

بسمه تعالی

عنوان مقاله :

شتاب سنج های MEMS

نویسنده:

سید عبدالله حسنی



مقدمه

شتاب سنج های MEMS یکی از ساده ترین و در عین حال کاربردی ترین نوع سیستم های الکترومکانیکی هستند که امروزه به عنوان یکی از ملزومات صنعت خودروسازی ، کامپیوتر و فناوری های صوتی و تصویری به حساب می آید. در این مقاله شتاب سنج های خازنی بیشتر مواد تاکید قرار گرفته اند ، طرز ساخت و کاربرد های آن ها به طور مفصل شرح داده می شود.

در ابتدا جهت آشنایی خواننده لازم است تا کمی در مورد MEMS صحبت شود.

MEMS مخفف کلمه *Micro Electro Mechanical System* است و ریشه آمریکایی دارد. همان طور که می دانیم با پیشرفت تکنولوژی، امروزه نیازمند داشتن لوازم دقیق تر در صنعت ، پزشکی ، کشاورزی و سایر علوم هستیم. MEMS این امکان را برای تحول در زندگی انسان فراهم ساخته است. چه چیزی می تواند شبیه هد پرینتر جوهر افشان یا DLP در یک ویدئو پروژکتور یا سامانه های پردازشگر بيو الكتريك يا سنسور كيسه هوا باشد؟ بله ، فناوری MEMS در همه ی این موارد کاربرد دارد.

آشنایی با ادوات MEMS

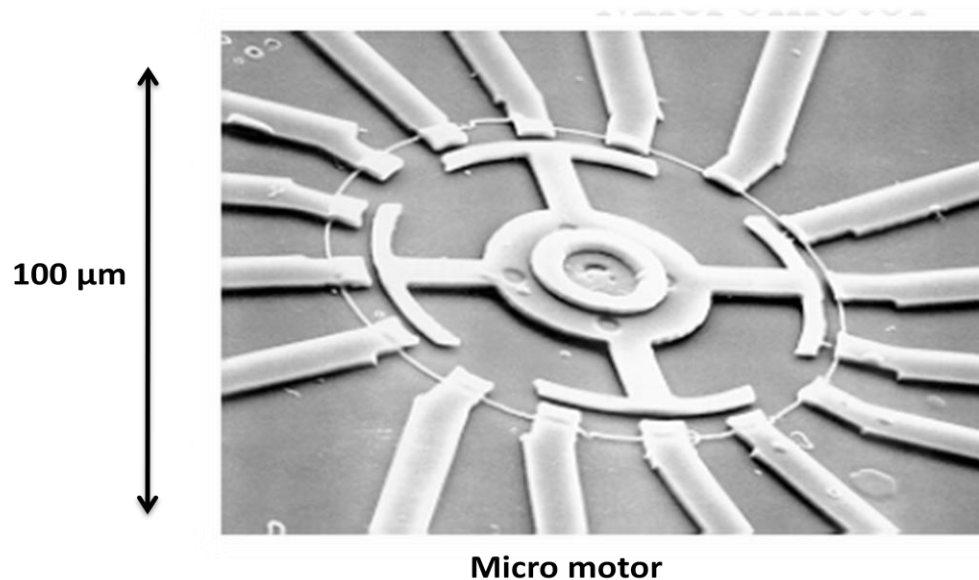
سیستم های الکترو مکانیکی یا همان MEMS اصطلاحی است که اولین بار در سال ۱۹۸۹ توسط پرفسور R.Howe و دستیارانش ابداع شد ، تا آغازگر زمینه ی تحقیقات جدیدی در ارتباط با عناصر مکانیکی نظیر اهرم ها و چرخ دنده ها باشد که بیشتر به میکرو الکترونیک وابسته باشند تا ماشین های تراشکاری. واضح است که این وسایل با سایز کوچکتر از ۱۰۰ میکرو متر توسط روش های معمول تراشکاری ساخته نمی شوند بلکه توسط تکنیک های جدیدی که در اصطلاح به آن micro – fabrication می گویند تولید می شوند. این اصطلاح ساده ممکن است شامل میکرو الکترونیک نیز شود ولی باید توجه داشت که مشخصه هایی وجود دارند که MEMS و مدار های الکترونیک را از هم

متمایز می سازند. در حالی که مدار های الکترونیکی دارای ساختار Solid و فشرده هستند ، ادوات MEMS دارای سوراخ ها ، فرورفتگی ها ، کانال ها ، اهرم ها و قسمت های متحرک هستند و در بعضی جهات شبیه ادوات مکانیکی عمل می کنند.

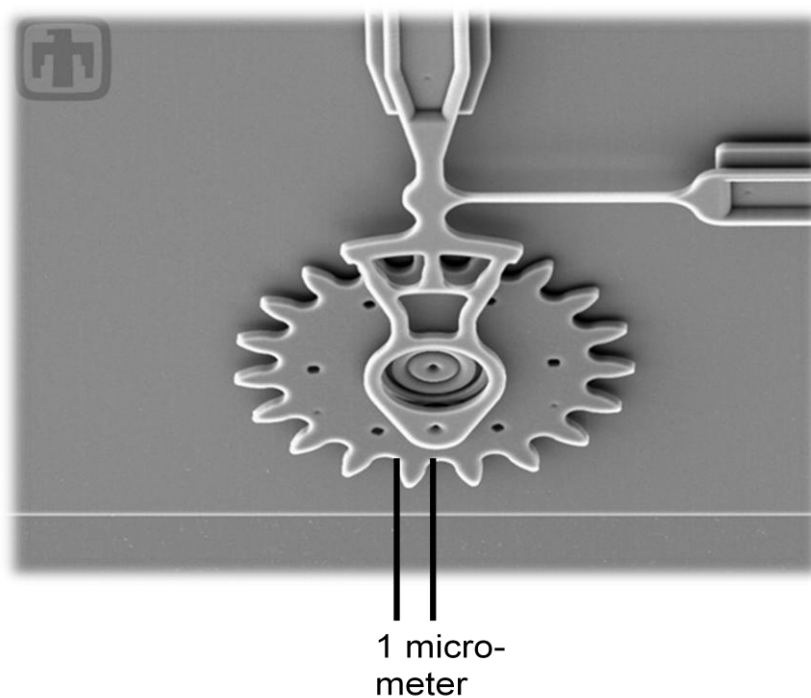
تاکید MEMS بر استفاده از سیلیکون به وضوح ناشی از تحقیقات گسترده با مواد سیلیکونی و استفاده از این مواد در ساخت مدار های مجتمع میکرو الکترونیک بوده است. ساخت ادوات MEMS تنها بر پایه سیلیکون نبوده بلکه از دیگر مواد نظیر پلیمر ها ، شیشه ، کو ارتز و حتی فلزات نیز استفاده می شود.

