

جهت خرید فایل word به سایت www.kandooon.com مراجعه کنید
یا با شماره های ۰۹۳۶۶۰۲۷۴۱۷ و ۰۹۳۶۶۴۰۶۸۵۷ و ۰۶۶۴۱۲۶۰-۰۵۱۱ تماس حاصل نمایید

سیستم های نانوالکترومکانیک

(NEMS)

سیستم های نانوالکترومکانیک (NEMS) در جوامع علمی و تکنیکی مورد توجه زیادی بوده اند. این دسته از سیستم ها که بسیار شبیه به سیستم های میکروالکترومکانیک هستند در انواع حالات تشدید شده خود با ابعادی در سابمیکرون عمیق عمل می کنند. سیستم در این محدوده، دارای فرکانس های رزونانس بسیار، توده های فعال تحلیل یافته و ثبات نیروی پایداری باشند؛ ضریب کیفیت تشدید این سیستم در رنج $10^3 - 10^5$ بسیار بالاتر از دسته دیگر مدارهای تشدید الکتریکی می باشند. این سیستم در NEMS برای دسته بسیاری از کاربردهای تکنولوژی مانند سنسور فراسریع، دستگاه راه اندازی، و اجزای پردازش سیگنال مهیا می سازد.

به طور آزمایشی از NEMS انتظار می رود که امکان تحقیق بر فرآیندهای مکانیکی متعادل فونون و واکنش کوانتوم سیستم های مکانیکی مزوسکوپیک را فراهم آورد. با وجود این، هنوز چالش های ریشه ای و تکنولوژیکی برای بهینه سازی NEMS وجود دارد. در این بررسی ما باید مروری بر چشم اندازها و چالش ها در این زمینه یک معرفی متعادل از NEMS را ارائه داده و کاربردهای جالب و آشکار سازی الکترومکانیک را به تصویر می کشیم.

سیستم های نانو الکترومکانیکی (NEMS)، تشدید گرهای مکانیکی با مقیاس نانو - به - میکرو متر می باشند که به ابزار الکترونیکی دارای ابعاد مشابه وصل می شوند. NEMS نوید میکروسکوپ نیروی فراحساس سریع و عمیق شدن فهم ما از چگونگی پیدایش

جهت خرید فایل word به سایت www.kandoo.cn.com مراجعه کنید
یا با شماره های ۰۹۳۶۶۰۲۷۴۱۷ و ۰۹۳۶۶۴۰۶۸۵۷ و ۰۶۶۴۱۲۶۰-۵۱۱ تماس حاصل نمایید

دینامیک کلاسیک با نزدیک شدن به دینامیک کوانتوم می باشد. این پژوهش با یک

بررسی از NEMS شروع شده و پس از جنبه های خاص دینامیک کلاسیک آنها را

توصیف می کند. مخصوصاً، نشان می دهیم که برای اتصال ضعیف، عمل ابزار

الکترونیکی روی شدید گرمکانیکی می تواند به طور مؤثر، یک حمام حرارتی باشد در

حالی که ابزار، یک محرک خارج از تعادل سیستم باشد.

۱- مقدمه:

محققان با استفاده از مواد و فرآیندهای میکروالکترونیک مدت هاست که کنترل پرتوها، چرخ دنده ها و پوسته های ماشین های میکروسکوپی را انجام داده اند که این عناصر مکانیکی و مدارهای میکروالکترونیکی که آن ها را کنترل می کنند را به طور کل سیستم های میکروالکترومکانیک یا MEMS خوانده اند. در تکنولوژی امروزی MEMS برای انجام اموری در تکنولوژی مدرن مانند باز و بسته کردن دریچه ها، (سوپاپ ها) چرخاندن آینه ها و تنظیم جریان الکتروسیسته و یا جریان نور بکار گرفته می شود. امروزه کمپانی های متعددی از غول های نیمه هادی گرفته تا راه اندازی های کوچک می خواهند ابزار MEMS را برای طیف گسترده ای از مشتریان تولید کنند. با تکنولوژی میکروالکترونیک که هم اکنون تا حد ریز میکرون پیش رفته است زمان آن رسیده که کشفیات متمرکز NEMS را آغاز کنیم.

شکل ۱ خانواده NEMS نیمه رسانا را نشان داده و مراحل تولید ساخت کلی آن را مطرح می کند. این فرآیند برای طراحی آزادانه ساختارهای نیمه رسانای نانومتر به عنوان نانوماشین سطحی می باشد که نقطه مخالف میکروماشین بالک MEMS می باشد این تکنیک ها برای سیلکون بر ساختارهای عایق، گالیوم آرسناید روی سیستم های آلومینیوم گالیوم، کاربید سیلکون برسیلیکون، نیتريد آلومینیوم برسیلیکون، لایه های الماس

نانو بلوری و لایه های نیتريد سيلكون نامنظم بكار گرفته می شود. اكثر اين مواد با درجه

خلوص زياد وجود دارد كه با كنترل دقيق ضخامت لايه ای رشد کرده اند.

اين قسمت دوم (كيفيت كنترل لايه ای) كنترل ابعادی در بعد عمودی در سطح تك لايه

ای را كنترل می كند. اين مقوله كاملا منطبق با دقت ابعادی جانبی ليتوگرافي

پرتوالكترونی است كه به مقياس اتمی نزديك می شود.

NEMS دارای ویژگی های چشمگیری می باشد. آن ها دسترسی به فضای پارامتری را

كه غير پيش بينی است را فراهم می كنند؛ فرکانس های مقاومت تشدیدي در ميكرويو،

ضريب كيفيت مكانيکی در دهها هزار، توده های فعال در femtogram، ظرفيت

گرمايی پايين تر از يوكتو كالری و ...

اين ویژگی ها تصورات و سيل افكار برای تجربيات و آزمايشات هيجان انگيز را بوجود

می آورد و در عين حال تعداد زيادی سؤالات غيرقابل پيش بينی و نگرهایی های بيشماری

را نيز بدنبال دارد از جمله اين سؤالات: چگونه مبدل ها در مقياس نانو مشخص می شوند؟

چگونه ویژگی های سطحی كنترل می گردد؟ ویژگی های پارامتر NEMS با هر اندازه و

مقياسی گسترده می باشند. كسانی كه می خواهند نسل بعدی NEMS را توسعه دهند

بايد به سمت آخرين كشفيات فيزيك و علوم مهندسی در جهات مختلف سوق بيايند. اين

بازنگری در چهار قسمت اصلی ذكر شده است. در دو بخش بعدی ما سعی می كنيم يك

معرفی متعادل از NEMS را ارائه دهيم. ما نه تنها ویژگی های جالب و مورد توجه

NEMS را مورد بحث و بررسی قرار می دهیم بلکه یک مرور کلی بر چالش های

اساسی و تکنولوژیکی را ارائه خواهیم داد.

همچنان که به بخش های بعدی نزدیک می شویم، معلوم می شود که کدام یک از این

چالش ها از طریق مهندسی سیستماتیک قابل بحث و بررسی است. در بخش چهارم این

تحقیق، یکی از کاربردهای ضروری NEMS را که آشکارسازی نانوالکترومکانیک

فراحسی می باشد تحت مطالعه قرار می دهیم. در بخش پنجم پروژه ها را ارائه خواهیم

داد.

یک سیستم نانو الکترومکانیک (NEMS) از یک تشدیدگر مکانیکی با درجه بندی

نانومتر به- میکرومتر تشکیل می شود که به یک ابزار الکترونیک دارای ابعاد قابل قیاس

مزدوج می شود [6 - 1]، تشدیدگر مکانیکی می تواند یک شکل هندسی ساده داشته

باشد مثل یک طره یا یک پل و از موادی مثل سیلیکون با استفاده از تکنیک های

لیتوگرافی مشابه به نمونه های به کار رفته برای ساختن مدارهای ترکیبی ساخته می شوند.

به خاطر اندازه میکروشان، تشدیدگرهای مکانیکی می توانند با فرکانس هایی در محدوده

چند مگاهرتز تا حدود یک گیگا هرتز $[v, n]$ نوسان داشته باشند. ما به طور نرمال، به

ایده نوسان سیستم های مکانیکی در چنین فرکانس های رادیویی - به- میکروویو، عادت

نمی کنیم.

اتصال به ابزار الکترونیک به شیوه الکترو استاتیکی بومی با بکار گیری یک ولتاژ به یک لایه فلزی گذاشته شده روی سطح تشدیدگر مکانیکی انجام می شود. یک نمونه از یک ابزار الکترونیک تزویجی، یک ترانزیستور تک الکترونی (SET) است که در شکل ۱ نشان داده شده است. کوانتوم الکترون ها، هر کدام در یک زمان از عرض ترانزیستور از الکتروود درین به الکتروود سورس که توسط یک ولتاژ درین- سورس V_{ds} تحریک می شود تشکیل کانال می دهند.

بزرگی کانال در درین به ولتاژ اعمال شده به الکتروود گیت سوم (ولتاژ گیت V_g) بستگی دارد. چون تشدیدگر مکانیکی بخشی از الکتروود گیت را تشکیل می دهد، حرکت تشدیدگر ولتاژ گیت را تغییر می دهد و از این رو جریان کانال درین سورس بعد از تقویت آشکار می گردد؟

با فرکانس های بالا و جرم های اینرسی کوچک تشدیدگرهای نانومکانیکی همراه با قابلیت های شناسایی جابجایی مکانیکی فراحساس ابزارهای الکترونیک مکانیکی، به نظر می رسد NEMS گرایش زیادی به مترولوژی نشان می دهد.

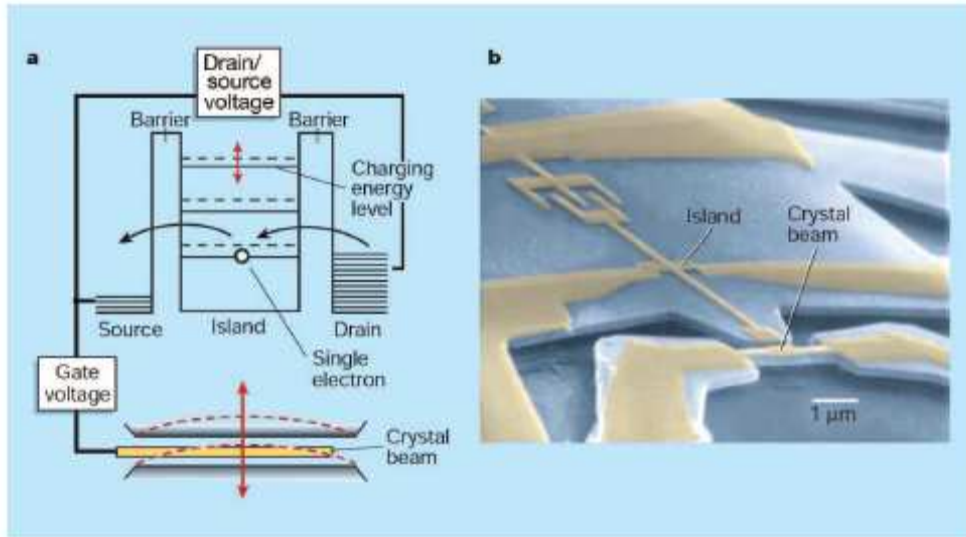
یک زمینه کاربرد ممکن، میکروسکوپ نیرو است که در آن نوک پایه روی یک سطح را جاروب می کند و جابجایی های پایه با حرکت نوک پایه روی سطح اندازه گیری می شوند و یک نقشه توپوگرافی نیرو را ایجاد می کنند. میکروسکوپ نیروی تشدید مغناطیسی (MRFM) مزیت خاصی دارد که یک نوک پایه فرومغناطیسی را بکار برده و

نقشه برداری از الکترون جفت نشده و چگالی های چرخش هسته ای در سطح و زیر سطح انجام می شود. اخیراً، حساسیت های آشکار سازی چرخش تک الکترون بدست آمده است [۱۱ و ۱۲]، کاربردهای بالقوه در تعیین خصوصیات در سطح تک مولکولی یا اتمی، زیاد هستند و با کاربرد ابزارهای MRFM و NEMS طراحی شده مناسب کوچکتر، فرکانس های مکانیکی بالاتر ممکن است منجر به زمان های بازخوانی سریعتر در میزان حساسیت های معادل یا بهتر شوند.

کاربرد دیگر، حس کننده جرم است که در آن ذرات کوچک جرم مستقل به تشدیدگر نانومکانیکی از تغییر فرکانس ارتعاشی، تعیین می شوند. اخیراً، میزان حساسیت شناسایی اتوگرام (۱۰=اتو) به دست آمده است [۱۳ و ۱۴].

با کاربرد فرکانس طراحی شده مناسب بالاتر NEMS، شناسایی مولکولهای انفرادی در حساسیت های تک دالتونی ممکن است. (یک دالتون برابر است با $1/66 * 10^{-27} \text{ kg}$ و $1/12$ ماده در یک ^{12}C اتم)

NEMS در جای خود به عنوان سیستم های دینامیک مهم جالب است. به خاطر جرم اینرسی تشدیدگر نانو مکانیکی و اتصال الکترو استاتیکی قوی به ابزار الکترونیک ترکیبی دقیق حاصل شده، الکترون های انفرادی که در ابزار الکترونیک حرکت می کنند می توانند نیروهای جابجایی بزرگی به تشدیدگر مکانیکی وارد کنند.



شکل 1. (a) تصویری که عملیات آشکار ساز جابجایی SET را نشان می دهد. سطوح انرژی باردار مشخص هزینه انرژی ناشی از تغییر در انرژی میدان الکتریکی ذخیره شده به صورت یک یا چند الکترون را نشان می دهد که بر سطح داخلی تونل سازی می شود و گسستگی سطوح اثر کوانتومی نیست بلکه هزینه افزایش انرژی در قراردادن فزاینده تعداد الکترون های روی سطح در همان زمان است (b) ریزنگار میکروسکوپ الکترون پوششی (SEM) رنگی کاذب دو پرتو کنار هممعلق و SEM را نشان می دهد. ماده اصلی و پرتو از GaAs (مناطق آبی) می باشد و الکترودهای گیت پرتو و SET لایه های نازک آلومینیوم (منطقه زرد) با اکسید آلومینیوم است که مانع های تونل را تشکیل می دهد. پرتو $0/25 \mu\text{m}$ دور از سطح الکتروود قرار دارد. فرکانس موجی بنیادی سنجیده شده برای حرکت در سطح ۱۱۶MHz است.

در عوض، حرکت تشدیدگر روی جریان الکترون و ... تأثیر می گذارد. در دماهای بالا، ابزار الکترونیکی خاص می توانند به یک شیوه منطقی کوانتومی رفتار کنند که در یک

مکان کوانتومی دارای موقعیت های متفاوت، هنگامی که الکترونها از طریق قطعه انتقال می یابند، موجود هستند. تأثیر متقابل چنین ابزاری، مرکز جرم تشدیدگر مکانیکی ممکن است به یک حالت کوانتوم [۶] کشیده شود، مثل یک موقعیت حالات مکان مجزا. ذات کوانتومی سیستم الکترومکانیکی مزدوج در موارد خاص جریان اندازه گیری شده آشکار می شود. تشدیدگرهای نانومکانیکی از حدود ده بیلین اتم تشکیل می شوند، طوری که از طریق اکثر استانداردها، چنین تغییرات کوانتومی، میکروسکوپی فرض می شوند. این مهم است که درک کنیم که در اینجا ما به تأثیرات کوانتوم در ابزار "واقعی کدر" اشاره کنیم که دارای درجات آزادی مکانیکی و الکترونیکی بوده به شدت با محیط اطراف که از فوتون و فونون تشکیل شده تعامل داشته و معایب تشدیدگر مکانیکی و ابزار الکترونیکی را تغییر می دهند. بررسی آزمایشی و نظریه ای چنین سیستم هایی منجر به یک فهم عمیق تر از چگونگی تبدیل دینامیک کلاسیک با تقریب به دینامیک کوانتوم می شود. NEMS دنیای کوانتوم میکروسکوپی و کلاسیک ماکروسکوپی ایجاد می کنند.

در اولین آزمایشات به بازبینی دینامیک NEMS، می پردازیم که نتیجه می گیریم اجزاء تشدیدگر مکانیکی همانطور که انتظار می رفت، به شیوه کلاسیک عمل می کنند، آزمایشات به اندازه ی کافی خالص نیستند تا تأثیرات دخالت کوانتوم را که توسط محیط تشدیدگر از بین می روند را قابل مشاهده کنند. به رغم این، دینامیک نیمه کلاسیک

NEMS مهم بوده و ارزش بررسی دارد. یک بعد از بررسی این است که ویژگی های مشترک دینامیک کلاسیک ابزار متفاوت NEMS را شناسایی کنیم تا به میزان ارتباط و وابستگی رشته ای دست یابیم. تحت شرایط خاص تزویج ضعیف و همچنین جدایی وسیع مقیاس زمانی دینامیکی الکترونیک و مکانیکی، ابزار الکترونیک به طور مؤثر به صورت یک حمام حرارتی عمل می کند. تشدیدگر مکانیکی حرکت براونی حرارتی را که توسط یک ثابت میرایی و دمای مؤثر شناسایی می شود و توسط پارامترهای الکترونیک وسیله مشخص می شود را تحمل می کند [۲۲ و ۲۳]. این واقعیت که ابزار الکترونیک می تواند به طور مؤثر توسط یک حمام حرارتی جایگزین شود، در اولین نگاه با دانستن اینکه جریان الکترون تحریک شده توسط ولتاژ در ابزار، یک حالت الکترون دور از تعادل است، حیرت انگیز می باشد. کاربرد مدل های اصول شناخته شده پایداری در ساختار مدل های تئوریک سیستم های غیرتعادلی نه چندان شناخته شده برای یافتن کاربرد وسیع به دوران اولیه مکانیک آماری بر می گردد. خلاصه این فصل به این شکل است: بخش ۲ نمونه هایی از ابزار گوناگون معرف NEM را نشان می دهد که در حال بررسی هستند. بخش ۳، دینامیک کلاسیک سیستم تشدیدگر SET- مکانیکی را با تمرکز روی توصیف موازنه مؤثر در رژیم اتصال ضعیف بررسی می کند. بخش ۴، دینامیک موازنه مؤثر برخی دیگر از NEMS معرفی می شده در بخش ۲ را توصیف می کند. بخش ۵ نتیجه گیری می باشد.

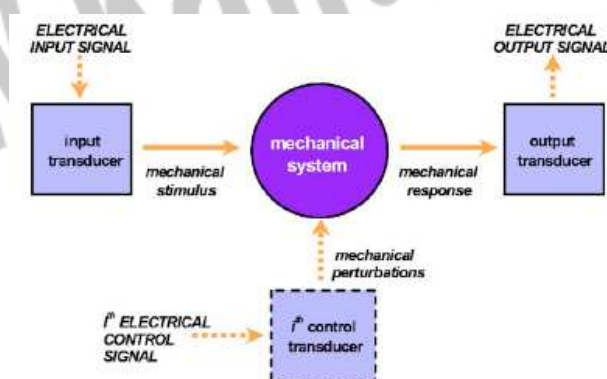
۲- ویژگی های NEMS:

۲-۱ NEMS به عنوان ابزارات الکترومکانیک چند قطبی.

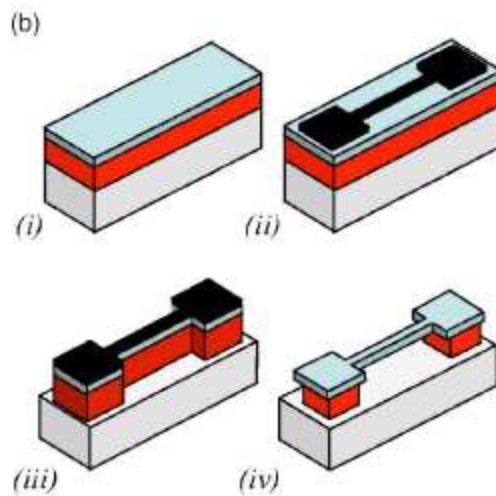
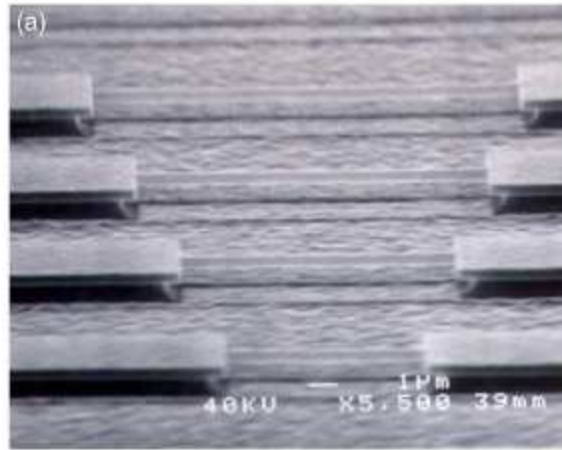
تصویر شماره ۲ وسیله الکترومکانیکی چندقطبی کلی را نشان می دهد که در آن مبدل های الکترومکانیکی محرک مکانیک ورودی را برای سیستم فراهم کرده و پاسخ مکانیکی اش را مورد مطالعه قرار می دهند. در قطب های کنترل اضافی، سیگنال های الکتریکی، به ظاهر استاتیک و متغیر زمانی می تواند بکار گرفته شود و نتیجتاً با کنترل مبدل ها به نیروهایی برای برهم زدن ویژگی های عنصر مکانیکی تبدیل می شود.

ابزارات NEMS تصاویر کلی توصیف شده در بالا را ارائه می دهد. ما بعداً می توانیم

NEMS های موجود را به دو دسته تشدید شده و ظاهراً استاتیک تقسیم کنیم.



شکل ۳- نمودار معرفی وسایل الکترومکانیکی چند ترمینالی



تصویر ۲ (a) تقطیق ریز نگار الکترون از SiC NEMS. این اولین خانواده از ریز میکرون دو پرتو کنارهم که فرکانس های تشدیدی موجی بنیادین آن از دو تا ۱۳۴ مگاهرتز نمایش داده می شود. آنها با الگوها در تکنولوژی کالری از C-SiC₃ بودند که لایه های epi به حالت دانشگاه غربی اختصاص داده شد. (b) سطح نانو ماشین NEMS ساخت آن به غیر از ساختمان نیمه هادی شروع شد. از چنین واحد نشان داده شده در (I) با ساختمانی (بلند) از دست دادن (وسط) لایه های روی سر یک زیر لایه (پائین). (II) ابتدا ماسک از طریق پرتو لیتوگرافی الکترون تعیین می شود. (III) سپس به طور نمونه در لایه از دست داده با استفاده از سیاه کردن یک ناهمسانگر مانند سیاه کردن پلاسما (IV) سرانجام لایه از دست داده شده تحت ساختمان با استفاده از سیاه انتخابی رفع می شود. ساختمان می تواند بعد یا در مدت فرایند وابسته به نیازمندیهای سنجش مخصوص فلز کاری شود.

