

طراحی، تحلیل و شبیه‌سازی میکروسنسور شیب خازنی با رنج دینامیکی پیوسته

مینو لیبی^۱، مهدیه مهران^۲

^۱ کارشناسی ارشد برق و الکترونیک، آزمایشگاه RF MEMS and Bio-Nano Electronics (MBNE)، بخش مهندسی برق، دانشگاه شهید باهنر کرمان

^۲ دانشیار، آزمایشگاه RF MEMS and Bio-Nano Electronics (MBNE)، بخش مهندسی برق، دانشگاه شهید باهنر کرمان، m.mehran@uk.ac.ir

چکیده

در این مقاله یک میکروسنسور شیب خازنی جدید مبتنی بر مایعات، طراحی، تحلیل و شبیه‌سازی شده است. میکروسنسور طراحی شده، شیب را حول یک محور (X -axis) اندازه‌گیری می‌کند. ساختار اصلی این سنسور استوانه‌ای شکل بوده و دارای سه خازن با صفحات موازی می‌باشد. صفحات خازن‌های ساختار بر روی قاعده‌های استوانه قرار دارند و فاصله‌ی بین آنها به نسبت مساوی، با روغن سیلیکون و هوا پر شده است. این خازن‌ها دارای یک صفحه مشترک هستند که بر روی یکی از قاعده‌های استوانه قرار دارد. صفحات دیگر و فواصل بین آنها، قطاع‌هایی ۶۰ درجه از دایره اند که بصورت یک در میان درون یک دایره و بر روی قاعده دیگر قرار گرفته‌اند. خروجی این سنسور (out) بصورت تابعی از خازن‌های ساختار تعریف شده است. با چرخش استوانه حول محور X و بدلیل افقی ماندن سطح روغن درون محفظه، موقعیت صفحات نسبت به روغن، تغییر کرده و منجر به تغییر خازن‌های ساختار و در نتیجه تغییر out می‌شود. با یک تحلیل دقیق، تاثیر تغییرات زاویه بر خازن‌های ساختار و خروجی، بدست آمده و با استفاده از نرم افزار MATLAB، بر حسب زاویه ترسیم شدند. این ساختار با کمک نرم‌افزار COMSOL Multiphysics نیز شبیه‌سازی شده است، که نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تحلیل مؤید یکدیگر می‌باشند. میکروسنسور خازنی طرح شده شیب را در بازه‌ی (0° تا 360°) با حساسیت $11/0.1 \text{ fF/deg}$ اندازه‌گیری می‌کند.

کلیدواژه

MEMS، سنسور شیب، میکروسنسور، دی‌الکترونیک مایع، COMSOL Multiphysics.

مقدمه

مایع و یا گاز باشد (جرم جامد^۱، الکترولیت، گاز، ...). تغییرات زاویه‌ی شیب بر وضعیت جرم معلق تاثیر گذاشته و سنسور بر اساس یک قانون فیزیکی، شیب را اندازه‌گیری می‌کند. اصل مشترک در تمامی سنسورهای شیب، اندازه‌گیری تغییرات اعمال شده از طرف نیروی گرانش به جرمی است که بصورت نسبی در حالت معلق قرار دارد [۲]. سنسورهای شیب مبتنی بر تکنولوژی‌های مختلف هستند و هر یک از آنها، زاویه شیب را بر اساس یک قانون فیزیکی تشخیص می‌دهند [۱-۴]. از جمله قوانینی که سنسورهای شیب مطابق با آنها طراحی و ساخته می‌شوند، عبارتند از: پیزوالکترونیک، پیزورزیستیو، خازنی،

امروزه زمینه‌های مختلف صنعت؛ مانند ناوبری، نظامی، رادارها و غیره؛ نیاز به سنجش زاویه‌ی شیب دارند. تغییرات زاویه‌ی شیب بوسیله سنسورهای شیب قابل اندازه‌گیری است. مشخصات این سنسورها، متناسب با کاربردهای مختلف، متفاوت است. به طور مثال در عمران و ساختمان‌سازی، به رنج دینامیکی کوچک ولی حساسیت بسیار بالا، و در ربات‌ها و هواپیماها، به سنسوری با رنج دینامیکی پیوسته و کامل ۳۶۰ درجه‌ای، نیاز است [۱-۲]. تمامی سنسورهای شیب، از یک جرم نسبتاً معلق، تشکیل شده‌اند که این جرم می‌تواند جامد،

^۱ Proof mass

اندازه می‌گیرد [۱۱]. ساختار دیگر، شامل چهار خازن با صفحات موازی با محدوده‌ی اندازه‌گیری 180° تا 180° است، با این حال بدلیل نزدیک بودن خازن‌های ساختار، خازن‌های پارازیتی ایجاد شده و غیر خطی شدن خروجی را به همراه دارد [۱۲]. طرح دیگری تغییرات زاویه شیب را در رنج نزدیک به 360° درجه اندازه‌گیری می‌کند. این سنسور، از دو خازن دایروی و کانالی به شکل دایره، تشکیل شده است. خروجی نهایی این سنسور به دلیل فواصل بین خازن‌ها گسسته می‌باشد [۱۳]. در ساختاری دیگر از چهار خازن حلقوی مسطح استفاده شده است، اما خروجی آن به دلیل فاصله بین الکترودها محدود می‌باشد. با این سنسور می‌توان خروجی را بصورت خطی در بازه 0° تا 360° ، به غیر از چهار محدوده $\pm 2^\circ$ در اطراف زوایای 90° ، 180° و 270° اندازه‌گیری کرد [۱۰، ۳]. اگر چه برخی از سنسورهای شیب خازنی مایع موجود، می‌توانند تغییرات زاویه شیب را از 0° تا 360° اندازه‌گیری کنند، اما در نقاطی از محدوده‌ی دینامیکی خروجی، ضعف دارند. این نقاط به فضاهای بین خازن‌های ساختار مربوط می‌شود که امری اجتناب‌ناپذیر است. در این فواصل، محدوده‌ی دینامیکی خروجی دارای پیوستگی نمی‌باشد [۱۳، ۱۰]. وقتی سطح مایع به این فضاها می‌رسد سنسور قادر به اندازه‌گیری تغییرات سطح مایع نیست. در نتیجه در محدوده‌ی اندازه‌گیری دینامیکی گسستگی رخ داده، حساسیت کاهش و خطای اندازه‌گیری افزایش می‌یابد [۱۳، ۳]. با این حال سنسورهای شیب با مشخصاتی نظیر حساسیت بالا، اندازه کوچک و محدوده‌ی خروجی خطی 360° درجه‌ای عملی و مورد نیاز هستند. در این مقاله، میکروسنسور شیبی ارائه شده است که علاوه بر خروجی دینامیکی پیوسته در بازه‌ی 0° تا 360° ، دارای حساسیت نسبتاً بالا و پروسه‌ی ساخت آسانی می‌باشد. بخش‌های ارائه شده در مقاله بدین شرح می‌باشند، پس از بیان ساختار میکرو سنسور پیشنهادی، به شرح عملکرد آن پرداخته و روابط تحلیلی حاکم بر خازن‌های ساختار و رابطه‌ی خروجی به همراه چگونگی تغییرات آنها در بازه‌های مختلف بین 0° تا 360° ، بطور دقیق ارائه گردیده‌اند. در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی سنسور پیشنهادی در محیط COMSOL ارائه و با نتایج حاصل از بکارگیری روابط تحلیلی در نرم افزار MATLAB، مقایسه می‌شوند. این مقاله در ادامه در بخش نتیجه‌گیری خاتمه می‌یابد.

ساختار میکروسنسور پیشنهادی

شکل ۱، شمای کلی میکروسنسور شیب پیشنهادی را نشان می‌دهد. این سنسور استوانه‌ای شکل است و در ساختار آن، سه خازن با صفحات موازی و در ابعاد میکرومتری وجود دارد که متغیر با شیب می‌باشند. نیمی از استوانه با روغن سیلیکون پر شده است و نیمه دیگر هوا می‌باشد. حفره‌ی استوانه‌ای شکل

الکترومغناطیسی و غیره [۴]. سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی (MEMS) در دهه‌های اخیر پیشرفت‌های چشمگیری داشته و کاربردهای بسیار متنوعی در حوزه‌ی الکترونیک پیدا کرده‌اند [۴]. سنسورهای شیب MEMS دسته‌ای جدید از این سنسورها هستند که مبتنی بر تکنولوژی MEMS طراحی و ساخته می‌شوند و بر اساس نیروی تعادل^۲، فتوالکتریک، حرکت مایع^۳ و دیگر قوانین عمل می‌کنند [۴].

