بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دانشکده مهندسی معدن و متالورژی

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مواد گرایش استخراج فلزات

تأثیر نانو لایه های بازدارنده در ساختار لایه های نازک تیتانات زیرکونات سرب (PZT)

نگارش:

علی کوچک زاده

اساتید راهنما:

دکتر اسکندر کشاورز علمداری

دکتر عبدالغفار برزگر

اساتید مشاور:

دکتر پیروز مرعشی

دکتر قادر رضازاده

بهمن ماه ۱۳۸۷

بسمه تعالی

تاریخ:
شماره:

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی‌تکنیک تهران)

فرم اطلاعات پایان‌نامه
کارشناسی- ارشد و دکترا

معاونت پژوهشی
فرم پروژه تحصیلات تکمیلی ۷

مشخصات دانشجو:

نام و نام خانوادگی: علی کوچک زاده | دانشجوی آزاد ● | بورسیه ○ | معادل ○

شماره دانشجوئی: ۸۵۱۲۷۰۶۹ | دانشکده: معدن و متالورژی | رشته تحصیلی: مهندسی مواد | گروه: استخراج فلزات

مشخصات استاد راهنما:

نام و نام خانوادگی: اسکندر کشاورز علمداری | درجه و رتبه: دانشیار

نام و نام خانوادگی: عبدالغفار برزگر | درجه و رتبه: استادیار

مشخصات استاد مشاور:

نام و نام خانوادگی: قادر رضازاده | درجه و رتبه: دانشیار

نام و نام خانوادگی: پیروز مرعشی | درجه و رتبه: استادیار

عنوان پایان‌نامه به فارسی :

تاثیر نانو لایه های بازدارنده در ساختار لایه های نازک تیتانو زیرکونات سرب (PZT)

عنوان پایان‌نامه به انگلیسی:The effect of nano barrier layers on structure of lead titanate zirconate (PZT)

نوع پروژه: کارشناسی ○ | ارشد ● | دکترا ○ | سال تحصیلی: ۸۸- ۸۷

کاربردی ● | بنیادی ○ | توسعه‌ای ● | نظری ○

تاریخ شروع : ۸۷/۴/۱ | تاریخ خاتمه : ۸۷/۱۱/۳۰ | تعداد واحد : ۶ | سازمان تأمین کننده اعتبار : پژوهشگاه مواد وانرژی

واژه‌های کلیدی به فارسی: PZT –MEMS- عملیات حرارتی آنیل

واژه‌های کلیدی به انگلیسی : Annealing heat treatment-PZT –MEMS

مشخصات ظاهری	تعداد صفحات ۱۰۹	تصویر ● جدول ● نمودار ● نقشه ○ واژه‌نامه ○		تعداد مراجع ۳۵	تعداد صفحات ضمائم ۷
زبان متن	فارسی ●	انگلیسی ○	چکیده	فارسی ●	انگلیسی ●
یادداشت					

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه

استاد:

دانشجو:

امضاء استاد راهنما: **تاریخ:**

۱ : ارائه به معاونت پژوهشی به همراه یک نسخه الکترونیکی از پایان‌نامه و فرم اطلاعات پایان‌نامه بصورت PDF همراه چاپ چکیده (فارسی انگلیسی) و فرم اطلاعات پایان‌نامه

۲ : ارائه به کتابخانه دانشکده (شامل دو جلد پایان نامه به همراه نسخه الکترونیکی فرم در لوح فشرده طبق نمونه اعلام شده در صفحه خانگی کتابخانه مرکزی) مرکزی)

چکیده

امروزه با کمک فناوری ساخت لایه های نازک، به صورت گسترده از سرامیک های پیزوالکتریک در ساخت سیستم های میکروالکترومکانیک (MEMS) استفاده می شود. در پروژه حاضر سرامیک پیزوالکتریک تیتانات زیرکونات سرب (PZT) با فرمول $Pb(Zr_x,Ti_{1-x})O_3$ به صورت لایه با ضخامت یک میکرون بر روی زمینه سیلیکون پوشش دهی شده با تیتانیوم و پلاتین (Si/Ti/Pt) و به روش کندوپاش مغناطیسی RF راسب می شود. از لایه نازک پلاتین به عنوان الکترود بر روی زمینه سیلیکون استفاده می شود.کاربرد لایه نازک تیتانیوم به عنوان عامل چسبنده بین لایه پلاتین و زیرلایه سیلیکون می باشد. انجام دو مرحله عملیات حرارتی آنیل بر روی مجموعه چند لایه ای سیلیکون برای رشد لایه پلاتین در جهت (۱۱۱) و ایجاد ساختار کریستالی پروفسکیت در لایه PZT ضروری است. اما در عین حال انجام عملیات آنیل، منجر به کریستالیزاسیون مجدد پلاتین و نیز ایجاد حفرات ریز بر روی این لایه می شود که متعاقب آن تخریب در لایه های نازک پلاتین و PZT و کاهش خواص الکتریکی PZT را در پی خواهد داشت. در این تحقیق اثر عوامل مختلف دما و زمان دو مرحله آنیل ونیز اثر ضخامت الکترود Ti/Pt بر ساختار و خواصPZT مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که انجام عملیات های پیش آنیل و آنیل نهایی به ترتیب در دمای ۶۵۰°c و زمان ۳۰ دقیقه و دمای ۷۰۰°c و زمان ۱۵ دقیقه بر روی نمونه های با ضخامت های لایه تیتانیوم ۱۰-۵ nm و لایه پلاتین ۱۵۰ nm بهترین نتایج را در حصول ساختار کریستالی و سطح مطلوب لایه PZT بدست می دهد.

