

مقاله علمی-تارویجی

مروری بر کاربرد خازن‌های بین انگشتی در سنسورهای خازنی

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

مهدیه مهران، آزمایشگاه RF MEMS و بایونانوالکترونیک، 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 الکترود 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

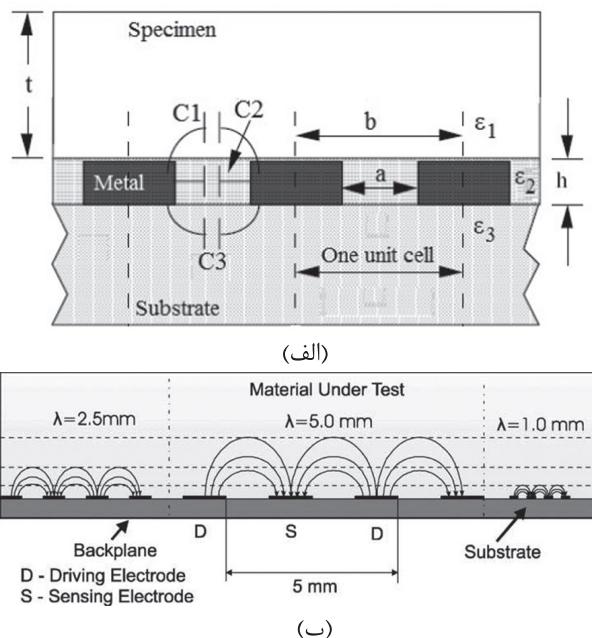
Mahdiyeh Mehran, RF MEMS and Bio-Nano Electronics (MBNE) Lab, Department of Electrical Eng., Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, m.mehran@uk.ac.ir

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.



شکل ۲: (الف) مقطع عرضی خازن‌های بین انگشتی [۶] و (ب) خطوط میدان در خازن‌های بین انگشتی بر حسب 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*

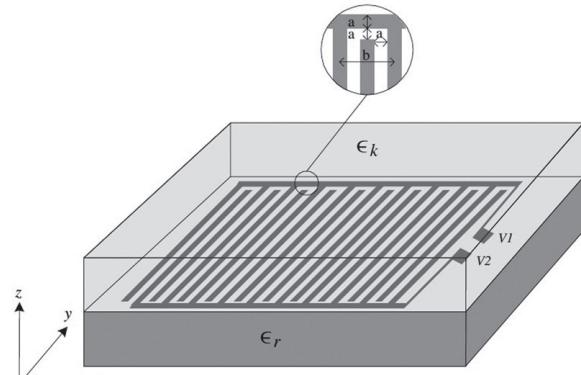
در این روابط h , L , a و b به ترتیب نشان‌دهنده ظرفیت کل، تعداد، طول، ضخامت و فاصله بین الکترودها و b مجموع عرض و فاصله بین الکترودها (Pitch) در خازن بین انگشتی نشان داده شده در شکل ۲-(الف)، هستند. ϵ_0 ، ضریب گذردهی الکتریکی خلاء، ϵ_1 و ϵ_2 ضرایب گذردهی الکتریکی نسبی ماده قرار گرفته بر رو و بین الکترودها و ϵ_r ، 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 حداقل 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 دی الکتریک قرار گرفته بر روی الکترودها حساس باشد. شکل ۲-ب، حداقل 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. بعلاوه این سنسورها در برابر دما، رطوبت و اختلالات مکانیکی مقاوم‌اند [۱-۳]. 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 متبادل ترین ساختار خازنی مورد استفاده در حوزه سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی (Micro electromechanical systems) هستند که نسبت به سایر خازن‌ها (خازن‌هایی که الکترودهای آن‌ها موازی یا بر هم 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.



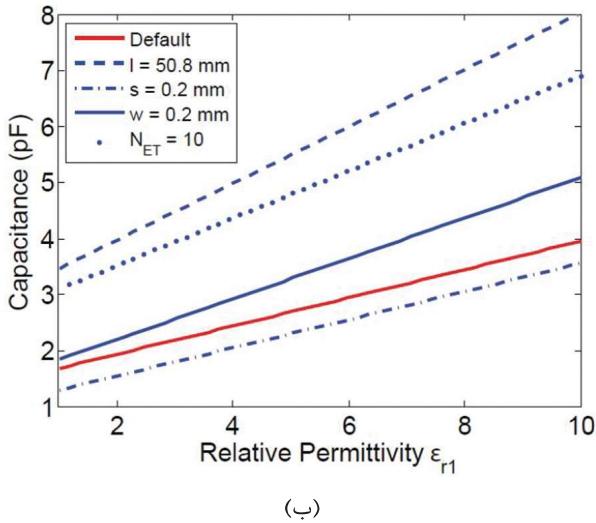
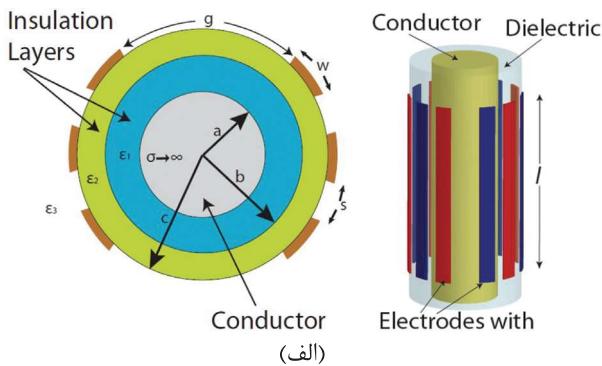
۱-۱- ظرفیت خازن‌های بین انگشتی

