

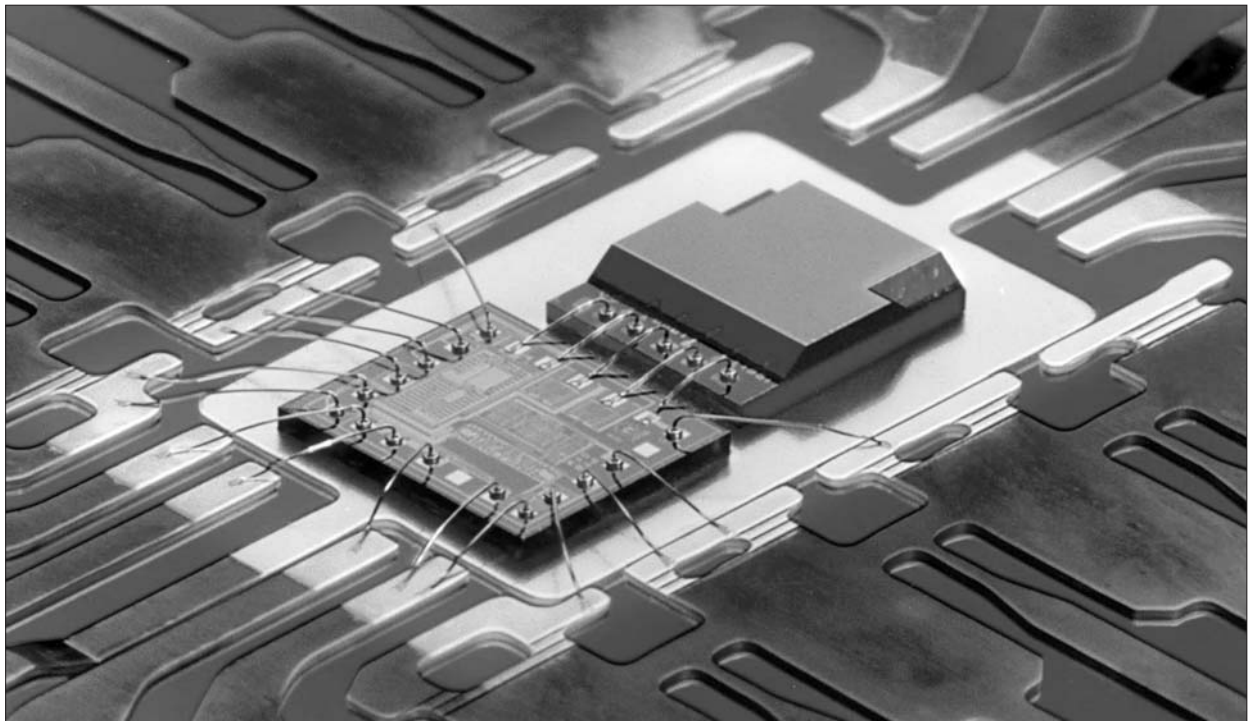
سامانه‌های میکروالکترومکانیکی؛

MEMS

برگردان: مهندس جلیل بصیریان جهرمی

برجسته‌ای دارند. مطالبی که در این مقاله آمده دانستنی‌های اولیه‌ای درباره‌ی این فناوری و جایگاه آن در صنعت و اقتصاد ارایه می‌دهد. باشد که به این امر مهم در زمینه‌ی آموزش، پژوهش، تولید و غیره بیشتر پرداخته شود.

فناوری میکروالکترومکانیکی^۱ یکی از فناوری‌های سطح بالا به شمار می‌آید. فرآورده‌های آن در علوم، مهندسی، پزشکی، صنعت و غیره کاربرد گسترده دارند. حسگرها و مبدل‌ها از فرآورده‌های مهم آن هستند که در صنعت ابزار دقیق هم نقش



واژه های کلیدی: MEMS، ریزحسگر، ریزعملگر، روش های ساخت

۱. مقدمه

فناوری میکرو الکترومکانیکی یا MEMS فناوری دستگاه های مکانیکی بسیار کوچک با نیروی محرکه ی الکتریکی می باشد که در مقیاس نانو جزو نانو سامانه های الکترومکانیکی و نانوفناوری می باشند. MEMS در ژاپن میکرو ماشین^۲ و در اروپا فناوری میکرو سامانه نامیده می شود.

MEMS از فرضیه ی نانوفناوری ملکولی و الکترونیک ملکولی جدا و متمایز است. سامانه های MEMS از اجزایی به اندازه ی ۱ تا ۱۰۰ میکرون ساخته می شوند و دستگاه های MEMS محدوده ی اندازه شان از ۲۰ میکرون تا یک میلیمتر می باشد. آنها معمولاً از یک واحد مرکزی پردازش داده^۳ و چند قطعه از قبیل ریزحسگرها^۴ جهت تراکنش^۵ با بیرون تشکیل می شوند. در این مقیاس از اندازه ها کاربرد فیزیک کلاسیک همیشه مفید نمی باشد. به دلیل بزرگی نسبت سطح به حجم، اثرات سطحی مانند الکترواستاتیک و عرق کردن بر اثرات حجم مانند لختی^۶ یا جرم گرمایی^۷ غلبه می کند.

