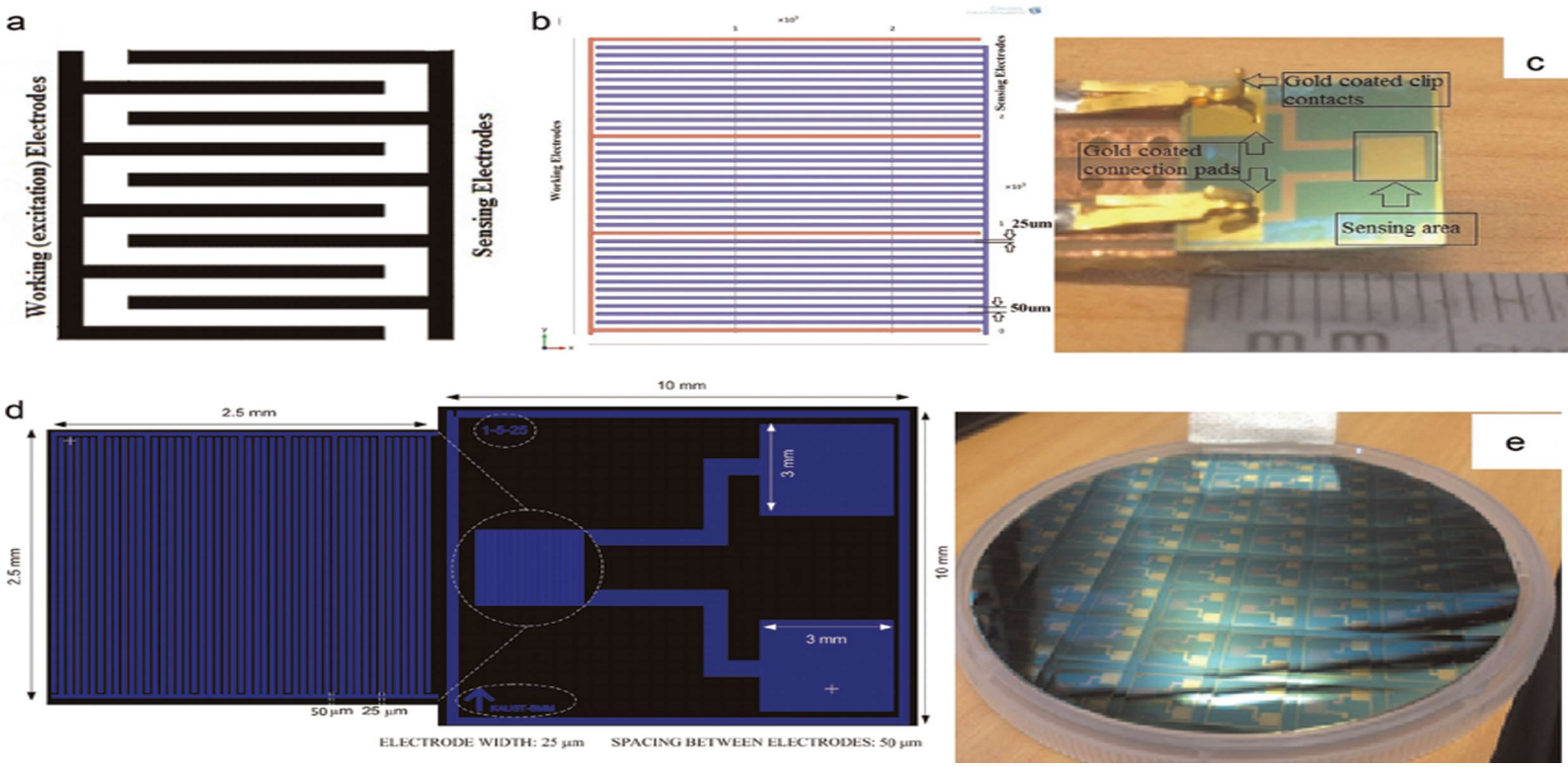


مقاله علمی-ترویجی

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 به‌دلیل 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-

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-02-05]

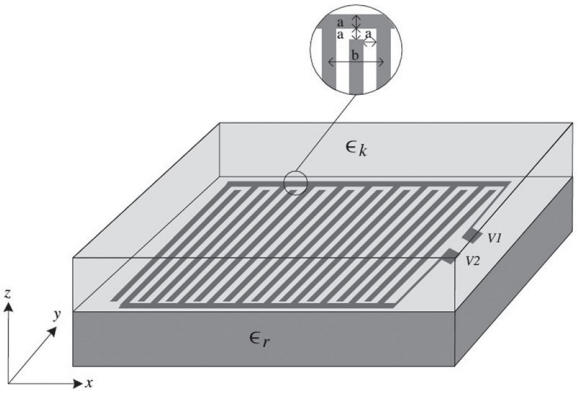
mechanical systems and are multi-finger periodic structures on an insulating substrate. Sensitivity and capacitance of the IDTs are relatively higher in comparison with the other capacitors that makes them to an attractive candidate in the sensor applications. This study reviews application of IDTs in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

Keywords: Interdigital capacitor, Capacitive sensors, MEMS.

