

پهنای باند، سطح نویز، حساسیت محوری، drift، خطی بودن، محدوده دینامیک، قابلیت ابقا شوک و مصرف توان می باشد. فرکانس رزونانس نیز مهم است زیرا محدوده مفید فرکانس بالای سنسور معمولاً کسری از فرکانس رزونانس است، در حالی که حساسیت و جابجایی به ازای هر g شتاب را تعیین می کند.

$$dg = \frac{Mg}{K_{sp}} = \frac{g}{W_0^2}$$

به طوری که :

dg : جابجایی به ازای هر g

M و  $K_{sp}$  : جرم و ثابت فنر قطعه

$$9.8 \text{ m/s}^2 : g$$

$W_0$  : فرکانس رزونانس زاویه ای

عموماً جابجایی عنصر حسگر بخش ضروری فرآیند حس کردن می باشد و dg بخش بهره حلقه باز سنسور است، بنابراین منجر به رابطه شدیداً معکوس بین حساسیت و پهنای باند برای هر کلاسی از سنسورها می شود.

نویز در شتاب سنج ها مشکلاتی بوجود می آورد. برای خود سنسور، برای خروجی الکترونیکی اش، برای damping مکانیکی و همه مقاومت های الکتریکی، سنسورهای MEMS خیلی کوچک هستند بنابراین نویز جانسون مقاومتیهای مکانیکی باید در نظر گرفته شوند، در حالی که در سنسورهای بزرگتر این مشکل وجود ندارد.

تنها یک باکتری یا گرده خاک می تواند نیروی بزرگی را روی اجزا MEMS ایجاد کند. نیروی Brownian عبارتست از :

$$F_B = \sqrt{4KTD} \left( \frac{N}{\sqrt{HZ}} \right)$$

که باعث حرکت Brownian می شود ( $X_B$ ) :

$$X_B = \frac{\sqrt{4KTD}}{K_{sp} + JWD - W^2M} \left( \frac{M}{\sqrt{HZ}} \right)$$

در حالی که :

$D =$  ضریب Damping جرم مرجع که به وسیله ثابت فنر تأمین می شود. پاسخ به شتابی که حرکت یکسانی را

تولید می کند،  $X_B$  :

$$Q = W_0 \frac{M}{D}$$

$$W_0 = \sqrt{\frac{K_{SP}}{M}}$$

$$g = 9.8 \frac{m}{S^2}$$

نویز شتابی معادل Brownian را می دهد.

$$g_{n,B} = \frac{\sqrt{4KTD}}{M_g} = \frac{1}{g} \sqrt{\frac{4KTW_0}{MQ}} \left( \frac{g}{\sqrt{HZ}} \right)$$

از معادله بالا می بینیم که یک جرم بزرگ و  $Q$  بزرگ ( damping کم ) در به دست آوردن سطح نویز کم کمک می کند. برای دستیابی به جرم بزرگی در یک سنسور میکروماشین شده نوعاً به یک ویفری که یک جرم مرجع ضخیمی بیرون آن تراشیده شده است، نیاز است. برای نویز خیلی کم، ثابت damping باید وسیله معلق کردن جرم مرجع در یک خلا از فنرهای الاستیک خالص کاهش یابد. فیدبک از دور زدن در حوالی فرکانس رزونانس جلوگیری می کند.

### میکرو سنسور شتاب

میکرو شتاب سنج ها یکی دیگر از ادوات مهم MEMS هستند. همه سنسورهای شتاب دارای یک جسم سنگین هستند که تقریباً معلق است و از یک یا چند طرف با میله هایی به یک قاب وصل شده است. تحت تأثیر شتاب، اینرسی جسم باعث می شود که نیرویی به آن وارد شود و کمی جابجا شود. شتاب با خواندن تنش وارده شده به میله ها که روی آنها piezo-resistor ها هستند، اندازه گیری می شود، اولین میکرو شتاب سنج ها ۱۹۷۰ ساخته شدند و از همان آغاز برای اندازه گیری استرس وارد شده به پایه های جسم معلق، از مقاومت پیزو استفاده شد. برای جلوگیری از

انحراف بیش از حد جسم معلق می توان صفحات محفظه را با فاصله کمی از جسم ساخت یا این که جسم معلق را در محفظه ای پر از روغن قرار داد.

شکل ۳ - ۶

شتاب سنج ها دو دسته هستند. یک دسته حساسیت کمی دارند و شتاب های زیاد را اندازه می گیرند. از این شتاب سنج ها در سیستم ترمز ( Antilok Brake System )، سیستم تعلیق ( Automatic Balance Control ) و سیستم کیسه هوایی خودروها می توان استفاده کرد. نوع دیگر حساسیت زیادی دارند و می توان از آنها در ربات ها، سیستم هدایت اتومبیل و نیز ناوبری هواپیما و فضا پیما و زیر دریایی ها استفاده کرد. لازم به ذکر است که هر شتاب سنج، شتاب را فقط در یک جهت اندازه می گیرد و برای اندازه گیری شتاب در دستگاه مختصات سه بعدی باید از سه شتاب سنج عمود بر هم استفاده کرد.

علاوه بر شتاب سنج های ساخته شده با میکروماشینینگ توده ای که در دهه ۱۹۸۰ به بازار آمدند ( از طرف IC Sensor, Lucas Nova Sensor )، شتاب سنج های ساخته شده با میکروماشینینگ سطحی نیز اخیراً برای کاربرد سیستم کیسه هوایی خودروها وارد بازار شده اند. ( ADXL50 از Analog Devices، MMAS40G از Motorola ) سیستم باز کردن کیسه هوایی، یکی از کاربردهای نسبتاً جدید میکرو شتاب سنج ها ست. در این سیستم ها هنگامی که خودرو، شتاب منفی زیادی پیدا می کند، به کیسه هوایی فرمان باز شدن داده می شود. سنسورهای بکار رفته در این سیستم ها باید دارای اندازه کوچک، کیفیت بالا و قیمت کم باشند. قیمت هر یک از این سنسورها در سال ۹۷ حدود ۴ دلار بوده که در سال ۲۰۰۰ به ۲ دلار رسید.

این نسل های جدید شتاب سنج ها برای کارایی بیشتر، شامل یک مدار مجتمع پیچیده نیز هستند. سنسورهای بر مبنای اینرسی شامل سنسورهای شتاب و ژيروسکوپ های ناوبری در سال ۲۰۰۰ بازاری حدود ۲/۷ میلیارد دلار داشتند.

طرز کار این سنسورها قبلاً توضیح داده شد و ساختار و روش ساخت آن نیز شبیه سنسورهای فشار مبتنی بر مقاومت پیزو است. طرح ساده یک نمونه آن که دارای ۴ پایه است در شکل زیر دیده می شود.

شکل ۳- ۷

### ۳- ۲ - ۲ - سنسور شتاب فازنی

طرز کار و ساختار این سنسور ها شبیه فشار سنج های خازنی است. به این ترتیب که یکی از صفحات خازن در نقش جسم معلق است و در اثر شتاب، حرکت می کند. در شکل زیر، یک نمونه از این سنسورها دیده می شود که دارای توانایی تفکیک ( Resolution )  $1\mu\text{g}$  در فرکانس 1Hz است و برای ناوبری بکار می رود.

شکل ۳- ۸

موتور لا نیز یک سنسور شتاب خازنی ساخته است که محدوده عمل آن تا 50g و حساسیت آن  $40\text{mV/g}$  در محدوده فرکانس 0.6Hz - 1KHz است. این شتاب سنج برای کاربرد در سیستم کیسه هوایی طراحی شده است. این سنسورها با هر دو فرآیند میکروماشینینگ توده ای و سطحی قابل ساخت هستند. البته با فرآیند دوم اندازه آن کوچکتر می شود و مدار جانبی نیز به طور یکپارچه روی آن قابل ساخت است. در حالی که در میکرو شتاب سنج خازنی که با فرآیند میکروماشینینگ توده ای ساخته شده، مدار روی یک چیپ دیگر ساخته شده و با چیپ سنسور بسته در یک بسته ( Package ) قرار می گیرد.

در شکل زیر یک نمونه از سنسور شتاب خازنی مشاهده می شود که به شکل مناسبی برای حفاظت در مقابل شتاب زیاد و جابجایی بیش از حد جسم معلق طراحی شده است.

شکل ۳ - ۹

### ۳ - ۲ - ۳ - سنسور شتاب تشدید

در این سنسور از خاصیت تغییر فرکانس تشدید یک جسم تقریباً معلق بر اثر استرس برای اندازه گیری شتاب استفاده می شود. معمولاً برای اندازه گیری تغییر فرکانس، از حالت خازنی استفاده می شود نه مقاومت پیزو. در ساخت این سنسورها نیز ایده های مختلفی وجود دارد. از جمله این که دو نوسانگر مکانیکی باشند که بر اثر شتاب فقط فرکانس یکی از آنها تغییر کند. مثلاً به یکی از آنها وزنه ای وصل باشد. در این حالت با اندازه گیری اختلاف فرکانس تشدید آنها می توان مقدار شتاب را تعیین کرد. شتاب در جهت های دیگر نیز، از آنجا که بر هر دوی آنها تاثیر یکسان می گذارد، در اختلاف فرکانس آنها تأثیر نمی گذارند. General Motors سنسوری از این نوع ساخته که حساسیتش  $160 \text{ Hz/g}$  است.

### ۳ - ۲ - ۴ - سنسور شتاب تونلی

در این سنسورها از پدیده تونل زنی الکترون ها بین دو جسم نزدیک به هم و وابستگی مقدار آن به فاصله هر دو جسم، استفاده شده است. این سنسورها حساسیت خیلی بالایی دارند و در فرکانس های تا چند کیلو هرتز هم می توانند کار کنند. پدیده تونل زنی بین یک جسم معلق خیلی کوچک و تیز است که با طلا پوشانده شده است. از آنجا که پدیده تونل زنی در محدوده خیلی کوچک و محدودی رخ می دهد، بهتر است سنسور را در یک سیستم فیدبک دار قرار داد

که سعی کند فاصله بین دو الکتروود را ثابت نگه دارد. مقدار نیروی لازم برای ثابت نگه داشتن جسم معلق نشان دهنده مقدار شتاب است. اعمال نیرو به جسم معلق را می توان توسط یک محرک پیزو الکتریک انجام داد.

### ۳ - ۲ - ۵ - شتاب سنح پیزو الکتریک

می دانیم که مواد پیزو الکتریکی در اثر خمیدگی و تغییر شکل، یک ولتاژ کوچک تولید می کنند. همان طور که در شکل ۳ - ۱۰ مشاهده می شود با چسباندن دو جسم پیزو الکتریک به یکدیگر که در جهت عکس هم ولتاژ تولید میکنند. می توان یک سنسور شتاب ساخت که سیگنال خروجی آن دو برابر شده است، با وارد شدن شتاب به جسم، بدنه آن خم می شود و یک سیگنال کوچک (که دو برابر هم شده) تولید می شود. البته این سیگنال باید تقویت و فیلتر شود.

شکل ۳ - ۱۰

### ۳ - ۳ سنسور سرعت زاویه ای (ژیروسکوپ)

ژیروسکوپ سنسوری است که سرعت یا مقدار تغییر زاویه را اندازه می گیرد. بر خلاف تصور، میکروژیروسکوپ ها معمولاً از قسمت چرخان که نیازمند یاتاقان است استفاده نمی کنند. به همین دلیل می توان به آسانی آنها را در اندازه های بسیار کوچک و به صورت پشته ای ساخت.

میکروژیروسکوپ ها معمولاً بر اساس انتقال انرژی بین دو مد ارتعاشی یک ساختار کار می کنند. این انتقال انرژی به خاطر شتاب کوریولیس انجام می شود.

شتاب کوریولیس به نام دانشمند و مهندس فرانسوی G.G de Coriolis به شتابی اطلاق می شود که به قاب مرجع در حال چرخش یک سیستم وارد می شود و مقدار آن متناسب با سرعت چرخش است. برای فهم بهتر اثر کوریولیس، طبق شکل زیر یک ذره را تصور کنید که با سرعت  $V$  در فضا در حال حرکت است. ناظر روی محور  $X$  از دستگاه مختصات  $XYZ$  نشسته است. اگر دستگاه مختصات با سرعت زاویه ای  $\Omega$  دور محور  $Z$  شروع به چرخش کند،

ناظر تصور می کند که ذره را عوض کرده و با شتاب  $2v \times \Omega$  به طرف محور X می آید. این پدیده مبنای کار تقریباً همه ساختارهای ژيروسکوپ ارتعاشی است.

### شکل ۳ - ۱۱

در سمت راست شکل ۳ - ۱۱ یک ساختار کلاسیک ژيروسکوپ ارتعاشی، مشاهده می شود. طرز کار آن به این صورت است که ابتدا، میله های فوقانی که یک سرشان آزاد است با دامنه و فرکانس برابر به ارتعاش در می آیند. وقتی که سیستم می چرخد، نیروی کوریولیس سینوسی به شکل تفاضلی و در جهت های عمود بر ارتعاش اصلی به آنها وارد می شود. با اندازه گیری دامنه این تفاضل ارتعاش ها می توان مقدار نیروی کوریولیس و از روی آن نیز، مقدار سرعت زاویه ای را بدست آورد. ایجاد ارتعاش می تواند به صورت الکترواستاتیکی، الکترومغناطیسی یا پیزوالکتریک باشد. اندازه گیری ارتعاش انجام شده بر اثر نیروی کوریولیس را نیز می توان به صورت خازنی، پیزوالکتریک یا با مقاومت پیزو انجام داد. البته آشکار سازی ارتعاش را به صورت نوری نیز می توان انجام داد که خیلی گران است.

در جدول زیر مشخصات سه دسته از ژيروسکوپ ها مشاهده می شوند. هر کدام از آنها در موقعیت خاصی به کار می روند. یک پارامتر خیلی مهم در ژيروسکوپ مقدار حساسیت آن نسبت به حرکت خطی ( و نه دورانی ) است.

### شکل ۳ - ۱۲

معروف ترین نوع ژيروسکوپ که در دانشگاه میشیگان ساخته شده است، در شکل زیر مشاهده می شود.

www.kandooon.com

شکل ۳- ۱۳

این ژيروسکوپ شامل یک حلقه سیلیکونی، ۸ فنر به شکل نیم دایره که در محور به هم متصلند و تعدادی الکتروود در اطرافش است. این الکتروودها برای ایجاد و حس کردن ارتعاش به حلقه به کار می روند. روش کار به این صورت است که ابتدا الکتروودها با دامنه خاصی حلقه را به ارتعاش در می آورند. در اثر چرخش حلقه، یک نیروی کوریولیس با زاویه ۴۵ درجه نسبت به ارتعاش اولیه، به حلقه وارد می شود که آن را در همان راستا به ارتعاش در می آورد، الکتروودهای حسگر این تغییر در کل دامنه ارتعاش حلقه را به صورت خازنی اندازه می گیرند و به این صورت، نیروی کوریولیس و به تبع آن سرعت زاویه ای تعیین می شود. این ساختار، مزایایی نسبت به ژيروسکوپهای دیگر دارد. از جمله این که به خاطر متقارن بودن حلقه، وجود حرکت خطی در راستاهای گوناگون، اثری بر مقدار سرعت زاویه ای اندازه گیری شده ندارد. این وسیله دارای قدرت تفکیک  $0.5^\circ/s$  در پهنای باند 25HZ است. خطی بودن آن نیز در محدوده  $\pm 100^\circ/s$  بهتر از 0.2% است.