امکان ساخت ماشین های بسیار کوچک قبل از وجود فناوری ساخت آنها مورد توجه قرار گرفته بود، برای مثال می توان سخنرانی مشهور ریچارد فیمن تحت عنوان «جای زیادی در دکمه وجود دارد» در سال ۱۹۵۹. اشاره کرد MEMS زمانی عملی شد که توانست با استفاده از فناوری های اصلاح شده ی ساخت قطعات نیمه هادی^۸ که معمولاً برای ساخت قطعات الکترونیکی استفاده می شوند ساخته شود. این فناوری ها عبارتند از: قالب گیری^۹ و آبکاری فلزی^{۱۰}، کنده کاری^{۱۱} تر و خشک، ماشین کاری با تخلیه برقی و فناوری های دیگر که امکان ساخت دستگاه های کوچک را فراهم می کنند. یک مثال اولیه از دستگاه های SMEM، تشدید کننده است؛ یک تشدید کننده ی یکپارچه ی^{۱۲} برقی مکانیکی.

بسته به وسیله و بازار هدف، فناوری MEMS می تواند با استفاده از چند ماده و روش مختلف ساخت عملی شود.

۲. مواد برای ساخت MEMS

۱.۲. سیلیکون

سیلیکون ماده ای است که برای ساخت بیشتر مدارات یکپارچه بکار رفته در دستگاه های الکترونیکی استفاده می شود. اقتصادی بودن تولید انبوه، دسترسی آسان به مواد با کیفیت بالای ارزان و قابلیت گنجاندن عملکرد الکترونیکی، سیلیکون را برای کاربردهای گوناگون MEMS مناسب ساخته است. سیلیکون همچنین مزایای برجسته ای از نظر خواص مواد دارد. در شکل بلور تکی، سیلیکون تقریباً یک ماده ی

Hookean کامل است، به این مفهوم که وقتی خم شود پسماند ندارد و بنابراین تقریباً تلفات انرژی ندارد. همچنین برای حرکت های خیلی تکراری، این ویژگی موجب قابلیت اطمینان بالای سیلیکون می شود چون خستگی خیلی کمی دارد و می تواند طول عمری در بازه ی بلیون تا تریلیون چرخه ی بدون شکست داشته باشد. روش های پایه برای تولید همه ی وسیله های MEMS سیلیکونی عبارتند از رسوب دهی^{۱۳} لایه های مواد، الگودهی^{۱۴} به این لایه ها به وسیله لیتوگرافی (سخت نگاری) نوری و سپس کنده کاری برای تولید شکل های مورد نیاز.

۲.۲. پلیمرها^{۱۵}

اگرچه صنعت الکترونیک تولید انبوه را برای صنعت سیلیکون اقتصادی نموده، سیلیکون بلورین هنوز ماده ای پیچیده و نسبتاً گران قیمت است. از سوی دیگر پلیمرها می توانند در حجم عظیم و با تنوع زیاد از نظر خواص مواد تولید شوند. وسیله های MEMS را می توان از پلیمرها با فرآیندهایی مانند قالب گیری تزریقی^{۱۶}، نقش برجسته^{۱۷} یا حکاکی دو سویه^{۱۸} ساخت که به ویژه برای کاربردهای ریز سیالی^{۱۹} از قبیل کارت ریج یک بار مصرف آزمایش خون مناسب هستند.

۳.۲. فلزها

فلزها نیز می توانند برای ساخت عناصر MEMS بکار روند. در حالی که فلزها برخی از مزایای نشان داده شده به وسیله سیلیکون در رابطه با خواص مکانیکی را ندارند، ولی وقتی در محدوده ی خود به کار روند می توانند درجه ی اطمینان بالایی را نشان دهند.

فلزها می توانند به وسیله فرآیندهای آبکاری برقی، تبخیر و پرتاب کردن^{۲۰} رسوب دهی شوند.

فلزهای رایج شامل طلا، نیکل، آلومنیوم، مس، کرومیوم، تیتانیوم، تنگستن، پلاتینیوم و نقره می باشند.

۳. فرآیندهای پایه ی MEMS

۱.۳. فرآیندهای رسوب دهی

یکی از سنگ بناهای پایه در فرآیند MEMS قابلیت رسوب دهی لایه های نازک ماده با ضخامتی بین چند نانومتر تا حدود ۱۰۰ میکرون است.