با اعمال ولتاژ ترمیمال و زمین به الکترودهای خازن بین انگشتی، خطوط میدان الکتریکی از طریق بستر و ماده دی الکتریکی 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 الکترود متواالی خازن بین انگشتی، سه خازن کوچکتر (C3, C2, C1) 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 پیش‌فرض $I=50.8\text{ mm}$, $s=0.2\text{ mm}$, $w=0.2\text{ mm}$, $N_{ET}=10$). [۱۰]

می‌گردد. تغییر در ضریب گذردهی نسبی کابل‌ها، سبب تغییر در شدت میدان و ظرفیت خازن‌های بین انگشتی می‌شود؛ بنابراین، با اندازه‌گیری ظرفیت خازن می‌توان میزان رطوبت، ضخامتم، 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].

۲-۱-استفاده از خازن بین انگشتی در سنسورهای رطوبت‌سنج
snsورهای 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 snsورهای رطوبت‌سنج براساس روش‌هایی نظیر خازنی، مقاومتی و غیره توسعه یافته‌اند. با این حال علم و فناوری در حال پیشرفت به سمت snsورهای رطوبت‌سنجی با حساسیت بهتر، محدوده اندازه‌گیری وسیع‌تر، پاسخ سریع‌تر، زمان بازیافت کوتاه‌تر و هزینه کمتر است [۱۲].

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

۲-snsورهای خازنی بین انگشتی با الکترود ثابت

در بسیاری از snsورهای خازنی بین انگشتی هر دو الکترود 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 الکترودها (ϵ_1 و ϵ_2) و طول الکترودها (L) رابطه‌ای مستقیم دارد. با تغییر در طول الکترودها 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 snsورهای 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 اندازه گیری کنند [۹].

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

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

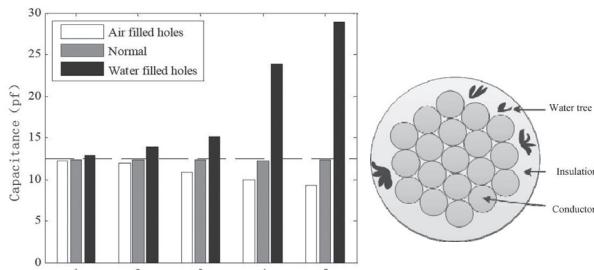
۲-۱-۱-تشخیص معیوب بودن عایق سیم

سیم‌های عایق دار 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 کشنه باشد، زیرا این سیم‌ها می‌توانند حامل سیگنال‌های هدایت و کنترل باشند. برای بررسی ویژگی عایق‌بندی سیم‌ها تعداد کمی از تست کننده‌های تجاری در دسترس‌اند. در برخی از تکنیک‌های تشخیص معاوی عایق‌بندی یک سیم، نیاز به دسترسی هادی مرکزی است که ممکن است به دلیل ولتاژ بالای آن، امکان پذیر نباشد یا عایق سیم در طی فرایند تشخیص معیوب بودنش، بشتر تخریب شود.

با استفاده از خازن بین انگشتی می‌توان معیوب بودن عایق سیم را تشخیص داد. شکل (۳-الف)، نمایی از این snsور را نشان می‌دهد. الکترودهای 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 snsور مستقل از ولتاژ اعمالی به الکترودها بوده و نیاز به دسترسی مستقیم به هادی مرکزی ندارد که یکی از مزیت‌های آن محسوس می‌شود. با توجه به حساسیت سیستم تعداد، عرض و فاصله الکترودها را می‌توان متفاوت انتخاب کرد. نمودار شکل (۳-ب)، ظرفیت خازن بین انگشتی را بر حسب گذردهی نسبی عایق به ازای مقادیر مختلف و مشخص طول (I)، عرض (w)، تعداد (N) و فاصله (s) بین الکترودها، نشان می‌دهد [۱۰].