۱- مقدمه

سنسـورهای خازنی به دلیـل ویژگی‌هایی نظیر خطی بودن خروجی، حساسـیت عالی، اصول عملکردی خوب، طراحی و ساخت آسان، کم هزینه بودن و... بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند و با تغییر در ظرفیت خـازن، پارامترهـای مورد نظـر را اندازه‌گیری می‌کننـد. بعلاوه این سنسـورها در برابر دما، رطوبت و اختلالات مکانیکی مقاوم‌اند[۳-۱]. بـا افزایش تقاضـا برای یکپارچه‌سـازی سیسـتم‌های الکترونیکی بر روی تراشـه و نیاز به کوچک‌سازی سنسـورها، سنسورهای مبتنی بر خازن‌های بین انگشتی بسیار مورد توجه قرارگرفته‌اند. خازن‌های بین انگشتی متداول‌ترین ساختار خازنی مورد استفاده در حوزه سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی(Micro electromechanical systems) هستند که نسبت به سـایر خازن‌ها (خازن‌هایی که الکترودهای آن‌ها موازی یا بر هم عمود هسـتند) دارای ظرفیت بزرگتری می باشند. شکل(۱)، یک ساختار خازن‌های بین انگشتی را نشان می‌دهد[۴ و ۵].

در ادامـه به مـرور برخی از سنسـورهای مبتنی بـر خازن‌های بین انگشتی، می‌پردازیم.



شکل ۱: یک ساختار خازن بین انگشتی [۵]

۱-۱- ظرفیت خازن‌های بین انگشتی

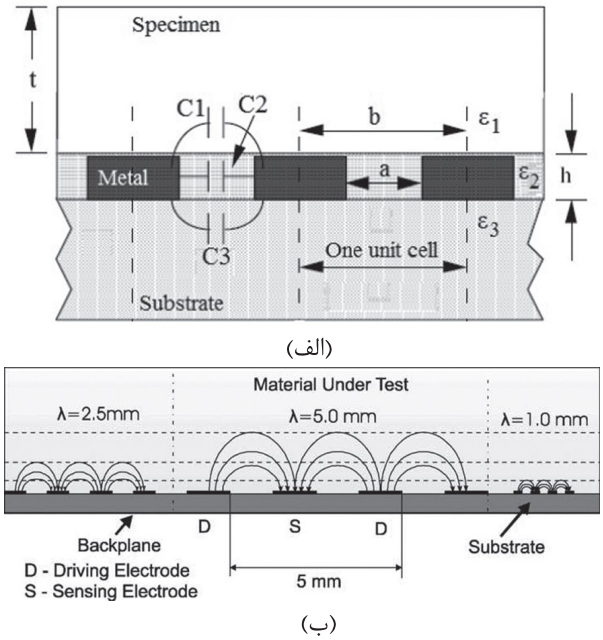
بـا اعمال ولتـاژ ترمینال و زمین به الکترودهای خازن بین انگشـتی، خطوط میدان الکتریکی از طریق بستر و ماده‌ی دی‌الکتریکی که بین الکترودها و بر روی آنها قرار گرفته است، بسته می‌شوند که خازن‌های کوچکی بـه وجود می‌آیند. ظرفیت خازن‌های بین انگشـتی مجموع همین خازن‌های کوچک است. با اعمال ولتاژ به الکترودها، بین هر دو الکترود متوالی خازن بین انگشتی، سه خازن کوچکتر (C2,C1 وC3) به وجود می‌آیند که در شکل (۲-الف)، نشان داده شده‌اند.

ظرفیت خازن بین انگشـتی را می‌توان با اسـتفاده از روابط ۱ تا ۵، به دست آورد[۶].

$$C = Cuc\,(N-1)L \qquad (۱)$$

$$Cuc = C1+C2+C3 \qquad (۲)$$

$$C_1+C_3= \varepsilon_0 \left(\frac{\varepsilon_1+\varepsilon_3}{2}\right)\frac{K\sqrt{1-k^2}}{K(k)} \qquad (۳)$$



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]

$$C_2 = \varepsilon_0\varepsilon_2 \frac{h}{a} \qquad (۴)$$

$$k=\frac{a}{b} \qquad (۵)$$

uc : unit cell*

در ایـن روابـط h ، L، N،C و a به ترتیب نشـان‌دهنده ظرفیت کل، تعـداد، طول، ضخامـت و فاصله بین الکترودهـا و b مجموع عرض و فاصله بین الکترودها (Pitch) در خازن بین انگشـتی نشان داده شده در شـکل (۲-الف)، هسـتند. ϵ_0، ضریب گذردهی الکتریکی خلاء، ϵ_1 و ϵ_2 ضرایب گذردهی الکتریکی نسـبی مـاده قرار گرفته بر رو و بین الکترودها و ϵ_3، ضریب گذردهی الکتریکی نسـبی بسـتر را بیان می کنند. K(k) تابع انتگرال بیضوی کامل نوع اول اسـت و آرگمان آن با استفاده از رابطه‌ی ۵ محاسبه می‌شود[۷].

