

ساختار مکانیکی نوین آشکارساز زاویه با فناوری میکروماشینکاری توده ای

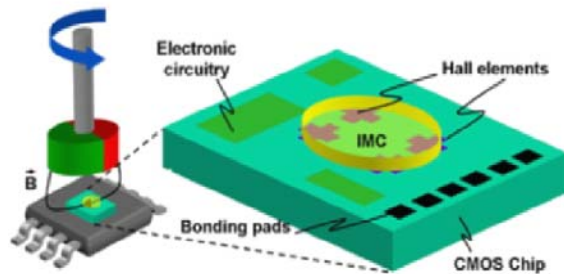
نیما سیاف^۱، فرشاد برازنده^۲، محمد رضا رازفر^۳

^۱کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ nima_sayyaf@aut.ac.ir

^۲استادیار دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ barazandeh@aut.ac.ir

^۳دانشیار دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛

ریزیستو نیز هنوز در حال پژوهش و ارتقا بوده و تکنولوژی ساخت پیچیده ای دارند که تنها در انحصار چند شرکت خارجی می باشد. ساخت این میکرو حسگر، بر مبنای تکنولوژی میکروماشینکاری، بر اساس تحریک با نیروی لورنس و آشکارسازی با صفحات خازنی (که دقت بالایی دارد)، انجام گرفت [۱،۲،۳،۴،۵].



شکل ۱: نمای شماتیک حسگر های مغناطیسی قابل ادغام در یک IC

جهت اندازه گیری زاویه یک آهنربای دوار [۱]

روش اندازه گیری زاویه بر اساس ساختار های سیستم های میکروالکترومکانیکی (MEMS) که در آنها عمل آشکار سازی با صفحات خازنی انجام می گردد، روش دقیق، ارزان قیمت و بر پایه اصول ساده فیزیکی می باشد. اصول اندازه گیری در این نوع حسگر ها همانند حسگر های پر کاربرد MEMS (مانند میکرو شتابسنج ها و میکرو فشارسنج ها) است که با تحریک یک توده جرم، جابجایی ایجاد شده با صفحات خازنی را آشکارسازی می کند. حسگر جابجایی زاویه ای MEMS از دو تیر خمشی به عنوان فنر بهره می گیرد. بسته به ضریب فنریت تیرها و نیروی الکترومغناطیسی لورنس اعمالی، ساختار جابجا شده و جابجایی ایجاد شده با استفاده از صفحات خازنی آشکار سازی می گردد.

پس از استخراج ایده ابتدایی و اصول کار این حسگر، یک ساختار متحرک با الهام گرفتن از شتابسنج های میکروماشینکاری شده اولیه، طراحی و مدلسازی شد. پس از مدلسازی با توجه به امکانات موجود، فرآیند های ساخت و ترتیب آن ها با استفاده از فرمت های استاندارد سیستم های میکروالکترومکانیکی (MEMS)، مشخص شد و دستور العملی برای ساخت استخراج گردید. پس از چندین مرحله اصلاح

چکیده

میکرو حسگر های غیر تماسی اندازه گیری زاویه می تواند زاویه بین قسمت دوار و قسمت ثابت را به صورت یک سیگنال الکتریکی خروجی، متناسب با زاویه بین دو قسمت، آشکار سازی کند. حسگر اندازه گیری زاویه غیر تماسی در این تحقیق بر اساس اصول کارکرد و ساخت حسگر های میکروالکترومکانیکی (MEMS) که از صفحات خازنی برای آشکارسازی بهره می برند، طراحی و مدلسازی شده است. جهت امکان سنجی ساخت این طرح جدید میکرو حسگر، بخش اصلی آن که ساختار متحرک مکانیکی آن می باشد نیز طراحی و پس از چندین مرحله نمونه سازی آزمایشی و اصلاح طرح، در داخل کشور ساخته شده است. اصول کارکرد این میکرو حسگر MEMS بر پایه دو تیر خمشی و یک توده جرم است که با نیروی مغناطیسی لورنس تحریک می شود و دو صفحه خازنی مقدار جابجایی ایجاد شده را آشکار سازی می کند. این حسگر بر اساس تکنولوژی میکروماشینکاری توده ای سیلیکون که در ساخت بسیاری از حسگر های تجاری MEMS استفاده می شود، ساخته شده است

