بسم الله الرحمن الرحيم

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
مؤسسه آموزش عالی غیردولتی-غیرانتفاعی سجاد

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد برق

گرایش الکترونیک

موضوع:

طراحی و شبیه سازی شتاب سنج خازنی MEMS

دانشجو

محمد سروقد مقدم

استاد راهنما

دکتر خلیل مافی نژاد

استاد دفاع

دکتر هومن نبوتی

دکتر عباس گلمکانی

تابستان ۱۳۹۲

فهرست مطالب

عنوان صفحه

چکیده

مقدمه ۱

فصل اول

۱- فناوری MEMS ۳

۱-۱- آشنایی با ادوات MEMS ۵

۱-۲- انواع و کاربردهای MEMS ۸

۱-۲-۱- صنایع پزشکی (Bio-MEMS) ۸

۱-۲-۱-۱- کاربردهای جدید Bio-MEMS ۸

۱-۲-۲- صنایع هوا فضا ۹

۱-۲-۳- صنایع ارتباطات ۹

۱-۲-۳-۱- MOEMS ۹

۱-۲-۳-۲- RFMEMS ۹

فصل دوم

۲- تکنیک‌های هدایت مکانیکی ۱۱

۲-۱- تکنیک‌های تحریک ۱۱

۲-۱-۱- الکتروستاتیکی ۱۱

۲-۱-۲- پیزوالکتریکی ۱۳

۲-۱-۳- حرارتی ۱٤

۲-۱-٤- مغناطیسی ۱٦

فصل سوم

۳- ساخت ادوات MEMS ۱۹

۳-۱- روش‌های میکروماشین‌کاری ۱۹

۳-۱-۱- ماشین‌کاری حجمی Bulk Micromachining ۱۹

۳-۱-۲- ماشین‌کاری‌سطحی Surface Micromachining ۲۰

۳-۲- فرایند ساخت سنسور MEMS ۲۰

فصل چهارم

٤- سنسورهای سنجش شتاب ٢٤
٤-١- شتاب سنج های MEMS ٢٤
٤-٢- اساس کار شتاب سنج های MEMS ٢٥
٤-٢-١- نوع اندازه‌گیری ٢٥
٤-٣- شتاب سنج و g مجاز ٢٦
٤-٤- کاربرد شتاب سنج ٢٦
٤-٤-١- چندین مورد استفاده از سنسور شتاب سنج عبارت است از ٢٦
٤-٥- انواع شتاب سنج ها ٢٨
٤-٥-١- شتاب سنج های پیزوالکتریکی PE ٢٨
٤-٥-٢- شتاب سنج های پیزومقاومتی PR ٢٩
٤-٥-٣- شتاب سنج های خازنی ٣٠

فصل پنجم

٥- شتاب سنج های خازنی ٣٤
٥-١- شتاب سنج خازنی دو محوره ٣٨
٥-١-١- نتایج شبیه سازی از یک شتاب سنج خازنی دو محوره MEMS ٣٩
٥-٢- شتاب سنج خازنی سه محوره ٣٩
٥-٢-١- شبیه سازی شتاب سنج خازنی سه محوره ٤١
٥-٣- نویز در شتاب سنج های MEMS ٤٢
٥-٤- کاربردها ٤٢
٥-٤-١- بکارگیری شتاب سنج در موس ٤٣

فصل ششم

٦- کاربرد شتاب سنج در خودرو ٤٦
٦-١- شتاب سنج های مورد استفاده در کاربردهای خودرو ٤٦
٦-١-١- شتاب سنج های تشخیص تصادف ٤٦
٦-١-٢- طراحی تخمین ٤٩
٦-١-٢-١- طراحی مبدل ٤٩
٦-١-٢-١- خود آزمایی ٥٠
٦-١-٢-٣- – توقف‌های Over travel ٥٠

٦-١-٢-٤- اصطکاک استاتیک ٥١
٦-١-٢-٤-١- تکنیک های طراحی ٥١
٦-١-٢-٤-٢- فرایندهای شستشو و خشک کردن ٥٢
٦-١-٢-٤-٣- تکنیک‌های خاص بسته‌بندی ٥٣
٦-١-٢-٤-٤- اصلاح سیگنال ٥٤
٦-١-٣- تبدیل ظرفیت خازنی به ولتاژ ٥٥
٦-١-٤- فیلتر کردن ٥٥
٦-١-٤-١- منابع اعوجاج ٥٦
٦-١-٤-٢- مشخصه ها ٥٧
٦-١-٤-٢-١- حساسیت و دقت ٥٧
٦-١-٤-٢-٢- آفست ٥٨
٦-١-٤-٢-٣- نویز ٥٨
٦-١-٤-٢-٤- دما و ولتاژ ٥٨
٦-١-٤-٢-٥- جنبه مکانیکی ٥٨

فصل هفتم

٧- طراحی و شبیه سازی پل های مختلف شتاب سنج خازنی MEMS ٦٠
٧-١- معرفی نرم افزارهای استفاده شده ٦٠
٧-١-١- نرم افزار ANSYS ٦٠
٧-١-١-١- برخی از ویژگی‌های مهم نرم افزار ANSYS ٦١
٧-١-١-٢- MEMS در ANSYS ٦٢
٧-١-٢- معرفی نرم افزار MATLAB ٦٢
٧-١-٣- معرفی نرم افزار COVENTOR ٦٣
٧-١-٣-١- رویکرد طراحی در COVENTOR ٦٤
٧-٢- شتاب سنج خازنی MEMS تک محوره ٦٦
٧-٢-١- قسمت های مختلف شتاب سنج خازنی تک محوره ٦٦
٧-٢-٢- تحریک الکترواستاتیک ٦٨
٧-٢-٢-١- نیروی الکترواستاتیکی ٦٨
٧-٢-٢-٢- ولتاژ تحریک ٦٨
٧-٢-٢-٣- ماکزیمم ولتاژ قابل تحمل شتاب سنج (Critical collapse voltage) ٦٩
٧-٢-٢-٤- ظرفیت خازنی متغیر (Capacitance Variable) ٦٩

