به نام خدا

سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی

مولفان :

عزیز قربان شیروی زاده – هدی قوامی نیا

هیات علمی دانشگاه ازاد اسلامی واحد دزفول

انتشارات ارسطو
(چاپ و نشر ایران)
۱۴۰۱

نام کتاب : سیستم های میکرو الکترو مکانیکی
مولفان : عزیز قربان شیروی زاده - هدی قوامی نیا
ناشر : ارسطو (سامانه اطلاع رسانی چاپ و نشر ایران)
تیراژ : ۱۰۰۰ جلد
نوبت چاپ : اول - ۱۴۰۱
چاپ : مدیران
قیمت : ۴۲۰۰۰ تومان
فروش نسخه الکترونیکی - کتاب‌رسان :
https://chaponashr.ir/ketabresan
شابک : ۳-۹۷۴-۴۳۲-۶۰۰-۹۷۸
تلفن مرکز پخش : ۰۹۱۲۰۲۳۹۲۵۵
www. chaponashr. ir

پیشگفتار

سیستم های میکروالکترومکانیکی (MEMS) قطعاتی هستند که از نظر اندازه فیزیکی خیلی کوچک و دارای اجزای الکتریکی و مکانیکی اند. MEMS ها علاوه بر قابلیت پردازش اطلاعات ، قدرت جمع اوری اطلاعات از محیط و تغییر در پیرامون را نیز دارند

ماهیت بین رشته ای MEMS از تخصص طراحی، مهندسی و ساخت از طیف گسترده و متنوعی از حوزه های فنی از جمله فناوری ساخت مدارهای مجتمع، مهندسی مکانیک، علم مواد، مهندسی برق، شیمی و مهندسی شیمی و همچنین مهندسی سیالات، اپتیک، ابزار دقیق و بسته بندی استفاده می کند. پیچیدگی MEMS همچنین در طیف گسترده ای از بازارها و برنامه های کاربردی که دستگاه های MEMS را در خود جای داده اند نشان داده شده است. MEMS را می‌توان در سیستم‌های مختلف خودرو، پزشکی، الکترونیک، ارتباطات و کاربردهای دفاعی یافت. دستگاه‌های MEMS شامل شتاب‌سنج‌ها، سنسورهای کیسه هوا، سرهای چاپگر جوهرافشان، هدهای خواندن/نوشتن درایو دیسک کامپیوتر، تراشه‌های نمایشگر، حسگرهای فشار خون، سوئیچ‌های نوری، میکرو دریچه‌ها، حسگرهای زیستی و بسیاری از محصولات دیگر هستند که همگی در حجم‌های تجاری بالا تولید و ارسال می‌شوند.

MEMS به عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین فناوری‌ها برای قرن بیست و یکم شناخته شده است و پتانسیل ایجاد انقلابی در محصولات صنعتی و مصرفی را با ترکیب میکروالکترونیک مبتنی بر سیلیکون با فناوری ریزماشینکاری دارد.

تکنیک‌ها و دستگاه‌های میکروسیستم پایدار آن، این پتانسیل را دارند که به طور چشمگیری بر زندگی و نحوه زندگی ما تأثیر بگذارند. اگر ریزساخت نیمه هادی اولین انقلاب میکروساختی بود، MEMS انقلاب دوم است.

این گزارش به معرفی سیستم های میکروالکتریکی *MEMS* می پردازد و به چهار بخش اصلی تقسیم می شود. در بخش اول، خواننده با *MEMS*، تعاریف، تاریخچه، مسائل مربوط به کوچک سازی آشنا می شود.

بخش دوم به روش‌های ساخت بنیادی *MEMS* از جمله فوتولیتوگرافی، نهشت، حکاکی، ریزماشین کاری حجیم، ریزماشین کاری سطحی و ریزماشینکاری با ابعاد بالا می‌پردازد.

بخش سوم محدوده سنسورها و محرک‌های *MEMS*، پدیده‌هایی را که می‌توان با دستگاه‌های *MEMS* حس کرد یا روی آن‌ها عمل کرد، و به اختصار مکانیسم‌های اصلی سنجش و تحریک را بررسی می‌کند.

بخش چهارم کاربردهای فعلی و بالقوه آن را بررسی می کند.