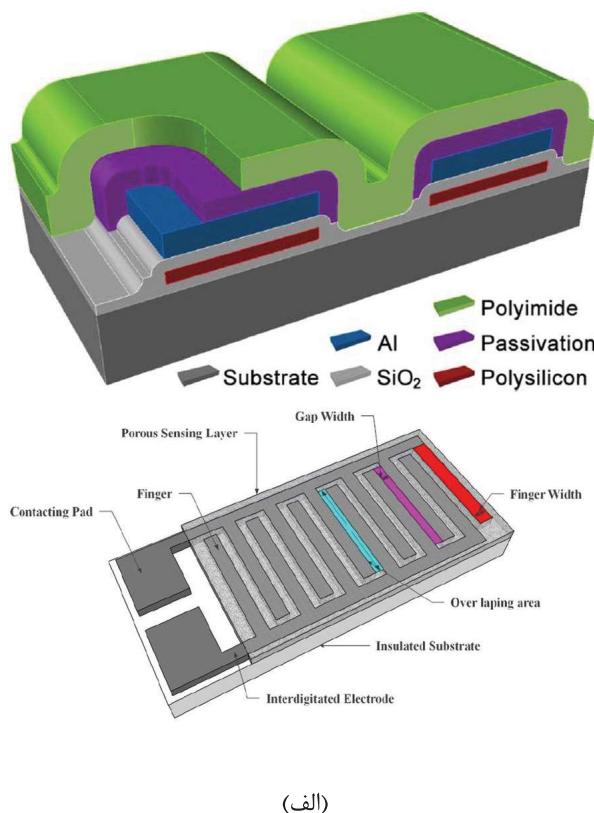
۲-۱-۲-تشخیص آسیب در عایق کابل‌های برق

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

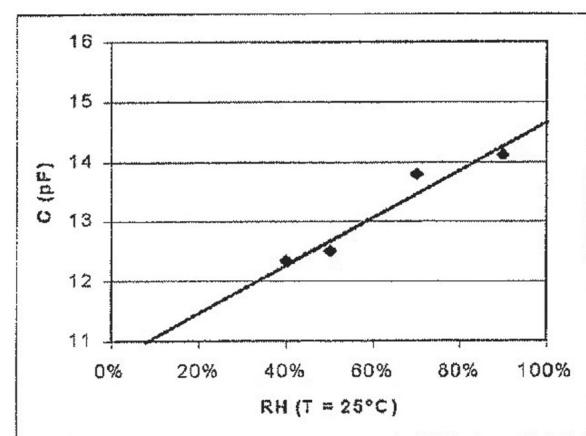


(الف) (ب)

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 پرشده باشد [۱۱]



(الف)



(ب)

شکل ۵: (الف) سنسور رطوبت‌سنج با استفاده از لایه جاذب رطوبت [۱۳، ۱۲] و (ب) ظرفیت خازن بر حسب 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 رطوبت‌سنج برای کاربردهای صنعتی و آزمایشگاهی ساخته شده‌اند. در این میان، سنسورهای رطوبت خازنی به دلیل حساسیت بالا، کم‌صرف بودن و هزینه پایین بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. در بخش‌های بعدی به نمونه‌هایی از رطوبت‌سنج‌های مبتنی بر خازن‌های بین انگشتی می‌پردازیم.

۱-۲-۲- سنسور رطوبت‌سنج با استفاده از یک لایه جاذب

در این نمونه از سنسورهای رطوبت‌سنج، الکترودهای خازن بین انگشتی بر روی یک بستر شیشه‌ای یا سرامیکی قرار داده می‌شوند. بر روی الکترودها یک ماده جاذب رطوبت نظیر پلی آمید (لایه حساس به رطوبت) قرار می‌گیرد. ضربه گذردۀ 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 رطوبت‌سنج خازنی و نمودار ظرفیت خازن بین انگشتی بر حسب رطوبت اندازه‌گیری شده در دمای ۲۵°C را نشان می‌دهد [۱۲-۱۵].

۲-۲-۲- سنسور رطوبت‌سنج بر روی بستر اکسید آلومینیوم

در نمونه‌ای دیگر از رطوبت‌سنج‌های خازنی بین انگشتی، 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 الکترود بدون تخلخل، بیشتر می‌شود. الکترودها می‌توانند به صورت مستطیلی یا مارپیچی بر روی بستر قرار گیرند. پسمند مغناطیسی (Hysteresis) در حالتی که الکترودها مستطیلی شکل هستند نسبت به حالت مارپیچی، بیشتر است اما در این حالت حساسیت بیشتر می‌باشد. اگر بتوان پسمند مغناطیسی را در حالتی که الکترودها مستطیلی شکل هستند، با کنترل عوامل طراحی یا گرمایش کاهش داد، زمان پاسخ و واستگی سنسور به دما، بهبود می‌یابد [۱۶]. خروجی این سنسور رطوبت‌سنج در شکل (۶-ب) مشاهده می‌شود.