در ایـن خازن‌هـا حداکثـر عمق نفوذ خطـوط میـدان الکتریکی از سـطح الکترودها (λ)، با اسـتفاده از رابطه‌ی ۶، محاسبه می‌شود[۸]. بـا توجه به کاربرد و ابعاد سنسـور، برای الکترودهـا، عرض و فاصله مناسـبی انتخاب می‌گردد تا سنسور نسـبت به ارتفاع خاصی از ماده دی‌الکتریک قرارگرفته بر روی الکترودها حسـاس باشد. شکل ۲-ب، حداکثر عمق نفوذ خطوط میدان الکتریکی در سه خازن بین انگشتی متفـاوت با توجه به عرض و فاصله بین الکترودهایشـان، نشـان داده شده است [۸].

$$\lambda = b \qquad (۶)$$

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-02-05]

۲- سنسورهای خازنی بین انگشتی با الکترود ثابت

دربسیاری از سنسورهای 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 قرارگرفته بر رو و بین الکترودها (ϵ_1 و ϵ_2) و طول الکترودها (L) رابطه‌ی 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 سنسورهای خازنی بین‌انگشتی با استفاده از دی‌الکتریک مایع می‌توانند برخی از پارامترها نظیر ارتفاع و ثابت دی‌الکتریک مایعات، میزان قند در محلول قندی و... را اندازه‌گیری کنند[۹].

بخش‌های بعدی به تعدادی از این قبیل سنسورهای خازنی بین‌انگشتی می‌پردازد.

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

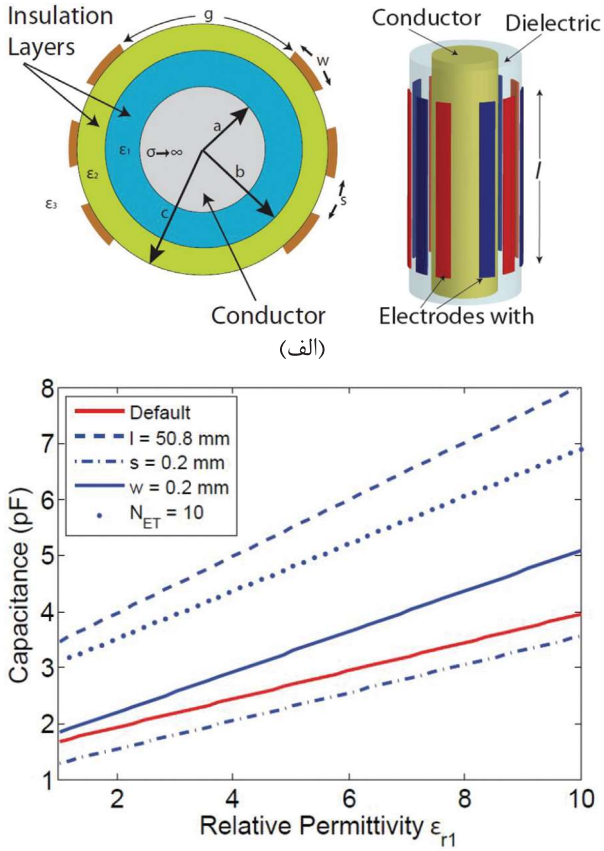
۲-۱-۱- تشخیص معیوب بودن عایق سیم

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 تست کننده‌های 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. 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 سنسور مستقل از ولتاژ اعمالی به الکترودها 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 الکترودها 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 الکترودها، نشان می‌دهد [۱۰].

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

کابل‌های برق بر امنیت شبکه‌های برق تاثیرگذار هستند. عایق کابل‌ها براثر 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، ابررسانی یا جریان نشتی، 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]. 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



شکل۳: (الف) سنسور خازنی بین انگشتی برای تشخیص معیوب بودن عایق سیم و (ب) تغییرات ظرفیت خازنی بر حسب ضریب گذردهی نسبی عایق (به‌طور پیش‌فرض l=w=s ,۰٫۱mm ,N= ,۲۵٫۴mm =۶) [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 این‌حال 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، می باشد. 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

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-02-05]

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

$$RH\% = \frac{P_v}{P_s} \times 100 \qquad (۷)$$

انواع مختلفی از سنسورهای رطوبت‌سنج برای کاربردهای صنعتی و آزمایشگاهی ساخته‌شده‌اند. در این میان، سنسورهای رطوبت خازنی به دلیل حساسیت بالا، کم‌مصرف بودن و هزینه پایین بیشتر مورد توجه قرارگرفته‌اند. در بخش‌های بعدی به نمونه‌هایی از رطوبت‌سنج‌های مبتنی بر خازن های بین انگشتی می‌پردازیم.