دلیل استفاده روز افزون از ادوات MEMS قابلیت مینیاتور سازی ادوات موجود ، توسعه ادوات جدید که توانایی عملکرد در مقیاس بزرگ را نداشته و نیاز به ارتباط با دنیای میکرو دارند ، است. مینیاتور سازی یا کوچک سازی با کم کردن مواد مصرفی موجب صرفه جویی در هزینه ها می شود ، همچنین کاهش جرم و اندازه قابلیت استفاده در مکان هایی را دارند که ادوات قدیمی هرگز نمی توانند داشته باشند. به عنوان مثال می توان به شتاب سنج های جایگزین سنسور های کیسه هوای قدیمی اشاره کرد یا شتاب سنج هایی که در دوربین های دیجیتالی جهت ثابت کردن عکس به هنگام لرزش دست به کار می روند. مزیت دیگر MEMS قابلیت مجتمع شدن آن است بدین معنی که به جای سیم کشی و لحیم کاری بین قسمت های مختلف یک سیستم (شامل سنسور ها ، محرک ها و ...) بر روی برد مدار چاپی (PCB) امکان مجتمع شدن MEMS بر روی سیلیکون و ارتباط مستقیم با قسمت میکرو الکترونیکی وجود دارد. این قبیل ادوات شامل قسمت های نمونه برداری ، فیلترینگ ، ذخیره ی داده ها ، محرک ها ، اهرم ها ، ارتباطات و همه و همه به صورت مجتمع در سایز کمتر از حدود ۱۰۰ میکرو متر هستند پس همان طور که مشاهده کردیم قابلیت MEMS فقط کوچک سازی نیست.

میکروسنسورها تغییرات پیرامون سیستم را بوسیله دریافت اطلاعات پدیده های مکانیکی ،
حرارتی، مغناطیسی ، شیمیایی یا الکترو مغناطیسی نشان می دهند. اهرمها ، دنده ها و پیستونها
موتورها(شکل ۱) و حتی توربین های بخار به خوبی بوسیله MEMS ساخته می شوند.

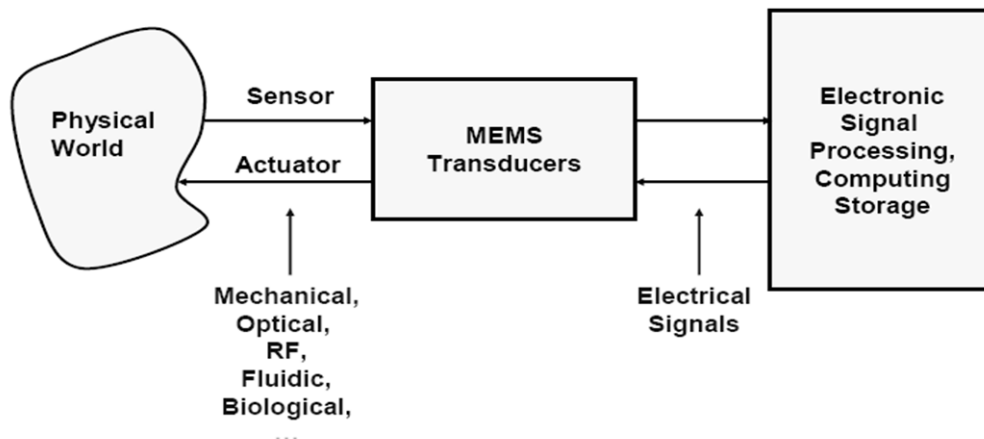


شکل ۱ الف- میکرو موتور ساخته شده با استفاده از فناوری MEMS



ب- چرخ دنده ساخته شده با استفاده از فناوری MEMS

MEMS System



شکل ۲- جایگاه MEMS

ادوات MEMS که تا کنون به صورت تجاری تولید شده اند به ۶ دسته کلی تقسیم می شوند.

Product category	Examples
Pressure sensor	Manifold pressure (MAP), tire pressure, blood pressure..
Inertia sensor	Accelerometer, gyroscope, crash sensor...
Microfluidics / bioMEMS	Inkjet printer nozzle, micro-bio-analysis systems, DNA chips...
Optical MEMS / MOEMS	Micro-mirror array for projection (DLP), micro-grating array for projection (GLV), optical fibre switch, adaptive optics...
RF MEMS	High Q-inductor, switches, antenna, filter..
Others	Relays, microphone, data storage, toys...

شکل ۳ دسته بندی ادوات MEMS

از شرکت های مطرح در زمینه ساخت ادوات MEMS می توان به Motorola ، Analog

Sensoror ، Devices و ... اشاره کرد.