۱.۱.۳. رسوب دهی فیزیکی

دو نوع فرآیند رسوب دهی فیزیکی وجود دارد:

- پرتاب کردن

- تبخیر

۲.۱.۳. رسوب دهی شیمیایی

سه نوع فرآیند رسوب دهی شیمیایی وجود دارد:

خورده با نخورده متفاوت است.

سپس این منطقه ی پرتو خورده می تواند برداشته یا پرداخت شود. لیتوگرافی نوری نوعاً برای رسوب دهی فلز یا لایه ی نازک دیگر، کنده کاری تر یا خشک استفاده می شود.

۳.۲.۲. لیتوگرافی پرتو الکترون

لیتو گرافی پرتو الکترون اسکن کردن یک الگو توسط پرتویی از الکترون ها در سراسر سطح پوشش داده شده با یک لایه به نام لایه ی مقاوم و برداشتن انتخابی مناطق در معرض قرار گرفته یا نگرفته ی لایه ی مقاوم است. هدف، مثل لیتوگرافی نوری، ایجاد ساختارهای بسیار کوچک در لایه ی مقاوم است که متعاقباً می تواند به ماده ی بستر^{۲۱} (زیر لایه) منتقل شود (اغلب با کنده کاری). این روش برای ساخت مدارهای یکپارچه ی الکترونیکی ایجاد شده و برای ایجاد ساختارهای فناوری نانو هم استفاده می شود.

نخستین برتری لیتوگرافی پرتو الکترون این است که یکی از راه های شکستن حد پراش^{۲۲} نور و ایجاد ویژگی هایی در مقیاس نانومتر می باشد. این شکل از لیتوگرافی بدون پوشش^{۲۳}، کاربرد گسترده ای در ساختن پوشش^{۲۴} نور مورد استفاده در لیتوگرافی نوری، تولید قطعات نیمه هادی کم حجم و تحقیق و توسعه پیدا کرده است.

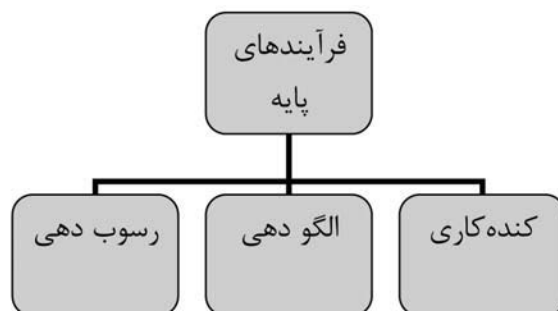
محدودیت کلیدی لیتوگرافی پرتو الکترون توان عملیاتی است. به عنوان مثال، زمان بسیاری طول می کشد تا کل یک قرص سیلیکونی یا بستر شیشه ای پرتو داده شود. زمان طولانی پرتو دهی کاربر را نسبت به راندگی^{۲۵} یا ناپایداری پرتو حین پرتو دهی آسیب پذیر می کند. حتی اگر الگو برای بار دوم تغییر نکند، دوباره کاری و باز طراحی بطور غیر لازمی طولانی می شود.

۳.۲.۳. لیتوگرافی پرتو یون

مشخص شده است که لیتوگرافی پرتو یون متمرکز شده قابلیت کشیدن خطوط نازک (خط و فضای کمتر از ۵۰ نانومتر به دست آمده) بدون اثر مجاورت را دارد. با این حال، به خاطر بسیار کوچک بودن زمینه ی نگارش در لیتوگرافی پرتو یون، الگوهای با مساحت زیاد باید به وسیله ی به هم پیوند زدن میدان های کوچک ایجاد شود.

۴.۲.۳. لیتوگرافی پرتو X

لیتوگرافی پرتو ایکس، فرآیند مورد استفاده در صنعت الکترونیک برای برداشتن انتخابی بخش هایی از یک فیلم نازک است. در این روش از پرتوهای ایکس برای انتقال یک الگوی هندسی از یک پوشش به یک ماده ی شیمیایی حساس و مقاوم به نور به نام لایه ی «مقاوم» روی بستر استفاده می شود. سپس



- تبخیر در فشار پایین
- پلاسمای پیشرفته
- اکسیدکردن گرمایی

۲.۳. الگودهی

الگودهی در MEMS انتقال یک الگو به یک ماده است. الگودهی توسط لیتوگرافی یا الماس انجام می شود. لیتوگرافی نیز چند روش دارد:

۱.۲.۳. لیتوگرافی نوری

لیتو گرافی درمورد MEMS نوعاً انتقال یک الگو به یک ماده ی حساس به نور به وسیله ی قرار گرفتن در معرض تابش مانند نور است. ماده ی حساس به نور ماده ای است که وقتی در معرض یک منبع تابش قرار می گیرد خواص فیزیکی آن تغییر می کند. اگر ماده ی حساس به نور به طور انتخابی در معرض تابش نور گذاشته شود الگوی تابش به ماده ی در معرض تابش انتقال می یابد بطوری که خواص بخش پرتو



الگو با مجموعه‌ای از پرداخت‌های شیمیایی روی ماده‌ی زیرلایه‌ی مقاوم نقش می‌بندد.

