

تشدیدگرهای الکترومکانیکی بر پایه نانوساختارها

نویسندگان: سمیه فردین دوست^۱، اعظم ایرجی زاد^۲، و رضا سروری^۳

۱. پژوهشکده علوم و فناوری نانو، دانشگاه صنعتی شریف

۲. دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شریف

۳. دانشکده برق دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

اخیراً ساخت تشدیدگرها در ابعاد نانو با بسامد تشدید بالا یکی از موضوعهای مورد تحقیق و توجه می‌باشد. جذابیت این ساختارها در توانایی‌شان به عنوان حسگر، فعال‌ساز و قابلیت مکانیکی‌شان در ابعاد نانو می‌باشد. در این مقاله مروری بر سیستم‌های الکترومکانیکی معرفی شده بر پایه نانوساختارهای متنوع، انواع روش‌های تحریک و آشکارسازی و کاربرد این سیستم‌ها در حسگری جرم و فشار ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: سیستم الکترومکانیکی، نانوساختار، حسگری جرم

iraji@sharif.edu

۱- مقدمه

رشد روزافزون صنعت مخابرات بی‌سیم توجه زیادی را در توسعه اجزاء با عملکرد در فرکانس رادیویی جلب کرده است. سیستم‌های الکترومکانیکی کاندیدای مناسبی برای فیلترها، نوسانگرها یا آنتن‌ها درحوزه فرکانس رادیویی می‌باشد. جایگزینی این سیستم‌ها به دلیل ابعاد کوچک و مصرف انرژی پایین‌شان و امکان ایجاد تشدیدگرها با فرکانس‌های چندگانه بر روی یک ویفر از اهداف تحقیق روی سیستم‌های میکرو و نانوالکترومکانیکی می‌باشد. از طرفی امکان ادغام تشدیدگرهای میکروالکترومکانیکی با CMOS در یک بسته‌بندی منفرد منجر به کاهش پارامترهایی مانند فاکتور شکل، پیچیدگی برد می‌شود. همچنین می‌توان گفت عملکرد الکتریکی سیستم‌های الکترومکانیکی ارجحیت به نوسانگرهای LC یا RC دارد [۱-۳]. اخیراً ساخت تشدیدگرها در ابعاد نانو با بسامد تشدید بالا یکی از موضوعات مورد تحقیق و مورد توجه می‌باشد. جذابیت این ساختارها در توانایی‌شان به عنوان حسگر، فعال‌ساز و قابلیت مکانیکی‌شان در ابعاد نانو می‌باشد. تیرک‌های نانومتری مقدار Q بسیار بالایی دارند و هنگام نوسان انرژی کمی تلف می‌کنند. این ابزارها به میرایی بیرونی حساسیت زیادی دارند که این خصوصیت برای گسترش ابزارهای حسگر بسیار مهم است. همچنین ابزارهای با Q بالا نویزهای ترمودینامیکی کوچکی دارند به این معنی که نوسانات مکانیکی تصادفی در آنها خیلی کم است. از مزیت‌های دیگر ابزارهای NEMS این است که به توان کمی برای راه اندازی نیازمندند. جرم مؤثر کوچک یک میله نانومتری باعث می‌شود که بسامد تشدید آن با کوچکترین تغییری در جرم تغییر کند که این مسأله می‌تواند اساس کار بسیاری از حسگرهای با حساسیت بالا باشد. از این حسگرها برای آشکارسازی نرخ لایه‌نشانی در سیستم‌های لایه‌نشانی، آشکارسازی باکتری‌ها، تخمین ظرفیت ذخیره هیدروژن و اندازه‌گیری استوکیومتری ترکیبات سطحی می‌توان استفاده کرد. در یک تعریف ساده سیستم‌های الکترومکانیکی ساختارهای متحرک با ابعاد در حوزه میکرو و نانومتری می‌باشند. در واقع در این ساختارها حداقل یکی از ابعاد در مرتبه چند صد نانومتر تا صد میکرومتر است به طوریکه ابعاد در سیستم‌های نانوالکترومکانیکی بسته به محدودیت فرآیند ساخت زیر ۱۰۰ نانومتر است. مشخص‌ترین وجه تمایز بین ساختارهای میکرو و نانوالکترومکانیکی تکنولوژی ساخت آن‌ها می‌باشد. سیستم‌های نانوالکترومکانیکی را نمی‌توان کوچک شده

سیستم‌های میکرو دانست بلکه در این حوزه با تکنولوژی متفاوتی مواجه هستیم. در سیستم‌های میکروالکترومکانیکی سیلیکن ماده اصلی برای ساخت می‌باشد اما در سیستم‌ها با ابعاد نانو، مواد و ساختارهای جدیدی مانند نانوتیوب‌ها، نانوسیم‌ها و ترکیبات ارگانیک قابل استفاده هستند [۴]. کاهش ابعاد در این سیستم‌ها به کمک روش‌های ساخت جدید مانند لیتوگرافی پرتو الکترونی، میکروسکوپ نیروی اتمی و تکنیک نانو چاپ امکان پذیر است. فیزیک حاکم بر ساختارهای میکرو و نانو متفاوت است و به همین دلیل در فرآیند ساخت این سیستم‌ها با چالش‌های جدیدی مواجه هستیم. ولیکن با توجه به توسعه و دسترسی به دستگاه‌ها و مواد جدید، کاربردهای ارزشمندی خصوصاً در حوزه نانوساختارها ظهور کرده است. یک تشدیدگر را می‌توان سیستمی تعریف کرد که با یک تحریک مناسب به ارتعاش واداشته می‌شود. فرکانس تشدید بر اساس خواص فیزیکی ماده تشکیل دهنده تشدیدگر، ابعاد و نوع شکل فیزیکی آن قابل محاسبه است. تشدیدگرهای میکرو و نانوالکترومکانیکی کاربردهای متنوعی از جمله حسگری و استفاده در سیستم‌های ارتباط از راه دور دارند. قابلیت آشکارسازی مقادیر بسیار کمی از جرم، نیرو، فشار و شتاب در این سیستم‌ها به عنوان حسگر وجود دارد. به عنوان یک جسم فیزیکی، ساختار تشدیدگرهای میکرو و نانوالکترومکانیکی دارای ویژه فرکانس‌های نامحدودی می‌باشند که معمولاً ویژه مقدار گفته می‌شود و تحت شرایط مشخصی می‌توان هر کدام از آن‌ها را تحریک کرد تا ساختار را به تشدید واداریم. سیستم‌های نانوالکترومکانیکی شکل‌های هندسی متنوعی بسته به نوع ماده به‌کار رفته به خود می‌گیرند که از جمله آن یک میله ساده، رشته، پوسه و غیره می‌باشند.