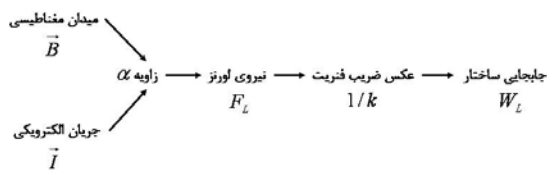
کلمات کلیدی: میکرو حسگر، سیستم های میکروالکترومکانیکی (MEMS)، تیر خمشی، نیروی لورنس، میکروماشینکاری توده ای.

مقدمه

حسگر های مغناطیسی که با اصول تغییر میدان مغناطیسی و میدان دوار برای آشکارسازی زاویه دوران استفاده می شود، بر سه نوع اثر هال، اثر مگنتورزیستیو و استفاده از ساختار میکروالکترومکانیکی می باشد. این المان های حسگری با بخش الکترونیکی قرائت سیگنال، در یک IC ادغام شده و زاویه دوران یک آهنربای دائم را اندازه گیری می کند (شکل ۱).

حسگر های جابجایی زاویه ای که اصول اندازه گیری آن ها بر اساس اثر هال و مگنتورزیستیو (MR) می باشند از همه کوچکتر بوده و قابلیت ادغام در یک IC را دارند. این روش ها هنوز هم در حال پژوهش، اصلاح و ارتقا جهت تجاری شدن می باشند. روش های اندازه گیری جابجایی زاویه ای بر پایه اثر هال ذاتا کم دقت بوده و برای بالا بردن دقت در مجموعه حسگر از ترکیب چند المان حسگری و استفاده از مدار الکترونیکی پیچیده ای به عنوان مدار قرائت سیگنال خروجی استفاده می شود. حسگر های بر پایه مگنتو

تیرهای خمشی جابجایی در راستای عمود بر راستای میدان مغناطیسی و جریان الکتریکی ایجاد می کند.



شکل ۳: دیگرام بلوکی عملکرد حسگر

مدلسازی بخش مکانیکی

همان طور که گفته شد تغییر زاویه بین میدان مغناطیسی و جریان الکتریکی باعث اعمال نیرو و جابجایی ساختار در راستای عمود بر آن دو می گردد. نیرویی که در اثر اعمال میدان مغناطیسی به هادی حامل جریان الکتریکی ایجاد می گردد به نیروی لورنس معروف است و از رابطه زیر بدست می آید.

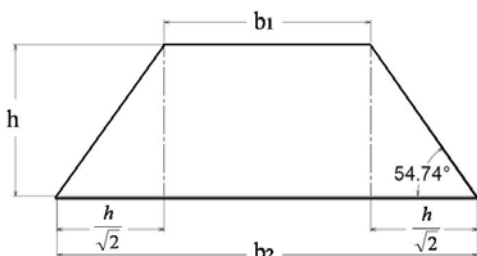
$$F_L = I_{fb} \vec{I} \times \vec{B} = I_{fb} B \sin(\alpha) \quad (1)$$

که در رابطه (۱)، F_L نیروی ایجاد شده لورنس در اثر اعمال شدت جریان I ، میدان مغناطیسی B و زاویه بین آنها، α می باشد. پس از ایجاد نیروی لورنس بسته به سختی ساختار توده متحرک جابجا می گردد. سختی ساختار به ابعاد و هندسه تیر بستگی دارد.

