



دانشکده فنی مهندسی

گروه مهندسی برق

طراحی و شبیه سازی یک سنسور زاویه سنج از طریق تکنولوژی میکروماشین

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

استاد راهنما:

دکتر ابراهیم عباسپورثانی

اساتید داور:

دکتر بهبود مشعوفی دکتر محمد نقی آذرمنش

توسط:

رسول سلیمی

شهریور ۱۳۹۳

حق طبع و نشر این پایان نامه متعلق به دانشگاه ارومیه است.

تقدیم بہ

دردانہ می آفرینش

حضرت حجہ ابن الحسن (عج)

تشکر و قدردانی

سپاس و حمد بی کران مخصوص آن یکتای بی همتایی است که رحمتش غالب بر سایر صفاتش است. همه پیروزی‌ها و شکست‌ها به ید قدرت اوست و هیچ کس را یارای مقابله با او نیست. اگر اندکی از نگاه مهربانانه او کم می شد عقل‌ها همگی زایل و بدن‌ها تباه می گشت. در آن هنگام پیشرفتی در علم میسر نبود و هیچ ایده تازه‌ای مطرح نمی شد.

سپس سپاس بی کران تقدیم به امام عصر (عج) که اگر دعای شب و روز او نبود عذاب از آسمان و زمین بر ما بندگان گناه کار می بارید. اگر اندکی از خودمان لیاقت نشان می دادیم، چشمانمان با دیدن چهره دلربایش، گوشمان با شنیدن کلام شیرینش و زندگی‌مان با مدیریت بی نظیرش برکت می یافت. بعد از آن تشکر و قدردانی فراوان از مادر مهربان و پدر دلسوزم که نهایت تلاششان را برای پیشرفت درسی من در همه مراحل انجام داده اند. اگر کمک‌ها و حمایت‌های آنها نبود هرگز تا این مرحله پیش نمی رفتم و سر از یک زندگی دیگر در می آوردم.

بعد از آن از استاد گرانقدر و مهربانم جناب آقای دکتر ابراهیم عباسپور ثانی تشکر و قدردانی فراوان می کنم. در روزگاری که هر روز اخلاقیات و خوبی‌ها جایشان را به نامردی‌ها و بد اخلاقی‌ها می دهند ایشان با صبر و مهربانی فراوان پاسخ سوالات من را می دادند و با برخورد مناسب روحیه من را برای ادامه کار می افزودند. و از اساتید محترم جناب آقایان دکتر بهبود مشعوفی و دکتر محمد نقی آذرمنش که زحمت داوری این رساله را متقبل شدند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

بعد از آن از آقایان مهندس جواد شهاوند، سروش کیانی، شهرام آقایی، مهندس حسین سلیمی، مهندس علیرضا فرامرزی فرد، محمد حسن جمالی، مهندس علی خدادادی، سینا کوهستانی و مهندس فرشاد فراهی که در طی این مدت همراه و کمک من بودند بسیار متشکرم.

چکیده

در این پایان نامه یک سنسور زاویه سنج ۲ جهته که از طریق تکنولوژی میکروماشین قابل ساخت است ارائه شده است. این سنسور توانایی اندازه گیری زاویه تا رنج $\pm 90^\circ$ در دو جهت X و Y را دارا می باشد. در این سنسور از فنر های جدیدی که به صورت صلیب شکسته قرار گرفته اند استفاده شده است. این فنر ها تقارن مناسبی در جهات X و Y به دست می دهند و ثابت فنر پایین در این جهات و سختی بالا در جهت Z دارند. در این سنسور از تیغه های جدیدی استفاده شده است. این تیغه ها خروجی نسبتاً خطی می دهند و حساسیت بسیار بالایی دارند. این تیغه ها در جهات X و Y به صورت دیفرانسیلی و در جهت Z به صورت غیر دیفرانسیلی عمل می کنند. همچنین توانایی مهار تنش ها و ضربه های شدید وارد شده به سنسور را دارا می باشند. به ازای تغییرات زاویه از ۰ تا ۹۰ درجه تغییرات خروجی این سنسور 2.3pF خواهد بود. با توجه به این میزان تغییرات حساسیت سنسور تا $25.44 \text{ fF}/^\circ$ افزایش یافته است. چیدمان الکتروود ها طوری قرار گرفته است که الکتروود های مربوط به جهت X با الکتروود های مربوط به جهت Y مجزا باشند. کل سنسور از فلز نیکل ساخته شده است. روش الکتروپلیتینگ نیکل باعث می شود بتوانیم خیلی راحت تر و با امکانات ارزانتر این سنسور را بسازیم. ابعاد این سنسور $1525\mu\text{m} \times 1525\mu\text{m}$ است.

کلید واژه: زاویه سنج خازنی - میکروماشین - الکتروود های دیفرانسیلی - نرم افزار COMSOL

فهرست مطالب :

فصل اول : مقدمه

- ۱-۱ پیشرفت کنترل به وسیله سنسور های اینرسی MEMS ۱
- ۲-۱ آینده بازار سنسور های اینرسی MEMS ۲
- ۳-۱ آینده تکنولوژی سنسور های اینرسی MEMS ۳
- ۴-۱ کاربرد های سنسور زاویه سنج ۵

فصل دوم : انواع سنسور های زاویه سنج

- ۱-۲ مقدمه ۶
- ۲-۲ سنسور زاویه سنج الکترولیتی ۶
- ۳-۲ سنسور زاویه سنج آونگ گاز (جریان گرمایی) ۷
- ۴-۲ سنسور زاویه سنج MEMS ۸
- ۱-۴-۲ کار های مرتبط MEMS ۸

فصل سوم : پیش زمینه تئوری مکانیکی در سنسور های زاویه سنج MEMS

- ۱-۳ مقدمه ۱۴
- ۲-۳ سیستم جرم-فنر در سنسور زاویه سنج ۱۴
- ۳-۳ فنر Fixed-Fixed (دو سر ثابت) ۱۵
- ۴-۳ فنر Crab Leg (پا خرچنگی) ۱۶
- ۵-۳ فنر Folded (تا شده) ۱۷
- ۶-۳ فنر Serpentine (مارپیچی) ۱۸
- ۷-۳ روابط ریاضی حاکم بر سنسور زاویه سنج خازنی MEMS ۱۹