۷-۲-۳- محاسبه ضریب فنر موثر(K_{eff} :effective Stiffness Coefficient) ٦٩
۷-۲-٤- ضریب فنر موثر برای پل‌های پیچیده (effective Stiffness Coefficient For Complex Beam)..... ۷۰
۷-۲-٥- ساختارهای مختلف از پل‌های شتاب سنج خازنی MEMS ۷۱
۷-۲-٦- مزایا و معایب طرح پیشنهادی ۷۳
۷-۲-۷- معادلات ضریب فنر پل های ارائه شده ۷٤
۷-۲-۸- فرکانس تشدید، حساسیت جابجایی ۷٥
۷-۲-۹- جرم کل و جرم موثر ۸۰
۷-۲-۱۰- نیروی اعمالی ۸۳
۷-۲-۱۱- ضریب دمپینگ (Damping Coefficient) ۸۳
۷-۲-۱۲- نرخ دمپینگ و ضریب کیفیت (Damping ratio and Quality Factor)..... ۸۷
۷-۲-۱۳- ضریب شایستگی (Figure of Merit) ۸۹
۷-۳- شبیه سازی پل‌های مختلف شتاب سنج خازنی MEMS..... ۹۰
۷-۳-۱- شبیه سازی میزان خمش انواع پل های دو سر گیردار از شتاب ۲۰g تا ۱۰۰g ۹۰
۷-۳-۲- شبیه سازی میزان ماکزیمم تنش انواع پل‌های دو سر گیردار از شتاب ۲۰g تا ۱۰۰g..... ۹۷
۷-۳-۳- شبیه‌سازی ماکزیمم کرنش مکانیکی انواع پل‌های دو سر گیردار از شتاب۲۰g تا ۱۰۰g ۱۰۱
۷-۳-٤- شبیه‌سازی ماکزیمم کرنش الاستیکی انواع پل‌های دو سر گیردار از شتاب ۲۰g تا ۱۰۰g ۱۰٥
۷-۳-٥- ماکزیمم پارامترهای قابل اندازه‌گیری شتاب‌سنج ۱۰۹
۷-٤- نتیجه گیری ۱۱۸

فصل هشتم

۸- مراجع ۱۲۰

فهرست اشکال

عنوان صفحه

فصل اول

شکل ۱-۱- اجزای MEMS [30] ۳
شکل ۱-۲- فرآیندهای MEMS [1] ٤
شکل۱- ۳- الف- میکرو موتور ساخته شده با استفاده از فناوری MEMS [1] ٦
شکل ۱- ۳- ب- چرخ دنده ساخته شده با استفاده از فناوری MEMS [27] ۷
شکل۱-٤- جایگاه MEMS [9] ۷

فصل دوم

شکل۲- ۱- محرک الکتروستاتیکی با خازن تخت[2] ۱۱
شکل۲- ۲- محرک الکتروستاتیکی تحریک شانه‌ای[2] ۱۲
شکل۲- ۳- نمایش اصول کاری محرک مالشی الکتروستاتیکی[2] ۱۳
شکل۲- ٤- پل پیزوالکتریک ۱۳
شکل۲- ٥- یک میکروپمپ ساده با محرک پیزوالکتریکی ۱٤
شکل۲- ٦- محرک حرارتی ساده‌ی تشکیل شده از دوجنس ۱٥
شکل۲- ۷- میکرو پمپ های حرارتی[2] ۱٥
شکل۲- ۸- محرک های shape memory effect [2] ۱٦
شکل۲- ۹- مثالی از محرک مغناطیسی درون صفحه[2] ۱۷

فصل سوم

شکل ۳- ۱- فرآیندهای ساخت ادوات MEMS [1] ۱۹
شکل ۳- ۲- ماشین‌کاری حجمی[1] ۲۰
شکل۳- ۳- ماشین‌کاری سطحی[27] ۲۰
شکل۳- ٤- فرایند ساخت سنسور MEMS ۲۲

فصل چهارم

شکل٤- ۱- نمونه هایی از سنسورهای موجود در بازار [12] ۲٤

شکل ٤- ٢- سنسورهای شتاب مینیاتوری سه محوره[12]. ٢٧
شکل ٤- ٣- شتاب سنج مورد استفاده در سیستم خودرو[12]. ٢٧
شکل٤- ٤- یک نمونه شتاب‌سنج پیزوالکتریک و شمای داخلی آن[12]. ٢٨
شکل٤- ٥- شتاب‌سنج پیزوالکتریک [12] ٢٩
شکل٤- ٦- شتاب‌سنج تست تصادف خودرو در یک بسته بندی استاندار در صنعت[12]. ٣٠
شکل٤- ٧- ساختار شتاب‌سنج خازنی ٣١
شکل٤- ٨- .شتاب سنج میکروترون [12] ٣١