سنسورهای نیروی تعادل، جابجایی جزئی جرم پاندولی را که وابسته به تغییرات شیب است، با روش‌های القایی یا خازنی، به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کنند. مکانیزم آنها اساساً شبیه به شتاب سنخ می‌باشد، این سنسورها دقت بالا ولی ظرفیت خازنی پارازیتی زیاد و خروجی غیرخطی دارند [۵]. دیگر سنسورهای مورد استفاده، سنسورهای شیب فتوالکتریک هستند که بیشتر به دلیل حجم کوچکی که اشغال می‌کنند مورد توجه می‌باشند، اما رنج دینامیکی پایینی دارند [۶].

سنسورهای شیب مبتنی بر حرکت مایع، دارای رزولوشن بالاتر و هزینه ساخت پایین‌تری هستند. آنها تکرارپذیری، ثبات و دقت عالی را ارائه کرده و با محدوده‌ی شیب و رزولوشن متفاوت عمل می‌کنند [۸، ۷، ۴، ۳]. در این سنسورها حرکت مایع در حفره‌ای، به تغییرات مقاومت یا خازن در سنسور منجر می‌شود [۳]. در نوع مقاومتی، مایع به عنوان الکترولیت استفاده می‌شود و الکترودها در تماس گالوانیکی با مایع هستند. تعدادی از الکترودها به پایه‌ی مثبت و تعدادی به پایه‌ی منفی منبع تغذیه متصل می‌گردند. در اثر اعمال ولتاژ، یون‌های مایع به سمت الکترودها رفته و باعث تغییر مقاومت آنها می‌شوند. تفاوت ارتفاعی که الکترودها درون مایع غوطه‌ورند، از تغییرات شیب ناشی می‌گردد که تغییرات مقاومت‌های ساختار را به دنبال دارد [۲، ۱]. در ساختار سنسورهای شیب خازنی مایع، چند الکتروود ثابت و یک دی الکتریک متحرک وجود دارد. تغییرات شیب باعث تغییرات ظرفیت خازن‌های ساختار می‌گردد. در این نوع از سنسورها، به تماس گالوانیکی الکترودها با مایع نیاز نیست و طول عمر سنسورها در مقایسه با نوع مقاومتی بیشتر است [۳، ۹، ۱۰]. به این دلیل، نوع خازنی بهتر از مقاومتی است زیرا علاوه بر صرفه جویی در هزینه و دقت خوب، خوردگی الکتروود را ندارد [۱۰، ۹، ۲، ۱].

در ادامه به چند مورد از سنسورهای شیب خازنی مایع، که طراحی و یا ساخته شده‌اند اشاره می‌کنیم. ساختار اولیه سنسور شیب خازنی مایع، شامل سه الکتروود مسطح و حفره‌ای نیمه پر از مایع است که تغییرات زاویه را در محدوده‌ی 30° تا 30° ،

^۲ Force-balance

^۳ Liquid pendulum

علت پیشنهاد روغن سیلیکون به عنوان دی الکتریک مایع، کشش سطحی کم، لغزندگی عالی، گرانروی کم (مقاومت کم تر روغن در برابر اعمال تنش برشی) و پایداری حرارتی خوب آن است. برای حرکت راحت تر روغن درون محفظه و افزایش سرعت پاسخ دهی سنسور، سطح داخلی استوانه را می توان با لایه نازکی از یک ماده روغن گریز همانند پلی تترافلورواتیلن (تفلون) با روش اسپاترینگ پوشاند [۱۵-۱۷]. جدول ۱، مشخصات ساختاری سنسور را نشان می دهد.

جدول ۱. مشخصات ساختاری میکروسنسور طراحی شده

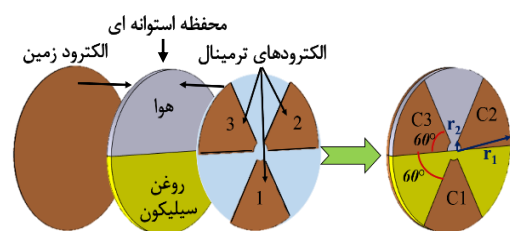
مقادیر	مشخصات ساختاری
$1700 \mu\text{m}$	r_1 : شعاع خارجی الکترودها
$200 \mu\text{m}$	r_2 : شعاع داخلی الکترودها
$50 \mu\text{m}$	d: فاصله ی بین دو صفحه ی خازن
$1 \mu\text{m}$	ضخامت صفحات خازن
$0.26865 \mu\text{L}$	حجم روغن سیلیکون
$2/8$	ثابت دی الکتریک روغن سیلیکون [۱۳، ۱۴ و ۱۷]
0.7395 pF	ماکزیمم ظرفیت خازنی C_1, C_2 و C_3
0.2641 pF	مینیمم ظرفیت خازنی C_1, C_2 و C_3
2.3691 pF	ماکزیمم خروجی out
-0.5 pF	مینیمم خروجی out

چگونگی عملکرد سنسور پیشنهادی

همانطور که گفته شد، صفحات مجزای خازن های ساختار و فواصل آنها، به شکل قطاع هایی 60° درجه از دایره اند که بصورت یک در میان، درون یک دایره قرار گرفته اند. این صفحات با هم پوشانی با الکتروود مشترک (زمین)، سه خازن با نام های C_1, C_2 و C_3 را ایجاد می کنند. از تغییرات ظرفیت این خازن ها در اثر شیب، برای اندازه گیری زاویه استفاده شده است. در هنگام اعمال شیب به سنسور، روغن سیلیکون در محفظه ی استوانه ای در جهت خلاف زاویه ی شیب، حرکت می کند تا همچنان بصورت افقی باقی بماند. جابجایی روغن، موقعیت صفحات خازن را نسبت به آن تغییر داده و در نتیجه دی الکتریک خازن ها و در پی آن، ظرفیت هر یک از خازن های یاد شده تغییر می کند. در طرح پیشنهادی، سنسور را با چرخش ساعتگرد حول محور x ، در نظر گرفته ایم که طبعاً دی الکتریک مایع در این وضعیت در جهت پادساعتگرد حرکت می کند. بازه های زاویه ای در روابط و منحنی هایی که در ادامه خواهند آمد، برای شیب گیری ساعتگرد سنسور هستند. شکل ۲- الف، خازن های ساختار سنسور را در حالتی که شیب نگرفته است ($\theta = 0^\circ$)، نشان می دهد. با توجه به این شکل، تمامی سطح خازن C_1 دارای دی الکتریک مایع است و خطوط میدان الکتریکی بین الکترودهایش از داخل روغن سیلیکون بسته می