فصل چهارم : طراحی و شبیه سازی سنسور زاویه سنج خازنی

- ۱-۴ مقدمه ۲۲
- ۲-۴ انتخاب الکتروود سنسور ۲۳
- ۱-۲-۴ ساختار اول ۲۳
- ۲-۲-۴ ساختار دوم ۲۴
- ۳-۲-۴ ساختار سوم ۲۶
- ۴-۲-۴ ساختار چهارم ۲۷
- ۵-۲-۴ ساختار پنجم ۲۸
- ۳-۴ تئوری حاکم بر صفحات خازنی سنسور پیشنهادی ۳۰
- ۱-۳-۴ جابجایی الکتروود متحرک فقط در جهت محور X ۳۲
- ۲-۳-۴ جابجایی الکتروود متحرک فقط در جهت محور Z ۳۳

۳۳	۳-۳-۴ جابجایی الکتروود متحرک فقط در جهت محور Y
۳۳	۴-۳-۴ جابجایی الکتروود متحرک در جهت محور X و Z به طور همزمان.....
۳۴	۵-۳-۴ جابجایی الکتروود متحرک در جهت محور X و Y به طور همزمان.....
۳۴	۶-۳-۴ جابجایی الکتروود متحرک در جهت محور Y و Z به طور همزمان.....
۳۴	۴-۴ طرح سنسور پیشنهادی.....
۳۷	۵-۴ نتایج شبیه سازی.....
۳۷	۱-۵-۴ زاویه فقط در جهت X (Y) به سنسور اعمال می شود.....
۴۰	۲-۵-۴ شتاب فقط در جهت Z به سنسور اعمال می شود.....
۴۱	۳-۵-۴ زاویه در جهت X و Y به سنسور اعمال می شود.....
۴۳	۴-۵-۴ زاویه در جهت X و Z به سنسور اعمال می شود.....
۴۴	۵-۵-۴ خم شدن الکتروود ها تحت زاویه.....
۴۴	۶-۵-۴ چرخش جسم متحرک.....
۴۵	۷-۵-۴ حداکثر استرس اعمالی به فنر ها.....
۴۶	۸-۵-۴ حساسیت در جهت X و Y
۵۱	۹-۵-۴ حساسیت در جهت Z
۵۱	۱۰-۵-۴ ثابت فنر در جهت X و Y
۵۱	۱۱-۵-۴ ثابت فنر در جهت Z
۵۱	۱۲-۵-۴ فرکانس رزونانس.....
۵۲	۶-۴ پروسه ساخت.....

فصل پنجم : نتیجه گیری و مقایسه

۶۰	۱-۵ مقدمه.....
۶۰	۲-۵ خلاصه دستاورد های پایان نامه.....
۶۱	۳-۵ مقایسه کار انجام شده با کار های دیگران.....
۶۱	۴-۵ نتیجه گیری.....
۶۲	۵-۵ پیشنهادات.....
۶۳	مراجع.....
۶۶	پیوست ها.....

فهرست جداول :

- جدول ۱-۳ : پارامتر های مورد استفاده برای فرمول های فنر دو سر ثابت..... ۱۶
- جدول ۲-۳ : پارامتر های مورد استفاده برای فرمول های فنر پا خرچنگی..... ۱۷
- جدول ۳-۳ : پارامتر های مورد استفاده برای فرمول های فنر تا شده..... ۱۸
- جدول ۴-۳ : پارامتر های مورد استفاده برای فرمول های فنر مارپیچی..... ۱۹
- جدول ۵-۳ : مقایسه ی حساسیت و رنج اندازه گیری سنسور زاویه سنج و شتاب سنج..... ۲۰
- جدول ۱-۴ : مشخصات کامل سنسور زاویه سنج پیشنهادی..... ۵۹
- جدول ۱-۵ : مقایسه کار انجام شده با کار های دیگران..... ۶۱

فهرست تصاویر :

- شکل ۱-۱ : انواع سنسور های اینرسی..... ۲
- شکل ۱-۲ : پیش بینی بازار فروش سنسور های اینرسی MEMS توسط شرکت Yole..... ۳
- شکل ۱-۳ : مسیر پیشرفت تکنولوژی برای سنسور های اینرسی MEMS..... ۴
- شکل ۱-۲ : شمای ظاهری یک سنسور زاویه سنج الکترولیتی..... ۷
- شکل ۲-۲ : نحوه عملکرد سنسور زاویه سنج الکترولیتی..... ۷
- شکل ۲-۳ : شمای ظاهری سنسور زاویه سنج آونگ گاز..... ۷
- شکل ۲-۴ : نحوه عملکرد سنسور زاویه سنج آونگ گاز..... ۸
- شکل ۲-۵ : (a) نیرو های وارد شده به سیستم جرم-فنر تحت زاویه (b) نحوه ی تغییرات سطح مشترک و فاصله ی هوایی بین الکتروود های مورب..... ۹
- شکل ۲-۶ : نمای ظاهری از سنسور مرجع [1]..... ۹
- شکل ۲-۷ : نمای ظاهری الکتروود ها ، دید سه بعدی و دید از بالای سنسور مرجع [3]..... ۱۰
- شکل ۲-۸ : استفاده از سنسور زاویه سنج در مطالعات پزشکی..... ۱۰
- شکل ۲-۹ : نمای ظاهری از سنسور مرجع [2]..... ۱۱
- شکل ۲-۱۰ : ساختار تیغه های سنسور مرجع [2]..... ۱۱
- شکل ۲-۱۱ : عکس گرفته شده از تیغه های سنسور مرجع [2]..... ۱۱
- شکل ۲-۱۲ : نمای ظاهری از سنسور مرجع [4]..... ۱۲
- شکل ۲-۱۳ : اتصالات الکتریکی و نمای ظاهری از سنسور مرجع [5]..... ۱۲
- شکل ۲-۱۴ : نمونه ای از یک سنسور شتاب سنج پاندولی. (a) دید از بالا (b) دید از پایین..... ۱۲
- شکل ۲-۱۵ : نمای ظاهری سنسور ADXL202 ساخت شرکت analog devices (تصویر از بالا)..... ۱۳
- شکل ۳-۱ : نیرو های اعمال شده به سیستم جرم-فنر که تحت زاویه قرار گرفته است..... ۱۴
- شکل ۳-۲ : ساختار فنر دو سر ثابت..... ۱۵
- شکل ۳-۳ : ساختار فنر پا خرچنگی..... ۱۶
- شکل ۳-۴ : ساختار فنر تا شده..... ۱۷
- شکل ۳-۵ : ساختار فنر مارپیچی..... ۱۸
- شکل ۳-۶ : ساختار فنر مارپیچی به همراه جزئیات..... ۱۸
- شکل ۳-۷ : شماتیک اندازه گیری برای سنسور زاویه سنج [24]..... ۲۰
- شکل ۴-۱ : شکل الکتروود های ساختار اول (دید از روبرو)..... ۲۳
- شکل ۴-۲ : شکل الکتروود های ساختار اول (دید سه بعدی)..... ۲۳
- شکل ۴-۳ : نمودار تغییرات خازنی بر حسب جابجایی ساختار اول..... ۲۴
- شکل ۴-۴ : شکل الکتروود های ساختار دوم (دید از روبرو و دید سه بعدی)..... ۲۵