### ۳- ۱۴ - سنسور گاز ما سفت میکروماشین شده

در این جا طراحی، ساخت و پرداخت اولین سنسور گاز ما سفت، که توان کمی مصرف می کند، شرح داده می شود. این سنسور گاز با استفاده از میکروماشینینگ توده ای Anisotropic سیلیکون ساخته می شود. یک مقاومت گرماده یک دیود که به عنوان سنسور حرارت استفاده شده و چهار ماسفت در یک ناحیه معلق به وسیله یک غشای دی الکتریک قرار دارند. غشاء ( Membrane ) دارای ضریب هدایت حرارتی پائین می باشد، بنابراین از نظر حرارتی اجزاء الکترونیکی را از بدنه چیپ جدا می سازد. این قطعه حرارت پائین مصرف توان را به مقداری در حدود 90mw برای آرایه ای از چهار ماسفت در دمای کاری  $170^\circ C$  کاهش می دهد. سه تا از این ماسفت ها، گیت های پوشیده شده با فلزات catalytic نازک دارند و به عنوان سنسورهای گاز به کار می روند. ما سفت چهارمی گیت استاندارد پوشیده شده با نیتريد دارد و می تواند به عنوان یک مرجع عمل کند، سنسور تحت محیط های گازی مختلف آزمایش شده و حساسیت گازی خوبی نسبت به هیدروژن و آمونیاک نشان داده است. این سنسور گاز که دارای آرایه ای از



ماسفت های کم مصرف است برای کاربردهای حسگر گاز قابل حمل، بینی های الکترونیکی و اتومبیل ها متناسب می باشد. بر روی قطعات حساس به گاز اثر میدانی ( Gas FETS ) در حدود ۲۵ سال مطالعاتی انجام شده است. تعویض گیت ماسفت با موادی که خصوصیات، Catalytic ( Ir, Pt, Pd ) دارند، اجازه آشکار سازی چندین قطعه گاز مثل هیدروژن، آمونیاک، مونوکسید کربن و الکل را می دهد. در طول سال ها، نشان داده شده است که این قطعات برای کاربردهایی نظیر نشان دهنده های هیدروژن و آشکار سازی نشتی و در بینی های الکترونیکی مناسب هستند. ابزارهای قابل حمل اتومبیل ها وسایلی هستند که در آنها قطعات کم مصرف و کم هزینه مورد نیاز می باشند. در طی دهه گذشته، کوششهای بسیاری در زمینه سنسور گاز، برای کاهش مصرف توان سنسورهای اکسید فلزی انجام شده است. ترکیب میکروماشینینگ سیلیکون با تکنولوژی لایه نازک برای ساخت سطوح میکرونی که عایق حرارتی خوبی هستند استفاده شده است. اخیراً بعضی از گروه های تحقیقاتی روی اجزای الکترونیکی عایق حرارتی که روی پوسته ها ساخته می شوند و از میکروماشینینگ سیلیکون و تکنولوژیهای CMOS استفاده می کنند، کار کرده اند. اما هیچ کدام از آنها گزارشی در زمینه سنسورهای گازی ماسفت ارائه نداده اند. در این نوع سنسورها، عایق گیت باید بعد از پردازش اجزا الکترونیکی، بدون حفاظت باقی بماند سپس یک لایه نازک حساس به گاز، نظیر فلز Catalytic یا یک اکسید فلزی یا یک پلیمر بالای عایق برای تشکیل گیت ترانزیستور لایه نشانی می شود. سنسورهای گاز ما سفت معمولاً در دمای بالای  $100^{\circ}\text{C}$  و در محدوده  $175^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$  بسته به استفاده از روش سیلیکون استاندارد کار می کنند. مصرف توان یک سنسور توده ای با استفاده از پردازش سیلیکون استاندارد در حدود  $0.5 - 1.0 \text{ W}$  نشان داده شده است.

آرایه های FET گازی کم توان مدهای کاری جدیدی را برای این نوع از قطعات حس گر گاز به ارمغان می آورند و این تکنولوژی را با محصولات دیگر در بازار قابل رقابت می کنند.

## طراحی

### الف - چیپ سنسور

سنسور ماسفت بدست آمده به هدف کاهش جریان های نشست درین - سورس و کاهش مصرف توان این نوع سنسورهای گازی طراحی شده است، هر قطعه از چهار Gas FET، یک سنسور حرارت ( دیود ) و یک گرم کن، همان طور که در شکل نشان داده شده، تشکیل شده است. سایز چیپ  $4 \times 4 \text{ mm}^2$  می باشد.

[www.kandooocn.com](http://www.kandooocn.com)

شکل ۳ - ۱۴

#### ب - اجزای الکترونیکی

دیود و درین - سورس ترانزیستور به وسیله انتشار تک مرحله ای از اتم های تزریق شده ( فسفر و بور ) از لایه های اکسید CVD ساخته شده اند. بنابراین، کوتاهترین کانال برای ترانزیستور 0.5 میکرومتر می باشد که وابسته به فرآیند انتشار مورد استفاده می باشد. گرمکن یک مقاومت نیمه هادی می باشد که در طول فرایند القا P-well ( P - well Implanation ) ساخته شده است. مقدار مقاومت گرمکن در دمای اتاق  $120 \Omega$  می باشد.

دو آرایه با چهار ماسفت متوسط یا کوچک با کانالی با طول 10.5 میکرومتر طراحی شده اند که هر دو دارای نسبت  $\frac{W}{L} = 30$  می باشند. جریان های نشتی سورس - درین به وسیله مینیوم کردن سطوح پسوند P-n در نواحی سورس و درین محدوده شده اند. بنابراین پیوندهای فلزی / نیمه هادی مستقیماً روی سورس و درین و کنار گیت قرار گرفته اند. در Gas FET ها، درین سورس های متصل به هم دارند. آنها با جریان ثابتی بین درین و سورس کار می کنند. در تستی که روی چیپ برای بدست آوردن خصوصیات الکتریکی ماسفت انجام شد، درین و گیت برای بدست آوردن انعطاف پذیری بیشتر در طی ساخت و پرداخت به هم متصل نبودند.

#### ه - مصرف توان

جرم حرارتی و در نتیجه مصرف توان سنسور به وسیله طراحی می نیمم شده است. Gas FET ها، گرمکن و دیود در یک ناحیه سیلیکونی عایق از بدنه چیپ به وسیله یک غشاء دی الکتریک قرار گرفته اند.

شکل ۳ - ۲۳

غشاء ( membrane ) از لایه نیتريد سيليكون Low - Stress که با فرآیند LPCVD بدست آمده، ساخته شده است. یک لایه اکسی نیتريد یا نیتريد سيليكون PEVCD به عنوان لایه Passivation روی Aluminum metal Ilization استفاده شده است. سایر غشاء  $1.8 \times 1.8 \text{ mm}^2$  می باشد. جزیره سيليكون دارای مناطقی است و ضخامتی به ترتیب در حدود  $10 \mu\text{m}, 900 \times 900 \mu\text{m}$  دارند.

### فرآیند ساخت

فرآیند ساخت شامل سه بخش اصلی زیر می شود :

- ۱ - ساخت نواحی تزریق شده در سيليكون برای ساخت اجزاء الكتريکی.
- ۲ - رشد اکسید گیت و لایه نشانی غشاء و Metallization و لایه های Passivation ( روکش گذاری شده )
- ۳ - آزاد کردن غشاء و تشکیل جزیره سيليكون به وسیله حکاکی تر Anisotropic سيليكون.

### الف - اجزاء الكترونیکی.

فرآیند القاء در یک زیر لایه ۱۰۰ میلی متری سیلیکون ( $25 \Omega\text{-cm}$  - ntype دو طرفه - صیقلی - ضخامت  $400 \mu\text{m}$ ) برای تشکیل ماسفت p - well و ناحیه p-doped از دیود و گرمکن حرارتی آغاز می شود. لایه نشانی و الگو دهی لایه های اکسید CVD که با فسفر و بور تزریق شده اند و در ادامه انتشار اتم های تزریقی برای ایجاد نواحی  $n^+, p^+$  قطعات الكترونیکی در همین مرحله انجام می شود.

### ب - Passivation, Metallization, Membrane

بخش دوم با رشد از یک اکسید گیت حرارتی (  $100\text{nm}$  ) و در ادامه لایه نشانی یک لایه سيليكون - نیتريد LPVCD که Low - Stress می باشد، انجام می شود. سپس، گیت و پیوندها در نیتريد

ایجاد می شوند. Metallization به وسیله فرایند تبخیر آلومینیوم لایه نشانی می شود. ( e – beam evaporation ) که بعداً برای بدست آوردن پیوندهای اهرمی روی سیلیکون Anneal ( گرم کردن و به آهستگی سرد کردن ) می شود. یک راکتور PECVD برای لایه نشانی یک لایه Passivation اکسی نیتريد / نیتريد سیلیکون استفاده می شود. ( کم استرس – کم کشش ) بعد از الگو دهی لایه Passivation. فلزات Catalytic نازک ( CM:pt,Ir,Pd ) لایه نشانی و الگو دهی و Anneal می شوند. بنابراین GasFET ها سه فلز Catalytic مختلف ساخته شده دارند و چهارمی گیت آلو مینیومی دارد و می تواند به عنوان مرجع استفاده شود.

### ج - میکروماشینینگ توده ای سیلیکون

از آنجایی که لایه نشانی لایه های حکاکی CM قبل از میکروماشینینگ توده ای سیلیکون انجام شده است، طرف جلویی ویفر در طول حکاکی طرف عقب سیلیکون در KOH حفاظت می شود. اول، لایه اکسید رشد یافته حرارتی روی بخش پشتی ویفر برای انجام نواحی جزیره ای سیلیکون الگو دهی می شود. لایه اکسید به عنوان mask در محلول KOH ( ۴۰٪ در 60°C ) در طول حکاکی به عمق 10µm سیلیکون که درست مطابق جزیره سیلیکون است، عمل می کند.

سپس، بعد از برداشتن اکسید محافظ سیلیکون کاملاً با استفاده از 52% KOH در 60°C حکاکی می شود. شکل ۳-۱۶ منظره پشتی جزیره سیلیکون نهایی تشکیل شده به وسیله حکاکی Anisotropic سیلیکون را نشان می دهد. یک محلول KOH غلظت ۵۲٪ برای کاهش نرخ حکاکی سطوح ( ۳۱۱ ) استفاده می شود. نسبت میان نرخ های حکاکی در جهات موازی ( جهت ۳۱۱ ) طرح ریزی شده روی سطح ( ۱۰۰ ) و خط عمود ( ۱۰۰ ) به سطح ویفر ( ۱۰۰ ) حدوداً برای این محلول KOH برابر ۱/۴ می باشد.

شکل ۳-۱۶

با وجود این حقیقت که لایه های اکسید و نیتريد مورد استفاده به عنوان غشا در مقایسه با سیلیکون به آهستگی حکاکی می شوند، آزاد سازی غشاء با کنترل زمانی دقیق نرخ حکاکی سیلیکون برای دستیابی به ضخامت جزیره سیلیکون مورد نظر (  $10\mu m$  ) انجام می شود.

در دستیابی به کنترل دقیق در ضخامت جزیره سیلیکون، متوقف کننده های حکاکی الکترومکانیکی ( etch stop ) می توانند استفاده شوند.

کل فرآیند ساخت با استفاده از ۱۱ ماسک انجام می شود که در ۱۴ مرحله فوتولیتوگرافی ( ۴ مرحله برای لایه های CM ) استفاده می شوند.

فرآیند ساخت با استفاده از عایق های گیت مختلف نظیر نیتريدسیلیکون (  $Si_3N_4$  )، اکسید آلومینیوم و اکسید تانتالیوم (  $Ta_2O_3$  ) سازگاری دارد. دو تای آخری یک mask اضافی نیاز دارند.

#### د - بسته بندی

قطعات ما سفت توده ای ( نه روی غشاها ) روی یک بسته ۱۶ پین DIL ( Dual in line ) کاملاً فلزی با یک مقاومت حرارتی خارجی و سنسور حرارتی دیود SiC قرار داده شده بودند. با توجه به سنسورهای ماسفت کم توان معلق روی غشاها، آنها روی یک بسته ۱۶ پین To-8 سوار بودند. اجزا در دو مورد با استفاده از چسب ( epo - tek3081 ) ثابت بودند. Pad ها روی قطعات به پین های بسته با استفاده از روش پیوند اولتراسونیک طلا یا سیم های آلومینیومی متصل بودند.

#### ه - خصوصیات

خصوصیات الکتریکی اجزاء الکترونیکی با استفاده از Parameter Analyzer نیمه هادی شرکت HP انجام میگیرد. ثابت های زمانی حرارتی به وسیله اعمال یک ولتاژ مربعی ( مولد پالس فیلیس PM 5705 ) روی گرم کن و مانیتور کردن سیگنال مربعی و ولتاژ دیود در  $100\mu m$  روی یک اسیلوسکوپ ( Tektronix ۴۰۰ مگاهرتز ) تعیین می شود. مصرف توان در واحد حرارت به وسیله اندازه گیری دما با استفاده از دوربین مادون قرمز AVI02100، با یک پیکسل رزولوشن  $20 * 12.5\mu m^2$  حاصل می شود. بررسی حرارتی در فشار محیط و دمای اتاق انجام می شود. رابطه مقاومت و ولتاژ  $R(V)$  و در بالاترین دما (  $T_{max}$  ) مانیتور می شود.

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

شکل ۳ - ۱۷

اندازه گیری های حس کردن گاز با استفاده از سیستم Mixing گاز و بینی الکترونیکی انجام می شود. سیستم Mixing گاز اجازه مخلوط کردن حداکثر ۴ نمونه گازی با یک گاز حامل را می دهد. هیدروژن ( 62.5,125,250ppm ) و آمونیاک ( 40,20,10pmm ) به عنوان نمونه گازی و گاز حامل هوای خشک مصنوعی فلوی نهایی  $100 \text{ ml} / \text{min}$  بود. طول پالس نمونه در 30s تنظیم شده بود و زمان بازیابی ( Recovery time ) در گاز حامل 300s بود. اینها مقادیر مورد استفاده برای کاربرد در بینی الکترونیکی می باشد. سنسورها به یک PCB متصل شده بودند، که حصول دیتا و کارکردن سنسورها را ممکن می ساخت. جریانی در حدود  $100 \mu A$  برای راه اندازی هم سنسورهای ما سفت و هم سنسورهای دما ( دیود ) استفاده شده بود. دما در حدود  $140^{\circ}\text{C}, 170^{\circ}\text{C}$  تنظیم شده بود که دمای کاری نوعی برای این سنسورها می باشد. کل عملیات با استفاده از PC مدیریت می شد و نتایج بدست آمده در نرم افزار Senstool مشخص می شد.

## نتایج و بحث

### الف - خصوصیات الکتریکی

خصوصیات الکتریکی ما سفت ها و دیود نشان داد که آنها برای کار در دماهای بالا تا حدود  $200^{\circ}\text{C}$  در جریان  $100 \mu A$  مناسب هستند. اضافه شدن این جریان می تواند اجازه کار در دماهای بالاتر (  $225^{\circ}\text{C}$  در  $200 \mu A$  ) را ایجاد کند. انتخاب دیگر استفاده از یک Retrograded p-well برای مینیم کردن جریان نشتی در دمای بالا می باشد. حساسیت دمای دیود اندازه گیری شده در کوره  $2.4^{\text{mV}} / \text{C}^{\circ}$  می باشد. غشاها در طی گرم شدن داخلی سنسور خم می شوند و بنابراین سیگنال دیود نیز به وسیله تغییر شکل دادن سیلیکون وابسته به خصوصیات پیزو رزیستیو آن تحت تأثیر قرار می گیرد.