فصل پنجم

شکل ٥- ١- الف- مدارالکتریکی که شتاب را به کمک تغییرات خازنی اندازه‌گیری می‌کند[5,6,7]. ٣٦
شکل٥- ٢- دیاگرام سیستم جرم-فنر- دمپر [10] ٣٧
شکل٥-٣- ساختار شتاب سنج سه بعدی [13] ٣٧
شکل٥- ٤- ساختار شتاب سنج دو محوره[24]..... ٣٨
شکل٥-٥- نمودار شبیه‌سازی شده ظرفیت خازنی بر حسب شتاب[24]. ٣٩
شکل٥- ٦- شتاب‌سنج خازنیMEMS سه محوره با یک جرم مقاوم [50] ٤٠
شکل ٥-٧- سطح همپوشانی الکترودهای حسگر (خطوط هاشور خورده) برای محور Z انگشت شانه‌ای [33]..... ٤٠
شکل ٥- ٨- عنصر حسگر محور Z ٤٠
شکل ٥- ٩- نمودار شبیه‌سازی شده ولتاژ خروجی بر حسب شتاب در راستای سه محور X,Y,Z [33]. ٤١
شکل ٥- ١٠- نمایش خصوصیات نویزی شتاب‌سنج[11]. ٤٢
شکل٥- ١١- تلفن همراه Apple4 وNokia مدل ٥٨٠٠[28,29]. ٤٣
شکل ٥-١٢- بلوک دیاگرام سیستم موس هیبرید[8]. ٤٤

فصل ششم

شکل ٦-١-١- شتاب‌سنج‌های تشخیص تصادف خودرو [45] ٤٨
شکل٦-١-٢- یک مدل مکانیکی ساده شده شتاب‌سنج[45]. ٤٩
شکل٦-١-٣- فرایند برش ویفر معکوس به کار رفته برای محافظت از شتاب‌سنج AD[45] ٥٣
شکل ٦-١-٤- معماری یک شتاب سنج ایده آل[45]. ٥٥
شکل ٦-١-٥- مدارات الکترونیکی واسط خازنی برای MEMS [45]. ٥٦

فصل هفتم

شکل ٧-١- جریان‌های طراحی پشتیبانی شده توسط نرم افزار COVENTOR ٦٤
شکل٧-٢- فرآیند ساخت برای مدل پیشنهادی در COVENTOR ٦٥

شکل۷-۳- مدل سه بعدی طرح پیشنهادی بعد از فرآیند ساخت با COVENTOR ٦٥
شکل ۷-٤- شماتیک سه بعدی از یک شتاب‌سنج خازنی میکروماشین کاری شده MEMS..... ٦٦
شکل۷-٥- شتاب سنج میکرو ماشین کاری شده خازنی موازی MEMS ٦٧
شکل۷-٦- شماتیکی از خمش ایجاد شده در پل دو سر ثابت تحت ولتاژ تحریک[46]. ٦٧
شکل۷-۷- یک مدل تحلیل عمومی برای محاسبه ضریب فنر موثر پل [46] ۷۰
شکل۷-۸- پل‌های دو سر ثابت ۷۲
شکل۷-۹- مقادیر شبیه‌سازی شده فرکانس تشدید مرتبه اول تا پنجم پل‌های ارائه شده ۷۷
شکل۷-۱۰- فرکانس تشدید مرتبه اول شبیه سازی شده توسط نرم افزار MATLAB..... ۷۹
شکل ۷-۱۱- جرم کل پل‌های ارائه شده..... ۸۲
شکل۷-۱۲- ایجاد دمپینگ slide film بین دو صفحه با فاصله ثابت [66] ۸٤
شکل۷-۱۳- ایجاد دمپینگ squeeze film بین دو صفحه با فاصله ثابت [66]..... ۸٤
شکل ۷-۱٤- ضریب دمپینگ شبیه سازی شده توسط نرم افزارCOVENTOR..... ۸٦
شکل۷-۱٥- شبیه سازی میزان خمش پل‌های دو سر گیردار تحت شتاب ۲۰g ۹۳
شکل۷-۱٦- شبیه سازی میزان خمش پل‌های دو سر گیردار تحت شتاب ۱۰۰g ۹٦
شکل۷-۱۷- شبیه سازی خمش پل‌های دو سر گیردار بر حسب شتاب از شتاب ۲۰g تا ۱۰۰g برای ساختار های ۱ تا ۷ ..۹٦
شکل۷-۱۸- شبیه سازی ماکزیمم تنش بر روی پل‌های دو سر گیردار تحت شتاب ۲۰g..... ۹۸
شکل۷-۱۹- شبیه سازی ماکزیمم تنش بر روی پل‌های دو سر گیردار تحت شتاب ۱۰۰g ۱۰۰
شکل۷-۲۰- شبیه سازی ماکزیمم تنش بر حسب شتاب از شتاب ۲۰g تا ۱۰۰gبرای ساختارهای ۱ تا ۷..... ۱۰۰
شکل۷-۲۱- شبیه سازی ماکزیمم کرنش مکانیکی بر روی پل‌های دو سر گیردار تحت شتاب ۲۰g..... ۱۰۲
شکل۷-۲۲- شبیه سازی ماکزیمم کرنش مکانیکی بر روی پل‌های دو سر گیردار تحت شتاب ۱۰۰g ۱۰۳
شکل۷-۲۳- شبیه سازی ماکزیمم کرنش مکانیکی بر حسب شتاب از شتاب ۲۰g تا ۱۰۰g برای ساختارهای ۱ تا ۷..... ۱۰٤
شکل۷-۲٤- شبیه سازی ماکزیمم کرنش الاستیکی بر روی پل‌های دو سر گیردار تحت شتاب ۲۰g ۱۰٦
شکل۷-۲٥- شبیه‌سازی ماکزیمم کرنش الاستیکی بر روی پل‌های دو سر گیردار تحت شتاب ۱۰۰g ۱۰۷
شکل۷-۲٦- نمودار شبیه سازی شده ماکزیمم کرنش الاستیکی از شتاب ۲۰g تا ۱۰۰g برای ساختارهای ۱ تا ۷.....۱۰۸
شکل۷-۲۷- نمودار ولتاژ تحریک شبیه سازی شده بر حسب شتاب از شتاب ۲۰g تا ۱۰۰g برای ساختارهای ۱ تا ۷..... ۱۰۸
شکل۷-۲۸- نمودار ظرفیت‌خازنی شبیه سازی شده بر حسب شتاب از شتاب ۲۰g تا ۱۰۰g برای ساختارهای ۱ تا ۷..... ۱۰۹
شکل۷-۲۹- ماکزیمم نیرو قابل اندازه گیری ۱۱۱
شکل۷-۳۰- ماکزیمم تنش قابل تحمل پل‌ها ۱۱۳
شکل۷-۳۱- ماکزیمم کرنش مکانیکی قابل تحمل پل‌ها ۱۱٥
شکل۷-۳۲- ماکزیمم کرنش الاستیکی قابل تحمل پل‌ها ۱۱۷