- شکل ۴-۵: نمودار تغییرات خازنی بر حسب جابجایی ساختار دوم..... ۲۵
- شکل ۴-۶: شکل الکتروود های ساختار سوم (دید از روبرو)..... ۲۶
- شکل ۴-۷: شکل الکتروود های ساختار سوم (دید سه بعدی)..... ۲۶
- شکل ۴-۸: نمودار تغییرات خازنی بر حسب جابجایی ساختار سوم..... ۲۷
- شکل ۴-۹: شکل الکتروود های ساختار چهارم (دید از روبرو)..... ۲۷
- شکل ۴-۱۰: شکل الکتروود های ساختار چهارم (دید سه بعدی)..... ۲۸
- شکل ۴-۱۱: نمودار تغییرات خازنی بر حسب جابجایی ساختار چهارم..... ۲۸
- شکل ۴-۱۲: شکل الکتروود های ساختار پنجم (دید از روبرو)..... ۲۹
- شکل ۴-۱۳: شکل الکتروود های ساختار پنجم (دید سه بعدی)..... ۲۹
- شکل ۴-۱۴: نمودار تغییرات خازنی بر حسب جابجایی ساختار پنجم..... ۳۰
- شکل ۴-۱۵: شمای کلی الکتروود های پیشنهادی (دید از روبرو)..... ۳۰
- شکل ۴-۱۶: شمای کلی الکتروود های پیشنهادی (دید از روبرو) که در آن الکتروود متحرک به سمت راست جابجا شده است..... ۳۱
- شکل ۴-۱۷: شمای کلی الکتروود های پیشنهادی (دید از روبرو) که در آن الکتروود متحرک به سمت بالا جابجا شده است..... ۳۱
- شکل ۴-۱۸: طرح اصلی سنسور پیشنهادی (دید سه بعدی)..... ۳۴
- شکل ۴-۱۹: مکانیزم عملکرد سنسور پیشنهادی (دید از بالا)..... ۳۵
- شکل ۴-۲۰: شمای ساده ای از جسم متحرک بدون الکتروود ها به همراه فنر های پیشنهادی..... ۳۵
- شکل ۴-۲۱: شمای اصلی سنسور پیشنهادی..... ۳۶
- شکل ۴-۲۲: قسمتی از سنسور که شامل جسم متحرک ، الکتروود متحرک و فنر می شود (ناحیه ۱ در شکل ۴-۲۱)..... ۳۷
- شکل ۴-۲۳: قسمتی از سنسور که دید از روبروی الکتروود ها را نشان می دهد (ناحیه ۲ در شکل ۴-۲۱)..... ۳۷
- شکل ۴-۲۴: جابجایی جسم متحرک در جهت X به ازای زاویه ۹۰ درجه در جهت X..... ۳۸
- شکل ۴-۲۵: جابجایی جسم متحرک در جهت Y به ازای زاویه ۹۰ درجه در جهت X..... ۳۸
- شکل ۴-۲۶: جابجایی جسم متحرک در جهت Z به ازای زاویه ۹۰ درجه در جهت X..... ۳۹
- شکل ۴-۲۷: نمودار جابجایی مرکز جسم متحرک در جهت X بر حسب زاویه متغییر در جهت X..... ۴۰
- شکل ۴-۲۸: جابجایی جسم متحرک در جهت X به ازای شتاب $1g$ در جهت Z..... ۴۱
- شکل ۴-۲۹: جابجایی جسم متحرک در جهت Z به ازای شتاب $1g$ در جهت Z..... ۴۱
- شکل ۴-۳۰: نمودار جابجایی مرکز جسم متحرک در جهت X به ازای زاویه ثابت ۹۰ درجه در جهت X و زاویه متغییر ۰ تا ۹۰ درجه در جهت Y..... ۴۲

- شکل ۴-۳۱ : جابجایی جسم متحرک در جهت X به ازای اعمال همزمان زاویه ۹۰ درجه در جهت های X و Y..... ۴۲
- شکل ۴-۳۲ : جابجایی جسم متحرک در جهت X به ازای اعمال شتاب 1g در جهت Z و زاویه ۹۰ درجه (معادل شتاب 1g) در جهت X..... ۴۳
- شکل ۴-۳۳ : نمودار جابجایی مرکز جسم متحرک در جهت X به ازای زاویه ثابت ۹۰ درجه در جهت X و شتاب متغییر 0-1g در جهت Z..... ۴۳
- شکل ۴-۳۴ : نمودار میزان جابجایی یک الکتروود بالایی تحت زاویه ۹۰ درجه در جهت X..... ۴۴
- شکل ۴-۳۵ : میزان استرس اعمالی به سنسور تحت زاویه ۹۰ درجه در جهت X..... ۴۵
- شکل ۴-۳۶ : میزان استرس اعمالی به سنسور تحت شتاب 1g در جهت Z..... ۴۶
- شکل ۴-۳۷ : نمودار تغییرات خازن بر حسب زاویه به ازای زاویه متغییر در جهت X..... ۴۷
- شکل ۴-۳۸ : نمودار تغییرات خازن بر حسب زاویه به ازای زاویه متغییر در جهت X+ با حذف نمودار های غیر دیفرانسیلی..... ۴۷
- شکل ۴-۳۹ : بررسی میزان غیر خطی بودن نمودار حساسیت از طریق نرم افزار EXCEL..... ۴۸
- شکل ۴-۴۰ : خطی سازی نمودار حساسیت از طریق دو نمودار خطی توسط نرم افزار EXCEL..... ۴۹
- شکل ۴-۴۱ : نمودار تغییرات خازن بر حسب شتاب به ازای شتاب متغییر در جهت X+..... ۵۰
- شکل ۴-۴۲ : بررسی میزان غیر خطی بودن سنسور بر حسب شتاب توسط نرم افزار EXCEL..... ۵۰

فصل اول

مقدمه

چند سالی است که تکنولوژی میکروماشین به منظور اندازه گیری پدیده های فیزیکی از جمله ، فشار، شتاب، سرعت زاویه ای و موقعیت برای کاربرد های مکاترونیک مانند اتومبیل ها ، سیستم های دریانوردی ، وسایل پزشکی ، سیستم های کنترل ربات ، وسایل الکترونیکی قابل حمل و ... مورد استفاده قرار می گیرد. اخیراً سنسور های زاویه سنج که بر پایه سنسور های اینرسی هستند ، به عنوان یک جزء مهم از سیستم های اندازه گیری موقعیت مورد توجه قرار گرفته اند. در مقایسه با سنسور های زاویه سنج معمولی که از روش هایی مثل الکتروولیت و جریان گرمایی استفاده می کنند، روش اندازه گیری الکترومکانیکی چند مزیت دارد. از جمله : مصرف توان کم ، طول عمر زیاد ، پروسه ساخت ساده و وابستگی دمایی کم [1].