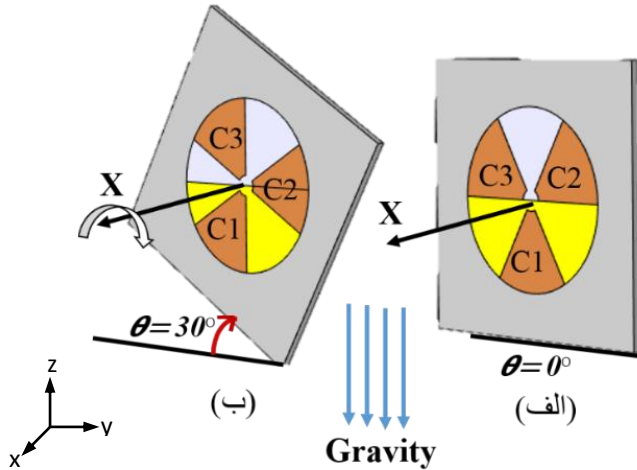
به حرکت روغن سیلیکون که دی الکتریک مایع است، کمک می کند. سه خازن ساختار دارای یک صفحه مشترک هستند که به صورت دایره ای کامل و در یکی از قاعده های استوانه قرار دارد. این صفحه به ولتاژ صفر متصل می گردد و الکتروود زمین است. سه صفحه ی دیگر خازن ها به الکتروود های جداگانه وصل می شوند. این صفحات و فواصل بین آنها، قطاع هایی 60° درجه از دایره اند که بصورت یک در میان درون یک دایره قرار گرفته اند. این دایره بر روی قاعده دیگر استوانه قرار گرفته است. خطوط میدان الکتریکی تنها بین دو صفحه ی موازی خازن وجود ندارند بلکه در لبه ها و با چگالی کمتر در بیرون صفحات موازی، نیز بسته می شوند. با در نظر داشتن ابعاد بسیار کوچک، احتمال تاثیر گذاری خازن های مجاور بر هم، که در فاصله کمی از یکدیگر قرار دارند، وجود دارد. از این رو، در ساختار طراحی شده فواصل بین خازن ها به اندازه ی مساحت یک الکتروود ترمینال در نظر گرفته شده است تا از لحاظ الکتروستاتیکی تاثیر کمتری بر هم داشته باشند. فواصل بین صفحات خازن ها، علاوه بر اینکه مانع از تاثیر گذاری آن ها بر هم می شود، به پیوستگی اندازه گیری زاویه در بازه 0° تا 360° کمک می کند. برای جداسازی الکتریکی صفحات خازن ها در مرکز استوانه، دایره ای به شعاع r_2 و به مرکز دایره ای که صفحات خازن ها، روی آن قرار دارند، از قطاعها کسر می شود.

هرچه سنسور رنج دینامیکی خطی بزرگ تری داشته باشد، بهتر است. یکی از نقاط ضعف طرح های پیشین، وجود گسستگی در رنج دینامیکی خروجی می باشد به این معنی که سنسورها با وجود داشتن رنج دینامیکی 360° درجه ای، در نقاطی از این رنج، توانایی تولید خروجی را نداشته و در آن نقاط دچار خطا می شوند. این خطا به دلیل وجود فواصل بین الکتروودها، جهت جلوگیری از اتصال الکتریکی آنها ایجاد می گردد [۳]. در طرح پیشنهادی علاوه بر وجود فضاهای منفصل کننده بین الکتروودهای ترمینال، که امری اجتناب ناپذیر است، با توجه به طراحی مناسب خازن های ساختار، اندازه گیری زاویه در تمامی بازه ی 0° تا 360° درجه پوشش داده شده است. زیرا زمانی که سطح دی الکتریک مایع به این فواصل می رسد، در ساختار سنسور، خازن دیگری وجود دارد که با تغییراتش زاویه ی شیب را دنبال می کند.



شکل ۱. ساختار کلی میکروسنسور خازنی شیب طراحی شده

زوایای مختلف در بازه‌ی ۰ تا ۳۶۰ درجه، بیان گردیده‌اند. همانطور که در این جدول مشخص است، سنسور در تمامی زوایا، قادر به اندازه‌گیری زاویه شیب بوده و نقاط ابتدایی و انتهایی بازه‌ها بر هم منطبق می‌باشند.



شکل ۲. میکروسنسور در شیب، (الف) $\theta = 0^\circ$ و (ب) $\theta = 30^\circ$.

همانطور که گفته شد، ساختار سنسور از سه خازن تشکیل شده است. در بازه‌ی ۰ تا ۶۰ درجه، خازن C_2 با تغییرات افزایشی، در ۶۰ درجه‌ی بعدی C_1 با تغییرات کاهششی، زاویه شیب را دنبال می‌کند. در بازه‌ی ۱۲۰ تا ۱۸۰ درجه، خازن C_3 به صورت صعودی و در ۶۰ درجه‌ی بعدی C_2 به صورت نزولی تغییر می‌کنند. همچنین در بازه‌ی ۲۴۰ تا ۳۰۰ درجه و ۳۰۰ تا ۳۶۰ درجه، به ترتیب، C_1 افزایش و C_3 کاهش می‌یابد. روند تغییرات خازن‌ها در بازه‌های یاد شده در جدول ۳ آمده است.

جدول ۲. روابط خازن‌های C_1 ، C_2 و C_3 در بازه‌ی ۰ تا ۳۶۰.

زاویه‌ی شیب	C_1	C_2	C_3
$0^\circ < \theta < 60^\circ$	$\frac{\epsilon_0 \epsilon_{oil} A}{6 \times d}$	$\frac{\epsilon_0 A}{d} \left(\frac{\theta - 0}{360} \epsilon_{oil} + \frac{360 - \theta}{360} \epsilon_{air} \right)$	$\frac{\epsilon_0 \epsilon_{air} A}{6 \times d}$
$60^\circ < \theta < 120^\circ$	$\frac{\epsilon_0 A}{d} \left(\frac{\theta - 60}{360} \epsilon_{oil} + \frac{120 - \theta}{360} \epsilon_{air} \right)$	$\frac{\epsilon_0 \epsilon_{oil} A}{6 \times d}$	$\frac{\epsilon_0 \epsilon_{air} A}{6 \times d}$
$120^\circ < \theta < 180^\circ$	$\frac{\epsilon_0 \epsilon_{air} A}{6 \times d}$	$\frac{\epsilon_0 \epsilon_{oil} A}{6 \times d}$	$\frac{\epsilon_0 A}{d} \left(\frac{\theta - 120}{360} \epsilon_{oil} + \frac{180 - \theta}{360} \epsilon_{air} \right)$
$180^\circ < \theta < 240^\circ$	$\frac{\epsilon_0 \epsilon_{air} A}{6 \times d}$	$\frac{\epsilon_0 A}{d} \left(\frac{\theta - 180}{360} \epsilon_{oil} + \frac{240 - \theta}{360} \epsilon_{air} \right)$	$\frac{\epsilon_0 \epsilon_{oil} A}{6 \times d}$
$240^\circ < \theta < 300^\circ$	$\frac{\epsilon_0 A}{d} \left(\frac{\theta - 240}{360} \epsilon_{oil} + \frac{300 - \theta}{360} \epsilon_{air} \right)$	$\frac{\epsilon_0 \epsilon_{air} A}{6 \times d}$	$\frac{\epsilon_0 \epsilon_{oil} A}{6 \times d}$
$300^\circ < \theta < 360^\circ$	$\frac{\epsilon_0 \epsilon_{oil} A}{6 \times d}$	$\frac{\epsilon_0 \epsilon_{air} A}{6 \times d}$	$\frac{\epsilon_0 A}{d} \left(\frac{\theta - 300}{360} \epsilon_{oil} + \frac{360 - \theta}{360} \epsilon_{air} \right)$

شوند، در نتیجه دارای ظرفیت خازنی ماکزیمم می‌باشد. وضعیت خازن‌های C_2 و C_3 در شیب صفر درجه، یکسان می‌باشد زیرا هر دو خازن، دارای دی الکتریک هوا بوده و در کمترین مقدار ظرفیت خازنی خود قرار گرفته‌اند. مطابق شکل ۲-ب، زمانی که شیب ۳۰ درجه، بصورت ساعتگرد حول محور X ، به سنسور اعمال می‌شود، در اثر گرانش، سطح روغن درون محفظه همچنان افقی باقی می‌ماند، اما سطحی از صفحات سه خازن که دی الکتریک آنها روغن می‌باشد، تغییر می‌کند. رابطه $C = \frac{Q}{V_0} = \frac{\epsilon A}{d}$ ظرفیت خازن تخت با صفحات موازی است، که A و d ϵ به ترتیب مساحت صفحات خازنی، فاصله‌ی بین دو صفحه و ثابت دی الکتریک می‌باشند. پس از چرخش استوانه حول محور X ، موقعیت الکترودهای خازن‌ها نسبت به دی الکتریک مایع تغییر می‌کند و بخشی از الکترودهای هر یک از خازن‌های C_1 ، C_2 و C_3 در دی الکتریک روغن و بخش دیگر در هوا قرار می‌گیرند، بنابراین رابطه‌ی اصلی مربوط به هر خازن مسطح موازی C_i ($i: 1,2,3$) به شکل رابطه (۱) خواهد بود.

$$C_i = \epsilon_0 \frac{\epsilon_{oil} A_{oil} + \epsilon_{air} A_{air}}{d} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، A_{oil} و A_{air} به ترتیب بیان‌گر مساحت قطع‌هایی از خازن C_i می‌باشند که در هوا و روغن قرار گرفته‌اند. به ازای هر زاویه‌ی شیب، بدلیل حرکت مایع، در پارامترهای A_{oil} و A_{air} تغییر ایجاد می‌گردد. در هر بازه‌ی ۶۰ درجه‌ای مطابق جدول (۲)، از سه خازن ساختار، دو خازن دارای مقداری ثابت بوده (می‌توانند ماکزیمم یا مینیمم باشند) و خازن سوم با توجه به بازه و زاویه‌ی اندازه‌گیری، دارای تغییرات خطی بصورت نزولی یا صعودی می‌باشد. تغییر صعودی ظرفیت خازنی در صورت افزایش سطحی است که دی الکتریک آن، روغن سیلیکون (A_{oil}) می‌باشد و تغییر نزولی بدلیل کاهش این سطح و افزایش سطح با دی الکتریک هوا (A_{air}) است.

