

مقاله علمی-ترویجی

مروری بر کاربرد خازن‌های بین انگشتی در سنسورهای خازنی

■ زینب ورع، آزمایشگاه RF MEMS و بایونانو الکترونیک، بخش مهندسی برق، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، nazaninzeinab.varaa@yahoo.com

■ مهدیه مهران، آزمایشگاه RF MEMS و بایونانو الکترونیک، بخش مهندسی برق، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، m.mehran@uk.ac.ir

چکیده

سنسور المانی است که یک کمیت فیزیکی را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند. سنسورهای خازنی به دلیل عملکرد خوب، داشتن حساسیت عالی، طراحی و ساخت آسان و... بیشتر از سنسورهای دیگر مورد توجه قرار گرفته‌اند. با افزایش تقاضا برای یکپارچه‌سازی سیستم‌های الکترونیکی بر روی تراشه و نیاز به کوچک‌سازی سنسورها، سنسورهای خازنی مبتنی بر خازن بین انگشتی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. خازن بین انگشتی، از تعدادی زوج الکتروود شانه‌ای بر روی بستر عایق تشکیل می‌شود. این خازن‌ها متداول‌ترین ساختار خازنی مورد استفاده در حوزه سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی هستند که ظرفیت و حساسیت آنها در مقایسه با سایر خازن‌ها به نسبت بالاتر است. مزایای خازن‌های بین انگشتی، آن‌ها را به گزینه‌ای محبوب برای کاربرد در سنسورهای مختلف تبدیل کرده است. این مقاله به مروری بر کاربرد خازن‌های بین انگشتی در سنسورهای خازنی مختلف، پرداخته است.

کلمات کلیدی: خازن‌های بین انگشتی، سنسورهای خازنی، سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی

A Review on Application of Interdigital Capacitors in the Capacitive Sensors

■ Zeinab Varaa, RF MEMS and Bio-Nano Electronics (MBNE) Lab, Department of Electrical Eng., Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, nazaninzeinab.varaa@yahoo.com

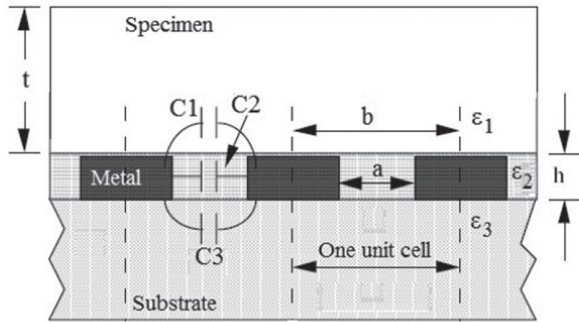
■ Mahdiyeh Mehran, RF MEMS and Bio-Nano Electronics (MBNE) Lab, Department of Electrical Eng., Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, m.mehran@uk.ac.ir

Abstract

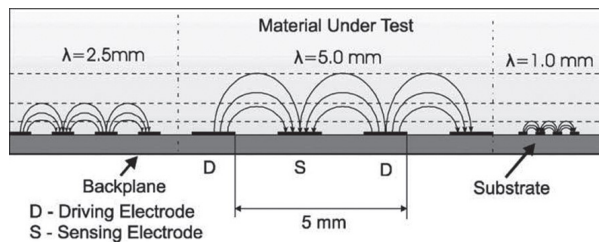
Sensor is a device that converts signals from one physical energy domain to electrical domain. Capacitive sensors have gain lots of attention because of their good performance, excellent sensitivity, easy-to-use principles, ease of manufacturing, etc. Due to the growing demand for the integrated on-chip electronic systems and need for the sensor downscaling, interdigital capacitor type of the sensors has become increasingly popular. These capacitors are the most common used capacitor structures in the micro electro-

mechanical systems and are multi-finger periodic structures on an insulating substrate. Sensitivity and capacitance of the IDTs are relatively higher in comparison with the other capacitors that makes them to an attractive candidate in the sensor applications. This study reviews application of IDTs in the capacitive sensors.

Keywords: Interdigital capacitor, Capacitive sensors, MEMS.



(الف)



(ب)

شکل ۲: (الف) مقطع عرضی خازن‌های بین انگشتی [۶] و (ب) خطوط میدان در خازن‌های بین انگشتی برحسب عرض و فاصله بین الکترودها برای سه خازن متفاوت [۸]

$$C_2 = \epsilon_0 \epsilon_2 \frac{h}{a} \quad (4)$$

$$k = \frac{a}{b} \quad (5)$$

uc : unit cell*

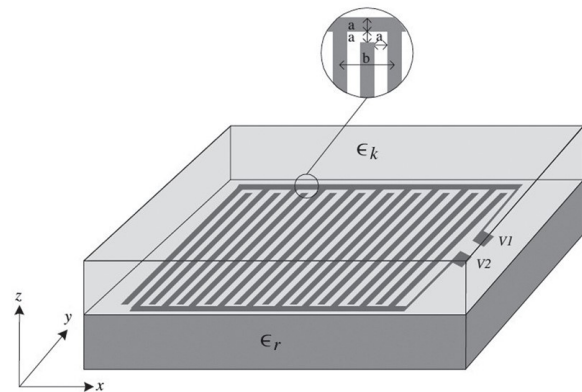
در این روابط h ، L ، C و a به ترتیب نشان‌دهنده ظرفیت کل، تعداد، طول، ضخامت و فاصله بین الکترودها و b مجموع عرض و فاصله بین الکترودها (Pitch) در خازن بین انگشتی نشان داده شده در شکل (۲-الف)، هستند. ϵ_0 ، ضریب گذردهی الکتریکی خلاء، ϵ_1 و ϵ_2 ضرایب گذردهی الکتریکی نسبی ماده قرار گرفته بر رو و بین الکترودها و ϵ_3 ، ضریب گذردهی الکتریکی نسبی بستر را بیان می‌کنند. $K(k)$ تابع انتگرال بیضوی کامل نوع اول است و آرگمان آن با استفاده از رابطه ۵ محاسبه می‌شود [۷].

در این خازن‌ها حداکثر عمق نفوذ خطوط میدان الکتریکی از سطح الکترودها (λ)، با استفاده از رابطه ۶، محاسبه می‌شود [۸]. با توجه به کاربرد و ابعاد سنسور، برای الکترودها، عرض و فاصله مناسبی انتخاب می‌گردد تا سنسور نسبت به ارتفاع خاصی از ماده دی‌الکتریک قرار گرفته بر روی الکترودها حساس باشد. شکل ۲-ب، حداکثر عمق نفوذ خطوط میدان الکتریکی در سه خازن بین انگشتی متفاوت با توجه به عرض و فاصله بین الکترودهایشان، نشان داده شده است [۸].

$$\lambda = b \quad (6)$$

۱- مقدمه

سنسورهای خازنی به دلیل ویژگی‌هایی نظیر خطی بودن خروجی، حساسیت عالی، اصول عملکردی خوب، طراحی و ساخت آسان، کم هزینه بودن و... بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند و با تغییر در ظرفیت خازن، پارامترهای مورد نظر را اندازه‌گیری می‌کنند. علاوه بر این سنسورها در برابر دما، رطوبت و اختلالات مکانیکی مقاومند [۳-۱]. با افزایش تقاضا برای یکپارچه‌سازی سیستم‌های الکترونیکی بر روی تراشه و نیاز به کوچک‌سازی سنسورها، سنسورهای مبتنی بر خازن‌های بین انگشتی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. خازن‌های بین انگشتی متداول‌ترین ساختار خازنی مورد استفاده در حوزه سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی (Micro electromechanical systems) هستند که نسبت به سایر خازن‌ها (خازن‌هایی که الکترودهای آن موازی یا برهم عمود هستند) دارای ظرفیت بزرگتری می‌باشند. شکل (۱)، یک ساختار خازن‌های بین انگشتی را نشان می‌دهد [۴ و ۵]. در ادامه به مرور برخی از سنسورهای مبتنی بر خازن‌های بین انگشتی، می‌پردازیم.