وقتی یک سیستم نانوالکترومکانیکی از نقطه تعادل خود خارج می‌شود، می‌توان آن را به صورت یک نوسانگر هارمونیک ساده مدل‌سازی کرد و در این مدل تغییر شکل سیستم نانوالکترومکانیکی را فقط با یک پارامتر مکان^x نشان می‌دهیم. معادله حاکم بر آن را می‌توان به‌صورت رابطه (۱-۱) نوشت:

(۱-۱)

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \eta \frac{dx}{dt} + k \frac{x}{M} = \frac{F_{ext}}{M}$$



ضریب کیفیت Q برای تشدید از رابطه $Q = \omega / \Delta\omega$ به دست می‌آید که در آن $\Delta\omega$ پهنای تشدید در نصف ارتفاع و ω بسامد تشدید است. اهمیت افزایش فاکتور کیفیت را می‌توان به دلایل زیر دسته بندی کرد: تشدیدگرها با فاکتور کیفیت بالا دارای امپدانس کمتری می‌باشند. فاکتور کیفیت بالا منجر به کاهش اثر نویز فاز می‌شود. بعلاوه تشدیدگرها با فاکتور کیفیت بالا دارای پایداری فرکانسی بهتری هستند که کمتر تحت اثر شیفست گرمایی یا بیاس قرار می‌گیرند. وقتی تشدیدگر در محیط سیال مانند هوا یا مایع قرار می‌گیرد، فاکتور کیفیت عمده‌تاً وابسته به اصطکاک می‌شود. برای یک نوسانگر هارمونیک Q عبارتست از:

(۷-۱)

$$Q = 2\pi \frac{\text{بیشینه انرژی ذخیره شده در یک دوره}}{\text{انرژی اتلاف شده هر دوره}}$$

با توجه به رابطه (۷-۱)، بیشینه انرژی ذخیره شده زمانی است که تشدیدگر در فرکانس f_n تشدید می‌کند. ضریب کیفیت نسبت انرژی ذخیره شده به اتلاف شده در هر دوره است و بنابراین عکس ضریب کیفیت اندازه‌ای بر اتلاف انرژی است.

۱-۱- بررسی پارامترهای مهم اتلاف در سیستم‌های الکترومکانیکی

بسته به اینکه تشدیدگر در محیط الاستیک یا خلأ ارتعاش کند مقادیر اتلاف متفاوت است. زمانیکه محیط هوا باشد فاکتور کیفیت توسط اصطکاک، لنگر خوردن، اتلاف سطح و اتلاف ترموالاستیک تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در یک محیط خلأ خوب اثر اصطکاک بر روی فاکتور کیفیت را می‌توان صرف‌نظر کرد. فاکتور کیفیت بالا منجر به توان مصرف پایین و حساسیت بالا به عنوان حسگر می‌شود. از طرفی هر چه فاکتور کیفیت بالاتر باشد اتلاف کمتر و کاهش پهنای باند داریم که برای استفاده در حوزه فرکانس رادیویی مهم می‌باشد و گزینندگی برای کاربرد حسگری یا به عنوان فیلتر را افزایش می‌دهد. از اتلاف‌های فیزیکی موجود در عملکرد تشدیدگر میکرو و نانوالکترومکانیکی می‌توان موارد زیر را نام برد:

اتلاف هوا

اتلاف نگهدارنده

اتلاف اثر سطح

اتلاف ترموالاستیک

بسته به طراحی تشدیدگر و محیط عملکرد آن، این مکانیزم‌ها در مقدار فاکتور کیفیت کل (۸-۱) تأثیرگذار است.

(۸-۱)

$$\frac{1}{Q_{\text{Total}}} = \frac{1}{Q_{\text{AIR}}} + \frac{1}{Q_{\text{Support}}} + \frac{1}{Q_{\text{Surface}}} + \frac{1}{Q_{\text{Thermoelastic}}}$$

اتلاف هوا عبارتست از انرژی تلف شده توسط تشدیدگر وقتی با محیط هوای اطرافش در حالت ارتعاش برخورد می‌کند. در این حالت سه مکانیزم دخیل در اتلاف هوا (۹-۱) عبارتند از اتلاف ویسکوز، ارتعاش آکوستیک و اتلاف فیلم

فشرده و مقدار Q_{AIR} را به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

(۹-۱)

$$\frac{1}{Q_{\text{AIR}}} = \frac{1}{Q_{\text{stoke}}} + \frac{1}{Q_{\text{squeezed}}} + \frac{1}{Q_{\text{Acoustic}}}$$

در اینجا M جرم مؤثر، η پارامتر اتلاف، k ثابت فنر و F_{ext} نیروی تحریک خارجی می‌باشند. فرکانس تشدید یک نوسانگر هارمونیک ساده را با رابطه (۲-۱) نشان می‌دهیم:

(۲-۱)

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} = \frac{D}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

اگر مقدار کمی جرم به این سیستم نانوالکترومکانیکی متصل شود فرکانس تشدید جابه‌جا می‌شود و می‌توان به‌صورت رابطه (۳-۱) بیان کرد:

(۳-۱)

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M+\Delta M}}$$

بنابراین تغییر فرکانس تشدید طبق رابطه (۴-۱) متناسب با جرم افزوده شده است.