۲-۲-۱- سنسور رطوبت‌سنج با استفاده از یک‌لایه جاذب

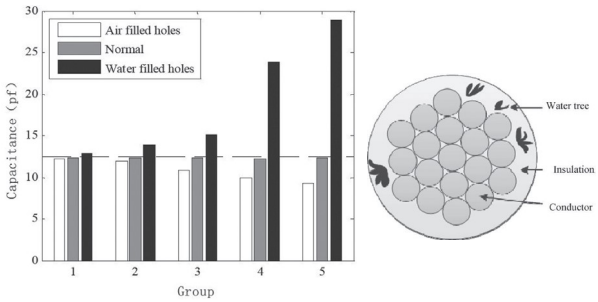
در این نمونه از سنسورهای رطوبت سنج، الکترودهای خازن بین انگشتی بر روی یک بستر شیشه‌ای یا سرامیکی قرار داده می‌شوند. بر روی الکترودها یک ماده جاذب رطوبت نظیر پلی آمید (لایه حساس به رطوبت) قرار می‌گیرد. ضریب گذردهی لایه حساس، با جذب رطوبت افزایش می‌یابد. با توجه به میزان رطوبت محیط، ظرفیت خازن تغییر می‌کند.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

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 (لایه‌ی 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 لایه‌ی 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. پسماند مغناطیسی(Hysteresis) در حالتی‌که 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 رطوبت‌سنج در شکل(۶-ب) مشاهده می‌شود.

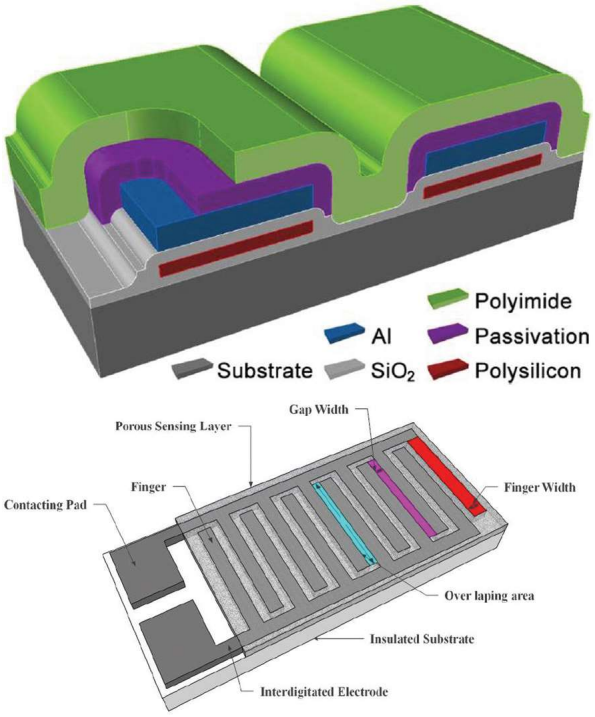
۲-۲-۳- سنسور رطوبت SAW مبتنی بر اکسید گرافن

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 قطبی های 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 می شود، 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) به‌طور 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

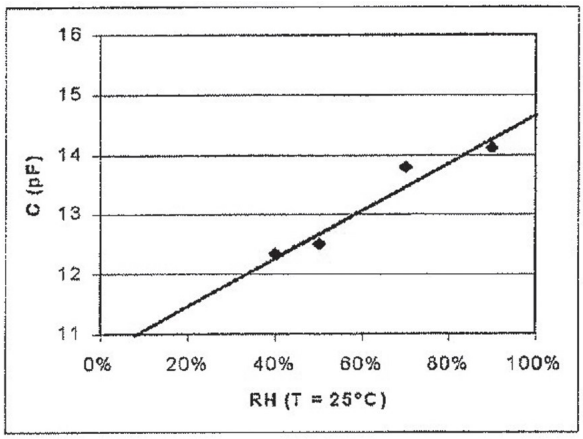


(ب) (الف)

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



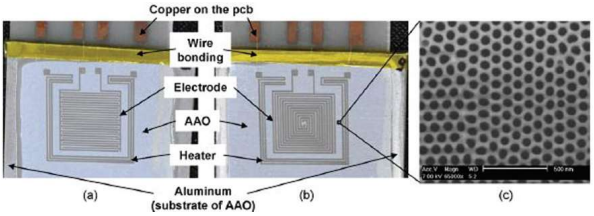
(الف)



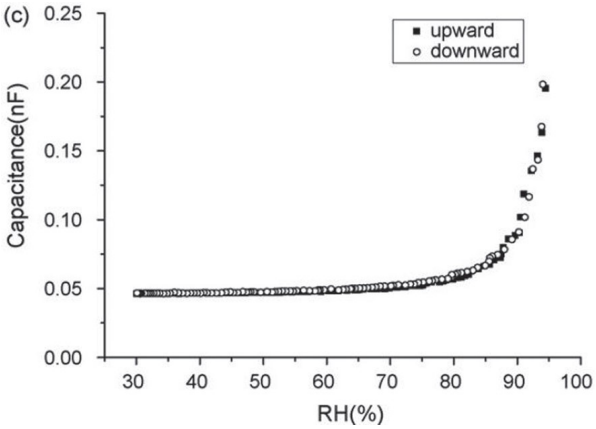
(ب)

