فناوری سامانه های میکرو الکترومکانیکی (MEMS)

مهدی طالبی[۱]

چکیده

فناوری قطعات میکرو الکترومکانیکی و سامانه‌های میکرونی این توانایی را دارند که بطور شگفت انگیزی راه و روش زندگی انسان را در آینده تحت تاثیر قرار دهند. بکارگیری این فناوری در زمینه های نظامی علاوه بر زمینه های مختلف تجاری موجب شده است تا جایگاه تثبیت شده ای را در میان کشورهای پیشرفته و برخی از کشورهای در حال توسعه بیابد. بنیان این فناوری همان فناوری میکرو الکترونیک بر پایه تراشه های سیلیسیمی است. بی شک راه یابی ایران به جمع کشورهای پیشرفته در سالهای آینده بدون عبور از مسیرهای طی شده کشورهای خط مقدم فناوری امری محال است. لذا می بایست با دیدگاه تحقیقاتی، نظامی و توسعه ای و نه تجاری به فناوری کلیدی میکرو الکترومکانیک نگریست. طی سالیان اخیر در بخش نیمه هادی سرمایه گذاری هایی در ایران شده است که می توان با ایجاد یک مدیریت علمی واحد از این سرمایه ها بعنوان بستر مناسبی استفاده نموده، با رفع برخی کمبودهای فنی و بهره گیری از همکاریهای علمی مشترک میان دانشگاه و صنعت، بطور نسبی و طی مدت کوتاهی به این فناوری دست یافت.

کلید واژه

سامانه های میکروالکترومکانیکی، میکروماشینها، سامانه‌های میکرونی، سیلیسیم.

۱.دانشگاه علم و صنعت mehdi.talebi@gmail.com

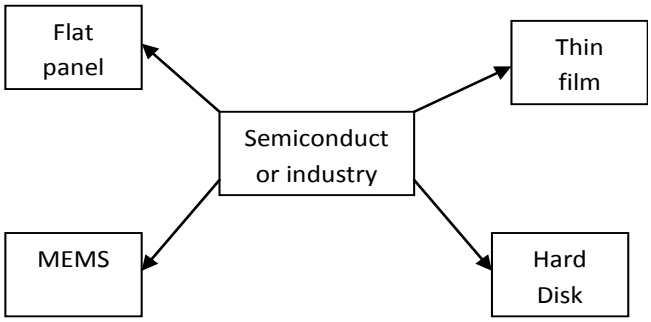
تاریخ دریافت: ۸۸/۱۱/۲۰ تاریخ پذیرش: ۸۹/۱/۲۲

مقدمه

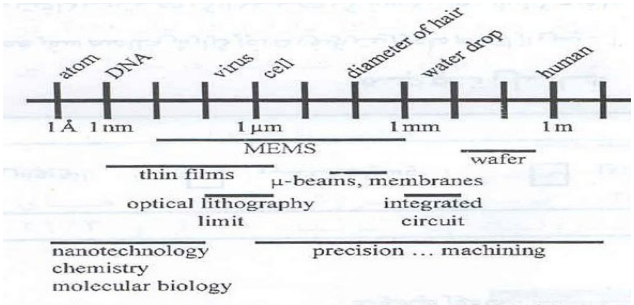
صنایع نیمه هادی از لحاظ محصول تولیدی مطابق شکل(۱) به چهار دسته صنایع لایه نازک و هایبرید، حافظه سخت، صفحات نمایش تخت و سامانه های میکروالکترومکانیک (MicroElectroMechanical Systems or MEMS)تقسیم بندی شده اند. نیمه هادیها مورد استفاده در صنایع شامل سیلیسیم (Silicon) ، ژرمانیم و ترکیبات عناصر گروههای III-V و II-VI جدول تناوبی می شوند. فناوری میکروالکترومکانیکی به عنوان یکی از فناوری های بسیار پرآتیه قرن بیست و یکم شناسایی شده است. این فناوری برای بوجود آمدن انقلابی در هر دو زمینه صنعتی و تجاری دارای پتانسیل بسیار قوی است. فناوری میکروالکترومکانیک با ادغام فناوری های ساخت قطعات میکروالکترونیک بر پایه سیلیسیم و میکروماشین کاری آن بوجود آمد. میکرو ماشین کاری و فناوری ساخت سامانه های میکروالکترومکانیکی برای تولید ساختارهای مرکبی از قطعات مکانیکی و سامانه های الکترونیکی به بزرگی میکرومتر مورد استفاده قرار می گیرد. در ابتدا، فناوری میکروماشین کاری بطور مستقیم از صنایع تولید مدارهای مجتمع منشعب گردید، در حالیکه هم اکنون به صورت منحصر به فردی برای تولید قطعات MEMS استفاده شده و در حال توسعه می باشد. فناوری میکرو ماشین کاری شامل میکرو ماشین کاری توده ای سیلیسیم و اتصال ویفر، میکروماشین کاری سطحی سیلیسیم پلی کریستالی، فرایند LIGA و میکروماشین کاری ترکیبی توده ای و سطحی میشود.

فناوری سامانه های میکروالکترومکانیکی فناوری فرآیندهای ساختی است که برای خلق قطعات مجتمع سازی شده بسیار کوچک یا سامانه های که مرکب از اجزا مکانیکی و الکترونیکی هستند (هایبریدها)، مورد استفاده قرار گرفته است. تولید قطعات MEMS با استفاده از فناوریهای فرآیندهای ساخت گروهی (Batch) مدارهای مجتمع (IC) انجام میشود که میتوانند اندازه ای از ابعاد میکرومتری تا میلیمتری داشته باشند. این قطعات توانایی آشکارسازی، کنترل و فعال سازی در مقیاس میکرونی و تولید آثاری در مقیاس بزرگتر (Macro Scale) را دارند. این سامانه ها در ایالات متحده آمریکا به عنوان MEMS در اروپا به عنوان فناوری سامانه های میکرونی (Microsystems Technology or MST) و در ژاپن به عنوان میکروماشینها (Micromachines) شناخته می شوند. صرفنظر از واژگان، نکته مهم در مورد یک قطعه MEMS روش ساخت عملی آن می باشد. زیرا در حال حاضر قطعات الکترونیکی با استفاده از فناوری برتر ساخت IC ها (مانند تراشه های کامپیوتر) انجام می شوند و اجزاء میکرو ماشینی با استفاده از روشهای پیشرفته(که بکارگیری آنها بستگی زیادی به مهارت شخصی دارند) و کار بر روی بستر سیلیسیمی با استفاده از فرآیندهای میکرو

ماشین کاری ساخته میشوند. در فرآیندهایی مانند میکرو ماشین کاری سطحی (Surface) و توده ای (Bulk) همچنین میکروماشین کاری به روش(High Aspect Ratio Micromachining(HARM به صورت گزینشی قسمتهایی از سیلیسیم تک کریستالی یا پلی کریستالی را برداشته و یا لایه های ساختمانی را برای ایجاد اجزاء میکروالکترومکانیکی به آن اضافه می کنند. در حالیکه مدارهای مجتمع از خواص الکترونیکی عالی سیلیسیم بهره می گیرند، قطعات MEMS از مزیت بسیار خوب مکانیکی سیلیسیم یا بطور همزمان از هر دو مزیت بهره مند می باشند. در شکل (۲) فناوری MEMS از لحاظ ابعادی با برخی از فناوریها و اشیاء مقایسه شده است. فناوری قطعات MEMS برای طراحی و ساخت قطعات مکانیکی پیچیده، سامانه ها و همچنین مدارهای مجتمع آنها با استفاده از تکنیکهای تولید گروهی از الگوهای مناسبی بهره میبرد. در اواسط دهه ۹۰ میلادی شماری از قطعات MEMS بصورت تجاری و برای کاربردهای تثبیت شده ای مانند: هد ها و نازلهای چاپگرها، شتاب سنجهای مورد استفاده در کیسه هوا (Airbag) و سنسور اندازه گیری فشار خون یک بار مصرف وارد بازار شدند.