در این بازنگری توجه ما در ابتدا بر ابزارات تشدید به عنوان ابتدایی ترین کاربردهای NEMS می باشد مبدل های ورودی در NEMS های تشدید، انرژی الکتریکی را با تحریک کردن حالت های تشدید عنصر مکانیکی به انرژی مکانیکی تبدیل می کنند. پاسخ مکانیکی که جابه جایی عنصر نامیده می شود به سینگنال های الکتریکی بازگردانده می شود. در این حالت تشدید عملیات اختلالات خارجی می تواند به عنوان سینگنال های کنترلی مورد نظر قرار گیرد چرا که آن ها ویژگی های ارتعاشی چون شدت فرکانس π $\omega/2$ یا Q عنصر ارتعاشی را توصیف می کنند. ماباید مکانیسم های تبدیل های الکترومکانیکی در NEMS را مورد بحث و بررسی قرار داده و برای اندازه گیری اختلال خارجی که در بخش چهار مورد مطالعه قرار می گیرد مثال بیاوریم.

۲-۲ فرکانس

در تصویر شماره ۴، ما فرکانس های بدست آمده به طور تجربی را برای حالت های متغیر بنیادین پرتوهای نازک طراحی کرده و برای ابعاد مختلف دامنه را از MEMS به عمق NEMS ادامه می دهیم. تخمین ها مکانیکی زنجیره ای برشمرده می شود، در واقع این بدین مفهوم است که عبارت $\omega/2\pi = (1/05)\sqrt{E/p(t/l^2)}$ شدت تغییر فرکانس های نازک پرتوهای NEMS را که به طور مضاعف گیر افتاده اند را تعیین می کند. در اینجا، $w \times t \times l$ ابعاد موجود هستند، E ضریب یانگ می باشد و P برابر با چگالی حجم

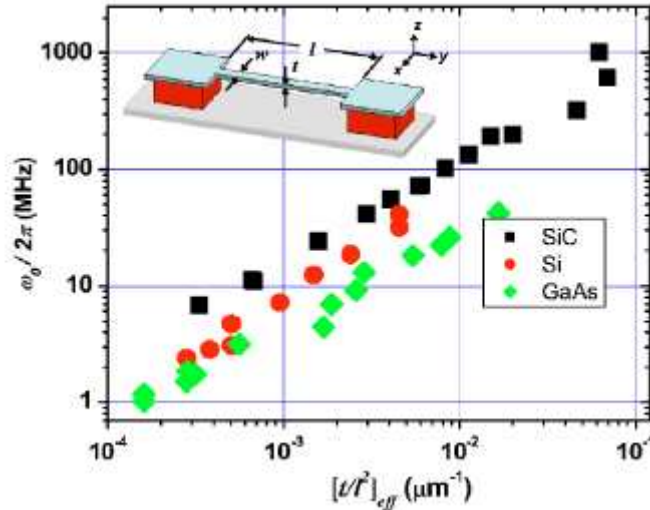
پرتو است (تصویر ۴). قابل توجه است که برای ساختارهای با ابعاد مشابه، SI فرکانس های ضریب ۲ را بوجود آورده و SiC چیزی است که ۳ برابر میزان بدست آمده از ابزارات GaAs می باشد. این افزایش ولوسیت $\sqrt{E/P}$ فاز افزایش یافته را در مواد سفت تر نشان می دهد.

البته ، حتی اگر در سایز کوچکتر از این نیز قرار داشته باشد هنوز ملموس است به خصوص برای نانووایر و نانوتیوپ NEMS این مسئله دقیقاً صدق می کند. ممکن است پیرسید که در چه مقیاسی مکانیک زنجیره وار شکسته شده و تصحیح رفتار اتمی صورت می گیرد؟ شبیه سازی دینامیک ملکولی برای ساختارهای ایده آل و آزمایش های اولیه نشان می دهد که این فقط برای ساختارهای بر روی نظم ده شبکه لتیس در برش عرضی آشکار می گردد. بنابراین برای بیشتر کارهای اخیر در NEMS، تخمین های زنجیره ای موجود کافی به نظر می رسد.

در اکثر NEMS ها به خصوص در ساختارهای دو یا چند لایه ای، فشارهای داخلی باید هنگامی که فرکانس های شدت تخمین زده می شود در نظر گرفته شود. تصویر ۵ تلاش اولیه ما را برای مشخص کردن چنین تأثیراتی در NEMS های نیمه رسانا با لایه های روی فلزی نشان می دهد. در این اندازه گیری ها نیروهای ایستایی کوچک برای شدت های پرتو نانومکانیکی گرفته شده بکار بسته می شود و فرکانس های تشدیدشان تحت عنوان تابع نیروی اعمالی بکار گرفته شده ارزیابی می شود. تغییرات فرکانس تحریک

شده به خصوص هدایت ظاهری آن که با تغییر همراه شده است توسط وجود فشار داخلی

مقاوم ثابت می گردد.



شکل ۴: طرح فرکانس در مقابل هندسه موثر برای دودسته پرتو کنارهم که از تک کریستال SiC, Si

و GaAs ساخته می شودی دودسته پرتو کنارهم با طول L عرض W و ضخامت t نشان می دهد.

فرکانس تشدیدی انعطافی خارج از سطح بنیادی این ساختار با این عبارت معین شده است

$$t/L^2 \text{ در طرح مقادیر } \omega_0/2\pi = 1/05 \sqrt{E/P(W/L^2)} \quad \omega_0/2\pi = 1/05 \sqrt{E/[t/L^2]}$$

برای رفع اثر سختی اضافی و بارگیری جرمی به خاطر فلز سازی الکتروود غیرعادی می شود.

۲-۳ ضریب کیفیت (Q)

ضریب Q که در نیمه رساناهای NEMS بدست آمده اند در رنج $10^3 - 10^5$ وجود دارند.

این از لحاظ نوسانگر الکتریکی از بقیه دسته های موجود فراتر می رود. این مقدارناچیز

اتلاف انرژی داخلی، سطوح قدرت اجرایی پایین و حساسیت بالا را چنانکه در بخش بعد

به طور دقیق توضیح خواهیم داد به NEMS منتقل خواهد کرد.

برای ابزار پردازشگر سیگنال، Q بالا به طور مستقیم به کاهش ضمیمه زیر بر می گردد.
باید توجه باشیم که Q بزرگی کاهش پهنای باند را نتیجه می دهد در حالی که این به دو دلیل برای اجرا از میان بخش نمی باشد. اولین دلیل کنترل بازخورد است که می تواند بدون معرفی و سروصدای اضافی بکار بسته شود و ممکن است برای افزایش پهنای باند تا حد دلخواه مناسب باشد. دوم اینکه، برای عملکرد مبدل در ۱ GHz ~ حتی در مورد Q با میزان بالا ۱۰ ~، عرض های معادل ۱۰ KHZ ~ نیز می تواند بدست آید؛ این برای کاربردهای مختلف باندهای باریک نیز کافی می باشد.

۴-۲ مشخصه عملکرد توان عملیاتی

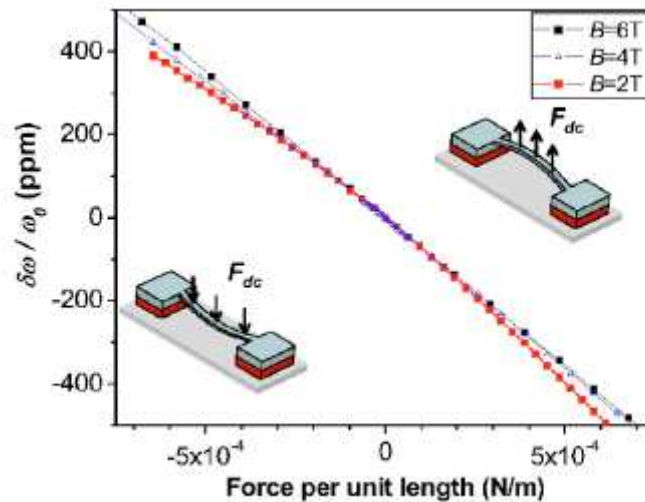
درک حداقل قدرت اجرای P_{min} برای وسیله NEMS تشدید می تواند توسط درک اینکه مبدل به طور ساده یک وسیله ذخیره انرژی از دست رفته است بدست آید. انرژی که به وسیله منتقل میگردد و در فواصل زمانی $T \sim Q/\omega_0$ اتلاف می شود فرمان شروع و پایان مبدل خوانده می شود. حداقل توان عملیاتی برای سیستم به عنوان انرژی که سیستم را در دانه های قابل مقایسه با آن دسته از نوسانات گرمایی، تحریک می کند با تعیین $K_B T$ نوسانات گرمایی حداقل قدرت ورودی می تواند توسط فرمول زیر تخمین زده شود.

$$P_{min} \sim k_B T \Omega_0 / Q \quad (1)$$

برای وسیله NEMS که امروزه از طریق لیتوگرافی پرتو در دسترس می باشد، ویژگی
سطح قدرت پایین در ردیف $10\text{aw}(10^{17\text{w}})$ قرار دارد. حتی اگر ما این مقدار را در
ضرب 1000000 ضرب کنیم و بعد از آن عملکرد یک میلیون از چنین ابزاری برای
درک بعضی از سیستم های محاسبه یا پردازشگر مکانیکی بر اساس NEMS که در
آینده بکار می رود را مشاهده کنیم، سطوح قدرت سیستم کلی هنوز بر اساس $1\ \mu\text{W}$ قرار
دارد. این ۶ مرتبه مقدار پیچیدگی کمتری از اتلاف قدرت در سیستم های جریان مشابه
مبنی بر ابزارات دیجیتالی است که در محدوده الکترونیکی به تنهایی کار می کنند.

۲-۵ پاسخ گویی (واکنش پذیری)

این امکان وجود دارد که تکنولوژی MEMS با مقیاس کوچک را برای بدست آوردن
فرکانس های بالا به کار بگیریم. این شیوه، با این وجود دارای مضرات جدی و قابل
ملاحظه ای می باشد که درک محدوده کامل توانایی هایی که توسط تکنولوژی
NEMS ارائه شده است را محدود می کند. برای تشریح این مقوله ما باید مجدداً بحث
مان را بر روی پرتوهای گرفته شده به طور مضاعف $L/t, L/W$ معطوف کنیم. دستیابی به
فرکانس بالا با ساختارهای با مقیاس میکرون فقط با نسبت های کوچک واحد ترتیبی
اتفاق می افتد. چنین هندسه هایی مقدار ثابت نیروی بالایی $keff$ را به وجود می آورند.



تصویر ۵) اندازه گیری فشار و کشش داخلی در مبدل های پرتو نانو الکترونیک در اینجا پرتو در معرض نیروی F_{dc} و همچنین نیروی تحریک کوچک در اطراف فرکانس شدت قرار دارد. تأثیر شبکه تغییر $\delta \omega$ در ω_0 می باشد. F_{dc} توسط عبور جریان dc در طول پرتو در رشته مغناطیسی ایستا تولید می شود. تغییر فرکانس داده های $S\omega/\omega_0$ در مقابل F_{dc} در طول واحد پرتو $I_{dc}B$ برای سه مقاومت مغناطیسی مختلف B به وجود می آید. انحنای واضحی که در پایین ترین قسمت قرار دارد و دارای ارزش $B = 2T$ می باشد می تواند به تأثیر گرمایی نسبت داده شود چرا که برای بدست آوردن F_{dc} مشابه، J_{dc} بزرگتر در B پایین تر مورد نیاز است. آنالیز ساده با استفاده از تئوری الاستیکی نشان می دهد که $\delta \omega$ مثبت است و در اطراف $F_{dc}=0$ در مبدل پرتو بدون فشار به طور متقارن وجود دارد. یک مبدل با فشار داخلی، با وجود این، یک تغییر را در $\delta \omega/\omega_0$ به وجود می آورد که با داده های ارائه شده ثابت می گردد.

K_{eff} بزرگ می تواند به ترتیب بر موارد زیر تأثیر بگذارد: الف) دامنه دینامیک قابل دسترسی ب) توانایی هماهنگی ابزار با استفاده از سیگنال های کنترل پ) کسب حداکثر Q (از طریق به حداقل رساندن اشعه های صوتی به پشتیبانی یعنی محار کردن تلفات) و

ت) سطوح تحریک شده مورد نیاز برای القای پاسخ های غیرخطی. تمام این ویژگی ها در بعد و متغیر ساختارهای نسبی بهینه سازی می شود یعنی ساختارهای با هندسه هایی که اخیراً در MEMS مورد استفاده قرار می گیرد اما در تمام جهات ابعاد مقیاس نانو NEMS را کاهش می دهد: K_{eff} محاسبه شده و سایر پارامترهای حائز اهمیت برای NEMS های مختلف در طول ابعاد شان در جدول شماره ۱ آورده شده است.

$w \times l \times l$	$\omega_0/2\pi$ (MHz)	κ_{eff} (N/m)	$\sqrt{S_x^{(th)}(\omega_0)}$ (nm/ $\sqrt{\text{Hz}}$)	$\langle x_c \rangle$ (nm)	Thermomechanically limited linear DR for $\Delta f \sim \omega_0/Q$ (dB)	M_{eff} (g)
$150 \text{ nm} \times 400 \text{ nm} \times 17.5 \mu\text{m}$	10	~ 8	5.7×10^{-4}	8	~ 50	1.8×10^{-12}
$100 \text{ nm} \times 200 \text{ nm} \times 2 \mu\text{m}$	385	~ 480	6.5×10^{-5}	4	~ 62	9.3×10^{-14}
$50 \text{ nm} \times 80 \text{ nm} \times 0.78 \mu\text{m}$	1000	~ 290	1.0×10^{-5}	1.6	~ 52	5.3×10^{-15}

جدول ۱: ویژگی های مهم برای خانواده ای از پرتوهای δi با گیر کردن مضاعف با $p=10000$

در $T=300\text{K}$ مقدار ثابت نیروی موثر $K_{eff} = 23 Et^3 w/L^3$ برای بارگیری نقطه ای در مرکز

پرتو تعیین می شود. دامنه غیر خطی $\langle X_C \rangle$ با استفاده از معیار توصیف شده در متن مشخص شده

است. دامنه دینامیکی خطی محدود ترمومکانیکی برای عرض نوار اصلی پرتو $DR = 20 \log(\langle x_c \rangle / \langle x_{th} \rangle)$

محاسبه می شود جاییکه $\langle x_{th} \rangle = (k_B T / \kappa_{eff})^{1/2}$ جرم موثر برای حالت اساسی $M_{eff} \approx 0.73 M_{tot}$ است که

M_{tot} کل جرم پرتو است.

۶-۲ دامنه دینامیک موجود

دامنه دینامیکی خطی (DR) در بسیاری موارد یک مفهوم عام و گسترده در توصیف

مشخصات تقویت کننده است که درجه ورودی قدرت را که در آن آمپلی فایر به طور

خطی عمل می کنند را توضیح می دهد. قسمت تحت نوع DR توسط قدرت صدای

تولید شده در آمپلی فایر (که به ورودی اش برمی گردد) تعیین می شود و قسمت فوقانی

آن توسط سطح قدرت که در آن ۱ db تراکم اتفاق می افتد مشخص می گردد.

مشابها، ما باید تلاش کنیم که DR را برای مبدل های NEMS تحت عنوان نسبت

حداکثر میزان لرزش به سطح صدای جابجا شده در طول پهنای باند (Band width)

اجرای Δf توصیف کنیم. به طور کل، یک مبدل NEMS همیشه توسط یک آمپلی

فایر تبدیلی دنبال می شود.

در اکثر عملکردهای با باند باریک، Δf توسط این موج آمپلی فایر تبدیلی تعیین می شود.

یک نفر ممکن است بخواهد از کل واکنش شدت که در آن پهنای باند به یک پهنای باند

مبدل معمولی تبدیل می شود استفاده کند $\Delta f \sim \omega_i = 0.2 \pi p$.

بلوک دیاگرام مسدود شده برای مبدل کل NEMS در حالت بنیادیش عمل کرده و به

یک مبدل تقویت کننده کاسکود پر سروصدا متصل می شود. (تصویر ۵). واکنش

مکانیکی برای وضعیت بنیادی مبدل می تواند توسط نوسانگر هارمونیک تک بعدی با

پارامترهای زیر بوجود آید:

توده موثر M_{eff} : مقدار ثابت نیروی موثر (خشکی) $K_{eff} = M_{eff} \omega_0^2$ و ضریب

کیفیت Q . تابع انتقال $G(\omega)$ برای مبدل بعدا به فرمول زیر تبدیل می شود.

$$G(\omega) = \frac{1}{M_{eff}(\omega_0^2 - \omega^2 + i\omega\omega_0/Q)} \quad (2)$$

برای حفظ کلیت این بحث، ما باید فرض کنیم که مبدل توسط نیروی کشنده بدون صدا

$\omega = \omega_0$ نزدیک می شود یک نونر اصلی غالب توسط نیروی پشتی آمپلی فایر مبدل

بوجود آمده است. این تحرک و کشش دارای چگالی طیف نیرو می باشد.

بوجود می آید، $\langle x_d \rangle^2 - \delta(\omega - \omega_0) / |G(\omega)|^2$ در اینجا $\langle x_d \rangle$ دامنه ارتعاش rms است که در آن مبدل

توسط نیروی کشش و کشش دارای چگالی طیف نیرو می باشد. چگالی

توسط نیروی کشش و کشش دارای چگالی طیف نیرو می باشد. چگالی

توسط نیروی کشش و کشش دارای چگالی طیف نیرو می باشد. چگالی

توسط نیروی کشش و کشش دارای چگالی طیف نیرو می باشد. چگالی

توسط نیروی کشش و کشش دارای چگالی طیف نیرو می باشد. چگالی

توسط نیروی کشش و کشش دارای چگالی طیف نیرو می باشد. چگالی

توسط نیروی کشش و کشش دارای چگالی طیف نیرو می باشد. چگالی

توسط نیروی کشش و کشش دارای چگالی طیف نیرو می باشد. چگالی

توسط نیروی کشش و کشش دارای چگالی طیف نیرو می باشد. چگالی

توسط نیروی کشش و کشش دارای چگالی طیف نیرو می باشد. چگالی

توسط نیروی کشش و کشش دارای چگالی طیف نیرو می باشد. چگالی

توسط نیروی کشش و کشش دارای چگالی طیف نیرو می باشد. چگالی

rms را تولید می کند.

$$\left[\int_{2\pi\Delta f} [S_F^{(i)}(\omega) + S_F^{(b)}(\omega)] |G(\omega)|^2 d\omega \right]^{1/2}.$$

مشابها، ولتاژ نویز تولید شده در طول مبدل تقویت کننده کاسکود با چگالی قدرت طیفی $\delta_v(W)$ به عنوان نویز جا به جا شده در ورودی امواج با بزرگی rms زیر ظاهر می شود.

$$\left[\int_{2\pi\Delta f} \frac{S_T(\omega)}{R^2} d\omega \right]^{1/2}.$$

در اینجا $R = \delta V / \delta X$ واکنش موج صدا با واحد v/m است. مهم ترین نتیجه گیری که می توان بر اساس بحث بالا بدست آورد اینست که: بخش پایینی DR موجود از دست خواهد رفت مگر اینکه امواج آمپلی فایر تبدیلی مناسب برای خواندن میزان جا به جایی NEMS به کار گرفته شوند. برای استفاده پتانسیل NEMS، برنامه های انتقال مبدل انرژی مورد نیاز است تا از آن طریق بتوان در سطح نوسانات جا به جایی درونی، بدون معرفی صدای backation، تفکیک پذیری را فراهم کرد.

اگر که یک آمپلی فایر تبدیل کننده با نویز بسیار پایین موجود باشد، محدودیت های اجرایی معمولاً توسط نوسانات جا به جا شده ترمودنایمیک درالمنت مکانیکی بوجود می آید. در جدول (۱) ما سطوح نویز ترمودنایمیک را برای NEMS معرف ارائه داده

ایم. $S_X^{(th)}(\omega_0)$ با قرار دادن $S_F^{(i)}(\omega) = 4M_{eff}\omega_0 k_B T / Q$ و محاسبه

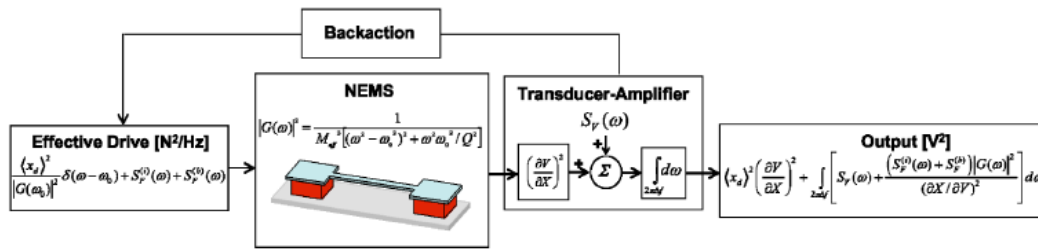
بدست می آید. $S_X^{(th)}(\omega_0) = S_F^{(i)}(\omega_0) |G(\omega_0)|^2.$

با وجود آوردن پایین ترین سطح نویز یا کمترین حد DR ما به سرحد نهایی دسترسی پیدا می کنیم. آخرین حد آن با دامنه بحرانی تحریک $\langle X_c \rangle$ در ابتدای محدوده غیرخطی تعیین می گردد. منبع این غیرخطی بودن در سیستم های مکانیکی می تواند هندسی، اینرسی، یا مادی باشد. بنابراین برای بوجود آوردن چنین سطح قدرتی دانش مخصوص هندسه ابزار و مکانیسم برجسته برای رفتار غیرخطی در مواد مورد نیاز می باشد. در هندسه پرتو گرفته شده مضاعف، به عنوان مثال برای $\langle X_f \rangle \langle X_c \rangle$ نزدیک $\omega \sim \omega_0$ می باشد و نوسان باعث افزایش طول پرتو شده و تصحیح قابل توجهی را به واکنش الاستیکی افزوده می کند. چنین شرایطی را می توان در تساوی زیر به تصویر کشید:

$$\langle x_c \rangle \approx \left[\frac{2}{0.528Q(1-\sigma^2)} \right]^{1/2} t, \quad (3)$$

که بستگی به ضخامت پرتو t در جهت لرزش و همچنین بستگی به نسبت پواسن δ و Q دارد. ما باید توجه داشته باشیم که طره، فرمولاسیون مشابه بر اساس یک تأثیر غالب و برجسته نمی تواند به درستی ساخته شود. شروع و ابتدای طرح غیرخطی بر اساس معیار انجام شده در پرتوهای گرفته شده مضاعف برای ابزارات معرف در جدول شماره ۱ نشان داده شده است. با این محدودیت ها، DR درون پهنای باند اجرایی به قرار زیر بیان می شود:

$$DR = 10 \log \left[\langle x_c \rangle^2 / \int_{2\pi\Delta f} S_X^{(eff)}(\omega) d\omega \right]. \quad (4)$$



تصویر ۶) در این شکل دیاگرامی از مبدل تقویت کننده کاسکود NEMS نشان داده می شود. در تجزیه و تحلیل صدا، این طور فرض می شود که مبدل نانومکانیک به نیروی رانش که در $\omega = \omega_0$ یعنی صدای نیروی درونی قرار گرفته است و صدای نیروی Backaction تبدیلی قرار گرفته است. واکنش مکانیکی مبدل توسط عملکرد انتقالی اش مشخص می شود. این نیروی ورودی به جا به جایی تبدیل شده و نهایتاً آمپلی فایر تبدیلی خطی این میزان جا به جایی را به ولتاژ الکتریکی تبدیل می کند. ما تصور می کنیم که موج آمپلی فایر تبدیلی پرازنویز است و دارای واکنش جا به جایی $\partial V / \partial X$ می باشد. در خروجی جریان تمام قدرت نویز و نیروی رانش (محرک) به ولتاژ تبدیل شده و بر روی باند اندازه گیری با هم ترکیب می شوند. توجه کنید که برای محاسبه DR می توان تمام سیگنال ها را به میزان جا به جایی و یا ولتاژ تبدیل کرد (که به عنوان ورودی آمپلی فایر تبدیلی قرار دارد)

در اینجا $S_x^{(eff)}$ پایین ترین حد نویز در Δf است این به معنی $S_x(w) / \eta^2$ بزرگتر یا $| [S_F^{(i)} w + S_F^{(b)}(w)] G(w) |^2$ می باشد. در جدول (۱)، ما به طور ترمومکانیک مقادیر DR را برای $\Delta f \approx \omega_0 / 2\mu Q$ محدود کرده ایم.