واژه های کلیدی: MEMS – PZT – عملیات حرارتی آنیل

فهرست مطالب

فصل۱ ۱

پیش گفتار ۱

فصل۲MEMS/NEMS کاربردها، مواد و فرآیند تولید ۴

۲-۱. معرفی سیستم های میکرو/نانو الکترومکانیک ۵

۲-۱-۲. مزایای سیستم های میکرو/نانوالکترومکانیک..... ۷

۲-۱-۳. تاریخچه ایجاد سیستم های میکرو/نانو الکترومکانیک..... ۸

۲-۱-۴. رشد اقتصادی فرایند میکرو/نانو الکترومکانیک..... ۱۱

۲-۱-۵. چالش های کنونی فناوری سیستم های میکرو/نانو الکترومکانیک ۱۳

.2-2 خصوصیت ها و ویژگی های مواد مصرفی در ساخت MEMS/NEMS ۱۴

۲-۲-۱. ویفر سیلیکون ۱۴

۲-۲-۲. مواد پیزوالکتریک..... ۱۵

۲-۲-۲-۱. معرفی خاصیت پیزوالکتریسیته..... ۱۵

۲-۲-۲-۲. تاریخچه پیزوالکتریسیته..... ۱۶

۲-۲-۲-۳. تقسیم بندی پیزوالکتریک کریستال ها ۱۷

۲-۲-۲-۴. خواص فروالکتریک مواد پیزوالکتریک..... ۱۹

۲-۲-۲-۵. خواص پیزوالکتریک مواد فروالکتریک..... ۲۳

۲-۲-۲-۶. مواد دارای خاصیت پیزوالکتریک..... ۲۵

۲-۳. فرایندهای ساخت وتولید سیستم های میکرو/نانو الکترومکانیک ۳۵

۲-۳-۱. میکروماشینکاری سطحی ۳۵

۲-۳-۱-۱. فرایند لایه نشانی..... ۳۵

۲-۳-۱-۲. لایه نشانی PZT به روش فیزیکی کندوپاش..... ۳۶

۲-۳-۱-۳. فرایند لیتوگرافی ۴۵

۲-۳-۱-۴. مرحله اچ کردن ۴۶

۲-۳-۲. تکنیک های میکروماشین کاری تجاری..... ۴۸

۲-۳-۲-۱. روش MUMPs..... ۴۸

۲-۳-۲-۲. روش LIGA..... ۴۹

۲-۳-۳. میکروماشین کاری حجمی ۵۰

فصل۳ مواد و روش ها ۵۱

فصل۴ ۶۳

نتایج و بحث ۶۳
۴-۱. تاثیر شرایط عملیات پیش آنیل بر روی خواص الکترود پلاتین و لایه PZT.....۶۴
۴-۲. تاثیر شرایط آنیل نهایی بر خواص کریستالوگرافی و مورفولوژی و توپوگرافی سطح PZT.....۷۰
۴-۲-۱. اثر دمای آنیل نهایی بر ساختار وخواص لایه PZT در زمان ماند ۳۰ دقیقه.....۷۱
۴-۲-۲. اثر زمان ماند آنیل نهایی بر ساختار و خواص لایه PZT در دمای $700^{\circ}c$.....۷۷
۴-۳. اثر ضخامت الکترود پایینی پلاتین بر ساختار وخواص لایه PZT.....۸۳
۴-۳-۱. اثر ضخامت لایه پلاتین.....۸۳
۴-۳-۲. اثر ضخامت لایه چسبنده تیتانیوم.....۸۹