بنابراین، دیود قبل از کار کردن برای تعریف رابطه ولتاژ در برابر دما و نقطه کار درست در  $170^{\circ}\text{C}$ ,  $140^{\circ}\text{C}$  باید کالیبره شود. مقدار گرما دهی مقاومت از مقدار انتظار رفته  $225^{\circ}\text{C}$  در دمای اتاق بالاتر بود. مقاومت در  $120^{\circ}\text{C}$  به وسیله پیشگیری در تعدیل برای طراحی و پردازش، می توانست تنظیم شود. مقدار مقاومت گرما ده به عنوان تابعی از دما رفتاری بر طبق یک نیمه هادی دارد. آن از دمای اطلاق تا رسیدن به یک مقدار ماکزیمم در حدود  $150^{\circ}\text{C}$  افزایش می یابد و سپس کاهش می یابد.

### ب - خصوصیات مرارتی

مصرف توان کمی ( 90mw ) در دمای کاری  $170^{\circ}\text{C}$  برای آرایه چهار Gas FET در مقایسه با  $1.0-0.5$  برای یک Gas FET استاندارد وجود دارد. شکل ۳ - ۱۸ تغییر دمای سنسور به عنوان تابعی از توان تلف شده به وسیله گرمکن را نشان می دهد. فرآیند میکروماشینینگ سیلیکون که کنترل بهتری را روی ابعاد جزیره سیلیکون می دهد، می توانست بهتر مورد استفاده قرار گیرد، نظیر استفاده از متوقف کننده های حکاکی الکترومکانیکی. یک جزیره باریکتر و نازکتر سیلیکون می تواند تلف گرما را به وسیله هدایت و هم رفتی کاهش دهد که این وابسته به فاصله میان جزیره سیلیکون و بدنه چیپ و منطقه جزیره سیلیکون می باشد.

شکل ۳ - ۱۸

ثابت زمانی حرارتی وقتی که گرمکن در 6V پالس می خورد ( 70mw ) برای زمان بالا رفتن ( Rising time ) برابر 65ms و برای زمان خنک شدن ( Cooling time ) در حدود 100ms می باشد. شکل وسط 3 - 18 تغییر ولتاژهای گرمکن و دیود ( در جریان ثابت  $100\ \mu\text{A}$  ) را به عنوان تابعی از زمان نشان می دهد. جرم حرارتی پائین اجازه کار کردن سنسور را در مد حرارتی پالسی یا سیکلی می دهد، که مصرف توان را کاهش می دهد.



#### ه - حساسیت های گاز

سنسورهای ماسفت کم توان پاسخ های کوچکتری از سنسورهای ماسفت توده ای استاندارد مورد استفاده در S-SENCE دارند، اما در محدوده مفید برای کاربردهای حس کردن گاز مراحل پردازش مختلف مورد استفاده برای ساخت غشاء و کیفیت فلزات Catalytic لایه نشانی شده ممکن است باعث مشاهدات مختلفی شود. شکل 3-19 حساسیت گاز به هیدروژن و آمونیاک را برای دو ماسفت کم توان پوشیده شده با لایه های نازک Ir و Pt که 8nm ضخامت دارند و در دمای حدود 140°C هستند را نشان می دهد. حساسیت به گاز خوبی در دمای 170°C مشاهده می شود. با توجه به نتایج بدست آمده، سنسور ماسفت کم توان برای کاربرد در بین الکترونیکی مفید است. تحقیقات بیشتر برای ارزیابی کردن تأثیر دماهای مختلف در طول اندازه گیری های گاز به هدف بهبود حساسیت به گاز و انتخاب گری نیاز می باشد.

شکل ۳ - ۱۹



#### ۴ - میکرو محرکها ( Micro Actuators )

میکرو محرکها ادواتی هستند که بر دنیای اطراف اثر می گذارند. مزیت میکرو محرکها این است که مقدار کاری که روی محیط انجام می دهند، بسیار کوچک و در نتیجه بسیار دقیق است. مزیت دیگرشان، کوچک بودن اندازه آنها است. هرچه مقدار میکرو محرک بزرگتر باشد، انرژی قابل اعمال توسط آن نیز بیشتر است. قیمت یک میکرومحرک نیز به اندازه سطح ویفر مصرف شده، متناسب است. هر چند که پیچیدگی و نسبت منظر آن نیز در تعیین قیمتش مؤثر هستند. برای ساخت میکرو محرکها از طیف وسیعی از مواد شامل فلزات، پلاستیکها و سرامیکها استفاده می شود. میدانیم که در دنیای ماکرو، معمولاً محرکها، الکترومغناطیسی هستند. اما در دنیای میکرو بخاطر مسائل مربوط به کوچک بودن میکروماشین ها، نیروی الکترومغناطیسی چندان مناسب نیست. هرچند که کارهایی در مورد محرکهای الکترومغناطیسی نیز گزارش شده است، اما بیشتر محرکها از قواعد دیگری مثل نیروی الکتروستاتیک برای حرکت کردن استفاده می کنند. در جدول زیر مثالهایی از میکرو محرکها جمع بندی شده است. بخاطر کمبود جا این جدول چندان کامل نیست.

جدول صفحه ۱ :

---

#### ۴-۱ - محرکهای با تمرکز جانبی ( Side Drive Actuators )

اصطکاک یک مشکل بزرگ در طراحی میکرو موتورها است. ضریب اصطکاک بین سطوحی که خیلی صاف باشند، زیاد و متغیر است. یافتن راههایی برای غلبه بر اصطکاک، باعث پیشرفت مهمی در این رشته خواهد شد. اولین ایده ای که برای ساخت یک محرک گردان به ذهن می رسد، این است که مطابق شکل زیر دیسک را که دارای تعدادی الکتروود به صورت شعاعی است، روی یک صفحه که آن هم دارای الکترودهایی به صورت شعاعی است، قرار دهیم.

شکل ۴ - ۱

با اعمال ولتاژ بین الکترودهای صفحه و دیسک، نیروهای ایجاد شده بین الکترودها، آنها را به سوی هم می شکند. مؤلفه مماسی ( افقی ) این نیروها، باعث می شود که این دیسک آن قدر بچرخد که دو الکتروود روی هم قرار گیرند. متأسفانه در این حالت یک مؤلفه عمودی نیرو نیز وجود دارد که دیسک را به سمت صفحه زیرین فشار می دهد. این باعث می شود که نیروی اصطکاک افزایش یابد. و دیسک ممکن است اصلاً از جایش تکان نخورد.

یک ایده هوشمندانه برای حل این مشکل، تحریک جانبی ( Side Drive ) است. همان طور که در شکل زیر مشاهده می شود، الکترودها دور محیط دیسک قرار داده شده اند.

#### شکل ۴-۲

با قراردادن متقارن و روبروی هم الکترودها، در اطراف دیسک، نیروهای مخالف هم مؤلفه شعاعی را خنثی می کنند. مؤلفه های اصلی این نیروها دیسک را به سمت Substrate فشار نمی دهند. این الکترودها و دیسک با فرآیند میکروماشینینگ سطحی ساخته می شوند. البته خطاها و عدم تقارن هایی که در ساخت الکترودها وجود دارد، نیروهای کوچک نا متوازی ایجاد می کنند که باید با آنها مقابله شود.

یک روش دیگر برای غلبه بر نیروی عمودی، قرار دادن دیسک بین دو ساختار است، یکی سقف بالا و یک لایه سطح Substrate در پایین.

الکترودهایی که روی سقف Substrate ایجاد شده اند، برای راندن موتور استفاده می شوند. در این جا نیروی جاذبه ای که از طرف دو لایه زیری و رویی به دیسک اعمال می شوند، یکدیگر را خنثی می کنند و تقریباً نیروی عمود وارد بر سطح صفر است. در ابتدا در سیستم هایی که به این روش ساخته شدند، سقف رویی خیلی نازک بود. به همین دلیل این لایه در اثر نیروی الکتروستاتیک به سمت پایین خم می شد و با دیسک تماس پیدا می کرد. با ضخیم کردن سقف این مشکل بر طرف شد. یک مزیت این ساختار نسبت به ساختار با تحریک جانبی، بالاتر بودن خازن بین الکترودهای آن است که باعث افزایش گشتاور می شود.

اگر روتور به زمین وصل شود و ولتاژها به الکترودهای رویی و زیری اعمال شوند، محل روتور ناپایدار می شود، زیرا به عنوان مثال، اگر در اثر یک اختلال، روتور از نقطه پایدار خود کمی به سمت بالا منحرف شود، نیروی جاذبه

الکترواستاتیک به سمت بالا افزایش می یابد و روتور بیشتر به سمت بالا می رود. اگر روتور به منبع ولتاژی وصل نباشد و شناور باشد، نیروهای ناپایدار کننده کمتر هستند. البته به علت القای بار استاتیکی نیز، نیروهای ناپایدار کننده به وجود می آیند.

ردیف اول در جدول این بخش یک موتور الکترواستاتیک با قطر ۱۲۰ - ۶۰ میکرومتر را نشان می دهد. این یک موتور با تحریک جانبی است. چرا که نیروی الکترواستاتیک بین لبه های روتور و استاتور عمل می کند. روتور و استاتور از لایه های پلی سیلیکون به ضخامت ۲ میکرومتر ساخته شده اند. استاتورها روی یک دایره قرار گرفته اند و به ولتاژ سه فاز وصل شده اند. اگر ولتاژ به ترتیب به سه استاتور اعمال شود، روتور هم زمان با آن می چرخد. ولتاژ ۳۰۰ ولت در طول ۲ - ۱ میکرومتر می افتد. گشتاور به دست آمده نیز حدود چند pNm تخمین شده می شود. سرعت چرخشی گزارش شده حدود ۵۰۰ rpm است. البته این سرعت، کمتر از مقدار محاسبه شده است. علت نیز اصطکاک بین روتور و محور است. هر چند که لایه نیتريد سیلیسیم روی صفحه لغزنده نشانده شده است که اصطکاک را کاهش می دهد.

در ردیف دوم نوع اصطلاح شده موتور با تحریک جانبی به چشم می خورد. با اصلاح طراحی، فرآیند ساخت و شرایط کار موتور، سازندگان آن به سرعت ۱۵۰۰۰ rpm با کار پیوسته به مدت یک هفته دست یافته اند. آنها صافی بین روتور و محور را کاهش دادند، سه گودی در زیر روتور برای قرار دادن تکیه گاه (Support) و تماس دهنده (Contact) الکتریکی ایجاد کردند و کل مجموعه را در محیط نیتروژن قرار دادند تا از اکسید شدن قطعات جلوگیری شود.

#### ۴ - ۲ محرک های شانه ای

محرک های شانه ای، ادواتی ساده و هوشمند هستند. همان طور که در شکل زیر نشان داده شده است، این ساختار دارای دندانهای متناوب است و شبیه دو شانه است که در هم فرو رفته اند.

شکل ۴ - ۳

یک شانه ثابت است و دیگری می توانند آزادانه حرکت کند. وقتی یک ولتاژ بین آند اعمال می شود، شانه متحرک به سمت شانه ساکن حرکت میکند. مقدار حرکت وابسته به مقدار ولتاژ است. شانه متحرک به یک فنر وصل می شود و بنابراین با تغییر ولتاژ، مقدار مسافت نیز تغییر می کند. در این روش، حرکت در مسافت نسبتاً زیادی قابل انجام است. ( چند میکرو متر ) انرژی مصرف شده برابر با حاصل ضرب نیروی الکتروستاتیک در فاصله طی شده است. اگر ولتاژ اعمال شده متناوب باشد، حرکت بصورت متناوب و تشدید می خواهد بود. برای معلق نگه داشتن شانه متحرک از سگدستهایی به شکل زیر استفاده می شود :

#### شکل ۴-۴

شکل کلی یک محرک شانه ای با قابلیت حرکت تشدید می در شکل زیر نشان داده شده است. الکترودها و سگدستهایی نگه دارنده شانه متحرک در شکل دیده می شوند.

#### شکل ۴-۵

در ردیف ۴ از جدول اول این بخش مثالی از محرک های شانه ای دیده می شود. در این سیستم، یک ولتاژ ۱۰ ولت AC که روی یک ولتاژ ۴۰ ولت DC سوار شده، حرکت تشدید می مورد نظر ما را با فرکانس معین ایجاد می کند. مقدار حرکت ۱۰ میکرومتر بوده و فرکانس تشدید ۱۸ KHZ و طول میله نگاه دارنده نیز ۲۰۰ میکرومتر بوده است. فوروهاتا و همکارانش، در سال ۱۹۹۱، تکنیک میکروماشینینگ با اکسید کردن را برای دستیابی به فواصل زیر میکرون بین الکترودهای ثابت و متحرک عرضه کردند. این کم کردن فاصله بین دو شانه، امکان کار با ولتاژ کم را که در مدارهای مجتمع استفاده می شود، را می دهد. هیرانو و همکارانش در سال ۱۹۹۲، توانستند حرکتی به مسافت ۷ میکرومتر با ولتاژ ۱۰ ولت ایجاد کنند.

#### ۴-۳ - محرک های هارمونیک

دیدیم که برای میکرو محرک های اصلاح شده نیز، اصطلاح یک مشکل مهم است، یک راه حل، جایگزینی تماس لغزشی در مرکز با تماس گردشی است. مهرگانی و همکاران در سال ۱۹۹۰ چنین نوعی از میکروموتور را ساختند. همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است، روتور یک حلقه ساده است که قطر داخلی آن کمی بزرگتر از محور است. وقتی ولتاژ به ترتیب به استاتور اعمال می شود، روتور در حرکتی غیر دایره ای می چرخد. بدون اینکه در محل تماس، لغزشی بین صفحات انجام شود.

#### شکل ۴-۶

از آن جایی که فاصله محیطی سوراخ روتور کمی بیشتر از محور است و بعد از هر گردش غیر دایره ای، روتور واقعاً قسمتی از دایره را می چرخد.

موتورهای هارمونیک چند مزیت دارند، یکی اینکه سطوح همیشه روی هم حرکت می کنند و هیچ اصطلاح سایش وجود ندارد. دوم این که چون سطوح می توانند خیلی به هم نزدیک شوند، با ولتاژهای معمولی انرژی بیشتری قابل تولید است. سوم این که بخاطر کم شدن دنده ها، موتور، گشتاور بیشتری، بخصوص در سرعت های پایین تولید می کند. البته یک عیب مهم نیز این است که تکنولوژی ساخت این نوع موتورها بر اساس تکنولوژی ساخت مدارهای مجتمع نیست.

موتورهارمونیک، مثال خوبی از ادواتی است که در دنیای میکرو به خوبی کار می کنند و در دنیای ماکرو، امکان کار ندارند. علت نیز این است که در دنیای ماکرو، نیروی اینرسی خیلی بیشتر از نیروی اصطکاک است. در حالی که بر عکس در دنیای میکرو، نیروی اینرسی خیلی کم بوده و نیروی اصطکاک غالب است.