شکل (۱): دسته بندی صنایع نیمه هادی بر حسب محصول تولیدی



شکل(۲): مقایسه ابعادی فناوری MEMS با فناوریهای دیگری مانند فناوری نانو، لایه نازک و مدارهای مجتمع

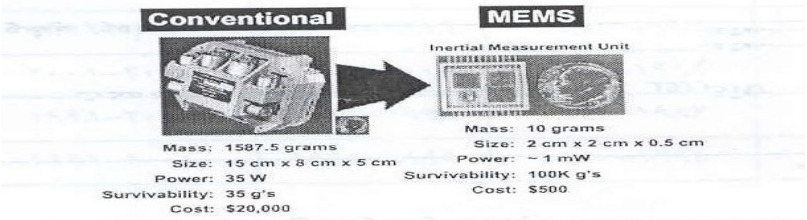
فناوری MEMS دارای مزایای منحصر به فردی از نقطه نظر ساخت می باشد. این مزایا سبب می‌شوند که این فناوری در سطح بالاتری از فناوری ساخت تراشه های مدار مجتمع قرار گیرد. مزایای اصلی این فناوری عبارتند از :

۱- طبیعت چندگانه علمی این فناوری و تنوع کاربردی آن موجب پدیدار شدن محدوده ای وسیع و بی نظیر از قطعات و همیاری و تلفیق حوزه های علمی مختلف که پیش از این در شاخه های متفاوتی مطرح شده اند، گردیده است(به عنوان مثال تلفیق دانش شیمی و زیست شناسی با الکترونیک)

۲- در این فناوری با استفاده از روشهای ساخت گروهی علاوه بر بهبود خواص عملکرد و افزایش قابلیت اطمینان عملیاتی، قابلیت تولید قطعات با ابعاد فیزیکی، وزنی و هزینه بسیار کم تولید مهیا میگردد. ضمن آنکه مصرف انرژی نیز از حدود چند ده واتی در سامانه های قدیمی و رایج به حدود چند ده میلی واتی کاهش می یابد در شکل (۳) نمونه ای از یک INS مکانیکی با نوع MEMS آن مقایسه شده است.

۳- در فناوری MEMS روش ساخت و تولید اساسی ارائه میگردد که محصولات تولیدی در آن را نمی توان با روشهای دیگر ساخت.
وقایع مهمی که در سالیان گذشته در فناوری MEMS روی داده و برآن تاثیر گذار بوده است، عبارتند از: فروش تجاری کرنش سنج سیلیسیمی در سال ۱۹۵۸، اعلام ابتدای راه کوچک سازی توسط ریچارد فایمن (Richard Feyman) در سال ۱۹۵۹، ساخت اولین سنسور فشار سیلیسیمی در سال ۱۹۶۱، کشف میکروماشین کاری سطحی در سال ۱۹۶۷، ساخت اولین سنسور شتاب سیلیسیمی در سال ۱۹۷۰، ساخت اولین هد چاپگرهای جوهر افشان نسل جدید در سال ۱۹۷۹، گسترش تحقیقات درباره میکروماشین کاری سطحی در اوایل دهه ۱۹۸۰، تحت تاثیر قرار گرفتن صنایع میکرو الکترونیک به واسطه ظهور فناوری میکروماشین کاری در اواخر دهه ۱۹۸۰، عرضه سنسور فشار سیلیسیمی میکروماشینی یک بار مصرف به بازار در سال ۱۹۸۲، مطرح شدن سیلیسیم به عنوان یک ماده با خواص مکانیکی خوب در سال ۱۹۸۲(سیلیسیم به عنوان یک ماده با خواص مکانیکی بسیار خوب علاوه بر خصوصیات عالی الکترونیک مطرح گردد) ، ارائه مقالات زیادی در ارتباط با خواص مکانیکی و اطلاعات حکاکی و... در سال ۱۹۸۲، شناسایی فرایند LIGA به عنوان یکی از روشهای میکروماشین کاری در سال ۱۹۸۲، برگزاری اولین کنفرانس تخصصی MEMS در سال ۱۹۸۸، بهبود عملکرد سنسورهای میکروماشینی در دهه ۱۹۹۰، انجام فرآیندهای میکرو ماشینی چند منظوره در سال ۱۹۹۲، ساخت اولین لولای مکانیکی در سال ۱۹۹۲، عرضه تجاری

اولین شتاب سنج میکروماشینی سطحی توسط Analog در سال ۱۹۹۳، اختراع فرایند حکاکی عمیق فعال یونی (Deep Reactive Ion Etching) در سال ۱۹۹۴، توسعه سریع قطعات Biomems در سال ۱۹۹۸، فروش وسیع اجزا شبکه فیبر نوری در سال ۲۰۰۰ در جدول (۱) مقایسه ای بین خواص فیزیکی و مکانیکی سیلیسیم تک کریستالی با فولاد انجام شده است. در جدول (۲) نیز تاریخچه توسعه برخی از قطعات میکروالکترومکانیکی گردآوری شده است.هم اکنون قطعات MEMS در ابعاد بسیار وسیعی که کاربرد نظامی نیز از آن جمله اند، تولید میشوند. در حالیکه سهم فروش جهانی صنایع نیمه هادی در سالهای ۱۹۹۶ و ۲۰۰۲ برابر با ۱۳۲ و ۲۲۵ میلیارد دلار بود، سهم فروش سامانه های میکروالکترومکانیکی در بازار جهانی الکترونیک به ترتیب ۱۳/۱ و ۳۴/۳ میلیارد دلار بوده است.



شکل(۳): مقایسه INS قدیمی مکانیکی و نوع MEMS آن

کاربردهای سامانه های میکروالکترومکانیکی

علاوه بر کاربردهای حرارتی، شیمیایی، تابشی، مغناطیسی و الکترونیکی سامانه های میکرونی، عمده کاربردهای آنها در حوزه علم مکانیک عبارتند از: فلومترها، نازلها (بطور کلی قطعات میکرونی با کاربردهای سیالاتی)، نیرو سنجها، فشارسنجها، سرعت سنجها، شتاب سنجها، ژیرسکوپها و بطور کلی حس‌گرهای مورد استفاده در تعیین موقعیت و وضعیت، هم اکنون با استفاده از فرایندهای ساخت میکروماشین کاری، قطعات میکروالکترومکانیکی گوناگونی مانند: حس‌گر فشار، حس‌گرهای اینرسی(شتاب سنج و ژیروسکوپ)، قطعات با کاربرد سیالاتی (فلومتر، نازل میکرونی و...) صفحات نمایش(Displays) و زیست تراشه ها (Biochips) و... تولید و به بازار عرضه میشوند. جدول (۳) پتانسیل های موجود تجاری و تنوع سامانه ها و قطعات میکرونی را نشان میدهد. همچنین در جدول (۴) سهم فروش قطعات MEMS تجاری در بازار جهانی ارائه شده است. برخی از کاربردهای تثبیت شده سامانه های میکروالکترومکانیکی عبارتند از:

