

## ۱-۱ - MEMS چیست؟

سیستم های میکرو الکترو مکانیکی (MEMS) نوعی سیستم هستند که اندازه فیزیکی خیلی کوچکی دارند. این سیستمها دارای اجزای الکتریکی و مکانیکی هستند. هرچند که بعضی اوقات دارای قسمتهای غیر متحرک غیر الکتریکی (مثل قسمتهای شیمیایی، بیوشیمیایی و نوری) نیز هستند. برای ساخت این ادوات خیلی کوچک، از تکنیک ها و موادی که در ساخت مدارهای مجتمع بکار می روند، استفاده می شود. همان طور که در شکل ۱-۱ مشاهده می شود، MEMS در واقع یک پل بین رشته های میکرو الکترونیک و مکانیک است. وسیله ای برای برقراری ارتباط و برهمکنش بین دنیای الکترونیک و دنیای اطراف است.

### شکل ۱-۱

MEMS اصطلاحی است که اولین بار در اواخر دهه ۱۹۸۰ در آمریکا برای نامیدن این سیستم ها معمول شد. این رشته از تکنولوژی، در اروپا به Microsystems و در ژاپن به Micromechartronics معروف است. با وجود این هنوز بر سر معنای این اصطلاح اتفاق نظر وجود ندارد. به هر حال تصویری که از MEMS وجود دارد، یک واحد کامل است که هم قسمتهای الکتریکی و هم میکرو ساختارهای مکانیکی دارد. اندازه این اجزاء نیز بین چند نانومتر تا چند میلی متر متفاوت است، بعضی میگویند که اندازه یک واحد MEMS باید کمتر از یک سانتی متر مکعب باشد. اما این تعریف، هنوز مبهم و ناقص است. چیزی که در مورد ادوات MEMS مشترک است، این است که آنها در مقایسه با ماشین های عادی، یک یا چند تا از این ویژگی ها را در کوچک سازی سیستم (Miniaturization) دارند: تعداد اجزاء، پیچیدگی کار، مجتمع سازی سیستم و قابلیت تولید انبوه.

موج MEMS با توسعه تکنولوژی میکرو ماشینینگ سیلیکونی به پیش می رود. تکنولوژی میکرو ماشینینگ سیلیکونی در بیشتر موارد از تکنولوژی Micro fabrication استفاده می کند، که همان تکنولوژی ساخت مدارهای مجتمع است. اما در ضمن با تکنولوژی های دیگر مثل Liga و Micro EDM نیز تقویت شده است، دو خاصیت

مهم در میکرو ماشینینگ سیلیکونی هست که از تکنولوژی مدارهای مجتمع به ارث برده شده است: یکی کوچک بودن اندازه و دیگری تعداد زیاد این صفات ویژه باعث می شوند که ماشین ها و سیستم های معمولی در مواردی، نتوانند با میکرو ماشینینگ سیلیکونی رقابت کنند.

تکنولوژی MEMS با حوزه های مختلفی مرتبط است. هم از آنها استفاده می کند و هم در آنها کاربرد دارد، مانند شیمی، فیزیک، مهندسی، زیست شناسی و پزشکی. از آنجائی که برای کنترل و یا خواندن سیگنال حاصل از قسمت مکانیکی، یک مدار الکترونی نیز لازم است، امروزه معمولاً این دو قسمت را با هم روی یک ویفر می سازند، این کار باعث افزایش دقت، کاهش هزینه و کاهش اندازه فیزیکی سیستم می شود. افزایش دقت به خاطر کاهش نویز، و نیز کاهش مقاومت و خازن پارازیتیک خط انتقال بین دو قسمت است.

امروزه می توان سیستم های MEMS را قبل از ساخت با کامپیوتر، شبیه سازی کرد و صحت کار سیستم را ارزیابی کرد. تولید نرم افزارهای MEMS CAD Tools باعث می شوند که طراحی و ساخت ادوات جدید با سرعت خیلی بیشتری انجام شود.

ادوات MEMS، در زمینه های مختلفی مثل پزشکی، حمل و نقل، خودکار سازی، ماشین آلات، انواع سنسورها، سیستم های نظامی و صفحات نمایشگر کاربرد دارند.

در سال ۱۹۹۷ تخمین زده می شد که بازار جهانی MEMS، حدود ۲ میلیارد دلار باشد. تا سال ۲۰۰۰ بازار جهانی MEMS به حدود ۱۴ میلیارد دلار و ارزش اثر آن بر بازار به طور کلی ۱۰۰ میلیارد دلار بوده است. پس می توان گفت که MEMS آینده بسیار خوبی دارد.

#### ۱-۲ - تاریخچه

ایده ساخت سیستم های خیلی کوچک در سال ۱۹۵۹ توسط فیزیکدان مشهور ریچارد فاینمن، در یک سخنرانی با عنوان *There is a plenty of room at the bottom* مطرح شد. او در این سخنرانی، ایده ها و چشم اندازهایی در مورد طرح کار، دانش، مهندسی و کاربردهای سیستم ها و ماشین های خیلی کوچک مطرح کرد. او در سال ۱۹۸۳ نیز سخنرانی دیگری را در این مورد ایراد کرد و پیش بینی های جالبی را ارائه داد، که بعضی از آنها تاکنون محقق شده اند و بعضی دیگر نیز موضوع تحقیقات هستند.

در سال ۱۹۸۲ کورت پیترسن از IBM، پس از چند سال پژوهش و آزمایش مقاله ای انتشار داد که در آن با بیان نتایج پژوهش هایش نشان داد که سیلیکون دارای خواص و قابلیت های بسیار خوبی (از جمله استحکام) برای ساخت قطعات

مکانیکی خیلی کوچک است. از آنجایی که در ساخت مدارهای مجتمع نیز به وفور از سیلیکون استفاده می شود و فرآیندهای لازم برای ساخت ادوات سیلیکونی ( مثل لیتوگرافی، Etching و ... ) وجود داشتند، این مقاله باعث شد که ساخت قطعات مکانیکی سیلیکونی، به سرعت رواج یافته و پیشرفت کند.

مقاله سال ۱۹۸۲ پیترسن از نظر بسیاری افراد، به عنوان نقطه آغاز رسمی تکنولوژی MEMS شناخته می شود. هرچند که قبل از آن نیز کارهای پراکنده ای در مورد ساخت سیستم های بسیار کوچک انجام شده و انتشار یافته بودند. پیترسن اکنون نیز زنده است و یکی از پرکارترین و مشهورترین پژوهشگران در زمینه MEMS به شمار می رود.

### ۱-۳ - MEMS چه مزایایی دارد؟

سیستم های MEMS اندازه بسیار کوچکی دارند. این مهمترین مزیت MEMS است.

استفاده از MEMS به عنوان سنسور مفید است. چرا که به خاطر اندازه خیلی کوچکش، بسیار کمتر از ادوات بزرگ با محیط بر همکنش و تبادل انرژی دارد. در ضمن می توان از یک آرایه از سنسورها استفاده کرد، ( برای اثر Redundancy ) بدون این که حجم زیادی اشغال شود. استفاده از MEMS به عنوان محرک نیز مفید است. چرا که بخاطر اندازه خیلی کوچکش، حرکت اعمال شده توسط آن می تواند خیلی دقیق باشد.

در ضمن، کوچک بودن این ادوات باعث می شود که بتوان آنها را در جاهای خاصی، مثل خودروها و بدن انسان وارد کرد تا بعضی پارامترهای محیط را اندازه گرفته یا تغییر دهند.

از آنجائی که تولید MEMS شبیه تولید مدارهای مجتمع است، پس ادوات MEMS نیز در صورت تولید انبوه ارزان تمام می شوند. در ضمن در موارد خاص، اگر ادوات MEMS گران تمام شود نیز، در جاهای خاصی که اندازه و وزن کم بسیار مهم است ( مثل ماهواره ها یا سفینه های فضائی ) بازهم استفاده از MEMS توجیه دارد.

در ضمن همان طور که قبلاً هم ذکر شد، اگر قسمت های مکانیکی و الکترونیکی سیستم MEMS به طور یکپارچه روی یک ویفر ساخته شوند، دقت و حساسیت سیستم حاصله بسیار بیشتر از سیستم های بزرگ معمولی خواهد بود. ( به خاطر کاهش نویز و مقاومت و خازن پارازیتیک )

### ۱-۴ - در چه جاهایی از MEMS استفاده می شود؟

در وسایل نقلیه از فشار سنج های MEMS برای اندازه گیری فشار روغن موتور، فشار خلاء، فشار تزریق سوخت، فشار سوخت منتقل شده، فشار خط ترمز ABS، فشار تایرها و فشار هوای ذخیره شده برای کیسه هوایی استفاده می

شود. همچنین از شتاب سنج های MEMS هم می توان برای خواندن دمای روغن موتور، ضد یخ و دمای هوا استفاده کرد.

در صنعت نیز سیستم های خودکار و ابزار دقیق می توانند از ادوات MEMS مثل فشار سنج، دما سنج، شتاب سنج، سنسور فاصله (Proximity) استفاده کنند.