فصل۵ نتیجه گیری و پیشنهادها ۹۸

پیوست ۱۰۳

فهرست اشکال

فصل۱ مقدمه **Error! Bookmark not defined.**

فصل۲MEMS/NEMS کاربردها، مواد و فرآیند تولید ۴

شکل۲-۱. مقایسه بازار تجاری حسگرها و عملگرها ۷

شکل۲-۲. کاربردهای مختلف MEMS/NEMS ۱۱

شکل۲-۳. گسترش جغرافیائی MEMS/NEMS ۱۳

شکل۲-٤. جایگاه مواد پیزوالکتریک در ۳۲ گروه کریستالی ۱۸

شکل۲-۵. ارتباط مواد پیزوالکتریک، پیروالکتریک و فروالکتریک با یکدیگر ۱۸

شکل۲-٦. ساختار پروفسکیت ABO_3 که برای $PbTio_3$ ۲۰

شکل۲-۷. تعیین حوزه های فروالکتریک ۲۱

شکل۲-۸. یک فروالکتریک پلی کریستالی با جهت گیری اتفاقی دانه ها ۲۳

شکل۲-۹. کریستال پیزوالکتریک PZT قبل وبعد از پلاریزه شدن ۲۵

شکل۲-۱۰. دیاگرام فازی محلول جامد $Pb(Zr,Ti)o_3$ که مرز فازی مورفوتروپیک ۳۰

شکل۲-۱۱. ضرایب پیزوالکتریک سرامیک های $Pb(Zr,Ti)o_3$ بر حسب تابعی از ترکیب در نزدیکی MBP ۳۱

شکل۲-۱۲. ساختار شیمیائی IPMC با پایه نفیون ۳۴

شکل۲-۱۳. سیستم اسپاترینگ مغناطیسی فرکانس رادیوئی ۳۷

شکل۲-۱٤. نمودار جریان بر حسب فشار گاز در اسپاترینگ DC ۴۰

شکل۲-۱۵. اسپاترینگ سه قطبی DC ۴۰

شکل۲-۱٦. شماتیک پروسه لیتوگرافی ۴۶

شکل۲-۱۷. سوراخ های اچ کردن ۴۷

شکل۲-۱۸. مراحل مختلف میکروماشین کاری سطحی ۴۸

فصل۳ نحوه انجام آزمایشات ۵۱

شکل۳-۱. آنالیز فازی XRD بر روی ویفر سیلیکون خالص با جهت مرجح (۱۰۰) ۵۳

شکل۳-۲. نمای شماتیک لایه های نشانده شده بر روی ویفر سیلیکون ۵۴

شکل۳-۳. چگونگی موقعیت ضخامت سنج نسبت به زیرلایه ۵۸

شکل۳-٤. اثر فاصله بر نرخ لایه نشانی PZT ۵۹

شکل۳-۵. زمان شروع و پایان عملیات لایه نشانی اسپاترینگ ۶۰

فصل۴ تحلیل نتایج ۶۳

شکل٤-۱. تصاویر SEM الکترود پلاتین ۶۵

شکل٤-۲. تصاویر دو بعدی AFM سطح پلاتین ۶۷

شکل٤-۳. تصاویر میکروسکپ الکترونی SEM لایه PZT پس از عملیات آنیل نهایی ۶۸

شکل٤-٤. تصاویر دو بعدی AFM سطح PZT به همراه تعیین رافنس سطح ۷۰

شکل٤-۵. تصاویر SEM از مورفولوژی سطح PZT در شرایط متفاوت دماهای آنیل نهایی ۷۱

شکل٤-٦. طیف XRD نمونه های PZT آنیل شده در دماهای متفاوت ۷۳

شکل٤-۷. کارت JCPDS مربوط به سرامیک PZT به همراه شدت پیکهای مربوط به هر صفحه ۷۵

شکل٤-۸. نمودار درجه جهت گیری D_n بر حسب دمای آنیل PZT ۷۵

شکل٤-٩. توپوگرافی سطح PZT با استفاده از آنالیز AFM در دماهای آنیل ۷۷
شکل٤-١٠. تصاویر میکروسکپ الکترونی SEM از سطح PZT آنیل شده ۷۸
شکل٤-١١. طیف XRD لایه PZT آنیل شده در دمای 700^{oc} و زمان های ماند متفاوت ۷۹
شکل٤-١٢. نمودار درجه جهت گیری D_n بر حسب زمان آنیل PZT برای هر یک از صفحات (۱۰۰)، (۱۱۰)، (۱۱۱)، (۲۰۰) و (۲۱۱) ۸۰
شکل٤-١٣. تصاویر AFM سطح PZT آنیل شده در دمای 700^{oc} ۸۱
شکل٤-١٤. تصاویر میکروسکپ الکترونی SEM لایه پلاتین با ضخامت های مختلف ۸۴
شکل٤-١٥. شکل(۴-۱۵): تصاویر SEM مورفولوژی سطح PZT راسب شده بر روی پلاتین ۸۵
شکل٤-١٦. طیف XRD لایه PZT راسب شده بر روی ضخامت های مختلف لایه پلاتین ۸۶
شکل٤-١٧. نمودار درجه جهت گیری D_n بر حسب ضخامت لایه پلاتین ۸۷
شکل٤-١٨. تصاویر AFM سطح PZT راسب شده بر روی لایه پلاتین با ضخامت های مختلف ۸۸
شکل٤-١٩. تصاویر میکروسکپ الکترونی SEM لایه پلاتین راسب شده بر روی ضخامت های مختلف ۹۱
شکل٤-٢٠. تصاویر SEM مورفولوژی سطح PZT راسب شده بر روی پلاتین با ضخامتهای مختلف تیتانیوم ۹۳
شکل٤-٢١. طیف XRD لایه PZT راسب شده بر روی لایه پلاتین با ضخامت های مختلف لایه تیتانیوم ۹۴
شکل٤-٢٢. نمودار درجه جهت گیری D_n بر حسب ضخامت لایه تیتانیوم ۹۵
شکل٤-٢٣. تصاویر AFM سطح PZT راسب شده بر روی لایه پلاتین با ضخامت های مختلف تیتانیوم ۹۶