#### ۴-۴ محرک های الکتروستاتیک

محرک های الکتروستاتیک بر اساس این معادله فیزیکی کار می کنند :

$$F = -\frac{\partial U}{\partial x}$$

F نیروی الکتروستاتیک است که بین دو صفحه محرک تولید می شود و U انرژی ذخیره شده در میدان الکتروستاتیک بین دو صفحه است. عمل مشتق گیری نیز نسبت به x، مقدار حرکت یکی از صفحه ها انجام می شود. شکل زیر ساختار دو صفحه را نشان می دهد. ساده ترین فرض، تقریب خازن با دو صفحه موازی است.

شکل ۴-۷

که در آن از اثر لبه ها صرف نظر می شود. با این فرض، انرژی ذخیره شده عبارتست از :

$$U = -\frac{1}{2} \epsilon_0 W L V^2 = -\frac{\epsilon_0 W L V^2}{2d}$$

نیروی F در جهتی که دو صفحه همدیگر را جذب می کنند برابر است با :

$$F_d = -\frac{\partial U}{\partial d} = -\frac{\epsilon_0 W L V^2}{2d^2} = -\frac{1}{2} \epsilon_0 A E^2$$

نیروی در جهت عرضی نیز چنین است :

$$F_w = -\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\epsilon_0 L V^2}{2d} = \frac{\epsilon_0 L d V^2}{2d^2} = \frac{1}{2} \epsilon_0 L d E^2$$

در روابط بالا،  $\epsilon_0$ ، ضریب گذر دهی خلا و A مساحت صفحه هاست. E نیز میدان الکتریکی است که بطور نوعی حدود ۱۰۰ ولت بر میکرون یا  $10^8 \text{ V/m}$  است.

نیروی الکتروستاتیک بین صفحات و بصورت نیرو بر واحد سطح ( یا فشار ) در نظر گرفته می شود. برای  $F_d$ ، این مساحت، مساحت صفحه هاست و برای  $F_w$ ، این مساحت، مساحت مشترک بین دو صفحه است. برای یک محرک الکتروستاتیک با ولتاژ ۱۰۰ ولت و فاصله هوایی یک میکرون، این فشار  $4.42 \times 10^4 \text{ N/m}^2$  است. بنابراین فشار

تولید شده توسط یک محرک الکتروستاتیک حدود نیم اتمسفر است. به عنوان مثال نیروی تولید شده توسط یک محرک با ولتاژ ۱۰۰ ولت بین صفحات با طول و عرض ۱۰۰ میکرون و فاصله یک میکرون، حدود  $4.42 \times 10^{-4} \text{N}$  است. این نیرو برای حرکت دادن یک قطعه ماده به ابعاد ۱۰۰ میکرون، نیروی قابل توجهی است و می تواند شتابی حدود  $10^5 \text{g}$  تولید کند. هر چند برای غلبه بر فشارهای دیگر (مثل بستن شیرها) معمولاً فشارهایی بیشتر از نیم اتمسفر لازم است. برای افزایش نیروی الکتروستاتیک، میتوان بین دو صفحه از ماده ای استفاده کرد که ضریب گذردهی بیشتری داشته باشد. اما این کار ممکن است به علت بیشتر بودن ویسکوزیته ماده، حرکت را مشکل تر کند. می توان با افزایش ولتاژ نیز نیرو را بیشتر کرد. نیرو با مجذور ولتاژ افزایش می یابد. اما این کار نیز مشکلاتی دارد، مثل شکست الکتریکی و قابلیت اطمینان و منبع ولتاژ لازم. یک مثال از محرک های الکتروستاتیک را می توان در شکل زیر مشاهده کرد :

#### شکل ۴ - ۸

در این سیستم، تعدادی الکتروود میله ای در یک صفحه قرار گرفته اند و روی آنها با عایق پوشیده شده است. اینها با سوئیچهایی به یک سر منبع وصل شده اند. استوانه ای هم که روی صفحه عایق قرار دارد و می تواند آزادانه بگردد، به سر دیگر منبع ولتاژ وصل شده است. با سوئیچ کردن و انداختن ولتاژ روی هر کدام از الکتروودهای درون صفحه، می توان استوانه را روی صفحه غلتاند. استفاده از نیروی الکتروستاتیک برای ایجاد حرکت، یک منبع جالب برای نیرو است. ولی در همه جا قابل استفاده نیست.

#### ۴ - ۵ محرک های مغناطیسی

اصول کار محرک های مغناطیسی همانند موتورهای الکتریکی معمولی است. یعنی نیرو در اثر عبور جریان از سیم در حضور میدان مغناطیسی ایجاد می شود. میدان مغناطیسی نیز توسط یک آهن ربای دائم یا جریان گذرنده از یک سلف ایجاد می شود. این محرک ها در مقایسه با محرک های الکتروستاتیک به ولتاژ کمتری نیاز دارند. اما توان بیشتری



مصرف می کنند، در ضمن اندازه بزرگتر و گشتاور بیشتری هم دارند. در اغلب موارد دارای آهن ربای دائمی نیز هستند که آن را می توان توسط فرآیند Liga لایه نشانی کرد.

اگر بخواهیم چگالی جریان عبوری از سیم ثابت بماند، با کوچک شدن سیستم، نیروی ایجاد شده به سرعت کم می شود. پس باید چگالی جریان عبوری زیاد شود. گرمای حاصله به علت کوچک بودن سیستم، معمولاً به راحتی قابل دفع است. البته گرمای ایجاد شده در موتور مغناطیسی در مقایسه با توان تلف شده در مدار کنترل و مدار Signal conditioning آن ناچیز است. اما به هر حال اتلاف توان، تعداد محرکهای قابل ساخت بر واحد سطح را محدود می کند. از دیگر عوامل محدود کننده این پارامتر، پیچیده بودن ساختار این نوع محرکها ( به دلیل لزوم سلف ) و نیز تداخل میدان های الکترومغناطیسی حاصل هستند. حداکثر جریان قابل عبور از سیم ها نیز به علت پدیده Electromigration محدود می شود.

از کارهای انجام شده در زمینه ساخت این نوع محرک ها، می توان به استفاده از ابر رسانه ها به منظور کمتر بودن اتلاف توان و نیز استفاده از مواد دیا مغناطیسی برای نگهداشتن روتور اشاره کرد.

#### ۴ - ۶ - محرکهای مبتنی بر خواص ویژه

برای تولید نیرو و ساخت محرکها، از خواص فیزیکی متعددی می توان استفاده کرد که به تعدادی از آنها در اینجا اشاره می شود.

#### ۴ - ۶ - ۱ محرکهای مبتنی بر خواص گرمایی

می دانیم که ترابرد گرما وابسته به شیب مکانی آن  $(dT/dx)$  است. اگر اندازه خیلی کوچک باشد، انتقال گرما نیز خیلی سریع خواهد بود. مثلاً در سیستم های میکرومکانیکی، می توان قطعات را در زمان هایی حدود چند میکرو ثانیه، گرم و سرد کرد. خاصیت انقباض و انبساط مواد می تواند این تغییر دما را به جابجایی تبدیل کند. گرمای تلف شده نیز خیلی کم بوده و حتی خیلی کوچکتر از توان تلف شده در مدار یک گیت AND است.

گرما را می توان با استفاده از یک مقاومت ایجاد کرد و جابجایی انجام شده نیز می تواند در حدود چند میکرومتر باشد.



#### ۴ - ۶ - ۲ - محرک های مبتنی بر آلیاژهای حافظه دار ( Shape Memory Alloys )

خاصیت حافظه دار بودن ( Shape memory effect ) در بعضی از آلیاژها به این صورت است که این مواد در زیر یک دمای خاص ( که بحرانی نامیده می شود ) تقریباً نرم هستند و می توان به راحتی شکل آنها را تغییر داد. اما بالاتر از آن نقطه، کریستال تغییر فاز می دهد و می خواهد به شکل قبلی خود برگردد. این بازگشت با نیروی زیاد انجام می شود و به همین دلیل، محرک مبتنی بر این خاصیت برای نیروهای زیاد مناسب است. این خاصیت در سال ۱۹۳۸ کشف شد و به تدریج معلوم شد که تعداد زیادی از آلیاژها این خاصیت را دارا هستند. تحول مهم در سال ۱۹۶۰ بود که معلوم شد که آلیاژ نیکل - تیتانیوم ( معروف به نیتینول ) به گونه خوبی این خاصیت را دارا است. بطوری که با تغییر درصد اجزاء آن، می توان دمای بحرانی آن را بین ۵۰ - ۱۶۶ درجه سانتی گراد تغییر داد. در ضمن تغییر درصد اجزاء آن نیز بین ۱۵ - ۱۰٪ و فشار تولیدی نیز حدود ۱۵۰۰۰ Map است. البته برای استفاده در محرک ها که باید میلیون ها بار عمل انبساط و انقباض انجام شود، معمولاً این اعداد حداکثر ۵٪ و ۲۰۰ Map هستند. بالا بردن دما را می توان با عبور جریان از یک مقاومت که در پشت قطعه تعبیه شده، انجام داد. برای تغییر شکل دادن قطعه در پائین تر از دمای بحرانی نیز می توان از یک قطعه دیگر این نوع مواد که دمایش بالا برده شده و حجمش بیشتر شده، استفاده کرد.

شکل ۴ - ۹

از کاربردهای محرک های مبتنی بر این خاصیت، می توان به میکرو روبات ها و نیز به خط کردن ( Alignment ) و تنظیم دقیق مکان فیبرهای نوری اشاره کرد.

#### ۴ - ۶ - ۳ - محرک های مبتنی بر خاصیت پیزو الکتریک

مواد پیزو الکتریک موادی هستند که در اثر وجود اختلاف پتانسیل الکتریکی اندازه شان تغییر می کند. اکسید روی از بهترین مواد دارای این خاصیت است. این محرک ها نیز همانند دو تای قبلی دارای نیروی زیاد و جابجایی کم هستند. از جالب ترین محرک های ساخته شده با این خاصیت، سیستم معروف به اسب پیزو الکتریک است :

[www.kandooocn.com](http://www.kandooocn.com)

#### شکل ۴ - ۱۰

طرز کار آن بدین شکل است که اول یکی از الکترودها بر روی سطح ثابت شده و دیگری آزاد می شود. با انداختن ولتاژ روی دو الکترودها، قطعه ZnO، منقبض شده و الکترودها آزاد حرکت می کنند. سپس الکترودها آزاد، ثابت شده و الکترودها ثابت، آزاد می شود و ولتاژ برداشته می شود. اکنون طول قطعه ZnO زیاد می شود و قطعه بازم به سمت جلو حرکت می کند. حرکت با تکرار سریع این مراحل ادامه پیدا می کند. این حرکت شبیه دویدن اسب است که یکی در میان پاها و دست هایش را روی زمین می گذارد.

با اعمال یک ولتاژ متناوب به ماده پیزو الکتریک می توان آن را به نوسان در آورد و با چسباندن آن به یک لایه اکسید روی، موج سطحی در فرکانس های صوت و فراصوت ایجاد کرد. این موج سطحی می تواند اجسامی را که روی آن سطح گذاشته شده اند را به حرکت در آورد. در شکل زیر مکانیزم این حرکت در سه حالت مختلف مشاهده می شوند.

[www.kandooocn.com](http://www.kandooocn.com)

#### شکل ۴ - ۱۱

در قسمت b، طول موج حدود ۱۰۰ میکرون (فرکانس ۱۰ KHz) است که شیارهایی با این عرض در زیر جسم بالایی ایجاد شده اند. در زیر هر یک از این شکل ها نمودار سرعت حرکت جسم بر حسب دامنه موج سطحی رسم شده است. لازم به ذکر است که علیرغم طولی بودن موج سطحی، دامنه ها در عرض حرکت موج ایجاد شده اند که به علت بالا آمدن قسمت فشرده شده ماده در ضمن عبور موج است. اگر این موج سطحی در یک مسیر حلقوی ایجاد شود، می توان طبق شکل زیر یک حلقه را نیز چرخاند.

[www.kandooocn.com](http://www.kandooocn.com)

شکل ۴ - ۱۲

این محرک ها سرعت  $10 \text{ mm/s}$  و فرکانس چرخش  $150 \text{ rpm}$  دارند و اختلاف توان آنها فقط  $1 \text{ mw}$  است. علیرغم این سرعت و جابجایی زیاد در این حالت، نیروی ایجاد شده چندان زیاد نیست. از کاربردهای این محرک های حلقوی می توان به چرخاندن و جابجایی قطعات در سیستم های نوری از جمله تنظیم و فوکوس کردن عدسی دوربین ها اشاره کرد.

#### ۴ - ۷ - شیرها و پمپ ها

سیالات ( گازها و مایعات ) در دنیای میکرو مکانیک فواید زیادی دارند. با آنها می توان مواد مختلف مثل مواد شیمیایی، سلولهای زیستی، ذرات معلق و .... را انتقال داد. همچنین از سیالات دارای فشار زیاد می توان برای وارد کردن نیرو در نواحی کوچک استفاده کرد. در ضمن در روی یک ویفر می توان دهها هزار شیر کوچک ساخت که مجموعاً به صورت یک شیر بزرگ کار می کنند و در ضمن دارای قابلیت کنترل دقیق نیز هستند. مشکلات مهم در طراحی و ساخت میکروپمپ ها چنین هستند: ساخت شیرهای خوب، تولید نیروی مورد نیاز برای پمپ کردن سیال، جلوگیری از ورود مواد خارجی به پمپ که می تواند شیرها و محفظه پمپ را مسدود کند. شیرها و پمپ های موجود در میکرو سیستم ها باید دارای قابلیت اطمینان خوبی باشند. چرا که عیب یابی و تعمیر آنها تقریباً غیر ممکن است.

این ادوات به نیروی زیادی نیز احتیاج دارند. چرا که نیروی وارده از طرف سیال زیاد است. در ضمن در اندازه گیری کوچک، خواص کشش سطحی و موینگی هم مهم می شوند. در مقالات، برای بستن شیرها از روش های متعددی استفاده شده است؛ محرک های پیزو الکتریک، فشار بخار حاصل از جوشاندن سیال در یک محفظه کوچک، حتی فشار خود سیال که شیر دیگری متصل به این شیر را باز می کند. به عنوان مثال در ردیف هشتم جدول ابتدای این بخش یک شیر الکتروستاتیک نشان داده شده است. یک صفحه که از یک طرف ثابت است، با نیروی الکتروستاتیکی حرکت می کند و سوراخ را می بندد. صفحه مانع یک الکتروود فلزی است که با لایه های  $Si_3N_4$  پوشانده شده است. شیرها در یک آرایه  $5 \times 5$  ساخته شده اند که با آن هم می توان جریان بیشتری عبور داد و هم مقدار آن را با بستن بعضی شیرها، دقیق تر کنترل کرد. با اعمال ولتاژ  $30V$ ، امکان بستن شیرها در مقابل فشار  $110 \text{ mmHg}$  وجود داشته است، مثال هایی از شیرهای طراحی شده برای میکروسیستم ها در شکل زیر دیده می شوند.

این سیستم با استفاده از نیروی الکتروستاتیکی کار می کند.

شکل ۴ - ۱۳

در سیستم زیر برای بستن شیر از تولید حباب بر اثر گرما، استفاده می شود.