شکل ۱: یک ساختار خازن بین انگشتی [۵]

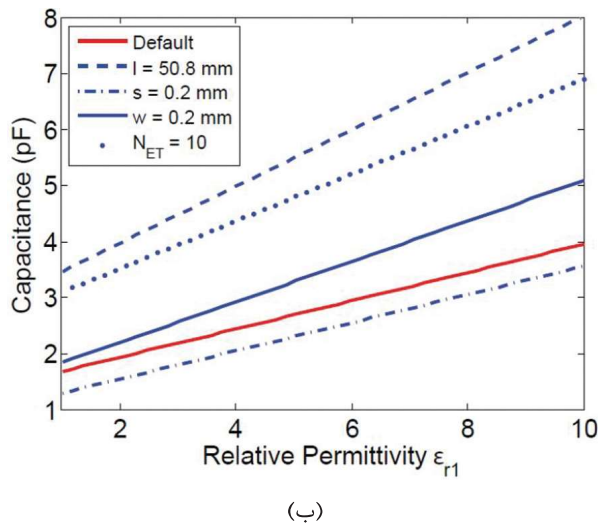
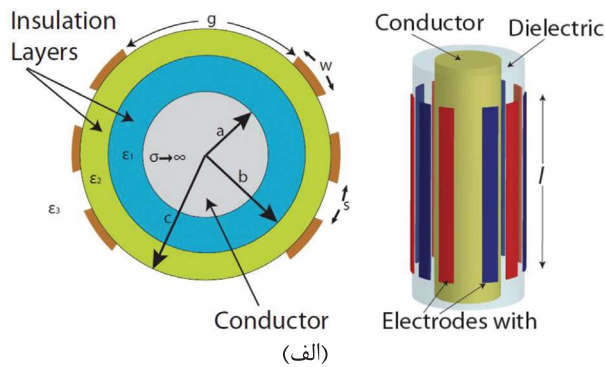
۱-۱- ظرفیت خازن‌های بین انگشتی

با اعمال ولتاژ ترمینال و زمین به الکترودهای خازن بین انگشتی، خطوط میدان الکتریکی از طریق بستر و ماده دی‌الکتریک که بین الکترودها و بر روی آنها قرار گرفته است، بسته می‌شوند که خازن‌های کوچکی به وجود می‌آیند. ظرفیت خازن‌های بین انگشتی مجموع همین خازن‌های کوچک است. با اعمال ولتاژ به الکترودها، بین هر دو الکترودها متوالی خازن بین انگشتی، سه خازن کوچکتر (C_1 ، C_2 و C_3) به وجود می‌آیند که در شکل (۲-الف)، نشان داده شده‌اند. ظرفیت خازن بین انگشتی را می‌توان با استفاده از روابط ۱ تا ۵، به دست آورد [۶].

$$C = C_{uc} (N-1)L \quad (1)$$

$$C_{uc} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (2)$$

$$C_1 + C_3 = \epsilon_0 \left(\frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2} \right) \frac{K\sqrt{1-k^2}}{K(k)} \quad (3)$$



شکل ۳: (الف) سنسور خازنی بین انگشتی برای تشخیص معیوب بودن عایق سیم و (ب) تغییرات ظرفیت خازنی بر حسب ضریب گذردهی نسبی عایق (به طور پیش فرض $l=w=s$, $N=10$, $l=50.8\text{ mm}$, $s=0.2\text{ mm}$, $w=0.2\text{ mm}$) [۱۰].

می‌گردد. تغییر در ضریب گذردهی نسبی عایق کابل‌ها، سبب تغییر در شدت میدان و ظرفیت خازن‌های بین انگشتی می‌شود؛ بنابراین، با اندازه‌گیری ظرفیت خازن می‌توان میزان رطوبت، ضخامت، تراکم و دیگر خواص فیزیکی عایق کابل را شناسایی کرد. نمودار شکل (۴-ب)، تغییرات ظرفیت خازنی، طول یکسانی از ۳ کابل را برای حالت‌هایی که حفره‌های عایق با آب و یا هوا پر شده‌اند، نسبت به حالتی که عایق کابل سالم است را نشان می‌دهد [۱۱].

۲-۲- استفاده از خازن بین انگشتی در سنسورهای رطوبت‌سنج

سنسورهای رطوبت‌سنج به‌طور گسترده در بسیاری از زمینه‌ها مانند هواشناسی، کشاورزی، کنترل صنعتی، پزشکی و غیره استفاده می‌شوند. اندازه‌گیری و کنترل رطوبت در فرآیندهای صنعتی، محصولات کشاورزی و آزمایش‌های تحقیقاتی از اهمیت زیادی برخوردار است. انواع مختلف سنسورهای رطوبت‌سنج براساس روش‌هایی نظیر خازنی، مقاومتی و غیره توسعه یافته‌اند. با این حال علم و فناوری در حال پیشرفت به سمت سنسورهای رطوبت‌سنجی با حساسیت بهتر، محدوده اندازه‌گیری وسیع‌تر، پاسخ سریع‌تر، زمان بازیافت کوتاه‌تر و هزینه کمتر است [۱۲].

اندازه‌گیری رطوبت به‌صورت نسبی انجام می‌شود. رطوبت نسبی (RH)، نسبت رطوبت مطلق (Pv)، به رطوبت اشباع (Ps) در یک دما، می‌باشد. به‌عبارت دیگر نسبت بخار آب موجود در حجم معینی از هوا در یک دما، به بیشترین بخارآبی که می‌توان در همان حجم و دما داشت. رطوبت نسبی یک مقدار وابسته به دما است و اندازه‌گیری آن

۲- سنسورهای خازنی بین انگشتی با الکتروود ثابت

در بسیاری از سنسورهای خازنی بین انگشتی هر دو الکتروود خازن بین انگشتی بر روی بستر، ثابت هستند و قابلیت جابه‌جایی ندارند. روابط (۱)، (۳) و (۴)، نشان می‌دهند ظرفیت خازن‌های بین انگشتی با ضریب دی‌الکتریک قرار گرفته بر رو و بین الکتروودها (ϵ_1 و ϵ_2) و طول الکتروودها (L) رابطه‌ی مستقیم دارد. با تغییر در طول الکتروودها یا ضریب دی‌الکتریک قرار گرفته بر رو و بین آنها، ظرفیت این خازن‌ها تغییر می‌کند و با توجه به تغییرات ظرفیت خازن می‌توان برخی از پارامترها را اندازه گرفت. در برخی از سنسورهای خازنی بین انگشتی با استفاده از دی‌الکتریک مایع می‌توانند برخی از پارامترها نظیر ارتفاع و ثابت دی‌الکتریک مایعات، میزان قند در محلول قندی و... را اندازه‌گیری کنند [۱۹].

بخش‌های بعدی به تعدادی از این قبیل سنسورهای خازنی بین انگشتی می‌پردازد.

۲-۱- استفاده از خازن بین انگشتی برای تشخیص آسیب عایق سیم و کابل

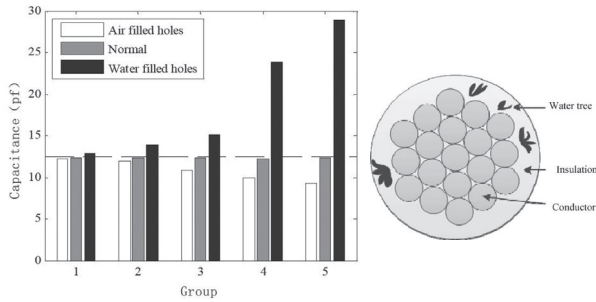
۲-۱-۱- تشخیص معیوب بودن عایق سیم

سیم‌های عایق‌دار در طول زمان استفاده، در معرض انواع مختلف تاثیرات مخرب از قبیل رطوبت، دمای شدید و فشارهای مکانیکی هستند. معیوب شدن سیم‌ها در برخی از دستگاه‌ها و مکان‌ها مانند راکتورهای هسته‌ای، هواپیما و غیره می‌تواند بسیار خطرناک و حتی کشنده باشد، زیرا این سیم‌ها می‌توانند حامل سیگنال‌های هدایت و کنترل باشند. برای بررسی ویژگی عایق‌بندی سیم‌ها تعداد کمی از تست‌کننده‌های تجاری در دسترس‌اند. در برخی از تکنیک‌های تشخیص معایب عایق بندی یک سیم، نیاز به دسترسی هادی مرکزی است که ممکن است به دلیل ولتاژ بالای آن، امکان‌پذیر نباشد یا عایق سیم در طی فرایند تشخیص معیوب بودنش، بیشتر تخریب شود.