در سیستم های کنترل کننده در خانه و صنعت نیز می توان از MEMS استفاده کرد. در اینجا هم سنسورها و هم محرک ها مورد نیاز هستند. از سنسورها برای اندازه گیری پارامترهای مختلف محیط اطراف و از محرکها برای تنظیم پارامترها استفاده می شود.

سیستم های نوری نیز از محرک های MEMS در جاهای مختلفی مثل آئینه و پروژکتورهای دیجیتال، فیلترها، مدولاتورهای نوری، ابزار خواندن خط نماد (Barcode) و ... استفاده می کنند.

در پزشکی نیز می توان از ابزار MEMS در جاهایی که دخالت دست ممکن نیست، مثل : آندوسکوپی، جراحی از راه دور و جراحی های ظریف مثل جراحی چشم ( مثلاً آب مروارید ) استفاده کرد. همچنین می توان ادوات خیلی ریز MEMS را وارد بدن و دستگاه گردش خون کرد تا کارهایی مثل شناسایی بیماری و آزاد کردن دارو در مناطق خاصی از بدن را انجام دهند.

در موارد متعدد دیگر مثل چاپگر جوهر افشان و میکروسکوپ ها نیز از MEMS استفاده می شود. هر کدام از این موارد بعداً به طور مفصل توضیح داده خواهد شد.

## ۲- فرآیند ساخت

فرآیند ساخت به چند دسته عمده تقسیم می شود:

- ۱- ساخت مدار مجتمع ( IC Fabrication ) .
- ۲- میکرو ماشینینگ توده ای ( Bulk Micro machining ) .
- ۳- میکرو ماشینینگ سطحی ( Surface Micro Machining ) .
- ۴- حکاکی عمیق یون واکنش زا ( DRIE = Deep Reactive Ion Etch ) .

میکرو ماشینینگ توده ای و سطحی در قسمت بعد توضیح داده خواهند شد.

فرآیند ساخت مدار مجتمع که در MEMS نیز استفاده می شود، خود به چند دسته تقسیم می شود :

- ۱- لایه نشانی ( Deposition ) .
- ۲- نقش نگاری ( Lithography ) .
- ۳- روش برداشتی یا حذفی ( Removal ) .

یکی از نیازهای مهم در MEMS قدرت نشاندن لایه هایی از مواد با کیفیت خوب است. فن آوری لایه نشانی در

MEMS به دو دسته تقسیم می شود :

- ۱- لایه نشانی بر اساس واکنش شیمیایی .
- ۲- لایه نشانی بر اساس واکنش فیزیکی .

در لایه نشانی بر اساس واکنش شیمیایی، ترکیبات گاز یا مایع با یکدیگر واکنش داده و نهایتاً یک لایه بر روی بستر رسوب می کند، چند روش وجود دارد که بر اساس واکنش شیمیایی عمل می کنند :

- ۱- لایه نشانی بخار شیمیایی ( CVD ) .
- ۲- آبکاری ( Electro deposition ) .
- ۳- رشد لایه هم بافته .
- ۴- اکسایش حرارتی .

در لایه نشانی بر اساس واکنش فیزیکی هیچ نوع واکنش شیمیایی اتفاق نمی افتد و مواد به صورت فیزیکی روی بستر نشاندگی می شوند. دو روش زیر بر اساس واکنش فیزیکی عمل می کنند :

۱- لایه نشانی بخار فیزیکی ( PVD ) .

۲- ریخته گری ( Casting ) .

در روش برداشتی یا حذفی که سومین روش از فرآیندهای ساخت MEMS می باشد، باید قسمت های اضافی بستر بر طبق الگوی مورد نظر زدوده شوند که خود به دو دسته تقسیم می شوند.

۱- حکاکی تر ( Wet Etching ) .

۲- حکاکی خشک یا حکاکی پلاسما ( Dry or Plasma Etching ) .

حال به شرح جزئیات روش های گفته شده می پردازیم :

## ۲-۱- روشهای لایه نشانی شیمیایی

### ۲-۱-۱- لایه نشانی بخار شیمیایی ( CVD: Chemical vapor Deposition )

در این روش بستر در یک راکتور قرار گرفته و یک یا چند گاز مثل ( N<sub>2</sub> ) وارد می شوند. این گازها تا رسیدن به حرارت لایه نشانی گرم می شوند و از این حرارت به بعد ورود این گازها قطع می شوند و از این به بعد گاز واکنش دهنده وارد می شود. در اثر واکنش این گازها با هم یک لایه بر روی بستر نشاندگی می شود. بسیاری از لایه های CVD یا به صورت Amorphous یا به صورت Polycrystalline هستند.

لایه نشانی بخار شیمیایی به دو صورت زیر انجام می شود :

۱- CVD فشار پایین ( LPCVD : Low Pressure CVD ) .

۲- CVD بهبود یافته یا پلاسما ( PECVD : Plasma Enhanced CVD ) .

فرایند LPCVD بهترین لایه ها از نظر کیفیت، ضخامت و مشخصه موادی خوب را تولید می کند. مشکل اساسی این روش نیاز به دمای بالای فرایند ( بیشتر از ۶۰۰ درجه سانتیگراد ) و پایین بودن سرعت لایه نشانی است .

در فرایند PECVD، گاز به اجزای سازنده اش تجزیه می شود. پلاسما باعث افزایش سرعت فرایند می شود. پلاسما

بوسیله یک منبع RF گرم شده، باعث تشکیل یون هایی می شود . بسیاری از یونها روی زیر لایه ( Substrate )

لایه نشانی ( Deposit ) می شوند. با این روش کیفیت لایه نازک ( Thin film ) معمولاً خوب نیست و ممکن

است شامل ترکها یا جاهای خالی باشد. شکل ۲-۱ یک راکتور LPCVD را نشان می دهد .

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

شکل ۲ - ۱

### ۲-۱-۲- آبکاری ( Electrodeposition )

این روش، برای ایجاد لایه هائی از مواد هادی الکتریکی مناسب است . دو فناوری برای آبکاری وجود دارد :

۱- Electroplating

۲- Electrolessplating

در فرایند Electroplating، بستر در یک الکترولیت قرار گرفته و وقتی پتانسیل بین سطح هادی بستر و الکترود کاتد ( معمولاً پلاتینیوم ) اعمال می شود، یک واکنش شیمیایی انجام گرفته و نتیجه آن تشکیل یک لایه روی بستر و تولید گاز از الکترود کاتد است.

در روش Electrolessplating یک ترکیب شیمیایی استفاده می شود و روی هر سطحی که پتانسیل الکترود شیمیایی بالاتری با محلول داشته باشد، لایه نشانی انجام می شود . این روش بخاطر عدم نیاز به پتانسیل الکتریکی خارجی و عدم استفاده از Contact به زیر بنا خوب است، اما کنترل ضخامت و یکنواختی لایه نشانی شده سخت است . شکل ۲-۲ شماتیک دستگاه Electrodeposition را نشان می دهد .

شکل ۲

هنگامی که لایه رسوب یافته هادی الکتریکی خوبی مثل مس، طلا و نیکل باشد مناسب است. با استفاده از این روش لایه هائی به ضخامت بین ۱ تا ۱۰۰ میکرومتر میتوان ایجاد نمود. اگر از پتانسیل خارجی استفاده شود، ضخامت را میتوان کنترل کرد، ولی این کار نیازمند اتصال الکتریکی به بستر است و سطح بستر نیز باید قبل از لایه نشانی هادی باشد.

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

### ۳-۱-۳ رشد لایه همبافته ( Epitaxy )

این روش، روشی است که فقط یکبار در شروع مراحل ساخت مورد استفاده قرار می گیرد. طی این مرحله، لایه ای از سیلیسیم روی قرصی از سیلیسیم رشد داده می شود. هنگامی که لایه همبافته بر روی بستر رسوب می کند، اتم های درون آن مطابق ساختار شبکه زیرین خود مرتب می شوند. بنابراین، لایه سیلیسیم که به روش همبافته رشد پیدا می کند، ساختار کاملاً بلورین دارد و ساختار بلور زیرین را تکرار می کند. فایده لایه همبافته از اینجا ناشی می شود که لایه های رشد یافته را می توان از نظر میزان / و یا نوع، به طرز متفاوتی نسبت به بستر زیرین آلاید. این گونه لایه ها اغلب بخشهای حساسی از افزاره های الکترونیکی را تشکیل می دهند ( مثلاً ناحیه کانال در ترانزیستور های CMOS یا کلکتور - بیس و امیتر در ترانزیستور های دو قطبی )

رشد لایه همبافته برای ایجاد ناحیه فعال در فن آوری SOI (Silicon on insulator) نیز به کار میرود. شکل ۲-۳ شماتیکی از VPE را نشان می دهد.

### شکل ۳

برای ایجاد لایه همبافته، قرص درون کوره رشد لایه همبافته قرار داده می شود. در اثر واکنش شیمیایی ( مثلاً تجزیه سایلین ) سیلیکون بر روی بستر رسوب می کند.