در تیر یک سر گیر دار این ساختار ممان خمشی M ناشی از نیروی لورنس F_L باعث ایجاد جابجایی انتهای تیر به طول بازوی L می باشد، از رابطه (۲) بدست می آید. بازوی ممان خمشی L فاصله اعمال نیروی لورنس تا انتهای گیردار تیر می باشد.

$$w(L) = \frac{ML^2}{2EI} \quad (2)$$

که در رابطه بالا E مدول الاستیک سیلیکون در نظر گرفته می شود. در ساخت تیر های ساختار به خاطر خصوصیات کریستالی ماده سیلیکونی مورد استفاده و زدایش ناهمسانگرد مرطوب در زدایش ساختار، دیواره های تیر ها به شکل مورب ایجاد می گردد. بنابراین برای محاسبه جابجایی ساختار، یک دوزنقه با مشخصات شکل (۴) در نظر گرفته و ممان اینرسی مقطع را از رابطه (۳) محاسبه می گردد.



شکل ۴: مقطع تیر دوزنقه ای شکل ساخته شده با زدایش مرطوب

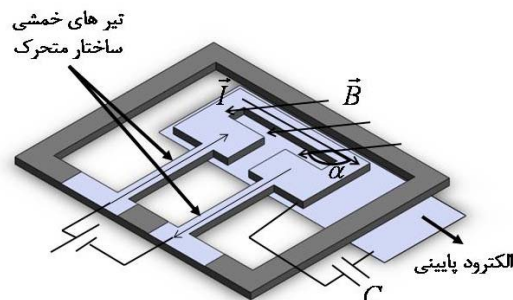
ناهمسانگرد

طرح و رفع مشکلات اجرایی مانند زدایش زیرین، ساختار نهایی با پارامتر های مورد نظر ایجاد گردید.

اصول عملکرد

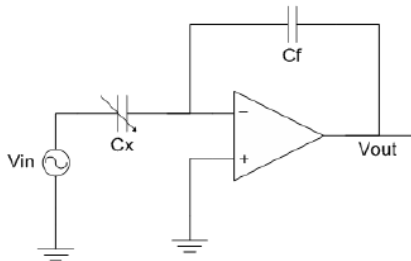
اصول کلی کارکرد این حسگر بر اساس اندازه گیری جابجایی یک توده جرم متناسب با تغییر زاویه بین میدان مغناطیسی و جریان دو لایه رسانای فلزی در ساختار متحرک می باشد (شکل ۲). با عبور دادن جریان الکتریکی از این ساختار در راستای زاویه دار با میدان مغناطیسی، نیروی لورنس، طبق قانون دست راست ایجاد می گردد. نیروی اعمال شده به ساختار، بسته به فنریت تیر های خمشی، باعث جابجایی ساختار متناسب با زاویه بین جریان الکتریکی در هادی و میدان مغناطیسی دوار می باشد. جابجایی ایجاد شده باعث تغییر فاصله صفحه فلزی متصل به ساختار شده و ظرفیت خازن را متناسب با نیروی اعمالی تغییر می دهد. بنابراین با بدست آوردن تابع تبدیل ساختار مکانیکی می توان مقدار جابجایی ساختار به ازای نیروی اعمالی را پیش بینی نمود و یا حساسیت ساختار را بدست آورد.

ساختار مکانیکی طراحی شده برای اندازه گیری زاویه بر اساس نیروی لورنس تحریک شده و متناسب با زاویه میدان مغناطیسی و جریان الکتریکی جابجا می گردد. همان طور که در شکل (۲) مشاهده می گردد، جریان (I) که در حدود چند میلی آمپر می باشد، از قسمت لایه نشانی شده نقره ای رنگ عبور داده می شود. برای جابجایی حول تیر های خمشی، جریان الکتریکی تنها باید از قسمت مشخص شده عبور داده شود. حال با ایجاد یک میدان مغناطیسی خارجی (B) به صورت افقی و موازی، بر اساس نیروی لورنس (طبق رابطه ۱)، یک تغییر شکل خمشی در ساختار حول میله های آن اتفاق می افتد. بر اساس این تغییر شکل، و جابجایی دو صفحه رسانای خازنی، مقدار ظرفیت خازن C بر اساس رابطه (۲)، با تغییر فاصله بین صفحات خازن، تغییر می کند. بنابر این با اندازه گیری و آشکار سازی تغییرات ظرفیت خازن ها با استفاده از یک مدار ویژه و همچنین تقویت کننده سیگنال الکتریکی، می توان بار خازن ها را به سیگنال الکتریکی قابل اندازه گیری با یک ولت متر تبدیل نمود.