شکل ۵: (الف) سنسور رطوبت‌سنج با استفاده از لایه جاذب رطوبت [۱۳,۱۲] و (ب) ظرفیت خازن برحسب رطوبت نسبی موجود در دمای °C۲۵ [۱۵]

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-02-05]

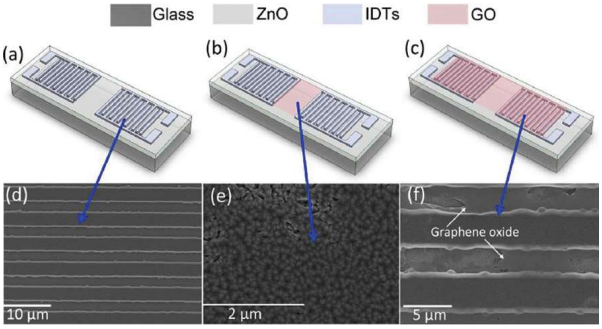


(الف)

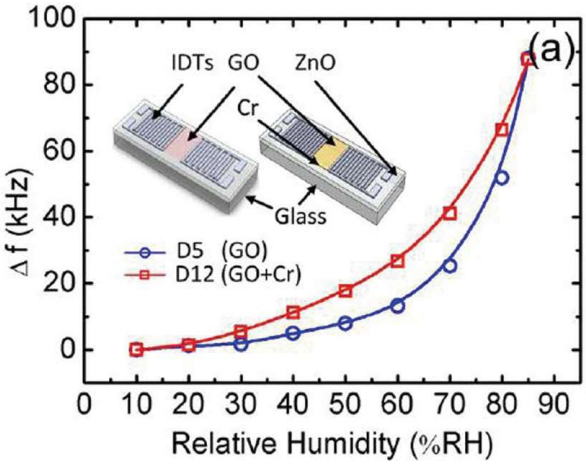


(ب)

شکل۶: (الف) قرارگیری الکترودهای خازن بین انگشتی بر روی بستر اکسید آلومینیوم و (ب) نمودار تغییرات ظرفیت خازن برحسب رطوبت محیط [۱۶]



(الف)



(ب)

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

دوم متناسب با تغییر مکانیکی اعمال شده به بستر پیزوالکتریک تغییر می‌کنند. 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) قرارداده می‌شود. سیگنالی با دامنه و فرکانس معلوم به خازن اول اعمال می‌شود. با توجه به میزان رطوبت محیط، لایه جاذب رطوبت، (اکسیدگرافن) 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 برحسب 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].

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

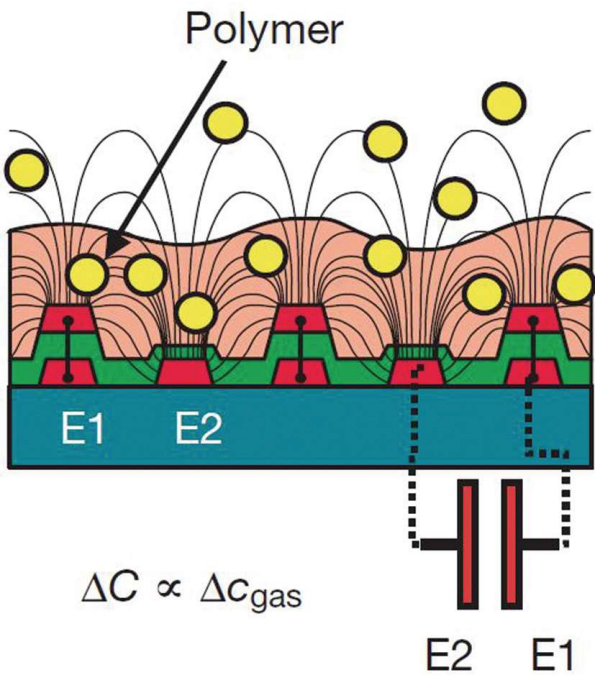
سنسورهای گاز خازنی، دارای زمان پاسخ‌دهی کوتاهی هستند. این سنسورها به دما وابسته‌اند و برای آن‌ها، باید دمای کاری مناسبی تعریف کرد. سنسورهای خازنی بین‌انگشتی می‌توانند گازهای بسیار خطرناک مونوکسیدکربن و دی اکسید گوگرد را در محیط شناسایی کنند. در این سنسورها، از گروه‌های آمینو به‌عنوان لایه حساس، استفاده شده است که بر رو و بین الکترودها لایه نشانی می‌شود. شکل(۸-الف)، ساختار سنسور گازی را با استفاده از خازن بین‌انگشتی، نشان می دهد. 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 بین‌انگشتی 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 برحسب غلظت‌های مختلف گاز دی اکسید گوگرد با توجه به فاصله بین الکترودها، نشان می‌دهد[۲۳-۲۱].