۳.۳. فرآیندهای کنده‌کاری

دو دسته‌ی اصلی فرآیند کنده‌کاری وجود دارد: کنده‌کاری تر و خشک. در اولی ماده‌ی زمانی که در محلول شیمیایی غوطه‌ور است حل می‌شود. در دومی ماده با استفاده از یون‌های واکنش دهنده یا حک‌کننده‌ی فاز بخار کنده یا حل می‌شود.

۱.۳.۳. کنده‌کاری تر

کنده‌کاری شیمیایی تر برداشتن انتخابی ماده با فرورودن بستر درون محلولی است که آن را حل می‌کند. طبیعت شیمیایی این فرآیند کنده‌کاری، انتخاب‌پذیری خوبی را فراهم می‌کند، بدین معنی که نرخ کنده‌کاری از ماده‌ی هدف بطور قابل توجهی از ماده‌ی پوشش اگر بطور دقیق انتخاب شده باشد بیشتر است.

۱.۱.۳.۳. کنده‌کاری یکنواخت^{۲۶}

کنده‌کاری با سرعت یکسان در تمام جهات پیش می‌رود. سوراخ‌های بلند و باریک در یک پوشش، در سیلیکون شیاری به شکل عدد ۷ تولید خواهد کرد. اگر کنده‌کاری به درستی انجام شده باشد سطح این شیاری می‌تواند با ابعاد و زوایای بی‌اندازه دقیق در حد اتمی صاف باشد.

۲.۱.۲.۳. کنده‌کاری غیر یکنواخت^{۲۷}

بعضی از مواد تک بلوری مانند سیلیکون، بسته به آرایش بلوری بستر، نرخ کنده‌کاری مختلفی خواهند داشت. این به عنوان کنده‌کاری غیر یکنواخت شناخته شده و یکی از نمونه‌های رایج کنده‌کاری سیلیکون در هیدراکسید پتاسیم است، که در آن سطوح «۱۱۱» Si حدود ۱۰۰ برابر کندتر از سطوح دیگر کنده‌کاری می‌شود. بنابراین کنده‌کاری یک سوراخ مستطیل شکل در یک قرص^{۲۸} Si - (۱۰۰) به جای یک سوراخ با دیواره‌های کناری خمیده در حالت کنده‌کاری یکنواخت، به کنده شدن گودال هرمی شکل با دیواره‌های ۵۴/۷ درجه منجر می‌شود.

۳.۱.۳.۳. کنده‌کاری HF

اغلب اسید هیدروفلوئوریک به عنوان مایع کنده‌کاری تر برای دی‌اکسید سیلیکون استفاده می‌شود، معمولاً به شکل اسید با غلظت ۴۹٪، مایع بافرشده‌ی کنده‌کاری ۵:۱، ۱۰:۱ و یا ۲۰:۱ HF بافر شده. آنها برای اولین بار در قرون وسطا برای کنده‌کاری روی شیشه استفاده می‌شدند. این مایع برای شکل‌دهی اکسید دروازه در ساخت مدار مجتمع استفاده می‌شد تا این‌که کنده‌کاری با یون واکنش دهنده^{۲۹}

(RIE) جایگزین آن شد.

اسید هیدروفلوئوریک یکی از خطرناک‌ترین اسیدها در اطاق تمیز محسوب می‌شود. در اثر تماس با پوست وارد بدن شده و مستقیم تا استخوان نفوذ می‌نماید. بنابراین آسیب احساس نمی‌شود تا وقتی که دیگر خیلی دیر شده باشد.

۴.۱.۳.۳. کنده‌کاری الکتروشیمیایی

کنده‌کاری الکتروشیمیایی (ECE) برای برداشتن انتخابی ناخالصی از سیلیکون، یک روش معمول برای کنترل کنده‌کاری بطور خودکار و به صورت انتخابی است. در ساخت اتصال فعال p-n دیود هر یک از ناخالصی‌ها می‌تواند ماده‌ی مقاوم در برابر کنده‌کاری باشد. Boron رایج‌ترین ناخالصی بازدارنده‌ی کنده‌کاری است. در ترکیب با کنده‌کاری تر غیریکنواخت که در بالا شرح داده شد، کنده‌کاری الکتروشیمیایی با موفقیت برای کنترل ضخامت پرده‌ی^{۳۰} سیلیکونی در حسگرهای^{۳۱} فشار تجاری (بر پایه‌ی تغییر مقاومت سیلیکون) استفاده می‌شود. مناطقی که بطور انتخابی ناخالص شده می‌تواند به وسیله‌ی پیوندزنی^{۳۲}، نفوذدهی^{۳۳}، یا رسوب هم بافته‌ی^{۳۴} سیلیکون ایجاد شود.