شکل ۲: نمای شماتیک ایده استفاده از ساختار متحرک

به طور خلاصه می توان (طبق دیگرام بلوکی شکل ۳) گفت که زاویه بین میدان و جریان تبدیل به نیروی لورنس شده و با توجه به فنریت



شکل ۵: شماتیک مدار تقویت کننده بار [۳۸]

$$V_{out} = -\frac{Z_f}{Z_x} V_{in} \quad (۶)$$

که Z_x و Z_f به ترتیب مقاومت ظاهری خازن های متغیر و ثابت می باشد. با قرار دادن مقادیر معادل مقاومت ظاهری و رابطه (۵) در رابطه (۶)، رابطه (۷) که رابطه سیگنال خروجی با ولتاژ ورودی متناوب V_{in} با فرکانس S می باشد حاصل می گردد.

$$V_{out} = -\frac{Z_{in}}{C_f} \varepsilon \frac{S}{d} \quad (۷)$$

میکروماشینکاری توده ای ساختار مکانیکی

تکنولوژی میکروماشینکاری سیلیکون به مجموعه فرآیند هایی شامل لایه نشانی، انتقال طرح (لیتوگرافی) و زدایش بر روی یک زیرلایه سیلیکونی (ویفر سیلیکن) گفته می شود که در برخی مواقع جهت دستیابی به ساختار باید این فرایندها بارها انجام گیرد. در میکروماشینکاری توده ای معمولا از غوطه ور کردن ویفر داخل محلول زداینده (معمولا KOH) استفاده می شود. از فرایندهای معمول پس از زدایش ساختار در تکنولوژی میکروماشینکاری توده ای، فرایندهای اتصال ویفر به زیرلایه می باشد. جهت ساخت ساختار سیلیکونی میکروحسگر، پس از طراحی ماسک و ساخت ماسک جهت ایجاد اشکال مورد نظر دو مرحله کلی انجام گرفت.

- لایه نشانی جهت ایجاد طرح ساختار؛
- زدایش مرطوب ناهمسانگرد با KOH.

در مرحله لایه نشانی پس از رشد دادن یک لایه اکسید سیلیکن بر روی ویفر سیلیکن در کوره اکسیژن (شکل ۶ الف) جهت ایجاد ماده مقاوم در برابر زدایش، یک لایه مقاوم در برابر نور بر روی اکسید سیلیکن لایه نشانی می گردد (شکل ۶ ب). در مرحله بعد طی فرایندی به نام لیتوگرافی طرح ماسک با تابش نور به ماده مقاوم در برابر نور منتقل می گردد (شکل ۶ ج). پس از شست و شوی ماده مقاوم در برابر نور متاثر شده و اکسید سیلیکن زیر آن (شکل ۶ د) طرح به طور کامل به سطح ویفر سیلیکن منتقل می گردد (شکل ۶ د).