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

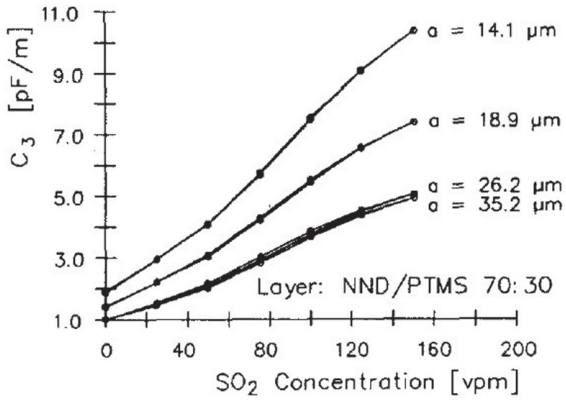
گونه‌های مختلف شیمیایی نظیر اتم ها، مولکول‌ها و یون‌ها را که در یک فرآیند شیمیایی تولید می‌شوند می‌توان با استفاده از روش‌هایی نظیر تغییر در مقاومت و خازن، تغییر در فرکانس رزونانس کانتلیور (cantilever) و...شناسایی کرد. در روش خازنی، لایه‌ای نازک از پلیمر بر روی صفحات خازن قرار می‌گیرد. استفاده از خازن 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 بین‌انگشتی 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، بخارآب و بخارات تولوئن)، ارایه می‌دهد[۲۴].

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-02-05]



(الف)

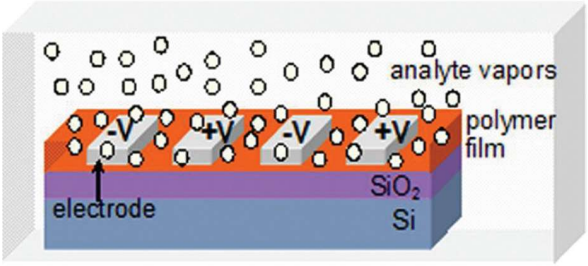


(ب)

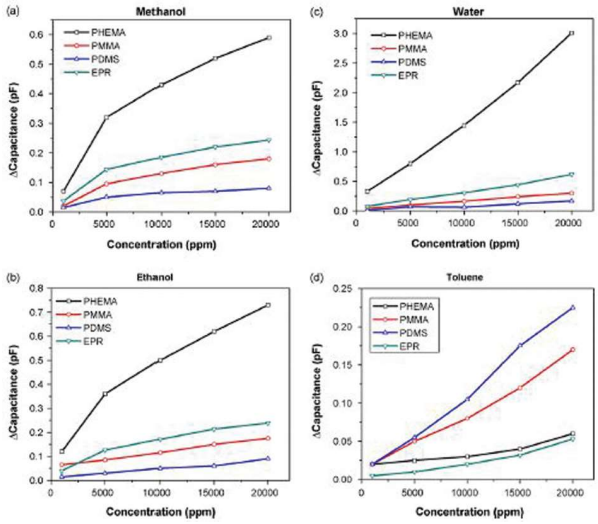
شکل ۸: (الف) مقطع عرضی از یک سنسور گاز مبتنی بر خازن بین انگشتی [۲۳] و (ب) خروجی سنسور برای غلظت‌های مختلف گاز دی اکسید گوگرد به ازای فاصله بین الکترودهای مختلف [۲۲]

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 ازآنتی‌ژن‌ها، 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 ماده‌ی تحت بررسی قرار گیرند، آنالیت مورد نظر، جذب آنتی‌ژن‌ها یا آنتی‌بادی‌های قرارگرفته بر روی الکترودها می‌شوند؛ بنابراین ضریب دی‌الکتریک خازن تغییر می‌کند که این خود سبب تغییر در ظرفیت خازن می‌شود که از روی می‌توان به مقدار آنالیت وجود در محیط



(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، بخارآب و بخارات تولوئن [۲۴]

موردنظر دست یافت [۲۸-۲۵].

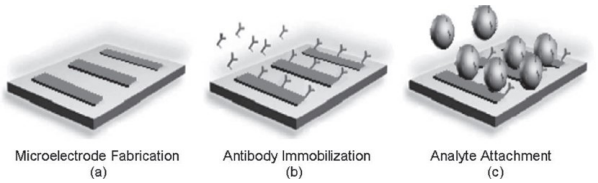
شکل‌های(۱۰-الف) و (۱۰-ب) به ترتیب تصویری از سطح بیوسنسور و خروجی آن بر حسب غلظت باکتری موجود در محیط در سه فرکانس متفاوت را نشان می‌دهد[۲۸-۲۷].