فصل۵ نتیجه گیری و پیشنهادها **۹۸**

پیوست **۱۰۳**

شکل(۱): جهت پلاریزاسون عمود بر صفحات الکترود در المان پیزوالکتریک ۱۰۴
شکل(۲): جهت پلاریزاسون موازی با صفحات الکترود در المان پیزوالکتریک ۱۰۵
شکل(۳): تنش های موجود روی المان پیزوالکتریک ۱۰۶
شکل(۴): المان پیزوالکتریک با ثابت d_{33} ۱۰۷
شکل(۵): المان پیزوالکتریک با ثابت d_{31} ۱۰۷

فهرست جداول

فصل۱ مقدمه **Error! Bookmark not defined.**

فصل۲MEMS/NEMS کاربردها، مواد و فرآیند تولید **۴**

جدول۲-۱. رشد اقتصادی تکنولوژی های مختلف MEMS/NEMS ۱۲

جدول۲-۲. مقایسه پارامترهای پیزوالکتریک مواد ورتزیت AlN وZnO و ماده پروفسکیت PZT ۲۷

جدول۲-۳. خواص برخی مواد پیزوالکتریک ۳۳

جدول۲-٤. ضخامت لایه های MUMPs ۴۹

فصل۳ نحوه انجام آزمایشات **۵۱**

جدول۳-۱. شرایط لایه نشانی تیتانیوم به روش تبخیر حرارتی ۵۶

جدول۳-۲. شرایط لایه نشانی پلاتین به روش الکترون بیم ۵۶

جدول۳-۳. شرایط لایه نشانی PZT به روش اسپاترینگ مغناطیسی RF ۵۷

فصل۴ تحلیل نتایج **۶۳**

جدول٤-۱. مشخصات سطح PZT آنیل شده در زمان های متفاوت با استفاده از تصاویر AFM شکل۴- ۱۳ ..... ۸۲

جدول٤-۲. مشخصات سطح PZT راسب شده بر روی لایه های پلاتین با ضخامت مختلف ۸۹

جدول٤-۳. مشخصات سطحPZT راسب شده بر روی لایه پلاتین با ضخامت های تیتانیوم مختلف ۹۷

فصل۵ نتیجه گیری و پیشنهادها **۹۸**

پیوست **۱۰۳**

فصل۱

پیش گفتار

فناوری تولید میکروپروسسور و IC ، سبب ایجاد زمینه ای جدید در ساخت ماشین آلات و قطعات میکرو/نانوالکترومکانیکی شده است.

با آنکه در ساختار MEMS/NEMS هم چنان قوانین فیزیک، الکتریک، مکانیک و شیمی برقرار است، اما به خاطر تغییر ابعاد از ماکروسکپی به میکروسکپی، این ساختار ماشین ها، قوانین، ابزارآلات و مواد مخصوص به خود را دارد. به عنوان مثال وقتی اشیا در ابعاد میکرونی بررسی و مطرح می شوند، فیزیک مساله نیز تغییر می کند. مثلا نیروهای اصطکاک و ویسکوزیته بسیار موثرتر از نیروهای اینرسی می شوند. همچنین محدودیت های تولید قطعه در ابعاد میکرونی و روش های کنترل میکروسیستم ها نیز حائز اهمیت هستند.

فناوری موجود برای ساخت و تولید MEMS همان تکنولوژی ساخت لایه های نازک می باشد. در فناوری لایه های نازک همه خواص و کاربرد مجموعه به پارامترهای کریستالوگرافی لایه ها و مورفولوژی سطح لایه ها بستگی دارد. خواص نهائی لایه PZT نیز از این قاعده مستثنی نیست و به ساختار کریستالوگرافی و مورفولوژی سطحی آن بستگی دارد به گونه ای که حتی خواص الکتریکی

PZT نیز تحت تاثیر این عوامل قرار گرفته و تغییر می کند. عوامل متغیر زیادی وجود دارند که می توانند ساختار کریستالی و مورفولوژی سطحی PZT را تحت تاثیر قرار دهند.