شکل ۷-۳۳- ولتاژ تحریک بر حسب خمش برای ساختار پیشنهادی شبیه سازی شده توسط نرم افزار COVENTOR .. ۱۱۷
شکل ۷-۳٤- تغییرات شکاف بین پل و الکترود بر حسب ولتاژ تحریک ۱۱۸

فهرست جداول

عنوان صفحه

فصل اول

جدول۱– ۱–دسته بندی ادوات MEMS [9] ۷

فصل چهارم

جدول٤– ۱– عملکرد چند شتاب‌سنج بر پایه تغییرات دمایی[12]..... ۳۲

جدول ٤– ۲– مزایا و نواقص شتاب سنج ها ۳۲

فصل پنجم

جدول۵– ۱– خصوصیات بدست آمده از شبیه سازی شتاب سنج خازنی سه محوره [33] ٤۱

فصل هفتم

جدول۷–۱– پارامترهای هندسی و مواد ۷۱

جدول۷–۲– معادلات ضریب فنر موثر پل‌های مختلف ارائه شده ۷٤

جدول۷–۳– مقادیر ضریب فنر پل‌های مختلف ارائه شده ۷۵

جدول۷–٤– مقادیر فرکانس تشدید پل‌های مختلف ارائه شده..... ۷۸

جدول۷–۵– مقادیر فرکانس تشدید مرتبه اول بدست آمده از نرم افزارهای ANSYS و MATLAB..... ۸۰

جدول۷–٦– مقادیر حساسیت نسبت به جابجایی پل‌های ارائه شده ۸۰

جدول۷–۷– مقادیر جرم کل و موثر پل‌های ارائه شده ۸۳

جدول۷–۸– مقادیر نیروهای اعمالی به پل‌های ارائه شده..... ۸۳

جدول۷–۹– ضریب دمپینگ پل‌های ارائه شده ۸۷

جدول ۷–۱۰– تاثیر ضریب کیفیت بر پارامترهای مختلف..... ۸۷

جدول۷–۱۱– ضریب کیفیت پل‌های ارائه شده ۸۸

جدول۷–۱۲– نرخ دمپینگ پل‌های ارائه شده ۸۹

جدول۷–۱۳– مقادیر شبیه سازی ماکزیمم خمش پل‌های مختلف شتاب سنج از شتاب ۲۰g تا ۱۰۰g ۹٦

جدول۷–۱٤– مقادیر شبیه سازی ماکزیمم تنش باقیمانده پل‌های مختلف شتاب سنج از شتاب ۲۰g تا ۱۰۰g ۱۰۰

جدول۷–۱۵– مقادیر شبیه سازی ماکزیمم کرنش مکانیکی پل‌های مختلف شتاب سنج از شتاب ۲۰g تا ۱۰۰g ۱۰٤

جدول۷–۱٦– مقادیر شبیه سازی ماکزیمم کرنش الاستیکی پل‌های مختلف شتاب سنج از شتاب ۲۰g تا ۱۰۰g..... ۱۰۸

جدول۷–۱۷– مقادیر شبیه سازی ولتاژ تحریک پل‌های مختلف شتاب سنج از شتاب ۲۰g تا ۱۰۰g..... ۱۰۸

جدول۷–۱۸– مقادیر شبیه سازی ظرفیت خازنی پل‌های مختلف شتاب سنج از شتاب ۲۰g تا ۱۰۰g ۱۰۹

جدول۷-۱۹- ماکزیمم نیرو و شتاب قابل اندازه گیری ۱۱۲
جدول۷-۲۰- ماکزیمم تنش قابل تحمل پل‌ها..... ۱۱۳
جدول۷-۲۱- ماکزیمم کرنش مکانیکی قابل تحمل پل‌ها..... ۱۱۵
جدول۷-۲۲- ماکزیمم کرنش الاستیکی قابل تحمل پل‌ها ۱۱۷
جدول۷-۲۳- ماکزیمم ولتاژ تحریک قابل تحمل پل‌ها ۱۱۷