در مرحله زدایش بعد از طرح دار کردن ویفر با الگوی مورد نظر توسط اکسید سیلیکن (به خاطر مقاومت آن در برابر زدایش در KOH) ویفر داخل محلول ۲۰ درصد در دمای $۸۰^{\circ}C$ قرار داده می شود. در این مرحله بین تیرها و ایجاد خط برش ساختارهای کنار هم (با سرعت ۱.۴ میکرون بر دقیقه) زدایش می شود و ساختار به اصطلاح آزاد می گردد (شکل ۷ الف).

$$I = \frac{h^3 (b_1^2 + 4b_1b_2 + b_2^2)}{36(b_1 + b_2)} \quad (۳)$$

با استفاده از روابط بالا، سختی ساختار متحرک که از دو تیر خمشی با مقطع دوزنقه ای شکل بهره می برد، و از تقسیم ممان خمشی اعمالی M بر جابجایی w بدست می آید، از رابطه (۴) استخراج می گردد. در این رابطه سختی کل ساختار K دو برابر سختی هر تیر k می باشد.

$$K = 2k = \frac{Eh^3 (b_1^2 + 4b_1b_2 + b_2^2)}{9(b_1 + b_2)L^2} \quad (۴)$$

بنابراین برای استخراج جابجایی ساختار با داشتن ممان خمشی ناشی از نیروی لونس و می توان جابجایی تیر را محاسبه کرد. محاسبه جابجایی ساختار نسبت به مقدار مشخص زاویه میدان مغناطیسی و جریان الکتریکی، حساسیت ساختار را نشان می دهد. یکی از پارامترهای مهم در حساسیت حسگر، سختی ساختار مکانیکی می باشد که باید محاسبه گردد.

مدلسازی آشکار ساز خازنی

یکی از بهترین روش های آشکار سازی جابجایی در ساختارهای میکروالکترومکانیکی MEMS استفاده از صفحات خازنی می باشد. آشکار سازی با استفاده از صفحات خازنی با استفاده از اصل رابطه فاصله صفحات خازن با ظرفیت خازن انجام می گیرد. در رابطه (۵)، ظرفیت خازن C از ضریب گذر دهی مطلق و نسبی (ε_0 و ε)، سطح بین صفحات خازن و فاصله بین صفحات خازن بدست می آید. همان طور که در این رابطه مشاهده می گردد، تمامی پارامترها ثابت بوده و تنها ظرفیت خازن نسبت به جابجایی بین صفحات خازن با رابطه معکوس، تغییر می کند.

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d} \quad (۵)$$

در این ساختار نیز همان طور که در شکل (۲) مشاهده می گردد با لایه نشانی دو صفحه رسانای خازنی می توان با تشکیل یک خازن و استفاده از یک مدار الکترونیکی آشکار ساز تغییر ظرفیت خازن، جابجایی ساختار را تبدیل به سیگنال الکتریکی متناسب با آن نمود که به آن قرائت خازنی نیز گفته می شود. در مدارهای قرائت خازنی روش های متفاوتی برای آشکار سازی تغییر ظرفیت خازنی استفاده می گردد اما روش تقویت کننده بار از نظر ایمن بودن نسبت به نویز، خطی بودن و رزولوشن بالا، از بهترین نوع مدار قرائت خازنی می باشد.

رابطه حاکم جهت دستیابی به سیگنال خروجی V_{out} که متناسب با تغییر ظرفیت خازن متغیر آشکار ساز C_x ، و با توجه به انتخاب مقدار خازن مرجع یا ثابت C_r ، بر اساس روابط تقویت کننده های عملیاتی (آپ امپ) طبق رابطه (۶) بدست می آید.

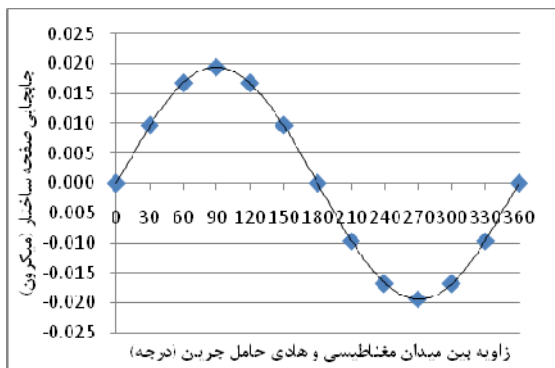
با دستیابی به سختی ساختار می توان حساسیت ساختار را قبل از ساخت پیشبینی نمود و در صورت نیاز با تغییر پارامتر های آن حساسیت را کم یا زیاد نمود. با توجه به ضریب فنریت محاسبه شده و اعمال نیروی لورنس با مشخصات جدول زیر می توان جابجایی حداکثر ساختار را پیشبینی نمود.