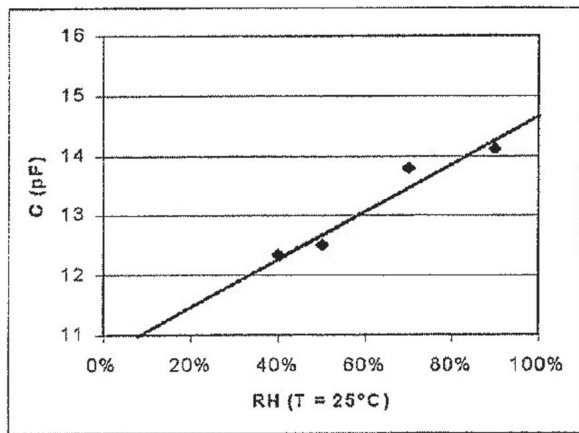
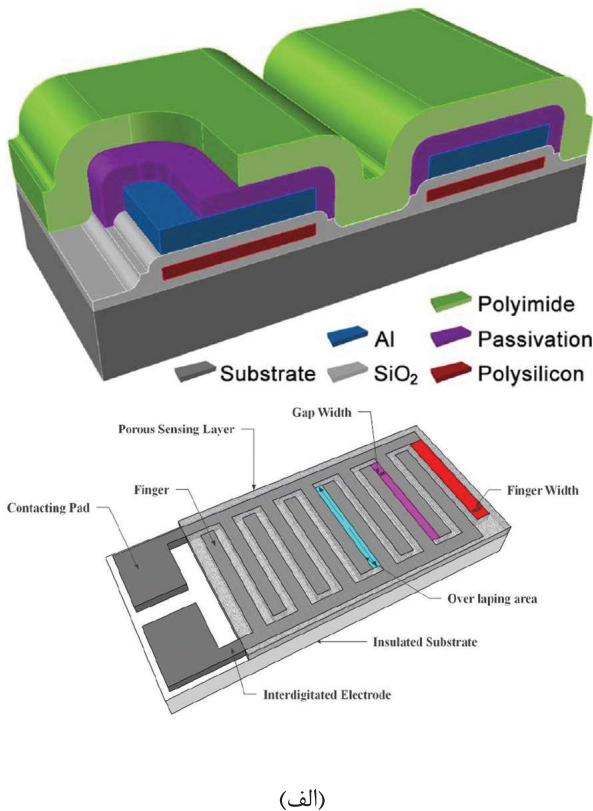
با استفاده از خازن بین انگشتی می‌توان معیوب بودن عایق سیم را تشخیص داد. شکل (۳-الف)، نمایی از این سنسور را نشان می‌دهد. الکتروودهای خازن بین انگشتی بر روی عایق قرار می‌گیرند. اگر عایق سیم معیوب شود، ضریب گذردهی نسبی آن تغییر می‌کند. تغییر در ضریب گذردهی نسبی عایق سیم‌ها سبب تغییر در ظرفیت خازن می‌شود. این سنسور مستقل از ولتاژ اعمالی به الکتروودها بوده و نیاز به دسترسی مستقیم به هادی مرکزی ندارد که یکی از مزیت‌های آن محسوب می‌شود. با توجه به حساسیت سیستم تعداد، عرض و فاصله الکتروودها را می‌توان متفاوت انتخاب کرد. نمودار شکل (۳-ب)، ظرفیت خازن بین انگشتی را برحسب گذردهی نسبی عایق به ازای مقادیر مختلف و مشخص طول (l)، عرض (w)، تعداد (N) و فاصله (s) بین الکتروودها، نشان می‌دهد [۱۰].

۲-۱-۲- تشخیص آسیب در عایق کابل‌های برق

کابل‌های برق بر امنیت شبکه‌های برق تاثیرگذار هستند. عایق کابل‌ها بر اثر رطوبت، استرس مکانیکی و برخی از عوامل القاء، ممکن است دچار تخریب شوند. برای مثال شکل (۴-الف)، نشان‌دهنده آب در میان عایق کابل برق است. می‌توان با به‌کارگیری روش‌هایی نظیر تخلیه جزئی، ابرسانی یا جریان نشی، معیوب بودن کابل را تشخیص داد که نیاز به تجهیزات خاص و عملیات پیچیده دارد. استفاده آسان و کارآمد از سنسور خازنی بین انگشتی در شناسایی آسیب کابل‌های برق، آن را نسبت به سایر روش‌های تشخیص متمایز کرده است [۱۰]. الکتروودهای خازن‌های بین انگشتی بر روی بدنه کابل‌ها قرار گرفته و سیگنال تحریک با یک فرکانس خاصی به آنها اعمال می‌شود، در نتیجه بین الکتروودهای خازن بین انگشتی میدان الکتریکی برقرار



شکل ۴: (الف) حضور آب درون کابل و (ب) مقایسه ظرفیت خازنی برای سه حالت، کابل سالم و کابلی که عایق آن با هوا یا آب پر شده باشد [۱۱]



شکل ۵: (الف) سنسور رطوبت-سنج با استفاده از لایه جاذب رطوبت [۱۳، ۱۲] و (ب) ظرفیت خازن برحسب رطوبت نسبی موجود در دمای ۲۵°C [۱۵]

به صورت درصد و مطابق با رابطه (۷)، بیان می‌شود [۱۳].

$$RH\% = \frac{P_v}{P_s} \times 100 \quad (7)$$

انواع مختلفی از سنسورهای رطوبت-سنج برای کاربردهای صنعتی و آزمایشگاهی ساخته شده‌اند. در این میان، سنسورهای رطوبت خازنی به دلیل حساسیت بالا، کم‌مصرف بودن و هزینه پایین بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. در بخش‌های بعدی به نمونه‌هایی از رطوبت-سنج‌های مبتنی بر خازن‌های بین‌انگشتی می‌پردازیم.

۲-۲-۱- سنسور رطوبت-سنج با استفاده از یک لایه جاذب

در این نمونه از سنسورهای رطوبت-سنج، الکترودهای خازن بین‌انگشتی بر روی یک بستر شیشه‌ای یا سرامیکی قرار داده می‌شوند. بر روی الکترودها یک ماده جاذب رطوبت نظیر پلی‌آمید (لایه حساس به رطوبت) قرار می‌گیرد. ضریب گذردهی لایه حساس، با جذب رطوبت افزایش می‌یابد. با توجه به میزان رطوبت محیط، ظرفیت خازن تغییر می‌کند. قسمت‌های (الف) و (ب) از شکل (۵)، به ترتیب ساختار یک سنسور رطوبت-سنج خازنی و نمودار ظرفیت خازن بین‌انگشتی برحسب رطوبت اندازه‌گیری شده در دمای ۲۵°C را نشان می‌دهد [۱۲-۱۵].

۲-۲-۲- سنسور رطوبت-سنج بر روی بستر اکسید آلومینیوم

در نمونه‌های دیگر از رطوبت-سنج‌های خازنی بین‌انگشتی، الکترودها بر روی بستری از اکسید آلومینیوم (لایه حساس به رطوبت) که دارای حفره‌های نانومتری است، قرار می‌گیرند. شکل (۶-الف)، ساختار این سنسور را نشان می‌دهد. حفره‌های نانومتری بستر، سطح بزرگ‌تری را برای جذب رطوبت ایجاد می‌کنند. با ضخیم شدن لایه اکسید آلومینیوم سطح تماس افزایش می‌یابد که سبب بیشتر شدن حساسیت سنسور می‌شود. همچنین اگر الکترودها نیز متخلخل شوند، حساسیت سنسور نسبت به الکترودها بدون تخلخل، بیشتر می‌شود. الکترودها می‌توانند به صورت مستطیلی یا مارپیچی بر روی بستر قرار گیرند. پسماند مغناطیسی (Hysteresis) در حالتی که الکترودها مستطیلی شکل هستند نسبت به حالت مارپیچی، بیشتر است اما در این حالت حساسیت بیشتر می‌باشد. اگر بتوان پسماند مغناطیسی را در حالتی که الکترودها مستطیلی شکل هستند، با کنترل عوامل طراحی یا گرمایش کاهش داد، زمان پاسخ و وابستگی سنسور به دما، بهبود می‌یابد [۱۶]. خروجی این سنسور رطوبت-سنج در شکل (۶-ب) مشاهده می‌شود.