در فصل دوم سیستم های میکرو/نانوالکترومکانیکی معرفی شده اند. در این فصل تاریخچه، کاربردها و وضعیت بازار این سیستم ها بیان می شود. سپس به مواد مصرفی در ساخت میکرو/نانوالکترومکانیک ها اشاره می کند، که از مهمترین آنها می توان به مواد پیزوالکتریک اشاره نمود. لذا فصل دوم به معرفی خاصیت پیزوالکتریسیته و تاریخچه آن و معادلات حاکم بر این خاصیت اشاره می کند. از دیگر مواد مصرفی در ساخت MEMS/NEMS می توان از پلیمرها و آلیاژهای حافظه دار یاد نمود که در این فصل مختصرا به آنها اشاره می شود. روش های موجود در ساخت و تولید MEMS/NEMS و ساخت لایه های نازک در همین فصل مورد بررسی قرار می گیرند. فرآیند میکروماشین کاری سطحی شامل مراحل لایه گذاری، لیتوگرافی برای رسیدن به طرح مورد نظر و اچ کردن می باشد. بررسی لایه نشانی به روش کندوپاش بطور مفصل تری بررسی می شود.

روش انجام آزمایش ها و نحوه آنالیزها در فصل سوم بررسی می شود و در فصل چهارم به بحث و بررسی نتایج حاصله از آزمایش ها می پردازیم. در نهایت نتیجه گیری کلی و نیز ارائه برخی پیشنهادها جهت انجام ادامه پروژه در فصل پنجم بررسی می شود.

فصل ۲

MEMS/NEMS کاربردها، مواد و فرآیند تولید

در این فصل ابتدا به معرفی و بررسی سیستم های میکرو/نانو الکترومکانیک می پردازیم سپس خواص و ویژگی های مواد مصرفی در فرایندهای ساخت و تولید این تجهیزات مورد بحث و بررسی قرار می گیرد و در نهایت فرایندهای ساخت و تولید MEMS/NEMS به خصوص روش های فیزیکی رسوب گذاری لایه های نازک مورد بررسی قرار می گیرد.

۲-۱. معرفی سیستم های میکرو/نانو الکترومکانیک

فرایند تولید میکروپروسسور و IC ها، سبب ایجاد زمینه ای جدید در ساخت ماشین آلات و قطعات میکرو/نانوالکترومکانیکی[1] (MEMS/NEMS) شده است. میکروماشینکاری و فرایند MEMS/NEMS می توانند برای تولید ساختارهای پیچیده در ابعاد میکرون به کار روند. سیستم های MEMS/NEMS از اجزای مکانیکی و الکترونیکی(مانند میکروحسگرها[2]، میکروعملگرها[1] و غیره)

[1] -Micro/Nano Electro Mechanical Systems(MEMS/NEMS)
[2] -Micro sensors

تشکیل شده اند. البته در مواردی قسمت های شیمیائی، بیو شیمی، نوری و اکوستیک نیز دارند. این سیستم ها می توانند در ابعاد میکرومتر دنیای میکرو/ماکروسکپی را حس کرده، کنترل کنند و یا اعمالی را انجام دهند [۱].

MEMS اصطلاحی است که اولین بار در اواخر دهه ۱۹۸۰ در آمریکا برای نامیدن این سیستم ها معمول شد. این رشته از فناوری در اروپا بنام " دانش میکروسیستم ها" و در ژاپن به"میکرومکاترونیک " معروف است.

به هر حال تصوری که از MEMS/NEMS وجود دارد عبارت است از واحدی کامل که هم قسمت های الکتریکی و هم ریزساختارهای مکانیکی دارد. اندازه آنها نیز از چند نانومتر تا چند میلیمتر است. این ادوات در مقایسه با ماشین های عادی چند تا از ویژگی های مینیاتوری بودن را دارند از قبیل: تعدد اجزا، پیچیدگی کار، مجتمع سازی سیستم و قابلیت تولید انبوه.

دو محصول عمده تشکیل دهنده MEMS میکروحسگرها و میکروعملگرها هستند.