مثلا در زوایای بین 0° تا 60° ، خازن C_1 بطور کامل دارای دی الکتریک روغن است و در این بازه در مقدار ماکزیمم خود ثابت می‌ماند در حالی که خازن C_3 که دارای دی الکتریک هواست در مقدار مینیمم خود ثابت می‌ماند. اما مقدار ظرفیت خازن C_2 با توجه حرکت پادساعتگرد مایع در استوانه، بطور خطی افزایش می‌یابد. در این بازه C_2 به دو خازن موازی تبدیل شده که یکی دارای مساحت $A \times \frac{\theta}{360}$ و دی الکتریک مایع و دیگری دارای مساحت $A \times \frac{360 - \theta}{360}$ و دی الکتریک هوا می‌باشد، که A معادل با $\pi(r_1^2 - r_2^2)$ است. همانطور که از روابط مشخص است، سطح قسمتی از الکترودهای C_2 که دارای دی الکتریک مایع است (A_{oil})، با افزایش θ زیاد شده و از طرفی A_{air} کاهش می‌یابد. در جدول (۲) روابط خازن‌های C_1 ، C_2 و C_3 در

$$C'_i = C_i - C_{min} \text{ for } i=1,2,3 \quad (3)$$

$$C_m = C_{max} - C_{min} \quad (4)$$

$$C_{min} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{air} A}{6 \times d} \quad (5)$$

$$C_{max} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{oil} A}{6 \times d} \quad (6)$$

جدول ۴. نحوه تغییرات قسمت‌های مختلف out در بازه ۰° تا ۳۶۰°

زاویه‌ی شیب ظرفیت خازنی	زاویه‌ی شیب					
	0° < θ < 60°	60° < θ < 120°	120° < θ < 180°	180° < θ < 240°	240° < θ < 300°	۳۰۰° < θ < ۳۶۰°
C ₁ '	C _m	C _m →0	0	0	0 → C _m	C _m
C ₂ '	0 → C _m	C _m	C _m	C _m →0	0	0
C ₃ '	0	0	0 → C _m	C _m	C _m	C _m →0
C _A =(C ₂ ' - C ₁ ')	-C _m →0	0 → C _m	C _m	C _m →0	0 → -C _m	-C _m
C _B = (C ₃ ' - C ₂ ' + 2 C _m)	2C _m → C _m	C _m	C _m → 2C _m	2C _m → 3C _m	3 C _m	3C _m → 2C _m
C _C = (C ₁ ' - C ₃ ' + 4 C _m)	5 C _m	5C _m → 4C _m	4C _m → 3C _m	3C _m	3C _m → 4C _m	4C _m → 5C _m
C' _A = $\frac{C_1 C_2 C_A}{C_1 C_2 + C_2 C_3 + C_1 C_3}$ =k ₁ ×C _A	-C _m →0	0 → C _m	0	0	0	0
	k ₁ =1		k ₁ =0			
C' _B = $\frac{C_2 C_3 C_B}{C_1 C_2 + C_2 C_3 + C_1 C_3}$ =k ₂ ×C _B	0	0	C _m → 2 C _m	2C _m → 3C _m	0	0
	k ₂ =0		k ₂ =1		k ₂ =0	
C' _C = $\frac{C_1 C_3 C_C}{C_1 C_2 + C_2 C_3 + C_1 C_3}$ =k ₃ ×C _C	0	0	0	0	3C _m → 4C _m	4C _m → 5C _m
	k ₃ =0				k ₃ =1	
out= C' _A + C' _B + C' _C	-C _m →0	0 → C _m	C _m → 2C _m	2C _m → 3C _m	3C _m → 4C _m	4C _m → 5C _m

بطور مثال، برای C'_A در بازه ۰ تا ۱۲۰ درجه، رابطه ی C_A به صورت خطی و به صورت صعودی از -C_m تا C_m تغییر کرده و مقدار k₁ در کل این بازه برابر با ۱ می باشد، در حالیکه k₂ و k₃ در این بازه، صفر هستند، در نتیجه خروجی نهایی سنسور (out) در این بازه برابر با مقدار 1×C_A است. در جدول ۴ روند تغییرات خطی و پیوسته خروجی نهایی سنسور (out) نشان

به کمک ساختار ارائه شده، می‌توان زوایای ۰ تا ۳۶۰ درجه را طی ۶ بازه، بصورت خطی و پیوسته اندازه‌گیری کرد. لازم به ذکر است که فضاهای ۶۰ درجه‌ای بین الکترودهای ترمینال که برای جلوگیری از تاثیر الکتروستاتیکی خازن‌ها بر هم قرار گرفته اند و هر یک مستقل از دیگری می باشند، باعث گسسته شدن خروجی نشده و سنسور را در هیچ زاویه‌ای دچار خطا نمی کنند. زیرا زمانی که در اثر تغییر زاویه‌ی شیب، سطح مایع به این فضاها می رسد، سنسور تغییرات شیب را به کمک خازن تعبیه شده در طرف مقابل این فضاها، حس می کند. در نتیجه موقعیت مناسب قرار گیری صفحات سه خازن باعث پیوستگی کامل خروجی سنسور (out)، به ازای تغییرات زاویه‌ی شیب می شود.

جدول ۳. نحوه تغییرات خازن‌های C₃ و C₂، C₁ در بازه ۰° تا ۳۶۰°

زاویه‌ی شیب	C ₁	C ₂	C ₃
0° < θ < 60°	C _{max}	C _{min} → C _{max}	C _{min}
60° < θ < 120°	C _{max} → C _{min}	C _{max}	C _{min}
120° < θ < 180°	C _{min}	C _{max}	C _{min} → C _{max}
180° < θ < 240°	C _{min}	C _{max} → C _{min}	C _{max}
240° < θ < 300°	C _{min} → C _{max}	C _{min}	C _{max}
۳۰۰° < θ < ۳۶۰°	C _{max}	C _{min}	C _{max} → C _{min}

$$* C_{min} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{air} A}{6 \times d} \quad * C_{max} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{oil} A}{6 \times d}$$

با توجه به جدول ۲، چگونگی محاسبه‌ی روابط جدول ۳، میسر می‌گردد. طبق جدول های ۲ و ۳ در هر بازه ۶۰ درجه‌ای در فاصله ۰ تا ۳۶۰، از سه خازن ساختار، یکی در مقدار مینیمم و دیگری در مقدار ماکزیمم ثابت بوده و خازن سوم در حال تغییر است.