۲-۳- سنسور رطوبت SAW مبتنی بر اکسید گرافن

سنسورهای SAW (Surface acoustic wave)، از دو خازن بین‌انگشتی قرار گرفته بر روی یک بستر پیزوالکتریک ایجاد می‌شوند. اگر به موادی با خاصیت پیزوالکتریک نیروی خارجی (کشش، فشار و...) اعمال شود دو قطبی‌های این مواد تحریک و سبب ایجاد میدان الکتریکی می‌شوند. این خاصیت به صورت معکوس نیز در این مواد وجود دارد. از مواد پیزوالکتریک در مبدل‌ها یا وسایلی که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند یا برعکس، استفاده می‌شود. زمانی که یک سیگنال الکتریکی با دامنه و فرکانس معین به خازن اول اعمال می‌شود، در سطح بستر پیزوالکتریک یک موج سطحی منتشر می‌شود. این موج از طریق بستر پیزوالکتریک به خازن دوم منتقل می‌شود. هنگامی که سیگنال به خازن دوم می‌رسد، دامنه و فرکانس آن در شرایط نرمال (هیچ اثر مکانیکی از خارج بر بستر پیزوالکتریک وارد نشود) به طور تقریبی برابر با سیگنال اعمال شده به خازن اول است. اما با اعمال کمیت‌هایی نظیر فشار، کشش، دما و... بر بستر پیزوالکتریک، فرکانس و دامنه سیگنال دریافتی در خازن

دوم متناسب با تغییر مکانیکی اعمال شده به بستر پیزوالکتریک تغییر می‌کند. حال اگر بر روی بستر پیزوالکتریک بین دو خازن، ماده جاذب آنالیت مورد نظر قرار گیرد، بسته به میزان آنالیت موجود در محیط، فرکانس سیگنال دریافتی در خازن دوم نسبت به فرکانس سیگنال اعمالی به خازن اول تغییر می‌کند. از این رو می‌توان طیف وسیعی از سنسورها را طراحی کرد [۱۹-۱۷].

ساختار سنسور رطوبت SAW، در شکل (۷-الف)، قابل مشاهده است. دو خازن بین انگشتی بر روی یک بستر پیزوالکتریک قرار دارند و بین آنها لایه‌ی جاذب رطوبت (اکسید گرافن) قرار داده می‌شود. سیگنالی با دامنه و فرکانس معلوم به خازن اول اعمال می‌شود. با توجه به میزان رطوبت محیط، لایه جاذب رطوبت، (اکسید گرافن) باعث تغییر مکانیکی در بستر پیزوالکتریک می‌شود. به این ترتیب فرکانس دریافتی در خازن دوم تغییر می‌کند که از روی میزان تغییرات در فرکانس سیگنال دریافتی در خازن دوم، می‌توان میزان رطوبت نسبی را اندازه‌گیری کرد. نمودار شکل (۷-ب)، تغییرات فرکانس دریافتی را بر حسب رطوبت نسبی محیط نشان می‌دهد. در بسیاری از برنامه‌های کاربردی به دلیل طراحی ساده و حساسیت عالی سنسورهای رطوبت SAW مبتنی بر اکسید گرافن، از آن‌ها استفاده شود [۲۰].

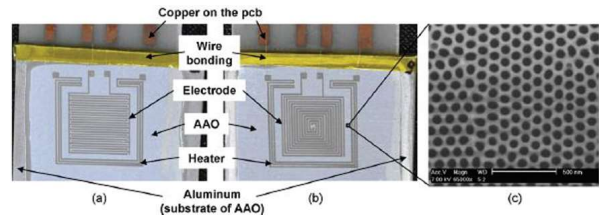
۳-۲- استفاده از خازن بین انگشتی در سنسور گاز

سنسورهای گاز خازنی، دارای زمان پاسخدهی کوتاهی هستند. این سنسورها به دما وابسته‌اند و برای آن‌ها، باید دمای کاری مناسبی تعریف کرد. سنسورهای خازنی بین انگشتی می‌توانند گازهای بسیار خطرناک مونوکسید کربن و دی اکسید گوگرد را در محیط شناسایی کنند. در این سنسورها، از گروه‌های آمینو به‌عنوان لایه حساس، استفاده شده است که بر رو و بین الکترودها لایه نشانی می‌شود. شکل (۸-الف)، ساختار سنسور گازی را با استفاده از خازن بین انگشتی، نشان می‌دهد. زمانی که گاز مورد نظر به درون محفظه پمپ می‌شود، ضریب گذردهی نسبی لایه حساس با جذب گاز مورد نظر، تغییر کرده و باعث تغییر در ظرفیت خازن بین انگشتی می‌شود که با توجه به آن می‌توان، غلظت گاز مورد نظر در محفظه را اندازه گرفت. حساسیت این سنسورهای خازنی گاز را می‌توان با تغییر در هندسه آن‌ها بهبود بخشید. در حالت بهبود داده شده، لایه حساس را فقط بین دو الکتروده قرار می‌دهند. شکل (۸-ب) خروجی یک سنسور گاز را بر حسب غلظت‌های مختلف گاز دی اکسید گوگرد با توجه به فاصله بین الکترودها، نشان می‌دهد [۲۱-۲۳].

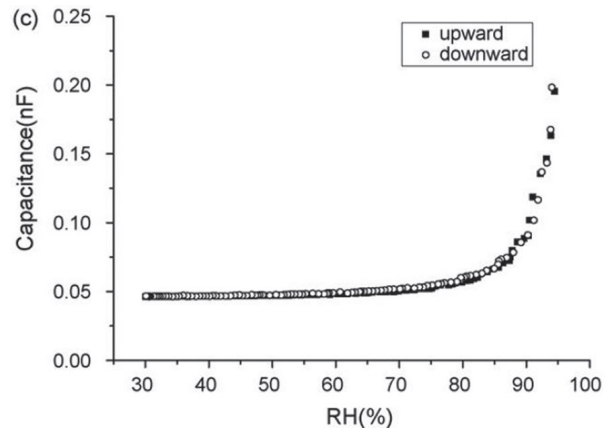
۴-۲- استفاده از خازن بین انگشتی در سنسور شیمیایی

گونه‌های مختلف شیمیایی نظیر اتم‌ها، مولکول‌ها و یون‌ها را که در یک فرآیند شیمیایی تولید می‌شوند می‌توان با استفاده از روش‌هایی نظیر تغییر در مقاومت و خازن، تغییر در فرکانس رزونانس کانتیلور (cantilever) و... شناسایی کرد. در روش خازنی، لایه‌ای نازک از پلیمر بر روی صفحات خازن قرار می‌گیرد. استفاده از خازن بین انگشتی پوشش داده شده با پلیمر، یکی از ساده‌ترین ابزارها برای سنسورهای شیمیایی است، همچنین هزینه ساخت آن‌ها کم بوده و به حداقل پردازش نیاز دارند. شکل (۹-الف)، ساختار کلی سنسور شیمیایی با استفاده از خازن بین انگشتی را، نشان می‌دهد [۲۴].

در این سنسور، لایه‌ای نازک از پلیمر، بر روی الکترودهای خازن بین انگشتی قرار می‌گیرد. با قرار گرفتن سنسور در معرض آنالیت مورد نظر، ضریب دی‌الکتریک پلیمر تغییر کرده و باعث تغییر در ظرفیت خازن بین انگشتی می‌شود. شکل (۹-ب)، نمودار خروجی سنسور را در غلظت‌های مختلف و برای چهار ماده‌ی (متانول، اتانول، بخار آب و بخارات تولوئن)، ارایه می‌دهد [۲۴].