### ۲-۱-۴ اکسایش ماراتی

این روش یکی از اساسی ترین روش های لایه نشانی است. در این روش بستر در محیط اکسیژن و در دمای ۱۱۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد ( بسته به سرعت مورد نیاز برای اجرای فرآیند ) اکسید می شود. در این روش مقداری از بستر نیز برای انجام واکنش مصرف می شود. سرعت رشد لایه با افزایش ضخامت آن کم می شود، زیرا اکسیژنی که به سطح بستر می رسد، رفته رفته کمتر می شود.

وقتی ضخامت لایه اکسید زیاد می شود، نفوذ اکسیژن به آن سخت می شود. بر اساس رابطه سهمی بین ضخامت لایه و زمان اکسایش، ضخامت به حدود ۱۰۰ نانومتر محدود می شود. با این روش لایه  $\text{SiO}_2$  روی  $\text{Si}$  تشکیل می شود.



شکل ۲ - ۴ این روش را نشان می دهد.

شکل ۴

#### ۲-۲ روش های لایه نشانی فیزیکی

##### ۲-۲-۱ رسوب بخارات فیزیکی ( PVD : Physical vapor Deposition )

در این روش مواد از منبع گرفته شده و به بستر منتقل می شوند. دو روش مهم تبخیر ( Evaporation ) و کندوپاش ( Sputtering ) است. PVD، روش استاندارد برای لایه نشانی فلزات است. خطرات کمی نسبت به CVD دارد و هزینه مواد آن کمتر از CVD است. ولی کیفیت لایه های آن بدتر از CVD است. PVD برای فلزات با مقاومت بالا و برای عایق ها، نقص ها و تله های زیادی دارد. همچنین پوشش پله ای در این روش خوب نیست .

##### ۲-۲-۲ تبخیر ( Evaporation ) .

در این روش بستر و مواد مورد نظر در یک محفظه خلا قرار می گیرند، سپس ماده مورد نظر را به صورت نقطه ای گرم کرده و در آن نقطه ماده ذوب و تبخیر می شود. وجود خلا مهم است، زیرا به مواد ذوب شده اجازه می دهد تا بدون برخورد با ملکولهای هوا به بستر مورد نظر برسند و بر روی آن ( و محیط اطراف آن ) رسوب کنند.

#### دو روش برای تبخیر وجود دارد :

۱- روش مقاومتی

۲- روش باریکه الکترونی

در روش گرم کردن با اشعه الکترونی، یک باریکه الکترونی توسط تفنگ الکترونی ( شامل فیلمان، کاتد، آند، لنزهای الکترو استاتیکی و مغناطیسی و شتاب دهنده الکترو استاتیکی ) تولید و شتاب داده می شود، به گونه ای که به ماده داخل بوته برخورد کند. بوته از زیر توسط خنک کننده ( آب )، خنک می شود. در این روش باریکه الکترونی به صورت

محلی فقط یک نقطه از ماده را تبخیر می کند و بنابراین آلودگی از بوته وارد لایه نمی شود و برای مواد دیر گداز کاملاً مناسب است. شکل ۲ - ۵ روش تبخیر به کمک الکترون را نشان می دهد.

شکل ۵

در روش تبخیر مقاومتی، یک بوته تنگستنی که شامل مواد مورد نظر است و با عبور جریان (حدود  $A = 260$ ) ماده مورد نظر ذوب و تبخیر می شود. این روش برای مواد دیر گداز مناسب نیست.

#### ۲ - ۳ - ۳ کندوپاش ( Sputtering )

این روش بسیاری از مشکلات Evaporation را حل می کند. این روش بر اساس کندن اتم ها از ماده مورد نظر در دمای خیلی پایین تر از دمای ذوب آنها و نشان دادن آنها بر روی بستر کار می کند. در این روش بستر و ماده مورد نظر به نام هدف ( Target ) در خلا (  $10^{-8}$  تا  $10^{-7}$  torr ) قرار گرفته و یک گاز خنثی ( Ar یا He ) با فشار کم به آن اعمال می شود. Target کاتد است و ویفرها ( Substrate ) آند هستند. با استفاده از منبع dc یا rf پلاسما تشکیل شده و گاز یونیزه می شود. یون ها به طرف ماده مورد نظر شتاب داده میشوند و اتم های آن را پراکنده می کنند. این اتمها روی بستر می نشینند. شکلی از Sputtering نوع RF در شکل ۲-۶ دیده می شود.

شکل ۶

در این روش تقریباً همه مواد Sputter می شوند. می تواند بیشتر از یک هدف مورد استفاده قرار گیرد. ( co sputtering ). بیش از یک Substrate می تواند مورد استفاده قرار گیرد ( Mass Sputtering ).

## ۲-۲-۴ - ریخته گری ( Casting )

در این روش ماده ای که باید نشانده شود در یک حلال، حل می شود و می توانیم آن را با اسپری کردن و یا چرخاندن روی بستر قرار دهیم، سپس حلال تبخیر شده و ماده مورد نظر روی زیر بنا باقی می ماند. این روش برای مواد پلیمری خوب است، چون به راحتی در حلال ها حل می شوند. این روش شبیه استفاده از فتورزیست در فوتولیتوگرافی است. ضخامت فیلم می تواند از یک لایه مولکولی تا چند ده میکرون باشد. برای تشکیل فیلم شیشه روی زیر بنا از این روش استفاده می شود. شکل ۲-۷ این روش را نشان می دهد.

شکل ۷

از روش Casting برای ایجاد لایه هائی از مواد مختلف می توان استفاده نمود ( مخصوصاً برای پلیمرها ) . ضخامت لایه را با دقت ۱۰٪ ( با زمان و سرعت چرخش ) میتوان کنترل کرد.

## ۲-۳ - روشهای حکاکی ( Etching ) .

### ۲-۳-۱ - حکاکی تر ( Wet Etching ) .

ساده ترین روش حکاکی است . در این روش یک حلال ماده را خورده و الگوی مورد نظر تولید می شود . این حلال ها باید قابلیت انتخابی داشته باشند. یعنی نباید مواد دیگر و یا محافظ حساس به نور ( فتورزیست ) را حل یا خراب کنند . حکاکی کننده های تر به دو گروه عمده تقسیم می شوند :

۱ - حکاکی کننده های Isotropic

۲ - حکاکی کننده های Anisotropic

حکاکی کننده های Isotropic ویفر را در همه جهات با نرخ یکسان حکاکی می کنند .

حکاکی کننده های Anisotropic ویفر را در جهات مختلف و نرخهای مختلفی حکاکی می کنند.

بعضی از حکاکی کننده ها ویفر را با توجه به محل تمرکز ناخالصی ها در نرخهای متفاوت حکاکی می کنند. حکاکی کننده های Isotropic برای سیلیکون، طلا، پلی سیلیکن، آلومینیوم، نیتريد و اکسید وجود دارند. Isotropic ها ماده را بطور افقی زیر Mask در نرخ یکسانی حکاکی می کنند. در شکل زیر لایه های نازکی از اکسید روی ویفری از سیلیکون نشان داده شده است که در آن از حکاکی کننده ای استفاده شده که اکسید را سریعتر از سیلیکونی که در لایه های زیرین قرار دارد، حکاکی می کنند. ( مثل اسید هیدروفلوئوریک HF ).

شکل ۲ - ۸

حکاکی کننده های Anisotropic وجود دارند که سطوح کریستالی را در نرخهای مختلفی حکاکی می کنند. متداول ترین آنها هیدروکسید پتاسیم ( KOH ) می باشد. KOH برای استفاده کاملاً ایمن می باشد. متداولترین جهت کریستالی سیلیکون <100> می باشد. ساده ترین ساختاری که می تواند با استفاده از KOH برای حکاکی ویفر سیلیکون ساخته شود در شکل ۲ - ۹ نشان داده شده است. جهت <110> نیز استفاده می شود ولی جهت <111> استفاده نمی شود.

شکل ۲ - ۹

این شکل یک کانال V شکل با گوشه های راست زاویه و دیواره های مورب می باشد. با استفاده از ویفرهای با جهات کریستالی مختلف می توان کانالهائی یا گودالهائی با دیواره عمودی ساخت. اکسید و نیتريد در KOH به آهستگی حکاکی می شوند. اکسید می تواند به عنوان یک Mask حکاکی برای زمانهای کوتاه در حمام KOH استفاده شود. برای زمانهای طولانی، نیتريد Mask حکاکی بهتری می باشد، زیرا در KOH به آهستگی حکاکی می شود. مقادیر زیاد Boron در سیلیکون باعث کاهش نرخ حکاکی می شود. ناخالصی بور معمولاً بوسیله فرآیندی به نام Diffusion وارد سیلیکون می شود.

Mask ضخیمی از Oxide در جایی که Boron داخل سیلیکون نباید بشود، در بالای ویفر سیلیکون تشکیل و الگو داده می شود. ( شکل a ). ویفر سپس در یک کوره در تماس با یک منبع انتشاری بور قرار داده می شود. در طی مدتی اتمهای بور داخل ویفر سیلیکون می شوند. یک بار که عمل انتشار بور کامل شد Mask اکسید برداشته می شود. ( شکل b ). سپس Mask دوّم قبل از اینکه ویفر در حمام KOH وارد شود، لایه نشانی و الگو دهی می شود. ( شکل c ). KOH سیلیکونی را که بوسیله Mask حفاظت نشده حکاکی می کند. ( شکل d ).