ما از این بخش نتیجه می گیریم که با توجه به این که رفتار غیرخطی نه تنها در کاربردهای معین همچون پردازش سیگنال درست نمی باشد بلکه شامل طیف وسیعی از فیزیک گیرا می گردد.

۲-۷ توده فعال:

فقط یک ذره از توده مبدل کلی در این جا به جایی وجود دارد. برای پرتو یا طره ها، توده کلی را در انتگرال عملکرد خنثی که شکل ظاهری را توصیف کرده و اندازه توده فعال M_{eff} را نشان می دهد ضرب کنید. برای پرتوهای گرفته شده که در حالت های اساسی عمل می کنند مثلاً $M_{eff} \approx 0.73M_{tot}$ ، که در آنجا M_{tot} توده کلی پرتو می باشد. ما M_{eff} را برای معرفی NEMS در جدول شماره ۱ نشان داده ایم.

ما پیچیدگی M_{eff} کوچک را که مربوط به NEMS است را در قسمت (۳) مورد بحث و بررسی قرار می دهیم که در آنجا موضوعات نوین فاز، ساخت نانو قابل تکثیر و NEMS بر اساس تشخیص میزان توده مورد مطالعه قرار می گیرد.

۳- چالش های اصولی

۳-۱ جستجوی Q بالا

هدف از بدست آوردن محدودیت های نهایی عملکرد NEMS جستجوی Q بالا است. این مقاله فراگیر و گسترده تمام تحقیقات اساسی و کاربردی در NEMS را در بر می گیرد. از نقطه نظر کاربردی، ائتلاف درون المنت مکانیکی مبدل عبارت اند از: الف) حساسیتش را به نیروهای خارجی کاربردی محدود کند. ب) سطح نوسانات را که کیفیت طیف را کاهش می دهد تعیین کند (یعنی پهنای باند آن وسیع می شود) ج) حداقل سطوح قدرت درونی را که در آن وسیله باید عمل کند تعیین کند.

بنابراین Q بالا، جنبه محدود و محدود کردن عملکرد در یک تعداد کاربردهای مهم می باشد. در نویز فاز پایین، نوسانگرهایی از قبیل آن دسته که برای نگه داری زمان مورد نیاز هستند برای فیلترهای انتخابی پردازش سیگنال و همچنین سنسورهای تشدید که تغییرات فرکانس تشدید بر اساس اختلالات خارجی ردیابی می شوند به کار می روند. (به بخش ۵ مراجعه کنید). عجله ما در افزودن انرژی اتلاف شده در سیستم های مکانیکی مزوسکوپیك به نوبه خود یک مشکل اساسی به شمار می رود.

مکانیسم های درونی و برونی برای محدود کردن Q در وسیله های NEMS واقعی به شمار می روند. در این مرور و بازنگری ما در یک بررسی کوتاه، بعضی از این مکانیسم ها را تحت مطالعه قرار دهیم. خوانندگان مشتاق می توانند بررسی های کاملتری را در منابع موجود راجع به این مقوله بیابند.

ما با منابع برونی شروع می کنیم. بسیاری از این منابع با جزئیات فراوان بررسی شده است. این ها شامل (۱) اتلاف انرژی به دلیل رطوبت گاز (۲) اتلاف های موجود در تکیه گاه (۳) اتلاف های تزریق میانی از طریق مبدل ها. در تصویر ۷. ما اندازه گیری های اخیرمان از تأثیر گاز احاطه شده بر تشدید کننده های NEMS را ارائه می دهیم. در فشارهای بسیار پایین در رژیم های ملکولی ذکر شده جایکه در آن راه آزاد شده از ملکول های گاز بسیار بزرگ تر از ابعاد وسیله باشد، تشدیدگر انرژی را از طریق برخورد با ملکول های

جداگانه اتلاف می کند. به طور ساده، ضریب کیفیت به دلیل اتلاف گاز می تواند از

طریق فرمول زیر محاسبه گردد:

که در اینجا $V = v\sqrt{K_B T/m}$ سرعت گرمایی ملکول های گاز

است که هر کدام با توده m و فشار گاز را احاطه می کند و A ناحیه سطحی تشدید

کننده است. Q وسیله که قبلا ذکر شد بعدا می تواند از طریق فرمول

$Q_L = (Q_i^{-1} + Q_{gas}^{-1})^{-1}$ تعیین گردد که در این فرمول Q_i همان Q درونی است.

در تصویر شماره (a) ۶، ما Q_{gas}^{-1} را به عنوان تابع P ترسیم کرده ایم. در P پایینی، میزان

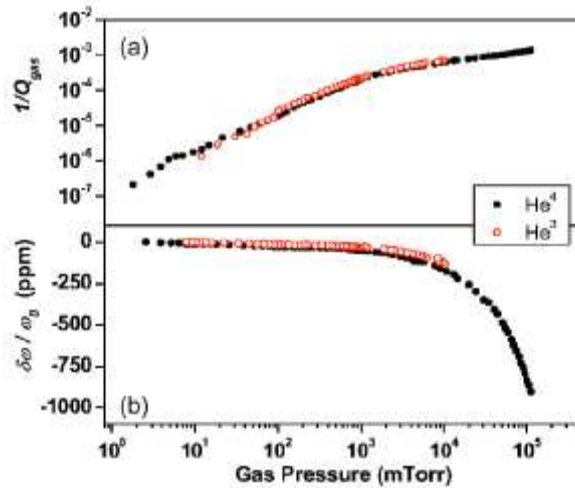
Q_{gas}^{-1} از لحاظ خطی بستگی به P دارد. در P بالا، تغییر به رژیم ویسکوز کاملا واضح

است: تحریک مشابه آن نیز در تغییر فرکانس شدت در شکل نشان داده شده است. در

رژیم ملکولی، تغییر فرکانس جزئی مشاهده می شود: در رژیم ویسکوز، بارگذاری، توده

ω را کاهش می دهد. این فشار متغیر می تواند با مقایسه طول موج صدا در میانه راه آزاد

ملکول های گاز مشاهده شود.



شکل ۷- تأثیرات فشار گاز احاطه شده بر پارامترهای تشدید کننده GaAs پرتو NEMS گرفته شده دو گانه با $\omega_0/2\pi \approx 4.38$ این Q درونی وسیله برابر است با $Q_i \approx 10^4$ که Q_i و $\delta\omega$ از پرتو به عنوان عملکرد فشار گاز در کانال اندازه گیری، ارزیابی می شوند. Q_{gas} بعداً با استفاده Q_i بدست می آید. اندازه گیری با گازهای صورت می گیرد. به تغییرات موجود در طرح ها از رژیم گازی ایده آل شروع شده و تا رژیم ویسکوز ادامه می یابد.

یک تشدید کننده می تواند انرژی اش را در حالت های تشدید از طریق متصل کردن اکوستیک به گیرها از دست دهد و NEMS هایی با فرکانس بالا در پیکر بندی پرتو تحت فشار مضاعف مشاهده می گردد. (تصویر ۴)

یکی از دلیل های ممکن برای کاهش ضریب Q در این وسیله ما کاهش اتلاف دستی در شرایط مرزی پرتوهای گیرافاده مضاعف می باشد. تشریح اخیر در کاهش میزان فشار اندازه گیری شده در تشدید کننده های پرتوهای NEMS، با این گفته نیز مطابقت دارد. هانگ و سایرین ضریب Q از پرتوهای نانومکانیک مشابه را با شرایط مرزی تحت فشار

مضعف و آزاد- آزاد مقایسه کرده اند و به طور واضح تقویت و افزایش ۲,۵ برابر در

Q پرتو آزاد - آزاد نشان داده اند.

این امکان وجود دارد که فرآیند تبدیلی جا به جا شده خودش به اتلاف انرژی مربوط

باشد و منجر به تغییرات واضحی در Q مشاهده شده گردد- که این مقوله، گاهی اوقات

Q و Q₁ خوانده می شود. کلندور و کز به عنوان مثال، میزان سهم مدار مبدل محرک

مغناطیسی را به انرژی اتلاف شده مشاهده شده در NEMS تعیین می کنند. آنها تکنیکی

را به وجود آورده اند که از طریق آن رطوبت الکتریکی خارجی می تواند کنترل و اندازه

گیری شود و امکان تنظیم Q₁ را به وجود آورد.

در بررسی منابع اتلاف درونی، ضروریست که بین اتلاف انرژی که در لاتیس (شبکه)

کریستال کامل وجود دارد و اتلاف انرژی که در کریستال ناقص واقعی با نقص های

سطحی و کلی رخ می دهد تمایز قائل شویم.

مکانیسم کاهش در کریستال کامل یک مکانیسم اساسی و بنیادین است. این تحلیل ها در

باندهای بالای نمایی نایل می شود. چنین فرآیندهایی شامل رطوبت ترموالاستیک که از

دو برابر شده غیر هارمونیک بین حالت های مکانیکی و منبع فونون ایجاد می شود و

کاهش های موجود از الکترون - فونون و واکنش های فونون - فونون صورت می گیرد.

مکانیسم های درونی که به دلیل نقص موجود در کریستال ممکن است به وجود آید با

انتخاب با دقت مواد، فرآیندها و کنترل ها، به راحتی کنترل می شود. این شامل کاهش

آنالاستیک که شامل نقص هایی در حجم و سطح است می شود.

ابزارات NEMS از یک کریستال الگو می گیرند، ساختارهای مختلفی می توانند به مقدار

خیلی کمی (حتی صفر) نقص ها و آلودگی های کریستالوگرافیک را شامل شوند.

بنابراین، اولین امیدواری اینست که در فرآیندهای کاهش انرژی اکوستیک، ساختارهای

کافی کوچک باید مغلوب شده و ضریب Q بالا بدست آید.

شگفت آور اینست که کلکسیون گسترده تشدید کننده های NEMS که از مواد و

فرآیندهای مختلف با استفاده از تکنیک های نانوماسین سطحی مختلف بوجود آمده اند-

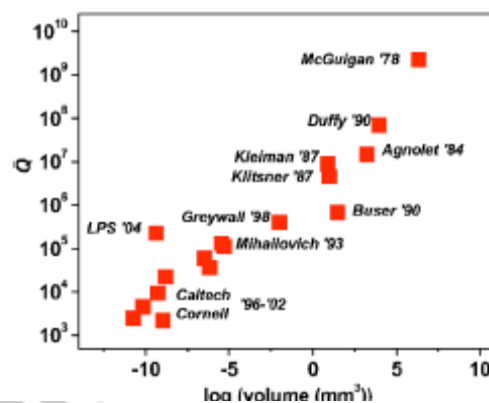
ضریب Q تقریباً کمی را در دامنه 10^3-10^{15} به وجود آورده است.

مدارک آزمایشی بسیاری وجود دارد که به اتلاف انرژی در NEMS در مدل های

جدید بارز اشاره دارد. آزمایش های رفتاری سطحی در خلا بالا (UHV) در نانو و

ابزارات میکرومکانیک نشان می دهند که اکسیدهای سطحی، نقص های موجود و میزان

جذب اتلاف انرژی را زیاد می کنند.



شکل ۸- ماکزیمم ضریب Q گزارش شده در تشدیدگرهای مکانیکی به شکل مونوکریستال مختلف در اندازه مقیاس ماکرو اطلاعات از یک روند نمایش یک کاهش در ضریب Q پیروی می کند که تقریباً با دیمانسیون خطی یعنی با افزایش نسبت حجم در سطح رخ می دهد.

بدست آوردن طره های Si نانومتريکی در UHV، ضریب Q را به یک مرتبه افزایش می دهند. در آزمایش های طیف نمایی فوتو الکترون اشعه X، از بین رفتن اکسیژن از سطوح طره مقیاس نانو با پیشرفت ضریب Q مکانیکی وابسته است. اخیراً تکنولوژی لایه های متصل نانو برای جلوگیری از اتلاف انرژی در ابزارات میکرومکانیک سیلکون بکار می رود. شکل ۷ روند دقیقی را که به طور کل در تشدید کننده های مکانیکی آشکار است را نشان می دهد. و در اندازه ای که واقعا در حوزه NEMS هستند مقایسه می شوند. حداکثر Q های موجود با بعد خطی به سمت پایین ادامه دارند یعنی نسبت آنها، نسبت حجم به سطح است. ما باید توجه کنیم که اندازه گیری Q در تشدید کننده ها در شکل ۷ با دماهای مختلف انجام شده است.

با ارائه آنچه که از وسیله های فیزیکی فوتونیک و الکترونیک با توجه به اکسیداسیون و ساخت مجدد سطح S صورت گرفته است واضح است که ویژگی های مکانیکی ابزارات کوچک NEMS، از آن دسته حجیم گرفته شده است.

بدست آوردن Q بالا با استفاده از نسبت های سطح به حجم دشوار به نظر می رسد. کم انرژی سطح، بدون شک برای ابزارات مقیاس نانومتر ضروری می باشد.

ممکن است که این طور نتیجه گرفته شود که ساختارهای چون نانوتیوب و نانووایر برای نشان دادن NEMS ایده آل هستند و سطوح انتهایی را به طور کامل نشان می دهند. با وجود این هنوز تکنولوژی موجود ساخت و اندازه گیری ویژگی های مکانیکی ابزارات نانوتیوب و نانووایر پیشرفت چندانی نکرده است. بنابراین اخیرا حتی برای تخمین Q_s که نهایتا در فرکانس های بالا با نانوتیوب و نانووایر بر اساس NEMS بوجود می آیند نیز اطلاعات کافی در دسترس نیست.

۲-۳ نویز فاز:

چنانکه در بالا اشاره شد، ابزارات NEMS تشدیدکننده در بسیاری از کاربردهای اولیه مانند نوسان گرها بادوام در کلاک های فرکانس، فیلترهای سیگنال در پردازش سیگنال ها و نیز به عنوان (دستگاه) سشور فراساس بکار می روند. در تمامی این ها، دوام و ثبات فرکانس تشدیدکننده بلند مدت و کوتاه مدت در ایجاد محدودیت های عملیات مهم

Type of noise	$S_u(\omega)$	$\delta\omega_0$
Amplifier ^{a,b}	$\omega_0^2 S_T(\omega) / Q^2 R^2 (x_c)^2$	$(\omega_0 / Q) 10^{-11(R/20)}$
Thermomechanical ^{a,c}	$(\omega_0^2 / Q^2) (k_B T / E_c) [1 / (\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \omega^2 \omega_0^2 / Q^2]$ (PLL) $k_B T \omega_0 / E_c Q$ (self-excited loop)	$\omega_0 (k_B T / E_c)^{1/2} (\Delta f / Q \omega_0)^{1/2}$
Temperature fluctuations ^d	$[(-22.4 c_p^2 / \omega_0^2 f^2) \alpha_T + (2 / c_p) (\partial c_p / \partial T)]^2 [\omega_0^2 k_B T^2 / \pi \epsilon (1 + (\omega - \omega_0)^2 \tau_T^2)]$	$\omega_0 / \pi^{1/2} [(-22.4 c_p^2 / \omega_0^2 f^2) \alpha_T + (2 / c_p) (\partial c_p / \partial T)] \times [k_B T^2 \arctan(2\pi \Delta f \tau_T) / \epsilon \tau_T]^{1/2}$
Adsorption-desorption ^{e-e}	$\{2\pi \omega_0^2 N_a \sigma_{occ}^2 \tau_r / [1 + (\omega - \omega_0)^2 \tau_r^2]\} (m / M_{eff})^2$	$\omega_0 m / M_{eff} \sigma_{occ} [N_a \arctan(2\pi \Delta f \tau_r)]^{1/2}$
Momentum exchange ^{f,g}	$(\omega_0^2 / Q_{gas}^2) (k_B T / E_c) [1 / (\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \omega^2 \omega_0^2 / Q_{gas}^2]$ (PLL) $k_B T \omega_0 / E_c Q_{gas}$ (self-excited loop)	$\omega_0 (k_B T / E_c)^{1/2} (\Delta f / Q_{gas} \omega_0)^{1/2}$

^aSee Ref. 12.
^bSee Ref. 27.
^cSee Ref. 25.
^dSee Ref. 73.
^eSee Ref. 74.
^fSee Ref. 76.
^gSee Ref. 77.

جدول ۱) توضیح صدای فاز NEMS و نوسانات فرکانس $S\omega_0$ برای مکانیسم های صدای مختلف $S\omega_0$ در اینجا برای باند Δf ارائه شده است. این طور فرض شده که تشدید کننده به دامنه محرک بحرانی $\langle Xc \rangle$ که توسط انرژی مشخص شده است برسد. در ردیف اول، نویز ولتاژ تولید شده در مبدل تقویت کننده کاسکود تبدیلی یک منبع نویز بارز است: نشانه های استفاده شده در اینجا در بخش IIIf تشریح می شوند. در اینجا DR محدودیت آمپلی فایر است و برابر است با $DR = 10 \log [\langle Xc \rangle^2 / (S_v \langle f / s_2 \rangle)]$ در ردیف دوم ما نوسانات فرکانس بوجود آمده از طریق صدای ترمومکانیک را نشان می دهیم. در اینجا علی رغم اینکه $S\Omega_0$ بدست آمده مستقل از برنامه است، برنامه اندازه گیری به طور موثر $S_\omega(\omega)$ را تعیین می کند. در ردیف سوم، نوسانات حرارتی بررسی می شوند. در اینجا CS درجه حرارت سرعت وابسته صدا است. ضریب انبساط گرمایی خطی است و T_T, g به ترتیب رسانای گرمایی و عامل ثابت گرمایی برای ساختار نانو می باشند. در ردیف چهارم صدای بوجود آمده از جذب ملکول های گاز بر تشدید کننده نشان داده می شود. برای تعیین صدای جذب- تبخیر، سطح به عنوان سایت می باشد در نظر گرفته می شود. T_T ضریب همبستگی برای چرخه جذب- تبخیر می باشد. در ردیف پایین، صدای تغییر یافته از ملکول های گاز برای حد فشار پایین توسط پارامترهای توصیف شده در قسمت III محاسبه می شود.

می باشد. در اینجا ما به بحث فرآیندهای نوین فاز و دوام فرکانس در تشدیدکننده های NEMS برمی گردیم.

ثبات فرکانس یک تشدیدگر مبدل تقویت کننده کاسکود با فرآیند خارجی در مدار مبدل و فرآیند داخلی اساسی خود تشدیدکننده تعیین می شود. دوام یا ثبات فرکانس در تشدید کننده های مکانیکی بزرگ و کوچک توسط المنت های خارجی مانند آمپلی فایر مبدل محدود شده اند. در دامنه فعالیت NEMS با دادن یک حساسیت قوی که در دسترس می باشد، همان طور که ابزارت کوچک تر می شوند و تکنولوژی تبدیل جا به جایی فراحسی به وجود می آید، فرآیندهای تبدیلی بنیادی به طور روز افزون نتیجه را تعیین می کنند.

در مقاله اخیر، کلاندوروز توضیحاتی را برای نوین فاز در NEMS که از فرآیندهای فیزیکی درونی بسیاری نشأت می گیرند را جمع آوری کرده اند. در مقاله بعدی، اکسی و سایرین نوین فاز را در مرجع ۲۵. به نوسانات فرکانس برای برنامه های اندازه گیری خاصی تبدیل کرده اند.

بعد از آن فرمول بندی برای فرآیندهای خارجی گسترش می یابد.

جدول شماره ۲ نتایج اخیر از انواع توابع تراکم طیفی نوسانات فرکانس $\delta_{\omega}(\omega)$ و نوسانات فرکانس مطابق با آن برای این فرآیندها خلاصه می کند.

$\delta\omega_0 \approx [f_{2n\Delta f} S_w(\omega) d\omega]^{1/2}$ در ردیف اول جدول (۲) مبدل آمپلی فایر که ثبات فرکانس را

نظارت می کند نشان داده شده است.

فرآیندهای درونی در ردیف های بعدی مورد بررسی قرار گرفته اند که شامل نویز ترمومکانیک تولید شده توسط مکانیسم کاهش درونی در مبدل، نوسانات حرارتی تولید شده توسط هدایت گرمایی محدود تشدیدکننده ها، نویز جذب-تبخیر و جا به جایی لحظه ای نویز از ملکول های گاز احاطه شده، می باشد.

۳-۳ توسعه مبدل هادامنه ارتعاشی IMS برای وسیله مکانیکی (که در رنج خطی عمل

می کند) در جهت سایش به مقیاس معین کوچک شده است. در جدول ۱ دامنه بحرانی

$\langle x_c \rangle$ برای تعدادی از ابزارات NEMS نشان داده شده است. چنین دامنه های جا به

جایی جزئی نشان می دهند که برای بکار بردن موثر این وسایل، مبدل های جا به جایی فرا

حساسی مورد نیاز هستند. برای متصل کردن حرکت وسایل NEMS در کاربردهای

فوق العاده سریع، پهنای باند با عملکرد بالا مورد نیاز است.