شکل ۴ - ۱۴

در پمپ نشان داده شده در شکل پائین، با گرم و سرد کردن متوالی سه محفظه مایع، مایع از درون لوله پمپ می شود. تحلیل حرارتی این پمپ نشان می دهد که سیکل های گرمایش و سرمایش را می توان با فرکانس ۲۰ Hz انجام داد و شار انتقال داده شده نیز در صورتی که فشار سیال در سوراخ ورودی ۱۵psi می باشد،  $7\text{ml}/\text{min}$  است.

شکل ۴ - ۱۵

در سیستمی که در زیر، مراحل ساخت آن توضیح داده شده نیز، از نیروی الکتروستاتیک برای بستن شیر استفاده می شود.

شکل ۴ - ۱۶

## ۵ - میکرو ماشین ها و اثر Scaling

ساخت ماشین های پیچیده مثل مورچه مصنوعی، برای مدت درازی در آرزوی بشریت بوده است. این ماشین ها می توان در این موارد به کار برد:

۱ - پزشکی: مثلاً برای تمییز کردن رگ های یک بیمار.

۲ - ماشین هایی که بتوانند با مولکول ها کار کنند و کاربردها در آشکار سازی یا تمییز کردن یک ناحیه آلوده باشد. درک اختلاف بین دنیای میکرو و دنیای ماکرو، برای تولید طرح های بهتر که کاربردهای بهتری هم دارند، بسیار مهم است. تجربه مهندسی و دانش تدبیری برای انتخاب گزینه ها ضروری هستند. علت این است که قوانینی که دنیاهای میکرو و ماکرو را توصیف می کنند، ممکن است کاملاً متفاوت باشند. برای مثال در معادله حرکت، پارامترهایی که در

دنیای ماکرو نادیده گرفته می شوند، ممکن است در دنیای میکرو تأثیر یادی داشته باشد. ( مثلاً اصطکاک و بار سطحی و اثر الکتروستاتیک ).

در ابتدا باید ابعاد میکرو ماشین در نظر گرفته شود. این ابعاد بر اساس کاربرد مورد نظر تعیین می شوند. مثلاً یک ماشین برای ذخیره بیت ها ( کاربرد در حافظه ) باید تا حدی که تکنولوژی اجازه می دهد، کوچک باشد. همین یک ماشین برای کار با یک شیء فیزیکی خاص در یک فضای محدود باید در ضمن کوچک بودن، قدرت کافی نیز داشته باشد.

حوزه میکروماشین ها، محدوده وسیعی از اندازه ها را از نانومتر تا میلیمتر در بر می گیرد. پس برای ساخت آنها نیز از روش های مختلفی باید استفاده شود. برای ساخت ماشین های در ابعاد نانومتر، ساختارها و ساز و کارهای مولکولی باید به کار گرفته شوند. پیشرفت های اخیر در زیست شناسی مولکولی و دسترسی به میکروسکوپ های پویشی با Probe مثل STM ( Scanning Tunneling Microscopy ) امکان ساخت این ماشین ها را در آینده نزدیک فراهم کرده است. در ابعاد میانی، ۰/۱ تا ۱۰۰ میکرون، تکنولوژی رایج ساخت مدارهای مجتمع، برای ساخت ادواتی مثل چرخ دنده، فنر، میکروموتور، میکرومحرک کاملاً مناسب بوده است.

تقسیم بندی میکروماشین ها بر حسب اندازه، از نظر تکنولوژی ساخت، روش و اصولی طراحی و کارکرد و حوزه کاربرد اهمیت دارد. جدول زیر سیستم های MEMS را که به وسیله روش های میکروماشینینگ ساخته شده اند، با ماشین های کوچکی را که به وسیله روش های معمولی مکانیکی ساخته شده اند، را مقایسه می کند.

همان طور که مشاهده می شود روش کوچک کردن ( Miniaturization ) ماشین های عادی، امکان ساخت انواع ماشین ها در شکل های مختلف با تنوع زیاد را فراهم می کند. روش میکروماشینینگ گرچه به روی ویفر محدود است و این تنوع را ندارد، اما مزیت مهمی دارد که همان امکان تولید انبوه ( Batch processing ) و مجتمع سازی با مدارهای الکترونیکی است. بنابراین یک سیستم پیچیده یا قسمت های الکترونیکی، و مکانیکی را تنها در یک قطعه ( Module ) می توان داشت. با وجود این اختلاف ها، میکروماشین ها یک ویژگی مشترک دارند که همان کوچک بودن است، بنابراین یک حوزه جدید در علم و تکنولوژی باید بنا شود که زمینه تئوریک لازم برای ساخت و پیشرفت میکروماشین ها را فراهم کند. این حوزه جدید، همان امتداد علم و تکنولوژی به دنیای میکروسکوپی است. اثر Scaling یکی از مسائل مهم در ساخت میکروماشین ها است. اصطکاک بین لایه های لغزنده، یکی از مهمترین مشکلات برای ساخت میکروموتورها است. علت این که نیروی اصطکاک در ابعاد خیلی کوچک از یک قاعده نامطلوب پیروی می کند. بر طبق این قاعده، با فرض این که طول مشخصه زیر ساخت، L باشد، نیروی اصطکاک با  $L^2$

متناسب است. در حالی که اینرسی با  $L^3$  متناسب است. پس نیروی اصطکاک غالب است و از حرکت روان روتور جلوگیری می کند. البته اگر اصلاً حرکتی آغاز شده باشد. اصطکاک و سایش در ابعاد میکرو، تحت پژوهش های دقیق قرار دارد.

## ۵ - ۱ - مشکلات کوچک سازی ( Miniaturization ) و راه حل ها

پزشکی، صنعت و علوم، از حوزه های بالقوه کاربرد میکروماشین ها هستند. این مسأله به همراه مشکلاتی که بر ساخت آنها وجود دارد، در شکل زیر نمایش داده شده است :

شکل ۵ - ۱

دو دلیل عمده هست که چرا میکروماشین ها در تعداد زیاد ساخته و استفاده نمی شوند. یکی از آنها مشکل ساخت ( Fabrication ) است. هر چند که اندازه کوچکتر شود، ساخت قسمت ها ( Machining ) و سوار کردن قطعات ( Assembly ) و تنظیم ( Adjustment ) آنها، مشکل تر می شود. مشکل دیگر در کنترل میکروماشین است. مسیر ارتباطی با قسمت خارجی و سیم کشی مربوط به آن، فضایی بیشتر از خود میکروماشین اشغال می کند. علت این است که با کاهش ابعاد فیزیکی، تعداد سیگنال های کنترلی کمتر نمی شود. این مشکلات در میکروماشینینگ را با این راه ها می توان برطرف کرد.

۱- مشکل ساخت میکروماشین ها را می توان با روش های مبتنی بر تکنولوژی ساخت مدارهای مجتمع بر طرف کرد که در آن تعداد زیادی قطعه را می توان همزمان با این روش ساخت. در واقع بخش های Assembly و تنظیم Adjustment به حداقل می رسند یا به کلی حذف می شوند. ساخت پشته ای با لایه نشانی، فوتولیتوگرافی و Etching امکان تولید انبوه میکروماشین ها را می دهد. امروزه هدف این است که بتوان با همان تکنولوژی، ساختارهای سه بعدی ساخت.

۲- به نظر می آید که پاسخ مشکل کنترل میکروماشین ها در مجتمع سازی باشد. میکرو مکانیزم ها و میکرو محرک ها را می توان با مدارهای الکترونیکی و حسگرها به صورت مجتمع ساخت. تکنولوژی ساخت

مدارهای مجتمع، ساخت سیستم های پیچیده شامل تعداد زیادی میکرومکانیزم را ممکن کرده است. شکل زیر مثالی از یک مدل را که از حسگر، محرک و مدار الکترونیکی برای مناسب کردن سیگنال و محاسبات تشکیل شده است، نشان می دهد.

شکل ۵ - ۲

به این ترتیب تعداد سیگنال های کنترلی در نتیجه خطوط ارتباطی، بین میکرومکانیزم و محیط خارج را می توان تا حد زیادی کاهش داد. چرا که بیشتر کار پردازش سیگنال و کارهای کنترلی را می توان با پردازش گره های محلی که با میکروماشین، مجتمع شده اند، انجام داد.

#### ۴ - مزایای مجتمع سازی MEMS و مدار میکروالکترونیک

یک قطعه کوچک MEMS احتمالاً فقط چند دلار قیمت دارد. اما قیمت یک سیستم کامل سنسور ممکن است به صدها دلار هم برسد. در حالی که اگر سنسور با مدار کنترلی آن روی یک قطعه سیلیکون ساخته شود، توان مصرفی، اندازه و قیمت آن پایین می آید. کاهش قیمت از آن جا ناشی می شود که بیشتر هزینه یک مدار مجتمع، مربوط به بسته بندی (Packaging) آن است.

دلیل دیگر برای مجتمع سازی MEMS و مدار میکروالکترونیک، افزایش حساسیت و دقت سیستم است. زیرا همان طور که می دانیم، خروجی سنسورهای MEMS معمولاً مقدار یک خازن یا مقاومت است که مقدار و محدوده تغییرات آن خیلی کوچک است. با ساختن MEMS و مدار جانبی آن روی یک چیپ، مقدار خازن ها و مقاومت های پارازیتیک و نویز سیستم خیلی کمتر می شود. در نتیجه حساسیت و دقت آن افزایش زیادی می یابد.

همچنین با مجتمع سازی MEMS و مدار جانبی روی یک قطعه سیلیکون، تعداد سیم های اتصال نیز کاهش می یابد و در نتیجه قابلیت اطمینان سیستم نیز بالا می رود.



اما باید گفت که این کار با مزایای گفته شده با مشکلات بزرگی نیز روبرو است. از جمله ناسازگاری مواد به کار رفته برای هر قسمت، ناسازگاری فرآیندهای لازم برای هر قسمت و نیز مقدار گرمای زیاد داده شده به چیپ در طی فرآیندهای ساخت.

#### ۴-۱- راهبرد های مجتمع سازی

برای نشان دادن مشکلات موجود بر سر راه مجتمع سازی MEMS و مدار جانبی، از یک مثال استفاده می کنیم، در این مثال می خواهیم چگونگی ساخت یک ساختار میکروماشین پلی سیلیکون را با مدار جانبی CMOS روی یک ویفر بررسی کنیم. سنسور شتاب در زمره این گونه سیستم ها قرار دارد. برای این کار می توان راهبردهای مختلفی اتخاذ کرد. اولین کار در انتخاب راهبرد، انتخاب ترتیب قطعات MEMS و مدار است. در اینجا سه راه مختلف موجود در مقابل این انتخاب را بررسی می کنیم.

#### ۴-۱-۱- اول میکرو الکترونیک، بعد میکرو ماشین.

یکی از اولین کارهایی که برای ساخت MEMS و مدار میکرو الکترونیک روی یک قطعه سیلیکون انجام شد در دانشگاه برکلی بود. راهبرد انتخاب شده نیز بدین ترتیب بود که اول مدار میکروالکترونیک به طور کامل ساخته شود و سپس میکروماشین ساخته شود.

دلیل انتخاب این راهبرد، آن بود که ساخت دو قسمت در دو محل مختلف انجام می شد. بدین صورت که ابتدا مدار CMOS در کارخانه ساخته شد و سپس ساخت قسمت MEMS در آزمایشگاه انجام شد.

این کار البته با موفقیت نسبی انجام شد. اما اشکال مهمی هم داشت. برای کم شدن استرس بین لایه پلی سیلیکون و ویفر سیلیکونی، باید چیپ مدتی در دمای بالا قرار داده می شد تا به اصطلاح Anneal شود. و گرنه لایه پلی سیلیکونی دچار خمیدگی و تغییر شکل می شود. گاهی اوقات لازم است که دما تا بالاتر از ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد هم برده شود. اما مشکل اینجا است که این کار به مدار CMOS ساخته شده روی ویفر صدمه می زند. از جمله خطوط اتصال آلومینیومی که در دمای ۴۵۰ درجه ذوب می شوند. به همین دلیل در این تکنولوژی به جای آلومینیوم از تنگستن استفاده شد که دمای ذوب خیلی بالاتری دارد. اما هنوز مشکلات دیگری هم وجود داشتند. از جمله این که بالا بردن دما باعث می شد مقاومت اتصال بین خطوط تنگستنی و Source, Drain در MOS ها زیاد شود و هم چنین نواحی p, n در MOS ها به اطراف نفوذ کنند.

پس سعی شد که دمای Annealing پایین آورده شود. اما حتی با این کار نیز مدارهای CMOS حاصل، کیفیت چندانی نداشتند.

#### ۴-۱-۲ - سافت میکروماشین در بین مراحل سافت مدار

به دلیل مشکلاتی که در راهبرد قبلی وجود داشت، شرکت Analog Devices تکنولوژی جدیدی را ابداع کرد که در آن میکروماشین در بین دو مرحله ساخت مدار ساخته می شد. در این راهبرد ابتدا مراحل ساخت مدار CMOS شروع می شود و تا قبل از مرحله نشاندن خطوط اتصالی آلومینیومی ادامه می یابد. سپس قسمت میکروماشین ساخته می شود. بعد از آن خطوط اتصال آلومینیومی ساخته می شوند و مراحل تکمیلی نیز انجام می شوند. در این روش به دلیل این که مرحله گرم کردن قبل از نشاندن فلز انجام می شود، برای خطوط اتصال آلومینیومی هیچ مشکلی پیش نمی آید و مقاومت اتصال آنها با نواحی Drain, Source نیز افزایش نمی یابد. شرکت ADI با این تکنولوژی یک سنسور شتاب برای استفاده در اتومبیل ها ( سیستم بازکردن کیسه هوایی ) و کاربردهای دیگر ساخته و به طور انبوه تولید کرده است.

البته این تکنولوژی نیز ایده آل نیست و اشکالات مهمی دارد. اشکال اول این است که به دلیل این که مرحله بالا بردن دما، بعد از ساخت MOS های خیلی کوچک با این تکنولوژی ممکن نیست. بنابراین ساخت مدارهای با تعداد ترانزیستور زیاد و کاربرد تکنولوژی Submicron امکان ندارد. اشکال دیگر این است که ساخت دو قسمت MEMS و مدار در دو مرحله کاملاً جداگانه امکان پذیر نیست. بنابراین تغییر در تکنولوژی ساخت یکی از قسمت ها، باعث لزوم تغییر و بازنگری در ساخت کل سیستم می شود.

#### ۴-۱-۳ - اول میکروماشین، بعد مدار میکروالتریک

اگر ساخت میکروماشین قبل از شروع به ساخت مدار انجام شود، هر قدر که دمای میکروماشین بالا برده شود، بر مدار تأثیری نمی گذارد. اما اشکالی که در ایده اولیه این راهبرد به نظر می رسد این است که در تکنولوژی ساخت مدارهای مجتمع نیاز است که سطح ویفر کاملاً مسطح و صاف باشد ( به خصوص در مراحلی مثل نشاندن Photoresist، لیتوگرافی و Etch کردن ). اما در صورت ساخت میکروماشین، دیگر سطح ویفر صاف نخواهد بود همین مشکل باعث شده است که این راهبرد، تا کنون نتواند پیشرفت چندانی داشته باشد.

اولین کار مهمی که با این راهبرد انجام شد در آزمایشگاههای ملی Sandis بود که ابتدا یک حفره در ویفر ایجاد شد و میکروماشین طبق شکل بعد در داخل آن حفره ساخته شد. سپس میکروماشین به طور کامل با  $\text{SiO}_2$  پوشانده شد و سطح ویفر صاف و مسطح شد. بعد مرحله بالا بردن دما و Annealing انجام شد. پس از Annealing سطح ویفر همچنان صاف است. اکنون می توان هر نوع مداری را در جای مناسب روی ویفر ساخت.