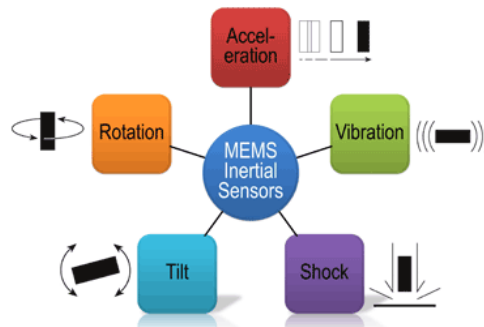
هزینه ی کم و انعطاف پذیری بالا و همچنین کوچک بودن سنسور های میکروماشینی باعث علاقه روز افزون به این تکنولوژی در سال های اخیر شده است. استفاده از تکنولوژی میکروماشین باعث کاهش هزینه ساخت و افزایش کیفیت سنسور ها شده است و این امر باعث تحقیقات گسترده در سراسر جهان در این زمینه شده است.

۱-۱ پیشرفت کنترل به وسیله سنسور های اینرسی MEMS

تکنولوژی سنسور باعث پیشرفت های انقلابی در زمینه رباتیک و سیستم های صنعتی شده است. علاوه بر رباتیک ، کاربرد هایی که سنسور های اینرسی ایجاد کرده اند ، عملکرد سیستم ها ، کنترل حرکت برای ماشین های صنعتی ، وسایل امنیتی/نظارتی و هدایت سیستم های صنعتی را خیلی بهتر کرده است. اطلاعات حرکتی که از طریق این سنسور ها تولید می شود ، نه تنها می تواند کارایی را افزایش دهد بلکه اطمینان پذیری ، ایمنی و قیمت تمام شده را تحت تاثیر قرار می دهد.

لیکن موانعی برای رسیدن به این ویژگی ها وجود دارد. به ویژه مشکل شرایط محیطی که در کار های صنعتی وجود دارد مانند دما ، لرزش ، ضربه ، فضای محدود و ... که بایستی مورد توجه قرار بگیرند. استخراج سیگنال از سنسور ، تبدیل این سیگنال به اطلاعات مفید و واکنش به آن و کنترل توان و زمان ، نیازمند کارشناسی در همه زمینه های مهندسی و طراحی است.

اطلاعات سنسور های اینرسی می تواند به منظور انجام حرکت ، کنترل مکان و تولید خروجی های بی واسطه مورد استفاده قرار گیرند. هر کدام از این رفتار ها که دارای رنج وسیع تری باشد ، پیچیدگی بیشتری ایجاد خواهد کرد. یک مثال خوب از این سیستم های کنترل ، نشانه روی و هدایت در وسایل نظامی است. اندازه زاویه یا شیب معمولاً هسته مرکزی این کاربرد ها را تشکیل می دهد.



شکل ۱-۱: انواع سنسور های اینرسی

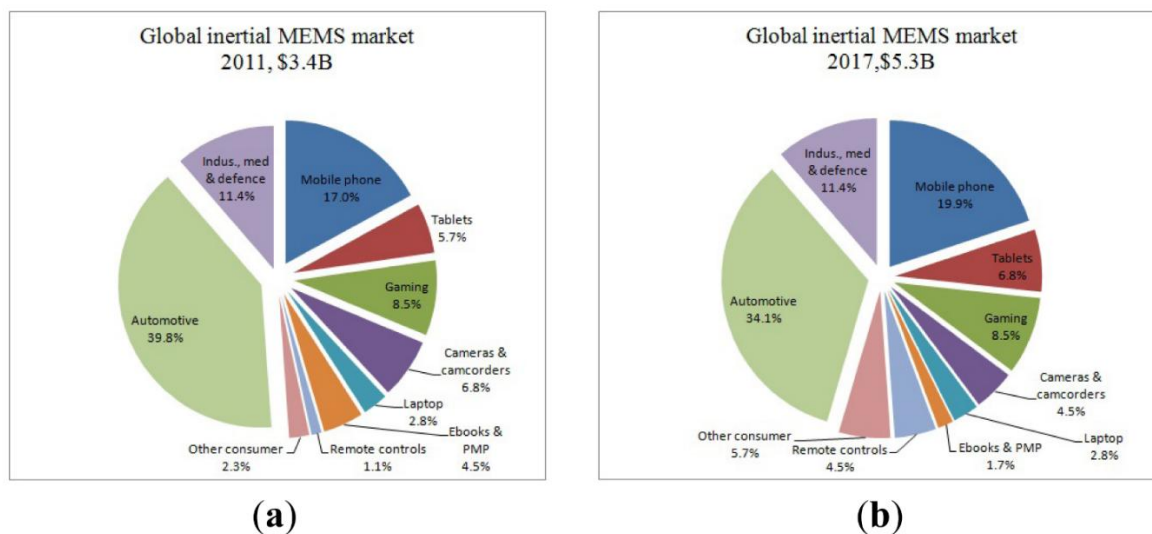
اگر حرکت های سیستم ایستا باشد ، یک سنسور زاویه سنج ساده کافی به نظر می رسد. اما زمان پاسخ دهی، ضربه و لرزش ، اندازه و شیفت پاسخ دهی در طول عمر سنسور نیاز به تکنولوژی پیشرفته تری را سبب می شود. به علاوه بسیاری از سیستم ها بیش از یک نوع حرکت (مثلا چرخش و شتاب به طور همزمان) را در خود دارند و گاهی در چند جهت کار می کنند. در نتیجه راه اندازی نیازمند انواع مختلفی از سنسور می شود. هرگاه سنسور های مناسب و تکنولوژی مربوطه مشخص شدند ، چالش به فهمیدن و نهایتا موازنه کردن عملکرد سنسور در شرایط محیطی (دما ، لرزش ، ضربه ، مکان ، زمان و ...) شیفت پیدا می کند. ارضای شرایط محیطی نیازمند مدارات ، تست کردن ، کالیبره کردن و سازگاری دینامیکی بیشتری است. به علت اینکه هر سنسور یکتا است ، دانستن پارامتر های سنسور از اهمیت بیشتری برخوردار است. این نکته طراحان را به راهکار هایی برای قرار دادن سنسور و مدار پردازشگر در یک بسته بندی سوق می دهد^۱.