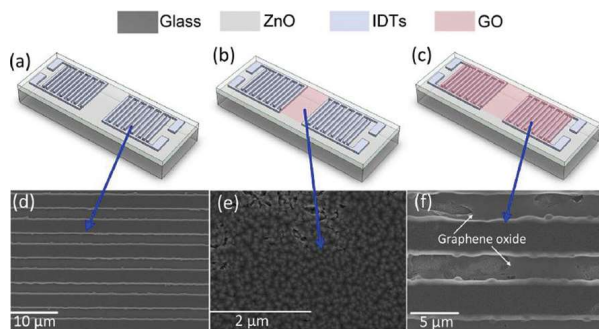


(الف)

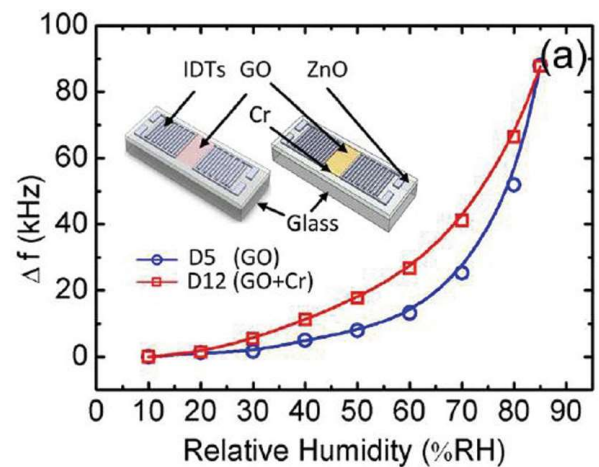


(ب)

شکل ۶: (الف) قرارگیری الکترودهای خازن بین انگشتی بر روی بستر اکسید آلومینیوم و (ب) نمودار تغییرات ظرفیت خازن بر حسب رطوبت محیط [۱۶]

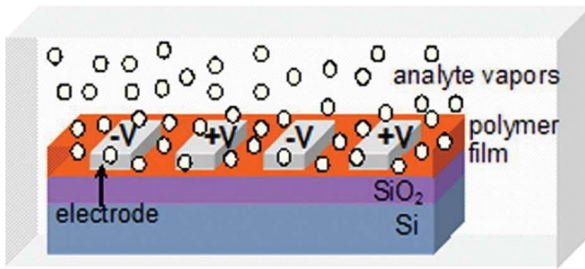


(الف)

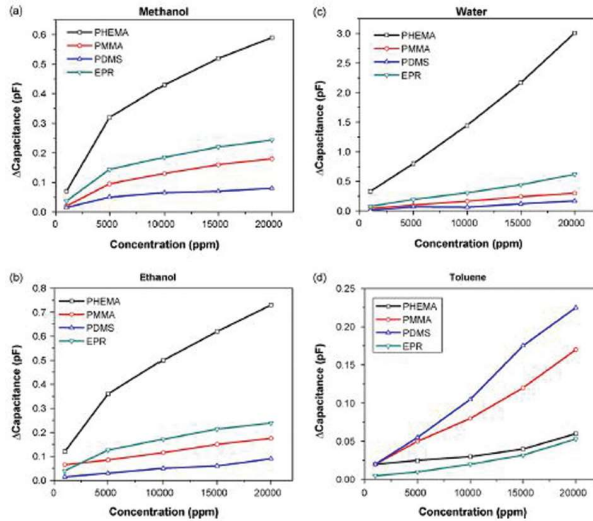


(ب)

شکل ۷: (الف) تصویری از سنسور رطوبت سنج SAW و (ب) تغییرات فرکانس بر حسب میزان رطوبت نسبی محیط [۲۰]



(الف)



(ب)

شکل ۹: (الف) تصویری از سنسور شیمیایی با استفاده از خازن بین انگشتی و (ب) نمودارهای تغییرات ظرفیت خازن در غلظت‌های مختلف برای چهار ماده متانول، اتانول، بخار آب و بخارات تولوئن [۲۴]

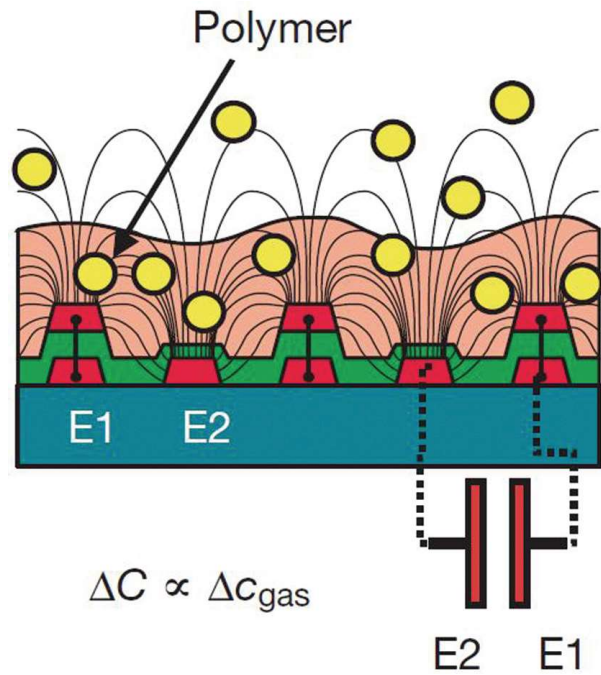
موردنظر دست یافت [۲۵-۲۸].

شکل‌های (۱۰-الف) و (۱۰-ب) به ترتیب تصویری از سطح بیوسنسور و خروجی آن بر حسب غلظت باکتری موجود در محیط در سه فرکانس متفاوت را نشان می‌دهد [۲۷-۲۸].

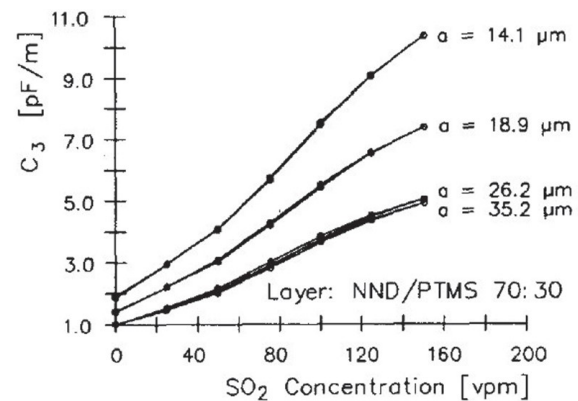
۲-۶- استفاده از خازن بین انگشتی در سنسور جابه جایی

از سنسورهای جابه جایی برای اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی یک جسم متحرک یا اندازه‌گیری طول و عرض یک جسم استفاده می‌شود. در این سنسورها از خازن بین انگشتی می‌توان بهره برد. شکل (۱۱-الف)، تصویری از سنسور جابه‌جایی با استفاده از خازن بین انگشتی را نشان می‌دهد. این سنسور با استفاده از فناوری ساخته شده است [۲۹].

LTCC (Low Temperature Co-Fired Ceramics) در دو طرف خازن دو نگهدارنده قرار دارد که با کمک آن‌ها، صفحه دی الکتریک قرار گرفته بر روی خازن، قابلیت تحرک می‌یابد و تشخیص جابه‌جایی با تغییر موقعیت این صفحه، انجام می‌پذیرد. زمانی که صفحه متحرک به الکترودهای خازن نزدیک یا از آن‌ها دور می‌شود، خطوط میدان الکتریکی عبوری از آن تغییر کرده و باعث تغییر در ظرفیت خازن می‌شود. اما باید توجه داشت که این سنسور توانایی اندازه‌گیری فواصل معین را دارد، زیرا اگر فاصله صفحه دی الکتریک متحرک از خازن بین انگشتی، از یک حد بیشتر شود، خطوط میدان الکتریکی دیگر از این صفحه عبور نمی‌کنند که این امر منجر به ثابت شدن ظرفیت خازن می‌شود. برای مثال در طراحی این سنسور، مجموع عرض و فاصله بین الکترودها (b)، در نظر گرفته شده است؛ بنابراین طبق رابطه ۶، حداکثر میزان عمق نفوذ خطوط میدان الکتریکی



(الف)



(ب)

شکل ۸: (الف) مقطع عرضی از یک سنسور گاز مبتنی بر خازن بین انگشتی [۲۳] و (ب) خروجی سنسور برای غلظت‌های مختلف گاز دی اکسید گوگرد به ازای

فاصله بین الکترودهای مختلف [۲۲]