چکیده

بعد از آشنایی کافی در مورد ادوات MEMS به طور کامل انواع شتاب‌سنج‌ها را مورد بررسی قرار دادیم و پس از آن در مورد نوع پرکاربردتر شتاب سنج ها که همان شتاب سنج خازنی MEMS است به توضیح و تفسیر بیشتری پرداختیم و انواع مختلف آن را که تقسیم می‌شود به تک محوره، دو محوره و سه محوره به طور کامل تشریح کردیم و در مرحله بعد کاربرد شتاب سنج در خودرو را مورد بررسی قرار دادیم و طبق شتاب لازمه برای تشخیص تصادف خودرو از جلو که بین ۲۰g تا ۱۰۰g حداقل و حداکثر رنج شتاب قابل سنس می‌باشد پل‌های مختلف شتاب سنج خازنی MEMS را توسط ۳ نرم افزار قدرتمند ANSYS ، MATLAB ، COVENTOR در رنج ذکر شده برای شتاب، شبیه سازی کرده و پارامترهای مربوطه، همچون ماکزیمم میزان خمش، تنش، کرنش مکانیکی، کرنش الاستیکی، ولتاژ تحریک، ولتاژ شکست، فرکانس تشدید، ضریب دمپینگ، نرخ دمپینگ، ضریب کیفیت و ظرفیت خازنی را بر حسب شتاب بدست آوردیم و در نهایت مقادیر مربوط به این پارامترها و همچنین نمودارهای مقایسه این پارامترها را برای پل‌های ارائه شده به طور کامل گزارش نمودیم. همان طور که قبلا هم ذکر شد یکی از پارامترهایی که می‌توانیم با کاهش آن ولتاژ تحریک را پایین بیاوریم ضریب فنر می‌باشد (ضریب فنر از ساختار ۱ به۷ کاهش میابد) بنابراین ما با طرح یک پل جدید توانستیم ضریب فنر را تا حد قابل قبول به طوری که شتاب‌سنج در رنج کاری خود دچار ناپایداری نشود و قابلیت اطمینان خوبی نیز داشته باشد پایین بیاوریم و بدین صورت به ولتاژ تحریکی کمتر از بقیه طرح‌های ارائه شده برسیم. همچنین طرح پیشنهادی از نرخ دمپینگ و ضریب کیفیت بهینه‌ای در مقایسه با دیگر پل‌ها برخوردار است به این صورت که هم دارای ضریب کیفیتی با مقدار بالا و مناسبی می‌باشد و می‌تواند باعث کاهش تلفات، نویز، توان مصرفی شود و هم با داشتن مقدار مناسب ضریب کیفیت دارای نرخ دمپینگی بالاتر از ساختارهای دیگر باشد که این مزیت باعث کاهش در زمان نشست پل می‌شود و پل پیشنهادی در مدت زمان کمتری می‌تواند به حالت سکون برسد و همچنین از سرعت بالایی نیز برخوردار است. مزیت دیگری که می‌توان برای این طرح برشمرد میزان حساسیت نسبت به شتاب این ساختار می‌باشد که در مقایسه با دیگر ساختارها از حساسیت بالاتری برخوردار است. مهمترین مزیتی که که طرح پیشنهادی را می‌تواند از بقیه طرح‌ها متمایز سازد ساختار فشرده و منحصر به فرد این طرح می‌باشد بدین ترتیب که این طرح توانسته با اشغال حجمی در حدود $\frac{1}{3}$ نسبت به بقیه طرح‌های ارائه شده باعث کاهش در هزینه و بسته بندی آسان تر شود و همچنین به مزایای بسیاری دست پیدا کند البته معایبی هم این طرح قطعا دارد که مهمترین آن میزان تنش باقیمانده بیشتر این طرح نسبت به بقیه ساختارها می‌باشد که این ایراد را با ارائه طرح جدیدتری از پل پیشنهادی با دوار کردن نقاط اتصال توانستیم به حداقل ممکن برسانیم و بدین ترتیب مقدار آن را به بقیه طرح‌ها نزدیک کنیم.

مقدمه

شتاب‌سنج‌**های** MEMS یکی از ساده ترین و در عین حال کاربردی ترین نوع سیستم هـای الکترومکـانیکی هسـتند چون که تقاضاهای زیادی برای استفاده از شتاب‌سنج در کاربردهای خودرویی مانند جایی که آشکارسازی تصـادف یا سیستم پایداری ماشین مورد نظر است وجود دارد. به علاوه به سبب اندازه کوچک و وزن سـبک، در کاربردهـای رباتیک و پزشکی برای کنترل حرکت فعال و برای پایدارسازی عکس در دوربین استفاده می‌شوند. شتاب‌سـنج‌هـای میکروماشین‌کاری شده بر اساس پیزوالکتریکی، خازنی و پیزومقاومتی توسعه داده شده‌اند. که هر روشی مشکلات و مزیت‌های ذاتی خودش را دارد.

MEMS مخفف کلمه Micro Electro Mechanical System است که ریشه آمریکایی دارد. MEMS همچنین به MST (تکنولوژی میکروسیستمها) دراروپا و میکرو مکانیک در ژاپن برمی‌گـردد. MEMS یـک فرآینـد تکنولـوژی است که برای بوجود آوردن سیستم‌ها و همچنین وسایل یکپارچه (مجتمع) خیلی کوچک بکارمی رود که ازعناصر الکتریکی و مکانیکی ترکیب می شوند. آنها با استفاده از تکنیکهای عملیات تک مرحله‌ای و در سایزهای بین کمتـر از میکرومتر تا میلی‌متر طبقه بندی می‌شوند. این وسایل یا سیسـتم‌هـا قابلیـت actuate، کنتـرل و Sense کـردن در مقیاس‌های میکرو و حتی macro (خیلی بزرگ) را دارند.

برای طراحی قطعات MEMS از یک محدوده متنوع و گسترده‌ای از علوم ماننـد: مهندسـی مکانیـک ، علـم مـواد، مهندسی برق، مهندسی شیمی، مهندسی سیالات و ابزار دقیق ااستفاده می‌شود. این ابزار برای کاربردهـای دفـاعی ، دارویی، پزشکی، الکترونیکی و مخابراتی می‌توانند مورد استفاده قـرار بگیرنـد. MEMS هـای کنـونی کـه شـامل شتاب‌سنج‌ها می‌باشند برای سیستم‌هایairbag، هدپرینترهـای جـوهرافشـان، هـدهای read وwrite دیسـک درایـو کامپیوترها، سنسورهای فشار خون، کلید های نوری، بیوسنسورها و... بکارمی‌روند که در حجم‌های عظیم تجـاری تولید می‌شوند.

MEMS به عنوان یکی از تکنولوژیهای برتر قرن ۲۱ به شمار می‌رود که پتانسیل لازم برای متحول ساختن تولیدات مصرفی و صنعتی را دارد. اگرmicro fabrication کردن نیمه‌هادیها را به عنوان اولین انقلاب درتولیدات میکـرو در نظر بگیریم MEMS دومین انقلاب در این زمینه است.