(۴-۱)

$$\Delta M = \frac{-\Delta f_o}{2f_o} M$$

در سیستم‌های میکرو و نانوالکترومکانیکی، ساختار در حالت‌های بنیادی خودش ارتعاش می‌کند و تشدیدگر حالت خمیده، کشیده و یا پیچیده به خودش می‌گیرد. تشدیدگر وقتی در فرکانس منطبق با خودش قرار می‌گیرد تغییر شکل می‌یابد که به آنها حالت‌ها یا مدهای ساختاری هم می‌گویند. ویژه

فرکانس‌های نوسانگر را می‌توان با قرار دادن $F_{\text{ext}} = 0$ در معادله (۱-۱) بدست آورد. با در نظر گرفتن معادله (۲-۱)، می‌توان فهمید که جرم مؤثر، وابسته به جرم فیزیکی تشدیدگر است و همچنین به ابعاد هندسی و حالت تشدید بستگی دارد. در نتیجه کاهش ابعاد تشدیدگر منجر به کاهش مقدار مطلق جرم مؤثر می‌شود که خود این منجر به افزایش فرکانس تشدید می‌گردد. از سوی دیگر جرم مؤثر بطور معکوس متناسب است با مرتبه حالت تشدید و در نتیجه حالت‌ها یا مدهای مرتبه بالاتر دارای انرژی کمتری نسبت به مدهای بنیادی می‌باشند. کاهش ابعاد از میکروساختار به نانوساختار منجر به کاهش جرم مؤثر و در پی آن کاهش دامنه ارتعاش تشدیدگرهای نانوالکترومکانیکی در مقایسه با میکروالکترومکانیکی می‌شود. در رابطه (۱-۱)

مقدار η نشان دهنده مقدار اتلاف در سیستم است و با رابطه (۵-۱)، نشان داده می‌شود.

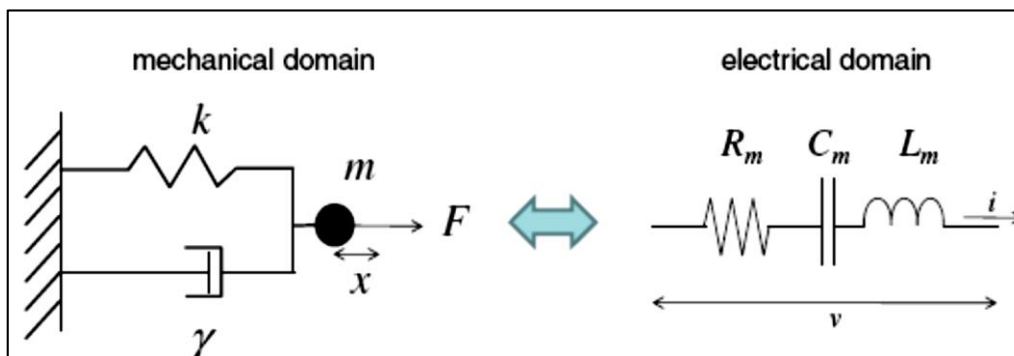
(۵-۱)

$$\eta = \frac{2\pi f_n m_{\text{eff}}}{Q}$$

Q ، در اینجا عبارت است از فاکتور کیفیت تشدیدگر و مهمترین پارامتر در طراحی یک تشدیدگر می‌باشد. فاکتور کیفیت فیزیکی Q بصورت نسبت انرژی ذخیره شده در تشدیدگر به انرژی اتلاف شده در یک دوره نوسان به دلیل اثر میرایی مکانیکی است. بر حسب اینکه مطابق شکل (۱-۱) ویژگی‌های مکانیکی یا الکتریکی تشدیدگر مد نظر باشد رابطه آن بصورت معادله (۶-۱) می‌باشد.

(۶-۱)

$$Q = 2\pi \frac{E_{\text{stored}}}{E_{\text{diss}}} = \frac{\sqrt{km}}{\gamma} = \frac{1}{R_m} \sqrt{\frac{L_m}{C_m}}$$



شکل (۱-۱) نمایش پارامترهای الکتریکی یک تشدیدگر با معادل مدل مکانیکی آن [۴]

جدول (۱-۱) مکانیزم تحریک و آشکارسازی در سیستم‌های الکترومکانیکی میکرو و نانو ساختاری [۴]

تحریک	آشکارسازی	مزایا	معایب
پیزوالکتریک	پیزوالکتریک	بازه گسترده دینامیکی، امکان ایزولاسیون آکوستیکی	نیاز به ادوات اضافی برای ادغام سازی با مدارات مجتمع
الکتروستاتیک	خازنی	میکروماشینکاری سطح	پروسه ساخت پیچیده
الکتروگرایی	پیزومقاومتی	تکنیک ساخت ساده	توان لازم برای تحریک گرمایی
اِپِتوگرایی	اِپِتیکی	ایزولاسیون الکتریکی، مقاوم در برابر نویز الکترومغناطیسی	نیاز به ادوات اضافی برای ادغام سازی با مدارات مجتمع
مغناطیسی	مغناطیسی	تنوع زیادی از روش‌های تحریک	محدود فقط به مواد مغناطیسی و میدان مغناطیسی بزرگ

اتلاف ویسکوز طبق رابطه (۱۰-۱) باعث جابه‌جایی محیط سیال حول تشدیدگر می‌شود. در حالیکه تشعشع آکوستیک وقتی اتفاق می‌افتد که تشدیدگر هوا را در راستای عمود بر حرکتش جابه‌جا کند.

(۱۰-۱)

$$Q_{\text{Stock}} = \frac{m_{\text{eff}}}{A} \sqrt{\frac{\pi f}{\rho \eta}}$$

که در اینجا m_{eff} جرم مؤثر، A مساحت سطوح بالا و پایین، f فرکانس تشدید، η ویسکوزیته در فشار اتمسفر و ρ چگالی هوا که بستگی به جرم مولی هوا، ثابت گاز و دمای عملکردی دارد. بطور مثال در تشدیدگرها با صفحات موازی براساس مبدل خازنی، سیال به سمت خارج گاف رانده می‌شود. حرکت هوا در راستای عمود به سطح، اتلاف فیلم فشرده بر اساس رابطه (۱۱-۱) ایجاد می‌کند.

(۱۱-۱)

$$Q_{\text{Squeezed}} = \frac{\pi^5 b m_{\text{eff}} f}{48 \eta L_{\text{eff}} w_{\text{eff}}^3}$$

در اینجا b ضخامت گاف هوا، η ویسکوزیته، L_{eff} طول مؤثر و w_{eff} پهنای مؤثر گاف هوا می‌باشد. اتلاف فیلم فشرده یک مکانیزم اتلاف غالب در سیستم‌های تشدیدگر میکرو و نانوالکترومکانیکی که به صورت الکتروستاتیکی تحریک می‌شوند، است. با این حال شکل تشدیدگر تعیین کننده شرایط محیطی در مکانیزم اتلاف غالب است.