جدول ۲: پارامتر های مهم و مقدار محاسبه شده جابجایی

$L (\mu)$	$I (mA)$	$Lc (\mu)$	$B (mT)$	$M (mN \cdot \mu)$	$W_L (\mu)$
طول جابجایی	جریان	طول هادی	میدان	ممان خمشی لورنس	حداکثر جابجایی
۴۳۰۰	۱۰۰	۳۰۰۰	۱۰۰	۱۲۹/۶	۱/۱

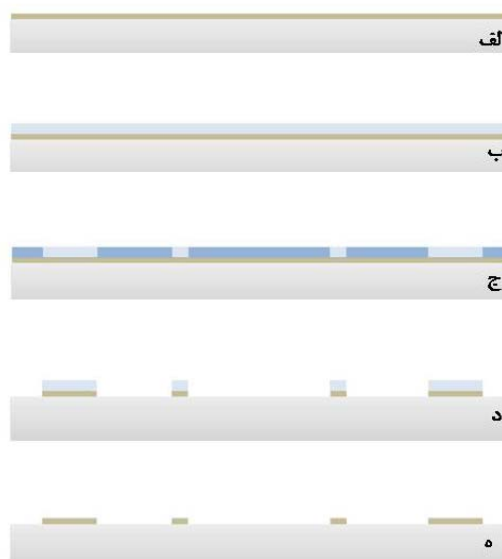
بنابراین با توجه به رابطه مستقیم جابجایی با ممان و نیروی لورنس و رابطه سینوسی بین نیروی لورنس و زاویه بین میدان و جریان، می توان گفت رابطه جابجایی با زاویه دوران نیز یک رابطه سینوسی بوده که دامنه آن حداکثر جابجایی محاسبه شده می باشد (شکل ۸). با استفاده از دو صفحه خازنی، جابجایی ایجاد شده در ساختار متحرک تبدیل به تغییر ظرفیت خازن می شود. در نهایت می توان با یک مدار قرائت خازنی تقویت کننده بار، تغییر ظرفیت خازن و در نتیجه زاویه بین میدان و جریان الکتریکی را به صورت تغییر ولتاژ آشکارسازی نمود.

جهت بررسی و امکان سنجی ساخت ساختار مدلسازی شده، پس از چندین مرحله تغییر طرح در نهایت ساختار میکروماشینکاری شده سیلیکنی به مشخصات جدول بالا ساخته شد که در عکس زیر مشاهده می گردد. بعلت اولین تجربه میکروماشینکاری ساختار سیلیکنی در داخل کشور، با مشکلات پیش بینی نشده زیادی مواجه بودیم که از مهمترین آن ها زدایش ناخواسته و از بین رفتن گوشه های خارجی بود. پس از چندین مرحله ساخت آزمایشی و مطالعه منابع جهت اصلاح مشکلات ایجاد شده، ساختاری با موفقیت و با کمترین مشکل ساخته شد (شکل ۹).



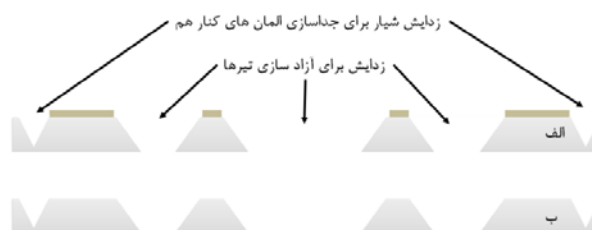
شکل ۸: نمودار آشکارسازی جابجایی ساختار بر اساس زاویه بین میدان

مغناطیسی و جریان الکتریکی



شکل ۶: نمای شماتیک مقطع یک المان از ساختار در حین انجام مراحل

لایه نشانی جهت انتقال طرح ساختار به ویفر سیلیکن



شکل ۷: نمایش شماتیک مقطع تیر ها و قاب ساختار در مرحله زدایش

در این مرحله نیز بعد از زدایش تیر ها و آزاد شدن آنها، اکسید سیلیکن زدوده شده تا کل ساختار یک دست شود (شکل ۷ ب).