شکل ۲ - ۱۰

بور می توان داخل سیلیکون به اندازه  $20\mu m$  در طی ۱۵ تا ۲۰ ساعت قرار داده شود. البته هر چه در کوره کمتر نگاه داشته شود، مطلوب تر است. وقتی که ویفر را از جلو در KOH حکاکی می کنیم، ممکن است قسمت تحتانی بور تزریق شده در سیلیکون حکاکی نشود. در این موارد، ویفر را می توان از پشت حکاکی کرد، اگر چه این روش هم بدون مشکل نیست. از مشکلات آن می توان به زمان حکاکی طولانی تر و ویفرهای گرانتتر اشاره کرد. در روش حکاکی تر Isotropic کیفیت لبه ها خیلی خوب است. از عوامل مؤثر بر این روش می توان موارد زیر را نام برد :

۱- حکاکی کننده ( Etchant ).

۲- روش تحریک ( String method ).

۳- حرارت.

۴- سطح تزریق.

۵- نقص کریستال.

حکاکی کننده های متداول مورد استفاده در این روش عبارتند از :

۱-  $HNO_3$  (اسید نیتریک).

۲- HF (اسید هیدرو فلوریک).

۳-  $CH_3 COOH$  (اسید استیک).

Mask های متداول مورد استفاده در مقابل این حکاکی کننده ها عبارتند از :

۱-  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ( نیتريتها ).

۲- فلزهای نجیب ( Nobble )

۳-  $\text{SiO}_2$

شکل ۲-۱۱ تفاوت بین حکاکی تر Isotropic و Anisotropic را واضح تر نشان می دهد.

شکل ۲-۱۱

برای کنترل حکاکی Anisotropic و مطمئن شدن از اینکه حکاکی در یک سطح مشخص متوقف می شود از Etching stop ها استفاده می شود.

از Boron معمولاً به عنوان Etch stop استفاده می شود. به عنوان مثال تزریق  $10^{20}$  اتم Boron در هر  $\text{cm}^3$  نرخ حکاکی را به صورت زیر تغییر می دهد.

۱- ضربی از ۵۰۰ برای EDS ( نوع S ) در  $66^\circ\text{C}$  برای سیلیکون  $\langle 100 \rangle$

۲- ضربی از ۱۰ برای ۴۲٪ KOH در  $66^\circ\text{C}$  برای سیلیکون  $\langle 100 \rangle$

حکاکی Boron  $\text{P}^+$  در حکاکی n-si خیلی مؤثر است، اما باعث استرس مکانیکی در دیافراگم انتهائی می شود. نوع دیگری از Etch stop ها تحت عنوان متوقف کننده های حکاکی الکترومکانیکی ( Electromechanical ) وجود دارند که در آن از یک اتصال p-n که در گرایش معکوس قرار داد استفاده می شود.

شکل ۱۳

در طی زمان حکاکی جریان نشستی اتصال p-n در بایاس معکوس برقرار است. وقتی که همه لایه p حکاکی شود، ناگهان جریان افزایش یافته و حکاکی متوقف می شود. تزریق زیاد در این روش مورد نیاز نیست.

### ۲ - ۳ - ۲ - حکاکی خشک یا حکاکی پلازما ( Dry or Plasma Etching )

این روش به سه دسته زیر تقسیم می شود :

۱- حکاکی توسط یون واکنش زا ( Reactive Ion Etch : RIE ).

۲- حکاکی به روش کندوپاش ( Sputter Etching ).

۳- حکاکی در فاز گاز.

در RIE ، بستر در یک راکتور که حاوی گازهای واکنش دهنده است قرار می گیرد. سپس پلاسمای ac اعمال می شود و مولکولهای گاز به یون تبدیل می شوند. یونها شتاب داده شده و با بستر واکنش می نمایند و باعث خرد شدن آن می شوند. این روش شیمیایی RIE است. یک روش فیزیکی مشابه کندوپاش نیز وجود دارد. در این روش با اعمال یونهای یک گاز با انرژی مناسب به اتمهای ماده مورد نظر آن را می زداییم. اجرای این روش به خاطر نیاز به تنظیم چندین پارامتر سخت است.

زدودن فاز بخار نیز می تواند با همان وسایل RIE انجام شود. در این روش قرص در محفظه قرار داده شده و چند گاز واکنش دهنده به آن وارد می شود. موادی که باید حل شوند، در واکنش گاز با سطح، زدوده می شوند. دو روش برای این کار وجود دارد :

۱- استفاده از HF.

۲- استفاده از  $\text{XeF}_2$ .

هر دو روش بالانجربه زدایش هم جهته ( Isotropic ) می شوند.

روش زدایش خشک در مقایسه با روش شیمیایی (حکاکی تر) گران است. اگر نیاز به دیواره های عمودی یا ایجاد نقشهای ریز باشد، این روش مفید است.

شکل ۲ - ۱۳ یک سیستم RIE را نشان می دهد. RIE یک روش حکاکی Anisotropic می باشد.

شکل ۱۴

## ۲-۴ - کاشت یونی

کاشت یونی، اساسی ترین فرآیندی است که بوسیله آن تراکم ناخالصی های آلاینده را تغییر می دهند. این فرآیند در دستگاهی به نام دستگاه کاشت یونی انجام می شود و طی آن تمام سطح هدف ( Target ) در معرض بمباران یک نواخت میزان کاملاً مشخصی از اتمهای یونیزه شده آلاینده مورد نظر، از قبیل آرسنیک ( As )، فسفر ( P ) و بور ( B ) قرار می گیرد. این یون ها، ابتدا در یک میدان الکتروستاتیک شتاب می گیرند و به این ترتیب برای وارد شدن به هدف، انرژی کافی به دست می آورند. ( ۳۰۰ Kev تا ۱۰ ) . یون ها وارد قسمتهائی از سیلیسیم می گردند که بوسیله ضخامت مناسبی از Mask محافظ از ورودشان جلوگیری نشده باشد. این پوشش محافظ را می توان از محافظ حساس به نور،  $SiO_2$ ،  $Si_3N_4$  سیلیسیم چند بلوره یا ترکیبی از این مواد انتخاب نمود. موقعیت قله یون های کاشته شده در لایه و پهنای آن به انرژی یون ها، جرم یون ها و ماده بستگی دارد. برای کاربردهای معمولی این پارامتر بین 0.05 تا 0.5 میکرومتر تغییر می کند. تعداد کل یون های کاشته شده بر واحد سطح یا دوز یونی را می توان به دقت کنترل نمود و این تعداد، بسته به کاربرد مورد نظر معمولاً ۱ تا ۱۰ یون بر میکرومتر مربع است.

اتم های ناخالصی ممکن است به طور مستقیم و یا پس از گذشتن از میان لایه نازکی که معمولاً اکسید حرارتی سیلیسیم است، در داخل سیلیسیم کاشته شوند.

## ۲-۵ - نقش نگاری ( Lithography ) .

نقش نگاری فرآیندی است که طی آن الگو های هندسی از یک نقاب، بر روی سطح قرص، یا بر روی سطح لایه ای که قرص را پوشانیده است، منتقل می گردند. برای این منظور، سطح ابتدا بوسیله لایه پلیمری به نام محافظ حساس پوشانیده می شود. و الگو های هندسی از سطح نقاب به روی آن منتقل می گردند. برای این انتقال، چند روش وجود دارد که در حال حاضر معمول ترین این روشها، روش نوری است.

به همین علت این فرآیند، نقش نگاری نوری ( Photolithography ) و لایه پلیمر محافظ حساس به نور ( Photoresist ) نامیده می شود.



شکل a لایه نازکی از یک ماده مثل اکسید سیلیکون را روی زیر لایه ای ( Substrate ) از ماده ای دیگر مثل ویفر سیلیکون نشان می دهد. می خواهیم که مقداری از دی اکسید سیلیکون به طور انتخابی برداشته شود و فقط در نواحی خاصی، دی اکسید سیلیکون روی ویفر سیلیکون باقی بماند ( شکل f )

ابتدا یک Mask که نوعاً یک الگوی کروم ( Chromium ) روی یک صفحه شیشه ای ( Glass plate ) است، ایجاد می شود. سپس ویفر با یک پلیمر که به نور ماورا بنفش حساس است و به آن Photoresist می گویند پوشانده می شود ( شکل b ) نور ماورا بنفش از طریق mask داخل photoresist راه می یابد و الگوی روی Mask به لایه Photoresist منتقل می شود ( شکل c,d ). اگر ماده محافظ حساس به نور مثبت ( Positive ) باشد، در مرحله ظهور، مناطقی را که در معرض نور قرار نگرفته اند، بدون تغییر باقی می گذارد و بقیه را پاک می کند، اگر ماده محافظ حساس به نور منفی باشد، عمل عکس اتفاق می افتد. ماده ای شیمیایی برای برداشتن اکسید در مناطقی که Photoresist برداشته شده، استفاده می شود. ( شکل e ) در نهایت Photoresist نیز برداشته می شود. ( شکل f )

شکل ۱۵

#### ۲-۶- هم تراز یا تنظیم ( Alignment )

برای ساختن قطعات مفید الگوهای مراحل مختلف لیتوگرافی که مربوط به یک ساختار هستند باید با یکدیگر Align شوند. الگوی اولیه معمولاً به یک ویفر که شامل مجموعه ای از نشانه های ( Alignment Marks ) alignment است، انتقال می یابد. آن ویفر دارای خصوصیات دقیقی است، چون به عنوان مرجعی برای جای گذاری الگوهای زیر مجموعه استفاده می شود. ( شکل ۲ - ۱۵ )

به علت این که نشانه های Alignment اصلی ممکن است در عملیات پردازش زدوده شوند، پس در الگوهای دیگر هم نشانه های Alignment به عنوان ذخیره وجود دارند. برای هر نشانه Alignment روی ویفر باید یک Label وجود داشته باشد تا معلوم شود که باید به کدام الگو align شود. با ایجاد مکان نشانه alignment و قرار

دادن الگو به طور صحیح برای کاربر ساده می باشد. هر لایه الگو باید دارای یک خصوصیت Alignment باشد، چون ممکن است قرار باشد به لایه های دیگر متصل شود.