ارتوژونالیتی (تعامد) راه اندازی و تبدیل پورت ها یعنی آن دسته که دارای پورت های

ورودی و خروجی می باشد کاملاً با المنت مکانیکی در تعامل است اما تنها تزویج مستقیم

ضعیف بریکدیگر این خاصیت دیگر را دارد. آشکارسازی جا به جایی تکیه گاه در دامنه

MEMS از طریق اتصال نوری و الکترونیکی صورت می گیرد. این آشکارسازی در

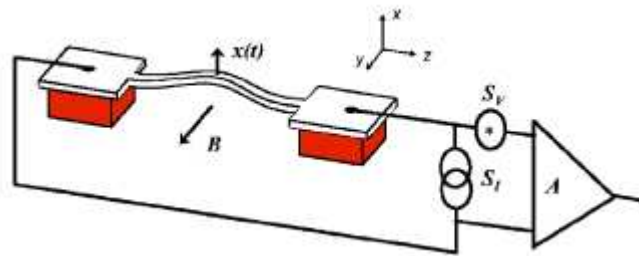
MEMS با استفاده از مبدل های مغناطیسی، الکترو استاتیکی، پینروالکتریک با موفقیت

بدست آمده است. در ابزارات MEMS نوری، انترفرومتری نوری (تداخل سنجی) و تکنیک های شکست پرتوی نور با موفقیت استفاده شده است اما با وجود این هر دو شیوه، در ابعاد کاهش یافته NEMS به سرعت غیر حساس می شوند. مشکل اساسی در اتصال الکترونیک اینست که همچنان که سایز وسیله کاهش می یابد و عملکرد فرکانس بالا می رود، مدولالسیون حرکتی مقاومت ظاهری (امپدانس) به مرور کمتر شده در حالی که مقاومت های ظاهری پارازیتی افزایش می یابند. تصویر آشکارسازی به خاطر فعال سازی دو پورتی الکترونیک، جذاب، اکثر وسایل MEMS در مقیاس NEMS به راحتی قابل درک نیستند. از طرف دیگر آشکارسازی میزان جا به جایی نوری در ساختارهای کوچک با تجزیه نور محدود می گردند. در بین المنت های مورد نیاز برای بوجود آوردن تکنولوژی ها بر اساس NEMS، باند وسیعپاز روش های انتقال رسانا به جا به جایی های سابنانومتر حساس می شود. جایگذاری برنامه های آشکارسازی با ویژگی های ذکر شده در بالا بیشتر مورد چالش بوده است. تکنیک های متعددی برای NEMS در نظر گرفته شده است. در زیر ما باید بعضی از این برنامه های تبدیلی را با جزئیات توضیح دهیم و توضیحات داده شده را ارزیابی کنیم. برنامه آشکارسازی میزان جا به جایی که به خوبی در دامنه NEMS مقیاس بندی شده است و اتصال الکترونیکی مستقیم NEMS را ارائه می دهد یک جابه جایی محرک مغناطیسی می باشد. این بر اساس وجود یک رشته میدان ایستایی یکنواخت صورت گرفته که از طریق آن المنت نانومکانیک رسانا حرکت

می کند. طرح آشکارسازی محرک مغناطیسی در تصویر ۹ نشان داده شده است. معمولاً

المنت پرتو که توسط نیروی لورنتز برانده شده است با عبور جریان AC در میدان مغناطیسی

ایستا تولید می شود.



شکل ۹) طرح تعیین جابجایی محرک مغناطیسی. حساسیت جایگزینی در متن با فرض بر این برآورد

می شود که منبع اصلی نویز، نویز ایجاد شده در اولین طبقه تقویت کننده است.

شار متغیر زمانی، نیروی الکتروموتور را در حلقه بوجود می آورد. برای پرتوهای گیرافتاده،

واکنش تبدیل محرک مغناطیسی می تواند از طریق فرمول زیر محاسبه می شود،

که در آنجا B شدت میدان مغناطیسی است و L طول پرتو است:

در اینجا نقطه میان پرتو در فرکانس ω جا به جایی می شود. ξ یک ضریب هندسی است و

برابر با $\xi = 0.885$ می باشد. با استفاده از تصویر ۹ و مفاهیم بوجود آمده در قسمت ۶-۲،

می توان حساسیت جا به جایی محدود شده آمپلی فایر را برای طرح به ترتیب زیر بدست

$$[S_x(\omega)]^{1/2} = \left(\frac{S_v(\omega)}{(\xi l B \omega)^2} + \frac{S_i(\omega) l^2 B}{m_{eff}^2 [(\omega^2 - \omega_0^2) + \omega^2 \omega_0^2 / Q^2]} \right)^{1/2}$$

در اینجا $S_i(\omega), S_v(\omega)$ به ترتیب ولتاژ و تراکم طیفی نویز جریان آمپلی فایر هستند.

با بکارگیری انفورمتری نوری، حساسیت های جا به جایی محدود نویز

به طور معمول بر اشیائی با برش های عرضی بزرگتر از نقطه $\delta_x^{1/2} \approx 10^{-6} \text{ nm} / \sqrt{\text{Hz}}$

شکست نوری محدود شده در دسترس می باشد.

اخیراً، تکنیک های انفورمتری نوری در راه مخصوص انفورمتری مایکلسون و فابری پروت

تا محدوده دامنه NEMS پیش روی کرده اند. شکل ۱۰ یک ساختار انفورمتری حرارتی

خاص را نشان می دهد.

در راه بوجود آمدن تثبیت انفورمتری مایکلسون، پرتوی لیزر متمرکز شده از سطح ابزار

NEMS منعکس شده، و با پرتوی منبع تداخل پیدا می کند. در مورد انفورمتری فابری

-پروت، حفره نوری ساخته شده در شکاف NEMS- بین سطح NEMS و

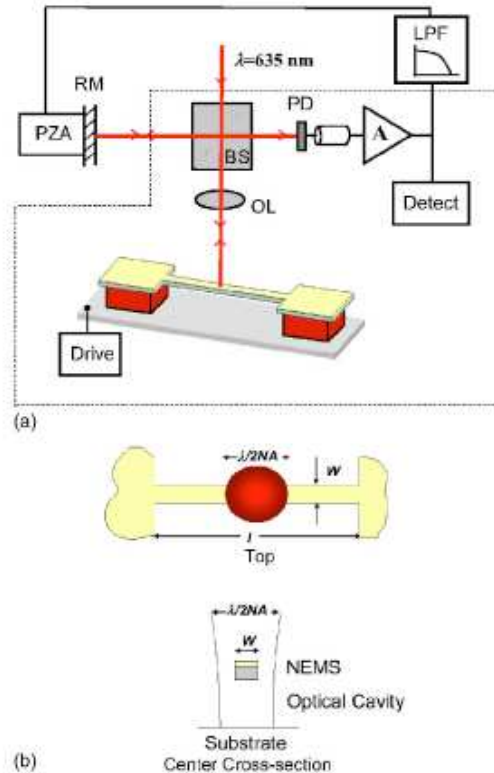
جایگزین آن - سیگنال های نوری را تعدیل و تنظیم می کند. در هر دو تکنیک تأثیرات

تجزیه (نور) قوی پدیدار میشود همچنان که ابعاد NEMS مربوطه فراتر از طول موج نور

کاهش می یابند. نهایتاً حساسیت های جا به جا شده محدود صدا که در وسایل بزرگتر

نشان داده شده اند در NEMS به راحتی در دسترس نیستند. با این وجود این امکان برای

دستگاه های حس گرای جا به جا شده نوری نزدیک و ترکیب شده وجود دارد.



تصویر ۱۰- دیاگرام طراحی شده ساختار نوری فضای خالی را که در دانشگاه بوستون مورد استفاده قرار گرفت نشان می دهد. انترفرم نوری بر مرحله ترجمه XXZ قرار می گیرد. این انتر فرمر شامل شکننده های نوری مختلف (BS_s)، آینه منبع (RM) و نهایتاً فوتودکتور می باشد. پرتوی تحت بررسی که برای آشکارسازی جا به جایی NEMS بکار می رود بر وسایلی با لنز نوری $50\times$ تأکید می کند. انعکاس های نور از NEMS توسط لنزهای مشابه جمع آوری شده و با پرتوهای منبع در PD مداخله می کنند. طول راه منبع ثابت با استفاده از فیلتر کوچک و PZA ثابت باقی می ماند. خط فاصله سهم ساختار مورد استفاده برای اندازه گیری های Fabn-Perot نشان می دهد؛ بازوی منبع اوپتیک ها به راحتی اندازه گیری را سر می کند. نمای بالای و برش عرضی مرکزی پرتوهای NEMS در ارتباط با نقطه نوری و پروفایل گوسی می باشد.

به طور خلاصه، تکنولوژی های تقویتی و میکروسکوپی لنزهای دارای پوشش جامد بر
قول خود باقی مانده اند.

در تبدیل های الکترواستاتیک، ظرفیت دینامیک بخاطر حرکت NEMS - بر اساس
مرتبۀ $10^{-18}F$ با ظرفیت های پارازیتی مسدود میشوند که چند مرتبۀ بزرگتر است. که فرار
از این کاهش مقاومت ظاهری امکان دارد با پارازیت افزایش رخ دهد که هنگامی اتفاق
می افتد که سائز وسیله کوچک می شود. راه حل موجود در اینجا حذف مقاومت ظاهری
بزرگ و پارازیتی می باشد.

یک تکنیک پل متعادل به عنوان مثال برای کاهش پیش زمینه مقاومتی و پارازیتی نشان
داده شده است. تکنیک های مقاومت ظاهری همچنن به عنوان یک راه حل پیشنهاد
می شود. هر کس می تواند به طور مستقیم یک مرحله بیشتر را در مبدل ظرفیتی قرار دهد.
اخیرا یک ترانزیستور الکترونی (SET) به تشدید کننده NEMS ترکیب شده است که
در آن الکتروود NEMS دارای هدف دو گانه می باشد یعنی هم به عنوان سشور حرکتی
برای NEMS عمل کرده و به عنوان الکتروود SET نیز بکار می رود.

تبدیل میزان جا به جایی پیزوالکتریک با شناسایی میدان های پلاریزاسیون متغیر زمانی که
توسط میدان های کششی منطقه ای متغیر زمانی بوجود می آیند، مشخص می شود. این
میدان های پلاریزاسیون می تواند بوسیله گیت ترانزیستورها یا ترانزیستورهای تکنولوژی
الکترونی که در آنجا قطب سازی الکتریکی تغییر زمانی در بزرگ ترین نوع خود قرار

دارد شناسایی شود. ساختارهای الکترون متحرک معلق نیز در شناسایی پیزوالکتریک حرکت نانو بکار می رود. آشکارسازی پیزروسیتو کاملاً به نوع شناسایی پیزوالکتریک مربوط می شود تونل سازی (کانال سازی) الکترون تکنیکی است که تا ابعاد بسیار کوچکی نیز قیاس شود.

با وجود این، از آنجاییکه مقاومت ظاهری اتصال تونل بسیار بالا است، پهنای باند چنین آشکار سازی هایی در صورت وجود ظرفیت پارازیتی اجتناب ناپذیر است، ما بر این تأکید داریم که این نقص های پهنای باند بخاطر دلایل فن آوری است نه دلایل اساسی و بنیادین. تونل سازی الکترون مکانیکی کوانتم در مقیاس اتمی ذاتاً پدیده ایست سریع که سرعت آن بیشتر از 1 GHz می باشد. وابستگی غیرخطی جریان طول بر فاصله تونل ممکن است برای برنامه های مخالف در NEMS هایی با فرکانس بالا کاملاً مفید باشد.

۴-۳ ساخت نانوقابل تولید مجدد

فرآیندهای نانوماشین سطحی وسایل NEMS را با خطاهای بزرگ در حاشیه ای پارامترهای ابزار اساسی تولید می کنند حتی زمانی که پارامترهای پردازشگر یکسان نیز بکار گرفته شوند این قضیه وجود دارد. این در واقع پیامد مخالف توده های موثر

NEMS های جزئی است. این واضح است که چنین تکنیک هایی برای NEMS نیز

مورد نیاز است.

۴- کاربرد پدید آمده (آغازین)

حتی در مرحله اولیه توسعه، به نظر می رسد که NEMS نهایتاً در دامنه وسیع کاربردها مورد استفاده قرار گرفته است همایش های اخیر NEMS بر اساس الکترومتری، آپتومکانیک، فرآیند سیگنال الکترومکانیک و آشکارسازی توده ای، توجهات بسیاری را به خود جلب کرده است. از نقطه نظر علمی، NEMS ها، شروع تحقیقات فرآیندهای مکانیکی فونون و رفتار کوانتوم سیستم های مکانیکی هستند. در انتهای این بخش، ما باید بر کاربرد NEMS های خاص تأکید کنیم: بحث ما از NEMS بر اساس آشکارسازی توده ای اداری جنبه های مختلف بسیار می باشد. اول اینکه، مفهوم حسی شدیدکننده حاضر را مطرح می کنیم.

دوم اینکه، NEMS را برای آشکارسازی گروهی با نشان دادن محدودیت هایش در پرسپکتیو قرار می دهد. سوم، راههایی برای طیف تمام توده مبتنی بر NEMS، پیشنهاد می شود سنسورهای شدیدکننده با فراهم کردن تغییر فرکانس ω که رابطه مستقیم با δm توده اینرسی دارد عمل می کند. با دادن واکنش توده ای $\mathcal{R}_M = \partial \omega_0 / \partial M_{\text{eff}} \cdot \delta m$ می تواند به عنوان فرمول زیر محاسبه گردد.

$$\delta m \approx \left| \frac{\partial M_{eff}}{\partial \omega} \right| \delta \omega = |R_M|^{-1} \delta \omega \quad (5)$$

در اینجا، ما فرض را بر آن می‌گیریم که پارامترهای سیستم به طور ضعیف برای تغییرات بسیار کوچک به هم متصل شده اند یعنی $\partial M_{eff} / \partial k_{eff} \approx 0$. ما بعداً می‌توانیم تعیین کنیم که $R_M = -(\omega \omega / 2M_{eff})$.

$$\delta m \approx 2 \frac{M_{eff}}{\omega \omega} \delta \omega \quad (6)$$

سنسورها با حساسیت‌های توده‌ای بی‌نقص بر اساس رابطه ساده توصیف شده توسط تساوی ۶ نشان داده شده‌اند و در بسیاری از زمینه‌های مخالف علم و فن آوری بکار گرفته شده‌اند. در بین این‌ها حساس‌ترین‌شان آن دسته‌ای هستند که بر اساس حالت‌های لرزشی کریستال، لایه‌های نازک و طره‌های با سایز میکروسکوپی قرار دارند. در تمامی این‌ها توده لرزشی موثر تشدیدکننده M_{eff} تغییر حداقل فرکانس قابل تفکیک δW_{min} توسط مدارات سنجش خاصیت توده‌ای انتهایی δW_{min} را تعیین می‌کند.

M_{eff} جرئی مربوط به NEMS در اتصالات با Q_s ‌های بالا به موقعیت‌هایی برای حساسیت توده‌ای در فرکانس‌هایی با عملکرد بالا، چنانکه در آزمایشات اخیرمان نشان داده شد تبدیل می‌شود.

در اینجا ما باید به طور مختصر این آزمایشات را در تلاش برای آسان‌سازی بررسی‌های بعدی مرور کنیم. این آزمایشات اولیه محیط UHV ($T \approx 17k$) درون دستگاه نشان داده شده در تصویر (a) ۱۱ انجام شده است. این سیستم اجازه می‌دهد عملکرد یک حرکت

مغناطیسی را به تشدیدگر NEMS تبدیل کند در حالی که یک پالس ضعیف، شار

بالیستیک اتم های Au را مستقیماً به سمت آن هدایت می کند. تشدید گرهای پرتوهای

کنار هم نانو مکانیکی SIC که در شکل (a) ۱۱ نشان داده می شود به عنوان عنصرهای

سنسور در این آزمایشات مورد استفاده قرار می گیرند. فرکانس رزونانس بنیادی انعطافی

در سطح $\omega_0/2\pi$ یکی از پرتوها را به طور مداوم با مدار حلقه فاز بسته (PLL) پیدا

می کند که به طور نموداری در شکل ۱۲ (10C) نشان داده می شود سیر تکامل موقتی

$\omega_0(t)/2\pi$ نشان داده می شود همچنانکه پرتو در معرض شار بالیستیک اتم های Au است

که M_{eff} را با میزان $\delta m(t)$ تغییر می دهد. برای این سیستم $\Re_m^{-1} = \partial M_{eff} / \partial \omega_0$ ، استنباط

می شود $|2\pi\Re_m^{-1}| \approx 3/90 \times 10^{-19} \text{ g / Hz}$. سطح پایین نویز اندازه گیری از نواحی

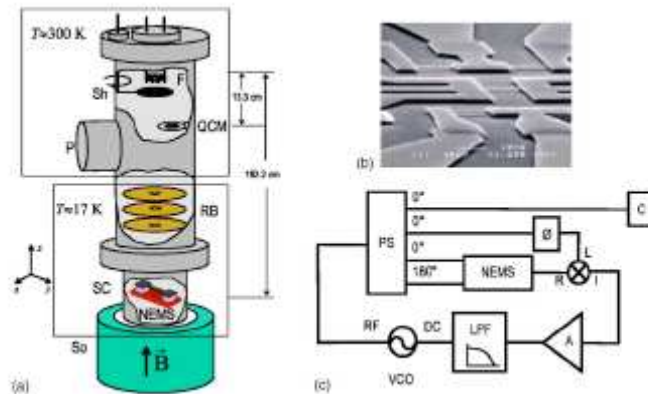
فرکانس ثابت که در آن دریاچه ها بسته است تعیین می شود.

برای این آزمایش، پهنای باند اندازه گیری $\Delta f \sim 3 \text{ kHz}$ ($\tau \sim 2 \text{ ms}$)، فرکانسی معادل

$\delta \omega_{\min} / 2\mu \approx 6.51 \text{ Hz}$ که با توده قابل شناسایی مینیوم منطبق می باشد را تولید

می کند.

$$\delta m_{\min} = |\Re_m^{-1}| \delta \omega_{\min} \approx 2.53 \times 10^{-18} \text{ g} \approx 1.5 \times 10^6 \text{ Da}^{123}$$



تصویر ۱۱ (a) درجه حرارت متغیر، کیروسنات میکروویو UHV برای اندازه گیری حساسیت NEMS. کانال نمونه در سوراخ So در هلیوم مایع قرار می گیرد. سپر یا موج گیر تابشی یک خط دید را در طول محور X از منبع تبخیر فرمان حرارتی (F) تا انتهای کدیوارستات بوجود می آورد.

تشدید گرهای NEMS به طور دقیق در این خط دید قرار گرفته اند، بعضی از شعاع های NEMS که در حدود $182/2$ سانتی متر هستند از این منبع تبخیر حرارتی جدا می شوند. مانیتور کریستال کوآرتز (QCM) در فاصله $r_{QCM}=13.3$ سانتی متر و دریچه حرارتی اتاق برای تعیین و تعدیل اتم Au مورد استفاده قرار می گیرد. با دانستن منطقه سطحی NEMS، و جریان ϕ مربوط به تبخیر کننده چنانکه توسط QCM اندازه گرفته می شود، می توان توده دقیق اتم های Au جذب شده بر NEMS

را به صورت زیر تعیین کرد: $\delta m(t) \approx \int_0^t A \phi (r_{QCM} / r_{NEMS})^2 dt$ در این سیستم، عامل هندسی برابر

است با: $(r_{QCM} / r_{NEMS})^2 = 5 \times 10^{-3} b$ اسکن کردن میکروگراف های الکترون المنت های حسی

پرتوها نانومکانیک می باشد. (C) دیاگرام مفهومی بازخوانی NEMS های گرهی می باشد. د راینجا

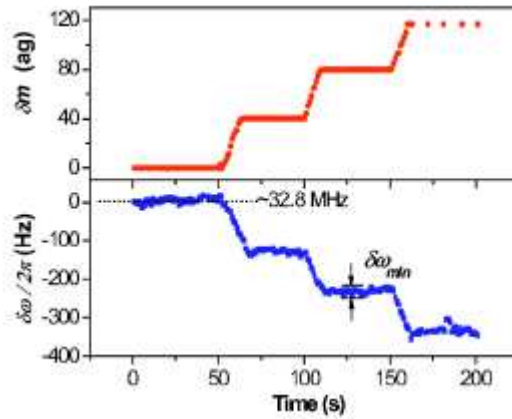
قسمت های اصولی عبارت اند از: نوسانگر فرکانس تابشی کنترل شده ولتاژ: شکننده های قدرت

چهارپورتی، دستگاه حس گرایی توده NEMS با بازخوانی فرکانس تابشی؛ تحریک کننده (m)؛

تعطیردهنده فاز (Q)؛ آمپلی فایر متغیر: فیلتر پایین گذر (LPF)؛ شمارش گر فرکانس (c).

شکل شماره ۱۲، اندازه گیری گسترده واکنش توده را که از آزمایش هایی با سایر ابزارات NEMS با ابعاد مختلف و فرکانس های تشدید گرفته شده است را نشان می دهد. چنانکه سائز سنسور NEMS کاهش پیدا می کند واکنش توده به طور چشمگیری افزوده می گردد. چنانکه جدول شماره ۳ نشان می دهد. این آزمایشات همراه با محاسبات اخیر به وضوح پتانسیلی را که وسیله های NEMS را ارائه می دهند را نشان می دهد. میزان حساسیت توده قابل دسترسی توسط NEMS در آینده نزدیک، رژیم را از چند دهم به چند دهم دالتون بسط می دهد. این رنج توده برای یک ملکول کوچک نشان دهنده پتانسیل متراکم برای NEMS بر اساس اسپکتومتری می باشد. علاوه بر این NEMS می تواند شیوه های قدرتمندی را برای آشکارسازی درمان زیستی، پخش دارو و تشخیص های پزشکی را با حساسیت سطح ملکولی تنها ایجاد کند.

با دسترسی به تجزیه توده تکنولوژی - دالتونی، NEMS بر اساس اسپکترومتر امکاناتی را برای اسپکترومی ماکرو ملکول های جداگانه ارائه می دهد. در چنین ترکیبی، پرتوهای کم فاز گازی طبیعی آنالیت به تشدیدگر NEMS متصل می شود. جهش های مصمم مختص فرکانس تشدیدکننده وسیله NEMS، مستقیماً نشان دهنده انبوهی از این ملکول های جذب کننده می باشد این شیوه ظرفیت منحصر به فرد اسپکترومتری، گونه های طبیعی خاص را نشان می دهد.