۲-۵- استفاده از خازن بین انگشتی در بیوسنسورها

از خازن‌های بین انگشتی برای شناسایی ویروس‌ها، باکتری‌ها، سموم یا سایر عواملی که مضر بوده و موجب بیماری یا مرگ در افراد، حیوانات و گیاهان می‌شوند، می‌توان استفاده کرد. همچنین با استفاده از آن‌ها می‌توان به بررسی چگونگی وقوع واکنش‌های شیمیایی در سلول‌ها، بافت‌ها و ارگان‌ها پرداخت. با استفاده از آنتی‌ژن‌ها، آنتی‌بادی‌ها یا دنبال کردن DNA می‌توان بیماری‌های ژنتیکی و عفونت‌های ویروسی را تشخیص داد. برای استفاده از خازن‌های بین انگشتی در کاربردهای بیوسنسوری، باید بر روی الکترودهای آنها، لایه‌ای از آنتی‌ژن یا آنتی‌بادی قرار داد. زمانی که این سنسورها در تماس با ماده‌ای تحت بررسی قرار گیرند، آنالیت مورد نظر، جذب آنتی‌ژن‌ها یا آنتی‌بادی‌های قرار گرفته بر روی الکترودها می‌شوند؛ بنابراین ضریب دی الکتریک خازن تغییر می‌کند که این خود سبب تغییر در ظرفیت خازن می‌شود که از روی می‌توان به مقدار آنالیت وجود در محیط

این سنسور افزایش یا کاهش فشار سبب تغییر در طول الکترودهای خازن بین‌انگشتی شده، در نتیجه ظرفیت خازن و فرکانس رزونانس مدار تغییر می‌کند. نتایج آزمون نشان می‌دهند که با افزایش فشار، فرکانس رزونانس به صورت خطی کاهش می‌یابد که در شکل (۱۳-الف) قابل مشاهده است [۳۰].

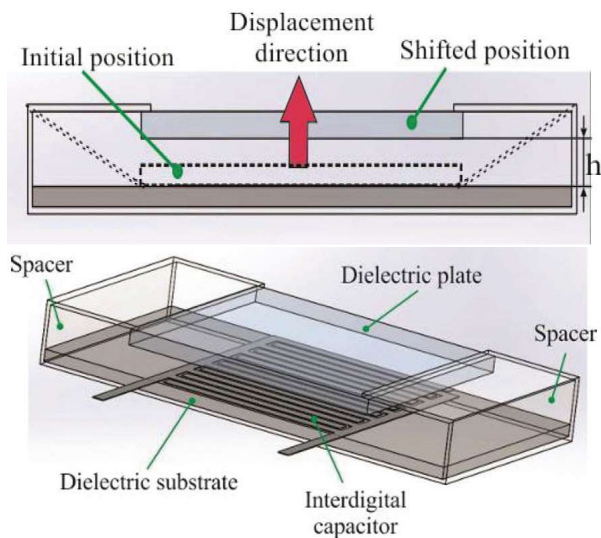
$$L_s = \frac{\mu n^2 d_{avg}}{2} \left[\ln \left(\frac{2.46}{P_s} \right) + 0.2 P_s^2 \right] \quad (8)$$

$$C_s = L_c (N_c - 1) \epsilon_0 \frac{1 + \epsilon_r k \left[(1 - (g_c / (w_c + g_c))^2)^{1/2} \right]}{2K(g_c / (w_c + g_c))} \quad (9)$$

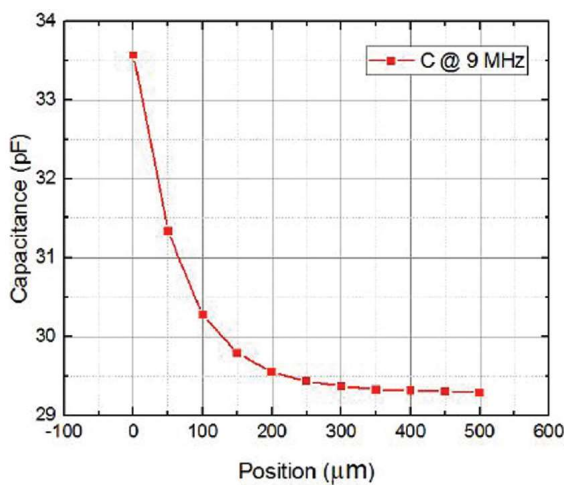
$$P_s = d_{out} - \frac{d_{in}}{d_{out}} + d_{in} \quad (10)$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s C_s}} \quad (11)$$

برای بررسی عملکرد این سنسور فشار در دمای بالا، از سیم تنگستن

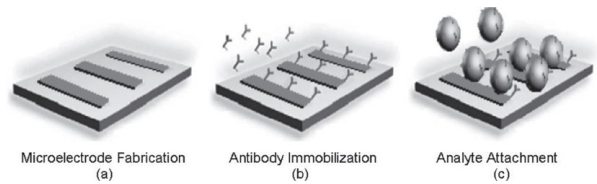


(الف)

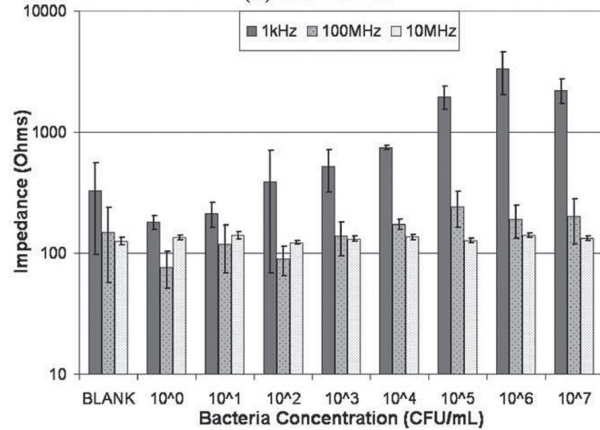


(ب)

شکل ۱۱: (الف) تصویری از یک سنسور جابجایی بر اساس خازن بین‌انگشتی و (ب) خروجی سنسور خازنی برحسب مکان صفحه دی‌الکتریک متحرک [۲۹]



(الف)



(ب)

شکل ۱۰: (الف) تصویری از سطح بیوسنسور [۲۷] و (ب) خروجی سنسور بر حسب غلظت‌های مختلف باکتری موجود در محیط در سه فرکانس ۱ kHz، ۱۰۰ MHz و ۱۰ MHz [۲۸]

(λ) ۵۰۰ μm است. به منظور اطمینان از بسته شدن خطوط میدان الکتریکی از طریق صفحه دی‌الکتریک متحرک، ضخامت این صفحه، بیش از ۵۰۰ μm در نظر گرفته شده است. شکل (۱۱-ب)، خروجی سنسور خازنی برحسب مکان صفحه دی‌الکتریک متحرک را نشان می‌دهد [۲۹].

۲-۷- استفاده از خازن‌های بین‌انگشتی در سنسور فشار

سنسور فشار خازنی بین‌انگشتی بر پایه فناوری LTCC ساخته شده است. از این سنسور برای اندازه‌گیری فشار در محیط‌های با دمای بالا یا در محیط‌هایی که گاز خطرناک وجود دارد، می‌توان استفاده کرد. ساختار این سنسور شامل یک سلف ثابت و خازن متغیر است و از هیچ‌گونه منبع تغذیه‌ای نظیر باتری، استفاده نمی‌شود، بنابراین احتمال وقوع جرقه الکتریکی در محیط وجود ندارد. قسمت‌های الف و ب در شکل (۱۲)، به ترتیب مدار و ساختار این سنسور را نشان می‌دهد [۳۰].

الکترودهای خازن‌های بین‌انگشتی بر روی یک بستری انعطاف‌پذیر قرار دارند که افزایش یا کاهش فشار سبب تغییر در طول الکترودهای خازن شده و ظرفیت خازنی به صورت خطی و متناسب با آن تغییر می‌کند ولی مقدار سلف ثابت است. روابط (۸) و (۹) به ترتیب بیانگر مقدار سلف ثابت (L_s) و خازن متغیر (C_s) هستند. در رابطه (۸)، $\mu n^2 d_{avg}$ به ترتیب نشان‌دهنده هدایت مغناطیسی در خلاء، تعداد دورهای سیم پیچ و میانگین قطر خارجی و داخلی سلف هستند. PS با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود که در آن d_{in} و d_{out} به ترتیب قطرهای خارجی و داخلی سلف، هستند. در رابطه (۹)، از طول (L_c)، تعداد الکترودها (N_c)، ضریب گذردهی الکتریکی خلاء (C_r)، ضریب نسبی گذردهی بستری که الکترودها بر روی آن قرار دارند (C_r)، فاصله بین الکترودها (g_c)، عرض الکترودها (w_c) و انتگرال بیضوی کامل نوع اول K(k) استفاده شده است. این سنسور تغییرات فشار را با توجه به تغییرات فرکانس رزونانس (f_H) تشخیص می‌دهد. فرکانس رزونانس مطابق با رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود. بنابراین در

استفاده شده است. دمای آزمایش بین 25°C تا 600°C است. رابطه بین فشار و دما در نمودار (۱۳-ب)، نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که فرکانس رزونانس سنسور با افزایش درجه حرارت کاهش می‌یابد [۳۰].