جدول (۱)- مقایسه بین خواصل فیزیکی- مکانیکی سیلیسیم تک کریستالی با فولاد

خاصیت	سیلیسیم	فولاد
مدول یانگ (GPa)	۱۶۰-۱۹۰	۲۰۰
Yield Strength(Gpa)	۷	۴/۲
Poisron's Ratio	۰,۲۲	۰,۲۵
جرم حجمی (kg/m^3)	۲۳۰۰	۷۹۰۰

جدول (۲)- تاریخچه توسعه برخی از قطعات میکروالکترومکانیکی

	سال			
محصول	**کشف**	**ارزیابی**	**توسعه کاربردی**	**تولید تجاری صددرصد**
حس‌گرهای فشار	۱۹۵۴-۱۹۶۰	۱۹۶۰-۱۹۷۵	۱۹۷۵-۱۹۹۰	۱۹۹۰ و ادامه دارد
شتابسنجها	۱۹۷۴-۱۹۸۵	۱۹۸۵-۱۹۹۰	۱۹۹۰-۱۹۸	۱۹۹۸
حس‌گرهای گاز	۱۹۸۶-۱۹۹۴	۱۹۹۴-۱۹۹۸	۱۹۹۸-۲۰۰۵	۲۰۰۵
شیرها	۱۹۸۰-۱۹۸۸	۱۹۸۸-۱۹۹۶	۱۹۹۶-۲۰۰۲	۲۰۰۲
نازل ها	۱۹۷۲-۱۹۸۴	۱۹۸۴-۱۹۹۰	۱۹۹۰-۱۹۹۸	۱۹۹۸
صفحات نمایش و فتونیک	۱۹۸۰-۱۹۸۶	۱۹۸۶-۱۹۹۸	۱۹۹۸-۲۰۰۴	۲۰۰۴
ژیروسکوپها	۱۹۸۲-۱۹۹۰	۱۹۹۰-۱۹۹۶	۱۹۹۶-۲۰۰۲	۲۰۰۲
سوئیچهای RF	۱۹۹۴-۱۹۹۸	۱۹۹۸-۲۰۰۱	۲۰۰۱-۲۰۰۵	۲۰۰۵
رلههای میکرونی	۱۹۷۷-۱۹۸۲	۱۹۹۳-۱۹۹۸	۱۹۹۸-۲۰۰۶	۲۰۰۶
حس‌گرهای زیست شیمیایی	۱۹۸۰-۱۹۹۴	۱۹۹۴-۱۹۹۹	۱۹۹۹-۲۰۰۴	۲۰۰۴

حس‌گرهای فشار: کشف سامانه های میکروالکترومکانیکی که منجر به انقلاب دیگری در سیلیسیم گردید، تقریبا همزمان با ساخت اولین حس‌گر فشار میکروماشینی در سال ۱۹۶۱ میلادی بود. تولید حس‌گر فشار میکروماشینی سیلیسیمی یک بار مصرف با کاربرد پزشکی در سال ۱۹۸۲ منجر به کاهش قیمت تمام شده از ۶۰۰ دلار به ۱۰ دلار برای هر حس‌گر گردید. هم اکنون حس‌گرهای فشار هایبریدی (حس‌گر فشار و مدارات الکترونیکی مورد نیاز آن در دو تراشه مجزا تولید و در یک

بسته بندی قرار میگیرند) و مجتمع سازی شده (تراشه حس‌گر فشار و مدارات الکترونیکی مورد نیاز روی یک تراشه تولید میگردند) و معمولی (تراشه تکی حس‌گر فشار بسته بندی شده) به بازار عرضه می شوند.

حس‌گر فشار میکروماشینی از یک غشاء(Membrane) سیلیسمی تشکیل شده است. خواص مکانیکی بسیار عالی سیلیسیم، مدول الاستیکی بالا، جرم حجمی کم و قابلیت کوچک سازی در ساخت قطعات سیلیسیمی منجر به ساخت حس‌گرهایی با فرکانس تشدید خیلی بالا شده است. سازوکار تغییرات پیزو مقاومتی به واسطه ایجاد تنش در غشاء نازک (به ضخامت چند ده میکرون) به دلیل اعمال فشار و تغییر مکانی غشاء اولین سازوکاری بود که برای ساخت حس‌گر فشار سیلیسیمی بکار گرفته شد. از مزایای اصلی اندازه گیری فشار با کمک پیزو مقاومتها، سادگی فرآیند تولید آنها و خاصیت خطی عالی میان ولتاژ خروجی از حس‌گر و فشار اندازه گیری شده است. حساسیت به دمای پیزو مقاومتها از عیوب اصلی این روش محسوب می گردد. البته در این مورد با کمک مدارهای ویژه جبران سازی دما میتوان تا حدود زیادی این ضعف را جبران نمود. در شکل (۴) حس‌گر فشار سیلیسیمی میکروماشینی از نوع پیزو مقاومتی نمایش داده شده اند.

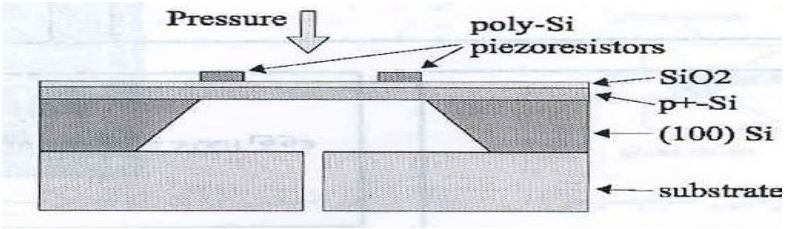
جدول (۳): پتانسیلهای موجود تجاری و تنوع سامانه ها و قطعات میکرونی

زمینه های فروش	سامانه ها و قطعات
Automotive industry	Pressure and fiow Sensors
Aerospace	Accelerometers and gyroscopes
Defence	Chemical sensors
Information Tecnology	Mass spectrometers
Telecommunications	Linear actuators
Biotechnology	Micromotors and Microturbines
Pharmaceutical industry	Fluid pumps and valves
Medicine	Fluid handling systems
Process tehnology and automation	Micro-chemical analysis systems(μTAS)
Chemical engineering	Scanning probe devices
Measurement and microscopy	Micro-Optical devices
Environmental technology	Micro-relays and switches

جدول (۴): سهم فروش قطعات MEMS در بازار جهانی

Product Types	1996 Units(Millions)	$ (Millions)	2002 Units (Millions)	$ (Millions)
HDD heads	۵۳۰	۴۵۰۰	۱۵۰۰	۱۲۰۰۰
Inkget print heads	۱۰۰	۴۴۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰۰
Heart Pacemakers	۰,۵	۱۰۰۰	۰,۸	۳۷۰۰
In vitro diagnostics	۷۰۰	۴۵۰	۴۰۰۰	۲۸۰۰
Hearing aids	۴	۱۱۵۰	۷	۲۰۰۰
Pressure sensors	۱۱۵	۶۰۰	۳۰۹	۱۳۰۰
Chemical sensors	۱۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۸۰۰
Infrared imagers	۰,۰۱	۲۲۰	۰,۴	۸۰۰
Accelerometers	۲۴	۲۴۰	۹۰	۴۳۰
Gyroscopes	۶	۱۵۰	۳۰	۳۶۰
Magnetoresistive Sensors	۱۵	۲۰	۶۰	۶۰
Microspectrometers	۰,۰۰۶	۳	۰,۱۵	۴۰
TOTAL	۱۵۹۵	۱۳,۰۳۳$	۶۸۰۷	۳۴,۲۹۰$

سازوکار دیگری که در تبدیل کمیت فیزیکی فشار به کمیت الکترونیکی استفاده نمی شود. سازوکار خازنی است. این مکانیسم بطور ذاتی نسبت به دما حساسیت کمتری دارد و مصرف انرژی الکتریکی در این روش کمتر می باشد. حساسیت حس‌گرهایی که از سازوکار خازنی استفاده می نماید. در مقایسه با انواع پیزو مقاومتی بیشتر است.