برای دستیابی به رابطه‌ای خطی و کاملاً پیوسته برحسب زاویه (θ)، خروجی (out) را به شکل رابطه (۲) و بصورت تابعی از سه خازن C₁، C₂ و C₃ بیان کرده ایم. در نوشتن این رابطه از این که در هر بازه ۶۰ درجه ای شیب، تنها یک خازن متغیر بوده و دو خازن دیگر ثابت هستند، استفاده شده است. به این ترتیب که خازن متغیر در خروجی ظاهر شده و تاثیر خازن های ثابت با ضرب شدن در هم ناچیز می گردد. C'_i و همچنین پارامتر ثابت C_m در رابطه‌ی out، به ترتیب در روابط (۳) و (۴) معرفی شده اند. علاوه بر این مقدار مینیمم و ماکزیمم ظرفیت خازن های ساختار، در روابط (۵) و (۶) ارائه گردیده اند.

$$out = \quad (2)$$

$$\frac{C'_1 C'_2 (C'_2 - C'_1) + C'_2 C'_3 (C'_3 - C'_2 + 2 * C_m) + C'_1 C'_3 (C'_1 - C'_3 + 4 * C_m)}{C'_1 C'_2 + C'_2 C'_3 + C'_1 C'_3} = k_1 \times C_A + k_2 \times C_B + k_3 \times C_C = C'_A + C'_B + C'_C$$

در نهایت بستر شیشه‌ای را به کمک چسب روی محفظه‌ی استوانه‌ای قرار می‌دهیم (شکل ۳-۵) [۲۰].

برای ساخت این سنسور در مجموع به دو مرتبه لایه نشانی فلز، دو بار پروسه فوتولیتوگرافی با استفاده از سامانه ماسک الاینر و یک مرتبه پروسه‌ی DRIE نیاز است.

بحث و نتایج

میکروسنسور پیشنهاد شده از طریق سه خازن متغیر، انحراف زاویه‌ای را تشخیص می‌دهد. همانطور که قبلاً ذکر شد، این سنسور به گونه‌ای طراحی شده است که شیب را در محدوده‌ی ۰ تا ۳۶۰ درجه به طور کامل و پیوسته اندازه‌گیری می‌کند.

جدول ۵. ویژگی مواد مورد نیاز در شبیه‌سازی COMSOL

روغن سیلیکون	ثابت دی‌الکتریک	۲/۸
چسبندگی		۱۰ mm ² /s
کشش سطحی		۱۹ mN/m
مس	رسانایی الکتریکی	۵/۹۹۸e ^۷ s/m
	مقاومت الکتریکی	۱/۷۲e ^{-۷} Ω×m
بستر سیلیکونی	ثابت دی‌الکتریک نسبی	۴/۲
	رسانایی الکتریکی	۰ s/m
تفلون	ثابت دی‌الکتریک	۲/۱

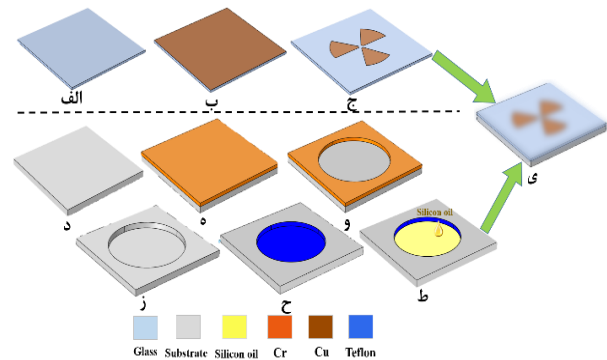
جهت اطمینان از عملکرد میکروسنسور شیب طراحی شده، آنرا با استفاده از نرم افزار COMSOL شبیه‌سازی کردیم. محیط نرم افزاری COMSOL می‌تواند، چندین فیزیک مختلف از جمله الکتروستاتیک، دینامیک سیالات، دینامیک گاز و ... را به سیستم طراحی شده، اعمال کند و در نهایت خروجی مورد نظر را بدست آورد. لازم به ذکر است در شبیه‌سازی‌ها، میزان ضخامت لایه‌ها، ابعاد اجزای مختلف سنسور و حتی مواد استفاده شده به عنوان دی‌الکتریک، الکترودها و حتی روان‌کننده‌ی سطح، مورد تحقیق و بررسی قرار گرفتند، زیرا هر یک از این مواد از نظر الکترواستاتیکی خواص مختلفی دارند. ویژگی‌های موادی که در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، در جدول ۵ آمده است. این مقادیر از کتابخانه‌ی نرم افزار کامسول، استخراج گردیده‌اند.

در همین راستا روغن سیلیکون که به عنوان دی‌الکتریک انتخاب شده است، چسبندگی و کشش سطحی پایین و ضریب دی‌الکتریک قابل قبولی دارد [۱۳، ۱۴]. کشش سطحی روغن سیلیکون بسیار پایین است و می‌تواند در استوانه حرکت کند، البته هرچه ناهمواری سطح کمتر باشد، روغن راحت‌تر حرکت خواهد کرد [۱۷]. برای بالا بردن سرعت پاسخ خروجی، سطح داخلی استوانه با یک ماده‌ی روغن‌گریز به نام تفلون پوشانده شده است. الکترودها نیز از جنس مس می‌باشند [۱۳، ۱۴].

داده شده است. همانطور که مشخص است، حساسیت سنسور $\frac{6C_m}{360}$ می‌باشد.

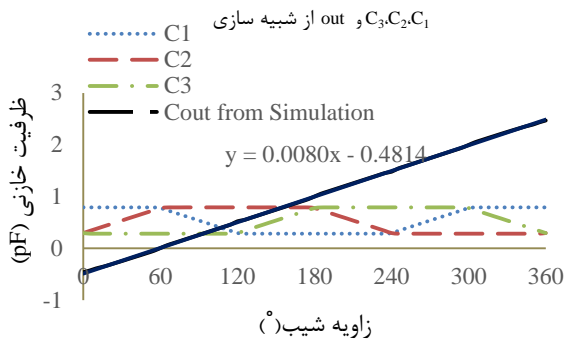
در ادامه پروسه‌ای ساده جهت ساخت سنسور پیشنهاد می‌گردد. مطابق شکل ۳-۳ الف، پس از تمیز کردن یک شیشه‌ی لام، با روش RCA#1 (NH₄OH:H₂O₂:H₂O, 1:1:5)، لایه‌ای نازک از جنس مس با ضخامت ۳۰۰nm را با روش کندوپاش^۴ روی آن می‌نشانیم (شکل ۳-ب). بعد از پروسه‌های فوتولیتوگرافی و زدایش، الکترودهای ترمینال، بر روی شیشه شکل می‌گیرند (شکل ۳-ج).

در ادامه، بعد از تمیز کردن بستر سیلیکونی (شکل ۳-د) با روش RCA#1، لایه‌ای نازک از کروم در حدود ۲۰nm، روی بستر سیلیکونی لایه نشانی می‌گردد (شکل ۳-ه) [۱۸]. در این لایه پس از پروسه فوتولیتوگرافی و زدایش، پنجره‌ای به سوی سیلیکون باز می‌شود (شکل ۳-و). در مرحله بعد پس از زدایش سیلیکون با پروسه‌ی DRIE، گودالی استوانه‌ای شکل به عمق ۵۰ μm، در سیلیکون ایجاد گردیده و به عنوان بدنه‌ی سنسور مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۳-ز). سپس مطابق شکل ۳-ح، لایه نازکی از تترافلوئورو اتیلن (تفلون) روی بدنه و کف گودال به روش RF sputtering لایه نشانی می‌شود [۱۹، ۱۶]. در انتهای این مرحله، همانگونه که در شکل ۳-ط نشان داده شده است، ۰/۲۶۶μl روغن سیلیکون که معادل نیمی از حجم استوانه‌ی بدنه است را، با کمک میکروپمپ به درون محفظه تزریق می‌کنیم [۱۳].

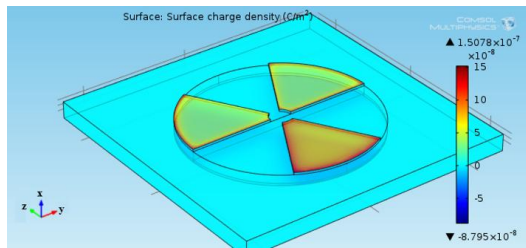


شکل ۳. پروسه‌ی پیشنهادی ساخت میکروسنسور خازنی شیب طراحی شده، (الف) شیشه لام RCA#1 شده، (ب) لایه نشانی مس با روش کندوپاش، (ج) شکل‌گیری الکترودهای ترمینال پس از پروسه‌ی فوتولیتوگرافی و زدایش مس، (د) ویفر سیلیکونی RCA#1 شده، (ه) لایه نشانی کروم با روش تبخیر با پرتو الکترونی، (و) پروسه‌ی فوتولیتوگرافی و زدایش کروم، (ز) پروسه‌ی DRIE برای شکل‌گیری استوانه‌ی بدنه، (ح) لایه نشانی کندوپاش تفلون، (ط) پر کردن نیمی از استوانه‌ی بدنه با روغن سیلیکون، (ی) اتصال دو قسمت سنسور.