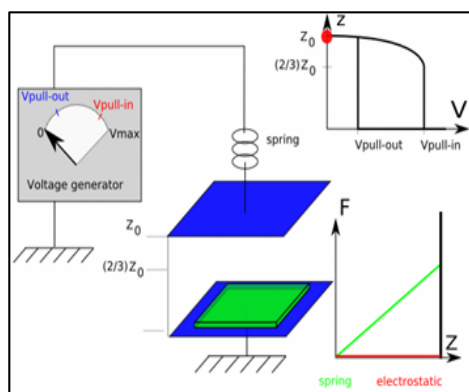
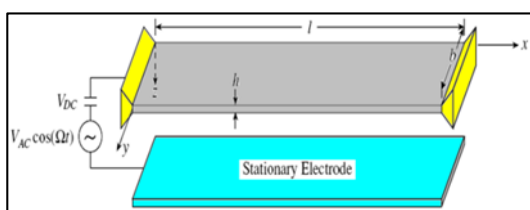
اتلاف نگهدارنده: این اتلاف معروف به اتلاف لنگر است در حالیکه تشدیدگر در نقاط اتصالش به دلیل جابه‌جایی در طول ارتعاش دچار استرس می‌شود. بنابراین سهمی از انرژی ارتعاشی از طریق انتشار موج الاستیک به سمت زیرلایه اتلاف می‌شود. اثر اتلاف نگهدارنده به نحوه طراحی نگهدارنده (نقاط اتصال) تشدیدگر بستگی دارد. هیچ عبارت کلی برای محاسبه Q_{Support} وجود ندارد. می‌توان آن را از طریق محاسبات تجربی با حذف اثر اتلاف هوا، سطح و ترموالاستیک پیدا کرد.

اتلاف ترموالاستیک: اتلاف ناشی از ذات ماده به دلیل اثر ترموالاستیسیته و به دلیل اثر جریان معکوس گرما در عرض ضخامت تشدیدگر است. همانطور که از نام آن برمی‌آید عبارتست از جفت‌شدگی بین میدان الاستیک در ساختار به دلیل خمش یا تغییر شکل و اثر میدان دمایی است. در تشدیدگرهای میکروساختاری خصوصاً تیرک‌های ضمیم با طول بلند اثر اتلاfi غالب است. با کاهش ضخامت اثر این اتلاف کم می‌شود.

۲- تکنیک‌های تحریک و آشکارسازی حرکت تشدیدگرهای نانوالکترومکانیکی

آشکارسازی بسامدهای بالا و جابه‌جایی‌های کوچک بسیار سخت است. یکی از مشکلات در این حوزه آشکارساختن حرکت ابزارهای نانومقیاس است. به دلیل محدودیت پراش شیوه‌های بازتابش اپتیکی مانند آنچه در محدوده میکرومتر روی سوزن تیرک‌های میکروسکوپ نیرو اتمی به کار برده می‌شود، قابل استفاده نیستند. این محدودیت زمانی ظاهر می‌شود که اندازه شیئی که می‌خواهد آشکار شود از طول موج نور کوچکتر باشد. معمولاً برای آشکارسازی حرکت در ابزارهای MEMS و NEMS از مبدل‌ها استفاده می‌شود. بطور مثال می‌توان حرکت مکانیکی را با تغییر ظرفیت خازنی که می‌توان آن را با یک مدار الکتریکی اندازه گرفت، آشکارسازی کرد. از موانع مهم گسترش ابزارهای NEMS ساختن مبدلی است که قادر به آشکارسازی جابه‌جایی‌هایی به کوچکی پیکومتر تا فمتومتر و یا بسامدهایی به بزرگی ۳۰ گیگاهرتز باشد. اغلب ابزارهای MEMS و NEMS بر اساس مبدل‌های الکترومکانیکی

میزان جابه‌جایی داریم که توسط یک الکتروود خارجی شناسایی می‌شود. در این نوع تحریک ظرفیت خازنی بین صفحات در موازات با ظرفیت پارازیتی قرار می‌گیرد که در فرکانس‌های بالا ظرفیت پارازیتی چندین مرتبه بزرگتر از ظرفیت خازنی تشدیدگر می‌شود و در این حالت باعث کاهش بازده تحریک می‌گردد. شکل (۳-۱) مدل جرم و فنر را برای معادل‌سازی نوسانات این تشدیدگرها به کار برده است. در این مدل یکی از صفحات خازن (گیت) ثابت است و صفحه یا عنصر معلق با اعمال ولتاژ دی سی به سمت پایین خمش پیدا می‌کند. طبق این مدل و روابط (۱۳-۱) تا (۱۷-۱)، بعد از یک آستانه دامنه جابه‌جایی با اعمال ولتاژ دی سی، امکان خمش زیاد و چسبیدن عنصر نوسان‌کننده به صفحه پایینی وجود دارد که به این مقدار ولتاژ متوقف‌کننده گفته می‌شود [۵].



شکل ۳-۱. نمایش تحریک الکترواستاتیکی یک ساختار معلق [۵]

$$F_{spring} = F_{electrostatic}$$

$$Kx = \frac{\epsilon A V^2}{2(d-x)^2}$$

$$V^2 = 2 \frac{kx}{\epsilon A} (d-x)^2$$

$$d_{pull-in} = \frac{2}{3}d \text{ \& } x_{pull-in} = \frac{1}{3}d$$

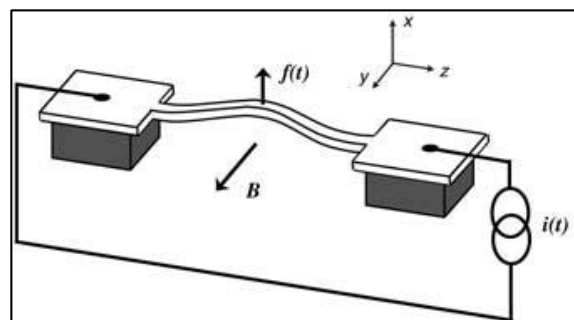
$$V_{pull-in} = \sqrt{\frac{8kd^3}{27\epsilon A}}$$

شکل (۴-۱) نمونه‌ای از یک تشدیدگر الکترومکانیکی که با تحریک الکترواستاتیک به نوسان واداشته شده است و در حین نوسان به کمک میکروسکوپ روبشی مد نوسانی ارتعاشی آن نشان داده شده است [۶].