تصویر ۱۲- تغییرات فرکانس $\delta\omega/2\pi$ استنباط شده توسط جذب اتم طلائی آتوگرام به شدت گر پرتوی گرفته شده به طور مضاعف کریبوسیلکون $670 \text{ nm} \times 259 \text{ nm} \times 14.2 \text{ }\mu\text{m}$ را نشان می دهد.

فرکانس اساسی برابر با $\omega_0/2\pi \approx 32.8 \text{ MHz}$ می باشد. اتم های طلائی $\delta\omega$ در طرح بالایی توسط شناساگرهای کریستال کوارتز جداگانه اندازه گیری می شوند. نوسانات فرکانس rms مربوط به

سیستم با حساسیت توده $\delta m_{\min} \approx 2.5$ مطابقت دارد. برای این سیستم توسط صدای موجود در موج آمپلی فایر تبدیلی محدود می شود یعنی $\delta m_{\min} (2M_{\text{eff}}/Q)10^{-(DR/20)}$ از طریق ست کردن

نزدیک به چیزی است که ما از طریق تجربی کسب کرده ایم. $\delta\omega_{\min} \approx (\omega_0/Q)10^{-(DR/20)}$ بوجود می آید. این ها همه منجر به نتایج تقریبی می شود که کاملاً

باید توجه داشته باشیم که محدودیت های مهم و ذاتی تکنیک های اسپکترومتری جاری

اینست که خود توده به طور مستقل در دسترس نباشد اما به جای آن این نسبت توده به بار

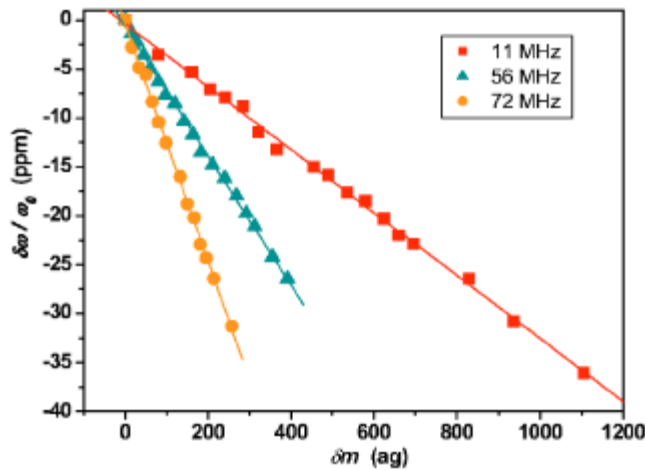
است که بدست می آید. حتی قبل از اینکه میزان تفکیک پذیری تک دالتونی بدست

می آید، NEMS قادر است پیشرفت قابل ملاحظه ای از اسپکترومتری توده ای قدیمی را

بدست آورد، این در صورتی است که به عنوان شناساگر در اسپکترومتری موجود اخیر

مورد استفاده قرار گیرد.

در چنین انجامشی ملکول های آنالیت یونیزاسیون شده و توسط تکنیک های سنتی جداسازی می شود. یون ها بعد از آن در طول المنت سنسور NEMS هدایت می شوند و قادرند جریان جذب تک یونی را ثبت و ضبط کنند. تفکیک پذیری توده های بزرگ که بسیار کوچکتر از δm_{\min} هستند از طریق سیستم اجازه داده می شود از طریق میانگین سازی سیگنال در دسترس خواهند بود.



شکل ۱۳- اطلاعات از سه وسیله دیگر SIC با $\omega_0/2\pi \approx 11$ و ۵۶ و ۷۲ مگا هرتز که با تناسب های خطی نشان داده شده و خواص وسیله محاسبه شده سنجیده شده در جدول موجودند.

با $\delta m_{\min} \approx 1 \text{MDa}$ نشان داده شده، برای مثال، بعد از ذخیره سازی $10^6 \sim N$ گونه 1MDa ، امکان دسترسی به تفکیک پذیری تک دالتون را دارد. در آشکارسازی NEMS حداقل تفکیک پذیری زود گذر بین رویداد دریافت مولکولی، توسط میانگین سازی زمان مورد نیاز برای بوجود آوردن فرکانس لحظه ای با صحت اندازه گیری دلخواه

تعیین می شوند. میانگین زمان متوسط $2ms$ حساسیت $1Da$ را برای گونه های MDa

۱- a در $30m$ ~ بوجود می آورد. نهایتاً، دامنه دینامیک توده متراکم وسیله NEMS

یک ویژگی مطلوب در اسپکترومتری توده ای می باشد.

۵- بررسی NEMS:

در این بخش، ما چندین NEMS معرف را توصیف می کنیم. توضیحات چگونگی کار

آنها مختصر و مفید بوده و روی دیاگرام کلی یا تصاویر میکروسکوپ الکترون هر وسیله

متمرکز می شوند.

شکل ۱۴ یک نمودار کلی از یک الکترو تونلی که از نظر مکانیکی منطبق است و از

[۲۵] گرفته شده را نشان می دهد. الکترو تونلی از یک طره با نوک فلزی تشکیل

می شود که نزدیک به سطح یک الکترو تونلی مصنوعی فلزی بزرگ قرار می گیرد. همان

گونه که در بررسی های تئوریک NEMS رایج است، طره به سادگی به عنوان یک

نوسانگر هارمونیک با مقادیر ثابت فنر و توده مؤثر مدل سازی می شود. الکترون های

تونل کننده در فاصله بین نوک فلزی و سطح باعث می شوند که طره به جای خود

برگردد، در عوض حرکت طره روی احتمال تونل سازی الکترون و در نتیجه روی جریان

تونل سازی دقیق تأثیر می گذارد. بنابراین، ما یک سیستم الکترومکانیکی مزدوج داریم

که باید خواص مغناطیسی جالبی داشته باشد که بستگی به ولتاژ اعمالی در فاصله، اندازه

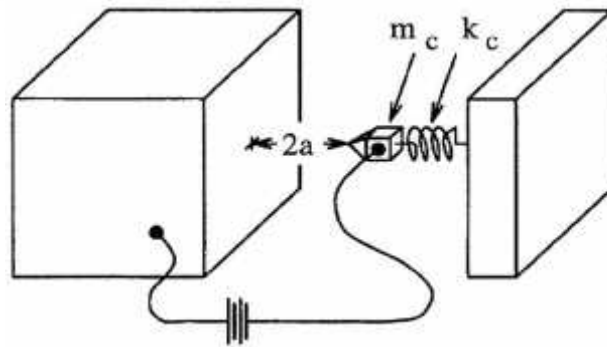
فاصله، توده طره، ثابت فنر و ... دارد. بررسی های تئوری زیادی در مورد الکتروود تونلی

مکانیکی و طرح های مربوطه وجود داشته اند [۲۵-۳۲ و ۲۲]. بررسی میکروسکوپ تونلی

[۳۳] یک آزمایش درست است چون یک الکتروود تونلی نمی تواند خیلی محکم (سخت)

شود. به هر حال، یک وسیله دارای الکتروود تونلی با توده کم، طوری باید نشان داده شود

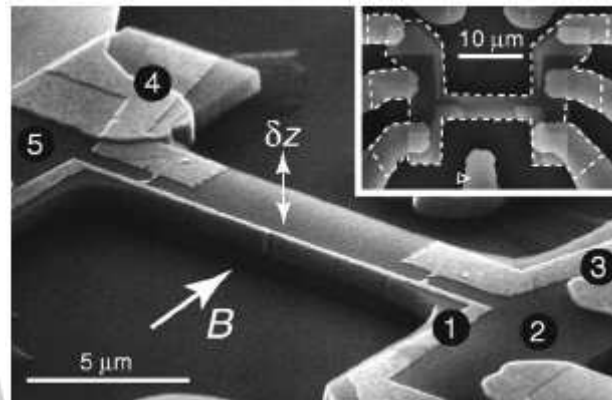
که خود الکترون ها باعث برگشتن زیاد الکترون به حالت قبلی شوند.



شکل ۱۴- طرح یک الکترون تونلی تابع مکانیک (۲۵). الکتروود طره بعنوان یک نوسانگر هارمونیک

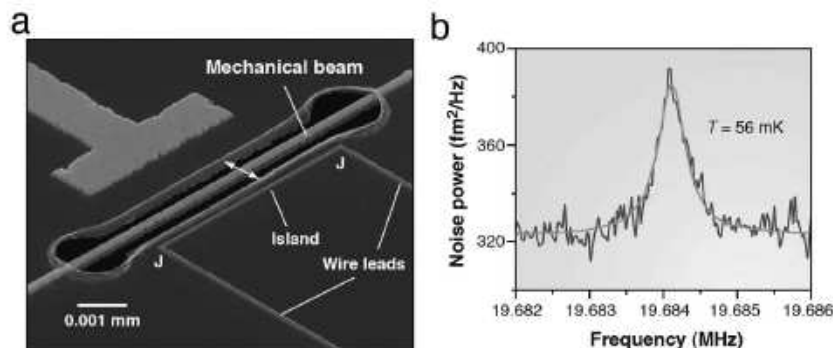
با ثابت فنر KC و توده (جرم) mc مدل سازی می شود. یک ولتاژ در فاصله 2a بکار رفته و جریان

ناشی از آن اندازه گیری می شود.



شکل ۱۵- میکروگراف SEM جابجایی QPC که نشان دهنده پرتو معلق با الکترودهای سطح می باشد. (۳۴). الکترودهای ورودی « ۱ » و « ۳ » عنوان گذاری می شوند. تماس های نقطه ای تشکیل دهنده انقباض بار یک درست بالای « ۱ » جای می گیرند. الکترودهای منبع و جریان، « ۵ » و « ۲ » نام می گیرند. میدان مغناطیسی نشان داده شده، بکار می رود تا پرتو را فعال کند، نیروی Lorentz جریان الکترون باعث جابجایی های انعطاف پذیر در مسیر نشان داده شده Z می شود.

شکل ۱۵ یک میکروگراف میکروسکوپ الکترون پوششی (SEM) از یک آشکارساز جابجایی رابط نقطه ای کوانتوم (QPC) را نشان می دهد که توسط گروه Andrew Cleland در UC santa Barbara توسعه یافت [۳۴]. موج یاب از یک پرتو معلق حک شده از یک ساختار ناهمگون آرسنید گالیوم تک کریستالی تشکیل می شود. که دارای یک فرکانس تشدید پایه ای برای حرکات انعطافی غیر مسطح تا حدود ۱/۵ MHz می باشد. درون پرتو یک لایه نازکی از الکترون های آزاد وجود دارد که گاز الکترون دو بعدی نامیده می شود. برای یک بررسی مقدماتی 2DEC و سیستم های نیمه رسانای دیگر کم بعدی هنگامی که یک ولتاژ درین - سورس در انتهای پرتو به کار می رود

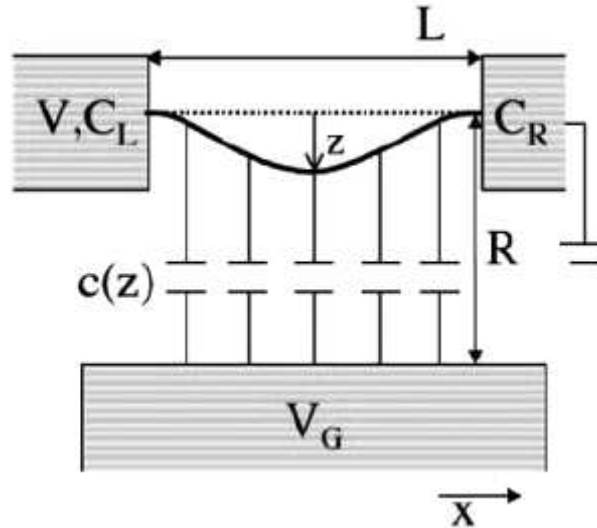


شکل ۱۶- a) میکروگراف SEM که نشان دهنده پرتو مکانیکی و سیم منبع = درین SET و جزیره (۱۷) می باشد. الکترون ها هر کدام در یک زمان روی اتصال های الکتریکی - حفاظتی واقع در گوشه ها (J) تونل می سازد. پرتو و پایه های اطراف از یک غشای سیلیکون (Sin)، و یک جسم رایج برای NEMS به خاطر نسبت تراکم قدرتش ساخته می شوند. پرتو با یک لایه طلا پوشانده می شود. و الکتروود گیت را تشکیل می دهد. در حالی که جزیره SET و سرب ها از آلومینوم ساخته می شوند. تشدید گر مکانیکی $0/6\mu m$ دور از جزیره گذاشته می شود. الکتروود ثابت بزرگ در چپ برای فعال سازی جا به جایی بکار می رود. (b) طیف قدرت صدای شناسایی شده SET تبدیل به مجذور جا بجایی شد. نقطه اوج Lorentzian به خاطر حرکت گرمایی Brownian پرتو مکانیکی به طور شفاف بالای زمینه صدای آمپلی فایر مشاهده می شود. فرکانس پایه ای اندازه گیری شده (دقیق) برای حرکت مسطح حدوداً 19/7 MHz است.

یک جریان تشکیل می دهد. همچنین اعمال یک ولتاژ منفی به الکتروودهای گیت فلزی روی سطح پرتو، الکترون ها مستقیماً از زیر الکتروودها طوری خارج می کند که فقط می توانند در انقباض الکترواستاتیکی باریک بین کنتاکتهای نقطه ای جریان یابند. این محدوده می تواند طوری باریک شود که با طول موج جزئی الکترون ها و به دنبال نام «نقطه تماس کوانتوم» قابل قیاس شود. چون، GaAs یک جسم پیزوالکتریکی است، فشار مکانیکی در پرتو انعطافی، یک میدان الکتریکی قطبی در پرتو به وجود می آورد. تأثیر این میدان قطبی به وجود آمده با اعمال یک ولتاژ گیت و در نتیجه تغییر جریان در QPC یکسان است. در عوض، تغییر میدان الکتریکی به خاطر جریان، یک فشار مکانیکی به

وجود می آورد. بنابراین، موج یاب جابجایی QPC نمونه دیگری از یک سیستم

الکترومکانیکی مزدوج می باشد.



شکل (۱۷) - طرح یک SET با سطح داخلی تابع مکانیکی که از یک نانو تیوب کرین معلق تشکیل شده است. در نتیجه اتصال الکترواستاتیکی بین ولتاژ کیت و جزیره مکان جزیره همانطور که الکترون ها در بیرون و داخل آن تول سازی می کنند، تغییر می کند.

شکل های ۱۳ و ۱۶ و ۱۷، مفهوم های گوناگون از آشکارساز جابه جایی ترانزیستور تک الکترونی را نشان می دهند. وسیله در شکل ۱، توسط گروه Cleland گسترش یافت، در حالی که به وسیله شکل ۱۶ توسط گروه Keith schwab در آزمایشگاه علوم فیزیک U Maryland توسعه یافت [۱۷ و ۱۸]. شکل ۱۷، طرحی را نشان می دهد که توسط گروه Herre vander Zanot در Delft توسعه یافته است. وسیله دوم با دو وسیله قبلی که در آن بخش داخلی SET از نظر مکانیکی به جای الکتروود گیت، قرار می گیرد

متفاوت می باشد. یک ابزار ترانزیستور مرتبط که یک نانوتیوب کربن معلق را ترکیب می کند اخیراً توسط گروه Paul MCEuen در Cornell نشان داده شده است [۲۰].

اصل اساسی اجرایی آشکارساز جابه جایی SET در شکل (a) ۱ نشان داده می شود. الکترونها آلومینیوم درین سورس از نظر الکتریکی از الکتروود داخلی، توسط یک لایه اکسید عایق می شوند. به هر حال، چون لایه اکسید خیلی نازک است، الکترون ها می توانند در موانع اکسید، از درین - به - سطح داخلی - سورس تونل سازی کرده و یک جریان به وجود آورند که پس از مراحل تقویت بعدی اندازه گیری می شود. برای اینکه یک الکترون بتواند از تونل سازی شود مانند الکتروود داخلی درین، کل کار انجام شده توسط ولتاژهای درین - سورس و گیت، باید قبل از تغییرات جانبی در انرژی، ذخیره شده و میدان الکتریکی ناشی از توزیع مجدد شارژ روی الکتروودهای گوناگون بیشتر باشد، تفاوت بین کار انجام شده و انرژی بار، انرژی کل به دست آمده از الکترون را نشان می دهد که باید مثبت باشد به خاطر اندازه کوچک الکتروودها، کنش های متقابل آنها کم بوده و در نتیجه انرژی بار بزرگ است.

بنابراین یک ولتاژ درین - سورس بزرگ باید به شکل صحیح بکار برود تا هزینه انرژی بار طوری تأمین شود که الکترون ها بتوانند در وسیله تشکیل کانال دهند. به هر حال اگر به اندازه ای بزرگ نباشد که انرژی بار لازم برای گذاشتن بیش از یک الکترون روی سطح

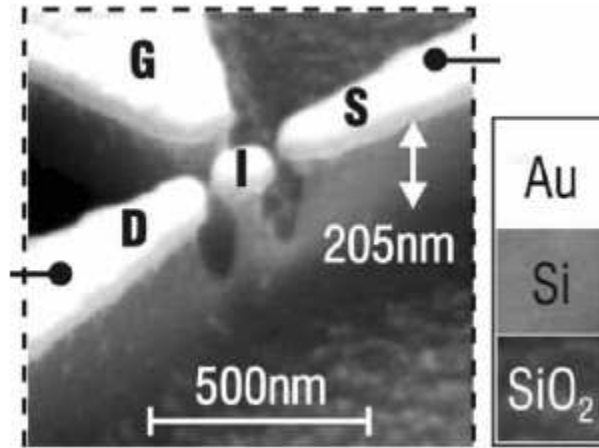
داخلی را تأمین کند، فقط یک الکترون روی سطح داخلی و خارج از آن در آن زمان قرار می گیرد.

انرژی بار می تواند توسط ولتاژ گیت طوری جبران شود که تغییر ولتاژ گیت جریان تونل سازی را تغییر دهد. به جای آن، با اعمال یک ولتاژ ثابت در الکتروود گیت پرتو تابع مکانیکی، حرکت الکتروود هم جریان را تغییر می دهد. شکل (b) ۱۶ نمونه ای از سیگنال پرتو مکانیکی شناسایی شده توسط SET از گروه Schwab را نشان می دهد، این پرتو حرکت گرمایی Brownian را تحمل می کند. پس از کاهش زمینه نویز سفید، ناحیه زیر نوک، یک جابجایی- ریشه- میانگین- مجذور در حدود $2 \times 10^{-13} m$ است با set

حساسیت شناسایی موقعیت، حدود $10^{-13} m$ توسط نویز سفید به وجود می آید. در صورتی که این اعداد را سر جای خود قرار دهیم، این SET قادر است جابجایی هایی به کوچکی یک هزارم قطر اتم هیدروژن را شناسایی کند. علاوه بر این، چنین حساسیت هایی در مرتبه اندازه از ناپایداری جابجایی پرتو مکانیکی نقطه صفر کوانتوم قرار دارند.

با استفاده از سه بخش بندی کلاسیک، انرژی مکانیکی برای یک نوسانگر هارمونیک،
 $\langle E \rangle = m^2 w \langle x^2 \rangle = KBT$ امکان دارد که مستقیماً حرارت پرتو مکانیکی را از جابجایی میانگین- مجذور اندازه گیری شده و فرکانس تشدید و توده حرکتی مؤثر به دست آوریم. داده ها در شکل ۱۶b₁ با یک حرارت حدوداً ۶۰ mk مطابقت دارند. این مقادیر یک رکورد برای پایین ترین درجه حرارت اندازه گیری شده مستقیم از یک

تشدیدگر نانومکانیکی می باشد. حرارت پایه ای واقعی سردخانه حدوداً 35 mk است که حاکی از این است که پرتوی یک گرمای مقطعی دارد. احتمالاً انرژی آزاد شده توسط الکترون ها در SET با سرعت توزیع نمی شوند. سطح داخلی به خاطر الکترون های درون ویرون سطح داخلی، یک نیروی واکنش برگشتی روی تشدیدگر الکترواستاتیکی مزدوج وارد می کند. بزرگی این نویز نیرو با ولتاژ گیت افزایش می یابد. حساسیت تعیین جابجایی نیز افزایش می یابد، طوری که یک نقطه تحریک ولتاژ گیت مطلوب وجود دارد که نه خیلی کوچک است و نه خیلی بزرگ. از سوی دیگر، اگر به تعیین جابجایی تمایل نداشته باشیم بلکه گرایش به بررسی دینامیک مزدوج NEMS داشته باشیم، ولتاژ گیت باید بیش از این نقطه تحریک بهینه افزایش یابد به طوری که یک واکنش معکوس بزرگ روی تشدیدگر وجود داشته باشد. بنابراین حرکت تشدیدگر جریان تونلی را تغییر می دهد و در عوض تغییر جریان، تشدیدگر مکانیکی را هدایت می کند. در گروه Schwab آزمایشاتی برای بررسی دینامیک مزدوج در این رژیم واکنشی در دست انجام هستند.



شکل (۱۸) - میکروگراف SEM نانو پیلار سیلیکون با سطح داخلی طلائی (I) سورس (S) و الکترودهای درین (D) الکتروده گیت (G) در آزمایش بکار نمی رفت. جریان از الکتروده درین پس از تقویت آن شناسایی می شود. نانو پیلار یک فرکانس پایه ای انعطافی 367MHz دارد.

شکل ۱۸ یک shuttle رفت و آمد بار نانومکانیکی را نشان می دهد که توسط Dominik scheible در دانشگاه Ludwig و Robert Blick در دانشگاه Wisconsin گسترش یافته است. عامل shuttle مکانیکی یک نانوپیلار است که از سیلیکون با یک هدایت داخلی ساخته شده است و قسمت بالایی آن طلاست. یک ولتاژ ac در الکتروده سورس در یک فرکانس نزدیک به فرکانس انعطافی فلکسورال پایه ای به کار برده می شود. وقتی یک بار اضافی روی سطح داخلی وجود دارد، ولتاژ ac نیرویی بر ستون وارد می کند که اگر بزرگ باشد، shuttle نزدیک به الکترودهای سورس و درین طوری منحرف می شود که الکترون ها می توانند بین الکترودها و سطح داخلی کانال تشکیل شوند. پس، ستون بار را بین الکترودها حرکت می دهد و یک جریان تولید

می کند که الکتروود جریان شناسایی می شود. تعداد الکترون هایی که تونل می سازد و جهت تونل بستگی به بزرگی و (پلاریته) علامت ولتاژ در نزدیکترین مسیر یک الکتروود مشخص دارد، مثلاً روی تاخیر فاز بین حرکت مکانیکی نوسانی و ولتاژ محرک. تاخیر فاز به نوبه خود بستگی به نسبت فرکانس محرک به فرکانس پایه ای shuttle دارد. بنابراین بزرگی و جهت جریان shuttle با تغییر فرکانس محرک کنترل می شود. shuttle بار با SET همراه با سطح داخلی موافق مکانیکی شکل ۱۷ شباهت دارد. به هر حال، همانطور که از اسم آن مشخص است، بر خلاف ابزار NEM توصیف شده در بالا، حرکت مکانیکی shuttle برای جریان الکترون ضروری است، درجه آزادی الکترونیکی و مکانیکی در دینامیک آنها به هم مربوط است. Shekhter و دیگرهای یک بررسی کلی از سیستم های شارژ shuttle باردار را ارائه می دهند.