این راهبرد معایب راهبردهای قبلی را ندارد. البته در آن، چار چوب مرسوم MEMS شکسته شده تا هر دو قسمت MEMS و مدار CMOS کامل و بی نقص باشند.

شکل ۶-۱

## ۷ - نمونه ای از معماری MEMS

### میکروماشینهای توزیع شده مستقل (ADM ( Autonomous Distributed Micromachines

مجتمع کردن سنسورها، محرکها و کنترلرها به مفهوم ADM منجر شد که به عنوان یک معماری مناسب برای میکروماشینها شناخته شده است. یک سیستم ADM سیستمی است که از تعداد زیادی زیر سیستم با هوش (SMART) تشکیل شده است. هر کدام از آن زیر سیستمها می توانند با سنسورهایش و با ارتباط با زیر سیستمهای همسایه اش و بعضی اوقات با کل سیستم، اطلاعات کسب کند. سپس بر اساس آن اطلاعات رفتار خود را تعیین می کند. تصمیم گیری برای انجام هر کاری با هماهنگی با یکدیگر در راستای تأمین هدف کلی انجام می شود. مثال های متعددی از ADM در ارگانیسم های زنده وجود دارند. پاهای هزارپا و مژه های درون راه دستگاه تنفس مثال های خوبی هستند. سلول های حرکت کننده، در واقع محرک ها هستند و شبکه عصبی آنها را کنترل می کند. با فرایند ساخت سازگار با مدارهای مجتمع امکان ساخت ADM با تعداد زیادی مدول با هوش وجود دارد. کاربردهای متعددی از یک صفحه نمایشگر تا فیلتر فعال ذرات را می توان با ADM ساخت. در ادامه به عنوان مثال، یک سیستم انتقال دهنده دو بعدی مورد بحث قرار می گیرد.

### ۷ - ۱ - انتقال دهنده دو بعدی

همان طور که در شکل زیر نشان داده شد، انتقال دهنده دو بعدی از یک آرایه دو بعدی از میکرومدولها ساخته شده است.

### شکل ۷ - ۱

مدولها باید دارای محرک بوده و مداری برای کنترل و مخابرات داشته باشند. ممکن است حسگرهایی برای آشکار سازی مکان و یا تعیین وزن جسم نیز داشته باشد. تمام قسمتهای لازم برای انجام این کار با تکنولوژی ساخت مدارهای مجتمع قابل ساخت هستند. حالا یک Positioner را بررسی می کنیم.

فرض می کنیم که هر مدول با یک وسیله ای قابل آدرس دهی باشند. برای مثال با پرتو لیزری و حسگر نوری. مدار داخل هر مدول بر اساس اطلاعاتی که از سنسور خود و از مدولهای مجاور به دست می آورد، حرکت محرک خود را تعیین می کند. هر مدول به مدول های جهت حرکت خود و اطلاعات حاصل از سنسور خود را اطلاع می دهد. چنین آرایه ای می تواند به عنوان یک سیستم خودکار دو بعدی از سلول های شامل حسگرها و محرک ها مورد توجه قرار گیرد. محرک های داخل هر مدول باید توانایی انتقال جسم در چهار جهت (  $+x, -x, +y, -y$  ) را داشته باشند. حرکت هر محرک، آن چنان با محرک های دیگر هماهنگ است که یک حرکت کلی به دست می آید. طرح هایی برای انتقال، به خط در آوردن ( **Aligning** )، قراردادن در مکان مناسب ( **Positioning** ) و چرخش یک جسم در شکل زیر نمایش داده شده اند.

برای مثال در طرح مربوط به **Positioning**، هر مدول طوری حرکت می کند که جهت کلی حرکت به یک نقطه در صفحه همگرا شود. مثلث ها در صفحه، جهت حرکت هر مدول را نشان می دهند.

## شکل ۷-۲

اکنون یک سیستم **Positioner** حلقه باز تصور کنید که دو درجه آزادی ( طولی و عرضی ) دارد. ساده ترین راه برای بدست آوردن طرح نشان داده شده در قسمت **C** شکل فوق چنین است :

- ۱- مدولی که در مرکز مکان دلخواه قرار دارد، آدرس دهی می شود.
- ۲- آن مدول سیگنال هایی را به چهار مدول مجاورش می فرستد. ( شکل زیر قسمت **b** )
- ۳- وقتی هر مدول سیگنالی را از یک طرف دریافت می کند، جهت حرکت محرک ها رو به آن جهت تعیین می شود ( شکل زیر قسمت **C** )

۴- مدول، سیگنالهایی را به سه مدول که در اطرافش قرار دارند، می فرستد ( شکل زیر قسمت **d** )

۵- با تکرار مراحل ۳ و ۴ طرح کلی ایجاد می شود ( شکل زیر قسمت **e** )

۶- محرک ها برای حمل جسم به مکان دلخواه، فعال می شوند.

[www.kandoocn.com](http://www.kandoocn.com)

شکل ۷-۳

برای حالتی که می خواهیم حلقه بسته داشته باشیم، لازم است آشکار سازی جسم روی Positioner انجام شود. فرض می شود که تنها یک جسم با سطح صاف روی Positioner قرار دارد و هر مدول سنسوری دارد که وجود جسم روی آن را آشکار می کند. سنسور می تواند یک سنسور لمسی ( Tactile ) یا سنسور نوری باشد که در صورت نوری بودن، باید کل صفحه با نور یکنواخت روشن شود تا سنسور ها، سایه جسم را حس کنند ( در واقع مثل یک تصویر بردار CCD )

لبه ها و مراکز جسم به وسیله یک منطق توزیع یافته ساده، قابل تعیین هستند. کارهای زیادی روی پردازش توزیع یافته داده های تصویر انجام شده است. این نتایج را می توان در تعیین نسخه پردازش اطلاعات برای ADM به کار برد. کار مکان دهی روی انتقال دهنده را می توان چنین ادامه داد: فرض کنید که شکل جسم را می دانیم. مکان و جهت مورد نظر برای جسم را هم به آن می دهیم. مرکز ثقل جسم حساب می شود. همان طور که در شکل بالا نشان داده شده است، یک طرح کلی مکان دهی دور مرکز ثقل تشکیل می شود. سپس جسم به سوی نقطه مورد نظر حرکت داده می شود. وقتی مرکز جسم روی نقطه مورد نظر قرار می گیرد، طرح انتقال دهنده به طرح چرخش دهنده تشکیل می شود. شباهت بین تصویر مورد نظر و محل جسم با محاسبه همبستگی ( Correlation ) بین آنها تعیین می شود. تکرار چند باره طرح های Positioning و چرخ دهنده، به حداکثر همبستگی منجر می شود.

## ۷-۲ - محرک های آرایه ای

به عنوان یک گام به سوی تحقق ADM محرک های آرایه ای ساخته و به کار گرفته شدند. زیرا این باور هست که ایده کلیدی، هماهنگی بین حرکت های ساده تعداد زیادی میکرو محرک برای انجام یک کار میکروسکوپی است. حتی اگر هر گام حتی حرکتی کوچک باشد، جمع شدن تعداد زیادی از این گام ها، منجر به طی مسافتی بزرگ میشود. یک بار سنگین روی تعداد زیادی محرک توزیع می شود که هر کدام فقط نیروی خیلی کوچکی تولید می کنند. پس در این روش، انعطاف در حرکت، توسعه یافتن و ایمنی در برابر خراب شدن بعضی از اجزا قابل دستیابی است.

یکی از مشکلات اساسی در میکرو محرک های حاضر، مشکل اصطکاک است که تا حد زیادی قابل حل است. اصطکاک در اندازه های کوچک، ما را از بکاربردن ادواتی مثل چرخ دنده و لوله باز می دارد. زیرا آنها انرژی زیادی را بر اثر اصطکاک تلف می کنند. محرک های معلق ( Suspended ) مشکل اصطکاک را ندارند. ولی محدوده حرکت آنها محدود به چند ده میکرومتر است. اگر تعداد زیادی از آن میکرو محرک ها با هم سری و موازی بسته شوند، ساختار کلی می تواند نیرو و مسافت بیشتری را تولید کند و کارهای پیچیده تری را انجام دهند. در این محرکها از اصطکاک بین محرک ها و جسم برای انتقال نیرو استفاده می شود.

برای نشان دادن این مفهوم، دو نوع میکرو سیستم حرکتی تولید شده را می توان مثال زد. یکی سیستم حرکت مژگی ( CMS ) است که از حرکت مژک ها در ارگانیسیم های زنده تقلید می کند. در این سیستم، تعداد زیادی سگدست ( Contilever ) به طور منظم حرکت می کنند و جسم را حرکت می دهند. مثال دیگر سیستم انتقال صفحه ای است که از جریان هوایی که به طور کنترل شده از تعداد زیادی سوراخ ریز خارج می شوند، برای انتقال جسم استفاده می کنند. یک صفحه روی سیستم معلق می شود و با جریان هوا حمل می شود.

#### ۷-۲-۱ - سیستم حرکت مژگی ( Ciliary Motion System )

سیستم حرکتی مژگی، از حرکت مژکها در ارگانیسیم های زنده برای حرکت تقلید می کند. تعداد زیادی مژه به طور همزمان با هم حرکت می کنند تا یک جسم یا سیال را حرکت دهند. یک مژه دو درجه آزادی دارد ( چرخش و تا شدن ). از آن جایی که محرک میکرو ماشین فقط یک حرکت ساده دارد، دو عنصر محرک با هم ترکیب می شوند تا به حرکت دارای دو درجه آزادی دست یابند. یک صفحه را با ترتیب حرکتی خاص محرک ها می توان حرکت داد. ( شکل زیر )

شکل ۷-۴

ما می توانیم یک آرایه از میکرو محرک ها بسازیم که دارای سگدست هایی هستند که با روش گرمایی حرکت داده می شوند. اصل اساسی حرکت بر پایه محرک Thermo-bimorph است که مشابه آن قبلاً گزارش شده است.



تنها اختلاف ها در نوع ماده استفاده شده ( Polyimide ) و فرآیند ساده تر ساخت است. دو لایه Polyimide با ضرایب انبساط دمایی متفاوت در دو طرف یک لایه فلزی که می توان آن را گرم کرد، چسبانده می شوند. از آلومینیوم میتوان برای ساخت این لایه فلزی استفاده کرد. از آن جایی که Polyimide استفاده شده در لایه رویی ضریب انبساط دمایی بیشتری از لایه زیرین دارد، با سرد کردن صفحه فلزی سگدست به سمت بالا حرکت می کند. با عبور جریان و گرم شدن آن نیز سگدست به سمت پایین حرکت می کند. ابعاد سگدست چنین هستند: ۵۰۰ میکرون طول، ۱۰۰ میکرون عرض و ۶ میکرون ضخامت. با عبور جریان ۲۲/۵ mA از لایه فلزی، می توان ۱۵۰ میکرومتر حرکت عمودی و ۸۰ میکرومتر حرکت افقی ایجاد کرد. توان تلف شده در هر سگدست، ۳۳ mW و حداکثر دما نیز ۲۶۰ درجه سانتی گراد است. پاسخ فرکانسی نیز اندازه گیری شده و فرکانس قطع ۱۰ Hz بوده است.

#### ۷-۲-۲ - انتقال دهنده با استفاده از جریان هوا

در این سیستم، اجسام دارای سطح صاف، با جریان کنترل شده هوا معلق نگه داشته شده و منتقل می شوند. می توان با استفاده از یک بالشتک هوا ( برای کم کردن اصطکاک )، جسم را معلق کرد و سپس با نیروی الکتروستاتیکی آن را حرکت داد. اما می توان از جریان هوا برای انتقال جسم نیز استفاده کرد. شکل زیر مفهوم انتقال در یک جهت با جریان هوایی جهت مند خارج شده از سوراخ های ریز را نشان می دهد. همان طور که در شکل زیر نشان داده شده است، می توان جهت جریان هوا را با بستن یک سوراخ و باز کردن سوراخ مقابل، عوض کرد. از یک ویفر

شکل ۷-۵

SOI به عنوان یک طبقه سیستم انتقال دهنده، می توان استفاده کرد. با Etch غیر جهت مند با KOH می توان تعداد زیادی سوراخ در لایه Si ایجاد کرد. ابعاد هر سوراخ ۲۰۰×۱۰۰ میکرومتر است. هر سوراخ با یک لایه نرم از Polyimide پوشانده می شود. دو کانال هوا در جهات مخالف هم در دو طرف این لایه بوسیله گذاشتن یک لایه قربانی، ایجاد می شوند. دو الکتروود در لایه Polyimide دور کانال گذاشته می شوند. وقتی ولتاژ بین هر



شکل ۶-۷

الکتروود و Substrate اعمال می شود، کانال بسته می شود ( شکل فوق قسمت b ) وقتی یک سوراخ بسته می شود جریان هوا از سوراخ دیگر عبور می کند. در فرآیند ساخت از پنج Mask استفاده می شود. یک آرایه  $9 \times 7$  از سوراخ ها در یک سطح به مساحت  $3 \times 2$  mm ساخته شده است. ولتاژ اعمال شده برای بستن کانال ۹۰ ولت و فشار هوا ۲ Kpa ( ۰/۰۲ atm ) بوده است.

## ۸ - کاربردهای ویژه

کاربردهای امید بخش MEMS در آینده نزدیک، در اپتیک، هدهای مغناطیسی و اپتیکی، سیالات، دستگاه OA، کارکردن با سلول ها و ماکرو ملکولها و میکروسکوپیهای دارای میکروپروپ مثل STM و Atomic AFM ( ForceMicroscope ) است. ویژگی مشترک این کاربردها این است که در آنها، با اجسام سبکی مثل آینه ها، هدها، شیرها و یاخته ها سر و کار هست و ارتباط با محیط خارجی لازم است. یک دلیل این است که میکرو محرک های فعلی، هنوز بدوی هستند و نمی توانند نیروی زیادی را به محیط خارجی اعمال کنند. دلیل دیگر، سختی Packaging است. در ادامه، چند مثال توضیح داده می شوند.

## ۸ - ۱ - اپتیک

تلفیق سیستم های اپتیکی و MEMS که حاصل آن به MOEMS ( Micro Opto Mechanical System ) معروف است، توسط دکتر منوچهر معتمدی ابداع شد و تاکنون پیشرفت زیادی داشته است.

Petersen و دیگران در سال ۱۹۷۷ انحراف پرتو نور بوسیله سگدست های کوچکی را که با نیروی الکتروستاتیک حرکت می کردند نمایش دادند. ابعاد سگدست دارای ۱۰۰ میکرومتر طول، ۲۵ میکرومتر عرض، ۰/۵ میکرومتر ضخامت بود. اخیراً یک سوئیچ فیبر نوری، Aligner آن و یک تداخل سنج فابری پروی تنظیم شونده گزارش شده اند. هم چنین یک میکرو کد کننده نوری مجتمع ساخته شده است. سازندگان آن یک دیود لیزر U شکل با آینه های Etch شده، عدسی های کوچک و یک فوتو دیود را به صورت مجتمع روی یک تراشه ساختند. اندازه کلی ۰/۵ × ۰/۵ mm بود. آنها با یک grating با گام یک میکرومتر، قدرت تفکیک ۰/۰۱ میکرومتر را به دست آوردند. به خاطر این اندازه کوچک و فرآیند ساخت آن، می توان آن را با میکرو محرک مجتمع کرد. در نتیجه می توان یک Micropositioner با دقت بالا ساخت.