۲-۶- استفاده از خازن بین‌انگشتی در سنسور جابه‌جایی

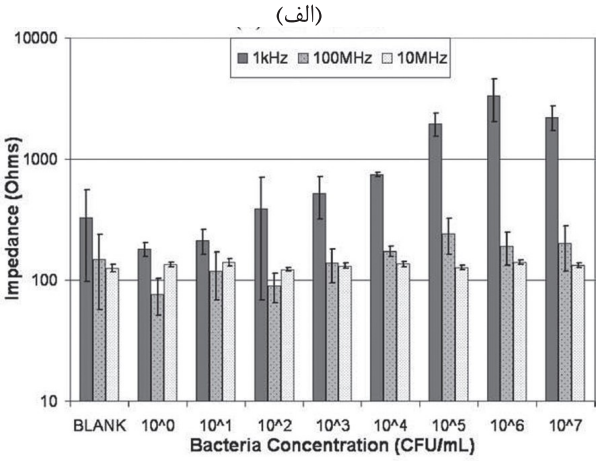
از سنسورهای جابه جایی برای اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی یک جسم متحرک یا اندازه‌گیری طول و عرض یک جسم استفاده می‌شود. در این سنسورها از خازن بین‌انگشتی می‌توان بهره برد. شکل (۱۱-الف)، تصویری از سنسور جابجایی با استفاده از خازن بین‌انگشتی را نشان می‌دهد. این سنسور با استفاده از فناوری ساخته شده است [۲۹].

LTCC (Low Temperature Co-Fired Ceramics) در دو طرف خازن دو نگهدارنده قرار دارد که با کمک آن‌ها، صفحه دی الکتریک قرارگرفته 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 معینی را دارد، زیرا اگر فاصله صفحه دی‌الکتریک متحرک از خازن بین‌انگشتی، 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)، ۵۰۰μm در نظر گرفته شده است؛ بنابراین طبق رابطه‌ی ۶، حداکثر میزان عمق نفوذ خطوط میدان الکتریکی

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-02-05]



(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 می دهد[۲۹].

۲-۷-استفاده از خازن های بین انگشتی در سنسور فشار

سنسور فشار خازنی بین انگشتی بر پایه فناوری LTCC ساخته شده است. از این سنسور برای اندازه گیری 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 بین انگشتی بر روی یک بستر انعطاف‌پذیر قرار دارند که افزایش یا کاهش فشار سبب تغییر در طول الکترودهای خازن شده و ظرفیت خازنی به‌صورت 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 رابطه‌ی (۸)، d_{avg}، n، μ به ترتیب نشان‌دهنده هدایت مغناطیسی در خلاء، تعداد دورهای سیم پیچ و میانگین قطر خارجی و داخلی سلف هستند. PS با استفاده از رابطه‌ی (۱۰) محاسبه می شود که در آن d_{out} و d_{in} به ترتیب قطرهای خارجی و داخلی سلف، هستند. در رابطه (۹)، از طول (L_c)، تعداد الکترودها (N_c)، ضریب گذردهی الکتریکی خلاء (ϵ_0)، ضریب نسبی گذردهی بستری که الکترودها بر روی آن قرار دارند (ϵ_r)، فاصله بین الکترود ها (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 می دهد. فرکانس رزونانس مطابق با رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود. بنابراین در این سنسور افزایش یا کاهش فشار سبب تغییر در طول الکترودهای خازن بین‌انگشتی شده، درنتیجه 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].

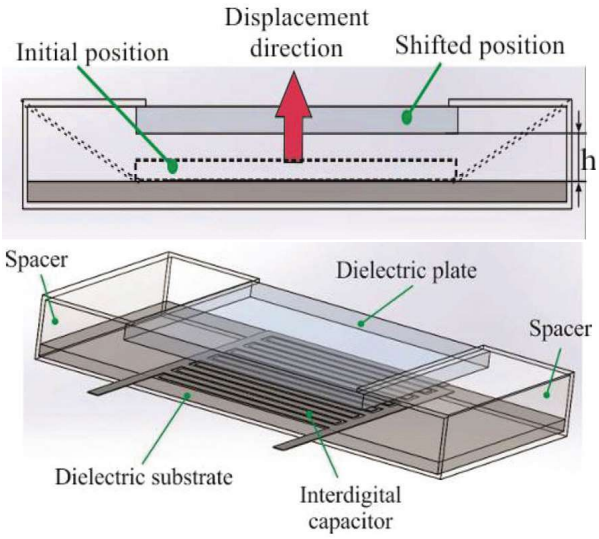
$$L_s = \frac{\mu n^2 d_{avg}}{2}\left[\ln\left(\frac{2.46}{P_s}\right) + 0.2P_s^2\right] \quad (۸)$$

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

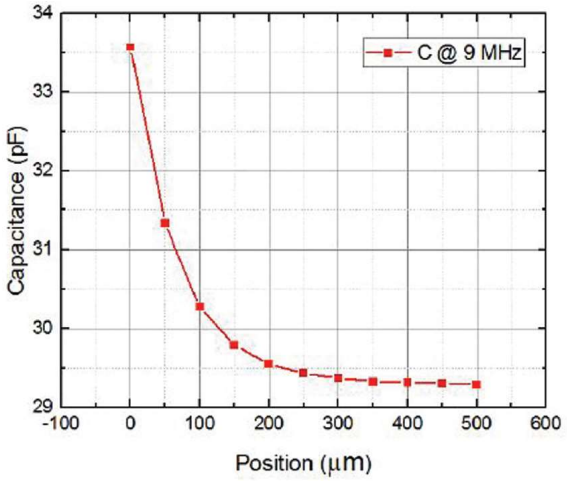
$$P_s = \text{dout} - \frac{\text{din}}{\text{dout}} + \text{din} \quad (۱۰)$$