۱-۲ آینده بازار سنسور های اینرسی MEMS :

تولیدات MEMS از جمله زاویه سنج ، شتاب سنج ، ژيروسکوپ و ... به طور گسترده ای در تجهیزات نظامی، صنایع ، تلفن های همراه ، اتومبیل و ... مورد استفاده قرار می گیرند. یک گزارش قابل توجه توسط شرکت Yole نشان می دهد که بازار سنسور های MEMS به شدت در آینده پیشرفت خواهد کرد. در آمد کلی سنسور های اینرسی MEMS در سال ۲۰۱۱ از ۳/۴ میلیارد دلار فراتر رفته است و این رکورد در سال ۲۰۱۷ از ۵/۳ میلیارد دلار هم عبور خواهد کرد. بیشترین کاربری سنسور های اینرسی MEMS در صنایع اتومبیل است که در آینده باز هم افزایش خواهد داشت. کاربرد ژيروسکوپ های MEMS در تبلت ها و تلفن های همراه سهم بیشتر و بیشتری را از آن خود خواهد کرد. در سال ۲۰۱۰ ژيروسکوپ های MEMS فقط در ۲٪ از تلفن های همراه و تبلت ها استفاده می شده است. در حالیکه این سهم به سرعت پیشرفت خواهد کرد و در سال ۲۰۱۷ به ۶۰٪ خواهد رسید^۲.

¹http://www.electronicproducts.com/Sensors_and_Transducers/Sensors_and_Transducers/Improving_control_with_MEMS_inertial_sensors.aspx

² <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/1/1394/htm>

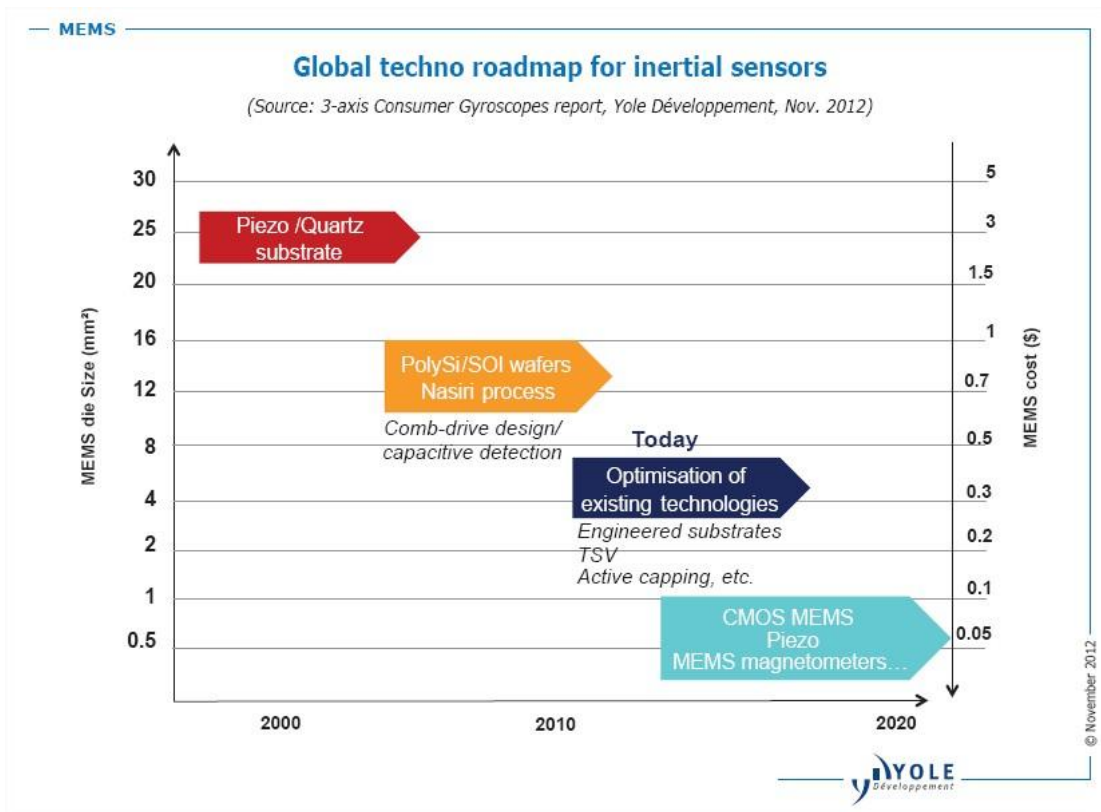


شکل ۱-۲: پیش بینی بازار فروش سنسور های اینرسی MEMS توسط شرکت Yole

۱-۳ آینده تکنولوژی سنسور های اینرسی MEMS:

بازار سنسور های اینرسی MEMS در سال ۲۰۱۳، ۱۱٪ رشد (معادل ۴ میلیارد دلار) را نشان می دهد. شرکت Yole در مورد نسل بعدی سنسور های اینرسی تحقیقات گسترده ای انجام داده است و با استفاده از نتایج آماری روند رشد این تکنولوژی را بررسی کرده است. در این تحلیل در آینده ای نزدیک تکامل بسته بندی توسط گروه های صنعتی MEMS و شرکت SUSS Microtec تعیین خواهد شد. بر این اساس تمایل شرکت های MEMS تولید سنسور هایی است که با تکنولوژی CMOS همخوانی داشته باشند و سنسور و پردازشگر در یک بسته بندی قرار بگیرند.

در ابتدا تکنولوژی MEMS بر روی ویفر های پیزویی و کوارتز پیاده سازی می شده است. این امر هزینه ساخت و اندازه ی سنسور را افزایش می داده است. نسل بعدی سنسور هایی هستند که بر روی ویفر های SOI و پلی سیلیکان تولید می شوند. شرکت Yole معتقد است امروزه ما در این نسل از سنسور های MEMS هستیم و همچنان پیشرفت در این نسل ادامه دارد. پیش بینی ها حاکی از این است که نسل بعدی سنسور های MEMS که به طور کامل با تکنولوژی CMOS همخوانی دارند در حال ظهور و گسترش است و از این پس مشکلی از بابت ساخت سنسور و مدار پردازشگر بر روی یک die وجود نخواهد داشت.