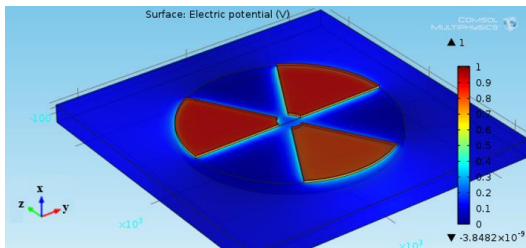
^۴ Sputtering



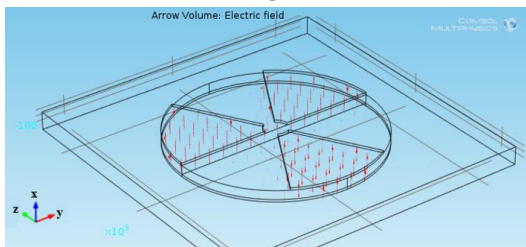
(الف)



(ب)



(ج)

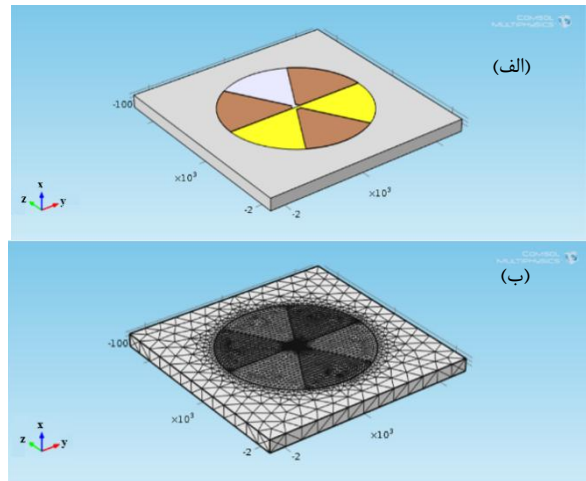


(د)

شکل ۵. نتایج حاصل از شبیه سازی میکروسنسور در COMSOL، (الف) منحنی ظرفیت خازنی C₁، C₂، C₃ و out بر حسب زاویه شیب، (ب) منحنی تراکم سطحی بار، (ج) منحنی توزیع پتانسیل الکتریکی و (د) خطوط میدان الکتریکی.

شکل ۶، منحنی تغییرات خازنهای C₁، C₂، C₃ و out را بر حسب θ نشان می‌دهد. این نتایج حاصل از ترسیم روابط تحلیلی ساختار میکروسنسور با استفاده از روابط (۱) تا (۵) و همچنین جدول ۲، در نرم افزار MATLAB می‌باشند. با بررسی نمودارهای بدست آمده به این نتیجه می‌رسیم که هر یک از سه خازن، شیفت یافته‌ی دیگری است و دارای دوره‌ی تناوب ۳۶۰ درجه‌ای می‌باشد. در هر بازه‌ی ۶۰ درجه‌ای، تنها یکی از خازن‌ها دچار تغییر می‌شود و دو خازن دیگر در مقداری مشخص ثابت می‌مانند. out (خروجی سنسور) نیز دارای رنج اندازه‌گیری زاویه‌ای، ۰ تا ۳۶۰ می‌باشد که کاملاً خطی و

با استفاده از این نرم‌افزار، ساختار میکروسنسور شیب پیشنهادی را در حوزه الکترواستاتیک به صورت شکل ۴-الف پیاده‌سازی و سپس این المان محدود را مش‌بندی کردیم (شکل ۴-ب). جدول ۶ پارامترهای مش‌بندی را نشان می‌دهند. از آنجایی که ماهیت نرم افزار COMSOL محاسباتی است، با حل معادلات الکترواستاتیک به صورت عددی، مقدار ظرفیت خازن‌های ساختار بدست آمده، و با استفاده از آن‌ها، مشخصه‌ی خروجی ترسیم گردید (شکل ۵-الف). نتایج شبیه‌سازی در قسمت‌های مختلف شکل ۵، نشان داده شده‌اند. در قسمت‌های (ب)، (ج) و (د) از شکل ۵، به ترتیب تراکم سطحی بار، توزیع پتانسیل الکتریکی و خطوط میدان الکتریکی مشخص شده‌اند. لازم به ذکر است که این نمودارها در زاویه‌ی شیب صفر درجه ($\theta = 0$) ترسیم شده‌اند و الکترودهای ترمینال به ولتاژ ۱ ولت متصل می‌باشند. با توجه به نمودارهای توزیع پتانسیل و خطوط میدان الکتریکی، طیف رنگی در شکل، تنها بین صفحات خازنی وجود دارد که این نشان‌دهنده‌ی مستقل بودن هر یک از خازن‌ها به لحاظ الکتریکی از هم می‌باشد. علاوه بر این خطوط میدان الکتریکی در لبه‌ی خازن‌ها نیز موازی با خطوط میدان در اواسط صفحات است که خود نشان دهنده‌ی یکنواخت بودن میدان الکتریکی می‌باشد و اثرات لبه‌ای^۵ را می‌توان نادیده گرفت. این امر بدلیل نسبت بزرگ ابعاد الکترودها به فاصله‌ی بین آن‌ها می‌باشد.



شکل ۴. (الف) ساختار میکروسنسور در COMSOL و (ب) مش بندی ساختار

جدول ۶. پارامترهای مش بندی میکروسنسور پیشنهادی در COMSOL

Maximum element size	۵۰۰
Minimum element size	۹۰
Maximum element growth rate	۱/۵
Resolution of curvature	۰/۶
Resolution of narrow regions	۰/۵

Edge effects^۵

جدول ۷. مقایسه میکروسنسور طرح شده با طرح‌های پیشین

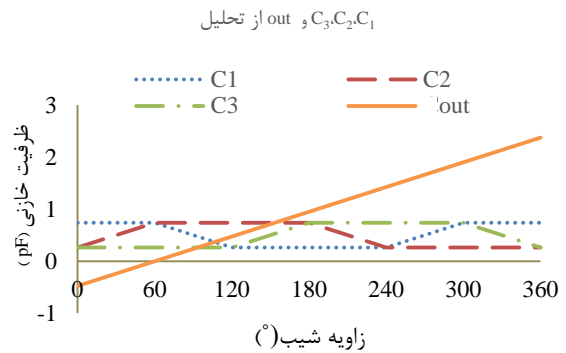
سنسور شیب	رنج دینامیکی خروجی (°)	خطی بودن و پیوستگی	حساسیت
سنسور پیشنهادی	۳۶۰°	خطی پیوسته	۸/۰۱۱ (fF/deg)
Hosseini, Fatemeh et al. (2018)[24]	۳۶۰°	خطی پیوسته	۲ (mV/deg)
Hu, Pengcheng et al. (2016)[3]	۳۶۰° به جز ۱۶°	خطی گسسته	۸/۴۳ (pF/deg)
Mir, Fahimeh, et al. (2016)[21]	۳۶۰° به جز چند بازه	خطی گسسته	۶/۴۴ (fF/deg)
Dang Dinh Teip et al. (2016) [9]	۰° تا ۷۰°	خطی گسسته	۴۰ (mV/deg)
Ueda, H., et al. (2006) [22]	-۴۵° تا +۴۵°	خطی گسسته	-۰/۲۲۲ (mV/deg)
Benz, D., et al. (2005)[12]	۳۶۰°	خطی پیوسته	۳۰ (mV/deg)

تمرکز بیشتر میکروسنسورهای شیب خازنی بر رنج دینامیکی ۳۶۰ درجه‌ای بوده است، اما سنسورهای شیب خازنی گزارش شده، که عملکرد آنها مبتنی بر حرکت مایع است، دارای خروجی نهایی گسسته بوده و در نقاطی از رنج دینامیکی با خطا مواجه می‌شوند. به طور مثال طرح‌های [۳، ۱۳، ۲۱] که در سال‌های اخیر به چاپ رسیده‌اند و رنج دینامیکی ۳۶۰ درجه‌ای دارند، دارای خروجی گسسته و حساسیت پایین در چند بازه‌ی زاویه‌ای کوچک می‌باشند. میکروسنسور پیشنهادی با توجه به هندسه‌ی الکترودها و موقعیت خازن‌های ساختار نسبت به هم، رنج دینامیکی کاملاً خطی و پیوسته به همراه حساسیت نسبتاً خوبی را ارائه می‌دهد که عملکردی شبیه به سنسور ارائه شده در [۲۴] دارد. پروسه‌ی ساخت پیشنهادی برای میکروسنسور در مقایسه با موارد مشابه [۲۲، ۲۱] که طبق تکنولوژی MEMS طراحی و ساخته شده‌اند، ساده تر و هزینه-ی کمتری دارد.