شتاب سنج های MEMS

شتاب سنج یک قطعه ی الکترو مکانیکی است که نیروی شتاب را اندازه گیری می کند. این نیرو ممکن استاتیک باشد ، مانند نیروی جاذبه زمین یا دینامیک مانند نیرو های ناشی از حرکت اجسام. در گذشته در مقالات گوناگون شاهد بررسی انواع شتاب سنج ها بوده ایم. در میان انواع آن ها شتاب سنج های پیزوالکتریک بیشتر مورد بررسی قرار می گرفتند ولی می دانیم که این شتاب سنج ها بسیار بزرگ و زمخت هستند. انسان ها در تلاش برای دستیابی به وسایل کوچک تر که کاربرد بیشتری داشته باشد تحقیقات در زمینه ی میکرو الکترونیک را آغاز کردند و این گونه شتاب سنج های MEMS توسعه یافتند. اولین شتاب سنج میکرو ماشینه کاری شده در سال ۱۹۷۹ در دانشگاه استنفورد طراحی شد ولی حدود ۱۵ سال طول کشید تا استفاده از آن رایج شد. در سال ۱۹۹۰ شتاب سنج های MEMS سبب ایجاد تحولی بزرگ در صنعت خودروسازی جهت استفاده در سیستم Airbag خودرو شد. از آن پس کاربرد آن ها روز به روز بیشتر شد تا جایی که امروزه در حفاظت Hard disk لپتاپ ها در اثر ضربه یا کنترل کننده های کامپیوتری نیز از آن ها استفاده می شود.

اخیراً صنعت ساخت سنسور ها کاملاً به صورت مجتمع در آمده که این امر سبب افزایش کاربرد آن ها در صنایع مختلف شده است. شتاب سنج های میکرو ماشین شده دارای فناوری توانایی هستند و از لحاظ تجاری پتانسیل خوبی دارند. مصرف کم توان ، فشرده بودن و حساسیت بالا از امتیازات این گونه سنسورها است.

اساس کار شتاب سنج های MEMS:

روش های گوناگونی برای ساخت شتاب سنج ها وجود دارد. بعضی از آن ها از اثرات پیزوالکتریک بهره می برند و دارای ساختار ها کریستالی میکروسکوپیکی هستند که در اثر نیروی شتاب وارد بر آن ها ولتاژی تولید می کنند. روش دیگر سنس تغییرات ظرفیت خازنی است که در این مقاله به بیان آن خواهیم پرداخت. این روش ویژگی های جالب توجهی دارد: برای ساخت آن ها در اغلب موارد به جز فرآیند میکرو ماشینکاری نیاز به فرآیند خاصی نیست. خازن ها هم می توانند به عنوان سنسور و هم به عنوان محرک عمل کنند. حساسیت بالایی دارند و مکانیزم های هدایتی آن ها ذاتاً به دما وابسته نیست. ظرفیت بین دو صفحه ی خازنی با صرفنظر کردن از شار عبوری از لبه ها برابر است با :

$$C_0 = \epsilon_0 \epsilon \frac{A}{d} = \epsilon_A \frac{1}{d} \quad (1)$$

تغییر هر کدام از این پارامتر ها سبب تغییر ظرفیت می شود و ممکن است سنسورهای گوناگون بر اساس یکی از این پارامتر ها عمل کنند به عنوان مثال سنسور های شیمیایی یا سنسورهای رطوبت بر اساس تغییر ϵ کار می کنند در حالی که شتاب سنج ها بر پایه ی تغییرات پارامتر d کار می کنند. شتاب سنج ها از یک جرم مقاوم متحرک با صفحاتی که به سیستم تعلیق مکانیکی متصل هستند تشکیل شده اند. صفحات متحرک و صفحات بیرونی ثابت به عنوان صفحات خازن عمل می کنند. ظرفیت خازنی فضای آزاد بین صفحات متحرک و صفحات بیرونی C_1 و C_2 تابع تغییرات جابه جایی X_1 و X_2 هستند.

$$C_1 = \epsilon_A \frac{1}{x_1} = \epsilon_A \frac{1}{d+x} = C_0 - \Delta C, \quad C_2 = \epsilon_A \frac{1}{x_2} = \epsilon_A \frac{1}{d-x} = C_0 + \Delta C. \quad (2)$$

اگر شتاب صفر باشد ، ظرفیت های C_1 و C_2 برابر هستند زیرا در این حالت $X_2 = X_1$ ، فاصله X که در شکل نشان داده شده است در اثر تغییرات شتاب تغییر خواهد کرد و اگر $X \neq 0$ تغییرات ظرفیت از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$C_2 - C_1 = 2\Delta C = 2\epsilon_A \frac{x}{d^2 - x^2} \quad (3)$$

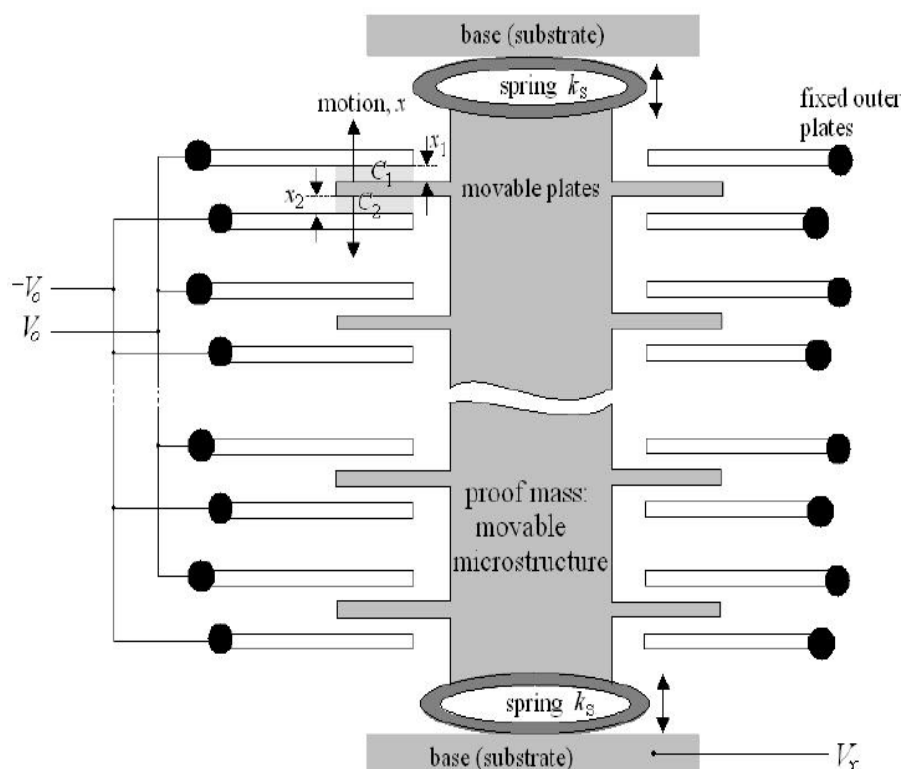
اندازه گیری ΔC به کمک معادله های غیر خطی زیر صورت می گیرد:

$$\Delta C x^2 + \epsilon_A x - \Delta C d^2 = 0 \quad (4)$$

برای جابجایی های کوچک می توان از جمله ی $\Delta C x^2$ صرفنظر کرد و به معادله ی زیر رسید:

$$x \approx \frac{d^2}{\epsilon_A} \Delta C = d \frac{\Delta C}{C_0} \quad (5)$$

یک نتیجه از این معادله این است که جابه جایی تقریباً متناسب با تغییرات خازنی ΔC است.



شکل ۴- ساختار شتاب سنج: صفحه مقاوم از طریق فنر ها به *substrate* متصل شده است که فقط می تواند به سمت بالا یا پایین حرکت کند. صفحات ثابت و متحرک در نقش خازن هستند.

همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است ، هر سنسور شامل چندین مجموعه ی خازنی است. تمام خازن های بالایی به صورت موازی خازن معادل C_1 را تشکیل می دهند و به همین نحو خازن های پایینی خازن معادل C_2 را تشکیل می دهند. در غیر این صورت تغییرات خازنی قابل سنس کردن نبود.

اکنون بیا یک مدار الکتریکی ساده را که بتواند این تغییرات خازنی را اندازه گیری کند ، بررسی کنیم. مداری شبیه آن چه که در شکل ۵ نشان داده شده است به عنوان مثال ما شتاب سنج ساخته شده توسط شرکت *Analog Devices* به شماره ی (ADXL05) که دارای ۴۶ جفت خازن است را در نظر می گیریم. صفحات ثابت سنسور توسط موج مربعی یا دامنه ی V_0 و فرکانس 1 MHz درایو می شوند. موج های مربعی که صفحات بالایی و پایینی را درایو می کنند 180° درجه اختلاف فاز دارند. می توان این

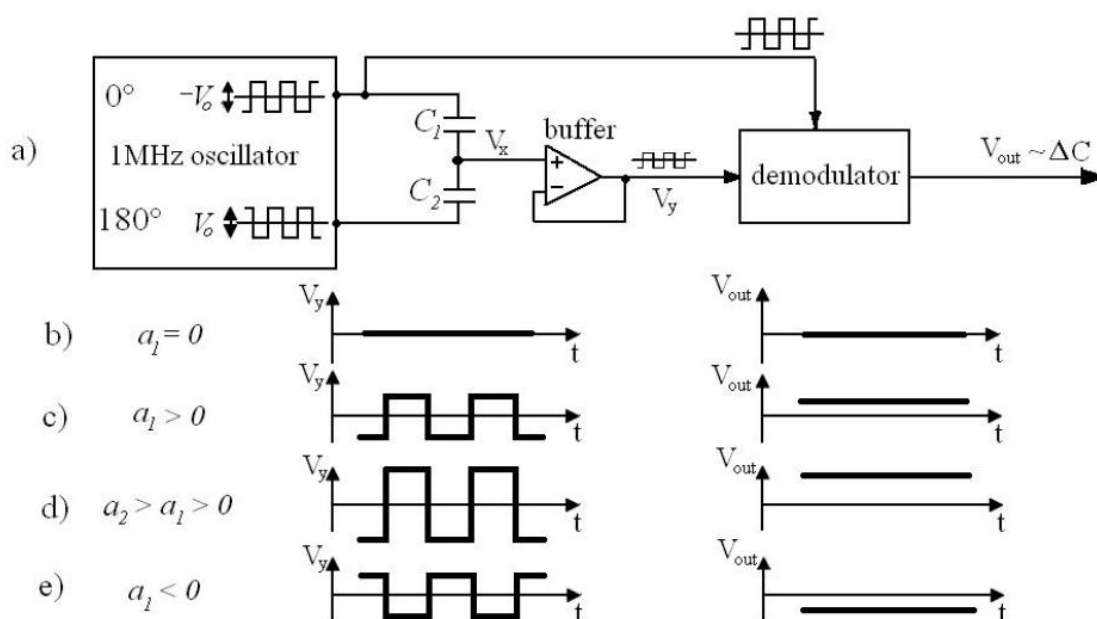
سیستم را یک تقسیم کننده ی ولتاژ مجسم کرد که خروجی آن به بافر و دمودلاتور می رود. قبل از هر چیز ولتاژ خروجی V_x برای ما مهم است که همان ولتاژ صفحه ی مقاوم است:

$$(V_x + V_0)C_1 + (V_x - V_0)C_2 = 0$$

با جایگذاری در روابط ۲ و ۵ خواهیم داشت:

$$V_x = V_0 \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} = \frac{x}{d} V_0 \quad (7)$$