۳- سنسورهای خازنی بین انگشتی با استفاده از الکترو د متحرک

در سنسورهایی که تاکنون در این مقاله مرور شدند، الکتروهای خازن‌های بین انگشتی بر روی بستری ثابت بودند، اما در برخی از کاربردها، یکی از الکتروهای این خازن‌ها ثابت و دیگری متحرک است که با جابه‌جایی الکترو د متحرک، ظرفیت خازن تغییر می‌کند. در ادامه به مرور نمونه‌ای از این قبیل سنسورها می‌پردازیم.

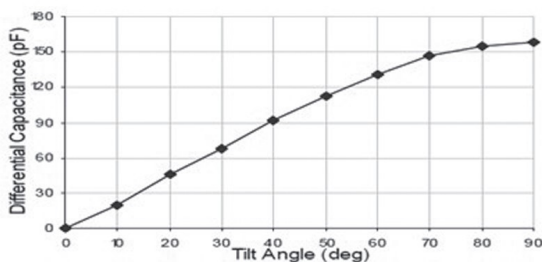
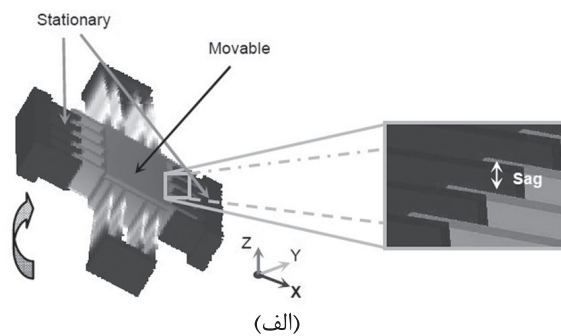
۳-۱- استفاده از خازن بین انگشتی در سنسور زاویه

ساختار یک سنسور خازنی شیب در شکل (۱۴-الف)، نشان داده شده است. در این سنسور تعدادی از الکتروها به یک جرم معلق متصلند که قابلیت حرکت دارند و در مقابل آن‌ها الکتروهای ثابتی وجود دارند. زمانی که این سنسور در معرض زاویه (شیب) قرار گیرد، نیروی گرانش وارد شده به جرم معلق، باعث جابه‌جایی آن می‌شود. بنابراین الکتروهای متصل به جرم معلق تغییر موقعیت داده و ظرفیت خازن‌های بین انگشتی را تغییر می‌دهند. این جابه‌جایی سبب افزایش ظرفیت خازن در یک جهت و کاهش ظرفیت خازن در طرف مقابل می‌شود. خروجی سنسور را می‌توان با استفاده از روابط (۱۲) و (۱۳) محاسبه کرد که در شکل (۱۴-ب) ارائه شده است [۳۱].

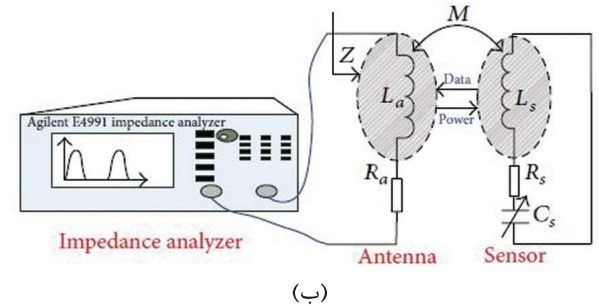
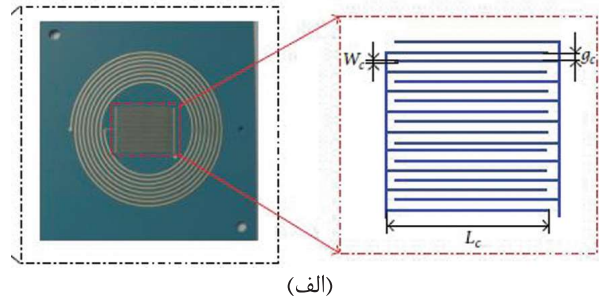
$$C = \frac{(l_0 \pm \Delta x)h\epsilon N}{G} = \frac{A_0\epsilon N}{G} \quad (12)$$

$$\Delta x = mgsin(\theta) / k_x \quad (13)$$

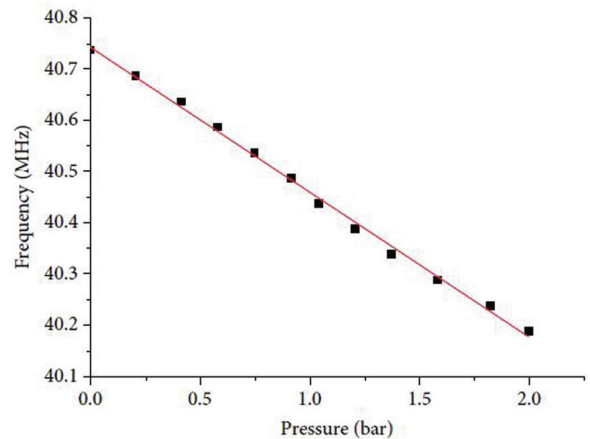
در روابط (۱۲) و (۱۳)، l_0 طول اولیه همپوشانی الکتروهای خازن، A_0 سطح اولیه همپوشانی و h ضخامت این الکتروها می‌باشد، ϵ گذردهی دی‌الکتریک به کار رفته در سنسور، Δx میزان جابه‌جایی افقی الکتروهای خازن، mg نیروی گرانش وارد بر جرم معلق، زاویه شیب، N تعداد الکتروها و h ثابت فنر هستند [۳۱].



شکل ۱۴: سنسور شیب خازنی، (الف) ساختار و (ب) مشخصه خروجی [۳۱].

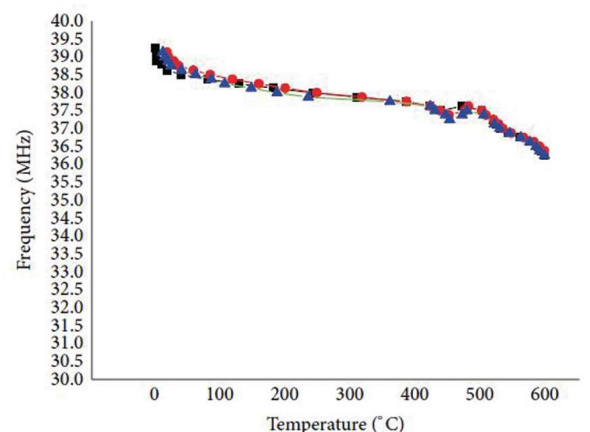


شکل ۱۳: (الف) مدار و (ب) تصویر سنسور فشار با استفاده از خازن بین انگشتی [۳۰]



■ Measured
— Data fit

(الف)



■ Frequency-1
● Frequency-2
▲ Frequency-3

(ب)

شکل ۱۳: نمودارهای (الف) فرکانس رزونانس بر حسب فشار و (ب) فرکانس رزونانس بر حسب دما [۳۰].

۴- نتیجه‌گیری

سنسورهای خازنی در مقایسه با سایر سنسورها، دارای مزایای بسیاری از قبیل قابلیت اندازه‌گیری خطی، حساسیت عالی، اصول عملکردی ساده، ساخت آسان و... هستند. ساختار این سنسورها تحت تأثیر دما، رطوبت یا اختلالات مکانیکی قرار نمی‌گیرند. با افزایش تقاضا برای یکپارچه‌سازی سیستم‌های الکترونیکی بر روی تراشه و نیاز به کوچک‌سازی سنسورها، سنسورهای مبتنی بر خازن‌های بین‌انگشتی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند.

