vol 156, 2009, pp. 28-35.
- [31] Judge, J. A., D. M. Photiadis, J. F. Vignola, B. H. Houston, J. Jarzynski. "Attachment loss of micromechanical and nanomechanical resonators in the limits of thick and thin support structures." *Journal of Applied Physics*, Vol. 101, No. 1, 2007, pp. 1-11.
- [32] Czuplewski, D., J. P. Sullivan, T. A. Friedmann, D. W. Carr, B. E. N. Keeler, J. R. Wendt. "Experimental demonstration of a laterally deformable optical nanoelectromechanical system grating transducer." *J. Appl. Phys.* 97, 2005.
- [33] Carr, D. W. "Nanoelectromechanical Resonators", Ph.D. thesis, Cornell University, 2000.
- [34] Blom, F. R., S. Bowstra, M. Elwenspoek, J. H. J. Fluitman. "Dependence of the quality factor of micromachined silicon beam resonators on pressure and geometry." *J. Vac. Sci. Technol B* 10(1), Jan/Feb 1992.
- [35] Yasumura, K. Y., T. D. Stowe, E. M. Chow, T. Pfafman, T. W. Kenny, B. C. Stipe, D. Rugar. "Quality factors in micron-and submicron-thick cantilevers." *Journal Microelectromech Sys*, vol. 9(1) Mar. 2000, 117.
- [36] Demirci, M. U., M. A. Abdelmoneum, C. T.-C. Nguyen. "Mechanically corner-coupled square microresonator array for reduced series motional resistance." *IEEE Transducers, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, 12<sup>th</sup> International Conference, vol. 2, June 9-12, 2003.
- [37] Urey, H., C. Kan, W. O. Davis. "Vibration mode frequency formulae for micromechanical scanners." *Journal of Micro-Mechanics and Microengineering*, vol. 15, 2005, pp. 1713-1721.
- [38] Lee, J. E-Y., J. Yan, A. A. Seshia. "Low loss HF band SOI wine glass bulk mode capacitive square-plate resonator." *Journal of Micro-Mechanics and Microengineering*, vol. 19, 2009, pp. 1-10.
- [39] Lee, J. E-Y., J. Yan, A. A. Seshia. "Study of lateral mode SOI-MEMS resonators for reduced anchor loss." *Journal of Micro-Mechanics and Microengineering*, vol. 21, 2011, pp. 1-10.

[40] Sutagundar, M., B. G. Sheeparamatti, D. S. Jangamshetti. "Research Issues in MEMS Resonators." *International Journal of Engineering And Science*, Vol. 4, Issue 8, August 2014, pp. 29-39.

پی نوشت

- 
1. microelectromechanical systems
  2. resonators
  3. circular disks
  4. square plates
  5. annular rings
  6. comb
  7. quality factor
  8. radio frequency microelectromechanical system
  9. anchor losses
  10. air damping
  11. thermoelastic dissipation
  12. surface loss
  13. actuation
  14. sensing
  15. motional resistance
  16. very high frequency
  17. ultra high frequency
  18. flexural mode
  19. torsion mode
  20. bulk mode
  21. out of plane sliding mode
  22. in plane sliding mode
  23. out of plane rocking mode
  24. in plane rocking mode
  25. radial-contour mode
  26. extensional mode
  27. breathing mode
  28. elliptical mode
  29. nodal points