شکل ۱-۳: مسیر پیشرفت تکنولوژی برای سنسورهای اینرسی MEMS

با توجه به ادعای SUSS Microtec ساخت سنسورهای 2.5D و 3D علاوه بر کاهش اندازه، بازدهی را از طریق ساخت مدار پردازشگر و سنسور بر روی یک die افزایش می دهد. اخیراً شرکت TSV سطح بالاتری از این امر را به همراه کوچک کردن اندازه بسته بندی ارائه داده است. در SUSS Microtec بهبودها و چالش هایی برای این تکنولوژی ارائه کرده اند. این شرکت همچنین در بسته بندی در سطح ویفر و ساخت سنسور و مدار بر روی یک die بهبودهایی را صورت داده است. با توجه به این مطالب تکنولوژی ساخت سنسورهای اینرسی در آینده باعث کاهش اندازه و قیمت و افزایش عملکرد خواهد بود.^۳

³ <http://www.i-micronews.com/news/Inertial-MEMS-manufacturing-trends-%E2%80%9C%E2%80%A6-There-is-growing,11138.html>

۴-۱ کاربرد های سنسور زاویه سنج :

- در سنسور های زاویه سنج اغلب زاویه در یک جهت یا دو جهت اندازه گیری می شود و اندازه گیری زاویه در سه جهت تقریباً کاربردی ندارد.
- سنسور های زاویه سنج کاربرد های متنوعی دارند که از جمله آنها می توان به موارد زیر اشاره کرد :
- ۱- در صنعت اتومبیل سازی با استفاده از سنسور زاویه سنج ، می توان شیب جاده را اندازه گیری کرد و از این طریق میزان مصرف سوخت را کنترل کرد. به نحوی که وقتی خودرو در سربالایی قرار می گیرد مصرف سوخت افزایش می یابد و وقتی خودرو در سرازیری قرار می گیرد مصرف سوخت کاهش می یابد.
 - ۲- در صنایع نظامی می توان برای کنترل موشک های دور برد زمین به زمین ، هوا به زمین ، زمین به هوا و هوا به هوا از سنسور زاویه سنج استفاده کرد. در این کاربرد زاویه حرکت موشک در هر لحظه اندازه گیری می شود و از این طریق مسیر حرکتی و تعادل موشک حفظ می شود.
 - ۳- در صنایع هوا و فضا برای ارسال ماهواره به فضا زاویه ی موشک ماهواره بر در هر لحظه باید محاسبه گردد.
 - ۴- در صنایع هوایی در هواپیماها تشخیص زاویه ی هواپیما با افق در هر لحظه و به خصوص در زمان اوج گیری و فرود از اهمیت ویژه ای برخوردار است.
 - ۵- در رباتیک برای اندازه گیری زاویه بازو های ربات ، حفظ تعادل ربات و چگونگی حرکت ربات از این سنسور می توان استفاده کرد.
 - ۶- در کاربرد های پزشکی برای دستیابی به الگو های حرکتی و تشخیص مشکلات جسمی از سنسور های زاویه سنج استفاده می شود.
 - ۷- در گوشی های تلفن همراه امروزی ، این سنسور برای چرخاندن تصویر یا انجام بازی مورد استفاده قرار می گیرد.

فصل دوم

انواع سنسور های زاویه سنج

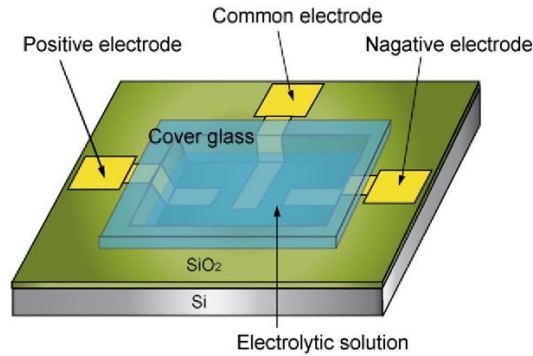
۲-۱ مقدمه :

تا کنون با روش های متعددی سنسور های زاویه سنج تولید شده اند و در کاربرد های خاصی مورد استفاده قرار گرفته اند. این روش ها عبارتند از : MEMS ، الکترولیت و آونگ گاز. هر یک از این روش ها معایب و مزایای خاص خود را دارند که در ادامه به اختصار به هر یک از آنها خواهیم پرداخت و در پایان روابط ریاضی حاکم بر نوع MEMS (موضوع اصلی مورد بحث) را بررسی خواهیم کرد.

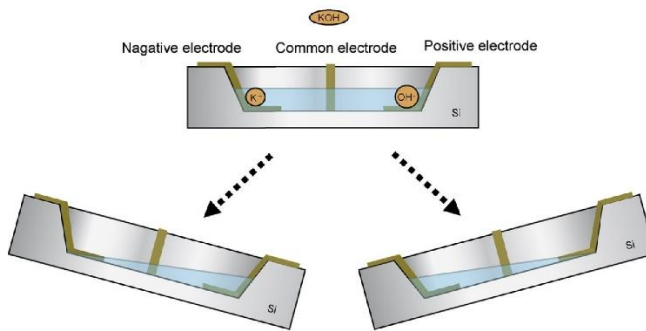
۲-۲ سنسور زاویه سنج الکترولیتی ۴ :

در این ساختار از خواص مایعات استفاده می شود. با توجه به اینکه سطح رویی مایعات همواره به صورت تخت قرار می گیرد ، می توان از این خاصیت برای ساخت سنسور زاویه سنج استفاده کرد. ساختار الکترولیتی از یک مخزن و چند الکتروود فلزی که درون مخزن قرار می گیرند تشکیل می شود. مایعی درون مخزن ریخته می شود که دارای خواص الکتریکی است. وقتی سنسور تحت زاویه قرار می گیرد ، مایع درون آن به یک طرف متمایل می شود و مقاومت الکتریکی بین الکتروود مشترک و الکتروود کناری را تغییر می دهد. با آشکار سازی این مقاومت می توان زاویه ی چرخش را اندازه گیری کرد. در طراحی و ساخت این سنسور پارامتر های محدود کننده زیادی وجود دارند. از جمله: ۱- انرژی کشش سطحی و جاذبه های بین مولکولی مایع مورد استفاده باید تا حد امکان تقلیل یابد. ۲- فضای خالی درون محفظه باید تا حد امکان از گاز ها تخلیه شود و خلا نسبی در محفظه ایجاد شود. ۳- چسبندگی مولکولی بین مایع و ظرف و الکتروود ها باید تا حد امکان کم باشد. ۴- نسبت حجم مایع به حجم فضای خالی نمی تواند از یک حدی پایین تر یا بالاتر باشد. ۵- حجم کلی محفظه نمی تواند از یک حدی کوچکتر باشد. ۶- مایع نباید برای محفظه و الکتروود ها باعث خوردگی ، زنگ زدگی و فرسایش شود و ... [10,11].