خازن‌های بین‌انگشتی از دو الکتروود شانه‌ای شکل قرار گرفته بر روی یک بستر عایق، تشکیل می‌شوند. هر دو الکتروود خازن بین‌انگشتی در یک صفحه قرار می‌گیرند. این الکتروودها در سنسورهای مختلف بسته به کاربرد، می‌توانند هر دو ثابت یا یکی از آن‌ها ثابت و دیگری متحرک باشند. ظرفیت خازن‌های بین‌انگشتی نسبت به سایر خازن‌ها بزرگتر است و با تغییر در تعداد الکتروودها، ابعاد، فاصله بین الکتروودها و ضریب گذردهی الکتریکی بستر عایق و ماده‌ی دی‌الکتریک بر روی الکتروودها تغییر می‌کند. ظرفیت خازن بین‌انگشتی با طول و ضریب دی‌الکتریک ماده قرار گرفته بر رو و بین الکتروودها رابطه خطی دارد که اساس کار بسیاری از سنسورهای مبتنی بر خازن‌های بین‌انگشتی است.

ویژگی‌های برجسته خازن‌های بین‌انگشتی، آن‌ها را به یک گزینه محبوب برای اندازه‌گیری پارامترهایی نظیر فشار، جابه‌جایی، رطوبت و... تبدیل کرده است. در این مقاله سعی بر آن شد که نمونه‌هایی از سنسورهای خازنی بین‌انگشتی مورد بررسی قرار گیرند. این سنسورها در تشخیص آسیب عایق سیم و کابل، اندازه‌گیری فشار، جابه‌جایی، زاویه کاربرد دارند. از خازن‌های بین‌انگشتی می‌توان در سنسورهای شیمیایی، گاز، رطوبت سنجی و بیوسنسورها نیز استفاده کرد.

مراجع

- digital capacitive sensors for detecting power cable insulation damage," in *Mechatronics and Automation (ICMA)*, 2015 IEEE International Conference on, 2015, pp. 1795–1799.
- [12] C.-L. Zhao, M. Qin, and Q.-A. Huang, "A fully packaged CMOS interdigital capacitive humidity sensor with polysilicon heaters," *IEEE Sens. J.*, vol. 11, no. 11, pp. 2986–2992, 2011.
- [13] H. Farahani, R. Wagiran, and M. Hamidon, "Humidity sensors principle, mechanism, and fabrication technologies: a comprehensive review," *Sensors*, vol. 14, no. 5, pp. 7881–7939, 2014.
- [14] P. Fürjes, A. Kovacs, C. Dúcsó, M. Ádám, B. Müller, and U. Mescheder, "Porous silicon-based humidity sensor with interdigital electrodes and internal heaters," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 95, no. 1–3, pp. 140–144, 2003.
- [15] C. Laville, C. Pellet, and G. N'Kaoua, "Interdigitated humidity sensors for a portable clinical microsystem," in *Microtechnologies in Medicine and Biology*, 1st Annual International Conference On, 2000, pp. 572–577, 2000.
- [16] Y. Kim, B. Jung, H. Lee, H. Kim, K. Lee, and H. Park, "Capacitive humidity sensor design based on anodic aluminum oxide," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 141, no. 2, pp. 441–446, 2009.
- [17] A. Pohl, "A review of wireless SAW sensors," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 47, no. 2, pp. 317–332, 2000.
- [18] M. Penza, F. Antolini, and M. V. Antisari, "Carbon nanotubes as SAW chemical sensors materials," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 100, no. 1–2, pp. 47–59, 2004.
- [19] K. Länge, B. E. Rapp, and M. Rapp, "Surface acoustic wave biosensors: a review," *Anal. Bioanal. Chem.*, vol. 391, no. 5, pp. 1509–1519, 2008.
- [20] W. Xuan et al., "Fast response and high sensitivity ZnO/glass surface acoustic wave humidity sensors using graphene oxide sensing layer," *Sci. Rep.*, vol. 4:7206, pp. 1–9, 2014.
- [21] D. M. Liu, J. Aguilar-Hernandez, K. Potje-Kamloth, and H. D. Liess, "A new carbon monoxide sensor using a polypyrrole film grown on an interdigital-capacitor substrate," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 41, no. 1–3, pp. 203–206, 1997.
- [22] H.-E. Endres and S. Drost, "Optimization of the geometry of gas-sensitive interdigital capacitors," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 4, no. 1–2, pp. 95–98, 1991.
- [23] C. Hagleitner et al., "Smart single-chip gas sensor microsystem," *Nature*, vol. 414, no. 6861, p. 293–296, 2001.
- [24] M. Kitsara et al., "Single chip interdigitated electrode capacitive chemical sensor arrays," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 127, no. 1, pp. 186–192, 2007.
- [25] S. M. Radke and E. C. Alocilja, "Design and fabrication of a microimpedance biosensor for bacterial detection," *IEEE Sens. J.*, vol. 4, no. 4, pp. 434–440, 2004.
- [26] M. Varshtey and Y. Li, "Interdigitated array microelectrodes based impedance biosensors for detection of bacterial cells," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 24, no. 10, pp. 2951–2960, 2009.
- [27] S. M. Radke and E. C. Alocilja, "A microfabricated biosensor for detecting foodborne bioterrorism agents," *IEEE Sens. J.*, vol. 5, no. 4, pp. 744–750, 2005.
- [28] S. M. Radke and E. C. Alocilja, "A high density microelectrode array biosensor for detection of *E. coli* O157: H7," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 20, no. 8, pp. 1662–1667, 2005.
- [29] N. Blaž, M. Kisić, Č. Žlebić, G. Mišković, G. Radosavljević, and L. Živanov, "Displacement sensor based on interdigital capacitor," in *Electronics Technology (ISSE)*, 2015 38th International Spring Seminar on, pp. 477–481, 2015.
- [30] Q. Tan et al., "A novel interdigital capacitor pressure sensor based on LTCC technology," *J. Sensors*, vol. 2014, pp. 1–6, 2014.
- [31] L. Zhao and E. M. Yeatman, "Micro capacitive tilt sensor for human body movement detection," in *4th International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN 2007)*, pp. 195–200, 2007
- [1] N. Maluf, "An introduction to microelectromechanical systems engineering," *Measurement Science and Technology*, Vol. 13, No. 2, pp. 229–235, 2002.
- [2] S. M. Sze, *Semiconductor sensors*, vol. 55. Wiley New York, 1994.
- [3] P. Hu, J. Guo, and J. Tan, "An annular planar-capacitive tilt sensor with a 360 measurement range," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 4, pp. 2469–2476, 2016.
- [4] G. González, E. S. Kolosovas-Machuca, E. López-Luna, H. Hernández-Arriaga, and F. J. González, "Design and fabrication of interdigital nanocapacitors coated with HfO₂," *Sensors*, vol. 15, no. 1, pp. 1998–2005, 2015.
- [5] N. Zoric, A. Iavorschi, M. Sireteanu, G. Viziteu, and R. Ciobanu, "Design and Simulations of IDC Sensor Using COMSOL Multiphysics and Dielectric Spectroscopy of LTCC Materials," *Bul. AGIR*, vol. 3, pp. 63–69, 2013.
- [6] N. Angkawisittpan and T. Manasri, "Determination of sugar content in sugar solutions using interdigital capacitor sensor," *Meas. Sci. Rev.*, vol. 12, no. 1, pp. 8–13, 2012.
- [7]<http://mathworld.wolfram.com/CompleteEllipticIntegraloftheFirstKind.html>
- [8] A. V Mamishev, K. Sundara-Rajan, F. Yang, Y. Du, and M. Zahn, "Interdigital sensors and transducers," *Proc. IEEE*, vol. 92, no. 5, pp. 808–845, 2004.
- [9] زینب ورغ و مهدیه مهران «مروری بر خازن‌های بین‌انگشتی ونحوه‌ی عملکرد آنها در سنسورهای مختلف با استفاده از دی‌الکتریک مایع» فصل‌نامه عصر برق، سال ششم، شماره ۱۲، تابستان ۱۳۹۸
- [10] R. T. Sheldon and N. Bowler, "An interdigital capacitive sensor for nondestructive evaluation of wire insulation," *IEEE Sens. J.*, vol. 14, no. 4, pp. 961–970, 2014.
- [11] Y. Liu, Y. Huang, R. Tang, and B. Wang, "Application of inter-