۲.۳.۳. کنده‌کاری خشک

۱.۲.۳.۳. کنده‌کاری با دیفلوراید زنون

دیفلورایدزنون (XeF₂) بخار خشک برای کنده‌کاری یکنواخت سیلیکون است که برای MEMS ابتدا در سال ۱۹۹۵ در دانشگاه کالیفرنیا لس‌آنجلس به کار رفته است. در ابتدا برای آزاد کردن سازه‌های فلز و عایق توسط بریدن سیلیکون استفاده می‌شد. انتخاب‌پذیری کنده‌کاری آن نسبت به سیلیکون بسیار زیاد است که اجازه می‌دهد با مواد مقاوم در برابر نور، SiO₂، نیتراید سیلیکون و فلزات مختلف برای پوشش کار کنند. واکنش آن به سیلیکون بدون پلاسما، صرفاً شیمیایی و خود به خودی است و اغلب به صورت پالس استفاده می‌شود. الگوهای عمل کنده‌کاری در دسترس هستند و آزمایشگاه‌های دانشگاهی و ابزارهای تجاری مختلف، کاربردهایی با این رویکرد را پیشنهاد می‌دهند.

۲.۲.۳.۳. کنده‌کاری با یون واکنش دهنده

در کنده‌کاری یون واکنش دهنده، بستر در داخل راکتور قرار داده شده، و گازهای مختلف وارد می‌شوند. با استفاده از یک منبع توان رادیویی^{۳۵} یک پلاسما به داخل مخلوط گاز زده می‌شود که مولکول‌های گاز را شکسته و به یون تبدیل می‌کند. یون‌ها به سمت سطح ماده‌ی مورد کنده‌کاری شتاب گرفته و با آن واکنش داده و ماده‌ی گازی دیگری را شکل می‌دهند. این به عنوان بخش شیمیایی کنده‌کاری یون واکنش

سازه های ریزمکانیکی استفاده می شود. سیلیکون با استفاده از فرآیندهای مختلف کنده کاری تراش داده می شود. پیوند آنودی صفحات شیشه ای یا قرص های سیلیکون اضافی برای افزودن ویژگی ها در بعد سوم و برای قرار دادن در محفظه ی آب بندی شده استفاده می شود. ریزتراشی عمقی در ایجاد امکان ساخت حسگر فشار و شتاب سنج های^{۴۰} با کارایی بالا که شکل صنعت حسگر سازی را در دهه های ۸۰ و ۹۰ دگرگون کرده نقش اساسی داشته است.

۲.۴. ریزتراشی سطحی

در ریزتراشی سطحی به جای خود بستر از لایه های رسوب روی سطح بستر به عنوان مصالح سازه ها استفاده می شود. ریزتراشی سطحی در اواخر دهه ی ۱۹۸۰ به وجود آمده تا ریزتراشی سازگارتر با فناوری مدار یکپارچه با هدف ترکیب MEMS و مدارهای یکپارچه در همان قرص سیلیکون را ارائه نماید. مفهوم اصلی ریزتراشی سطحی مبتنی بود بر لایه های نازک سیلیکون چند بلوری^{۴۱} الگودهی شده (به عنوان سازه های جابجا شونده ی مکانیکی) که توسط کنده کاری فدا شونده ی لایه ی اکسید زیرین انجام می شود. الکترودهای شانه ای^{۴۲} دیجیتال برای تولید نیروهای درون صفحه ای^{۴۳} و برای آشکارسازی خازنی حرکت درون صفحه ای مورد استفاده قرار می گرفت. این نمونه ی MEMS ساخت شتاب سنج کم هزینه را میسر می سازد. برای مثال برای سامانه های کیسه ی هوای خودرو و کاربردهای دیگر که در آن عملکرد پایین و دامنه ی شتاب گرانشی بالا کافی هستند. شرکت Devices Analog پیشگام صنعتی شدن ریزتراشی سطحی است و یکپارچه سازی MEMS و مدارات یکپارچه را عملی ساخته است.