شکل ۱۶

منوط به تجهیزات لیتوگرافی مورد استفاده، خصوصیت روی Mask مورد استفاده برای ثبت کردن Mask، ممکن است به ویفر انتقال یابد، شکل ( ۲ - ۱۶ ). در این مورد، قرار دادن نشانه های Alignment آن چنان که روی عملکرد قطعه یا فرآیند پردازش زیر مجموعه ها تأثیر نگذارد، مهم می باشد. برای مثال، نشانه Alignment نشان داده شده در شکل زیر بعد از حکاکی DRIE ویفر از بین رفته است. انتقال الگو از طرح های Mask alignment به ویفر ممکن است، طرح های Alignment روی ویفر را حذف کند. در این مورد، نشانه های Alignment باید برای کاهش این اثر طراحی شوند، یا به طور متناوب باید چندین کپی از نشانه های Alignment روی ویفر وجود داشته باشد. بنابراین نشانه های Alignment دیگری برای ثبت شدن به قبلی ها برای دیگر Mask ها وجود خواهد داشت.

شکل ۱۷

نشانه های Alignment ممکن است لزوماً به طور دلخواهانه روی ویفر قرار داده نشوند، این بخاطر تجهیزات مورد استفاده در Alignment می باشد که مانور عملیات را محدود می کند که باعث می شود تنها بتوان در یک ناحیه مشخص روی ویفر عملیات Alignment را انجام داد ( شکل ۲ - ۱۷ ) هندسه و سایز آن ناحیه مشخص نیز ممکن است با نوع Alignment تغییر کند، بنابراین قبل از قرار دادن نشانه های alignment، باید تجهیزات لیتوگرافیک و نوع Alignment مورد توجه قرار گیرد. دو نوع نشانه Alignment برای Align کردن Mask و ویفر در جهات X,Y کافی است. اما به دو نشانه ( ترجیحاً جدا از هم ) برای تصحیح برای افست خوب در چرخش مورد نیاز است.

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

شکل ۱۸

از آن جایی که روی ویفر برای الگوی اولیه هیچ الگویی برای Align کردن وجود ندارد، الگوی اولیه به سطح ویفر اولیه Align می شود ( شکل ۲-۱۸ ). این عمل ممکن است به صورت اتوماتیک یا به صورت Manual روی Mask صورت گیرد.

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

شکل ۱۹

## ۲-۷ - در معرض گذاری ( Exposure )

برای دستیابی به یک الگوی دقیق انتقال از Mask به لایه حساس به نور، یک سری پارامترها را باید در نظر گرفت تا به آن میزان تغییر خصوصیتی که می خواهیم در Photoresist ایجاد شود، برسیم. از جمله این موارد، طول موج منبع تشعشع و میزان تشعشع می باشد. Photoresist های مختلف نسبت به طول موج های مختلف حساسیت های مختلفی نشان می دهند. Photoresist مورد نیاز در واحد حجم برای یک انتقال الگوی خوب تا حدی ثابت است. اگر چه فیزیک فرآیند Exposure ممکن است روی مقدار انتقال واقعی الگو تاثیر بگذارد. برای مثال در صورتی که لایه زیر Photoresist بسیار صیقلی باشد، نسبت به موردی که لایه زیر photoresist جذب کننده است، Photoresist بیشتری نیاز دارد.

همچنین تاثیرات مرتبه بالا ( High order ) نیز وجود دارد. مثل الگوهای راه یافته در لایه های ضخیم Resist روی زیر لایه های صیقلی که ممکن است روی کیفیت انتقال الگو و خصوصیات دیواره تاثیر بگذارد. در لبه های الگو، پراکندگی و شکست نور وجود دارد، بنابراین اگر یک طرح بیش از اندازه در معرض نور قرار گیرد، میزان نور دریافتی به

وسيله Photoresist در ليه هايي كه نبايد در معرض نور قرار گيرند، ممكن است مهم باشند. اگر از photoresist مثبت استفاده كنيم، در ليه ها سايبديگي بوجود خواهد آمد. و باعث کاهش تيزي گوشه ها مي شود. همچنين باعث کاهش سايز ظاهري مي شود. اگر از Photoresist منفي استفاده كنيم، هم تيزي گوشه ها از بين مي رود و هم سيماي ظاهري بزرگتر مي شود. همچنين اگر يك طرح کمتر از حد لزوم در معرض نور قرار گيرد، امکان انتقال نيافتن الگو وجود دارد و همان نتايجي كه براي زياد در معرض نور قرار گرفتن حاصل شده بود، نتيجه مي شود. ( شكل ۲ -

۱۹)

شكل ۲۰

اگر سطحي كه در معرض نور قرار مي گيرد مسطح نباشد، طرح " رزوليشن بالاي " پوشش روي ويفر ممكن است، از شكل طبيعي انداخته شود.

#### ۲ - ۸ - لايه هاي نازك ( Thin Films )

چندين روش مختلف وجود دارند كه لايه نشاني ( Deposition ) يا تشكيل لايه هاي خيلي نازك از مواد مختلف روي يك ويفر سيليكون يا روي زير لايه هاي ( Substrate ) ديگر را تسهيل مي كنند. اين لايه ها سپس مي توانند با استفاده از روش هاي فوتوليتوگرافي و روش هاي حكاكي مناسب الگو دهی شوند. مواد متداول  $SiO_2, Ni_3S_4$  و سيليكون پلی کریستالین و آلومینیوم می باشند. تعدادی از مواد دیگر مثل فلزات نجیب ( مثل طلا ) نیز می توانند به عنوان لايه هاي نازك لايه نشانی شوند. لايه هاي فلزات نجیب ( Nobble ) به وسيله روشی به نام Lift off الگو دهی می شوند. اين روش از حكاكي تر و خشك براي فلزات نجیب مرسوم تر است.

اغلب Photoresist به اندازه كافي در مقابل حكاكي با دوام نمی باشند. در اين مورد لايه نازكي از مواد بادوام تر مثل اكسيد يا نيتريد لايه نشانی شده و با استفاده از فوتوليتوگرافي الگو دهی می شوند. اكسيد يا نيتريد سپس به عنوان يك Mask حكاكي در طول حكاكي ماده زيرين عمل می كند. وقتی كه ماده زيرين به طور كامل حكاكي شد. لايه Masking برداشته می شود.

## Lift off ۹ - ۲

این روش تکنیکی برای الگو دهی لایه های فلزات نجیب می باشد. ابتدا لایه نازکی از اکسید لایه نشانی شده و همانند لیتوگرافی لایه ای از Resist روی این لایه قرار داده شده و الگو داده می شود. ( شکل a ) سپس اکسید حاکاکی تر می شود تا زمانی که به زیر Resist برسیم ( شکل b ) سپس با تکنیکی به نام Evaporation فلز نجیب روی ویفر لایه نشانی می شود. ( شکل c ) الگوی فلز به طور مؤثری از شکافها در Resist الگو سازی شده و سپس قسمتهای فلزی که لازم نداریم برداشته می شود ( شکل d ) سپس لایه اکسید نیز برداشته شده و الگوی فلز نجیب باقی می ماند. ( شکل e )

## شکل ۲۱

تکنیکهای Lift off ی وجود دارد که در آنها تنها از photoresist به عنوان الگو استفاده می شود. در Assisted Lift off یک لایه واسط در فرآیند برای مطمئن شدن از یک لایه Lift off تمیز به کار می رود. وقتی که قرار است یک فلز نجیب استفاده شود لایه نشانی لایه نازکی که یک فلز فعال (مثل کروم) در ابتدا خوب است. این عمل برای اطمینان از خوب چسبیدن فلز نجیب صورت می گیرد.