فهرست مطالب

فصل اول

ساختار میکروسیستم های مکانیکی **۱۱**

۱-۱مقدمه ۱۱

۱-۲تاریخچه ۱۲

۱-۳ابعاد ۱۳

فصل دوم

فرایندهای ساخت MEMS **۱۵**

۲-۱سیلیسیوم ماده مورد استفاده در ساختار MEMS..... ۱۵

۲-۲لیتوگرافی ۱۷

۲-۳نهشت ۱۸

۲-٤حکاکی ۱۸

۲-٤-۱حکاکی همسانگرد و ناهمسانگرد..... ۲۰

۲-٤-۲حکاکی تر شیمیایی ۲۲

۲-٤-۳حکاکی خشک ۲۳

۲-۵فرایندهای افزایشی ۲۸

۲-۵-۱لایه نشانی بخار شیمیایی ۲۹

۲-۵-۲رشد همبافته ۳۰

۲-۵-۳فلزکاری ۳۲

۲-۶کندوپاش ۳۳
۲-۷لایه های قربانی ۳۴
۲-۸ریزماشین کاری سطحی ۳۶
۲-۸-۱پیوند همجوشی ۳۹
۲-۹ریزماشین کاری با نسبت تصویر بالا ۴۰
۲-۹-۱ LIGA ۴۰
۲-۹-۲ریز ماشین کاری لیزری ۴۱
۲-۱۰طراحی به کمک کامپیوتر ۴۲
۲-۱۱مونتاژ و یکپارچه سازی سیستم ۴۳

فصل سوم

فرایندها و ابزارهای اساسی برای تولید MEMS ۴۵

۳-۱درایو شانه الکتروستاتیک ۴۵
۳-۱-۱اساس کار درایو شانه الکتروستاتیکی ۴۸
۳-۱-۲ فن اوری ساخت درایو شانه ای ۵۳
۳-۱-۳ شتاب سنج های الکتروستاتیکی ۵۴
۳-۱-۴ اسیلاتورهای MEMS ۵۶
۳-۲ عملگرهای الکتروستاتیکی ۵۷
۳-۳ عملگرهای حرارتی ۵۸
۳-۴ ژیروسکوپ الکتروستاتیکی ۵۸
۳-۵ میکروموتورهای الکتروستاتیکی ۵۹
۳-۶ فرایندهای قالبی CMOS ۶۱
۳-۷ تست MEMS روی تراشه ۶۴

فصل چهارم

کاربردهای MEMS ٦٥

٤-١سنسورها ٦٥

٤-١-١ سنسورهای فشار ٦٨

٤-١-٢ سنسورهای اینرسی MEMS ٧٠

٤-٢ کاربردهای MEMS در پزشکی ٧٣

٤-٢-١ تست بالینی ٧٤

٤-٣ کاربردهای نوری MEMS ٧٤

٤-٣-١ سیستم TLsDLP ٧٥

٤-٣-٢ شیر گریتینگ نور ٧٦

٤-٤سایرکاربردهای MEMS ٧٧

٤-٥سایرکاربردهای MEMS ٧٨

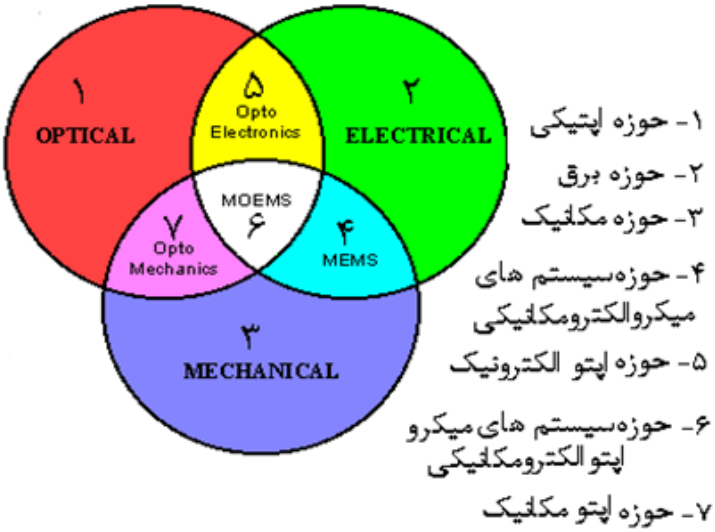
منابع و مآخذ ٧٩

فصل اول

ساختار سیستم های میکروالکترو مکانیکی

۱-۱ مقدمه

سیستم های میکروالکترومکانیکی ($MEMS$) قطعاتی هستند که در آنها از اثرات متقابل خواص مکانیکی و الکتریکی مواد در ابعاد میکرومتر استفاده شده است. در این سیستم ها که به طور گسترده ای در سنسورها وعملگرها بکار برده می شوند، اعمال یک استرس مکانیکی بر ماده ایجاد یک اختلاف پتانسیل (سنسورها) می کند. یا اعمال یک پالس الکتریکی موجب حرکت یا ارتعاش مکانیکی (عملگرها) می شود. این سیستم ها با توجه به دقت بالا، سادگی تکنولوژی ساخت (بسیار شبیه تکنولوژی مولدهای مجتمع) و ارزانی آن بسیار مورد توجه و پیشرفت می باشد. در شکل ۱ حوزه ی عمل سیستم های میکروالکترومکانیکی بصورت شماتیکی نشان داده شده است.



شکل ۱ حوزه عمل سیستم های میکرومکانیکی.