شکل (۴) : حس‌گر فشار

پیزو مقاومتی سیلیسیمی میکروماشینی(mm^3 ۳×۳×۱) ساخته شده با فناوری MEMS توده ای

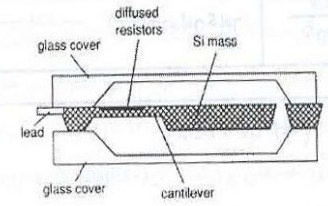
بالاترین دقت اندازه گیری فشار با استفاده از حس‌گرهای تشدیدی قابل حصول است. این حس‌گرها دارای سیگنال خروجی به فرم تغییرات در فرکانس تشدید المان در حال ارتعاش به واسطه تغییر فشار محیط اطراف حس‌گر هستند. عیوب اصلی این حس‌گرها پیچیدگی فرآیندهای ساخت آنها میباشد. هم اکنون حس‌گرهای فشار پیزومقاومتی، خازنی و تشدیدی با روشهای ساخت توده ای و سطحی تولید و در بازار عرضه شده اند.

شتاب سنج ها : اولین شتاب سنج سیلیسیمی(ADXL50) میکروماشینی ساخته شده با فناوری سطحی توسط شرکت Analog Device به بازار عرضه گردید. تحقیقات بیشتر برای کاهش هزینه های تمام شده و توسعه کاربرد این شتاب سنجها در سالهای ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۸ انجام شد و از سال ۱۹۹۸ به صورت صددرصد تجاری مورد استفاده قرار گرفته اند. ارزانی، کوچکی و قابلیت اطمینان در عملکرد شتاب سنجه ای سیلیسیمی موجب شده است تا بجز در کاربردهای بسیار دقیق ناوبری، این قطعات جایگزین انواع مشابه مکانیکی(و غیره) شوند. در سال ۲۰۰۲ در حدود ۹۰ میلیون شتاب سنج سیلیسیمی به بازار جهانی عرضه شد که ۴۳۰ میلیون دلار از فروش جهانی سامانه های میکروالکترونیکی (MEMS) را به خود اختصاص داد هم اکنون شتاب سنجه ای سیلیسیمی با فناوریهای ساخت مجتمع سازی تک تراشه ای، هایبریدی و سلول تکی به بازار عرضه میشوند در اتومبیل BMW740i بیش از ۷۰ قطعه MEMS برای مقاصد مختلف از جمله ناوبری استفاده شده است.

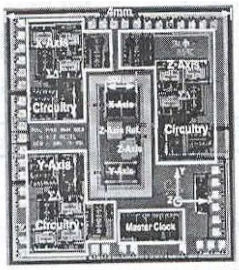
در شتاب سنجها برای رسیدن به نویز کمتر و حساسیت بیشتر باید از جرم معلق بزرگتری استفاده نمود که از طریق میکرو ماشین کاری توده ای، جرمی با ضخامت یک ویفر سیلیسیمی میتوان تهیه نمود. شکل (۵) برشی از مقطع جانبی یک شتاب سنج میکروماشینی توده ای پیزو مقاومتی را نشان می دهد. این شتاب سنج از یک ویفر سیلیسیمی مرکزی شامل جرم معلق و بازوی نگهدارنده مربوطه تشکیل شده است. برای محافظت از شتاب سنج، شوک گیری و لرزه گیری، ویفر مرکزی از دو طرف به دو لایه شیشه ای یا ویفر سیلیسیمی دیگر متصل است. پیزو مقاومتها در قسمت رویی بازوها قرار می گیرد. در این شتاب سنجها وقتی که موقعیت جرم معلق نسبت به قاب تغییر میکند، بازوی تعلیق خم شده و در نتیجه مقدار پیزو مقاومت به واسطه وجود تنش در بازو تغییر میکند.

شتاب سنج های خازنی دارای مزیت هایی از قبیل حساسیت بالاتر، پاسخ DC بهتر، جریان نشتی کمتر، حساسیت کمتر به دما و توان الکتریکی مصرفی پایین می باشند. علاوه بر این شتاب سنجهای خازنی برای اهداف Self-Testing بکار گرفته میشوند که در کاربردهای بحرانی مانند سامانه های ایمنی اتومبیل با اهمیت است. مهمترین ضعف شتاب سنجهای خازنی افزایش پیچیدگی مدارهای

الکترونیکی مورد نیاز برای اندازه گیری است. بعلاوه مدار میانی (Interface) می بایست در فاصله کمی از شتاب سنج قرار گیرد (حداکثر چند میلیمتر) تا از اثر خازنهای پارازیتی جلوگیری شود. همچنین در این شتاب سنجها برای جلوگیری از اثر میدانهای مغناطیسی خارجی نیاز به پوشش های مناسب (Shielding) می باشد.



شکل (٥): شتاب سنج پیزو مقاومتی سیلیسیمی
میکروماشینی ساخته شده با تکنولوژی توده ای



شکل (٦): شتاب سنج خازنی سیلیسیمی میکروماشینی
سه جهتی ساخته شده با تکنولوژی سطحی

امروزه با کمک میکروماشین کاری سطحی شتاب سنجهای خازنی به صورت تجاری ساخته میشوند. در این شتاب سنج با استفاده از تغییرات خازنی میان الکترودهای ثابت و متحرک به واسطه تغییر مکان جرم معلق و تغییر شکل المانهای فنری مقدار شتاب اعمال شده به سامانه در جهت افقی اندازه گیری می شود. البته برای اندازه گیری شتاب در راستای عمودی نیز می توان با ایجاد ساختار مکانیکی سطحی مناسب از شتاب سنجهای میکروماشینی سطحی نیز استفاده نمود. استفاده ازروش میکرو ماشین کاری سطحی موجب شده است تا بتوان یک واحد اندازه گیری اینرسی (شامل شتاب سنجها و ژیروسکوپهای هر سه جهت مختصاتی) را در ابعاد چند ده میلیمتری ساخت در شکل (۶) یک نمونه شتاب سنج سطحی با قابلیت اندازه گیری در سه جهت محورهای مختصاتی نمایش داده شده است.