۳-۲-۲- سنسور رطوبت SAW مبتنی بر اکسید گرافن

سنسورهای (الف) SAW(Surface acoustic wave)، از دو خازن بین انگشتی 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 بر عکس، 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 رسد، دامنه و فرکانس آن در شرایط نرمال (هیچ اثر مکانیکی از خارج بر بستر پیزوالکتریک وارد نشود) به طور تقریبی برابر با سیگنال دریافتی در 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 [۱۷-۱۹].

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) قرارداده 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].

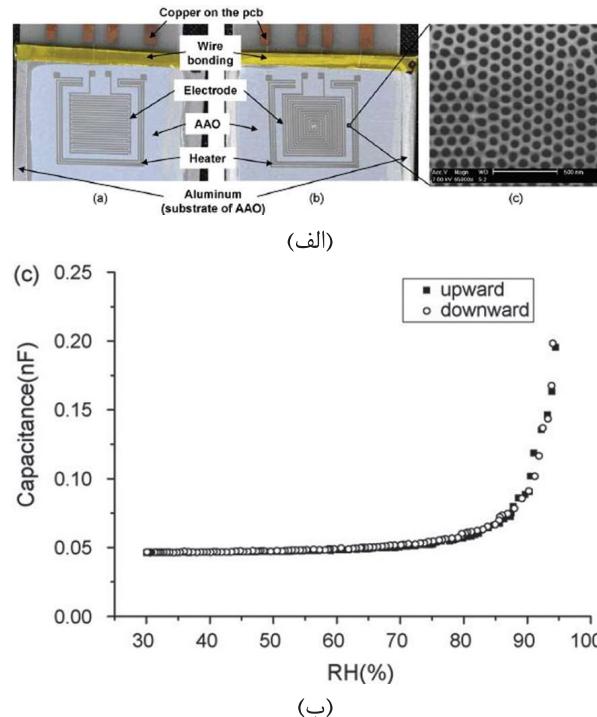
۳-۲- استفاده از خازن بین انگشتی در سنسور گاز

سنسورهای گاز خازنی، دارای زمان پاسخ‌دهی کوتاهی هستند. این سنسورها به دما وابسته‌اند و برای آن‌ها، باید دمای کاری مناسبی تعییف کرد. سنسورهای خازنی بین انگشتی می‌توانند گازهای سیار خطرناک مونوکسید کربن و دی‌اکسید گوگرد را در محیط شناسایی کنند. در این سنسورها، از گروههای آمینو به عنوان لایه حساس، استفاده شده است که بر روی بین‌الکترودها 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، ضربی گذرهی 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 الکترود قرار می‌دهند. شکل(۸-ب) خروجی یک سنسور گاز را بر حسب غلظت‌های مختلف گاز دی‌اکسید گوگرد با توجه به فاصله بین الکترودها، نشان می‌دهد [۲۱-۲۲].

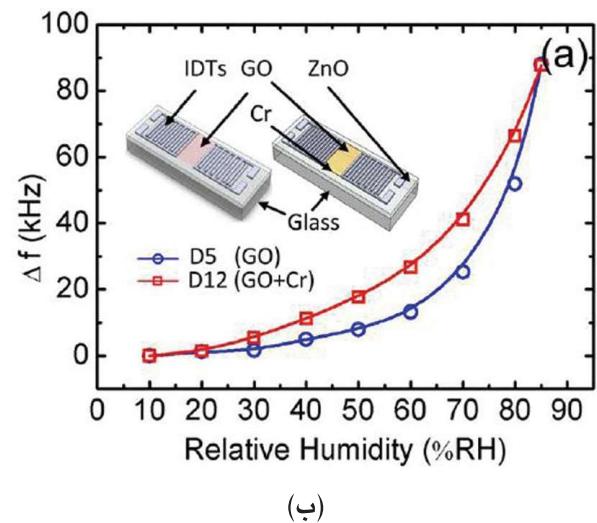
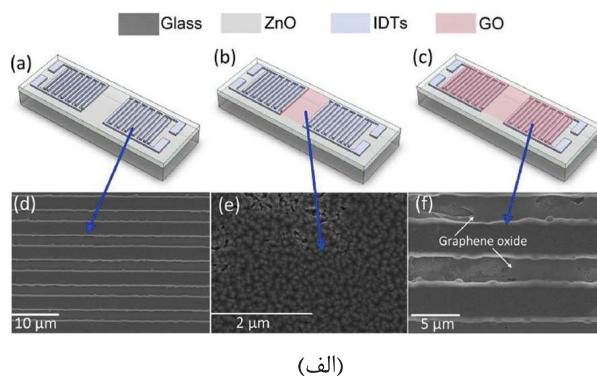
۴-۲- استفاده از خازن بین انگشتی در سنسور شیمیایی

گونه‌های مختلف شیمیایی نظری اتم‌ها، مولکول‌ها و یون‌ها را که در یک فرآیند شیمیایی تولید می‌شوند می‌توان با استفاده از روش‌هایی نظری تغییر در مقاومت و خازن، تغییر در فرکانس رزونانس کانتیلیور (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].