۳.۴. ریزتراشی سیلیکون با نسبت ابعاد بالا^{۴۴} (HAR)

هر دو ریزتراشی عمقی و سطحی سیلیکون در تولید صنعتی حسگرها، افشانه های^{۴۵} جوهرافشان^{۴۶} و وسیله های دیگر استفاده می شوند. اما در بسیاری از موارد تمایز بین این دو کاهش یافته است. یک فناوری جدید کنده کاری یعنی کنده کاری یون واکنش دهنده ی عمیق، امکان یافته است تا عملکرد خوب معمول در ریزتراشی عمقی با سازه های شانه ای و عملیات درون صفحه ای معمول در ریزتراشی سطحی را ترکیب کند. در حالی که در ریزتراشی سطحی داشتن ضخامت لایه ی ساختاری در دامنه ی ۲ میکرومتر معمول است، در ریزتراشی سیلیکون HAR ضخامت می تواند از ۱۰ تا ۱۰۰ میکرومتر باشد. ماده های رایج بکار رفته در ریزتراشی سیلیکون HAR عبارتند از: سیلیکون چندبلوری ضخیم، معروف به epi-poly و قرص های پیوند^{۴۷} سیلیکون روی عایق^{۴۸}، اگرچه فرآیندهایی برای قرص توده ی^{۴۹} سیلیکون نیز ایجاد شده است. پیوند قرص دوم توسط پیوند خمیر شیشه^{۵۰}، پیوند آندی یا پیوند آلیازی برای محافظت از سازه های

دهنده شناخته می شود. همچنین یک بخش فیزیکی هست که شبیه فرآیند رسوب دهی پرتابی می باشد. اگر یون ها انرژی به اندازه ی کافی بالا داشته باشند می توانند اتم ها را بدون واکنش شیمیایی از ماده کنده کاری شونده بکنند. توسعه ی فرآیندهای کنده کاری خشک که کنده کاری شیمیایی و فیزیکی را متعادل می کند کاری بسیار پیچیده است، چون که عامل های بسیاری برای تنظیم وجود دارد. با تغییر تعادل ممکن است که نایکناختی کنده کاری تحت تأثیر قرار گیرد. چون ترکیب قسمت شیمیایی یکنواخت و بخش فیزیکی بسیار نایکناخت می تواند دیواره های کناری با شکل های از گرد تا عمودی را شکل دهد. RIE می تواند عمیق باشد.

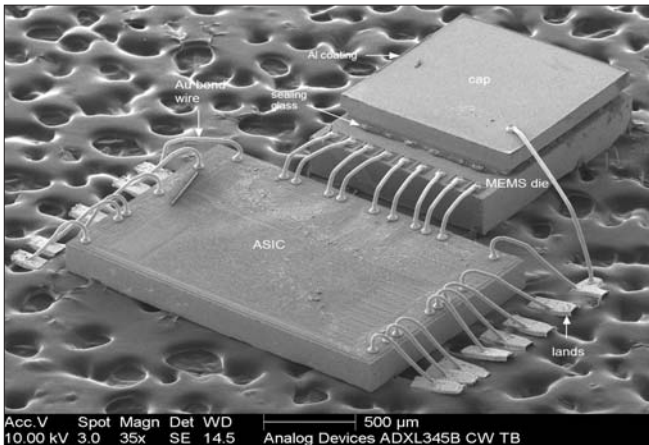
کنده کاری یون واکنش دهنده ی عمیق: کنده کاری یون واکنش دهنده ی عمیق یک زیر طبقه ی خاص از کنده کاری یون واکنش دهنده است که از لحاظ اقبال عمومی در حال رشد است. در این فرآیند، عمق کنده کاری صدها میکرومتری با دیواره های کناری تقریباً عمودی به دست می آید. فرآیند اولیه بر پایه ی «فرآیند بوش» است که به افتخار شرکت آلمانی رابرت بوش که اختراع اولیه را به ثبت رسانده به نام این شرکت نامیده می شود. در آن دو ترکیب گازی مختلف در راکتور جا عوض می کنند. در حال حاضر دو گونه کنده کاری یون واکنش دهنده ی عمیق وجود دارد. گونه ی اول شامل سه مرحله ی متمایز است (فرآیند بوش همان طور که در ابزار پلازما - گرما^{۳۶} استفاده می شود) در حالی که گونه ی دوم تنها از دو مرحله تشکیل شده. در گونه ی اول، چرخه ی کنده کاری به شرح زیر است اول، کنده کاری یکنواخت توسط SF6؛ دوم، خنثی سازی توسط C4F8؛ سوم، کنده کاری غیر یکنواخت توسط SF6 برای تمیز کردن کف. در دومین گونه، مرحله ی اول و سوم با هم ترکیب می شوند.

هر دو گونه شبیه هم کار می کنند. C4F8 بر روی سطح بستر یک پلیمر^{۳۷} ایجاد نموده و ترکیب گازی دوم (SF6 و O2) بستر را کنده کاری می کند. پلیمر بلافاصله توسط بخش فیزیکی کنده کاری پرانده می شود، فقط در سطوح افقی و نه دیواره های کناری. از آن جا که پلیمر بسیار به آرامی در بخش شیمیایی کنده کاری حل می شود، روی دیواره های کناری جمع می شود و از آنها در برابر کنده کاری محافظت می کند. در نتیجه، میزان کنده کاری به نسبت ۵۰ به ۱ می توان به دست آورد. این فرآیند به راحتی می تواند برای کنده کاری کامل بستر سیلیکونی مورد استفاده قرار گیرد، و نرخ کنده کاری ۳ تا ۶ برابر بیشتر از کنده کاری تراست.