برای کاربردهایی که به حساسیت بالا نیاز دارد باید از شتاب سنجهای تشدیدی (Resonant Accelerometer) به جای انواع خازنی و پیزو مقاومتی استفاده گردد. از این نوع شتاب سنجها در سامانه های ناوبری ثقلی (INS) تلفیقی(که در آنها بطور همزمان از سامانه های GPS استفاده میشود) برای تعیین مسیر حرکت یک ماشین (یا هر متحرک دیگر)، سامانه های ترمز ضد سر خوردن ABS، تعلیق فعال (Active Suspension) و دوربین های ویدئویی استفاده می شود. با کمک روشهای بسیار پیشرفته، قطعه نوسان کننده این شتاب سنجها درون خلا و در هنگام تولید تراشه به گونه ای عالی بسته بندی میشود تا از تلفات اصطکاک با محیط اطراف آن جلوگیری شود.

هد چاپگرهای جوهر افشان (Inkjet Print Head)

یکی از موارد استفاده از فناوری MEMS هد چاپگرهای جوهر افشان میباشد، بطوریکه حتی از لحاظ تجاری موفقیت بیشتری از حس‌گرهای فشار در کاربردهای پزشکی و حس‌گرهای مورد استفاده در صنایع خودروسازی داشته است. در چاپگرهای جوهر افشان با کمک آرایه ای از نازلها برای پاشیدن مستقیم قطرات جوهر بر روی کاغذ استفاده می گردد. با توجه به نوع چاپگر جوهر افشان قطرات جوهر با روشهای مانند تبخیر حرارتی جوهر و یا با استفاده از کریستالهای پیزوالکتریک از نازلها پرتاپ میگردند. در اختراع به ثبت رسیده توسط شرکت HP در سال ۱۹۷۹ از فناوری حرارتی MEMS برای انبساط حرارتی بخار جوهر استفاده گردید. درون هد این چاپگرها از مقاومت های آرایه ای بسیار کوچک به عنوان گرمکن الکتریکی استفاده شده است. این مقاومت ها که با کمک یک میکروپروسسور کنترل میشوند. می توانند با پالسهای الکتریکی در کمتر از ۳ میکرو ثانیه عمل نمایند. افزایش حرارتی ۱۰۰ میلیون درجه ای در ثانیه موجب تبخیر آنی جوهر عبوری از روی این گرمکن ها می شود. انبساط حرارتی حرارتی حباب شده سبب پرتاب مقداری جوهر بر روی کاغذ چاپ میشود. خلاء ایجاد شده به واسطه عبور حباب از نازل موجب انتقال جوهر از منبع تغذیه کارتریج به هد چاپگر می گردد. تمام این عملیات بدون دخالت اعضای مکانیکی انجام می شود.

از المانهای پیزوالکتریک نیز میتوان برای وارد کردن نیرو به جوهر داخل نازل و پرتاب آن بر روی کاغذ چاپ استفاده نمود. در این تجهیزات یک کریستال پیزو الکترویک در پشت واحد تغذیه جوهر هر نازل قرار گرفته است. با شارژ الکتریکی کریستال و ارتعاش آن به واسطه خاصیت پیزوالکتریکی، عملیات پرتاب جوهر از نازل و انتقال جوهر از واحد تغذیه به نازل به تناوب انجام میشود. در چاپگرهای شرکت EPSON از این فناوری MEMS استفاده میگردد. در چاپگرهای جوهر افشان امروزی ۶۰۰ نازل به صورت همزمان با تفکیک 1000dpi در عملیات چاپ شرکت می نمایند.

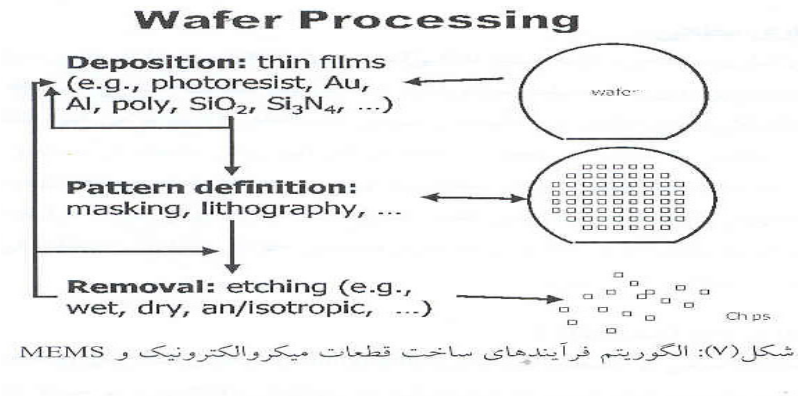
اورهدهای نمایش پرژکتوری(Overhead Projection Display)

یکی از قطعات MEMS مورد استفاده در کاربردهای نمایشی پرژکتوری، آینه های میکرونی دیجیتالی (DMD) میکروالکترومکانیکی هستند که اولین بار توسط شرکت Texas Instruments به بازار عرضه شده اند. این قطعات شامل آینه های میکرونی به ابعاد ۱۶در۱۶ میکرو با توانایی چرخش ۱۰ ± درجه در یک هزارم ثانیه می باشند. با فناوری میکرو الکترومکانیک آینه های با ابعاد ۱ میکرون نیز ساخته شده است. این فناوری گوی سبقت را از فناوری صفحات نمایش کریستالی مایع(LCD) ربوده است. زیرا علاوه بر بهبود وضوح تصاویر محدودیت ابعادی در مقایسه با LCD ها ندارند.

روشهای میکرو ماشین کاری

هر فرآیندی که منجر به نشست (Deposition) ماده بر بستر مناسب و حکاکی (Etching) آن با قابلیت اشکالی با حداقل تصویر قابل اندازه گیری در مقیاس میکرومتری باشد. میکرو ماشین کاری نامیده میشود. همه قطعات و سامانه هایی (جدای از مدارهای مجتمع و قطعات نیمه هادی سنتی و رایج) که در اندازه های نانومتری تا ابعاد سانتی متری به کمک روشهای میکروماشین کاری تولید میشوند. قطعات میکروالکترومکانیکی یا MEMS نامیده میشوند.

فرایندهای میکرو ماشین کاری جز در پاره ای موارد همان فرآیندهای رایج در ساخت قطعات الکترونیکی هستند. در شکل (۷) الگوریتم کلی ساخت این قطعات نمایش داده شده است. بطور کلی فرآیندهای میکروماشین کاری به روشهای اصلی توده ای(Bulk)، سطحی (Surface) و فرآیند LIGA انجام میشود.



شکل(۷): الگوریتم فرآیندهای ساخت قطعات میکروالکترونیک و MEMS

میکرو ماشین کاری توده ای

در میکرو ماشینکاری توده ای، بستر مورد استفاده جهت ایجاد قطعه میکرو الکترومکانیکی، سیلیسیم تک کریستالی است. از مهم ترین فرآیندهای مورد استفاده در میکرو ماشین کاری توده ای میتوان به فرآیندهای زیر اشاره نمود:

حکاکی مرطوب وابسته به جهت گیری (Anisotropic Wet Etching)سیلیسیم: در این فرآیند سیلیسیم تک کریستالی در محیط مرطوب توسط محلولی مناسب به صورتیکه توانایی حکاکی محلول در جهت های مختلف کریستالی متفاوت باشد، حکاکی میگردد. در این روش دیواره های مجازی حکاکی شونده با راستای افقی زاویه حاده می سازند. در شکل (۸۹) برداشتی ساده از میکرو ماشین کاری توده ای نمایش داده است.