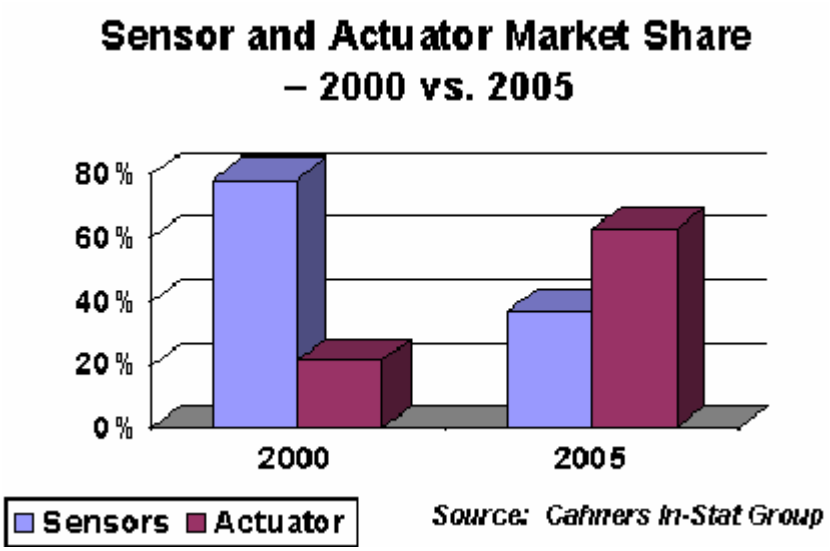
حسگر وسیله ای است که در پاسخ به یک سیگنال تحریک، یک سیگنال الکتریکی قابل استفاده در خروجی ایجاد می کند. وپارامترهای محیط را بدون آنکه بر آن اثر بگذارد، اندازه می گیرد و این به دلیل کوچک بودن اندازه حسگر است. زمانی که یک حسگر با یک مدار پردازشگر[۲] سیگنال در یک بسته[۳] ساده (معمولا در یک تراشه پلی سیلیکون) جمع می شود بعنوان حسگر مجتمع[٤] یا حسگر هوشمند[٥] شناخته می شود [۲].

عملگر به تعریف ساده وسیله ای است که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می کند عملگرها را می توان بعنوان مبدل در نظر گرفت. مبدل وسیله ای است که انرژی را از یک حوزه به حوزه دیگر تبدیل می کند یا وسیله ای که انرژی را از یک نوع به نوع دیگرحتی اگر هر دو نوع در

[1] -Micro actuators
[2] -Processor
[3] -Package
[4] -Integrated sensor
[5] -Smart sensor

یک دامنه باشند تبدیل می کند.(مانند تبدیل انرژی مکانیکی از حالت خطی به دورانی) [۳]. از انواع عملگرها می توان به عملگرهای خطی و دورانی, عملگرهای الکترواستاتیک, عملگرهای پیزوالکتریک وعملگرهای IPMC و SMA اشاره نمود [۳]. در حالت کلی تر در یک سیستم میکروالکترومکانیک میکروحسگرها در کنار سایر قسمت ها (میکروعملگرها، میکروساختارها و بخش های میکروالکترونیک) تشکیل یک سیستم کنترلی را می دهند.

امروزه در بازار تجاری MEMS/NEMS ، مصرف عملگرها به مراتب بیشتر از حسگرها شده است. بطوریکه در سال ۲۰۰۰، نزدیک به ۸۰ درصد حجم مبادلات تجاری MEMS/NEMS به حسگرها و ۲۰ درصد به عملگرها اختصاص داشته و این نسبت در سال ۲۰۰۵ به ٤۰ درصد برای حسگرها و ٦۰ درصد برای عملگرها تغییر یافته است. شکل ۲-۱ نمودار تجاری حسگرها وعملگرها را در طی این دو سال نشان می دهد. با این مقایسه، اهمیت نقش عملگرها درکاربردهای جدید MEMS/NEMS بیش از پیش مشخص می شود.



شکل۲-۱. مقایسه بازار تجاری حسگرها و عملگرها [٤].

۲-۱-۲. مزایای سیستم های میکرو/نانوالکترومکانیک

در انجام یک عمل یکسان، MEMS/NEMS مزایای بسیاری در مقایسه با سیستم های ماکرو ارائه

می دهد. تولیدات MEMS/NEMS معمولا یک یا چند مورد از ویژگی های زیر را دارند:

الف) مزیت خواص ابعادی:

بسیاری از پدیده های فیزیکی زمانی که تا حد نانو یا حتی میکرون کوچک می شوند بسیار بهتر عمل کرده و بازدهی بیشتری دارند. بخاطر اندازه بسیار کوچک این سیستم ها صدها عدد از آنها فضائی را اشغال می کنند که یک سیستم ماکرو به تنهائی اشغال خواهد کرد. بنابراین چند نتیجه اساسی بدست می آید:

۱- این سیستم ها می توانند در جاهای کوچک که وسایل بزرگ معمولا نمی توانند بخوبی جای گیرند قرار داده شوند. بعنوان مثال درون موتور ماشین یا موجود زنده.

۲- دقت بسیار بالاتری از میکروعملگرها بدست می آید. حرکتهای در حد میکرون به خوبی قابل انجام است.

۳- یک وسیله کوچک، اثر کمی بر روی محیط خواهد داشت. بنابراین برای اندازه گیری پارامترها ترجیح داده می شود که از ابعاد کوچک استفاده شود [۲].