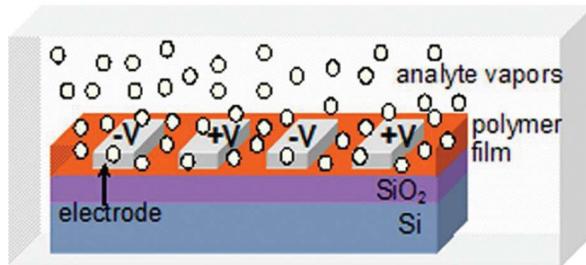
در این سنسور، لایه‌ای نازک از پلیمر، بر روی الکترودهای خازن بین انگشتی قرار می‌گیرد. با قرار گرفتن سنسور در محیط آنالیت مورد نظر، ضربی دی‌الکتریک پلیمر تغییر کرده و باعث تغییر در ظرفیت خازن بین انگشتی می‌شود. شکل(۹-ب)، نمودار خروجی سنسور را در غلظت‌های مختلف و برای چهار ماده‌ی (متانول، اتانول، بخار آب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



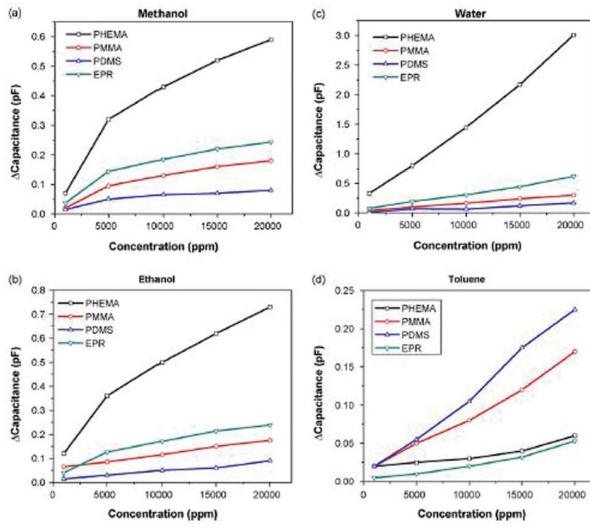
شکل ۶: (الف) قرارگیری الکترودهای خازن بین انگشتی بر روی بستر اکسید آلومینیوم و (ب) نمودار تغییرات ظرفیت خازن بر حسب رطوبت محیط [۱۶]



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



(الف)



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]

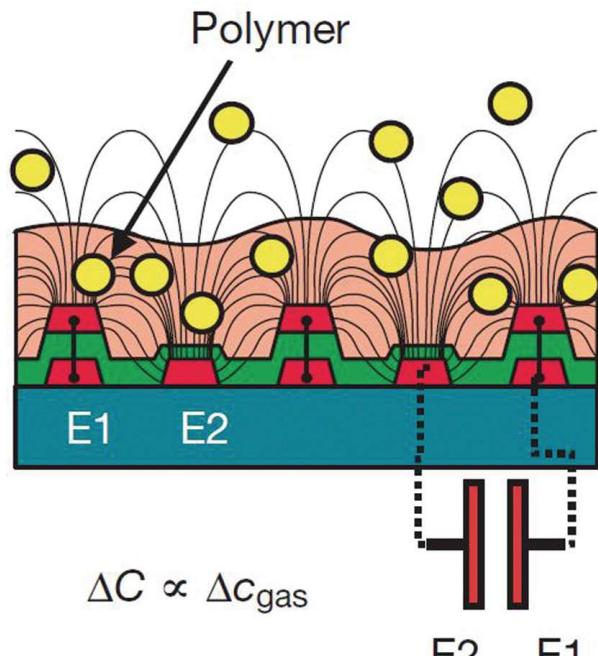
موردنظر دست یافت [۲۵-۲۸]. شکل‌های (۱-الف) و (۱-ب) به ترتیب تصویری از سطح بیوسنسور و خروجی آن بر حسب غلظت باکتری موجود در محیط در سه فرکانس متفاوت را نشان می‌دهد [۲۷-۲۸].

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

از سنسورهای جابه جایی برای اندازه‌گیری میزان جابه جایی یک جسم متحرک یا اندازه‌گیری طول و عرض یک جسم استفاده می‌شود. در این سنسورها از خازن بین انگشتی می‌توان بهره برد. شکل (۱-الف)، تصویری از سنسور جابه جایی با استفاده از خازن بین انگشتی را نشان می‌دهد. این سنسور با استفاده از فناوری ساخته شده است [۲۹].