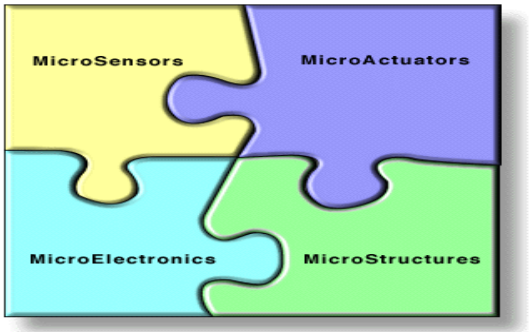
فصل اول

فناوری MEMS

۱- فناوری MEMS

سیستم‌های میکروالکترومکانیکی یا MEMS[1] از تلفیق اجزای مکانیکی، حس کننده‌ها، محرک‌ها و قطعات الکترونیکی بر روی یک لایه سیلیکون به کمک فناوری ساخت تراشه های میکرونی است.

در حالی که قطعات الکترونیکی با استفاده از روال ساخت مدار مجتمع (IC) ساخته می شوند (همانند فرآیندهای(Bipolar, CMOS, BICMOS) عناصر میکروماشین‌ها از طریق فرآیندهای ماشین کاری میکرونی (Micromachining) تولید می شوند به این ترتیب که بر حسب مورد، قسمتهایی از ویفر (Wafer) برداشته شده یا لایه‌های جدیدی به آن اضافه می‌شود.



شکل۱- ۱- اجزای MEMS [30].

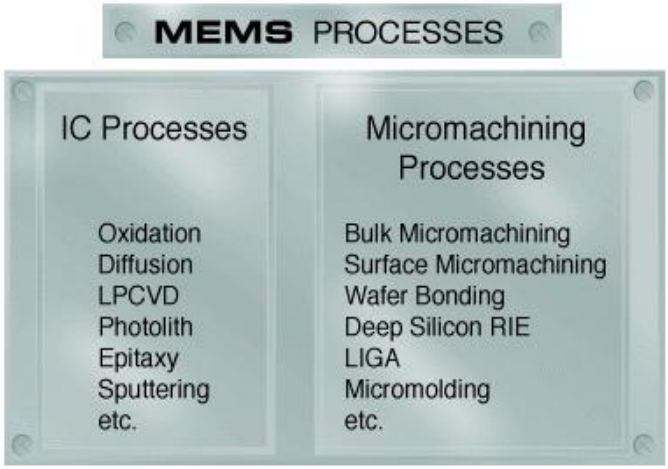
MEMS با تلفیق میکروالکترونیک و با فناوری ماشین‌کاری میکرونی، نوید تحول را تقریبا در هرنوع محصولی می‌دهد تا به این ترتیب به نظام روی یک تراشه جامه عمل بپوشاند. MEMS فناوری واقعاً توانایی است که با درک و کنترل قابلیت‌های میکروسنسورها و میکرومحرکها و به همراه آوردن توانایی محاسبات دستگاههای میکروالکترونیکی‌موجب پیشرفت در تولیدات هوشمند می‌شود. MEMS همچنین فناوری بسیار گسترده و مستعدی در کاربرد و در نحوهٔ ساخت و طراحی ابزارها است.

مدارهای مجتمع میکروالکترونیکی می‌توانند بعنوان مغز متفکر سیستم‌ها باشند و MEMS با اضافه کردن چشم و بازو این قدرت تفکر را توسعه می‌دهد تا این میکروسیستم‌ها بتوانند محیط اطرافشان را حس کرده و کنترل نمایند. این حسگرها در ساده‌ترین حالت خود با کمک اندازه‌گیری پدیده‌های مکانیکی، گرمایی، زیستی، شیمیایی، نوری و مغناطیسی اطلاعات را از محیط جمع آوری می‌کنند. پس از اخذ اطلاعات از حس کننده ها، دستگاههای الکترومکانیکی به کمک قدرت تصمیم‌گیری خود، محرک‌ها را به پاسخ هایی چون: حرکت، جابجایی، تنظیم کردن، پمپ کردن و فیلترکردن وادار کرده و محیط را به سمت نتایج موردنظر هدایت می‌کنند. قطعات MEMS را می‌توان هم مانند IC ها در سطح بسیار بالایی از کارکرد، اطمینان و پیچیدگی و با هزینه اندک بر روی تراشه کوچک

[1] Micro Electro Mechanical System

سیلیکونی و هم به صورت غیر مجتمع شکل داد. فناوریMEMS توانایی کشفیات جدیدی را در علوم و مهندسی دارد مثل: میکروسیستم‌های واکنشهای زنجیره ای پلیمر برای تقویت و شناساییDNA میکروسکپ‌های تونـل‌زنـی پیمایشگر که با فرآیندهای ماشین‌کاری میکرونی ساخته شده‌اند.

تراشه‌های زیستی شناساگر عوامل خطرناک شیمیایی و بیولوژیکی فناوری جهشی میکروسیستم‌ها جهـت غربـال و انتخاب سریع دارو هستند.



شکل۱- ۲- فرآیندهای MEMS [1].

ابزارهای MEMS در بازارهای مختلف صنعتی، تعیین کنندهٔ کیفیت محصولات شده و پیش بینی می شود کـه ایـن فناوری سالانه ۵۰ %رشد داشته باشد.