⁴ Electrolytic



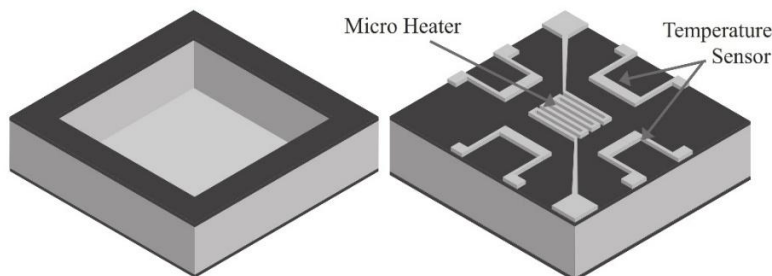
شکل ۱-۲ : شمای ظاهری یک سنسور زاویه سنج الکترولیتی



شکل ۲-۲ : نحوه عملکرد سنسور زاویه سنج الکترولیتی

۳-۲ سنسور زاویه سنج آونگ گاز^۵ (جریان گرمایی^۶):

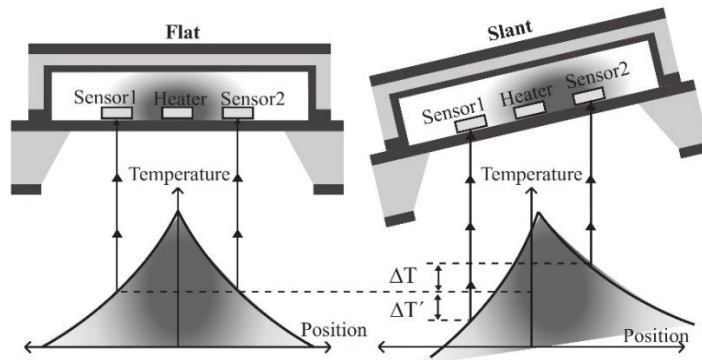
با توجه به اینکه گاز گرم همیشه به سمت بالا حرکت می کند ، از این خاصیت به منظور ساخت سنسور زاویه سنج استفاده می شود. در این ساختار در یک محفظه یک گرماساز در وسط قرار می گیرد و در اطراف آن دماسنج هایی تعبیه می شود. هنگامی که سنسور تحت زاویه قرار می گیرد دمای اندازه گیری شده توسط دماسنج بالایی بیشتر خواهد بود. مساله ی محدود کننده در این ساختار ، کم بودن حجم گاز مورد نظر است. همچنین دقت اندازه گیری در این سنسور بسیار پایین خواهد بود. که باعث کاهش جریان همرفتی و افزایش پاسخ زمانی می شود. حسن اصلی این روش وابسته نبودن سنسور به شتاب اعمالی در جهت اندازه گیری است [7-9].



شکل ۳-۲ : شمای ظاهری سنسور زاویه سنج آونگ گاز

⁵ Gas Pendulum

⁶ Air medium



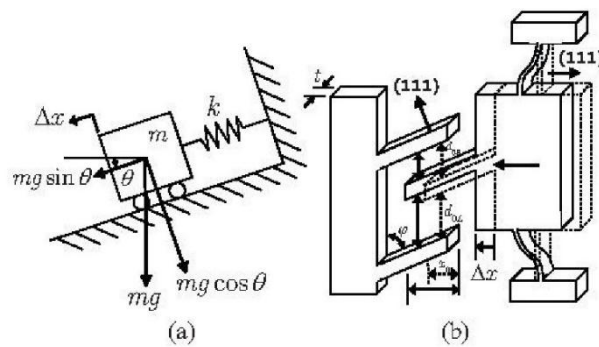
شکل ۲-۴ : نحوه عملکرد سنسور زاویه سنج آونگ گاز

۲-۴ سنسور زاویه سنج MEMS :

ساختار های الکترونیکی و شبکه ی فیبر دارای حجم بسیار زیادی هستند (ابعاد سانتی متر). همچنین زمان پاسخ دهی و هزینه ساخت بسیار بالایی دارند. به همین منظور گرایش به سمت ساختار MEMS افزایش یافته است. در MEMS روش هایی همچون پیزوالکتریک ، پیزورزیستیو ، تونلی ، خازنی و... مرسوم است. برای ساخت سنسور زاویه سنج ، استفاده از روش های پیزو الکتریک (به علت ایستا بودن پارامتر زاویه) و تونلی (به علت هزینه ساخت بسیار بالا) منتفی است. از میان روش های پیزورزیستیو و خازنی ، روش خازنی ترجیه دارد چون اولاً وابستگی دمایی و نویز کمتری دارد و ثانياً در بازه های اندازه گیری پایین (در حد چند g) ساخت آن ساده تر است.

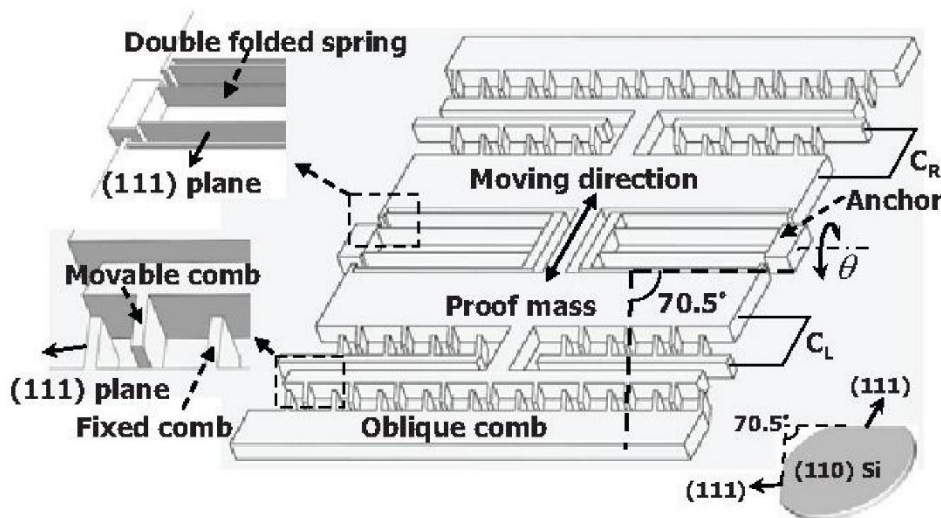
۲-۴-۱ کار های مرتبط MEMS :

در زمینه MEMS کار های متنوعی برای ساخت سنسور زاویه سنج انجام شده است. در بیشتر کار ها سعی بر آن بوده است که از یک سنسور شتاب سنج ، هم به عنوان شتاب سنج و هم به عنوان زاویه سنج استفاده گردد. اما در این میان سنسور هایی فقط به منظور اندازه گیری زاویه طراحی شده اند. در سال ۲۰۰۹ یک سنسور زاویه سنج جدید یک جهته ارائه شده است. ویفر در این سنسور از نوع (1 1 0) است. با توجه به زاویه جهت گیری صفحات {1 1 1} در ویفر نوع (1 1 0) ، الکتروود ها با زاویه ی 70.5 درجه نسبت به جرم اصلی قرار می گیرند که این خود باعث می شود حساسیت سنسور در جهت حرکت افزایش یابد. چون در جابجایی جسم متحرک فاصله ی بین الکتروود ها و سطح مقطع آنها به طور همزمان تغییر خواهند کرد.