پیزوالکتریک یا الکترواستاتیک (خازنی) هستند. هر کدام از این مبدل‌ها مزایا و معایب خودشان را دارند. تکنیک‌های بسیاری برای تحریک سیستم‌های الکترومکانیکی وجود دارند که از جمله رایج‌ترین آنها تحریک مغناطیسی و تحریک خازنی (الکترواستاتیک) هستند. مابقی روش‌ها کمتر در گزارش‌ها آمده‌اند اما می‌توانند در نسل‌های آتی سیستم‌های الکترومکانیکی استفاده شوند. در جدول ۱-۱، روش‌های تحریک و آشکارسازی سیستم‌های الکترومکانیکی را معرفی و به مزایا و معایب هر کدام از این روش‌ها اشاراتی کرده‌ایم.

۱-۲- تحریک مغناطیسی

در این نوع تحریک نیروی لورنتسی بر روی یک هادی حامل جریان تحت اثر یک میدان مغناطیسی ایستایی ایجاد می‌شود. همانطور که در شکل (۲-۱) نشان داده شده است جریان ac با فرکانس ω از درون میله در حضور یک میدان مغناطیسی قوی عبور می‌کند. بسته به جهت‌گیری میله نسبت به میدان مغناطیسی، نیروی تحریک کننده می‌تواند تحریک داخل صفحه یا خارج صفحه ایجاد کند. نیروی اعمالی به صورت $F(\omega) = lBi(\omega)$ که در آن $i(\omega)$ جریان هارمونیک تحریک کننده، l طول سیم و B شدت میدان مغناطیسی می‌باشد. جابه‌جایی هارمونیک مرکز میله با رابطه (۱۲-۱) بیان می‌شود.



شکل ۲-۱. نمایش تحریک مغناطیسی یک ساختار معلق [۵]

(۱۲-۱)

$$X(\omega) = \frac{lBi(\omega)}{m_{eff}(\omega_0^2 - \omega^2 + \frac{j\omega\alpha_0}{Q})}$$

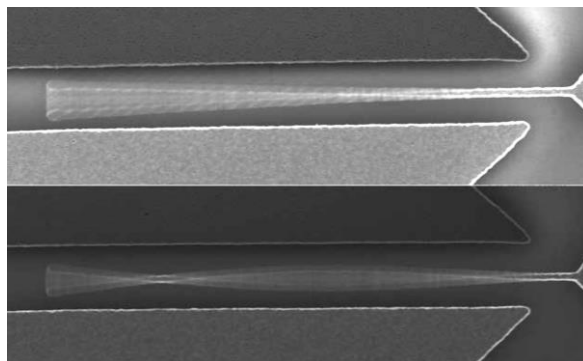
از معایب این روش ایجاد میدان مغناطیسی قوی برای تحریک است که برای تولید چنین میدان‌هایی به سیم لوله‌های ابرسانا نیاز است.

۲-۲- تحریک الکترواستاتیکی (خازنی)

نیروی جاذبه ایجاد شده بین صفحات خازن باردار عامل تحریک در این روش می‌باشد. شماتیک نمایش داده شده در شکل (۳-۱) مدل رایجی برای مبدل‌های الکتریکی در سیستم‌های نانوالکترومکانیکی است. عنصر معلق شده در تماس با الکترودهای سورس و درین در بالای گیت قرار گرفته است. ولتاژ dc اعمالی باعث خمش استاتیک تشدیدگر به سمت گیت می‌شود. یک سیگنال RF (δv_g) با اعمال نیروی $F = \epsilon \delta v \delta v$ باعث نوسان تشدیدگر حول نقطه

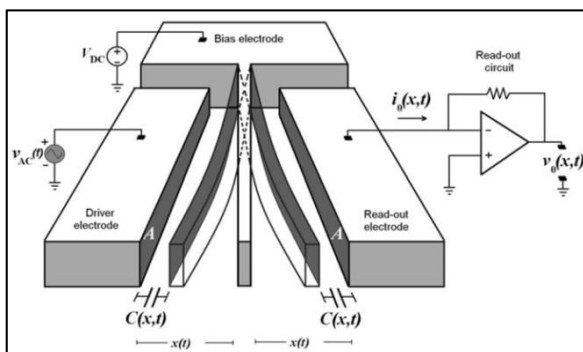
استاتیک Z_0 با دامنه δZ می‌شود. در این حالت تغییرات هدایت وابسته به بار الکتریکی (G) به عنوان مبدل حرکت مکانیکی به جریان متغیر با زمان استفاده می‌شود. تغییرات جریان سورس-درین با میزان خمش تشدیدگر را از رابطه (۲۰-۱) می‌توان بدست آورد. در مبدل‌های خازنی با تحریک الکترواستاتیکی، تیرک با اعمال یک ولتاژ ثابت پلاریزه می‌شود. سیگنال نوسانی یا همان Vac به تشدیدگر اعمال می‌شود. در فرکانس تشدید تیرک بیشترین

عبارت اول در این معادله مستقل از مؤلفه ولتاژ متناوب است. اما به مقدار جابه‌جایی تشدیدگر وابسته است و می‌تواند به عنوان نیروی فزنی در نظر گرفته شود. عبارت دوم هم می‌تواند به عنوان نیروی فزنی در نظر گرفته شود با ثابت فزنی که وابسته به میزان جابه‌جایی است. عبارت سوم شامل دو پارامتر متغیر با زمان V_{ac} و x می‌باشد. اگر تشدیدگر با یک ولتاژ نویزدار $V_n + V_{ac}$ تحریک شود حاصلضرب $V_n + V_{ac}$ در x منجر به پهن شدن فرکانس نوسان می‌گردد [۸].



۳- مروری بر تحقیقات انجام شده بر روی تشدیدگرهای میکرو و نانوالکترومکانیکی

نوسانگرهای مکانیکی معمول دارای نقص‌هایی می‌باشند که کاربرد آنها را محدود می‌کند. این نوسانگرها عمدتاً بر اساس ساختارهای بالک هستند و امکان افزودن به CMOS به راحتی بدون پیچیده‌سازی و افزایش فرآیند ساخت نمی‌باشد. نوسانگرهای مکانیکی باید با دیگر اجزای مدار رابطه برقرار کنند که در نتیجه آن یک محدودیت در کوچک‌سازی سیستم‌های الکترونیکی به حساب می‌آیند. از طرف دیگر نوسانگرهای الکترونیکی در مواردیکه دقت و نویز کمتری مورد نظر است، استفاده می‌شوند. پایداری و نویز فاز آنها را می‌توان با اتصال به نوسانگرهای مکانیکی با استفاده از یک حلقه قفل شده فاز ایجاد کرد. ولیکن این هم منجر به افزایش اندازه مؤلفه بر روی تراشه و هزینه نهایی می‌شود [۹]. در جدول (۲-۱) جوانب مثبت و منفی نوسانگرهای مکانیکی و الکترونیکی را نشان داده شده است.