اگرچه وسایلMEMS خیلی کوچک اند(مثلا MEMS دارای موتورهای الکتریکی کوچکتر از قطر موی انسان است) ولی‌اهمیت فناوریMEMS فقط به اندازهٔ آنها مربوط نمی‌شود به علاوهMEMS فقط به پایه‌سیلیکونی محدود نمی شود، هرچند سیلیکون به دلیل داشتن خواص عالی به یک انتخاب جالب توجه برای مصارف مکانیکی با کیفیت بالا تبدیل شده است مثلا نسبت استحکام به وزن برای سیلیکون از خیلی از مواد مهندسی دیگر بالاتر است، که ساخت وسایل مکانیکی با پهنای‌باندوسیع را ممکن می‌سازد. در عوض MEMS فناوری تولیدی است که راه جدیدی برای ایجاد سیستم‌های الکترومکانیکی با تکنیکهای تولید ناپیوسته را ارائه می‌دهد، مانند روش تولید مدارهای مجتمع که باعث تولید عناصر الکترومکانیکی در کنار قطعات الکترونیکی می شود.

این فناوری تولید جدید مزایای متعددی دارد:

اول اینکه MEMS فناوری گسترده‌ای است که بالفعل می‌تواند تأثیر مهمی برانواع تولیدات تجاری و نظامی بگذارد. هم اکنون MEMS در هر چیزی، از نمایش فشار خون گرفته تا سیستم‌های تعلیق فعال خودروها مورداستفاده قرار می‌گیرد. لذا ماهیت فناوریMEMS و کاربردهای متعددش، آن را از فناوریهای مرسوم حتی مدارهای مجتمع و ریز تراشه‌ها فراگیرتر نموده‌است.

دوم اینکه MEMS فاصله بین سیستم‌های مکانیکی پیچیده و مدارهای مجتمع‌الکترونیکی را پر می کند. حسگرها و محرک‌ها عموماً گران قیمت اند، به علاوه سیستم‌الکترونیکی، محرکها و حسگرها در ابعاد بزرگ قابل اعتماد نیستند. فناوری MEMS امکان ساخت سیستمهای میکروالکترومکانیکی را با استفاده از تکنیک‌های ساخت ناپیوسته فراهم کرده موجب برابری قیمت و اعتبار حسگرها و محرک‌ها با مدارهای مجتمع می‌شود. جالب اینکه انتظار می‌رود کارآیی دستگاهها و ابزارهای MEMS بالاتر از عناصر و سیستمهای مقیاس ماکرو و قیمت آن خیلی پایین‌تر از آن‌ها باشد.

به عنوان یک نمونهٔ جدید از فواید فناوری MEMS می‌توان به شتاب‌سنجهایMEMS اشاره کرد، که به سرعت جایگزین سرعت‌سنجهای مربوط به سیستم‌های کیسهٔ هوا در اتومبیل می‌شود. در روش مرسوم از چندین شتاب‌سنج حجیم شامل اجزای مختلف در جلوی خودرو استفاده می‌شود که قطعات الکترونیکی سیستم در نزدیکی کیسهٔ هوا قرار دارند و قیمت مجموعه بالغ بر۵۰ دلار است.

MEMS این امکان را فراهم کرده تا شتا ب‌سنج وسایل الکترونیکی با هزینه ای کمتر از ۵ تا۱۰دلار در یک ریزتراشهٔ سیلیکونی تلفیق شوند. شتاب‌سنج MEMS خیلی کوچکتر، کارآمدتر، سبکترو قابل اعتمادتر بوده و قیمتی بسیار کمتر از شتاب‌سنج های مرسوم دارد. لذا انتظار می رود ظرف چند سال آینده این شتاب‌سنج ها جایگزین دستگاههای مشابه در کلیه خودروهای خارجی و داخلی گردند.

بهای اندک عناصر شتاب‌سنج MEMS اجازهٔ ساخت کیسهٔ هوا برای حفاظت مسافرین درمقابل ضربات کناری را می دهد. ادامهٔ پیشرفت در فناوری شتاب‌سنج MEMS در ۵ سال آینده، امکان می دهد تا حسگرها، اندازه و وزن یک مسافر را تعیین کرده پاسخ بهینه را محاسبه کنند تاصدمات احتمالی ناشی از کیسه هوا کاهش یابد.

۱-۱- آشنایی با ادوات MEMS

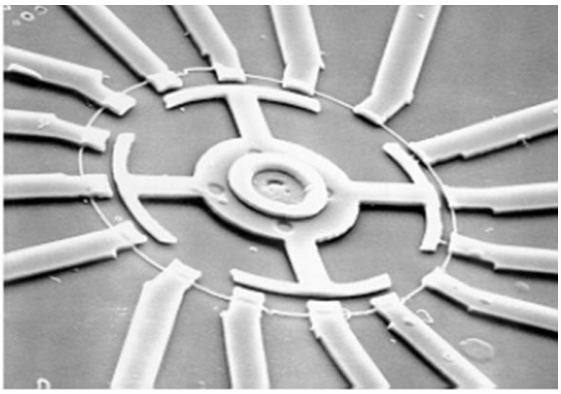
سیستم‌های‌الکترومکانیکی یا همان MEMS اصطلاحی است که اولین بار در سال ۱۹۸۹ توسط پروفسور R.Howe و دستیارانش ابداع شد تا آغازگر زمینه‌ی تحقیقات جدیدی در ارتباط با عناصر مکانیکی نظیر اهرم ها و چرخ دنده ها باشد که بیشتر به میکرو الکترونیک وابسته باشند.