ب) بهینه سازی مدارها:

با سر هم کردن مدارها به کمک MEMS/NEMS علاوه بر جلوگیری از افزایش قیمت و پیچیدگی، خواص مطلوب زیادی بدست می آید. به عنوان مثال می توان از پیش تقویت سیگنال های حسگرها، کاهش پارازیت های الکتریکی و کوچکتر شدن مجموعه نام برد.

۲-۱-۳. تاریخچه ایجاد سیستم های میکرو/نانو الکترومکانیک

قبل از بیان هر نوع تاریخچه ای در این زمینه لازم است تعاریف زیر را بدانیم:

میکروماشینکاری: به هر پروسه ای که فرآیندهای لایه نشانی، اچ کردن و غیره را انجام دهد یا اجسامی را تولید کند که کمترین ابعاد اندازه گیری شده آنها در حدود میکرون یا کمتر از آن باشد میکروماشینکاری گفته می شود.

MEMS : به هر وسیله یا سیستمی به جز IC که بامیکروماشینکاری تولید شود MEMS گویند. باتوجه به تعریف های فوق تاریخچه MEMS/NEMS به ایجاد و رشد پروسه های میکروماشینکاری وابسته است.

دهه ۱۹٤۰ میلادی: بوجود آمدن شبه رساناهای خالص (Ge و Si) که با ایجاد رادار در جنگ جهانی دوم اولین جرقه های استفاده از آن زده شد [۳۵].

۱۹٤۷ میلادی: اختراع ترانزیستورهای تماس نقطه ای که جلودار صنعتی شدن مدارهای حاوی شبه رسانا بود [۳۵].

۱۹٤۹ میلادی: توانائی رشد تک کریستال های خالص سیلیکون، بازده ترانزیستورها را افزایش داد ولی قیمت و قابلیت اطمینان آنها هنوز کاملا رضایت بخش نبود [۳۵].

۱۹۵۹ میلادی: ایده ساخت سیستم های خیلی کوچک را پروفسور ریچارد فاینمن[1] در سخنرانی مشهور خود با عنوان " فضاهای بسیاری در ابعاد کوچک موجود است[2] " ارائه داد. او در این سخنرانی توضیح داد که مقدار بسیار زیادی فضا در ابعاد میکروسکپی موجود است " آنچه که در دایره المعارف آمده است، می تواند در سر یک سوزن جمع شود." او پتانسیل بسیار زیادی را برای میکروساخت[3] در زمان اختراعش بیان کرد. بعلاوه او در تئوری قانع نشد و بلکه موتوری با ابعاد کمتر از ۱/٦٤ اینچ در هر بعد ساخت [۳۵].

۱۹٦۰ میلادی: اختراع فرآیند سری سازی صفحه ای که قابلیت اطمینان و قیمت وسایل شبه رسانا را شدیدا بهبود بخشید. بعلاوه این پروسه امکان جمع شدن چندین شبه رسانا در یک قطعه سیلیکون واحد را فراهم می کند. این اختراع منادی آغاز صنعت IC بود. اگرچه پروسه صفحه ای اولیه، وسایل نسبتا بزرگ (بیشتر از میلیمتر) را تولید می کرد اما یک پروسه به شدت قابل تطبیق با سایز بود که

[1] -Richard Feynman
[2] -There is plenty of room at the bottom
[3] -Microfabrication

توانست تعداد زیادی از قطعات را میکروماشینکاری کند [۳۵].

۱۹۷۰ میلادی: ایجاد میکروپروسسورها که کاربردهای فراوانی پیدا کرد و در جهت تغییرات جوامع امروزی بسیار موثر بود. این ادعای مور که هر ۱۸ ماه یک بار تعداد ترانزیستورهائی که روی یک چیپ می توان ساخت دو برابر می شود در ۳۰ سال گذشته درست بوده است [۳۵].

۱۹۸۲ میلادی: مقاله اساسی کرت پترسون[1] از شرکت IBM با عنوان "سیلیکون یک ماده مکانیکی" ساخت انواع وسایل میکرومکانیکی را مطرح کرد که این مقاله در افزایش دادن آگاهی نسبت به توانمندی های MEMS بسیار موثر بود. از آنجا که در ساخت مدارهای مجتمع به وفور از سیلیسیوم استفاده می شود و فرآیند های لازم برای ساخت ادوات سیلیسیومی مانند لیتوگرافی و اچ کردن وجود داشت، این مقاله موجب شد که ساخت قطعات مکانیکی سیلیسیومی به سرعت رواج یابد. مقاله سال ۱۹۸۲ پترسون از نظر بسیاری افراد بعنوان نقطه آغاز رسمی فناوری MEMS شناخته می شود. هر چند که قبل از آن نیز کارهای پراکنده ای برای ساخت سیستم های بسیار کوچک صورت گرفته و انتشار یافته بود. پترسون اکنون نیز یکی از پرکارترین و مشهورترین محققین در زمینه MEMS/NEMS محسوب می شود [۳۵].