شکل (۴-۱) نمایش تحریک الکتروستاتیکی یک تیرک معلق [۶]

جریان آشکارسازی شده با توجه به تغییرات خازنی تشدیدگر با روابط (۱۸-۱) تا (۲۰-۱) بدست می‌آیند.

(۱۸-۱)

$$F_E(x) = V_{DC} \frac{\partial C(x)}{\partial x} V_{AC}$$

(۱۹-۱)

$$i_0(t) = \frac{\partial(C(x,t)V)}{\partial t}$$

(۲۰-۱)

$$i_0(t) = C_0 \frac{\partial V_{AC}}{\partial t} + V_{DC} \frac{\partial C(t)}{\partial t}$$

نیروی F_x بین دو الکترود را با رابطه (۲۱-۱) نشان می‌دهیم [۷].

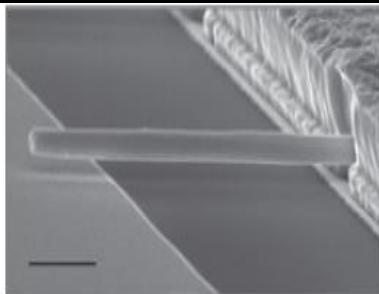
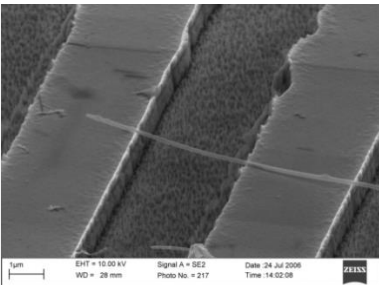
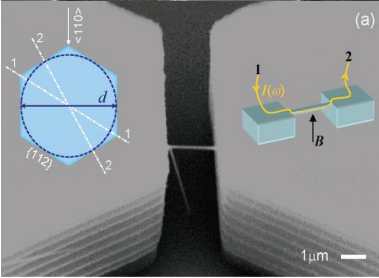
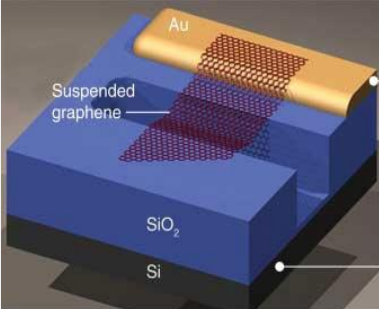
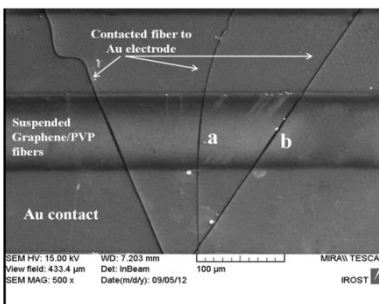
(۲۱-۱)

$$F = \frac{dU}{dx} = \frac{1}{2} V_g^2 \left(\frac{dc}{dx} \right) = \frac{1}{2} \left[(V_{DC}^2) + \frac{(V_g^{AC})^2}{2} + 2(V_{DC}^2)(V_g^{AC}) \cos \omega t + \frac{(V_g^{AC})^2}{2} \cos 2\omega t \right] \left(\frac{dc}{dx} \right)$$

جدول (۲-۱) جوانب مثبت و منفی نوسانگرهای مکانیکی و الکترونیکی

Resonator technology	Accuracy df/f_0 (ppm)	Noise FoM_2	Size $L \times W \times H$ (mm)	System integration
mechanical	<10 	~130 	>1.6x1.2x0.35 	•Bulky hermetic package  •Non-CMOS compatible
electrical	>100 	~90 	<0.5x0.5x0 	•Standard plastic package  •CMOS design

جدول ۴-۱) معرفی بر خانواده متنوعی از تشدیدگرهای نانوالکترومکانیکی با روش‌های ساخت مختلف می‌باشد.

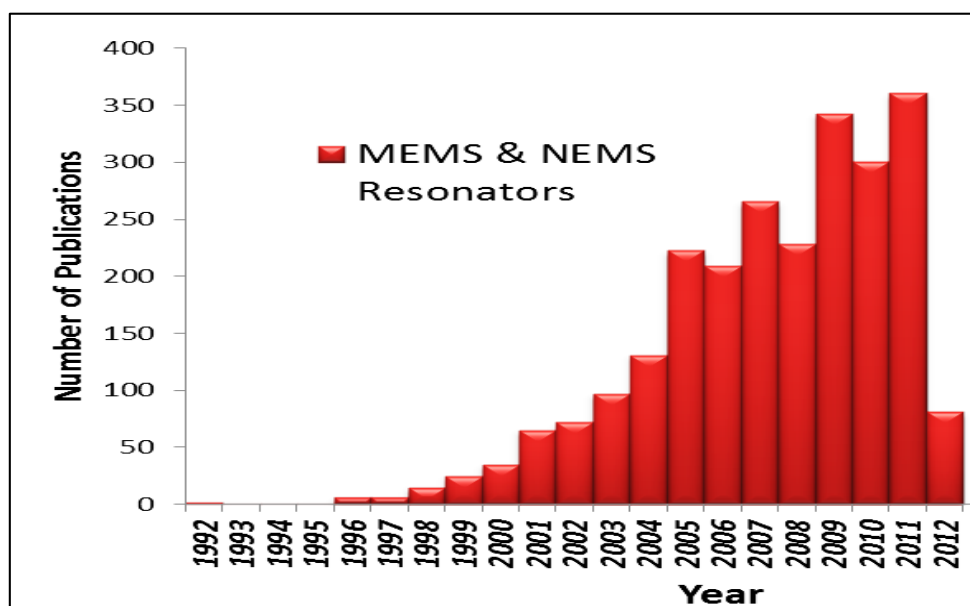
Resonator	Frequency	SEM View	Performances
Out of plane]۱۰[	$f_0 = \frac{1}{8\pi} \left(\frac{\beta^4 E}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{D}{L^2}$		92 MHz. $f_0=1$ Q=4500 (vacuum) $086 \times 105. f_0 \times Q=0$
Free- Free]۱۱\ Beam [	$L_s = 1.683 \left[\sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{W_s}{f_o} \right]^{1/2}$		47 MHz. $f_0=10$ Q=10000 (vacuum) 05 MΩ. R=1 $69 \times 106. f_0 \times Q=0$
Clamped-]۱۲\ Clamped [	$f_0 = 0.94 \frac{d}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$		$f_0=80$ MHz Q=13100 (vacuum) 6 kΩ. R=3 $04 \times 106. f_0 \times Q=1$
Clamped-Free]۱۳[	$57T/\rho / f_0 = \{ [A(\sqrt{\frac{E}{\rho}} t/L2)]^2 + A20 L2wt \}^{1/2}$		$f_0=36$ MHz Q=210 (vacuum) $7 \times 104. f_0 \times Q=0$
Clamped-]۱۴\ Clamped [	$f_0 = 0.94 \frac{d}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$		$f_0=1$ MHz Q=1300 (air) 6 kΩ. R=3