۴. فناوری های ساخت MEMS

۰.۱.۴. ریزتراشی^{۳۸} عمقی^{۳۹}

ریزتراشی عمقی قدیمی ترین روش ساخت MEMS بر پایه ی سیلیکون است. از کل ضخامت قرص سیلیکون برای ساخت



و سلامت از «آزمایشگاه روی تراشه» تا «ریز تجزیه ی کامل^{۶۴}» (حسگرزیستی و حسگر شیمیایی).

- مدولاتور تداخلی^{۶۵} صفحه ی نمایش در لوازم الکترونیکی مصرفی (در صفحات نمایش ابتدایی برای دستگاه های تلفن همراه).

۶. ساختار صنعت

شرکت هایی بزرگ و کوچک با برنامه های پر بار MEMS وجود دارند. شرکت های بزرگ تر متخصص در ساخت قطعات ارزان قیمت با حجم بالا یا ارایی فرآورده ی کامل برای بازار مصرف مانند خودرو، پزشکی و الکترونیک می باشند. شرکت های موفق کوچک در زمینه های نوآورانه ارزش آفرین بوده و هزینه ی ساخت سفارشی را با حاشیه ی فروش بالا جبران می کنند. علاوه بر این، شرکت های بزرگ و کوچک در تحقیق و توسعه برای کشف فناوری MEMS فعالیت می نمایند.

بازار جهانی برای MEMS، شامل محصولاتی مانند سامانه های کیسه ی هوای خودرو، سامانه های صفحه ی نمایش و ادوات^{۶۶} جوهرافشان بالغ بر ۴۰ میلیارد دلار در سال ۲۰۰۶ بوده که پیش بینی می شود به ۷۲ میلیارد دلار در سال ۲۰۱۱ برسد.

مواد و تجهیزات مورد استفاده برای ساخت دستگاه های MEMS در سراسر جهان در سال ۲۰۰۶ به یک میلیارد دلار رسیده است. تقاضای مواد برای زیرلایه با بیش از ۷۰ درصد بازار، پوشش های بسته بندی و پرداخت شیمیایی مکانیکی^{۶۷} می باشد. در حالی که غالب بودن ساخت MEMS توسط تجهیزات دست دوم ساخت نیمه هادی ادامه دارد، حرکت به سمت خطوط ۲۰۰ میلی متری و انتخاب ابزارهای جدید شامل کنده کاری و پیوندزنی برای کاربردهای خاص MEMS می باشد.

منبع:

www.wikipedia.com

مراجع:

1. Waldner, Jean-Baptiste (2008). Nanocomputers and Swarm Intelligence. London: ISTE John Wiley & Sons. p. 205. ISBN 1848210094.

MEMS استفاده می شود. مدارات یکپارچه نوعاً با ریزتراشی سیلیکون HAR ترکیب نمی شوند.

در حال حاضر به نظر می رسد اجماع صنعت این است که انعطاف پذیری و کاهش پیچیدگی فرآیند به دست آمده با دو توانایی جدا، از جریمه ی کوچک در بسته بندی مهم تر است.

تاریخ فراموش شده ی ریزتراشی سطحی پیرامون انتخاب پلی سیلیکون^{۵۱} یا دگرگون شده است. پلی سیلیکون خالص ریزدانه ی^{۵۲} (اندازه ی دانه کمتر از ۳۰۰ آنگستروم) پخته^{۵۳} توسط پروفیسور هنری گوگل از دانشگاه ویسکانسین ارائه شده است، در حالی که یک پلی سیلیکون ناخالص^{۵۴} با دانه ی درشت تر و با تنش^{۵۵} کنترل شده توسط گروه دانشگاه یوسی برکلی ابداع گردیده است.

۵. کاربرد

تراشه ی^{۵۶} MEMS، گاهی «آزمایشگاه روی یک تراشه»^{۵۷} نامیده می شود. از یک دیدگاه کاربرد MEMS به وسیله ی موارد استفاده ی آن به شرح ذیل طبقه بندی می شوند:

- حسگر

- عملگر^{۵۸}

- سازه .

از دیدگاه دیگر کاربردهای MEMS به وسیله ی کاربردهای میدانی طبقه بندی می شوند. کاربردهای تجاری شامل موارد زیر است:

- چاپگرهای جوهر افشان که از افشانه ی پیزوالکتریک^{۵۹} یا حباب گرمایی^{۶۰} برای نشان دادن جوهر روی کاغذ استفاده می کنند.