دامنه ی موج مربعی V_x متناسب با شتاب خواهد بود. مشکلی که وجود دارد این است که این سیگنال بسیار ضعیف و نویزی است. هنگامی که شتابی وجود نداشته باشد ($a_1=0$) ، صفحه ی مقاوم حرکتی نخواهد داشت و ولتاژ خروجی صفر خواهد بود. اگر سنسور تحت شتاب قرار گیرد ($a_1>0$) ولتاژ خروجی V_x متناسب با ولتاژ ورودی V_0 طبق معادله ی ۷ تغییر می کند. برای جلوگیری از تضعیف سیگنال ، V_x را پس از بافر می خوانیم ، اگر شتاب را معکوس کنیم ($a_1<0$) سیگنال های V_x و V_y منفی می شوند. دمودلاتور علامت شتاب را به ما می دهد زیرا این دمودلاتور حاصلضرب V_y و موج مربعی V_0 را بر می گرداند. اکنون ما ولتاژ خروجی V_{out} به همراه علامت شتاب را در اختیار داریم.



شکل ۵-ا) مدار الکتریکی که شتاب را به کمک تغییرات خازنی اندازه گیری می کند. (b) هنگامی که شتابی وجود نداشته باشد ولتاژ خروجی صفر خواهد بود. (c) تا (e) اگر شتاب صفر نباشد مطابق شکل ولتاژ خروجی با دامنه و علامت مناسب رو در اختیار خواهیم داشت.

برای یک فنر ایده آل طبق قانون *Hook* رابطه ی زیر را داریم :

$$F_S = k_S x \quad (8)$$

با جایگذاری معادله تفاضلی زیر را خواهیم داشت:

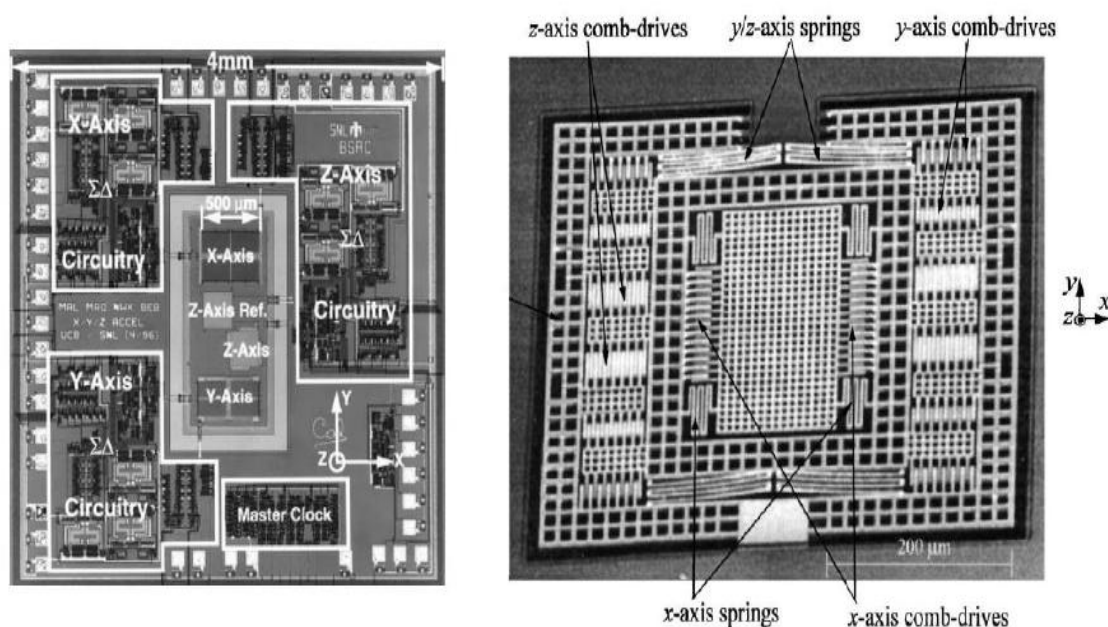
$$a = \frac{k_S}{m} x \quad (9)$$

بنابراین شتاب به عنوان تابعی از جابجایی رابطه ی زیر را به دست می دهد :

$$a = \frac{k_S d}{m V_0} V_x \quad (10)$$

و طبق معادله ی ۷ شتاب متناسب با ولتاژ خروجی خواهد بود.

اکنون بهتر است کمی با مقادیر حقیقی آشنا شویم. جرم صفحه ی مقاومتی در حدود $0.1\mu g$ کمترین ظرفیت قابل سنس برابر 20 pf و فاصله ی بین صفحات خازنی در حدود $1.3\mu m$ است. مثال بالا یک شتاب سنس یک محوره بود. اگر شتاب سنس شامل مجموعه ای از خازن ها باشد که در راستای عمودی قرار گرفته اند شتاب سنس دو محوره خواهد بود. یعنی تغییرات شتاب را در دو محور اندازه گیری می کند. شکل ۶ شتاب سنجی را نشان می دهد که شتاب را در سه محور x, y, z اندازه گیری می کند.