شده بر روی تشدیدگرهای نانوالکترومکانیکی بر اساس مواد و ابعاد مختلف را نشان می‌دهد.

در جدول بالا E مدول یانگ، ρ چگالی، D قطر، L طول، T ضخامت و W پهنای ساختار تشدیدکننده می‌باشند. جدول (۴-۱) مروری بر تحقیقات انجام

جدول (۴-۱) مروری بر تحقیقات انجام شده بر روی تشدیدگرهای نانوالکترومکانیکی بر اساس مواد و ابعاد مختلف

	L(μm)	d (nm)	Resistance (Ω)	Frequency (MHZ)	Q	Actuation	References
Si Al/Ti	2.25	142	50	199.68	2000-2500	Magnetomotive	[12]
Si	2.77	74	3/6 k	80.57	13100	Electrostatic	[10]
SWNT	0.9	1/4		167	800-2000	Electrostatic	[15]
Pt	1.3	43	10-100	64	8500	Magnetomotive	[16]
GaN	5.5	84		2.23	2800	Electrostatic	[17]
SnO ₂	2.5	125		59	2200	Electrostatic	[18]
InAs	2.9	100		31		Electrostatic	[19]
Rh	5.8	280		7.18	1150	Electrostatic	[10]
Graphene	15 nm			42	210	Electrostatic	[13]
ZnO nanofiber	80	400		3.2	800	Electrostatic	[20]
Graphene/PVP nanofiber	80	900		0.8	1600	Electrostatic	[14]



شکل ۵-۱) تعداد مقالات چاپ شده نتیجه آمار گیری که در پایگاه اسکوپوس

طبق جدول (۴-۱) نانوساختارهای متنوعی به شکل نانوسیم و ساختارهای یک بعدی و دو بعدی به عنوان تشدیدگر الکترومکانیکی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تکنیک‌های ساخت گران قیمت، کنترل ناپذیری فرآیند خوردگی و معلق‌سازی ساختار تشدیدکننده و نیاز به انجام اندازه‌گیری‌ها در شرایط فشار و دمای پایین از چالش‌های این سیستم‌ها می‌باشند که همچنان تحقیق و بررسی بر روی این سیستم‌ها ادامه دارد. نتیجه آمارگیری که در پایگاه اسکوپوس انجام شده در شکل (۵-۱) آمده است. تعداد مقالات چاپ شده در زمینه تشدیدگرهای میکرو و نانوالکترومکانیکی با سه کلید واژه "تشدیدگر" و "میکرو و نانو الکترومکانیکال سیستم" از پایگاه اسکوپوس بدست آمده است.

۴- مروری بر کاربردهای تشدیدگرهای میکرو و نانوالکترومکانیکی
می‌توان گفت تشدیدگرهای نانومکانیکی با داشتن فرکانس‌های بالا و جرم‌های اینرسی کوچک قابلیت شناسایی جابجایی‌های مکانیکی فراحساس را دارند. یک زمینه کاربرد ممکن، میکروسکوپ نیرو است که در آن نوک پایه روی یک سطح را جاروب می‌کند و جابجایی‌های پایه با حرکت نوک پایه روی سطح اندازه‌گیری می‌شوند و یک نقشه توپوگرافی نیرو را ایجاد می‌کنند. کاربرد دیگر، حس‌کننده جرم است که در آن ذرات کوچک جرم مستقل به تشدیدگر نانومکانیکی از تغییر فرکانس ارتعاشی، تعیین می‌شوند. اخیراً، میزان

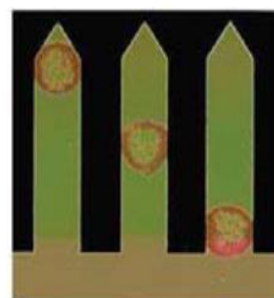
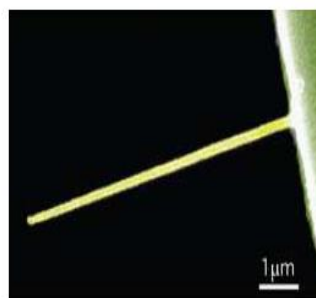
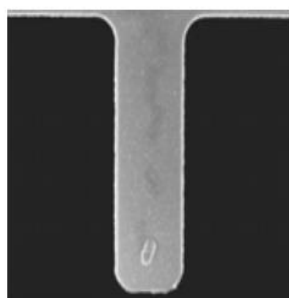
حسگرهای فوق حساس برای آشکارسازی جرم، نیرو و بارالکتریکی آشکارسازی میزان جرم نشانده شده در سیستم‌های لایه نشانی آشکارسازی باکتری‌ها اندازه‌گیری استوکیومتری ترکیبات سطحی آشکارسازی آلودگی هوا شکل (۶-۱) چند نمونه از حسگرهای جرم بر اساس ساختارهای معلق شده متنوعی را نشان می‌دهد.

شکل (۷-۱) الف وب، نمونه شبیه‌سازی و نمونه مورد آزمایش از جذب سطحی جرم بر روی یک تیرک معلق را به ترتیب نشان می‌دهد. که طبق رابطه (۲۲-۱) با جذب جرم، فرکانس تشدید به مقادیر پایین‌تر شیف‌ت پیدا می‌کند.