در این بخش، ما چندین نمونه از ابزار NEM را معرفی کرده ایم. بخش های بعدی، ابعاد دینامیک مزدوج آنها را بررسی می کنند و هدف اصلی این است که نقاط مشترک رفتار دینامیکی آنها را شناسایی کنیم. در این مورد، مفید است که یک ابزار NEM را طبق طرح کلی شکل ۱۹ بررسی کنیم.

تشدیدگر مکانیکی که در پایین ترین حالت نوسانی خود به عنوان یک نوسان گر هارمونیک مدل سازی می شود، یک سیستم باز است که به دو منبع انرژی مزدوج می شود. وسیله الکترونیکی که در آن یک جریان الکترون وجود دارد، یکی از منابع را

تشکیل می دهد که در آن جریان با انرژی توسط نوسانگر از طریق تعامل الکترومغناطیسی مبادله می شود. همه درجه های آزادی جدا از درجه های وسیله الکترونیک و نوسانگر، دومین سورس "خارجی" را تشکیل می دهند. برای نمونه، این درجات آزادی از حالات مکانیکی بزرگتر، نقایص متغیر در تشدیدگر مکانیکی و مولکول های هوا و فوتون های مؤثر روی سطح تشدیدگر تشکیل می شود.

این درجات خارجی آزادی به عنوان یک حمام متعادل حرارتی بزرگ نامحدود در حرارت T_{ext} مدل سازی می شوند. اگر نوسانگر از درون تحریک شود بنابراین در حضور وسیله الکترونیک، نوسانگر انرژی را با یک سرعت ω/Q_{ext} به حمام می دهد، که در این جا ω فرکانس نوسانگر و Q_{ext} ضریب کیفیت است. تشدیدگرهای نانومکانیک معمولاً ضریب های کیفیت بین $10^3 - 10^5$ دارند، طوری که یک تشدیدگر حداقل چندین هزار سیکل (چرخه) نوسان می کند قبل از اینکه دامنه اش از دامنه تحریکی درونی کمتر دیده باشد.

ما باید توجهی خاص به دینامیک سیستم نوسانگر به عنوان نتیجه کنش آن با این دو منبع داشته باشیم. در این مورد، ما باید یک بررسی مجزای مستقیم و ایده آل از دینامیک نوسانگر انجام دهیم که در آن اندازه گیری کامل موقعیت و سرعت آن بدون تأثیر

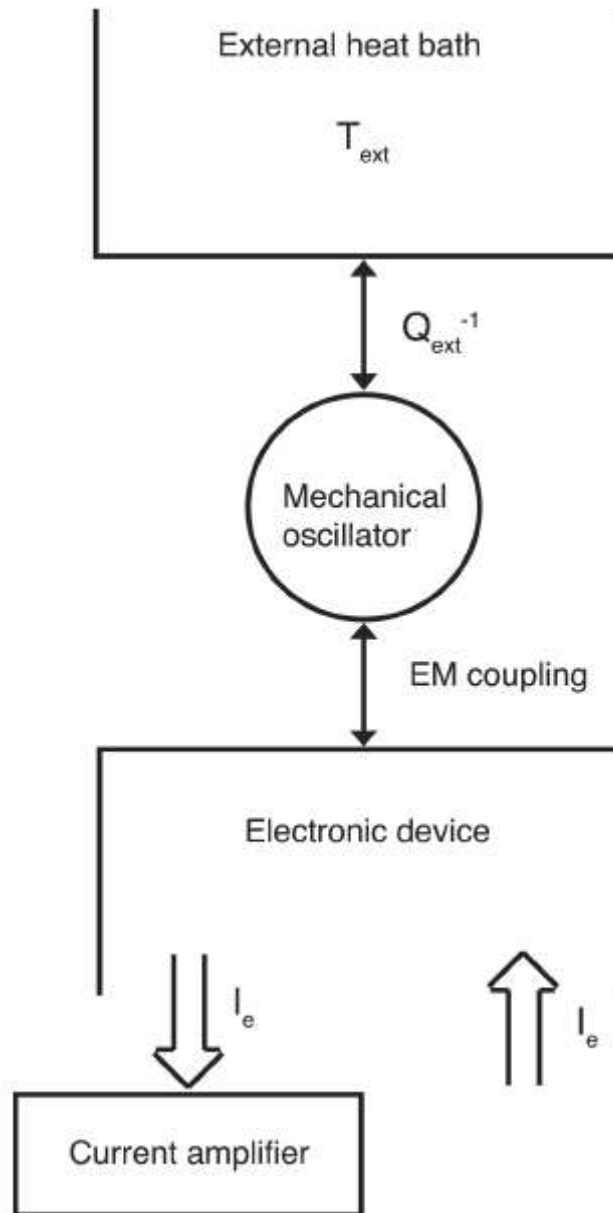


Figure 7. Scheme of a generic NEMS.

شکل ۱۹ طرح NEMS کلی

دینامیک آن بر روی هم با هم متناسب باشند. در آزمایشات واقعی NEMS، اطلاعات در مورد دینامیک تشدیدگر مکانیکی از طریق اندازه گیری جریان الکترون به دست می آید:

اینکه چگونه دینامیک تشدیدگر مکانیکی خودش را در خروجی سیگنال جریان نشان می دهد برای نمونه [۳۸-۴۲ و ۳۰] را ببینید.

۶- سیستم تشدیدگر SET- نانومکانیکی:

در این بخش ما دینامیک کلاسیک مزدوج سیستم های تشدیدگر SET- نانومکانیکی را توصیف می کنیم. دینامیک مزدوج دیگر NEMS، در بخش ۴ بررسی خواهد شد با ارجاع به طرح کلی شکل ۷، ما باید در اولین نمونه، اتصال به حمام حرارتی خارجی را حذف کنیم، (یعنی $Q_{ext} \rightarrow \infty$) ما به تشریح دینامیک "خالص" نوسانگر در حال کنش با SET علاقمند هستیم. برای نمونه، آیا این سیستم از این نظر که جریان الکترون تونلی، انرژی را از نوسانگر تحریک شده درونی به وجود آورنده رطوبت تضعیف می کند و یا باعث می شود الکترون ها روی نوسان گر جمع شده و دامنه آن را بزرگتر کنند؟

۶-۱ معادله اصلی:

ما شکلی از معادله اصلی قابل کنترل حرکت را جستجو می کنیم که سیستم تشدیدگر SET- مکانیکی را توصیف می کند. نقطه شروع منطقی معادله وابسته به زمان Schrodinger با Hamiltonian می باشد که شامل درجات آزادی میکروسکوپی مربوط، مخصوصاً الکترون های رسانا در الکترودهای گوناگون SET و حالت نوسانگر بنیادی می باشد. سپس باید مراحل گوناگون تقریب (تخمین) را پشت سر بگذاریم تا به

معادله های آماری کلاسیک با کنترل وانتقال ساده و شرایطی برای اثبات این معادله ها دست یابیم. به هر حال، حداقل برای NEMS، این فرآیند نیاز به توسعه داشته و باید این هدف ادامه پیدا کند تا به یک فهم عمیق تری از چگونگی پیدایش دینامیک کلاسیک از دینامیک کوانتوم از طریق تقریب در این سیستم ها برسیم.

در غیاب چنین فرآیند معینی، ما باید درک فیزیکی (جسمی) را به کار ببریم تا ما را مستقیماً به طرف نوشتن معادله های آماری کلاسیک حرکت راهنمایی کند. یک نسبت طولانی با کاربرد چنین شیوه ای به Boltzmann و معادله مشهور او بر می گردد. یک مزیت این است که چنین معادله هایی اغلب به طور دقیق، دینامیک آماری را توسط آزمایش اثبات می کنند. مزیت خاص دیگر در این مورد این است که بررسی دینامیک در رژیم تزویج قوی الکترومکانیکی آسان تر از تئوری کوانتوم کامل می باشد. عیب کلی این است که شرایط دقیق برای اثبات معادله های کلاسیک حرکت در دسترس نیستند که نتیجه این است که ضوابط مهم، گاهی اوقات نادیده گرفته می شوند.

اعتقاد بر این است که این برای معادله های کلاسیک نوسانگر SET که باید به طور خلاصه بنویسیم، مشکل محسوب نمی شود.

کدام مجموعه کوچکی از مختصات باید تشدیدگر مکانیکی را در مقابل با SET توصیف کنند؟ حالت تشدیدگر به عنوان یک حالت نوسانگر مجزا توسط آرایه مکان X و سرعت V توصیف می شوند. با توجه به نوسانگر، مختصات SET مربوطه، تعداد کل N

الکترون اضافی روی سطح داخلی می باشد، براسان N ، نیروی الکترواستاتیکی، نوسانگر را با اندازه های متفاوت به سمت سطح داخلی می کشاند (اگر می خواستیم جریان سورس-درین SET را نیز توصیف کنیم، یک مختصات معکوس اضافی نیز نیاز داشتیم که تعداد الکترون های ورودی یا خروجی SET را حفظ کند).

چون تونل سازی یک فرآیند تصادفی است، مختصات N ، X و V متغیر هستند. بنابراین معادله های حرکت هم می توانند شکل معادله های تفاضلی اتفاقی توابع تصادفی وابسته به زمان $N(t)$ ، $x(t)$ ، $v(t)$ را داشته باشند و یا اینکه می توانیم یک معادله حتمی درگیر تابع چگالی احتمال $P_N(x, v, t)$ را بنویسیم. در فرمول دوم، $P_N(x, v, t) dx dv$ به عنوان احتمال برداشتن یک سیستم دارای تعداد N سطح و مختصات سرعت و مکان در فواصل مخصوص $[x, x+dx]$ و $[v, v+dv]$ از تعداد زیادی سیستم های نوسانگر-SET مشابه در زمان t می باشد. ما باید دینامیک را در شرایطی از توابع چگالی احتمال بیان کنیم نه در شرایط مختصات تصادفی. با مراجعه به دیاگرام مدار، سیستم تشدیدگر SET-اتصال (به

شکل ۸) ما داریم [۲۳]:

$$\frac{\partial P_N}{\partial t} = \{H_N, P_N\} - (\Gamma_L^- + \Gamma_R^+) P_N + (\Gamma_L^+ + \Gamma_R^-) P_{N+1} \quad (7)$$

$$\frac{\partial P_{N+1}}{\partial t} = \{H_{N+1}, P_{N+1}\} - (\Gamma_L^+ + \Gamma_R^-) P_{N+1} + (\Gamma_L^- + \Gamma_R^+) P_N \quad (8)$$

که در این جا، $H_{N(N+1)}$ ، نوسانگر Hamiltonian برای تشدیدگر در پتانسیل

الکترواستاتیکی. SET با $N(N+1)$ الکترون روی سطح داخلی است، آکولاد

Poisson است:

$$\{H_N, P_N\} = \frac{\partial H_N}{\partial x} \frac{1}{m} \frac{\partial P_N}{\partial v} - \frac{1}{m} \frac{\partial H_N}{\partial v} \frac{\partial P_N}{\partial x}$$

و $\Gamma_{L(R)}^+$ میزان تونل سازی الکترون به چپ (+) یا راست (-) در عرض اتصالات تونل

راست (R) یا چپ (L) می باشد. در این جا، فرض می کنیم ولتاژها طوری انتخاب شده

اند که تعداد الکترون های اضافی روی جزیره بین N و N+1 فقط تغییر می کنند.

معادله های (۱) و (۲) که تکامل توزیع احتمال $P_N(N+1)(x, v, t)$ را توصیف می

کنند، $P_{N(N+1)}(x, v, t)$ "معادله های اصلی" نامیده می شوند. آنها معادله های تفاضلی

جزیی مرتبه اول در متغیرهای x, v, t هستند. وقتی یک توزیع احتمال آغازین تعیین شده

باشد، این معادله ها توزیع احتمال در حال بسط بعدی را تعیین می کنند. برای نمونه،

توزیع، در یک زمان آغازین t_0 ممکن است شکل $P_N(x, v, t_0) = \delta(x)\delta(v)$ و

$P_{N+1}(x, v, t_0) = 0$ را بگیرد، یعنی اینکه در زمان t_0 تمام سیستم های نوسانگر - SET در

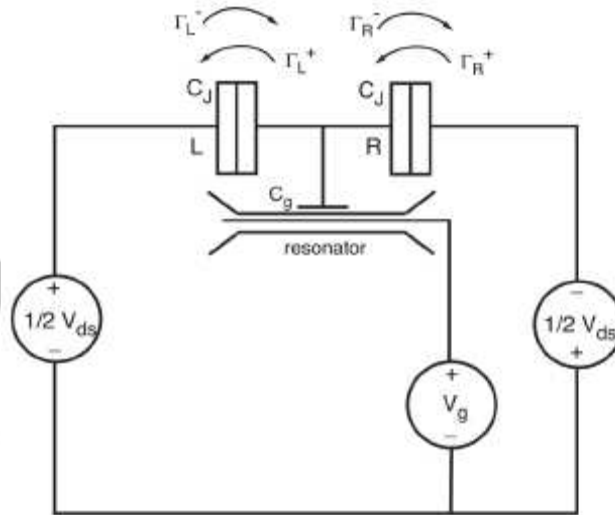
مجموع، در یک حالت هستند که مکان و سرعت نوسانگر به ترتیب $x = 0$ و $v = 0$

می باشد و تعداد سطح داخلی SET، N می باشد. اگر شرایط میزان تونل سازی در

معادله (۷) و (۸) حضور نداشت، توزیع در حال گسترش، احتمال یک تابع دلنا باقی

می ماند که حرکت نوسانگر هارمونیک را توصیف می کرد و تعداد جزیره ها در N ثابت

باقی می ماند.



شکل (۲۰) - دیاگرام مدار سیستم تشدیدگر SET مکانیکی. ظرفیت اتصالات تونل راست (R) و

چپ (L) مشابه فرض شده و با C_R نشان داده می شود. ظرفیت ورودی شکل گرفته توسط تشدیدگر

مجاور الکتروود های جزیره با C_g نشان داده می شود. همانطور که تشدیدگر حرکت می کند، فاصله

بین دو الکتروود و در نتیجه C_g تغییر می کنند. وقتی الکتروود تشدیدگر در ولتاژ گیت V_g ثابت نگه

داشته می شود. تغییر C_g باعث بوجود آمدن پتانسیل متغیر سطح داخلی و در نتیجه تغییر جریان تونل

سازی می شود. برای قطعیت ولتاژ سورس - درین نشان داده شده (V_{ds}) جهت کلی جریان الکترون

از راست به چپ است که توسط نسبت های تونل Γ_L^+ و Γ_R^+ کنترل می شود.

با انطباق ریشه مختصات X با مکان تعادل نوسانگر در زمانی که الکترون روی سطح

داخلی است، نوسانگر Hamiltonian شکل زیر را به خود می گیرد:

$$H_N = \frac{P^2}{2m} + \frac{1}{2} m \omega^2 x^2 \quad (9)$$

$$H_{NH} = \frac{P^2}{2m} + \frac{1}{2}mw^2(x-x_0)^2 \quad (10)$$

که در اینجا، x_0 فاصله بین مکان های تعادل نوسانگر با N و $N+1$ الکترون روی سطح داخلی می باشد. به هر حال اگر جملات نسبت به تونل سازی موجود باشند، توزیع احتمال در حال بسط، شروع به انتشار می کند. تغییر تعداد الکترون سطح داخلی به خاطر تونل سازی الکترون ها در داخل و خارج سطح باعث می شود که تکامل تدریجی نوسانگر در زمان های تصادفی با یک تغییر ناگهانی $\pm x_0$ در ریشه پتانسیل هارمونیک تجربه شده توسط نوسانگر به هم بخورد. موقعیت و علائم در جلوی جملات (اصطلاحات) نسبت تونل سازی در معادله های اصلی (۷) و (۸) به آسانی از شکل ۲۰ فهمیده می شود. برای نمونه در معادله (۷)، دو نسبت اول Γ_R^+, Γ_L^- مطابق با تونل سازی روی سطح داخلی است و بنابراین این احتمال که تعداد جزیره در N ثابت بماند و علامت "منفی" شود را کاهش می دهد. از سوی دیگر، دو نسبت دوم Γ_R^+, Γ_L^- مطابق با تونل سازی در خارج از جزیره می باشد و بنابراین این احتمال که تعداد جزیره N شده و علامت "مثبت" شود را افزایش می دهد. نسبت تونل سازی با استفاده از قانون Fermis Golden به دست می آید [۴۴] و شکل زیر را می گیرد:

$$\Gamma_{L(R)}^\pm = \frac{1}{e^2 R_J} \frac{E_{L(R)}^\pm}{1 - e^{-E_{L(R)}^\pm / KBT_e}} \quad (11)$$

که در این جا؛ R_J مقاومت موثر اتصال تونل، T_c دمای سوریس، درین منبع الکترون سطح و جزیره و $E_{L(R)}^\pm$ انرژی بدست آمده از طریق تونل سازی الکترون به چپ (-) یا

راست (+) در سرتاسر اتصال چپ (L) یا راست (R) می باشد. وقتی دمای الکترون T_e

در مقایسه با انرژی باردار تک الکترونی کم است. $K_B T_e \ll e^2 / 2c\Sigma$ (که ضریب

کیفیت $C_\Sigma = 2C_3 + C_R$ باشد)، تساوی (۵) تقریباً می شود:

$$\Gamma_{L(R)}^\pm = \frac{1}{e^2 R J} E_{L(R)}^\pm \Theta(E_{L(R)}^\pm) \quad (12)$$

که در اینجا، $\Theta(0)$ تابع مرحله Heaviside است. بنابراین یک نسبت تونل معین فقط

وقتی کوچک نیست (قابل چشم پوشی نیست) که E جانبی، مثبت باشد. برای SET های

در مقیاس میکرون، $C_\Sigma \approx 1fF (\equiv 10^{-15} F)$ وقتی که $T_e \ll 1K$ می باشد. در اکثر

آزمایشات، این شرط برآورده می شود و بنابراین از حالا به بعد ما عبارت (۱۲) را برای

نسبت ها به کار می بریم.

برای قطبیت ولتاژ درین - سورس نشان داده شده در شکل ۲۱، نسبت های Γ_R^+, Γ_L^+ که تونل

سازی به چپ را توصیف می کنند، قابل چشم پوشی نیستند، در حالی که نسبت های

Γ_R^-, Γ_L^- برای تونل سازی به راست از نظر نمادی (تصادفی) حذف می شوند. به هر حال،

توجه داشته باشید که در E ها، نسبت تونل هم بستگی به مکان X دارد، برای جابجایی

های دامنه بزرگ و ولتاژهای گیت اعمالی، این ممکن است که یک E معین، علامت را

تغییر دهد و در نتیجه فرآیند تونل متناظر را اجرا و متوقف کرده و مسیر تونل را تغییر می

دهد.

هر دو معادله (۷) و (۸) اصلی بالا، کلاسیک هستند. توزیع احتمال، بی تردید آماری

کلاسیک در دانش مختصات دقیق X و U نوسانگر و تعداد الکترون داخلی را توصیف می کند.

معادله ها به امکان انطباق کوانتوم بین حالات تعداد سطح های مختلف، حالات مختلف

سرعت و وضعیت مختلف نوسانگر یا حالات پیچشی (چرخشی) نوسانگر - سطح

نمی پردازند. مکانیک کوانتوم فقط وارد تعیین مقاومت اتصال مؤثر تونل R_r می شود که

در عبارات نسبت (۱۱) موجود بوده است و باعث می شوند نسبت های انتقال تصادفی

باشند. با مراجعه به بحث آغازین این بخش، معادله کلاسیک اصلی در اصل می تواند از

معادله Schrodinger گرفته شود، این معادله تکامل زمانی ماتریس چگالی را توصیف

می کند که این ماتریس معرف حالت کوانتوم الکترون های رسانا و نوسانگر هارمونیک

در الکترودهای SET می باشد. یک مرحله در مشتق سازی این است که حالات الکترون

های زیادی را طراحی کرده و در توصیف حالت SET، فقط تعداد کل سطح قرار

می دهیم. این مرحله، همانطور که با جملات نسبت تونل سازی نشان داده شده است، به

طرز غیر قابل برگشتی درون معادله ها وارد می شود. دو مرحله کلیدی تقریب (تخمین)

که از آنها یک توصیف کلاسیک به دست می آید به صورت زیر هستند:

(۱) یک سطح SET بزرگ را فرض کنید طوری که اندازه سطح انرژی الکترون قابل

چشم پوشی باشد.

(۲) یک مقاومت اتصال تونل بزرگ را فرض کنید طوری که الکترون به طور غیر منسجم بین الکترودهای سطح و سورس / درین تونل بسازد. دیگر مرحله تخمین این است که فرض کنیم که معیار زمان برای بارهای پلاریزاسیون روی سطوح الکتروود برای متعادل سازی مجدد در واکنش به رخداد تونل سازی در مقایسه بامختصات زمان بین پدیده های تونل به دست آمده از $t_{\text{tunnel}} = eRjvds$ قابل چشم پوشی است.

این در این واقعیت منعکس می شود که نسبت تغییر چگالی احتمال در زمان t در معادله اصلی با نسبت های انتقالی که با چگالی احتمال در زمان t و نه زودتر تنظیم می شود، کنترل می شود. این تقریب "Markovian" نام دارد. اگر نوسان گر را خارج کنیم، معادله اصلی بالا که از تقریب های گوناگون توصیف شده به دست می آید، مدل "ارتدوکس" SET نامیده می شود.