نتیجه گیری و جمع بندی

پس از مدلسازی تئوری ساختار مکانیکی پس از چندین مرحله ساخت آزمایشی با موفقیت ساخته شد. پارامتر های مهم در حساسیت این حسگر در جدول زیر آورده شده است و در پایان پس از انجام محاسبات با استفاده از روابط فوق، مقدار جابجایی ساختار با توجه به ورودی ها آورده شده است. پارامتر های در نظر گرفته شده حداقل و حد اکثر مقادیر قابل ساخت با استفاده از امکانات موجود می باشد.

جدول ۱: مشخصات ساختار سیلیکونی ساخته شده

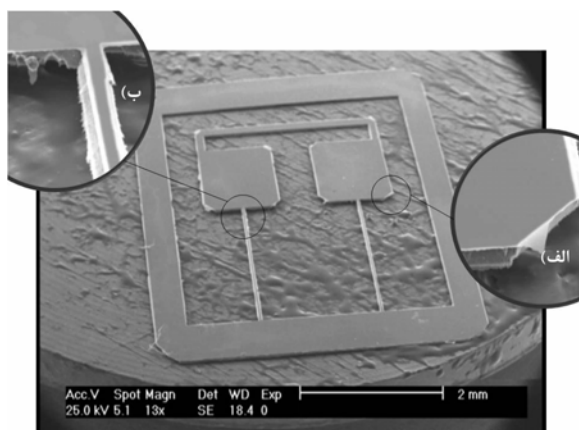
$H (\mu)$	$b_1 (\mu)$	$b_2 (\mu)$	$Lt (\mu)$	$E (mN/\mu m^2)$	$K (mN/\mu m)$
ارتفاع تیر	قاعده کوچک	قاعده بزرگ	طول تیر	مدول الاستیک	ضریب فنریت
۷۰	۳۰	۱۲۹	۲۲۹۰	۱۶۰	۱۲۰/۷۴

تشکر و قدردانی

جهت ساخت اولین ساختار میکروماشینکاری شده سیلیکونی داخل کشور از کمک های بی دریغ مسئولین شرکت صنایع قطعات الکترونیک و جناب آقای مهندس علیپور، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

مراجع

- [۱] C. Schott, R. Racz, S. Huber., ۲۰۰۶. "Novel analog magnetic angle sensor with linear output". *Sensors and Actuators*.
- [۲] J. Caruso , Dr.Carl H. Smith , Tamara Bratland , "HONEYWELL SSEC & NONVOLATILE ELECTRONICS" , INC.
- [۳] WWW.SSEC.HONEYWELL.COM.
- [۴] SIEMENSE CORPORATE TEC." GMR Sensors for Contactless Position Detection".
- [۵] HTTP://WWW.SSEC.HONEYWELL.COM
- [۶] ROBERT BOSCH GBMT, ۱۹۹۹ "Magnetic Sensor for Automotive Application"
- [۷] Stephen Beeby, ۲۰۰۴, *MEMS MECHANICAL SENSORS* .
- [۸] Marc J. Madou, ۲۰۰۲, *FUNDAMENTAL OF MICROFABRICATION THE SCIENCE OF MINIATURIZATION*(Second Edition).
- [۹] *Springer Handbook of NANO Technology* Bhushan Editor.



شکل ۹: عکس (SEM) از ساختار متحرک ساخته شده با امکانات

ابتدایی ساخت داخل کشور الف) گوشه های خارجی اصلاح شده ب) تیر

های خمشی آزاد شده به عرض ۳۰ میکرون