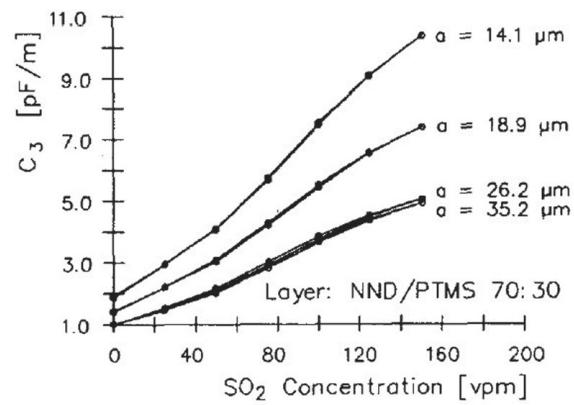
شکل (۱-الف) و (۱-ب) به ترتیب تصویری از سطح بیوسنسور و خروجی آن بر حسب غلظت باکتری موجود در محیط در سه فرکانس متفاوت را نشان می‌دهند که این تغییرات تقریباً ۳۰٪ تغییر ظرفیت خازن را نشان می‌دهند.

شکل (۱-الف) و (۱-ب) به ترتیب تصویری از سطح بیوسنسور و خروجی آن بر حسب غلظت باکتری موجود در محیط در سه فرکانس متفاوت را نشان می‌دهند که این تغییرات تقریباً ۳۰٪ تغییر ظرفیت خازن را نشان می‌دهند.



$$\Delta C \propto \Delta c_{\text{gas}}$$

(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 دی‌اکسید کوگرد به ازای فاصله بین الکترودهای مختلف [۲۲]

۵-۵- 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 آنتی‌بادی‌های قرار گرفته باشد. زمانی که این سنسورها در تماس با ماده‌ی تحت بررسی قرار گیرند، آنالیت مورد نظر، جذب آنتی‌ژن‌ها یا آنتی‌بادی‌های قرار گرفته بر روی الکترودها می‌شوند؛ بنابراین ضریب دی‌کتریک 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 بین انگشتی 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].

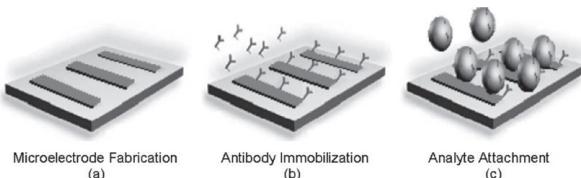
$$L_s = \frac{\mu n^2 d_{avg}}{2} \left[\ln \left(\frac{2.46}{P_s} \right) + 0.2 P_s^2 \right] \quad (۸)$$

$$C_s = L_c (N_c - 1) \varepsilon_0 \frac{1 + \varepsilon_r k \left[(1 - (\frac{g_c}{w_c + g_c})^2)^{1/2} \right]}{2K(\frac{g_c}{w_c + g_c})} \quad (۹)$$

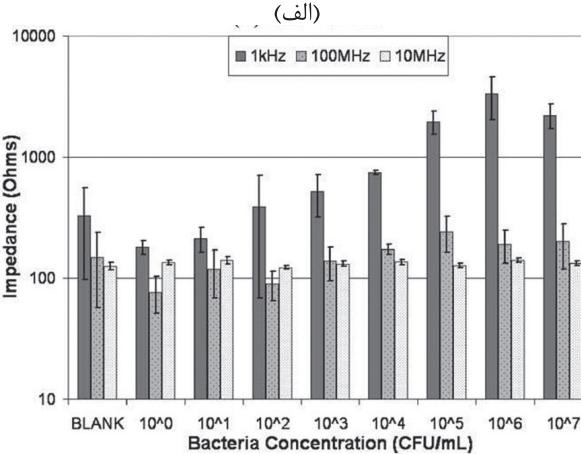
$$P_s = dout - \frac{din}{dout} + din \quad (۱۰)$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \quad (۱۱)$$

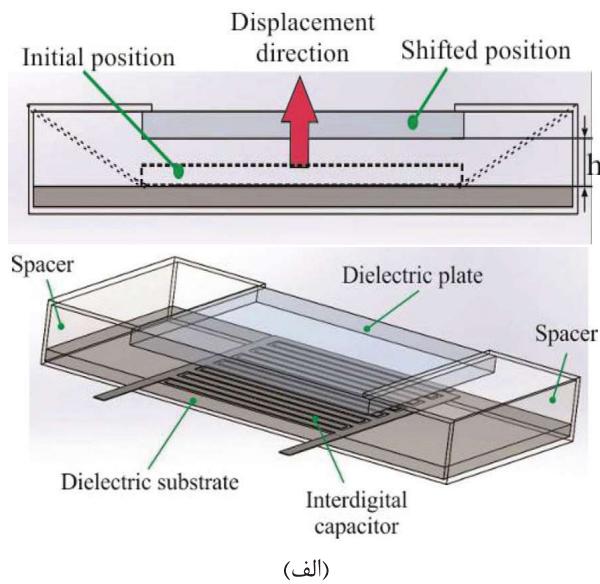
برای بررسی عملکرد این سنسور فشار در دمای بالا، از سیم تنگستن