نتیجه‌گیری

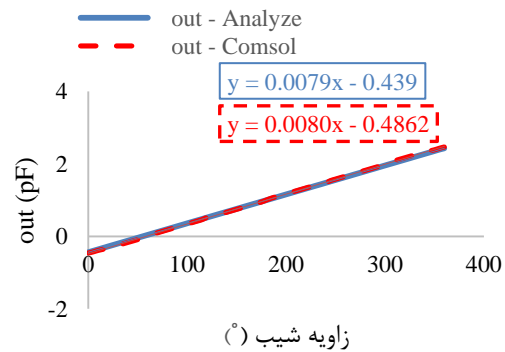
یک میکروسنسور شیب خازنی، در جهت دستیابی به محدوده‌ی اندازه‌گیری کاملاً پیوسته‌ی ۰ تا ۳۶۰ درجه طراحی گردید. این سنسور بر پایه حرکت دی الکتریک مایع عمل می‌کند و زاویه شیب، بر اساس تغییرات ظرفیت سه خازن ساختار

پیوسته است (این بازه‌ی زاویه‌ای، به ازای چرخش ساعتگرد سنسور حول محور x، می باشد).



شکل ۶. منحنی ظرفیت خازنی C1، C2، C3 و out بر حسب زاویه شیب حاصل از ترسیم روابط تحلیلی در MATLAB

out از آنالیز و شبیه سازی



شکل ۷. مقایسه نتایج حاصل از ترسیم روابط تحلیلی و شبیه سازی خروجی (out) بر حسب زاویه شیب

شکل ۷، نمودارهای حاصل از تحلیل و شبیه‌سازی را با هم مقایسه می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود منحنی‌های خروجی سنسور حاصل از شبیه‌سازی و تحلیل به خوبی بر هم منطبق‌اند. با در نظر داشتن شیب نمودارها به ترتیب حساسیتی معادل ۸/۰۱۱ fF/deg و ۷/۹۵۶۵ fF/deg بدست می‌آید.

جدول ۷، سنسور پیشنهادی را با موارد مشابه از حیث محدوده‌ی رنج دینامیکی خروجی، خطی و پیوسته بودن آن و حساسیت خروجی نهایی مورد مقایسه قرار می‌دهد. امروزه با پیشرفت تکنولوژی، نیاز به سنسورهای هوشمند بیشتر شده و سنسورهای با ابعاد کوچک‌تر بیشتر مورد توجه هستند. طرح پیشنهادی با وجود ابعادی بسیار کوچک، نه تنها پیچیدگی و غیرخطی بودن خروجی سنسور را به همراه ندارد، بلکه بر یک اصل فیزیکی ساده مبنی بر "افقی بودن سطح مایعات" استوار است و روابط کاملاً خطی را دنبال می‌کند.

- on Communications and Electronics (ICCE), 2016.
- [10] J. Guo, P. Hu, and J. Tan, "Analysis of a segmented annular coplanar capacitive tilt sensor with increased sensitivity," *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 133-144.
- [11] R. A. Yotter, R. R. Baxter, S. Ohno, S. D. Hawley, D. M. Wilson, "On a micromachined fluidic inclinometer." 12th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2003.
- [12] D. Benz, T. Botzelmann, H. Kuck, D. Warkentin, "On low cost inclination sensors made from selectively metallized polymer," *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, vol. 123, pp. 18-22.
- [13] B. Salvador, A. Luque, and J. M. Quero. "Microfluidic capacitive tilt sensor using PCB-MEMS," *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2015.
- [14] M. I. Khan and M. M. Nasef, "Spreading behaviour of silicon oil and glycerol drops on coated papers," 2009, no. 14, pp. 18-29.
- [15] R. W. Jaszewski, H. Schiff, B. Schnyder, A. Schneuwly, P. Groning, "The deposition of anti-adhesive ultra-thin teflon-like films and their interaction with polymers during hot embossing," *Applied surface science*, 1999, vol. 143, no. 1, pp-301-308.
- [16] L. Gao, Lichao, and T. J. McCarthy. "Teflon is hydrophilic. Comments on definitions of hydrophobic, shear versus tensile hydrophobicity, and wettability characterization," *Langmuir*, 2008, vol. 24, no. 17, pp. 9183-9188.
- [17] M. I. Khan and M. M. Nasef. "Spreading behaviour of silicone oil and glycerol drops on coated papers," *Leonardo Journal of Sciences*, 2009, vol. 8, pp. 18-30.
- [18] K. H. Jang, W. J. Lee, H. R. Kim, and G. Y. Yeom, "Etching of copper films for thin film transistor liquid crystal display using inductively coupled chlorine-based plasmas," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2004, vol. 43, no. 12, pp. 8300-8303.

[۱۹] شمسی، علیرضا، سعید دل آرام فریمانی، and احمد عفیفی. "استفاده از روش لیتوگرافی نرم جهت ایجاد میکروساختارها روی بستر آبدوست شده پلیمر PMMA." *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز* ۴۶:۲، ۱۲۷-۱۳۳، ۲۰۱۶.

- [20] C.H. Lin, G.B. Lee, B.W. Chang, and G.L. Chang, "A new fabrication process for ultra-thick microfluidic microstructures utilizing SU-8 photoresist," *J. Micromechanics Microengineering*, 2002, vol. 12, no. 5, pp. 590-597.

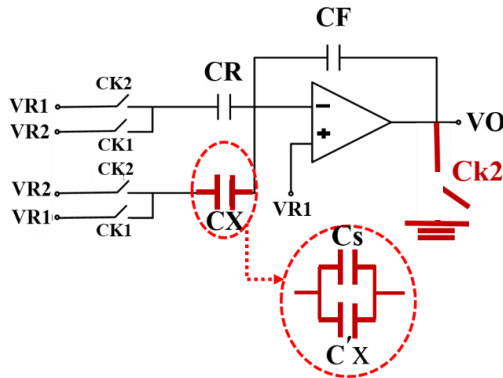
تعیین می شود. استفاده از حفره‌ی استوانه‌ای که نیمی از آن با دی الکتریک مایع پر شده است، برای دستیابی به حسگری خطی می باشد. دلیل اصلی سنجش پیوسته‌ی ۳۶۰ درجه‌ای میکروسنسور پیشنهادی، نحوه‌ی قرارگیری الکترودها است. سه الکترودها که هر یک از آنها یک ششم از یک دایره را پوشش می دهند، این امکان را ایجاد می کنند تا رابطه‌ی پیوسته و خطی بین θ و خروجی out داشته باشیم. رابطه‌ی تحلیلی خروجی سنسور (out) با استفاده از MATLAB ترسیم شد. نتایج حاصل از شبیه سازی سنسور در COMSOL نیز ارائه شدند که با نتایج تجزیه و تحلیل، موید یکدیگر هستند. سنسور پیشنهادی ابعادی کوچک دارد، و حساسیت ۸/۰۱۱ fF/deg را ارائه می-دهد. ابعاد کوچک، رنج دینامیکی پیوسته و حساسیت مناسب از ویژگی های سنسور طراحی شده می باشند.