حکاکی عمیق با کمک فعالیت یونی در محیط پلاسما (Reactive Ion Etching or RIE)

در این روش که در محیط خشک انجام میشود، طی برخورد یونهای فعال شده به سطح سیلیسیم الگوها و تصاویر عمیق مورد نیاز طی انجام پاره ای از واکنشهای شیمیایی در فاز گازی ایجاد میگردند. مزیت این روش بر روش مرطوب، قابلیت ایجاد دیوارهای عمودی مجازی حکاکی شده است.

اتصال (Bonding)

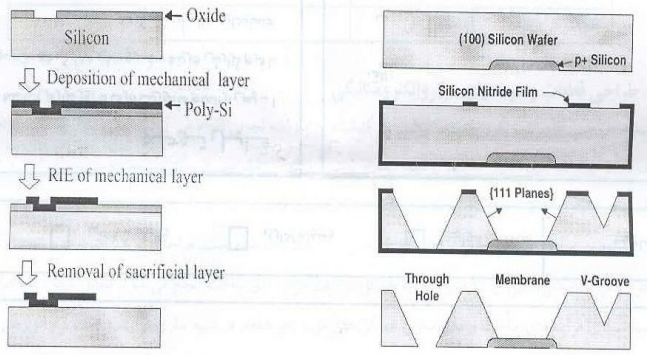
در میکرو ماشین کاری توده ای این امکان وجود دارد که ویفر سیلیسیمی قبل از بسته بندی نهایی به بستری سیلیسیمی یا شیشه ای از طریق انجام فرآیندهای ویژه پیوند داده شوند. از عمده روشهای اتصال میتوان به انجام عملیات حرارتی، اعمال فشار، استفاده از چسب های مخصوص پلیمری و اعمال ولتاژ که گاهی به صورت مشترک نیز آنها استفاده می شود، اشاره نموده از عمده مسائل مورد توجه در طی فرآیند اتصال میتوان به، تنش باقی مانده (Residual Stress) و کیفیت درزبندی (Sealing) اشاره نمود. از جمله مزیتهای میکرو ماشین کاری توده ای میتوان ارزانی فرآیندهای ساخت و استفاده از خواص مکانیکی عالی سیلیسیم تک کریستالی اشاره نمود. درحالیکه از معایب این روش میتوان به عدم تطبیق مناسب آن با فرآیندهای ساخت مدارهای مجتمع اشاره نمود. ضمن آنکه در میکرو ماشین کاری توده ای از هر دو طرف ویفر سیلیسیمی برای تولید قطعات استفاده میشود که این موضوع منجر به استفاده از یک یا چندین مرحله اضافی تولید (مانند فرآیند اتصال) نسبت به میکروماشین کاری سطحی می گردد.

میکرو ماشین کاری سطحی

در میکرو ماشین کاری سطحی، لایه های نازکی (در حدود میکرو متری) از جنس سیلیسیم پلی کریستال، نترید سیلیسیم و اکسید سیلیسیم بر روی بستر سیلیسیمی (و یا نترید سیلیسیم) نشست داده میشود که از آنها به منظورهای ایجاد ساختارهای مورد نیازمکانیکی، عایق سازی و یا نگهداری موقتی آن ساختارها استفاده میشود. شکل (۹) نمایی بسیار ساده از روش میکروماشین کاری سطحی را نمایش میدهد. از جمله مزایای این روش، انجام فرآیندهای ساخت بر روی یک طرف ویفر سیلیسیمی، نازکی لایه های ایجاد شده بر روی سطح ویفر و در نتیجه قابلیت خوب انطباق فرآیندهای میکروماشین کاری سطحی با فرآیندهای مجتمع سازی الکترونیکی میباشد. ضمن آنکه در این روش نیاز به فرآیند اتصال نمی باشد. از معایب این روش میتوان به هزینه بالای آن در مقادیر تولید کم و همچنین خواص مکانیکی ضعیف تر لایه های نشست داده شده در مقایسه با سیلیسیم تک کریستالی اشاره نمود.

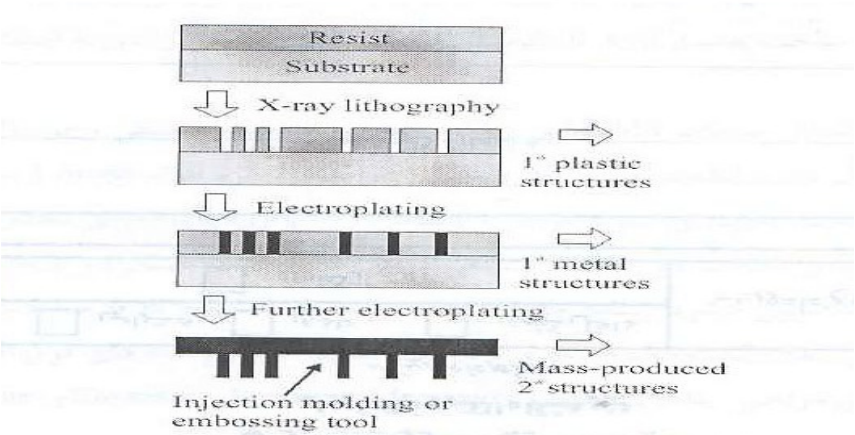
میکرو ماشین کاری با فرآیند LIGA

واژه LIGA از معادل اسامی فرآیندهای لیتوگرافی (Lithography)، آبکاری الکتریکی (Electroplating) و برجسته کاری (Molding) در زبان آلمانی درست شده است. در این فرایند از لیتوگرافی، آبکاری و برجسته کاری برای تولید ساختارهای مکانیکی استفاده میشود. در فرآیند ماشین کاری LIGA امکان خلق بسیار عالی و دقیق ساختارهایی تا ضخامت ۱۰۰۰ میکرون وجود دارد. در این فرآیند از تابش اشعه X با طول موج کمتر از ۷°A و انرژی ۱Gev برای تولید الگوها و تصاویر بر روی فتورزیست(که یک بستر هادی را پوشانده است) استفاده میگردد که گاهی زمان تابش تا ساعتها به طول می انجامد. در شکل (۱۰) مراحل انجام فرآیند LIGA نمایش داده شده است. پس از ظهور فتورزیست، تشکیل و تثبیت تصاویر روی آن به کمک فرآیند آبکاری الکتریکی ساختارهای میکرونی فلزی بر روی فتورزیست تشکیل میگردد. رهاسازی ساختار فلزی ایجاد شده (نیکل یکی از رایج ترین فلزات مورد استفاده در این روش است. به عنوان مثال یکی از انواع ژیرسکوپهای میکروماشینی تشدیدی به کمک فرآیند LIGA و با فلز نیکل ساخته شده است) با استفاده از زدایش فتورزیست در یک حلال مناسب انجام می گیرد. از این ساختار میتوان به عنوان قطعه مکانیکی مورد نظر، قالبی برای برجسته کاری و یا تزریق پلاستیک استفاده نمود. از آنجایی که انجام لیتوگرافیکی با اشعه X بسیار گران است در مواقعی که ضخامت ساختار مورد نیاز کم بوده و حداقل اندازه تصاویر مورد نیاز کوچک نباشد (تفکیک های بزرگتر از ۷ میکرون) از روشهای رایج نوردهی با کمک نور UV، روشهای پرتو الکترونی ولتاژ بالا و لیزری برای ایجاد تصاویر بر روی فتورزیست یا بستر مورد نظر بهره گیری میشود. در جدول (۴) روشهای مختلف میکروماشین کاری با یکدیگر مقایسه شده اند.