مثال دیگر برای کاربرد میکرو محرک ها در ادوات نوری، صفحه نمایشگر آینه ای دیجیتال DMD است که توسط TI ساخته شده است. این صفحه نمایشگر با تفکیک 768×576 پیکسل، با فرآیندهای معمول نیمه هادی روی ویفر ۶ اینچ ساخته شده است. البته در گذشته، ادوات مشابهی با تعداد پیکسل های کمتر برای کاربردهای نظامی ساخته شده بودند. DMD در تلویزیون و صفحه نمایشگر هولوگرافی می تواند به کار برده شود.

آینه دیجیتال از تعداد زیادی آینه های بسیار کوچک ساخته شده است که هر کدام از آنها می توانند در دو زاویه با اختلاف ۲۰ درجه، جهت گیری کنند. طبق شکل زیر، تغییر جهت هر آینه با اعمال ولتاژ بین دو الکتروود زیر آن انجام می شود.

شکل ۸ - ۲

در شکل های زیر هم ساختار هر آینه ریز با مدار زیر آن نشان داده شده است.

شکل ۳ - ۸

طریقه کلی عملکرد هر آینه دیجیتال به این صورت است که سه رنگی اصلی ( آبی، قرمز، سبز ) در زمانهایی بسیار کوتاه به طور متوالی به سطح آینه تابانده می شوند. شکلی که آینه باید روی پرده بتاباند، یا در زاویه خاصی نشان دهد، در حافظه سیستم ذخیره شده، به این ترتیب کنترل کننده سلول های آینه می داند هر آینه ریز باید کدام رنگ را در آن زاویه بتاباند تا در مجموع تصویر کلی مشاهده شود. به این ترتیب با سوئیچ کردن سریع آینه های ریز می توان حتی تصاویر متحرک را هم نشان داد.

شکل ۸ - ۴

#### شکل ۸ - ۵

از آینه دارای قابلیت تغییر جهت می توان برای مصارف دیگر همانند خواندن خط نماد کالاهای تجاری ( Barcode ) استفاده کرد. در این حالت باید آینه دارای قابلیت تحرک خیلی بیشتری از حالت قبل باشد. چرا که باید محدوده ای از زاویه را جارو ( Scan ) کند.

#### شکل ۸ - ۶

هم چنین با قرار دادن یک Grating متحرک به جای آینه نیز می توان یک میکروطیف سنج ساخت. می دانیم که در Grating شدت و زاویه پرتو نور خروجی، به زاویه و فرکانس پرتو نور ورودی وابسته است. به این ترتیب با چرخاندن Grating در محدوده ای از زاویه و تاباندن پرتو خروجی به یک آشکار ساز نوری می توان شدت نور ورودی در فرکانس های مختلف را بدست آورد و این یعنی طیف سنجی.

#### شکل ۸ - ۷

## ۸ - ۲ - سیالات

در ابتدا، کاربرد این تکنولوژی را در چاپگر جوهر افشان بررسی می کنیم. این چاپگرها مثال خوبی از میکروماشین های وارد شده در بازار هستند. در این چاپگرها از فشار بخار ایجاد شده در یک محفظه برای انتقال جوهر به روی کاغذ استفاده می شود. با استفاده از میکروماشینینگ سیلیکون و تکنیک های پیوند ( Bonding ) توانسته اند محفظه ها و روزنه های ریز را بسازند و سپس یک گرم کننده ( Heater ) کوچک را به هر کانال وصل کردند. وقتی یک پالس جریان از گرم کننده می گذرد و جوهر دور آن به حالت فوق بحرانی می رود و یک قطره بسیار کوچک را از زورنه به بیرون پرتاب می کند. هرچند در این جا هیچ بخش متحرکی وجود ندارد، گرم کننده، مثل یک محرک عمل می کند. با استفاده از این طرز کار، چاپگر معروف به حباب افشان ( Bubble jet ) از Canon و چاپگر Think jet از HP بصورت تجاری ساخته شده با موفقیت به بازار عرضه شده اند.

مثالی دیگر از میکرو محرک های در سیالات، شیر Thermo-pneumatic است که بوسیله Redwood Microsystems ساخته شده است ( ۱۹۹۴ ). در این قطعه، یک دریچه می تواند راه یک روزنه را باز و بسته کند. این باز و بسته شدن، وابسته به این است که محفظه ای که زیر دریچه قرار دارد، دارای فشار هست یا نه. با تولید گرمایی یک حباب بخار در داخل یک محفظه که با مایع پر شده، می توان به فشار بالایی دست یافت. مثال دیگر سنسور شار سیال است که همان طور که در شکل زیر نشان داده شده است، ابتدا از جریان سیال نمونه برداری می کند. سپس دمای آن را اندازه می گیرد. از اختلاف دمای سیال در دونقطه می توان سرعت عبور آن را بدست آورد.

شکل ۸ - ۸

## ۸ - ۳ - دستکاری الکترواستاتیکی اجسام ریز زیستی

ابعاد اجسام زیستی، حدود ۱ - ۱۰ میکرومتر برای یاخته ها و حدود چند میکرومتر طول و چند نانومتر عرض برای ماکرو مولکول هاست. توزیع میدان الکتریکی بدست آمده از الکترودهای ریز را می توان در همین حدود کنترل کرد و

این هدف ها برای کار مناسب هستند. از آن جایی که این اجسام در سیال هادی معلق هستند، ولتاژ اعمال شده ac و فرکانس بالا هستند ( بیش از چند MHz ). همانند چاپگر جوهر افشان، ساختار، حرکت نمی کند. ولی در اطراف خود میدانی تولید می کند که با آن روی جسم کار می کند.

در سال ۱۹۹۰ یک سیستم ترکیب یاخته ها دارای یک سیستم سیالی ریز و میدان الکتریکی ساخته شده است. شکل زیر این سیستم را نشان می دهد. دو نوع سلول A,B در حفره های PA,PB قرار داده می شوند.

شکل ۸ - ۹

هر حفره، یک پمپ پیزوالکتریک دارد. پمپ، سلول ها را به یک کانال باریک می راند. کانال آن قدر باریک است که سلول های نوع A,B باید یکی یکی به آن وارد شده و از آن عبور کنند. محفظه ترکیب سلول ها در شکل زیر نشان داده شده است.

شکل ۸ - ۱۰

سلول A از کانال سمت چپ و سلول B از کانال سمت راست می آید. آنها در محل سوراخ دیواره به هم می رسند. اشکال فوق مجموعاً یک سیستم ترکیب سلول ها را با استفاده از مدار مجتمع سیالی نشان می دهند. یک میدان الکتریکی از راه سوراخ بوسیله دو الکتروود اعمال می شود. سلول ها به سمت مرکز فشردگی میدان الکتریکی در محل سوراخ جذب می شوند. آنها به هم می چسبند و سپس یک پالس کوتاه ولتاژ بالا از الکتروود ها به آنها اعمال می شود تا سلول ها به هم ترکیب شوند. سپس سلول ترکیب شده، بوسیله پمپها از کانال خارج می شود. بر اساس همین عملکرد، یک انتقال دهنده الکتریکی یاخته بنام Cell Shift Register ساخته شده است.

روی ملکولهای زیستی مثل DNA و پروتئین ها نیز با میدان الکتریکی می توان کار کرد. برای مثال، مولکولهای DNA که شکل عادی آنها در آب، مثل یک رشته ماریچ است، با اعمال میدان الکتریکی در حدود  $10^6 V/m$  فشرده می شود. طول مولکول های DNA مستقیماً با حجم اطلاعات ژنتیکی موجود در آن نسبت دارد. بنابراین با طول مولکولهای DNA که با ولتاژ فشرده شده اند و با رنگ فلورسنت رنگ آمیزی شده اند، می توان به حجم اطلاعات ژنتیکی موجود در آن پی برد.

همچنین توانسته اند مولکولهای DNA را هم جهت کنند. همچنین توانسته اند مولکول ها را در راستای میکروالکتروود به خط ( Align ) کنند و با اشعه فرابنفش متمرکز شده، آنها را در جاهای معینی ببرند. از آن جایی که اندازه لکه در مرتبه یک میکرومتر است، بردن مولکول ها با دقت جفت های پایه DNA ممکن نیست. همچنین توانسته اند شکل سه بعدی پروتئین ها را با میدان الکتریکی تغییر دهند.

#### ۸-۴ - آشکار سازی و کنترل جریان تونلی

تا کنون با استفاده از روش های میکروماشینینگ سطحی و توده ای پروب های بسیار کوچک و ریزی برای استفاده در SPM ( Scanning Probe Microscope ) ساخته شده اند. ( ساخته Park Scientific و Nano Probe ) همچنین تاکنون واحد های میکروماشین شده تونل زنی و STM گزارش شده اند. در سال ۱۹۹۰ یک واحد تونل زنی جانبی ( LTU ) هم گزارش شده است که با یک محرک خطی الکتروستاتیک کار می کند. ساختار جانبی این واحد تونل زنی، این مزایا را دارد :

۱- دارای فرآیند میکروماشینینگ سطحی فقط با یک Mask است.

۲- محرک الکتروستاتیکی ساده یک محدوده کاری بزرگ دارد و به سادگی هم قابل کنترل است.

۳- قابل مجتمع شدن با سایر میکروساختارها مثل نوک AFM است.

۴- سطح نوک و دیواره روبرو را می توان با نوعی از مواد هادی پوشاند.

ولتاژ بین نوک و سطح، ۱۰۰-۴۰ ولت DC است. در محدوده ای از ولتاژ، جریان تونلی به مقدار ۱۰۰-۰/۱ نانوامپر مشاهده می شود. ولتاژ با مدار کنترل کننده آن قدر بالا می رود تا این جریان مشاهده شود. از روی مقدار جریان و ولتاژ می توان فاصله را اندازه گرفت. رابطه جریان و فاصله در ولتاژ ثابت چنین است:

$$I = e^{-kd}$$

## ۸ - ۵ - کاربرد در میکرو ویو

فیلترهای میکرو ویو و سوئیچ های تولید شده با استفاده از روشهای میکروماشینینگ : روشهای میکروماشینینگ، طراحی و ساخت تعدادی از اجزاء میکرو ویو را ممکن ساخته است. دوتا از این نمونه ها، تشدید کننده شنوائی توده ای لایه نازک ( Film Acoustic Resonator ) یا thin FBAR که برای ساخت یک فیلتر باند میانی استفاده می شود و یک سوئیچ میکرو ویو تحریک شده پیزوالکتریک می باشند. اکنون میکروماشینینگ روش شناخته شده طراحی و ساخت قطعات برای کاربردهای فراوانی می باشد. اینها شامل شتاب سنج ها، سنسورهای فشار، سنسورهای شارژ و ژيروسکوپ ها می شوند. برای بهره برداری بیشتر از میکرو ماشینینگ می توان در قسمت اجزاء سیستم های میکرو ویو کار کرد. موارد زیر را باید در کاربردهای میکرو ویو در نظر داشت :

۱ - مینیا تور سازی ( ریز سازی )

۲ - امکان مجتمع سازی

۳ - امکان کار کردن در پهنای باند بزرگتری

۴ - امکان کار کردن در فرکانس های بالا

۵ - افت کمتر نسبت به ابزارهای حالت جامد

دو ناحیه عمده که میکروماشینینگ در حال تحقیق می باشد در کاربردهایی برای فیلترها و سوئیچ ها می باشد. سوئیچ های میکروویو و فیلترها اجزا کلیدی در بسیاری از سیستم های میکروویو هستند و امتیازات مهمی می تواند به وسیله به کار بردن روشهای میکرو مهندسی و مواد جدید در طراحی و ساخت این قطعات به دست آید.

## ۸ - ۵ - ۱ - تشدید گر شنوائی توده ای لایه نازک (Thin Film Bulk Acoustic Resonator (FBAR

نیاز مهمی برای کوچک بودن، هزینه کم و عملکرد بهینه فیلترهای باند میانی که در محدوده 1-5 GHZ برای کاربردهایی مثل مخابرات سیار ( Mobile communication ) کار می کنند، وجود دارد. فیلترهای معمول اغلب بزرگ و پیچیده هستند و مانعی در برابر کوچک سازی سیستم می باشند. ابعاد نوعی فیلترهای میکرو ویو شبیه طول موج در فرکانس کاری شان می باشد. برای قطعات بر پایه روشهای الکترو مغناطیسی، این نتیجه در مقایسه عناصر فیلترهای بزرگ که مانعی در برابر کوچک سازی سیستم می باشند، به دست آمده اند. سرعت طول موج امواج تولیدی حدوداً چهار مرتبه از نظر شدت در مقایسه با روشهای الکترو مغناطیسی کاهش می یابد.



این تکنولوژی تولید فیلترهایی را ممکن می سازد که حدوداً ابعادی در حدود چند صد میکرون دارند. علاوه بر این فرآیندهای مورد استفاده برای ساخت این قطعات آن چنان هستند که فیلترها بتوانند روی ویفر و در مقادیر زیاد تولید شوند.

### اصول عملکرد

تشدید کننده های اکوستیک توده ای لایه نازک ( FBAR ) قطعات تشدید کننده پیزوالکتریک هستند که شبیه به تشدید کننده های اکوستیک توده ای مثل کوارتز هستند، اما برای تشدید کردن در فرکانس های GHz مقیاس بندی شده اند، در این قطعه ZnO به عنوان لایه پیزوالکتریک استفاده شده است. وقتی که یک سیگنال RF به قطعه اعمال می شود، تحرکی مکانیکی در Zon تولید می کند. تشدید اصلی وقتی که ضخامت لایه برابر نصف طول موج سیگنال ورودی می شود، مشاهده می شود. در تشدید، امپدانس الکتریکی قطعه سریعاً تغییر می کند، که امکان طراحی یک فیلتر انتخابگر فرکانسی را ایجاد می کند. طراحی پایه قطعه FBAR در شکل ۸ - ۱۱ نشان داده شده است. قطعه از یک غشاء پیزو الکتریک ( Zon ) که بین دو الکتروود قرار گرفته، تشکیل شده است.

### شکل ۸ - ۱۱

قطعات روی سیلیکون مقاومت بالا برای کاهش تلفات دی الکتریک ساخته شده اند. همچنین می توان آن را روی GaAs ساخت. این واحد تشدید کننده ساختمان اساسی برای تولید یک فیلتر می باشد. قطعه با استفاده از روش لایه نشانی استاندارد و روش های فوتولیتوگرافی ساخته می شود. لایه پیزو الکتریک با استفاده از RF magnetron sputtering حرارت پایین لایه نشانی می شود.

غشاء پیزو الکتریک به وسیله حکاکی تر Anisotropic ویفر سیلیکون ساخته می شود.

### کارایی

نمودار  $S_{21}, S_{11}$  برای قطعه FBAR در شکل ۸ - ۱۲ نشان داده شده است.

[www.kandooon.com](http://www.kandooon.com)

شکل ۸-۱۲

ساختار FBAR می تواند به عنوان واحدی فرض شود که از یک خازن و سلف و مقاومت موازی با یک خازن فیزیکی تشکیل شده است.