شکل ۶- الف) ساختار شتاب سنس سه بعدی. دارای سه سنسور متفاوت برای اندازه گیری شتاب در سه راستای

x, y, z و سه مدار الکترونیکی مجزا برای هر محور (ب) ساختار بدون نمایش قسمت الکترونیکی

اکنون بیایید برخی از پارامترهای شتاب سنس ها را بررسی کنیم. یکی اینکه شتاب سنس دارای خروجی آنالوگ یا دیجیتال باشد. دیگری اندازه گیری شتاب در یک، دو یا سه محور است. شتاب سنس با دقت $\pm 1.5 g$ برای اندازه گیری شتاب چ اذبه مناسب است در صورت داشتن دقت $\pm 2 g$ می توان از آن در حرکت خودرو و در صورت داشتن دقت $\pm 5 g$ و بیشتر می توان در کاربرد هایی که توقف و شروع حرکت ناگهانی وجود دارد، استفاده کرد. پارامترهای بعدی پهنای باند خواهد بود پهنای باند

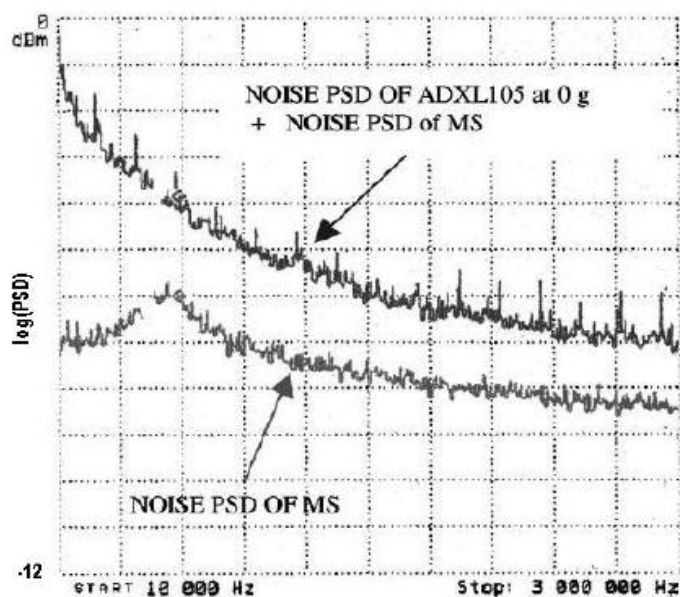
عبارتست از فرکانسی که در آن شتاب اندازه گیری می شود. فرکانس اسپلاتور باید بسیار بزرگتر از فرکانس پهنای باند باشد زیرا مدار الکترونیکی باید بتواند تغییرات خازنی را سریع تر از تغییرات شتاب اندازه گیری کند.

نویز در شتاب سنج های MEMS

از آن جا که شتاب سنج های MEMS در بسیاری از سیستمها کاربرد دارند، مشخصه ی نویز آنها بسیار مهم است. شتاب سنج ADXL05 از شرکت ANALOG DEVICES دارای چگالی نویز ولتاژی در حدود $500\mu g/\sqrt{Hz}$ و محصول جدید تر آن یعنی ADXL202E دارای چگالی نویز ولتاژ $200\mu g/\sqrt{Hz}$ است، همان طور که از واحد مشخص است چگالی نویز ولتاژ با معکوس جذر پهنای باند رابطه دارد. هر چه سریع تر تغییرات را بخوانیم دقت پایین می آید. اگر بخواهیم در مورد منابع نویز صحبت کنیم، سه منبع نویز اولیه در شتاب سنج های MEMS وجود دارد. که عبارتند از :

- نویز ناشی از ارتعاشات مکانیکی فنر
- نویز ناشی از مدارات الکترونیکی
- نویز ناشی از سیستم اندازه گیری

اگر بخواهیم نویز شتاب سنجی را که بررسی کردیم (ADXL05) ببینیم. می توان به شکل زیر که عملکرد سنسور در $0g$ ، $+1g$ و $-1g$ را نشان می دهد، رجوع کنیم.



شکل ۷- نمایش خصوصیات نویزی شتاب سنج

همان طور که مشاهده می شود شتاب سنج های MEMS در فرکانس پایین دارای نویز نوع $1/f$ و در فرکانس های بالا نویز نوع گاوسی دارند.

اندازه ی PSD (Power Spectrum Density) نویز در شتاب $\pm 1g$ کمی بیشتر از PSD نویز در $0g$ است که علت این مقدار بیشتر می تواند ناشی از ارتعاش مکانیکی فنر در شتاب $\pm 1g$ باشد.

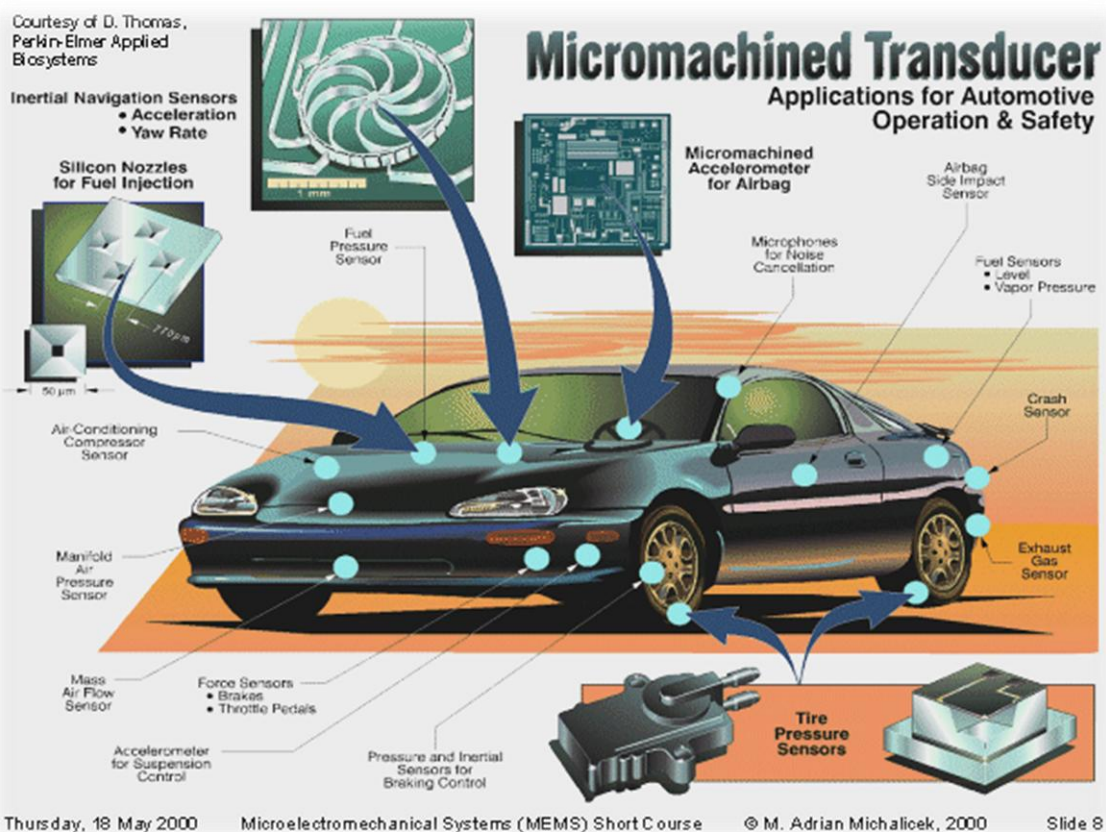
کاربرد ها:

کاربرد شتاب سنج ها هر روز بیشتر و بیشتر می شود. امروزه شاهد کاربرد آن ها در media

Player ها و وسایل سرگرمی نیز هستیم. بویژ در smart phone های شرکت هایی همچون

Apple, iPhone و Nokia.

به عنوان مثال شرکت نوکیا در گوشی 5500 مدل Sport از شتاب سنج سه محوره ای برای شناسایی حرکات دست استفاده کرده بدین صورت که با حرکت دست در راستای افقی موزیک بعدی پخش خواهد شد. دوربین های دیجیتال نظیر دوربین Power Shot از شرکت cannon جهت ثابت کردن عکس به هنگام لرزش دست از شتاب سنج استفاده می کنند. اخیرا شرکت های IBM و APPLE در لپتاپ های خود از شتاب سنج های MEMS جهت حفاظت hard-disk در مقابل ضربات بهره بره اند و تونسته اند به کمک این ادوات لپتاپ های ضد ضربه تولید کنند، بدین صورت که در لحظه ی افتادن لپتاپ بر روی زمین شتاب سنج ها این ضربه ی ناگهانی را سنس کرده و hard-disk را خاموش می کنند تا هد آن در اثر ضربه آسیب نبیند. در عملکردی مشابه شتاب سنج هایی با حساسیت بسیار بالا در سنسور های فعالسازی کیسه هوا در هنگام تصادف به کار می روند که توانایی تشخیص سریع شتاب منفی ناشی از تصادف و فعال کردن کیسه هوا را دارند. اخیرا ژيروسکوپ ها نیز در سیستم های هدایتی ضد لغزش (ASS) از شتاب سنج های MEMS بهره برده اند.



شکل ۸- کاربرد تکنولوژی MEMS در خودرو

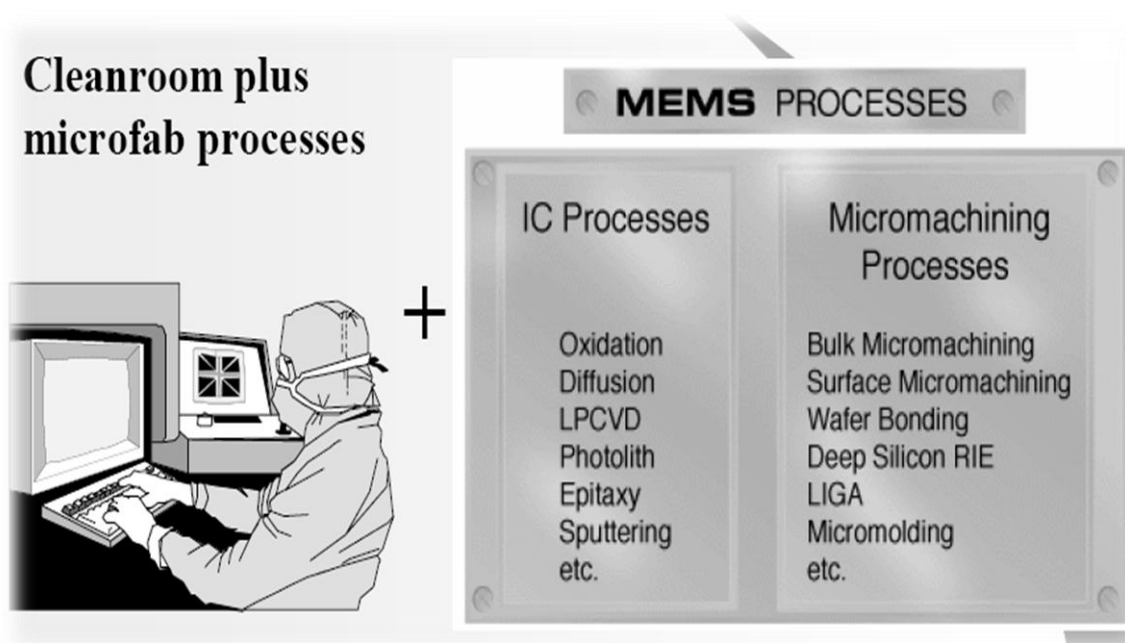
شتاب سنج ها همچنین دارای کاربرد های Real-Time در سیستم های کنترلی فضایی و نظامی هستند. تسلیحات هوشمند (موشک ها، پرتابه ها، راکت ها و...) نمونه هایی از این کاربرد ها هستند.

ساخت ادوات MEMS

ادوات MEMS بی نهایت کوچکند. موتور های متحرک کوچکتر از قطر مو، در عین حال تکنولوژی MEMS اصولاً در باره اندازه ها بحث نمی کند. MEMS معمولاً به وسیله تکنولوژی سیلیکونی ساخته می شود. زیرا سیلیکن دارای خواص خوبی است که آن را به یک انتخاب عالی برای کاربرد های مکانیکی سطح بالا تبدیل کرده است، برای مثال نسبت استحکام به وزن سیلیکون از

بسیاری از موارد مهندسی دیگر بالاتر است که این خاصیت دست یافتن به ادوات مکانیکی دارای پهنای باند زیاد را ممکن می کند .