## ۲ - ۱۰ - میکروماشینینگ توده ای ( Bulk Micromachining )

میکروماشینینگ توده ای، فرآیندی برای ساخت ریز ساختارها با استفاده از یک Substrate اولیه است که در آن قسمت های مورد نظر Substrate را به طور انتخابی از آن جدا می کنیم تا شکل دلخواه بدست آید. از لحاظ نظری انتخابهای متعددی برای نوع ماده Substrate اولیه و نیز روش برداشتن بعضی قسمت های آن وجود دارد. هر چند در تکنولوژی MEMS، این ویفر اولیه معمولاً کریستال ساده Si و روش برداشتن سیلیکون نیز فرآیند Etching شیمیایی هم جهت ( Isotropic ) یا غیر هم جهت ( Anisotropic ) است.

برای ساخت یک ریز ساختار سیلیکونی با هندسه خاص، Etching انتخابی سیلیکون با استفاده از روش لیتوگرافی ( به همراه تکنیک هایی مثل ایجاد Etch stop الکترو شیمیایی یا با نفوذ Boron ) انجام می شود. در نتیجه، ریز ساختارهای متفاوت سیلیکونی مثل سگدست ( Cantilever )، میله ( Beam )، دریچه ( Diaphragm )، کانال و روزنه ( Nozzle ) قابل ساخت هستند. این ریز ساختارها عناصر اصلی تشکیل دهنده MEMS هستند. تکامل روش ها و مواد Etch کننده شیمیایی سیلیکون از دهه ۱۹۵۰ آغاز شد که در آن زمان پژوهشگران سعی کردند راههایی برای Etch کردن دقیق سیلیکون بیابند. Etch کننده های محلول در آب ( Aqueous ) که ابداع شدند، عمدتاً هم جهت بودند و بر پایه مخلوطی از HF، اسید نیتریک و اسید استیک بودند. یک نمونه از کاربرد Etching هم جهت برای ساختن حفره هایی به شکل نیم کره در شکل ۲-۲۱ مشاهده می شوند.

شکل ۲-۲۱

Etch کننده های غیر هم جهت تکامل خود را از دهه ۱۹۶۰ آغاز کردند. Etch کننده هایی که بیشتر مورد مطالعه قرار گرفتند، ( Ethylene-Diamine-Pyrocatechol ) EDP, KOH و محلول های هیدرازین بودند. در شکل ۲-۲۲ ساختارهای بلوری یک مکعب واحد سیلیکون مشاهده می شود که در آن اتمهای موجود در صفحات سه گانه مشخص شده اند.

شکل ۲-۲۲

خاصیت غیر هم جهتی مواد این است که آنها بلور Si را در جهات  $\langle 100 \rangle$ ،  $\langle 110 \rangle$  خیلی سریعتر از جهت  $\langle 111 \rangle$  Etch می کنند. پس می توان حفره هایی ساخت که دیواره هایش صفحات  $\langle 111 \rangle$  باشند. این مفهوم و مقایسه آن با Etching هم جهت در شکل ۲ - ۲۳ مشاهده می شود.

شکل ۲ - ۲۳

این خاصیت بطور وسیعی مورد استفاده قرار گرفت و روش های Etch کردن غیر هم جهت در دهه های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ پیشرفت زیادی کردند. در شکل ۲ - ۲۴ روش بدست آوردن حفره های با اشکال مختلف در سیلیکون با استفاده از Etching غیر هم جهت در سیلیکون مشاهده می شوند.

اخیراً از Etching کننده های غیر هم جهتی که روی فلزات اثر نمی گذارند از جنس موادی مثل آمونیاک و TMAH ساخته شده اند. هم چنان که تعداد بیشتری از ادوات MEMS کنار مدارهای مجتمع روی یک ویفر ساخته می شوند، این Etch کننده ها اهمیت بیشتری می یابند. امروزه تکنولوژی میکرو ماشینینگ توده ای با استفاده از Etch کردن شیمیایی با محلول ها به حد بلوغ رسیده است و تعداد زیادی از ادوات MEMS با استفاده از این روش ساخته می شوند.

علاوه بر Etch کردن با محلولهای شیمیایی، روشهای دیگر Etching مثل Etch کردن خشک و جود دارند که در مواردی می توانند جایگزین روش استفاده از محلول ها شوند. برای مثال روش های Laser etching، Plasma etching، RIE (Reactive ion etching)، Micro EDM وجود دارند که از آنها در موارد متعدد استفاده شده است. روش Etch کردن خشک به جهت کریستالی حساس نیست و به جهات خاصی محدود نمی شود. بنابراین مشکلات ناشی از تنش سطحی وجود ندارند.

شکل ۲ - ۲۴

در این فرآیند امکان ساخت قطعات با ضخامت نسبتاً زیاد هم وجود دارد. اما با این وجود قطعات ساخته شده آن قدر کوچک و نازک هستند که باید برای Package شدن، به یک تکیه گاه محکم و سفت چسبانیده شود.

## ۲ - ۱۰ - ۱ ایجاد Etch Stop

با توجه به ماهیت میکروماشینینگ توده ای که بر اساس Etching غیر هم جهت قرار دارد، روشن است که زمان Etch شدن، نقش مهمی در فرآیند دارد. اگر این نقش، عامل غالب باشد، کنترل فرآیند سخت و خسته کننده می شود. خوشبختانه عوامل مهم دیگری در Etching غیر هم جهت هستند که می توان از آنها برای کنترل فرآیند استفاده کرد. معلوم شده است که Etch شدن سیلیکون به مقدار ناخالصی (Dopant) آن بستگی دارد. از این خاصیت می توان برای کنترل سرعت فرآیند یا متوقف کردن آن استفاده کرد. با این کار می توان ضخامت دریچه را کنترل کرد. و در نقطه مناسب، فرآیند را به انتها رساند. برای متوقف کردن این فرآیند Etching همچنین می توان در Etching غیر هم جهت از فرآیندهای الکترو شیمیایی نیز بهره گرفت.

شکل ۲ - ۲۵ سرعت نسبی Etch شدن سیلیکون بر حسب مقدار ناخالصی بوران را نشان می دهد. می توان مشاهده کرد که نقطه بحرانی در مقدار بوران،  $2.5 \times 10^{-19} \text{ cm}^{-3}$  است که در کمتر از آن، سرعت Etch شدن، مستقل از مقدار بوران است و در بیشتر از آن با افزایش مقدار بوران، سرعت Etch شدن با شیب زیادی کم می شود. در این قسمت سرعت Etch شدن با عکس توان چهارم بوران، متناسب است. اساس فیزیکی این رفتار مبتنی بر پدیده های مرتبط با Degeneration در سیلیکون است. می توان از این پدیده برای متوقف کردن فرآیند Etching استفاده کرد. اگر در یک طرف سیلیکون یک لایه نازک  $p^+$  با ناخالصی بوران بیشتر از  $10^{20}$  ایجاد شود، با رسیدن Etch کننده به آن سرعت فرآیند به یک هزارم می رسد و تقریباً متوقف می شود.

شکل ۲ - ۲۵



## ۲-۱۰-۲ - پیوند ویفرها ( Wafer Bonding )

این فرآیند، یکی از فرآیندهای اساسی در میکروماشینینگ توده ای است. در این فرآیند دو ویفر که سطوح آن ها کاملاً صاف و تمیز شده، بدون استفاده چسب یا اعمال فشار، به هم چسبانده می شوند، در واقع این چسبیدن، با ایجاد پیوندهای شیمیایی بین لایه های سطحی ویفرها انجام می شوند، در واقع این چسبیدن، با ایجاد پیوندهای شیمیایی بین لایه های سطحی ویفرها انجام می شود. همان طور که خواهیم دید، فرآیند پیوند ویفرها، ساخت ادوات مختلف MEMS مثل سنسور فشار و شتاب و ... را در اختیار ما قرار می دهد. مزیت مهم این فرآیند برای استفاده در MEMS این است که با برقرار شدن پیوند بین دو ویفر، در حفره ها و گودی های ایجاد شده در هر کدام از آنها هیچ تغییری ایجاد نمی شود. یک مثال از روش ساخت منطقه ( Cavity ) در شکل زیر دیده می شود.

این فرآیند غیر از MEMS در موارد دیگری نیز کاربرد دارد. مثلاً با پیوند دادن دو ویفر سیلیکون با دو نوع دوپینگ متفاوت، ( به علت تیز بودن پیوند حاصله ) می توان قطعاتی مثل دیود و ترانزیستور قدرت و تریتور ساخت که کیفیت بسیار بالایی داشته باشند. علت تیز بودن پیوند حاصله این است که عمل پیوند را هر چند که در دمای بالا انجام می شود، می توان در زمان کوتاه انجام داد. پس آلاینده های  $n, p$  چندان فرصت نمی کنند که در ویفر دیگر نفوذ کنند. همچنین یکی از روشهای مهم ساخت SOI نیز پیوند یک ویفر سیلیکون به شیشه پیرکس است. در مورد پیوند ویفر سیلیکون به شیشه، نکته مهمی وجود دارد و آن این است که شیشه استفاده شده، باید از نوعی باشد که ضریب انبساط حرارتی آن به سیلیکون نزدیک باشد.