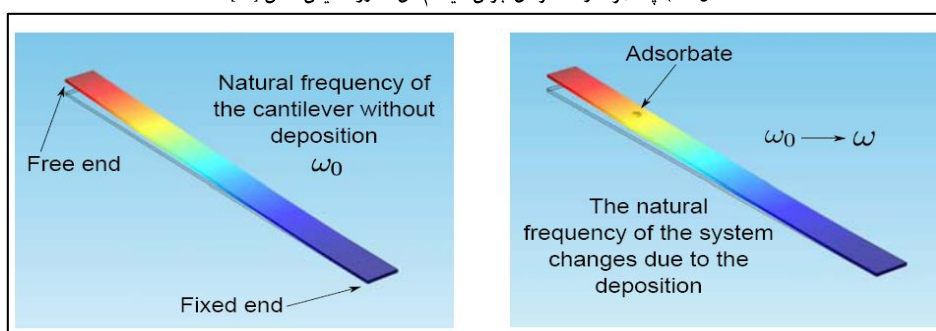
Cantilevers

Nanowires

Arrays



شکل ۶-۱ چند نمونه از حسگرهای جرمی سیستم‌های الکترومکانیکی معلق [۲۳]



(۲۲-۱)

$$\frac{\Delta \omega}{\omega} \approx - \frac{\Delta m}{2(m + \Delta m)}$$



شکل (۷-۱) الف و ب نمایشی از جذب جرم و شیف‌ت فرکانسی متناسب با آن [۲۳]

۵- نتیجه گیری

ساخت تشدیدگرها در ابعاد نانو با بسامد تشدید بالا یکی از موضوعهای مورد تحقیق و مورد توجه می باشد. جذابیت این ساختارها در توانایی شان به عنوان حسگر، فعال ساز و قابلیت مکانیکی شان در ابعاد نانو می باشد. تیرکهای نانومتری مقدار Q بسیار بالایی دارند و هنگام نوسان انرژی کمی تلف می کنند. این ابزارها به میرایی بیرونی حساسیت زیادی دارند که این خصوصیت برای گسترش ابزارهای حسگر بسیار مهم است. همچنین ابزارهای با Q بالا نویزهای ترمودینامیکی کوچکی دارند به این معنی که نوسانات مکانیکی تصادفی در آنها خیلی کم است. از مزایای دیگر ابزارهای NEMS این است که به توان کمی برای راه اندازی نیازمندند. جرم مؤثر کوچک یک میله نانومتری باعث می شود که بسامد تشدید آن با کوچکترین تغییری در جرم تغییر کند که این مسئله می تواند اساس کار بسیاری از حسگرهای با حساسیت بالا باشد. از این حسگرها برای آشکارسازی نرخ لایه نشانی در سیستم های لایه نشانی، آشکارسازی باکتری ها، تخمین ظرفیت ذخیره هیدروژن و اندازه گیری استوکیومتری ترکیبات سطحی می توان استفاده کرد.

۶- منابع

- Lam, C. S. (2008), A review of the recent development of MEMS and crystal oscillators and their impacts on the frequency control products industry, IEEE Ultrasonic Symp. 694-704.
- Hsu, W. T. (2008), Recent progress in silicon MEMS oscillators, Proc. 40th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI).
- Ayazi, F. et al., (2006), High aspect ratio SOI Vibrating Micromechanical resonators and filters, IMS, 676-679.
- Campanella, H. (2010), Acoustic wave and electromechanical resonator, ARTECH House.
- Ekinci, K. L. (2005), Electromechanical transducers at the nanoscale: actuation and sensing of motion in nanoelectromechanical systems (NEMS), small, 1: 786-797.
- Image courtesy of Dr. Zachary J. Davis, DTU Nanotech, Copenhagen, Denmark.
- Kaajakari V., Koskinen J. K. and Mattila T. (2005), Phase noise in capacitively coupled micromechanical oscillators, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, 52:2322-31.
- Pardo M., Sorenson L., Pan W. and Ayazi F. (2011), Phase noise shaping via forced nonlinearity in piezoelectrically actuated silicon micromechanical oscillators, Proc. MEMS, 780-3.
- Nguyen, C. T. (2007), MEMS technology for timing and frequency control, IEEE Trans. UFFC, 33:251-70.
- Li, M. et al., (2008), Bottom-up assembly of large area nanowire resonator arrays, Nature Nanotechnology, 3, 88-92.
- Khaderbad, A. et al., (2012), Electrical actuation and readout in a nanoelectromechanical resonator based on a laterally suspended zinc oxide nanowire, Nanotechnology, 23:025501.
- Feng, X.L. et al., (2007), Very high frequency electromechanical resonators, Nano Letter. 7:1953-59.
- Bunch, J.S. (2007), Electromechanical resonators from grapheme sheets, Science. 315: 490-93.
- S. Fardindoost et al., "Electromechanical resonator based on electrostatically actuated graphene-doped PVP nanofibers," Nanotechnology 24(13), 135201-7 (2013).
- Lassagne, B. (2008), Ultrasensitive mass sensing with a nanotube electromechanical resonator, Nano Letter. 8: 3735-38.
- Husain, A. (2003), Nanowire based very high frequency electromechanical resonator, Appl.Phys. Lett. 83: 1240-43.
- Nam, C.Y. (2006), Diameter dependet electromechanical properties GaN nanowires, Nano Letter. 6: 153-8
- Fung Wayne, Y. et al., (2009), Radio frequency nanowire resonators and in situ frequency tuning, Appl.Phys. Lett. 94: 203104
- Solanki, H. S. et al., (2011), High Q electromechanic with InAs nanowire quantum dots, Appl. Phys. Lett. 99: 213104.
- Rahafrooz A., (2011), High-frequency thermally actuated electromechanical resonators with piezoresistive readout, IEEE transaction on electron device, 58:41205-1214.
- K.L. Ekinci, X. M. H. Huang and M.L. Roukes, (2004), "Ultrasensitive nano-electromechanical mass detection", Appl. Phys. Lett., 84, 446-9
- A. K. Naik, et al., (2009) "Towards single-molecule nanomechanical mass spectrometry", Nature nanotech. 4, 445 - 450.
- <http://www.ee.nthu.edu.tw/sclu/biosensor.pdf>