شکل ۲-۵: (a) نیرو های وارد شده به سیستم جرم-فنر تحت زاویه (b) نحوه ی تغییرات سطح مشترک و فاصله ی هوایی بین الکترودهای مورب با انجام یک پروسه لایه برداری رقیق KOH^7 که بعد از انجام پروسه DRIE^8 صورت می گیرد، دیواره های عمودی تر و صاف تر ایجاد می شود. با این کار نقص مورفولوژیک^۹ از بین می رود. برای کاهش دادن این نقص دیواره های الکترودها به صفحات $\{111\}$ برخورد می کند.

فنرها هم همچنین به صفحات دیگری از نوع $\{111\}$ برخورد می کنند. این کار باعث می شود در طی عمل لایه برداری رقیق KOH ضخامت ایجاد شده برای فنرها تغییر چندانی نکند. برای جلوگیری از معکوس شدن تغییرات خازن به ازای زاویه ی منفی، الکترودها با فاصله هوایی بهینه ایجاد شده اند. یعنی در یک طرف فاصله هوایی بیشتر و در طرف دیگر کمتر است [1].



شکل ۲-۶: نمای ظاهری از سنسور مرجع [1]

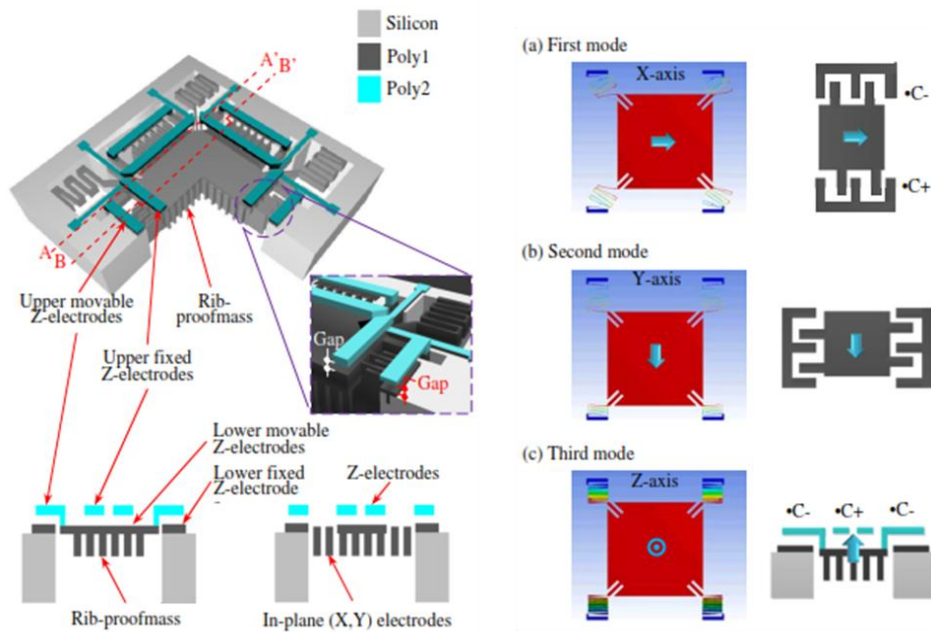
در سال ۲۰۱۳ یک سنسور شتاب سنج سه جهته ساخته شده است. ساختار اصلی این شتاب سنج از یک جسم پلی سیلیکانی دنده ای، فنر و الکترودهای با Aspect-ratio بالا می باشد. با توجه به اینکه بازه ی اندازه گیری در هر سه جهت، 0.1g تا 3g است، می توان از این سنسور به عنوان زاویه سنج هم استفاده کرد. شگردی که در اینجا برای سه جهته کردن سنسور استفاده شده است، تغییر فاصله ی هوایی و سطح مشترک

⁷ Crystalline Wet Etching in KOH

⁸ Deep Reactive Ion Etching

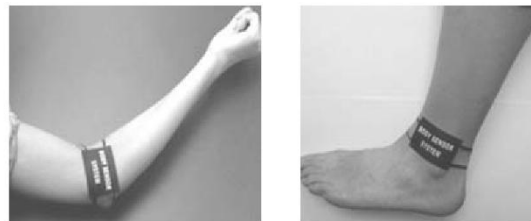
⁹ Morphologic Defect

بین الکتروود متحرک و ثابت به طور همزمان است. به طوری که با جابجایی جسم متحرک در جهت X و Y تغییرات خازنی از نوع تغییر فاصله ی هوایی و در جهت Z از نوع تغییر سطح مشترک رخ می دهد [3].



شکل ۲-۷: نمای ظاهری الکتروود ها ، دید سه بعدی و دید از بالای سنسور مرجع [3]

سنسور های زاویه سنج دیگری برای مصارف پزشکی طراحی شده اند. زاویه یک پارامتر مهم در بسیاری از آشکار سازی های حرکتی برای مصارف پزشکی است. بررسی حرکت قسمت های مختلف بدن ، اطلاعات مهمی را به دست می دهد ، از جمله : وضعیت بهبود مسدومیت ، الگوهای حرکتی ورزشکاران ، الگوی خواب بیماران بی خوابی و



شکل ۲-۸ : استفاده از سنسور زاویه سنج در مطالعات پزشکی

در سال ۲۰۰۷ یک سنسور زاویه سنج یک جهتی برای کاربرد های پزشکی طراحی شده است. ساخت این سنسور بر مبنای چسباندن ^{۱۰} سیلیکان بر روی بدنه ی عایق است که پایین و بالای آن لایه برداری شده است تا جسم آزاد شود. الکتروود ها در اینجا به ارتفاع 50 μm هستند که با aspect ratio بالا با روش لایه برداری DRIE و بعد از آن لایه برداری رقیق KOH ایجاد شده اند.