شکل(۹): میکروماشین کاری سطحی سیلیسیم پلی کریستالی تک لایه ای

شکل(۸): میکروماشین کاری توده ای سیلیسیم تک کریستالی



شکل(۱۰): میکروماشین کاری با فرآیند LIGA

جدول (۴): مقایسه فرآیندهای میکرو ماشین کاری با یکدیگر

توانایی	میکرو ماشین کاری توده ای (Bulk)	میکرو ماشین کاری توده ای (Bulk)	میکرو ماشین کاری به روش LIGA
حداکثر ضخامت ساختار	ضخامت ویفر	ضخامت ویفر	۵۰۰ میکرون
هندسه سطحی مورد نیاز	مربعی	مربعی	نامحدود
حداقل اندازه تصویر سطحی	۱/۴۱۴* عمق حکاکی	۱/۴۱۴* عمق حکاکی	۳ میکرون
زاویه دیوارههای حکاکی	۵۴/۷۴ درجه	۵۴/۷۴ درجه	۰/۲ میکرون تا ضخامت ۴۰۰ میکرونی
کیفیت تصاویر و گوشهها	عالی	عالی	خوب
خواص مواد	عالی	عالی	خوب
قابلیت مجتمع سازی	متوسط	متوسط	بسیار سخت
میزان سرمایه گذاری و هزینه	کم	کم	زیاد
سطح دانش فنی موجود	عالی	عالی	متوسط

طراحی قطعات و سامانه های میکروالکترومکانیکی

طراحی قطعات میکروالکترومکانیکی در گذشته به صورت تجربی انجام می گرفت. یعنی ابتدا جانمایی (Layout) و نمودار فرایند ساخت (Process Flow) قطعه تهیه و سپس ساخته می شد. پس از ساخت، آزمایش و بررسی خواص و عملکرد قطعه، مجددا جانمایی و مراحل ساخته بهینه تهیه شده و عملیات متناوب ساخت تا حصول نتیجه مطلوب انجام می گرفت. طریقه تجربی مراحل طراحی قطعات MEMS در شکل (۱۱) نشان داده شده است مراحلی که هم اکنون در ساخت یک قطعه میکروالکترومکانیکی، قبل از تولید و برای به حداقل رساندن هزینه های ساخت انجام میشود، مطابق شکل (۱۲) عبارتند از: شبیه سازی فرآیندهای ساخت مانند نفوذ ناخالصی، اکسیداسیون، عملیات نشست لایه های نازک، حکاکی مرطوب و خشک و ... را شبیه سازی کامپیوتری می نمایند. به عنوان مثال با کمک نرم افزارهای حکاکی وابسته به جهت گیری سیلیسیم میتوان طرح ماسک، کیفیت و کمیت حکاکی در محیط مرطوب یا خشک را بررسی نموده و شرایط بهینه طراحی ماسک را برای فرآیند واقعی قبل از ساخت بدست آورد. لذا کیفیت جانمایی نهایی بستگی زیادی به استفاده از این نرم افزارهای شبیه سازی دارد.

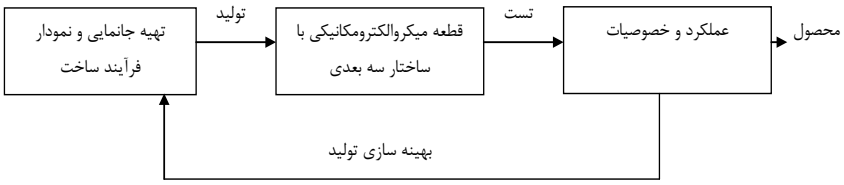
برای آنالیز ساختار مکانیکی قطعات MEMS و عملکرد آنها نرم افزارهای مختلفی وجود ندارد که قابلیت اتصال به نرم افزارهای ویژه طراحی و مدلسازی قطعات میکرو الکترونیک را دارا هستند. نرم افزار Ansys از مهمترین آنها میباشد که در آن امکان آنالیزهای مکانیکی (مانند تحلیلهای تنش، حرارتی، ارتعاشی و...) با روشهای اجزای محدود (FEM) نیز وجود دارد.

تعیین ابعاد بهینه برای این قطعات قبل از آنکه اشتباهی در طراحی، کیفیت عملکرد و یا طرح ماسک فوتولیتوگرافی بروز نماید با کمک این نرم افزارها تعیین میشود. نسخه جدید Ansys قابلیتی دارد که طرح جانمایی را به صورت فایلهایی با پسوند مشخص به نرم افزارهای الکترونیک ارسال و یا دریافت نماید. البته نرم افزارهای فوق العاده تخصصی برای طراحی سامانه ی، آنالیز مکانیکی و طراحی جانمایی مانند Intellisute, Coventor, Memscap(Memspro) در طراحی و تولید قطعات تجاری مورد استفاده قرار می گیرند. هم اکنون طراحی، مدلسازی، شبیه سازی، آنالیز ساختاری و سامانه ی،تولید و آزمایش قطعات MEMS با استفاده از الگوریتم ارائه شده در شکل (۱۳)انجام می شود.

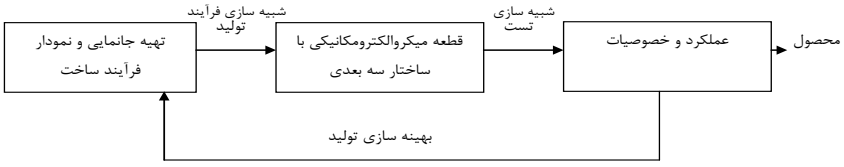
روند توسعه سامانه های میکرو الکترومکانیکی در آمریکا

در سال ۲۰۰۱ به ازاء هر آمریکایی ۱/۶ قطعه MEMS در آمریکا تولید شد که پیش بینی میشود این مقدار در سال ۲۰۰۴ به ۵ قطعه برای هر نفر برسد. این روند رشد متوسطی در حدود ۴۵ درصد

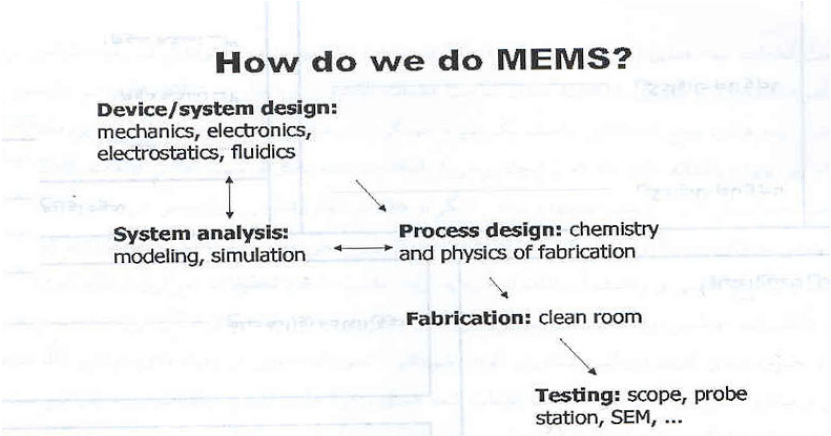
را نشان میدهد. بیش از ۷۰ درصد شرکتهای MEMS در آمریکا در فاصله سالهای ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۱ میلادی بوجود آمده اند. بطوریکه در سه ساله قبل از سال ۲۰۰۱ هر ساله ۱۰ کمپانی جدید به لیست تولید کنندگان MEMS افزوده شد. میزان اشتغال در این صنایع طی سال ۲۰۰۱ میلادی ۳۰ برابر سال ۱۹۸۵ بوده است. بیشتر کمپانی های MEMS در آمریکا بخش تولید قطعات سامانه های ارتباطاتی و حس‌گرها فعالیت می کنند.