پیوند ویفرها با دو روش انجام می شود که مکانیزم ها کاربردهای متفاوتی دارند. این روش ها در ادامه توضیح داده می شوند. اما قبل از آن، ذکر نکاتی در مورد سطح ویفرها لازم است.

حداکثر ارتفاع یا عمق انحنای بزرگ سطح ( Flatness ) باید کمتر از ۵ میکرومتر باشد. برجستگی ها و گودی های ویفر ( Roughness ) نیز باید کمتر از ۱۰ آنگستروم باشد. اگر خود ویفر همواری مورد نظر را نداشته باشد، باید با یکی از روشهای مکانیکی، شیمیایی، مکانیکی هموار شود. اگر یکی از ویفرها، شیشه باشد، چون سطح آن نسبتاً نرم است، همواری سطح آن، خیلی مهم نیست.

تمیزی سطح ویفرها نیز خیلی مهم است. در این فرآیند چون منبع مهم برای آلودگی وجود دارند، مثل ذرات گرد و غبار، گازهای به دام افتاده در هنگام روی هم قرار دادن ویفرها، مواد ارگانیک، و ... وجود هر کدام از این موارد در بین

دو ویفر، می تواند در آن نواحی مانع از تشکیل پیوند شده و به اصطلاح، حباب ایجاد کنند. این حباب ها با روش های مختلفی، مثل تداخل سنجی نوری، قابل تشخیص و اندازه گیری هستند.

## ۲- ۱۰- ۱- پیوند ویفرها به کمک مارات ( Fusion Wafer Bonding )

در این روش دو ویفر که سطوح کاملاً صاف و تمیز و بدون آلودگی دارند، روی هم گذاشته می شوند و به علت صافی بسیار زیاد سطوحشان به هم می چسبند. علل این چسبیدن عبارتند از : نیروهای واندروالس، نیروی الکترواستاتیکی، و ایجاد پیوند های شیمیایی بین بعضی از اتم های دو سطح. اما این پیوند، یک پیوند موقت است و تا این جای کار، هنوز می توان دو ویفر را از هم جدا کرد. یعنی این یک فرآیند برگشت پذیر بوده است. برای ایجاد یک پیوند دائمی و یکی کردن ساختار کریستالی این دو ویفر و به اصطلاح ترمیم پیوند ( Annealing ) باید دو کار انجام داد. یکی بالا بردن دمای ویفر و دیگری اعمال فشار. مکانیزم ایجاد پیوند دائمی بین دو ویفر، بسته به نوع دو ویفر فرق می کنند. این مکانیزم ها و روش ایجاد پیوند، شرح مفصلی دارد که در این جا به طور مختصر توضیح داده می شوند. ابتدا می توان به اتمهای Si لایه های سطحی گروه هیدروکسیل ( -OH ) اضافه کرد. برای این کار مواد خاص دارای توانایی Hydroxyle enhancement وجود دارند. ( مثل اسید سولفوریک و اسید نیتریک ) بعد از این که دو ویفر روی هم گذاشته شده و گرم می شوند، مولکولهای آب از اتم های هیدراته شده آزاد می شوند و گروه های اکسید سیلیسیم -Si-O-Si- به جا می مانند. اگر بخواهیم با گرم کردن بیشتر، اتم های اکسیژن را هم خارج کنیم. به این ترتیب کریستال ساده سیلیکون تشکیل می شوند، مراحل این فرآیند در شکل صفحه بعد مشاهده می شود. برای پیوند دادن یک ویفر Si به شیشه، می توان ابتدا سطح Si را اکسید کرد و لایه ای به ضخامت مثلاً یک میکرون تشکیل داد. به این ترتیب پیوند دادن این دو سطح، راحت تر انجام می شود. عمل Annealing در دمایی بین ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد و زمانی بین ۰/۵ تا ۲ ساعت انجام می شود. آزمایش ها نشان داده اند که هرچه Annealing در دمای بالاتر و زمان بیشتری انجام شود، کیفیت و قدرت پیوند بیشتر خواهد بود. البته به همین نسبت، حفره های ایجاد شده در ویفرها نیز احتمال خرابی بیشتری خواهند داشت. چون در دمای بالا ویفره ( به خصوص اگر شیشه باشد ) نرم میشوند و شکلشان تغییر می کند. همچنین در صورت یکی نبودن ضریب انبساط دمایی ویفرها، استرس مکانیکی بین آنها وجود دارد که با افزایش دما، تشدید می شود.

شکل ۲ - ۲۷

### ۲ - ۱۰ - ۲ - پیوند وایفرها به کمک ولتاژ ( Anodic Wafer Bonding )

از این روش به دلیل مکانیزم خاص آن معمولاً فقط برای یک وایفر Si به شیشه استفاده می شود ( چرا که اگر هر دو وایفر Si باشند، با اعمال ولتاژ بر دو وایفر جریان شدیدی از آنها می گذرد! ) روش کار به این ترتیب است که وایفر Si و یک وایفر شیشه را که دارای مقدار ناخالصی Na نیز باشد، طبق شکل روی هم می گذارند و به آنها ولتاژ ( و در صورت تمایل گرما و فشار ) اعمال می کنند. دمای دو وایفر را تا ۲۰۰ - ۴۵۰ درجه سانتیگراد بالا می برند و ولتاژی بین ۱۰۰۰ - ۲۰۰ ولت نیز اعمال می کنند. ولتاژ اعمال شده باعث می شود که یونهای سدیم، از شیشه به سوی کاتد حرکت کنند. در نتیجه لایه سطحی شیشه که نزدیک وایفر Si است از یونهای سدیم خالی می شود و یک اختلاف پتانسیل بین دو سطح Si و شیشه که مجاور هم هستند به وجود می آید. این اختلاف پتانسیل باعث می شود که تعدادی از یونهای منفی اکسیژن از لایه سطحی شیشه جدا می شوند و به Si بروند. از آنجائی که انرژی پیوند Si-O-Si - بیشتر از انرژی پیوند Si-Si است، طبیعی است که یک لایه بسیار نازک اکسید سیلیسیم در سطح وایفر Si تشکیل می شود و به این ترتیب ساختار بلوری دو وایفر، یکی می شود.

شکل ۲ - ۲۸

خارج شدن یونهای سدیم از شیشه و وارد شدن آنها به کاتد، جریان کوچکی را به مدت چند ثانیه ایجاد می کند که شکل تقریبی برای دو وایفر متفاوت در زیر مشاهده می شود. اندازه گیری دقیق این جریان در طول زمان نیز، اطلاعاتی را در مورد فرآیند انجام شده، به ما می دهد.

## ۲-۱۱ میکروماشینینگ سطحی ( Surface Micro machining )

همان طور که از نام این فرآیند پیدا است، میکروماشینینگ سطحی، روی سطح ماده انجام می شود که می تواند سیلیکون، شیشه یا فلز باشد. Substrate تنها به عنوان یک تکیه گاه مکانیکی نقش دارد. فرآیند میکروماشینینگ سطحی شامل نشان دادن لایه نازک و شکل دهی ( Patterning ) آن است. آخر سر میتوان با Etching انتخابی، لایه های خاصی را که قربانی ( Sacrificial ) نامیده می شوند، پاک کرد و لایه های دیگر که در زیر قسمتی از آن خالی شده به طور معلق باقی می مانند. یک مثال ساده از این فرآیند، یعنی ساخت سگدست در شکل ۲ - ۳۰ دیده می شود.

## شکل ۲ - ۳۰

فرآیند انجام شده در میکروماشینینگ سطحی نسبتاً مستقل از Substrate است، بنابراین می تواند ابتدا تغییرات لازم ( مثل ساخت مدار جانبی ) را روی Substrate انجام داد و سپس این فرآیند را روی سطح آن انجام داد. میکروماشینینگ سطحی ابتدا محدود به نشان دادن لایه های با ضخامت کم بود، چرا که فقط لایه های نازکی از مواد مختلف را میتوانستند روی Substrate بنشانند. اما اخیراً با پیشرفت تکنولوژی، امکان ساخت لایه های ضخیم تر نیز فراهم شده است.

مفهوم میکرو ماشینینگ سطحی در دهه ۱۹۵۰ معرفی شد. هر چند که استفاده عملی از این فرآیند برای ساخت یک قطعه MEMS که ترانزیستور با گیت تشدید شونده ( Resonant Gate Transistor ) بود در سال ۱۹۶۷ انجام شد. بعد از انتشار این کار، تعدادی ادوات با استفاده از میکروماشینینگ سطحی ساخته شدند که یکی از آنها اولین صفحه نمایش با آینه دیجیتال ( Digital Mirror Display ) بود.

در سال ۱۹۸۲ بود که توانستند با نشاندن لایه پلی سیلیکون با روش LPCVD لایه های معلق و پل روی ویفرها بسازند. (اولی یک تکیه گاه و دومی دو تکیه گاه دارد) اهمیت این فرآیند میکروماشینینگ سطحی با نشاندن پلی سیلیکون این است که با تکنولوژی ساخت مدارهای مجتمع سازگاری دارد. در دهه ۱۹۸۰ کارهایی در برکلی انجام شد که نشان داد میکروماشینینگ با پلی سیلیکون استفاده وسیعی در ساخت ادوات مثل Pin – Joint قطعات لغزنده روی صفحه، میکرو موتورها، میکرو تشدید گرها، و انبرک ها دارد. در شکل ۲ - ۳۱ به طور ساده مراحل مختلف برای ساخت یک قطعه معلق مشاهده می شود.