[www.kandooon.com](http://www.kandooon.com)

شکل ۸-۱۳

با نگاهی ساده، اندوکتانس مدل، جرم ماده ای را که بطور اکوستیکی تشدید می کند را نشان می دهد و خازن سری کش سانی ماده را نشان می دهد. خازن موازی ظرفیت فیزیکی ساختار را نشان می دهد. فرکانس تشدید فیلتر وابسته به فاکتورهایی شامل ضخامت لایه های پیزوالکتریک و الکتروود و سرعت اکوستیک توده دیافراگم میباشد. عموماً، اگر ضخامت الکتروودها یا لایه پیزوالکتریک کاهش یابد، فرکانس تشدید قطعه افزایش می یابد. بنابراین همه این لایه ها کمترین ضخامت عملی را دارند.

افزایش سرعت اکوستیک لایه پیزو الکتریک می تواند باعث افزایش فرکانس رزونانس شود. برای مثال استفاده از AIN به جای ZnO سرعت اکوستیک را از 6330 m/s به 10400m/s افزایش می دهد. قطعاتی که حداکثر تا 5 GHz کار می کنند، در آنها می توان از ZnO یا AIN استفاده کرد. قطعات مشخصی داریم که تا 3.1 GHz کار می کنند و این محدوده می تواند با کاهش ضخامت دیافراگم و استفاده از یک فلز کمتر فشرده به عنوان الکتروود، افزایش یابد.

---

[www.kandooon.com](http://www.kandooon.com) طراحی و کارایی فیلتر

یک تشدید گر FBAR به تنهایی خیلی کم مورد استفاده قرار می گیرد، اما وقتی که با دیگر تشدید گرها ترکیب شود می تواند یک فیلتر باند عبور یا یک فیلتر باند توقف تولید کند. یک طرح فیلتر باند عبور مدل شده در Cas well فیلتر Ladder نامیده می شود. فیلتر Ladder از عناصر FBAR به طور سری و موازی استفاده می کند.

( شکل ۸ - ۱۳ )

لازمه این نوع فیلتر این است که همه FBAR هایی که سری هستند در فرکانس یکسانی تشدید کند و همه FBAR های موازی در فرکانسی با افت کم از فرکانس FBAR های سری تشدید کنند. قاعده فیلتر Ladder ( شکل ۸ - ۱۴ ) این است که عناصر FBAR سری برای داشتن ماکزیمم قله در انتقال در یک فرکانس مشخصی طراحی شوند، بنابراین سیگنال ها از طریق آنها انتقال می یابند. تحت شرایط یکسان، عناصر FBAR موازی برای داشتن کمترین قله در انتقال در فرکانس یکسانی باید طراحی شوند تا سیگنالها اتصال کوتاه نشوند.

شکل ۸ - ۱۴

ترکیب یک عنصر FBAR سری و یک عنصر FBAR موازی بخشی از یک فیلتر Ladder را تشکیل می دهد. قرار دادن چند بخش از این فیلترها به طور سری، پس زدن بیرون باند را بهبود می بخشد، اما همزمان افت داخلی باند میانی را کاهش می دهد.

یک فیلتر Ladder ۳ مرحله ای ساخته و تست شده است. فیلتر برای کار کردن در فرکانس 2.3 GHz طراحی شده و شامل ۳ قطعه سری و موازی متصل شده به هم میباشد. قطعات موازی نیاز به نشان دادن فرکانس تشدید در حدود ۲٪ کمتر از فرکانس تشدید قطعات سری دارند. یک میکرو گراف از قطعه در شکل زیر نشان داده شده است.

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

#### شکل ۸ - ۱۵

کارایی فیلتر در شکل زیر نشان داده شده و در جدول جمع آوری شده است. و تیزی فیلتر و تضعیف باند توقف به وسیله اضافه کردن چندین طبقه به فیلتر امکان پذیر است. افت داخلی بیشتر از مقدار مدل شده است و وابسته به اختلاف بین فرکانس های تشدید هر کدام از تشدید کننده ها که مجموعاً فیلتر را تشکیل می دهند می باشد. افت داخلی می تواند با بهبود بخشیدن یکنواختی لایه نشانی لایه ZnO بهبود بخشیده شود.

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

#### شکل ۸ - ۱۶

#### ۸ - ۵ - ۲ - سوئیچ های میکروویو

سوئیچ های میکروویو الکترومکانیکی بر اساس همان اصل سوئیچ های on/off معمول عمل می کنند. آنها چندین امتیاز علاوه بر سوئیچ های میکروویو نیمه هادی دارند. مهمترین این امتیازات افت کمتر ( 0.1 dB ) و Isolation در محدوده فرکانسی گسترده تر می باشد. سوئیچ های نیمه هادی متداول که بر پایه دیوهای PIN یا FET های GaAs هستند به ازای هر Contact حدود 0.5 dB تا 1 dB افت نشان می دهند. افت کمتر سوئیچ الکترومکانیکی بر اساس این حقیقت است که این نوع از سوئیچ ها از مواد خیلی هادی استفاده می کنند. کمترین افت قابل دسترسی وابسته به کیفیت پیوند است، وقتی که بسته است و وابسته به ماده مورد استفاده است. Isolation زیاد وابسته به جدا سازی فیزیکی میان Contact ها وقتی که وضعیت off است، می باشد. این فاصله هوایی گذر دهی کمی دارد و بنابراین هر نشتی بین Contact ها را مینیمم می کند. افزایش فاصله هوایی سطح ایزولاسیون قابل دستیابی را افزایش می دهد.

کاربردهای فراوانی وجود دارد که این چنین سویچ هایی می تواند به کار رود. مثلاً سیستم های مخابراتی سلولی، پخش مستقیم ماهواره ای، پخش زمینی و راداری. دلیل اصلی پذیرفتن این سویچ ها افت بسیار کم آنها می باشد. افت، کاربرد سویچ نیمه هادی را محدود می کند. آزادی در جای گذاری اجزاء، کاهش قانع کننده ای در پیچیدگی و هزینه سیستم بدون کاهش کارایی نتیجه می دهد. کاربردهای سیستم شامل آرایه های فازی و شبکه های تأخیر زمانی می باشد. سویچ های الکترومکانیکی متداول آهسته، سنگین، توده ای هستند که باعث غیر جذاب شدن آنها برای بسیاری کاربردها می باشد. سویچ های نیمه هادی کوچک هستند و می توانند زمان های سوئیچینگ در حدود نانو ثانیه بدهند. روش های میکروماشینینگ فرصتی برای سویچ های الکترومکانیکی برای کوچک سازی آنها ایجاد می کنند، بنابراین مانع جرم و سایز از میان برداشته می شود. علاوه بر این که سایز فیزیکی کاهش می یابد، سرعت سوئیچینگ افزایش یافته و سرعت های سوئیچینگ در حدود ۵۰ تا ۱۰۰ میکرو ثانیه می تواند بدست آید.

معابر عمده ای برای ساخت این سویچ ها بر پایه یک سگدست تحریک شده ( Actuated cantilever ) است که یک فاصله را در خط سیگنال باز و بسته می کند. تحریک الکتروستاتیکی نوعاً به کار گرفته می شود، اما مثال هایی از سویچ های موجود که از تحریک حرارتی و مغناطیسی استفاده می کنند، وجود دارد. عمده معابر منتخب بر پایه روش های میکروماشینینگ سطحی برای ساخت ساختار سویچ می باشد. معابر نوین هم ظاهر شده اند که شامل یک میکرو رله پر شده از مایع با یک قطره جیوه حرکت کننده می باشد. قطره جیوه در یک کانال است همراه با یک مایع دی الکتریک که در طرف دیگر می باشد. قطره به وسیله تشکیل یک حباب در مایع دی الکتریک به وسیله به کار بردن حرارت تشکیل شده و جیوه برای بستن فاصله Contact حرکت می کنند. معبر برگزیده به وسیله Caswell در شکل زیر نشان داده شده است. آن بر پایه تحریک تولید شده به وسیله لایه نازک Lead Zirconate Titanate ( PZT ) که روی یک سگدست نازک لایه نشانی شده است می باشد. ساختار قطعه بر پایه سیلیکون است و به وسیله روش های میکروماشینینگ توده ای سیلیکون تشکیل می شود. ساختار سویچ به صورت اتصال flip – chip داخل یک ریز لایه با زمین و خطوط سیگنال علاوه بر یک طرح هم صفحه یا Micro Stripe می باشد. سگدست تحریک شده فاصله موجود در خط سیگنال را باز و بسته می کند. یک فاصله  $2 \mu\text{m}$  بالای خط سیگنال وقتی که باز است، Isolation در حدود 25 db در 50 Ghz ایجاد می کند و Isolation با کاهش فرکانس افزایش می یابد. یک Pad طلا در انتهای سگدست برای بستن فاصله ۱۰۰ میکرون در خط سیگنال عمل می کند. تحریک سگدست که در هر دو جهت می تواند باشد، یک نیروی اعمالی تولید می کند وقتی که بسته می شود، وقتی که باز می شود یک نیرو می تواند برای غلبه بر هر چسبندگی به خط فلز اعمال شود.

سوییچ ها با استفاده از روش های فوتولیتوگرافیک استاندارد ساخته می شوند. لایه PZT با استفاده از یک فرآیند Sol Gel - لایه نشانی می شود. سگدست با استفاده از ترکیب حکاکی توده ای سیلیکون و حکاکی عمیق یون واکنش زا (DRIE) ساخته می شود. یک نوع سوییچ ساخته شده در شکل زیر دیده می شود.

شکل ۸ - ۱۷

سوییچ ها داخل یک زیر لایه با استفاده از اتصال Flip - Chip قرار می گیرند. این روش سوییچ را برای قرار گرفتن بالای خطوط هم سطح با دقتی در حدود  $\pm 2\mu m$  در جهات X,Y و  $\pm 0.5\mu m$  در جهت Z قادر می سازد. اتصال Flip - Chip سوییچ به زیر لایه، سوییچ را برای استفاده در اکثر زیر لایه ها قادر می سازد. یک سوئیچ Flip - Chip اتصال یافته داخل یک زیر لایه GaAs در شکل ۸ - ۱۸ نشان داده شده است. امتیازات اضافی سوییچ تحریک شده Piezo ولتاژ کم ( $3 - 5^v$ ) مورد نیاز برای کار کردن می باشد. این را با ولتاژ  $100 \rightarrow 30$  برای راه اندازی یک سوییچ الکتروستاتیکی مقایسه کنید. در ولتاژ ( $3 - 5^v$ ) توان مورد نیاز برای مجتمع سازی کاملاً مناسب است. مسیر ساخت آسان است و ارزش های پردازش سیلیکون متداول استفاده می کند و بسیاری قطعات ممکن است روی یک ویفر ساخته شوند.

شکل ۸ - ۱۸

## ۹ - طراحی MEMS به کمک کامپیوتر ( CAD )

ابزارهای طراحی به کمک کامپیوتر می توانند تا حد زیادی باعث صرفه جویی در زمان و هزینه لازم برای طراحی فرآیند ساخت یک سیستم MEMS شوند. برای ساخت یک طرح، احتیاج به انجام مراحل متوالی ساخت در اتاق تمیز است. وقتی که قطعه بطور کامل ساخته شد، دیگر نمی توان به عقب برگشت و در فرآیند ساخت تغییراتی داد، یا شکل قطعه را تغییر داد. بلکه باید همه چیز را از ابتدا شروع کرد. اما با طراحی به کمک کامپیوتر، طراح می تواند خیلی سریع تغییرات مورد نظر خود را در فرآیند ساخت و طرح سیستم ایجاد کند. بدون این که هفته ها و ماه ها وقتش برای ساخت سیستم تلف شود.

اما مشکل کار اینجا است که ساخت ابزارهای CAD برای ادوات میکرومکانیکی مشکل است. چرا که نرم افزار باید توانایی منظور کردن و تحلیل فرآیندهای مختلف ساخت، ساختارهای سه بعدی، دینامیک قطعات متحرک و تولید نیرو در اثر عوامل مختلف را داشته باشد. در ضمن باید یک بانک اطلاعاتی قوی از خواص مواد مختلف به کار برده شده در MEMS و تغییرات خواص آنها نسبت به عواملی مثل دما و دوپینگ در اختیار طرح نرم افزار باشد.

روش معمول شبیه سازی سیستم MEMS این است که ابتدا برای سیستم یک MESH تعریف می شود. یعنی محدوده فیزیکی سیستم به خانه های بسیار کوچک تقسیم بندی می شود. سپس به وسیله روش عناصر کوچک ( FEM ) شبیه سازی انجام می شود. بدین ترتیب که فرمول های حاکم بر سیستم اعمال شده و پارامترهای مورد نظر استخراج می شوند. البته برای طرح های پیچیده، این روش بیش از حد کند است و تفسیر نتایج هم کار بسیار خسته کننده ای است. در شکل صفحه بعد الگوریتم کلی چنین نرم افزاری مشاهده می شود.

راه حل این مشکل چنین است که همانند نرم افزار SPICE قطعات MEMS به تنهایی مدل سازی شده و طراحی و شبیه سازی سیستم با رعایت سلسله مراتب ( Hierarchy ) انجام شود. در شکل زیر یک مثال از این تسلسل، از کل سیستم تا یک قطعه خاص مشاهده می شود.



ترویج و ارتباط شدید بین پارامترهای مختلف در سیستم های MEMS نشان می دهد که افق های وسیع و جالبی پیش روی طراحان CAD قرار دارد.

شکل ۹ - ۲

تکنولوژی MEMS بر پزشکی نیز اثر خواهد داشت. با استفاده از میکرو محرک ها می توان عمل های جراحی خیلی دقیق انجام داد ( مثل جراحی چشم ).

همچنین ادوات بسیار کوچکی می توان ساخت که بتوانند وارد خون شوند و بیماری را تشخیص دهند، در جاهای معینی دارو آزاد کنند و به تجمعات ویروس ها حمله کنند. هم اکنون شرکت i-stat سنسورهای الکترو شیمیایی بسیار کوچکی ساخته است که می توانند فقط با استفاده از ۶ هزارم میلی لیتر، مقدار انواع مواد موجود در خون مثل سدیم، پتاسیم، کلریدها، اوره، گلوکز، و ..... را اندازه گیری کنند. دانشمندان سعی می کنند آزمایشگاه های بسیار کوچک را در اندازه های بسیار کوچکتر به گونه ای بسازند که بتوان آنها را در زیر پوست انسان جای داد و به طور مرتب از وضع جسمی او آگاه شد.

همچنین با پیشرفت در فرآیندهای ساخت SiC که خواص بسیار بهتری نسبت به Si دارد ( از جمله سختی مکانیکی و قابلیت کار در دماهای بالا )، انتظار ساخت ادوات با کیفیت بسیار بالاتر وجود دارد.

همان طور که می دانیم تا کنون فقط سه نوع میکروماشین یعنی سنسور فشار، سنسور شتاب، و آینه دیجیتال توانسته اند به طور تجاری و در سطحی وسیع تولید شوند. با پیشرفت تکنیک های Packaging انتظار می رود در آینده، تعداد بیشتری از ادوات MEMS وارد بازار شوند.

متخصصان پیش بینی می کنند، تکنولوژی MEMS و میکرو سیستم در قرن بیست و یک همان تحولی را ایجاد می کند که تکنولوژی مدارهای مجتمع در قرن بیستم ایجاد کرد.

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)

[www.kandoo.cn.com](http://www.kandoo.cn.com)