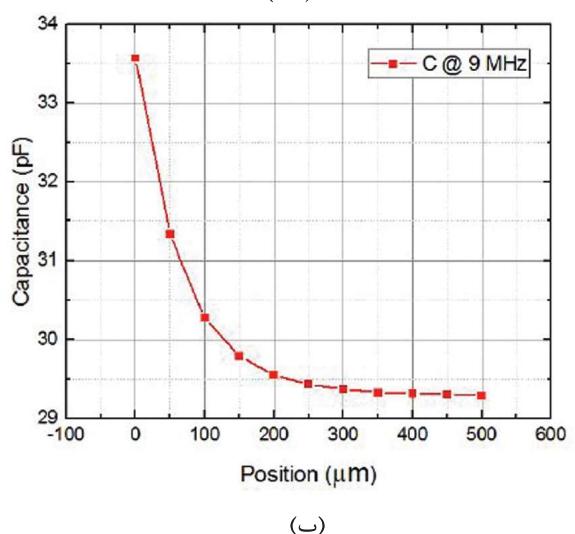
(الف) (a) Microelectrode Fabrication (b) Antibody Immobilization (c) Analyte Attachment



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



(الف)



(ب)

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

(آ) 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 بر حسب مکان صفحه دیالکتریک متحرک را نشان می‌دهد [۲۹].

۲-۷-۲-استفاده از خازن‌های بین انگشتی در سنسور فشار

سنسور فشار خازنی بین انگشتی 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 هیچ گونه منبع تغذیه‌ای نظریه‌باتری، 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 بین انگشتی بر روی یک بستر 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 (LS) و خازن متغیر (CS) هستند. در رابطه (۸)، d_{avg} به ترتیب نشان دهنده 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_s)، تعداد الکترودها (N_s)، ضربی گذردهی الکتریکی خلاء (ϵ_0)، ضربی نسبی گذردهی بستری که الکترودها بر روی آن قرار دارند (ϵ_s)، فاصله بین الکترودها (g_s)، عرض الکترودها (w_s) و انتگرال بیضوی کامل نوع اول ($K(k)$) استفاده شده است. این سنسور تغییرات فشار را با توجه به تغییرات فرکانس رزونانس (f_R) 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 الکتروود متحرک

در سنسورهایی که تاکنون در این مقاله مور شدند، الکتروودهای خازنی‌های بین انگشتی بر روی بستر ثابت بودند، اما در برخی از کاربردها، یکی از الکتروودهای این خازن‌ها ثابت و دیگری متحرک است که با جایه جایی الکتروود متحرک، ظرفیت خازن تغییر می‌کند. در ادامه به مرور نمونه‌ای از این قبیل سنسورها می‌پردازیم.

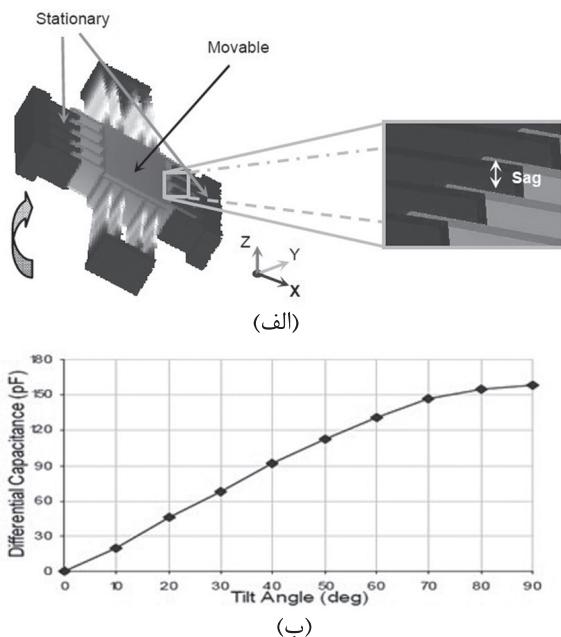
۱-۳- استفاده از خازن بین انگشتی در سنسور زاویه

ساختر یک سنسور خازنی شبیه در شکل (۱۴-الف)، نشان داده شده است. در این سنسور تعدادی از الکتروودها به یک جرم معلق متصلند که قابلیت حرکت دارند و در مقابل آن‌ها الکتروودهای ثابتی وجود دارند. زمانی که این سنسور در معرض زاویه (شبیه) قرار گیرد، نیروی گرانش وارد شده به جرم معلق، باعث جایه جایی آن می‌شود. بنابراین الکتروودهای متصل به جرم معلق تغییر موقعیت داده و ظرفیت خازن‌های بین انگشتی را تغییر می‌دهند. این جایه جایی 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) ارایه شده است [۳۱].