امروزه میکروماشینینگ با پلی سیلیکون، خود به عنوان یکی از مهمترین شاخه های میکروماشینینگ سطحی شناخته می شود. علاوه بر پلی سیلیکون مواد دیگری مثل آلومینیوم و نیتريد سیلیسیم در میکروماشینینگ سطحی استفاده می شوند.

همچنان که ادوات MEMS کوچک تر، سبک تر، سریع تر و ارزان تر می شوند و با مدارهای مجتمع نیز یک جا ساخته می شوند، فرایند میکروماشینینگ سطحی بیشتر خودنمائی می کند.

شکل ۲ - ۱۲

#### ۲ - ۱۱ - ۱ - فرآیند Liga

برای میکروماشینینگ سطحی، فرآیند دیگری به نام Liga وجود دارد که آلمانی ها آن را ابداع کرده اند. ( Litographie Galvanoformung ) در فرآیند Liga از لیتوگرافی با اشعه X برای ایجاد شکاف هایی در Photoresist های ضخیم استفاده می شود. سپس قسمت اشعه دیده پاک می شود و فضای خالی شده، به وسیله آب کاری با فلز ( Electroplating ) پر می شوند.

استفاده از اشعه X که لیتوگرافی با آن دقت زیادی دارد، اجازه ساخت قطعاتی با دقت خیلی زیاد را به ما می دهد. در ضمن هیچ روش دیگری نیست که در میکروماشینینگ توان ساخت ادواتی با چنین نسبت منظر ( Aspect ratio )

بالایی را داشته باشد. نسبت منظر عبارت است از بیشترین ارتفاع قطعه به کمترین عرض آن. این روش DXRL ( Deep X-Ray Lithography ) نیز نامیده می شود.

البته این روش به خاطر دستگاه سنکروترون پر انرژی که برای تولید اشعه X استفاده می شود، هزینه بالایی دارد. به همین دلیل تکنولوژی Liga چندان معمول نیست. هزینه بالایی دارد. اما برای کاربردهای خاص که نیاز به دقت و قدرت تفکیک ( Resolution ) و نسبت منظر بالا دارند، مناسب است. در روش Liga دقت دیواره ها حدود چند میکرون است و به عنوان Photoresist معمولاً از پلاستیکی بنام PMMA استفاده می شود.

مشکلات استفاده از اشعه X سبب شده است که همین فرآیند با استفاده از اشعه فرابنفش ( UV ) نیز انجام شود که منبع نور و امکانات استفاده از آن در مراکز ساخت مدارهای مجتمع وجود دارد. این روش یعنی Micro electroplating با استفاده از اشعه فرابنفش در موارد متعددی مثل ساخت موتورها، قسمت های متحرک کانال ها به وفور استفاده می شود. در شکل های ۲ - ۳۲ مراحل ساخت ادوات با فاصله خیلی کم یا نسبت منظر زیاد مشاهده می شوند.

شکل ۲ - ۳۲

#### ۲ - ۱۱ - ۲ - میکروماشینینگ سه بعدی

میکرو ساختارهای ساخته شده با میکروماشینینگ سطحی، طبعاً صفحه ای هستند و در بعضی موارد ضخامتی بیش از ۱۰ میکرون دارند. بعضی کاربردها، به ساختارهای ضخیم تر یا ساختارهای پیچیده سه بعدی نیاز دارند. پس باید میکروماشینینگ سطحی اصلاح شود. یک تکنیک این است که صفحات میکروماشین شده را به سمت بالا تا کنیم تا یک ساختار سه بعدی ساخته شود. صفحه Substrate آزاد می شود و با لولا یا لوله های انعطاف پذیر در جای جدید خود قرار می گیرد. به این وسیله ساختارهایی سه بعدی مانند یک مکعب به ضلع ۳۰۰ میکرون و دو میله که مثل پروانه قرار گرفته اند، ساخته شده اند.

در کوشش های دیگری، ساختارهای آویزان، ساخته شده اند. انبرک های میکروسکوپی ساخته شده اند که ۴۰۰ میکرون از لبه ویفر جلوتر رفته اند. با این گیره کوچک، توانسته اند یک یاخته را نگه دارند. پرتوهای الکترونی و لیزری می توانند به رشد، انجماد و Etching انتخابی مواد کمک کنند. ساختارهای سه بعدی مثل یک فنر مارپیچی به قطر ۵۰ میکرون و یک لوله خمیده شده به ابعاد  $0.1 \times 0.1 \times 1$  میلی متر ساخته شده اند. متأسفانه توانائی تولید پشته ای در این موارد، هنوز چندان پیشرفت نکرده است.

#### مواد مورد استفاده

#### سیلیکون تک کریستالی ( Single crystal )

کریستال های تکی همیشه ساختار و خصوصیات بهتری نسبت به پلی کریستالین ( Polycrystalline ) یا لایه های نازک Amorphous دارند. کریستال تکی Si به طور شیمیایی نمی تواند روی زیر لایه های غیر کریستالی رشد یابد.

#### تکنیک های بدست آوردن لایه های تک کریستالی Si

#### Wafer Bonding and Back Etching

۱ - تعریف یک منطقه انتشار یافته  $P^+$  روی زیر لایه

۲ - الگو سازی و Bond کردن Si به روش Anodically روی زیر لایه

۳ - ویفر که شامل لایه انتشار یافته است، از پشت حکاکی شده و لایه ای که خیلی تزریق شده دست نخورده باقی می ماند.

#### نیتريد سیلیکون

به عنوان MASK مقابل Etchant ها مثل KOH استفاده می شود. همچنین از آن برای درزگیری و محافظ استفاده می شود. اغلب لایه های نیتريدسیلیکون، Amorphous هستند. نیتريد سیلیکون می تواند به وسیله فرآیندهای LPCVD یا PECVD رشد داده شود.



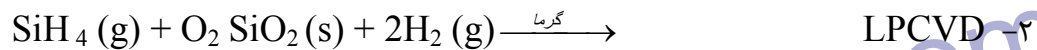
لایه های  $Si_3N_4$  که به روش PECVD رشد داده می شوند، اساساً ضعیف تر هستند. لایه های رشد یافته LPCVD دارای کیفیت بهتری هستند.

## دی اکسید سیلیکون (SiO<sub>2</sub>)

یک عایق الکتریکی و حرارتی عالی می باشد.

تکنیک های لایه نشانی SiO<sub>2</sub> عبارتند از :

۱- رشد واکنشی یا اکسیداسیون



۳- اگر لایه با بور تزریق شود BSG تولید می شود. Borosilicate Glass

اگر لایه با فسفر تزریق شود، PSG تولید می شود. Phospho silicate glass

۴- Sputtering

۵- Spin casting

## لایه های آلی ( organic films )

متداول ترین آنها Polyimide ها هستند.

معمولاً Spin cast یا Evaporation می شوند و سپس در دمای بالا پهبود می یابند. Polyimide ها به عنوان

لایه های sacrificial ( قربانی ) استفاده می شوند. همچنین از آنها در سنسورهای رطوبت استفاده می شود.

## ۲ - ۱۳ - حکاکی لایه های تازک Si

حکاکی کننده های ( etchants ) تری که در میکروماشینینگ توده ای ( Bulk ) استفاده می شد، در اینجا نیز

استفاده می شود. حکاکی پلاسما با استفاده از SF<sub>6</sub>, CF<sub>4</sub> نیز انجام می شود. اتم های F خیلی واکنش دهنده هستند

و بنابراین حکاکی نتیجه شده به صورت Isotropic می باشد.

O<sub>2</sub> ( در سطح ۱۰٪ ) برای فرو نشانیدن تشکیل پلی مرها استفاده می شود. ماسک های متداول برای حکاکی پلاسما

بر پایه Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiO<sub>2</sub>, F می باشند.

## مشکلات حکاکی بر پایه F



۱- Wafer loading effect : نرخ حکاکی وابسته به تعداد ویفرهای حکاکی شده می باشد.

۲- Bulls eye pattern : مرکز ویفر با نسبت پایین تری حکاکی می شود.

نوع دیگری از حکاکی پلاسما، حکاکی بر پایه CL می باشند. CL به اندازه F واکنش دهنده نیست. واکنش با سیلیکون به وسیله بمباران آغاز می شود. حکاکی بر پایه CL به صورت Anisotropic می باشد. ماسک های متداول در اینجا  $\text{SiO}_2$ ، Photoresist، Ni، Cr می باشند.

اکسید محلی که بطور طبیعی روی لایه پلی سیلیکن رشد می یابد، ممکن است حکاکی به وسیله  $\text{CCl}_4$  را به تأخیر بیندازند. در این مورد ویفر قبل از حکاکی به وسیله  $\text{CCl}_4$  در HF غوطه ور می شود.