واضح است که این با سایز کوچکتر از ۱۰۰ میکرومتر توسط روش‌های معمول تراشکاری ساخته نمی‌شوند بلکه توسط تکنیک‌های جدیدی در اصطلاح به آن (micro-fabrication) می گویند تولید می‌شوند. این اصطلاح ساده ممکن است شامل میکروالکترونیک نیز شود ولی باید توجه‌داشت که مشخصه‌هایی وجود دارند که MEMS و مدارهای الکترونیک را از هم متمایز می‌سازند . در حالی که مدارهای الکترونیکی دارای ساختار solid و فشرده هستند ادوات MEMS دارای سوراخ‌ها، فرورفتگی‌ها، کانال‌ها، اهرم‌ها و قسمت‌های متحرک هستند و در بعضی

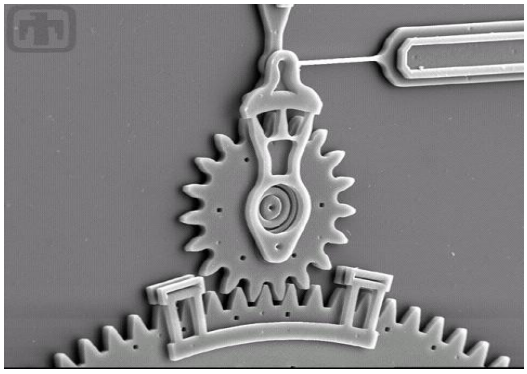
جهات شبیه ادوات مکانیکی عمل می کنند. تاکید MEMS بر استفاده از سیلیکون به وضوح ناشی از تحقیقات گسترده با مواد سیلیکونی و استفاده از این مواد در ساخت مدارهای مجتمع میکروالکترونیک بوده است. ساخت ادوات MEMS تنها بر پایه سیلیکون نبوده بلکه از دیگر مواد نظیر پلیمرها، شیشه، کوارتز و حتی فلزات نیز استفاده می شود. دلیل استفاده روز افزون از ادوات MEMS قابلیت مینیاتورسازی ادوات موجود توسعه ادوات جدید است که توانایی عملکرد در مقیاس بزرگ را نداشته و نیاز به ارتباط با دنیای میکرو را دارند.

مینیاتورسازی یا کوچک‌سازی با کم کردن مواد مصرفی موجب صرفه‌جویی در هزینه‌ها می‌شود همچنین کاهش جرم و اندازه قابلیت استفاده در مکان‌هایی را دارند که ادوات قدیمی هرگز نمی‌توانند داشته باشند. به عنوان مثال می توان به شتاب‌سنج‌های جایگزین سنسورهای کیسه هوای قدیمی اشاره کرد یا شتاب‌سنج‌هایی که در دوربین‌های دیجیتالی جهت ثابت کردن عکس به هنگام لرزش دست به کار می‌روند. مزیت‌دیگرMEMS قابلیت مجتمع شدن آن است بدین صورت که به جای سیم‌کشی و لحیم‌کاری بین قسمت‌های مختلف یک سیستم شامل سنسور و محرک‌ها بر روی برد مدار چاپی امکان مجتمع شدن MEMS بر روی سیلیکون و ارتباط مستقیم با قسمت میکرو الکترونیکی وجود دارد. این قبیل ادوات شامل قسمت های نمونه برداری، فیلترینگ، ذخیره سازی داده‌ها، محرک‌ها، اهرم‌ها، ارتباطات و همه و همه به صورت مجتمع در سایز کمتر از ۱۰۰ میکرومتر هستند پس همان‌طور که مشاهده کردیم قابلیت MEMS فقط کوچک سازی نیست.

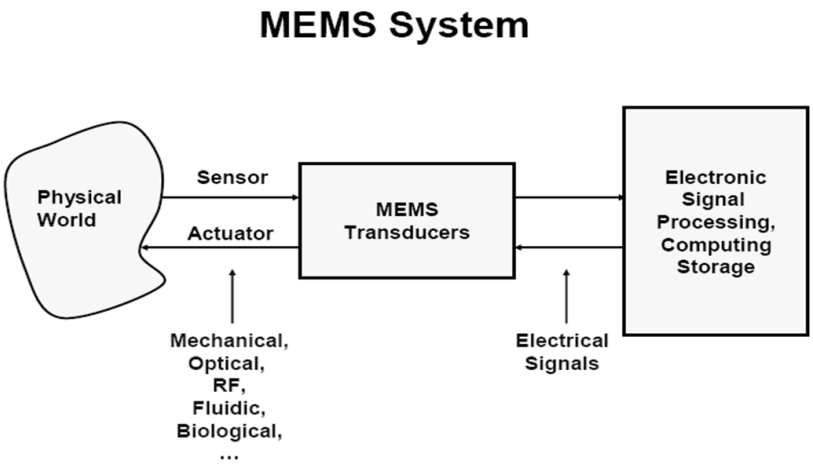
میکروسنسورها تغیرات پیرامون سیستم را به وسیله دریافت اطلاعات پدیده های مکانیکی، حرارتی، مغناطیسی، شیمیایی یا الکترومغناطیسی را نشان می‌دهند. اهرم‌ها، دنده‌ها، پیستون‌ها و موتور ها که در شکل ۱-۳ نشان داده شده است و حتی توربین های بخار به خوبی به وسیله MEMS ساخته می شوند.



شکل۱- ۳- الف- میکرو موتور ساخته شده با استفاده از فناوری MEMS [1].



شکل ۱- ۳- ب- چرخ دنده ساخته شده با استفاده از فناوری MEMS[27].



شکل۱-٤- جایگاه MEMS [9].

ادوات MEMS که تاکنون به صورت تجاری تولید شده اند به ٦ دسته کلی به صورت زیر تقسیم می‌شوند :

جدول۱- ۱-دسته بندی ادواتMEMS [9].

Product category	**Example**
Pressure sensor	Manifold pressure (MAP) ,tire pressure, blood pressure, …
Inertia sensor	Accelerometer, gyroscope, crash sensor, …
Microfluideics / Bio MEMS	Inkjet printer nozzle, micro-bio-analysis system, DNA chip, …
Optical MEMS / MOEMS	Micro-Mirror array for projection (DLP), Micro-grating array for projection (GLV), Optical fiber switch, adaptive optics, …
RF MEMS	High Q-inductor, switches, antenna, filter, …
Other	Relays, Microphone, Data storage, toys, …

از شرکت‌های معتبر در ساخت ادوات MEMS می توان به Motorola، Analog Devices و ... اشاره کرد.