همان طور که در شکل زیر نشان داده شده است در ساخت ادوات MEMS دو پروسه مطرح است یکی شامل همان مراحل معروف ساخت IC است که با آن ها آشنا هستیم (برای پیاده سازی قسمت الکترونیکی) و دیگری مراحل میکروماشین کاری برای پیاده سازی قطعات مکانیکی بر روی سیلیکن است.



شکل ۹-فرآیندهای ساخت ادوات MEMS

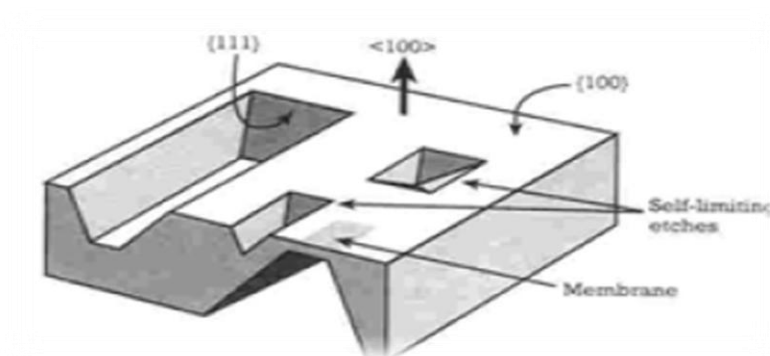
روش های میکرو ماشینکاری

دو روش معمول در فرآیند میکرو ماشینکاری ادوات MEMS وجود دارد که عبارتند از :

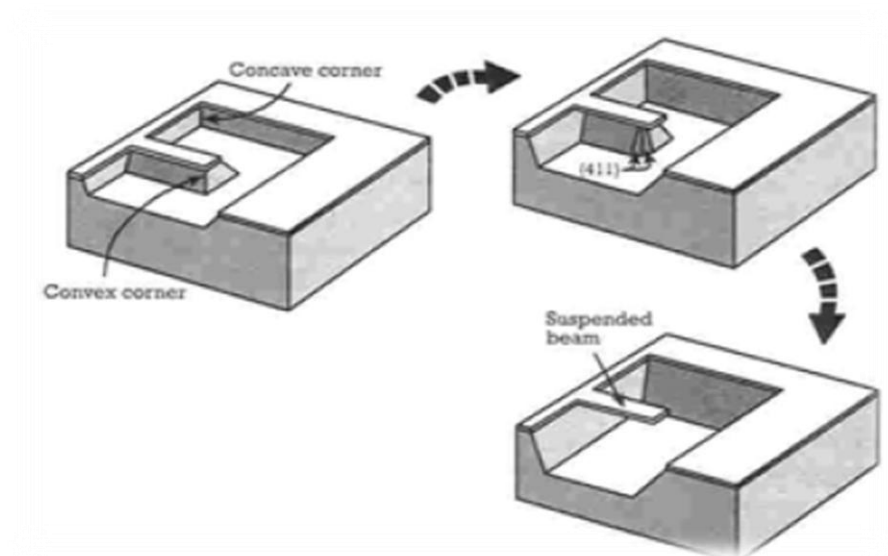
- ماشینکاری حجمی
- ماشین کاری سطحی

ماشینکاری حجمی **Bulck Micromachining**

فرآیند تشکیل میکرو ساختارها با برداشتن قسمت هایی از Substrate است. این فرآیند به کمک روش های (Dry و Wet) etching صورت می گیرد که در شکل زیر نشان داده شده است:



الف



ب

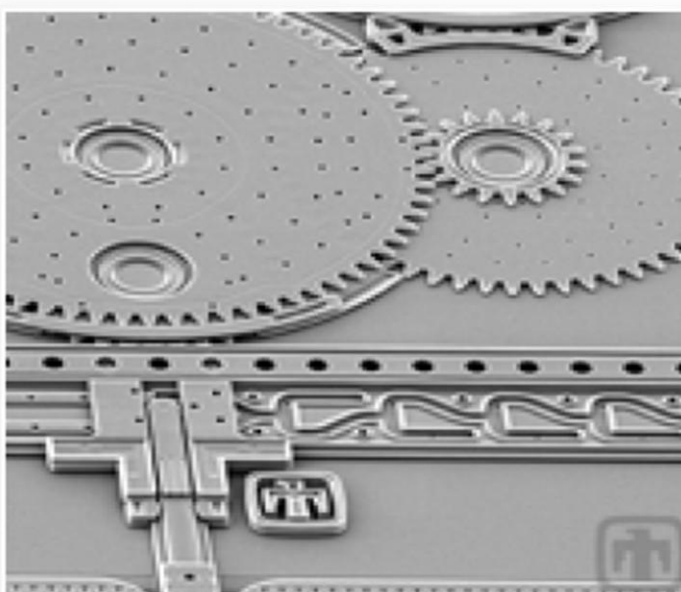
شکل ۱۰- ماشینکاری حجمی

ماشین کاری سطحی Surface Micromachining

این نوع ماشین کاری بر خلاف ماشین کاری حجمی ساختارها را با افزودن مواد به صورت لایه به لایه بر روی سطح Substrate تشکیل می دهد.



الف



ب.



ج

شکل ۱۱- ماشین کاری سطحی

منابع

١)University of Ljubljana, Faculty for mathematics and physics," MEMS ACCELEROMETERS"pp 2 to 7

٢) Mohamed Gad-el-Hak,"MEMS Applications",crc press,pp 97 to 105

٣)Other Enternet Web Sites and Ebooks