مراجع

- [1] G.R. Jordan, "Sensor technologies of the future," *J.Phys. E: Sci.Instrum*, 1985, vol. 18, pp.729-735.
- [2] G. Meijer, "Smart sensor systems," John Wiley & Sons. 2008.
- [3] H. Pengcheng, J. Guo, and J. Tan. "An annular planar-capacitive tilt sensor with a 360 measurement range," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, vol. 63, no. 4, pp. 2469-2476.
- [4] H. Qiushi and C. Chen, "Research on tilt sensor technology," *IEEE International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling Workshop*, 2008.
- [5] R. Olaru, and D. D. Dragoi. "Inductive tilt sensor with magnets and magnetic fluid," *Sensors and actuators A Physical*, 2005, vol. 120, no. 2, pp. 424-428.
- [6] B. Yao, L. Feng, X. Wang, W. Liu, H. Jiao, "Micro-grating tilt sensor with self-calibration and direct intensity modulation," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2015, vol. 126, no. 1, pp. 144-147.
- [7] H. Jung, J. K. Chang, and S. H. Kong, "An optimized MEMS-based electrolytic tilt sensor," *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, vol. 139, no. 1, pp. 23-30.
- [8] A. B. A. Manaf, K. Nakamura, Y. Matsumoto. "One-side-electrode-type fluid-based inclinometer combined with CMOS circuitry," *Sensors and Materials*, 2007, vol. 19, no. 7, pp. 417-434.
- [9] Tiep, Dang Dinh, et al. "Tilt sensor based on three electrodes dielectric liquid capacitive sensor," *IEEE Sixth International Conference*

$$V_{O2} = \frac{C_X - C_R}{C_F} (V_{R2} - V_{R1}) + V_{O1} \quad (3)$$

مطابق رابطه (۳) ولتاژ خروجی در فاز دوم (V_{O2}) به ولتاژ خروجی در فاز اول (V_{O1}) وابسته می‌باشد. بنابراین برای حذف مقدار V_{O1} از رابطه مذکور، مدار به صورت شکل (پ ۲) تغییر داده می‌شود.



شکل پ ۲. مدار مبدل خازن به ولتاژ تغییر یافته [۲۳].
با اضافه کردن کلید در خروجی مدار، مشکل وجود V_{O1} در رابطه ولتاژ خروجی فاز دوم برطرف می‌شود. در واقع در هر سیکل، خروجی ابتدا صفر می‌گردد، بنابراین ولتاژ سیکل‌های قبلی به ولتاژ سیکل جدید اضافه نمی‌شود [۲۳]. رابطه (۴) ولتاژ خروجی در فاز دوم را نشان می‌دهد.

$$V_O = \frac{C_X - C_R}{C_F} (V_{R2} - V_{R1}) \quad (4)$$

برای اندازه‌گیری رنج‌های مختلفی از خازن C_X (در حد فمتوفاراد و یا پیکوفاراد) باید C_F و C_R مناسب اختیار شوند. در اینجا $V_{R2} - V_{R1} = 0.55 \text{ Volt}$ به ترتیب 1 fF و 1500 fF انتخاب شده‌اند (در اینجا مقادیر مرجع [۲۳] اتخاذ گردیده است). با جایگذاری این مقادیر در رابطه‌ی (۴) به رابطه‌ی (۵) دست می‌یابیم [۲۳].

$$V_O = -0.017 + 3.7 \times 10^{-4} C_X \quad (5)$$

For $100 \text{ fF} \leq C_X \leq 1640 \text{ fF}$

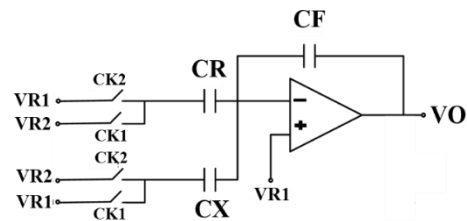
مطابق رابطه‌ی (۵) برای این مدار رنج اندازه‌گیری C_X ، 100 fF تا 1640 fF است اما خازن‌های ساختار پیشنهادی (C_1 ، C_2 و C_3) دارای مقادیر ظرفیت خازنی کمتر هستند (طبق جدول ۱). بنابراین برای مشاهده‌ی تمامی رنج تغییرات میکروسنسور پیشنهادی در خروجی، از خازن C_S ، با مقدار 100 fF موازی با خازن متغیر در مدار قبلی (C_X) استفاده می‌کنیم ($C'_X \parallel C_S = C_X$). در این حالت خازن متغیر مدار که بایستی خازن‌های میکروسنسور پیشنهادی را به آن متصل کنیم، C'_X می‌باشد. پس ولتاژ متناظر با هر یک از خازن‌های ساختار با قرار دادن آن‌ها به جای خازن C'_X از مدار شکل پ ۲ بدست خواهد آمد. رابطه‌ی (۱۲) ظرفیت خازنی را به ولتاژ

- [21] F. Mir, and M. Mehran, "Design, analysis and simulation of a novel linear capacitive tilt micro-sensor," *Microsystem Technologies*, 2016, vol. 22, no. 9, pp. 2159-2165.
- [22] Ueda, H., et al. "Micro capacitive inclination sensor utilizing dielectric nano-particles." *19th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, 2006.
- [23] A. Alam, N. Arfah, S. Khan, "Design of capacitance to voltage converter for capacitive sensor transducer," *American Journal of Applied Sciences*, 2010, vol. 7, no. 10, pp. 1353-1357.
- [24] F. Hosseini, M. Mehran, S. Mohajzade and O. Shoaie, "Design, Analysis, Simulation and Fabrication of a novel linear MEMS capacitive Inclinometer," 2018, *IEEE Sensor*, vol. 18, no. 17, pp. 6962-6968.

پیوسته ۱

در ادامه روشی مختصر برای تبدیل روابط خازنی به ولتاژ بیان شده است.

مدار مبدل خازن به ولتاژ که شماتیک آن در شکل پ ۱، دیده می‌شود، با استفاده از تقویت‌کننده عملیاتی ایجاد شده است. در این مدار از بلوک‌های جمع‌کننده ولتاژ، ضرب‌کننده و تقسیم‌کننده آنالوگ استفاده شده است. C_X خازن متغیر و C_F ، C_R خازن‌های طراحی هستند. سیگنال‌های ck_1 و ck_2 دو کلاک غیر هم‌فاز می‌باشند به نحوی که با یکدیگر هم‌پوشانی ندارند. زمانی که سیگنال ck_2 در حالت ماکزیمم است، C_X توسط ولتاژ V_{R2} شارژ شده و C_F ولتاژ Op-Amp را ذخیره می‌کند. زمانی که سیگنال ck_1 در حالت ماکزیمم است، خازن C_F به خروجی متصل است و ولتاژ V_{R2} خازن C_R را شارژ می‌کند [۲۳].



شکل پ ۱. شمای کلی مدار مبدل خازن به ولتاژ [۲۳].
با نوشتن قانون بقای بار برای هر یک از حالات ماکزیمم بودن سیگنال‌های ck_1 و ck_2 داریم:

$$\left(\sum Q \right)_1 = \left(\sum Q \right)_2 \quad (1)$$

$$0 + (V_{R2} - V_{R1}) C_X + (V_{R1} - V_{O1}) C_F = 0 + (V_{R2} - V_{R1}) C_R + (V_{R1} - V_{O2}) C_F \quad (2)$$

قابل تبدیل شدن به ولتاژ هستند. حساسیت بدست آمده از تحلیل و شبیه سازی برای خروجی نهایی این مدار برحسب ولتاژ به ترتیب $30.48/7972 \mu\text{V}/\text{deg}$ و $3111/8727 \mu\text{V}/\text{deg}$ می باشند.

تبدیل می کند و با جایگذاری رابطه $C'_x + C_s = C_x$ در رابطه ۵ بدست می آید.

$$V_o = 0.0385 + 3.7 \times 10^{-4} C'_x \quad (6)$$

For $0 \text{ fF} \leq C'_x \leq 1540 \text{ fF}$

طبق این رابطه، مدار توانایی تبدیل ظرفیت خازنی در بازه 0 fF تا 1540 fF را به ولتاژ دارد. پس به کمک این مدار، خازن های ساختار درسنسور طراحی شده، با افزودن خازن C_s .