۲-۶- راه حل حالت ثابت (پایدار)

در حل معادله های اصلی (۷) و (۸)، ما اول رفتار حالت ثابت $t \rightarrow \infty$ را تعیین می کنیم. اگر V_{ds} را خیلی بزرگ و اتصال بین نوسانگر و SET را وطری ضعیف فرض می کنیم که جملات انرژی E_L^+, E_R^+ همیشه مثبت باشند، ما فقط باید نسبت های Γ_R^+, Γ_L^+ را همان وطر که در معادله (۱۲) مشخص شد را با حذف تابع بررسی کنیم. این راحت است که معادله های اصلی را در اصطلاحات مختصات بدون بعد بیان

کنیم، چون در شکل بدون بعد، پارامترهای ضروری کنترل کننده دینامیک واضح تر

بیان می شوند، با بیان مختصات زمان در واحدهای زمانی تونل سازی t_{tunnel} ، مختصات

مکان در واحدهای تغییر x_0 و مختصات سرعت در واحدهای x_0 / t_{tunnel} ، معادله های

اصلی به این صورت درمی آیند:

$$\frac{\partial P_N}{\partial t} = \varepsilon x^2 \frac{\partial P_N}{\partial v} - v \frac{\partial P_N}{\partial x} + \tilde{E}_L^+ P_{N+1} - \tilde{E}_R^+ P_N, \quad (13)$$

$$\frac{\partial P_{N+1}}{\partial t} = \varepsilon^2 (x-1) \frac{\partial P_{N+1}}{\partial v} - v \frac{\partial P_{N+1}}{\partial x} - \tilde{E}_L^+ P_{N+1} + \tilde{E}_R^+ P_N \quad (14)$$

که در اینجا، پارامتر بدون بعد $\varepsilon = \omega t_{tunnel}$ معرف جدایی بین نوسانگر و معیار زمانی

دینامیک SET می باشد. شرایط انرژی بدون بعد از تقسیم $E_{L(R)}^\pm$ بر eV_{ds} به دست

می آیند:

$$\tilde{E}_L^+ = -\frac{e}{c_\Sigma v ds} (N_g - N - \frac{1}{2}) - kN + \frac{1}{2} - kx \quad (15)$$

$$\tilde{E}_R^+ = +\frac{e}{c_\Sigma v ds} (N_g - N - \frac{1}{2}) + kN + \frac{1}{2} + kx \quad (16)$$

که در اینجا $N_g = C_g V_g / e$ بار دو قطب تحریک شده توسط ولتاژ گیت است و

پارامتر بدون بعد $K - mw^2 x_0^2 / (eV_{ds})$ معرف قدرت اتصال بین نوسانگر و SET

است. مختصات جابجایی به شکل $x_0 = -eN_g / (C_\Sigma m \omega^2 d)$ است که در آن d فاصله

الکتروود تشدیدگر - سطح داخلی است به شکلی که قدرت اتصال با تغییر ولتاژ گیت

V_g کنترل می شود، به طور خاص k در درجه دوم به V_g وابسته است. همانگونه که

مشاهده می شود، پارامترهای ε و k برای توصیف دینامیک اتصال SET -

نوسانگر کلیدی هستند. از (۱۳) و (۱۴) می توانیم معادله هایی برای گشتاورهای

گونگون $\langle x^n v^n \rangle_{N(N+1)}$ توزیع احتمال به دست آوریم که در آن

ها:

$$\langle x^n v^n \rangle_{N(N+1)} = \int dx \int dv x^n v^n P_{N(N+1)}(x, v, t).$$

حل گشتاورها یک کار قابل کنترل تر است تا اینکه سعی کنیم توزیع احتمال را

یکباره حل کنیم. معادله ها در زیر آمده است:

$$\begin{aligned} \frac{d\langle x^n v^m \rangle_N}{dt} = & -m\epsilon^2 \langle x^{n+1} v^{m-1} \rangle_N + n \langle x^{n-1} v^{m+1} \rangle_N + E_L \langle x^n v^m \rangle_{N+1} \\ & - E_R \langle x^n v^m \rangle_N - \kappa (\langle x^{n+1} v^m \rangle_N + \langle x^{n+1} v^m \rangle_{N+1}) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\langle x^n v^m \rangle_{N+1}}{dt} = & -m\epsilon^2 (\langle x^{n+1} v^{m-1} \rangle_{N+1} - \langle x^n v^{m-1} \rangle_{N+1}) \\ & + n \langle x^{n-1} v^{m+1} \rangle_{N+1} \\ & - E_L \langle x^n v^m \rangle_{N+1} + E_R \langle x^n v^m \rangle_N \\ & + \kappa (\langle x^{n+1} v^m \rangle_N + \langle x^{n+1} v^m \rangle_{N+1}), \end{aligned}$$

(۱۸)

که در آن ها اصطلاحات اتصال وابسته به K از اصطلاحات انرژی E خارج شده اند و

نمادهای \sim و $+$ در فرمول دوم به خاطر راحتی از نظر نمادی حذف شده اند. اگر

SET، نوسانگر را میرا کند، در حد $t \rightarrow \infty$ گشتاورهای گونگون به مقادیر ثابت نزدیک

می شوند. بنابراین ما یک راه حل ممکن برای (۱۷) و (۱۸) با

$d \langle x^n v^m \rangle_{N(N+1)} / dt = 0$ پیدا می کنیم. خوشبختانه، این معادله ها دقیقاً برای

گشتاورهای مستقل از زمان قابل حل می باشد. برای $n+m=0.1$ ما داریم:

$$\langle x \rangle_{N+1} = \langle P \rangle_{N+1} = 1 - \langle P \rangle_N = \frac{E_R}{1-K} \quad (19)$$

و $\langle x \rangle = \langle v \rangle_N = \langle V \rangle_{N+1} = 0$ برای $n+m=2$ ، برای [۲۳] variance داریم:

$$\delta x^2 = \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2 = \frac{eV_{ds}}{m\omega^2} \langle P \rangle_N \langle P \rangle_{N+1} \quad (20)$$

$$\delta v^2 = \langle v^2 \rangle = (1-K) \frac{eV_{ds}}{m} \langle P \rangle_N \langle P \rangle_{N+1} \quad (21)$$

و $\langle xv \rangle_N = \langle xv \rangle_{N+1} = 0$ ، که در آن احتمالات میانگین به صورت زیر تعریف

می شود.

$$\langle P \rangle_{N(N+1)} = \int du \int dv P_{N(N+1)}(x, v, t)$$

و ما به مختصات ابعاد اصلی بعدی باز گشته ایم:

ما از این راه حل های چندین گشتاور (لحظه) اول چیزی یاد می گیریم؟ برای $K < 1$ ،

وجود راه حل ها دلیل بر این است که SET نوسانگر را میرا کرده و به آن یک حالت

ثابت می دهد. برای $K > 1$ از سوی دیگر، راه حل ها نامشخص هستند که این حاکی

از این است که سیستم اتصالی SET - نوسانگر ممکن است در این رژیم ناپایدار

باشد.

این ممکن نیست که چیز مشخص تری در مورد رژیم بزرگ K بگوییم، چون تقریب

های (تخمین های) تساوی اصلی در بالا، هنگامی که k کوچک نیست به هم

می ریزد. از (۲۰) و (۲۱) معلوم می شود که واریانس های مکان و سرعت بصورت

زیر با هم مرتبط هستند:

$$\delta^2_R \delta x^2 = \delta v^2 = \frac{evds}{m} \langle p \rangle_N \langle p \rangle_{N+1} \quad (22)$$

که در اینجا فرکانس نوسان گر عادی شده $\omega R = \sqrt{1-k\omega}$ می باشد. اکنون به یاد

بیاورید که برای یک نوسانگر هارمونیک میرا کلاسیک در تماس با یک حمام

حرارتی در دمای T، ما اکیپارسیون انرژی: $\frac{1}{2} m \delta v^2 = \frac{1}{2} m \omega^2_R \delta x^2 = \frac{1}{2} K_B T$ را

داریم. در مقایسه با تساوی (۲۲)، این نشان دهنده این است که ما می توانیم یک دمای

مؤثر Tset را به SET بدست آمده از طریق تساوی زیر اختصاص دهیم:

$$K_B T_{SET} = evds \langle p \rangle_N \langle p \rangle_{N+1} \quad (23)$$

شواهد بیشتر در مورد اینکه SET به طور مؤثر به عنوان یک حمام حرارتی رفتار

می کند از آزمایش گشتاورها (لحظات) بالاتر با ۴ و ۳ = n+m بدست

می آید. برای $K < 1$ ، به این نتیجه می رسیم که گشتاورهای بالاتر می توانند

حدودا به شکل حاصل و گشتاورهای c کمتر با ۲ و ۱ = n+m، یعنی $\langle x \rangle - \langle x^2 \rangle$

$\langle v^2 \rangle$ تجزیه شوند. این بدین معنی است که توزیع احتمال حالت پایدار

$p(x, v) [= P_N(x, v) + P_{N+1}(x, v)]$ برای نوسانگر، توسط یک تقریب گوسی

خوب تبدیل می شود، همان گونه که در مورد پخش Maxwell-Boltzmann که

توصیف کننده یک نوسان گر هارمونیک کلاسیک در تماس با یک حمام حرارتی

نیز صدق می کند.

$$p(x, v) = \frac{2\pi K_B T}{m\omega} \exp\left\{-\frac{m}{2K_B T}[\omega^2(x - \langle x \rangle)^2 + v^2]\right\} \quad (24)$$

شکل ۲۲ یک نمونه ای از پخش احتمال حالت ثابت برای $p(x) = \int dv P(x, v)$ بدست

آمده از حل عددی تساوی اصلی (۷) و (۸) با پارامتر گزینه های $k = 0.1$ و $\varepsilon = 0.3$

را نشان می دهد. همچنین گوسی بدست آمده پس از ترکیب (۲۴) روی مختصات

سرعت نیز طراحی شده است، که مختصات مکان میانگین حالت ثابت از

$\langle x \rangle = x_0 \langle p_{N+1} \rangle$ [شکل بعدی تساوی ۱۹] بدست می آید و دما از تساوی (۱۷).

همانطور که بطور واضح مشاهده می شود، توزیع حالت ثابت از توزیع گوسی تخمین

زده می شود که با استفاده از دمای مؤثر از طریق تحلیلی به دست آمده و مختصات

مکان میانگین حالت ثابت، ثابت شده است.

۳-۶ دینامیک تشدیدگر مکانیکی در رژیم تزویج ضعیف:

در بخش قبلی، ما دریافتیم که برای تزویج ضعیف ($k \ll 1$) SET، برای نوسانگر در

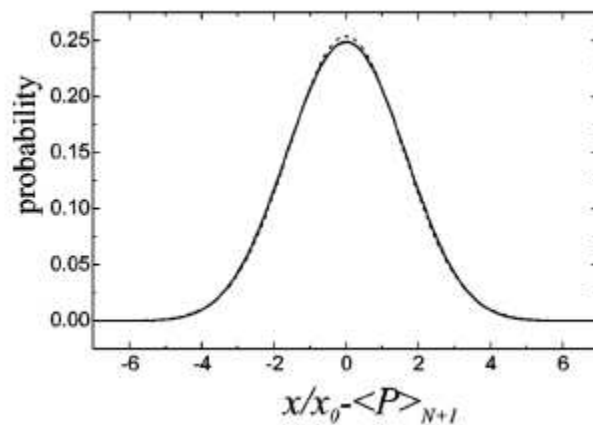
حالت ثابت به عنوان یک حمام حرارتی با دمای مؤثر

$K_B T_{set} = eV ds \langle p \rangle_N \langle p \rangle_{N+1}$ ظاهر می شود. حال فرض کنید که یک تشدیدگر

در یک حالت ثابت است، یعنی به آن یک دامنه جابجایی آغازین داده شده و سپس

رها شده و یک حرکت حالت ناپایدار داشته است. آیا هنوز هم SET به عنوان یک حمام حرارتی برای نوسانگر ظاهر می شود؟ بررسی زیر به این سؤال می پردازد و همانطور که می فهمیم، در واقع SET به عنوان یک حمام عمل می کند، به شرطی که یک جدایی وسیع در نوسانگر و معیار زمانی دینامیک SET ($\varepsilon \ll 1$) علاوه بر توزیع ضعیف وجود داشته باشد.

ما به دنبال یک روش تقریبی برای حل تساوی های اصلی بدون بعد (۱۳) و (۱۴) هستیم که شرایط اتصال ضعیف $k \ll 1$ را بکار برد. این راه حل باید یک تقریب خوب برای زمان های طولانی تر از پریود نوسان گر $2\pi/\omega$ باشد تا ثابت کند که SET نوسان گر را می لرزاند.



شکل (۲۱) - توزیع احتمال حالت پایدار $p(x)$ برای $E=0.3$ و $k=0.1$ مختصات افقی در واحد های متغیر X_0 و ریشه در مکان میانگین حالت پایدار $X_0 < P_{N+1} >$ قرار دارند. راه حل عددی توسط خط ثابت داده می شود تناسب Gaussian متحرک است.

فرآیند آشکار برای حل توزیع احتمال آن است که K به عنوان پارامتر بسط کوچک

استفاده کنیم. ابتدا تساوی های اصلی را در ماتریس دقیق زیر جای گذاری می کنیم:

$$\frac{\partial \mathcal{P}}{\partial t} = (\mathcal{H}_0 + \mathcal{V})\mathcal{P}, \quad (25)$$

که در اینجا

$$\mathcal{P} = \begin{pmatrix} P_N(x, v, t) \\ P_{N+1}(x, v, t) \end{pmatrix},$$

$$\mathcal{H}_0 = \begin{pmatrix} \varepsilon^2 x \frac{\partial}{\partial v} - v \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \varepsilon^2 x \frac{\partial}{\partial v} - v \frac{\partial}{\partial x} \end{pmatrix}$$

$$+ \begin{pmatrix} -E_R - \kappa(x) & E_L - \kappa(x) \\ E_R + \kappa(x) & -E_L + \kappa(x) \end{pmatrix} \quad (26)$$

و $\mathcal{V} = \mathcal{V}_1 + \mathcal{V}_2$ که

$$\mathcal{V}_1 = \kappa x \begin{pmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (27)$$

و

$$\mathcal{V}_2 = \varepsilon^2 \frac{\partial}{\partial v} \begin{pmatrix} \langle x \rangle & 0 \\ 0 & \langle x \rangle - 1 \end{pmatrix} \quad (28)$$

در اینجا ما مختصات مکان را مجدداً طوری تعریف کرده ایم که ریشه آن منطبق بر

مقدار حالت پایدار $\langle x \rangle \approx E_R$ باشد. تساوی (25) مشابه تساوی وابسته به زمان

Schrodinger می باشد اما بدون I موهومی، چون این یک سیستم کلاسیک را

توصیف می کند نه یک سیستم کوانتوم اپراتور H_0 Hamiltonian، تکامل آزاد

وجدا نشدنی سیستم های نوسان گر مستقل و SET را نشان می دهد، درحالیکه

اپراتور $V=V_1+V_2$ اثرمتقابل بین دو سیستم را نشان می دهد که در اینجا V_1 ،

وابستگی به نسبت های تونل سازی SET در مکان نوسان گر و v_2 ، وابستگی

تعداد سطح داخلی SET. از نیروی الکترواستاتیکی نوسانگر می باشند با شبیه دانستن

تساوی (۲۵) به تساوی schrodinger، ما می توانیم کاربرد طرح های تقریبی که در

مکانیک کوانتوم توسعه یافته اند را بررسی کنیم. ما باید روشی را بکار ببریم که برای

سیستم های کوانتوم بازی که گاهی اوقات تقریب خود پایدار Born نامیده

می شود گسترش یافته اند (SCBA) یک سیستم وقتی باز است که به یک سیستم

دیگر دارای تعداد نامحدود درجات آزادی متصل شود. سیستم دوم معمولاً «محیط» یا

«منبع» نامیده می شود و شیوه تقریب تساوی های موثر و ساده تری از حرکت را برای

سیستم محدود جستجو می کند که در آن درجات محیط آزادی ترکیب شده اند. در

مورد ما، سیستم محدود جالب، تشدید گرم مکانیکی است که به عنوان یک نوسان

گر هارمونیک مدل سازی شده است در حالی که محیط متشکل از الکترون های تونل

سازی در SET می باشد. با کاربرد SCBA به شیوه ای که در بخش ۱-۶ توصیف

شد، ما تساوی مؤثر تقریبی حرکت زیراز حرکت را برای توزیع احتمال $PHo(x,r,t)$

نوسان گر بدست می آوریم.

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(x, v, t)_{HO}}{\partial t} &= \mathcal{H}_{HO} P_{HO}(x, v, t) \\ &+ \exp(\mathcal{H}_{HO} t) \text{Tr}_{SET}[V(t) P_{SET}(0)] \exp(-\mathcal{H}_{HO} t) P_{HO}(x, v, t) \\ &- \int_0^t dt' \exp(\mathcal{H}_{HO} t) \\ &\quad \text{Tr}_{SET}[V(t) P_{SET}(0)] \text{Tr}_{SET}[V(t') P_{SET}(0)] \\ &\quad \exp(-\mathcal{H}_{HO} t) P_{HO}(x, v, t) \\ &+ \int_0^t dt' \exp(\mathcal{H}_{HO} t) \text{Tr}_{SET}[V(t) V(t') P_{SET}(0)] \\ &\quad \exp(-\mathcal{H}_{HO} t) P_{HO}(x, v, t), \end{aligned} \quad (29)$$

که در اینجا، $H_{Ho} = \varepsilon^2 x(\partial / \partial x)$ ، اپراتور Hamiltonian برای نوسان گر هارمونیک آزاد است و $V(t) = \exp(-H_0 t) V \exp(+H_0 t)$ در تصویر اثر متقابل است.

توزیع احتمال آغازین $t=0$ به یک حالت منتجه فرض می شود:

$$P_{SET}(0) = \begin{pmatrix} p_N(0) \\ p_{N+1}(0) \end{pmatrix} \quad \text{که در آن } P(0) = P_{HO}(x, v, 0) P_{SET}(0)$$

تأثیر SET روی نوسانگر در شرایط اثر گزاری از جمله

$$\text{Tr}_{SET}[V(t) P_{SET}(0)] = \sum_{\alpha=1}^2 \sum_{\beta=1}^2 V_{\alpha\beta}(t) P_{SET} \beta(0)$$

در (۲۹) و انتگرال های آنها با توجه به t' از نظر تحلیلی قابل ارزیابی هستند. نتیجه

عبارت نتیجه برای (۲۹) نسبتاً پیچیده بوده و شامل شرایط مستقل از t ، شرایط وابسته

به شرایط ضعیف از شکل e^{-1} و شرایط نوسانی نوع $e^{-t} \sin(\varepsilon t)$ ، $e^{-t} \cos(\varepsilon t)$ می باشد.

شرایط همچنین وابسته به حالت آغازین $P_{SET}(0)$ SET می باشند. به هر حال اگر

$\varepsilon \ll 1$ ، می توانیم همه شرایط ضعیف (کاهش یافته) شامل e^{-t} را نادیده بگیریم،

چون روی مقیاس زمانی مرته، پررود مکانیکی $t > \varepsilon^{-1}$ است، چنین شرایطی یک تأثیر

قابل اغماض روی دینامیک نوسانگر دارند. علاوه بر این، وابستگی به حالت آغازین

SET کاهش می یابد. چشم پوشی از شرایط کاهش یافته وابسته به زمان، معمولا

تقریب « markov » نامیده می شود، در حالی که مراحل ترکیبی تقریب markov ,

SCBA معمولا تقریب « Born-Markov » نامیده می شوند. در نتیجه ما تساوی

ساده تر و مؤثر حرکت زیر را برای نوسانگر بدست می آوریم:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \left[\varepsilon^2 x \frac{\partial}{\partial v} - v \frac{\partial}{\partial x} + \kappa \varepsilon^2 \frac{\partial}{\partial v} (v - x) + \varepsilon^4 \langle P \rangle_N \langle P \rangle_{N+1} \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{\partial}{\partial v} + \frac{\partial}{\partial x} \right) \right] P \quad (30)$$

که در اینجا $\langle p \rangle_N$ و $\langle p \rangle_{N+1} (= 1 - \langle p \rangle_N \approx E_R)$ احتمالات تعداد الکترون سطح

داخلی SET حالت پایدار می باشند و ما « Ho » را از توزیع احتمال نوسانگر

$p(x, v, t)$ برای راحتی نمادی حذف کرده ایم. با بیان (۲۴) با شرایط مختصات اندازه،

ما به تساوی زیر می رسم:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \left[\omega_R^2 x \frac{\partial}{\partial v} - v \frac{\partial}{\partial x} + \gamma_{SET} \frac{\partial}{\partial v} v + \frac{\gamma_{SET} k_B T_{SET}}{m} \frac{\partial^2}{\partial v^2} \right] P \quad (31)$$

که در اینجا با یادآوری اینکه فرکانس نوسان گر عادی شده می باشد $\omega_R = \sqrt{1 - \kappa} \omega$ ،

نسبت رطوبت (۳۲) $\gamma_{SET} = \kappa \varepsilon \omega$ می باشد و دمای مؤثر SET ، T_{SET} در (۱۷) تعیین

می شود. تساوی (۳۱) که تساوی « Klein-Kramers » یا « Fokker- planck »

نامیده می شود حرکت brownian یک نوسان گر هارمونیک در حال تعامل با یک

حمام حرارتی را توصیف می کند، نوسان گر یک نیروی ضعیفی را به خاطر SET

رابطه ضریب کیفیت $Q_{SET} = \omega/\gamma_{SET} = 1/(\kappa\varepsilon)$ (since $\kappa \ll 1$)، تحمل می کند و با یک

نوسان های حرارتی توزیع شده گوسی همراه است شرایط $\partial^2 P/\partial x \partial v$ در تساوی (۳۰)

نادیده گرفته شده است (حذف شده است)، چون در مرتبه ε ، وقتی زمان در واحد

پریود مکانیکی گریبان می شود. به اندازه کوچکتر از شرایط انتشار است.

این باید فقط یک تأثیر کوچک روی معیارهای زمانی مرتبه پریود مکانیکی یا طولانی

تر داشته باشد. اولین لحظه نیروی متغیر باعث پیدایش شرایط انتشار می شود، از بین

می رود، $\langle F(t) \rangle = 0$ ، در حالی که لحظه دوم آن به شکل زیر است:

$$\langle F(t)F(t') \rangle = \frac{2\gamma_{SET}k_B T_{SET}}{m} \delta(t-t') \quad (33)$$

تابع دلتا در تساوی (۳۳) دال بر این است که نیروهای وارد شده به نوسانگر توسط

SET به هم مربوط نیستند، مهم نیست که فاصله زمانی جداکننده نیروها چقدر

کوچک باشد. این برابر با حد $\lim_{t \rightarrow 0} \tau_{tunnel}$ است که در صورتی قابل قبول است که

$\tau_{tunnel} \ll 2\pi/\omega$ باشد و ما فقط، همانگونه که در بالا بحث شد، به دینامیک نوسان گر

روی معیارهای زمانی $t \gtrsim 2\pi/\omega$ علاقمند هستیم. شرط $\varepsilon \ll 1$ برای این لازم است که

نوسان گر SET را به عنوان یک حمام حرارتی دریافت کند، اگر شرط فراهم نشود،

این ممکن است که از دینامیک نوسانگر استنباط کنیم که این به یک وسیله تونل

سازی الکترون وصل شده است نه به یک سیستم دارای درجات آزادی زیاد در یک

حالت موازنه گرمایی.