۱۹۸٤ میلادی: هوو[2] و مولر[3] در دانشگاه برکلی- کالیفرنیا[4] پروسه میکروماشینکاری سطحی را ایجاد کرده و از آن برای ساخت MEMS با مدار مجتمع استفاده کردند. این تکنولوژی به عنوان پایه بسیاری از تولیدات MEMS به کار می رود [۳۵].

۱۹۸۹ میلادی: اولین میکروموتور الکترواستاتیکی کنترل شده که دارای سطوح یاتاقانی بود بوجود آمد. اگرچه امروز هیچ محصول صنعتی از این تکنولوژی میکروموتور استفاده نمی کند اما بعنوان یک تکنولوژی ارزشمند و محرک در زمینه MEMS تلقی می شود [۳۵].

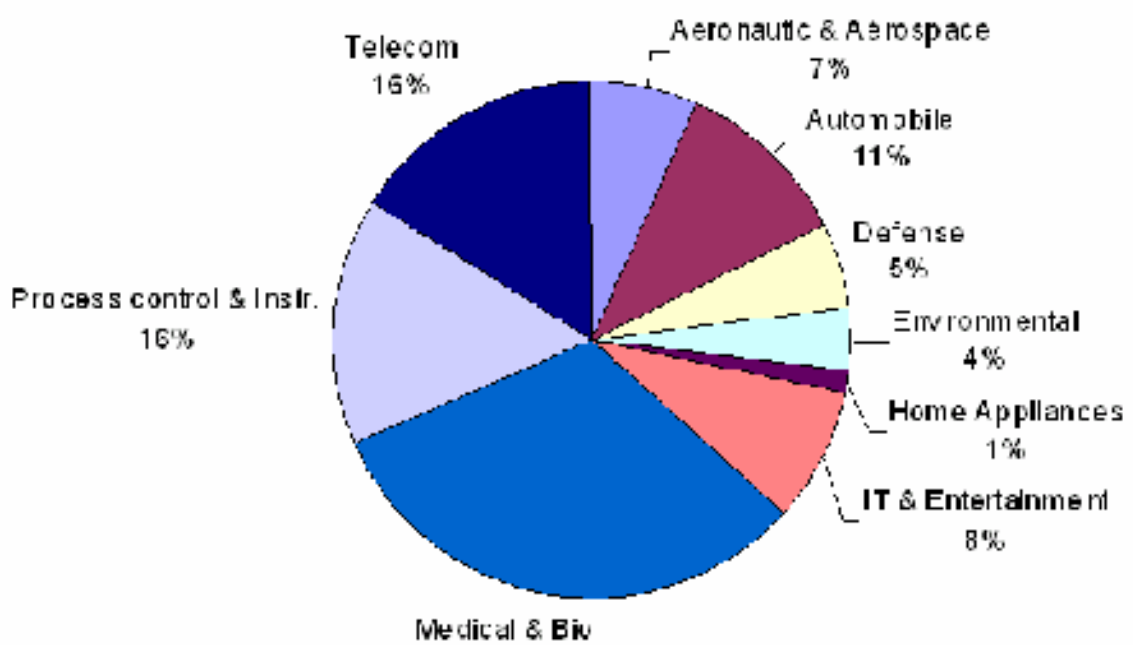
[1] - Kurt Peterson
[2] - Howo
[3] - Muller
[4] - UCB

۱۹۹۱ میلادی: گسترش پروسه میکروماشینکاری سطحی پلی سیلیکون باعث بوجود آمدن میکرولولاها شد. بنابراین ساختارهای بزرگ توانستند در خارج از صفحه زیرلایه[1] مونتاژ شوند و در نتیجه به MEMS توانائی زیادی برای گسترش در بعد سوم داده شد [۳۵].

بطور کلی دهه ۹۰ میلادی گسترش زیادی در تعداد وسایل، تکنولوژی ها و کاربردهای MEMS/NEMS داشته است که تا امروز ادامه دارد.

۲-۱-۴. رشد اقتصادی فرایند میکرو/نانو الکترومکانیک

بازار کنونی MEMS/NEMS بیشتر در حسگرهای فشاری و اینرسی، سدهای پرینترهای جوهرافشان و نمایشگرهای دیجیتالی با دقت های بالاست. کاربردهای آینده و رو به رشد آن نیز بیشتر شامل حسگرهای اندازه گیری فشار باد لاستیک ها، قطعات مخابراتی RF و بیسیم، قطعات فیبر نوری، ابزار آلات کنترل مایعات، کاربردهای پزشکی و انتقال دارو می باشد. شکل۲-۲ در صد استفاده کاربردهای مختلف MEMS/NEMS را در مقایسه با یکدیگر نشان می دهد:



شکل۲-۲. کاربردهای مختلف MEMS/NEMS [۵].

[1] - Substrate