۱-۲ تاریخچه

بیش از ٤٥ سال است که دانشمندان روی سیستم های میکرو الکترومکانیکی کار می کنند. شروع کار بر روی این سیستم ها در سال ۱۹۵۸ وقتی بود که اسمیت[۱] کشف کرد که سنسورهای فشار سیلیکون (هوا یا آب) بهتر از فلزات می توانند عمل کنند. هفت سال بعد دانشمندان دیگر ارتباطی به این صورت که ما می توانیم در ساخت سنسورهای فشار سیلیکون از همان روشهای ساخت تراشه های کامپیوتری بهره بگیریم ، را بیان کرد .

در سال ۱۹٦۲ در هانوول اولین میکرو ماشین ساخته شد .

سیر تاریخی ساخت سیستم های میکرو الکترومکانیکی و اشتراک آن با تکنولوژی ساخت قطعات نیمه هادی بصورت زیر می باشد :

ساخت اتصال نیمه رسانای p-n توسط ویلیام شاتکی .

اختراع ترانزیستور توسط شاتکی و همکاران او .

---

۱ *S.S.Smite*

اثر پیزو رسیستیو (سیلیسیم) توسط اسمیت .

ابداع اولین مدار مجتمع یا IC .

بکارگیری سیلیسیم در پیزو عملگرهای مجتمع .

۱۹٦۵ ابداع شتابسنج های FET در سطوح پرداخت شده سیلیسیم .

۱۹۷۷ ابداع شتاب سنج های الکترواستاتیکی سیلیکونی .

۱۹۸۲ استفاده از سیلیسیم بعنوان یک ماده ی مکانیکی .

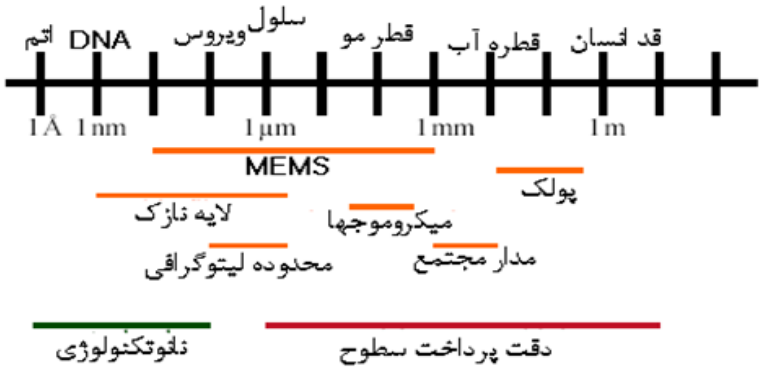
۱۹۹۲ ابداع روش پرداخت ریز حجمی در ساختارهای سیلیسیم .

۱۹۹۳ ابداع آشکارکننده های آینه دیجیتالی .

۱۹۹۹ ابداع سویچهای شبکه ی اپتیکی .

۳-۱ ابعاد

برای آشنایی بهتر با ابعاد کاری سیستم های میکروالکترومکانیکی و مقایسه آن با حوزه های دیگر محور افقی زیر را در نظر می گیریم . با توجه به اینکه ابعاد اتم در حدود nm ۰/۱ می باشد ، اندازه ی سیستم های $MEMS$ از ابعاد nm ۱۰ تا ابعاد mm ۱ گسترش یافته است .در ابعاد بسیار ریز در حدود nm ۱۰ تا nm ۱۰۰ حوزه های نانو تکنولوژی و سیستم های میکروالکترومکانیکی مشترک هستند، با این تفاوت که نانوتکنولوژی خواص شیمیایی و مولکولهای بیولوژیکی را مورد بحث قرار می دهد.



شکل ۲- بررسی ابعاد میکروسیستم ها

فصل دوم

فرایندهای ساخت MEMS

۲-۱ سیلیسیم ماده مورد استفاده در ساختار MEMS

در سیستم های MEMS بطور مشخص زیر ساختار سیلیسیم رشد داده شده (ساختار بلوری ساده ی SC) پایه پرداخت سطح مورد استفاده، قرار می گیرد. بکارگیری سیستم های MEMS معمولاً بصورت ترکیب دوگانه با سیستم های میکروالکترومکانیکی در مدارهای مجتمع در کاربردهای فراوان روزمره مانند مخابرات و کامپیوتر در قالب عملگرها و سنسورهای میکرونی مورد استفاده قرار می دارد.

دلیل استفاده از ساختار سیلیسیوم به خواص ویژه ی این نیمه هادی گروه چهارم بعنوان یک ماده ی نیمه رسانا با خواص مکانیکی ویژه مربوط می شود. کار با سیلیسیم با توجه به تجربیات بسیار گسترده در ساخت مدارهای مجتمع (IC) دارای مزیت می باشد. همچنین خالص سازی سیلیسیم دارای فرآیند ساده و شناخته شده ای است. خواص مادی سیلیسیم بسیار خوب شناخته شده است و می توان در مدارهای مجتمع الکترونیکی بصورت ترکیب با خواص مکانیکی از آن بهره جست. خواص استثنایی سیلیسیم شامل.سختی بسیار بالا در حدود $7\times10^{9}\ N/m^2$ (فولاد $4/2\times10^{9}\ N/m^2$)، سبکی نسبتا