- شتاب سنج ها در خودروهای امروزی برای تعداد زیادی از اهداف از جمله بکاراندازی کیسه ی هوا در تصادفات.

- شتاب سنج ها در دستگاه های الکترونیکی مصرفی مانند کنترل کننده های بازی، دستگاه های پخش صوت و تصویر، تلفن های همراه

و تعدادی از دوربین های دیجیتال، همچنین در رایانه های شخصی برای متوقف کردن هد دیسک سخت^{۶۱} در هنگام تشخیص سقوط آزاد و جلوگیری از آسیب دیدن و از دست دادن اطلاعات بکار می رود.

- ژيروسکوپ^{۶۲} MEMS خودروهای امروزی و کاربردهای دیگر برای آشکارسازی خطا.

- حسگرهای فشار سیلیکونی به عنوان مثال، حسگرهای فشار تایر ماشین، و حسگرهای یکبار مصرف فشار خون .

- نمایشگرها به عنوان مثال تراشه ی داخل یک نوع نورافکن^{۶۳} که صفحه ای با چند صد هزار آینه ی ریز دارد.

- فناوری کلیدزنی نوری که برای کلیدزنی و هم تراز کردن برای مخابرات داده ها استفاده می شود.

MEMS زیستی و کاربردهای آن در فناوری های مرتبط با پزشکی

17. embossing
18. sterolithography
19. microfluidic
20. sputtering
21. substrate
22. diffraction limit
23. maskless lithography
24. photomask
25. drift
26. isotropic
27. anisotropic
28. wafer
29. Reactive Ion Etching
30. diaphragm
31. sensor
32. implantation
33. diffusion
34. epitaxial deposition
35. RF power source
36. plasma- therm
37. polymer
38. micromachining
39. bulk
40. accelerometers
41. polycrystalline
42. comb elctrodes
43. in-plane forces
44. High Aspect Aatio
45. nozzles
46. ink-jet
47. bonded
48. Silicon - On- Insulator
49. bulk
50. glass frit
51. polysilicon A or B
52. grain
53. annealed
54. doped
55. stress
56. chip
57. lab on a chip
58. acuator
59. piezoelectric
60. thermal bubble
61. hard disk head
62. gyroscope
63. projector
64. micro total nalysis
65. interferometric modular display
66. cartridge
67. chemical mechanical planarization

2. Electromechanical monolithic resonator, US patent 3614677, Filed April 29, 1966; Issued October 1971
3. R.J. Wilfinger, P. H. Bardell and D. S. Chhabra: The resonistor a frequency selective device utilizing the mechanical resonance of a substrate, IBM J. 12, 113-118 (1968)
4. McCord, M. A.; M. J. Rooks (2000). "2" SPIE Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication. http://www.cnf.cornell.edu/cnf_spietoc.html
5. Williams, K.R.; Muller, R.S. (1996). "Etch rates for micromachining processing". Journal of Microelectromechanical Systems 5: 256. doi :10.1109/84.546406
6. Kovacs, G.T.A.; Maluf, N.I.; Petersen, K.E. (1998). "Bulk micromachining of silicon". Proceedings of the IEEE 86: 1536. doi: 10.1109/5.704259
7. Chang, Floy I. (1995). Gas-phase silicon micromachining with xenon difluoride. pp. 117. doi:10.1117/12.220933
8. Chang, Floy I-Jung. 1995. Xenon difluoride etching of silicon for MEMS. Thesis (M.S.) University of California, Los Angeles, 1995.
9. Brazzle, J.D.; Dokmeci, M.R.; Mastrangelo, C.H. (2004). Modeling and characterization of sacrificial polysilicon etching using vapor-phase xenon difluoride. pp. 737. doi:10.1109/MEMS.2004.1290690
10. Laermer, F.; Urban, A. (2005). Milestones in deep reactive ion etching. pp. 1118. doi:10.1109/SENSOR.2005.1497272
11. J. M. Bustillo, R. T. Howe, and R. S. Muller, "Surface micromachining for microelectromechanical systems" Proceedings of the IEEE, vol. 86, pp. 1552-1574, 1998.
12. Johnson, R. Collin. There's more to MEMS than meets the iPhone EE Times (2007-07-09). Retrieved on 2007-07-10.
13. Cenk Acar, Andrei M. Shkel (2008). MEMS Vibratory Gyroscopes: Structural Approaches to Improve Robustness pp. 111 ff. ISBN 0387095357
14. Worldwide MEMS Systems Market Forecasted to Reach \$72 Billion by 2011

بی نویس :

1. Microelectromechanical Systems
2. micromachine
3. microprocessor
4. microsensors
5. interact
6. inertia
7. thermal mass
8. semiconductor
9. molding
10. plating
11. etching
12. monolithic resonator
13. deposition
14. patterning
15. polymer
16. injection molding