شکل (۱۱): نمودار ساخت تجربی قطعات میکروالکترومکانیکی



شکل (۱۲): نمودار مدل سازی و شبیه سازی قطعات میکرو مکانیکی



شکل(۱۳): الگوریتم کلی طراحی، مدل سازی، شبیه سازی، آنالیز، ساخت و تست قطعات MEMS

جنگ ارتش آمریکا در تصرف عراق در مراحل آغازین انقلاب فناوری کوچک سازی قرار داشت. فقط انواع کمکی از سامانه های MEMS در جنگ افزارهایی که برای سرنگونی رژیم صدام حسین بکار گرفته شد، استفاده گردید. بی گمان نقش فناوری MEMS در جنگهای آینده بیشترخواهد بود بطوریکه یک دوجین از آنها در سخت افزارهای نظامی در اولویت اول استفاده خواهند شد. در هواپیمای شناسایی و نظارت بدون سرنشین UAV و در برخی از جنگنده های نیروی هوایی آمریکا از شتاب سنج میکروماشینی شرکت Crossbow برای مقاصد ناوبری و همچنین کمک به خلبان جنگنده ها در هنگام عملیات در هوای طوفانی استفاده شد.

بحث و نتیجه گیری

در حال حاضر با استفاده از روشهای میکروماشین کاری قطعات میکرو الکترومکانیکی با کاربردهای مختلف به بازار عرضه میشوند که عمده مزیت آنها بر قطعات مکانیکی قدیمی عبارتند از: ارزانی، کوچکی و قابلیت اطمینان در عملکرد آنها همان طوری که مقدار فروش قطعات میکروالکترومکانیکی در فاصله سالهای ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۲ تقریباً ۲/۵ برابر شده است. پیش بینی می شود بجز در کاربردهای بسیار دقیق که هنوز از برخی روشهای سنتی استفاده می شود (مانند استفاده از روشهای مکانیکی اندازه گیری شتاب در سطوح ناوبری بسیار دقیق) این قطعات بسرعت جایگزینی قطعات قدیمی شده و ابداعات در این زمینه همچنان ادامه یابد. کشورهایی که در رده های تجاری و تحقیقاتی فعالیتهای مستمری در فناوری MEMS دارند، عبارتنداز: آمریکا، ژاپن، آلمان، انگلستان، فرانسه، سوئد، سوئیس، هلند و کره جنوبی، از فعالیتهای روسیه اطلاعاتی در دست نیست.

سرمایه گذاری تجاری برای دستیابی به فناوری پیشرفته MEMS در ایران اقتصادی و موفق نمی باشد. زیرا این فناوری پیشرفته گران بوده و قادر به ایجاد فرصت شغلی زیادی نیست. مدیران و افراد کارآزموده و ماهر به تعداد کافی در داخل کشور وجود ندارد به دلیل محدود بودن بازار داخلی، می بایست فکر صادرات محصول به بازار بین المللی نیز بود. بنابراین نگرشی تجاری به فناوری میکرو الکترومکانیک در ایران مردود بوده و باید به صورت تحقیقاتی و توسعه ای به این فناوری نگریست.

هم اکنون جز برخی تحقیقات دانشگاهی و صنعتی تقریبا هیچ فعالیتی در رابطه با کسب دانش فنی طراحی و ساخت این فناوری در کشور انجام نشده است. طی سالیان گذشته سرمایه گذاری هایی برای بخش نیمه هادی در کشور شده است که شرکت صنایع قطعات الکترونیک ایران (در صاایران) یکی از آنهاست. این شرکت علاوه بر توانایی در زمینه طراحی تراشه های با کاربرد خاص (ASIC) و با فناوری CMOS ، امکان ساخت قطعات الکترونیک با فناوری Biopolar را نیز داراست. در این شرکت طرح تحقیقاتی ساخت یک نمونه حس‌گر فشار میکروماشینی توده ای از نوع پیزو مقاومت

انجام شد. نتایج انجام این پروژه یکساله نشان داد که با ایجاد برخی از امکانات بسته بندی و آزمایش خاص قطعات MEMS، این صنعت قادر به ساخت حس‌گرهای فشار، شتاب سنجها و برخی دیگر از قطعات میکروماشینی سیلیسیمی می باشد.

دستیابی به فناوری میکروالکترومکانیک نیاز به یک همکاری جمعی میان دانشگاهیان و صنعتگران کشور دارد. وجود یک مدیریت صحیح علمی و واحد، استفاده از سرمایه اولیه مناسب، انجام تحقیقات تمرکزی و بکارگیری صاحب نظران الکترونیک، مکانیک، مهندسی مواد ، مهندسی شیمی، فیزیک و شیمی و برخی رشته های دیگر می تواند منجر به ورود کشور به برخی از حوزه های کاربردی این فناوری گردد. هم اکنون تجربیات خوبی در زمینه های طراحی IC، ساخت قطعات الکترونیکی و میکروالکترومکانیکی در وجود دارد. تکمیل امکانات مورد نیاز از انجام کارهای موازی دیگر جلوگیری می‌کند و شرایط دستیابی به این فناوری را آسان می نماید.

مراجع

1-S.M.Sze, Semiconductor Sensors, john Wiley and Sons,1994

2-M.Elwenspoek and R. Wiegerink, Mechanical Microsensors, Springer.2001

3-J.W.Judy, Microelectromechanical Systems(MEMS): Fabrication,Design & Appllications, Smart Materials and Structures, 10(2001), pp.1115-1134

4-W.P.Eaton and others, Comparison of Bulk and Surface Micromachnial pressure Sensors, Micromechanical devices and components, procspie,vol35,p.431

5-Liwei Lin, Curriculum Development in Microelectromechanical system in Mechanical Engineering, IEEE Transactions on Education, Vol. 44, No. 1, Feb.2001

6-An Introduction to MEMS, prime faraday partnership,http://www. Primetechnology watch. Org.uk

7-S. Middelhoek, T. Fukuda and W.Menz, Handbook of Sensors and Actuators, Vol.6,Elsevier, 1998

8-H. Baltes, W. Gopel, J. Hesse, Sensors Update, Vol.4,Wiley-VCH, 1998

9-P. Rai-Choudhury, Handbook of: Microlithography, Micromachining and Microfabrication, Vol.2.1997

10-N. Yazdi, F. Ayazi, k. Najafi, Micromachined Inertial Sensors, Proceedings of the IEEE, Vol.86,No.8,August 1998

11-J.M. Bustillo, R.T. Howe and R.S. Muller, Surface Micromachining for Microelectromechanical Systems, IEEE, Vol.86,No 8, August 1998

12-G.T.A. Koacs N.I. Maluf and K.F. Petersen, Bulk Micromachining of Silicon, Vol.86,No.8, August 1998