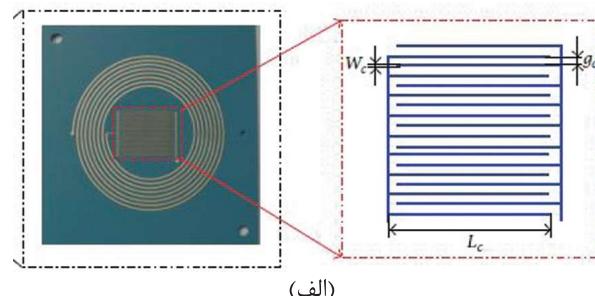
$$C = \frac{(l_0 \pm \Delta x) h \varepsilon N}{G} = \frac{A_0 \varepsilon N}{G} \quad (12)$$

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

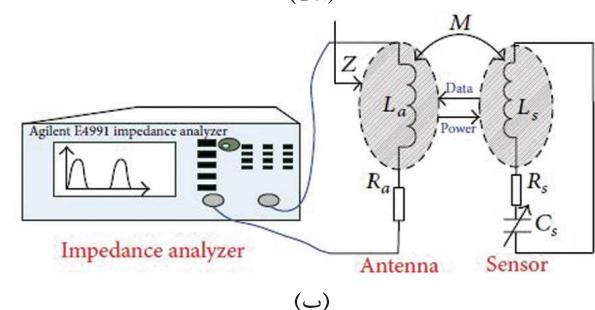
در روابط (۱۲) و (۱۳)، l_0 طول اولیه همپوشانی الکتروودهای خازن، A_0 سطح اولیه همپوشانی و h پختامت این الکتروودها می‌باشد، ε گذردهی دیکتریک به کار رفته در سنسور، Δx میزان جابجایی افقی الکتروودهای خازن، mg نیروی گرانش وارد بر جرم معلق، زاویه شبیه، N تعداد الکتروودها و h ثابت فنر هستند [۳۱].



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

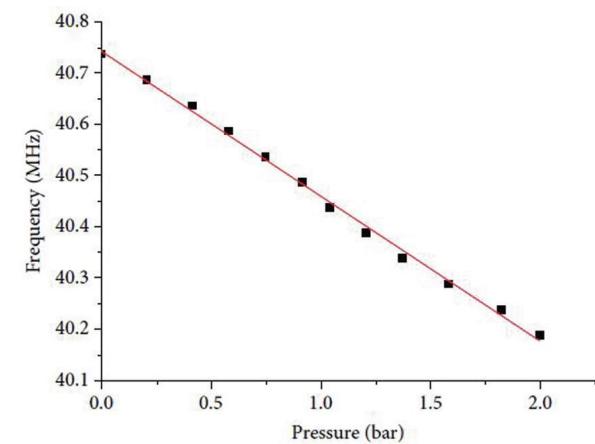


(الف)



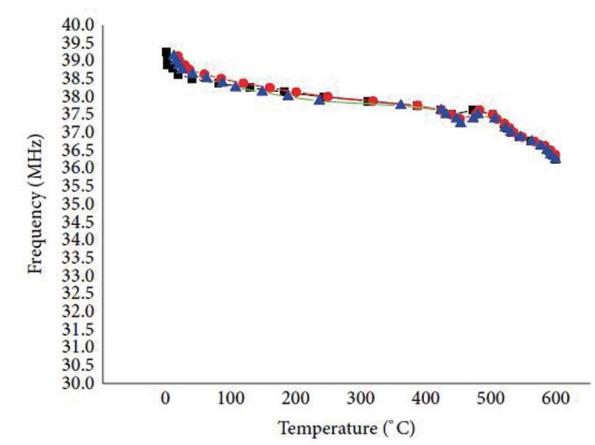
(ب)

شکل ۱۲: (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 بین انگشتی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند.

خازن‌های بین انگشتی از دو الکترود شانه‌ای شکل قرار گرفته بر روی یک بستر عایق، تشکیل می‌شوند. هر دو الکترود خازن بین انگشتی در یک صفحه قرار می‌گیرند. این الکترودها در سنسورهای مختلف بسته به کاربرد، می‌توانند هر دو ثابت یا یکی از آن‌ها ثابت و دیگری متحرک باشند. ظرفیت خازن‌های بین انگشتی نسبت به سایر خازن‌ها بزرگتر است و با تعییر در تعداد الکترودها، ابعاد، فاصله بین الکترودها و ضریب گذردهی الکتریکی بستر عایق و ماده‌ی دیالکتریک بر روی الکترودها تعییر می‌کند. ظرفیت خازن بین انگشتی با طول و ضریب دیالکتریک ماده قرار گرفته بر روی بین انگشتی بر خازن‌های بین انگشتی است.

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

مراجع

- [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. Angkawisitpan 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 ورع و مهدیه مهران «مرواری بر خازن‌های بین انگشتی و نحوه‌ی 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-