شرایط دوم و سوم سمت راست تساوی (۲۹) که شامل آثار اپراتورهای پتانسیل تکنولوژی تعامل $v(+)$ می باشد. به خاطر تقریب Markov و این واقعیت که مختصات مکان اصولاً طوری مجدداً تعریف شد که ریشه منطبق بر مقدار حالت پایدار، حذف می شود. شرایط انتشار و میرایی در تساوی (۳۰) از جمله چهارم سمت راست تساوی (۲۹) بدست می آید که نشانه اثر متقابل اپراتور پتانسیل تعامل $v(t)v(t')$ می باشد به طور خاص، فقط جواب های $v(t) v(t')$ ، $v_2(t)v_2(t')$ شکل و مقادیر غیر صفر میدهند، شرایط فرکانس و میرایی از اولین جواب و شرایط انتشار و انتشار غیرعادی از جواب دوم بدست می آیند. بنابراین برای توصیف حمام حرارتی مؤثر برای SET باید نه تنها به تأثیر SET روی نوسان گر (v_2) بلکه به تأثیر نوسانگر روی SET و (v_1) توجه کنیم.

در بررسی از دینامیک نوسانگر SET مزدوج، با تزویج بین نوسانگر و حمام حرارتی خارجی آن را نادیده گرفته ایم. دخالت (گنجاندن) حمام خارجی در تساوی های حرکت، راحت است، ما فقط جمله زیر را به تساوی (۲۵) Fokker- plank وارد می کنیم، که در آن ما مجدداً به خاطر سادگی فرض می کنیم که تأثیر حمام خارجی روی نوسانگر، بی ربط و ناپایدار است.

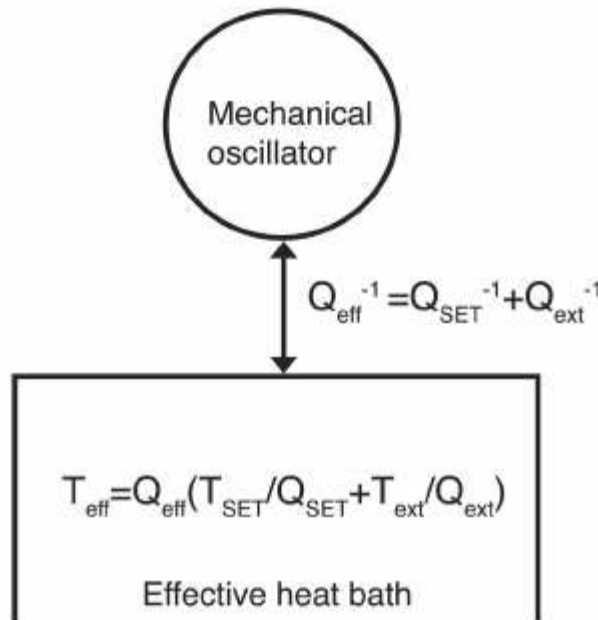
$$\gamma_{\text{ext}} \frac{\partial(vP)}{\partial v} + \frac{\gamma_{\text{ext}} k_B T_{\text{ext}}}{m} \frac{\partial^2 P}{\partial v^2} \quad (34)$$

شرایط نیروهای نوسانی و میرایی ناشی از SET و حمام خارجی می توانند ترکیب بشوند

تا یک شرایط میرایی ساده با ضریب کیفیت مؤثر $Q_{\text{eff}}^{-1} = Q_{\text{SET}}^{-1} + Q_{\text{ext}}^{-1}$ و یک شرایط نیروی

نوسانی ساده جدا با حرارت مؤثر بدست آید:

$$T_{\text{eff}} = Q_{\text{eff}} \left(\frac{T_{\text{SET}}}{Q_{\text{SET}}} + \frac{T_{\text{ext}}}{Q_{\text{ext}}} \right) \quad (35)$$



شکل ۲۲) طرح سیستم نوسانگر-SET تحت شرایط اتصال ضعیف و جدایی وسیع زمان های

دینامیک بین نوسان گر و SET. نوسان گر حرکت گرمایی Brownian را تحمیل کرده و طوری

رفتار می کند که انگار با یک حمام گرمایی در دمای $T_{\text{eff}} = Q_{\text{eff}} \left(\frac{T_{\text{SET}}}{Q_{\text{SET}}} + \frac{T_{\text{ext}}}{Q_{\text{ext}}} \right)$ در تماس است.

در تماس است. $Q_{\text{eff}}^{-1} = Q_{\text{SET}}^{-1} + Q_{\text{ext}}^{-1}$

خلاصه اینکه، ما فهمیدیم که اگر نوسان گر مکانیکی و SET اتصال ضعیف داشته باشند

($k \ll 1$) و علاوه بر این، اگر دینامیک SET در زمان های کوتاهتری نسبت به دینامیک

نوسان گر، رخ دهد ($\epsilon \ll 1$)، نوسان گر به طور مؤثر بطوری رفتار می کند که انگار با

یک حمام حرارتی در تماس است و شکل ۲۰ با شکل ساده تر ۲۲ جایگزین می شود.

برای پارامترهای وسیله معمولی SET و تشدیدگرهای مقیاس میکرون با فرکانس های

چند مگاهرتزی، که توسط یک فاصله $0.1 \mu\text{m}$ الکتروود تشدیدگر - سطح مجزا

می شود، دماهای مؤثر SET حدود 1 k و ضرایب کیفیت مؤثر SET در محدوده

10^2 تا 10^4 و ولتاژ گیت از 1 v تا 10 v بدست می آید. دماهای خارجی و ضرایب

کیفیت برای تشدیدگرهای مقیاس میکرون به ترتیب، دارای ترتیب 100 mk و $10^5 - 10^4$

۱۰ هستند، طوری که اندازه گیری تأثیرات دمای SET و ضریب کیفیت روی تشدیدگر

مکانیکی ممکن است. در گروه Keithschwab آزمایش هایی در دست اجراست تا

دینامیک اتصالی SET و تشدیدگر مکانیکی (۴۸) را بررسی کنند.

آنها در چندین ابزار، شواهدی مشاهده کرده اند که SET به عنوان یک حمام مؤثر عمل

کرده و تشدیدگر را گرم کرده و رطوبتی ایجاد می کند که با ولتاژ گیت افزایش می یابد.

این اولین بار است که فعالیت (کنش) برگشتی نویز ضربه الکترونیک روی یک تشدیدگر

نانومکانیک مشاهده شده است. به هر حال توجه داشته باشید که آنها با SET های خیلی

رسانایی کار می کنند (SSETs) که در آنها فرآیند تونل سازی شامل جفت های

Cooper می شود طوری که فرمول بالا برای T_{EST} و P_{SET} جواب نمی دهد . بنابراین

این مهم است که دینامیک تزویج تشدید گر مکانیکی - SSET را بررسی کنیم

(۴۹ و ۵۰)

دینامیک متعادل موثر دیگر NEMS ها :

در این بخش ، دینامیک متعادل موثر برخی دیگر از ابزار NEM توصیف شده در بخش

۵ را بررسی می کنیم . یکی از اولین بررسی های تئوری برای اثبات اینکه یک وسیله

الکترونیک متعادل نشده می تواند مثل یک حمام حرارتی موثر عمل کند ، توسط

LosAlamos Ivar Martin , Dima Mozysky انجام شد . آنها یک وسیله مدل

مشکل از یک اتصال تونل الکتریکی ساده با نسبت های تونل سازی وابسته به مختصات

مکان یک نوسان گر مکانیکی را همانگونه که در شکل ۲۳ توضیح داده شده است بررسی

کردند .

آنها با حل تساوی کوانتوم schrodinger برای سیستم مزدوج تونل سازی الکترون -

نوسانگر ، تحت شرایط ضعیف و تقریب marker یافتند که نوسان گر به طور موثر

طوری رفتار می کند که انگار با یک حمام حرارتی با اتصال تونل شناسایی شده توسط

یک نسبت رطوبت و دمای بدست آمده از $k_B T_U = eV/2$ در تماس است .

$$k_B T_{TJ} = eV/2,$$

(۳۶)

در این تساوی ، V ولتاژ بکار رفته در الکترودهای تونل است .

بنابراین ، به رغم تفاوت های بین اتصال تونل و SET هر دو می توانند به طور موثر بعنوان

یک حمام حرارتی عمل کنند .

در واقع ، شباهت در ویژگی های آماری آنها بیشتر است . این استنباط می شود جملات

دمای مخصوص (۲۱) و (۳۶) آنها ، می توانند مشترکاً با انرژی میانگین کل ، ناشی از

تونل سازی روی اتصال بدست آمده توسط الکترون برابر شود .

برای اتصال تونل میانگین انرژی بدست آمده $eV/2$ است با فرض اینکه دمای الکترون

صفر و چگالی حالت ثابت در الکترودها و ماتریس تونل سازی ، مستقل از اینکه انرژی

صفر باشد (۲۲ و ۳۱)

برای SET با همین فرضیات ، میانگین انرژی بدست آمده توسط الکترون تونل سازی

برابر با $\langle p \rangle_{N+1} - \langle p \rangle_N \approx eV_{ds} - (E_L/2) \langle P \rangle_{N-1} + (E_L/2) \langle P \rangle_{N+1}$ (ER/2) برای

$K \ll 1$ باشد ، که در آن ما تساوی های (۱۵) و (۱۶) و (۱۹) را بکار برده ایم .

در حالی که الکترودهای تونل تابع مکانیکی توضیح داده شده در شکل ۱۴ دقیقاً شبیه مدل

اتصال تونل بررسی شده شکل ۲۳ است ، یک اختلاف از این جهت دارند که الکترون

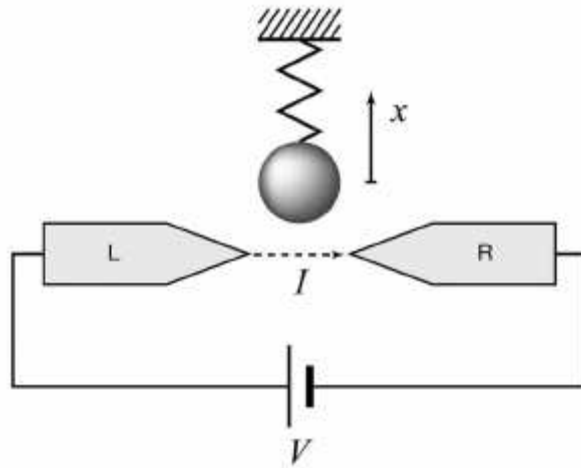
های تونل سازی یک حرکت برگشتی به الکترودهای تابع مکانیکی می دهد که البته برای

الکترودهای ثابت وجود ندارد . طبق دانسته های ما باید یک بررسی جامع از دینامیک مزدوج

الکترون های تونل سازی و الکترودهای تابع مکانیکی وجود داشته باشد که شامل تاثیرات

حرکت برگشتی باشد. با این وجود، انتظار می رود که تحت شرایط مناسب تزویج ضعیف و جدایی معیارهای زمانی دینامیک بین درجات آزادی مکانیکی و الکتریکی، مجدداً توصیف حمام حرارتی ایجاد می شود.

همانگونه که در بخش ۵ ذکر شد، دینامیک الکتریکی و مکانیکی به طور قوی در shuttle بار کوپل می شود تا یک جریان ایجاد شود (شکل ۱۸)، الکتروود سطح نانو مکانیکی باید بار را بین الکتروودهای سورس و درین طوری حرکت دهد که معیارهای زمانی دینامیک از درجات آزادی الکتریکی و مکانیکی قابل قیاس باشند. چون این ممکن نیست که یک جدایی وسیع زمانی داشته باشیم، این احتمال وجود ندارد که یک روش وجود داشته باشد که در آن دینامیک تونل سازی الکترون به طور موثر دینامیک حمام حرارتی باشد، همانگونه که از shuttle مکانیکی فهمیده می شود. تنها امکان جدایی معیارهای زمانی این است که فاصله الکتروود درین سورس را از طول تونل سازی الکترون کوچکتر کنیم. یک روش غیر معمولی برای تشدید گرهای مکانیکی مقیاس نانوآن است که باید فاصله را پر کند.



شکل (۲۳) نوسان گر متصل به یک اتصال تونل الکتریکی (۲۲) در نتیجه یک ولتاژ اعمالی V ، الکترون ها از چپ به راست الکتروود می روند و نسبت تونل سازی بستگی به مکان X نوسان گر مکانیکی دارد. اتصال الکترومکانیکی از طریق گذاشتن یک شارژ غیر صفر (ولتاژ) روی یک نوسان گر مکانیکی فلزی شده انجام می شود.

بنابراین، اگر دینامیک الکترون تصادفی باشد، قدرت تزویج الکترومکانیکی ضعیف بوده و دینامیک مکانیکی آرام تر از دینامیک الکترون است. نمونه های بالا نشان می دهند که وسیله الکتریکی می تواند به طور موثر بوسیله یک حمام حرارتی برای دینامیک کاهش یافته تشدید گر مکانیکی مزدوج جایگزین شود به شکلی به شکل ۱۸ توسط شکل ۲۱ جایگزین شود.

چطور می توانیم دلایل این احتمال (فرض) را برای یک طبقه بندی کلی از سیستم های الکترومکانیکی پیدا کنیم؟ یک مسیر ممکن توسط روش تقریب Born- Marker پیشنهاد می شود که در سیستم تشدید گر SET در بخش ۳-۶ بکار رفت.

در واقع ، مشتق تساوی Fokker- planck بستگی به شکل جزئی ماتریس های موجود در تعارف (۲۱) و (۲۲) اپراتورهای تعامل V_2, V_1 ندارد، مشتق تساوی Fokker- planck باید برای انواع اضافی و متفاوت فرآیند تونل سازی یعنی SET خیلی رسانا (۵۰) عملی شود. البته ، عبارات جزئی فرکانس عادی شده ، ثابت میرایی و دما در یک وسیله به وسیله دیگر متفاوت است. مراحل مهم ضروری که باید به تساوی Fokker- planck ختم شوند ، بسط دو ترتیبی در اپراتور تعامل V و چشم پوشی از شرایط وابسته به زمان در دینامیک الکترون می باشند. یک نقطه شروع مناسب برای یک دلیل کلی این است که یک تساوی اصلی / Boltzman بنویسیم که در برگیرنده یک تابع احتمال $P_{\{k\}}(x, v, t)$ باشد که در آن (x, v) مختصات سرعت / مکان کلاسیک نوسان گر بوده و $\{k\}$ انتخاب مناسب آرایه های الکترونیکی می باشد. اپراتور اثر متقابل کلی v باید شامل جملات وابسته مکان و سرعت باشد. بنابراین دلیل (آزمایش) ، شامل کاربرد تقریب Born- Marker به این تساوی اصلی همراه با کشف تساوی Fokker- planck می باشد. یک شرط مهم این است که هیچ تضمینی نیست که وسیله الکتریکی بتواند نوسانگر را میرا کند. دینامیک تونل سازی می تواند طوری باشد که این احتمال وجود داشته باشد که الکترون انرژی را به نوسانگر بدهد ، نه آن را از نوسانگر بگیرد ، که این به دینامیک اتصالی نا پایدار ختم می شود. این نا پایداری خودش را در ضریب های « رطوبت منفی » و « حرارت منفی » در تساوی Fokker- planck نشان می دهد. چنین

حالت ناپایداری در مورد SET خیلی رسانا برای محدوده های ولتاژ درین - سورس

[۴۹/۵۰] رخ می دهد .

یک دلیل توصیف حمام حرارتی موثر در بالا توسط Ashish Clerk در دانشگاه MC

Gill اخیرا نشان داده شده است . او یک حالت کوانتوم ارائه می دهد که در آن وسیله

الکترونیک به عنوان یک آشکارساز پاسخ خطی کلی موقعیت نوسانگر کوانتوم که به آن

متصل است مدل سازی می شود . بخشی از این دلیل ، تعمیم بررسی Martin و

Mozyrsky در مورد اتصال تونل است [۲۲] به هر حال ، همانگونه که در بالا توصیف

شد ، وقتی دینامیک اتصالی تحت بررسی کلاسیک است ، باید امکان داشته باشد که یک

دلیل مشابه در چهارچوب تساوی های اصلی کلاسیک بیاوریم .

در واقع ، در بررسی اتصال تونل Martin و Mozyrsky این شرط $ev \gg hw$ فرض

می شود که از تساوی (۳۶) برابر با گرفتن حد کلاسیک $hw \gg KBT_{TJ}$ برای

نوسانگر می باشد . قطعا یک مشتق کلاسیک توصیف حمام حرارتی موثر برای NEMS

از این که بخواهیم به طور همزمان به مقوله پیچیده ای که چگونه دینامیک کلاسیک توسط

تقریب از دینامیک کوانتوم بدست می آید ، اجتناب می کند .

۸- نتایج :

ما یک بررسی خلاصه از رشته تحقیق NEMS ارائه داده ایم که در آن روی دینامیک موثر کلاسیک تشدیدگر نانو مکانیکی ، به خاطر اثر متقابلش با یک سیستم الکترون تونل سازی ، تاکید کرده ایم . تحت شرایط تزویج ضعیف دینامیک مکانیکی شاخص (مخصوص) ، که در معیارهای زمانی طولانی تر از دینامیک الکترون تونل سازی رخ می دهد ، سیستم الکترون می تواند به طور موثر بعنوان یک حمام حرارتی عمل کرده و باعث شود که تشدیدگر ، حرکت گرمایی Brownian را متحمل شود .

همانگونه که بیان شد ، شرایط اینکه تشدیدگر ، سیستم الکترونیک را به عنوان یک حمام حرارتی دریافت کند ، نسبتا کلی هستند . بنابراین این طبیعی است که تامل کنیم که آیا نوسانگرهای مکانیکی دیگری هم دور از سیستم های متعادل ، با درجات آزادی زیاد ، طوری متصل هستند که نوسان گر حرکت Brownian حمام حرارتی را تحمل کند یا نه؟ . نمونه های زیادی از این قبیل در واقع بررسی شده اند . یک نمونه آن ، خنک سازی

لیزر Doppler یک یون حفظ شده به شیوه هارمونیک می باشد [۵۱ و ۵۲]

لیزر زیر تشدید اتمی طوری تنظیم می شود که تغییر Doppler باعث می شود اتم یک فوتون با جهت (جریان) مخالف جهت اتم را جذب کند که این منجر به میرا شدن حرکت اتم می شود . به رغم این واقعیت که میدان اشعه لیزر ، یک حالت متعادل گرمایی نیست ، با این وجود تحت شرایط اتصال ضعیف و جدایی زیاد فواصل زمانی ، دینامیک

اتم توسط تساوی Fokker- planck توصیف می شود، که در آن دمای موثر خیلی پایین تر از دمای محیط است. لیزر، یون حفظ شده را خنک می کند. دیگر نمونه نوسانگر میکروسکوپی بررسی شده [۵۴] شامل جایگذاری یک کره در یک جریان گاز بالا رونده می باشد. این یافت شد که کره به عنوان یک نوسانگر هارمونیک عمل می کند که به رغم حالت متعادل نشده متلاطم مولکول های گاز، حرکت گرمایی Brownian را تحمل می کند. یک مشتق گیری از این رفتار ممکن است با یک تساوی Boltzmann برای یک تک ذره سنگین آغاز می شود که از برخورد با گاز رقیق بوده ذرات کوچک را تحمل می کند.

و سپس باید اتصال بدون بعد کوچک مناسب و پارامترهای مقیاس زمانی را برای بسط سری تساوی بعدی Boltzmann شناسایی کنیم. به هر حال کشف یک تساوی Fokker- planck، راحت نیست و این به خاطر ارتباط دینامیک مهم گاز متلاطم با دینامیک موثر نوسانگر است. اما، دیگر نمونه میکروسکوپی مربوطه شامل فرو بردن یک نوسان گر پیچ خورده در یک محیط (جسم) خشن لرزشی سیار بی تعادل می شود. مجدداً جسم (محیط) خشن به طور موثر به عنوان یک حمام حرارتی عمل می کند و نوسانگر، حرکت گرمایی Brownian را تحمل می کند.

اگر به موضوع NEMS برگردیم، هنوز ابعاد زیادی از حالت دینامیک آنها باقی مانده که باید فهمیده شود. در رژیم اتصال قوی، به طور کلی در مورد دینامیک موثر نوسان

گر و اینکه چگونه دینامیک اتصالی خود را در رفتار موثر سیستم الکترونیک نشان می دهد، چیز زیادی شناخته شده، نیست. علاوه بر این در مورد دینامیک کوانتوم NEMS و چگونگی دینامیک کلاسیک در نتیجه عدم زمان بندی در سیستم الکترونیک و محیط خارجی تشدید گر نانو مکانیک چیز زیادی نمی دانیم.

NEMS امکان دسترسی به فضای پارامتری را برای اندازه گیری های اساسی و حساسی بوجود می آورد در نظر گرفتن مزیت های NEMS تصورات ما را گسترش داده و روش های اخیر در علم و تکنولوژی وسیله نانو را توسعه می دهد. این طور به نظر می رسد که اکثر کاربردها از این رشته نشأت می گیرد. نهایتاً سیستم های نانومکانیک که در اینجا طراحی شده اند یک نانو تکنولوژی واقعی را نمودار می سازند. با استفاده از این تکنولوژی ها ما تکنیک های قابل تولید را به تصویر می کشیم و امکان تولید انبوه ابزارهای پیچیده که شامل هزاران اتم می شوند را فراهم می کنیم. واضح است که در ک « Feynmamesque » نیاز به تلاش بیشتری در آزمایشگاه ها دارد، درعین حال NEMS چنانچه در اینجا به تصویر کشیده شد امروزه می تواند زیر ساخت های مهندسی و علمی حیاتی را که در اختیار نانو تکنولوژی آینده قرار دارد را فراهم کند.

جهت خرید فایل word به سایت www.kandoo.cn.com مراجعه کنید
یا با شماره های ۰۹۳۶۶۰۲۷۴۱۷ و ۰۹۳۶۶۴۰۶۸۵۷ و ۰۶۶۴۱۲۶۰-۰۵۱۱ تماس حاصل نمایید

Filename: Document1
Directory:
Template: C:\Documents and Settings\hadi tahaghoghi\Application
Data\Microsoft\Templates\Normal.dotm
Title: در جوامع علمی و تکنیکی مورد توجه زیادی (NEMS) سیستم های نانو الکترو مکانیک
بوده اند
Subject:
Author: all
Keywords:
Comments:
Creation Date: 3/28/2012 4:44:00 PM
Change Number: 1
Last Saved On:
Last Saved By: H.H
Total Editing Time: 0 Minutes
Last Printed On: 3/28/2012 4:44:00 PM
As of Last Complete Printing
Number of Pages: 93
Number of Words: 13,805 (approx.)
Number of Characters: 78,694 (approx.)