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

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



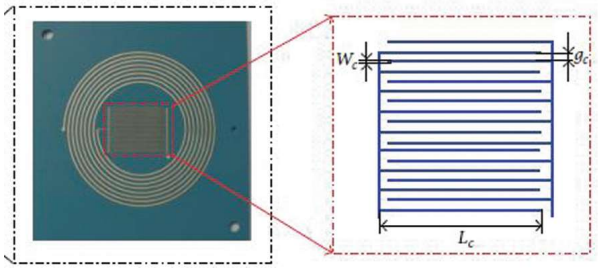
(الف)



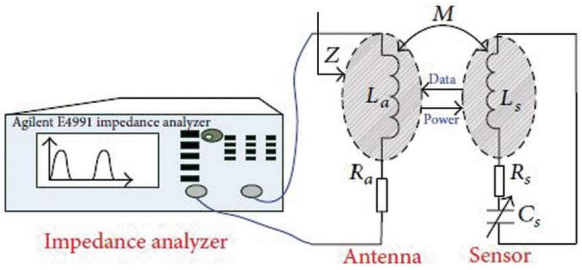
(ب)

شکل۱۱: (الف)تصویری از یک سنسور جابجایی بر اساس خازن بین انگشتی و (ب) خروجی سنسور خازنی برحسب مکان صفحه دی‌الکتریک متحرک [۲۹]

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-02-05]

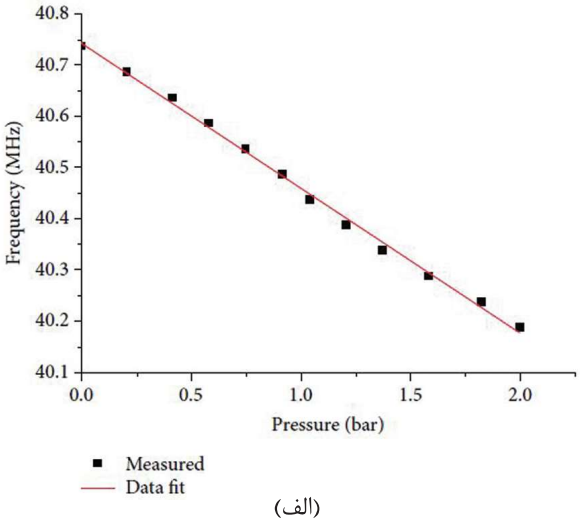


(الف)

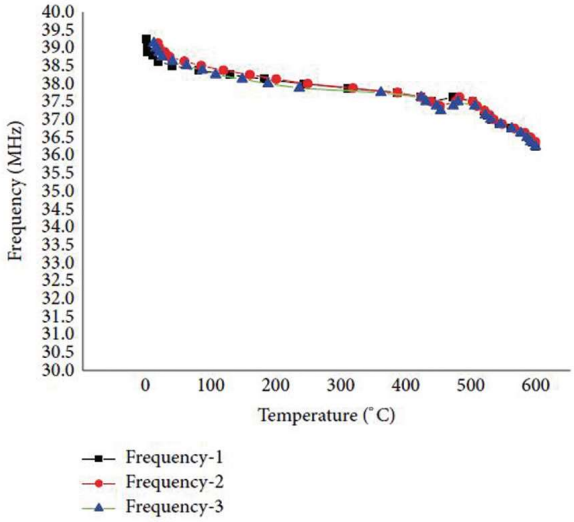


(ب)

شکل۱۲: (الف) مدار و (ب) تصویر سنسور فشار با استفاده از خازن بین انگشتی [۳۰]



(الف)



(ب)

شکل ۱۳: نمودار های، (الف) فرکانس رزونانس برحسب فشار و (ب) فرکانس رزونانس برحسب دما [۳۰].

استفاده شده است. دمای آزمایش بین ۲۵ °C تا ۶۰۰°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 الکترود متحرک

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

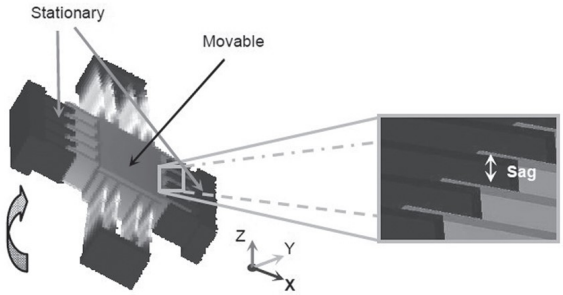
۳-۱- استفاده از خازن بین‌انگشتی در سنسور زاویه

ساختار یک سنسور خازنی شیب در شکل (۱۴-الف)، نشان داده شده است. در این سنسور تعدادی از الکترودها به یک جرم معلق متصلند که قابلیت حرکت دارند و در مقابل آن‌ها الکترودهای 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 الکترودهای متصل به جرم معلق تغییر موقعیت داده و ظرفیت خازن‌های بین‌انگشتی 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) ارایه شده است [۳۱].

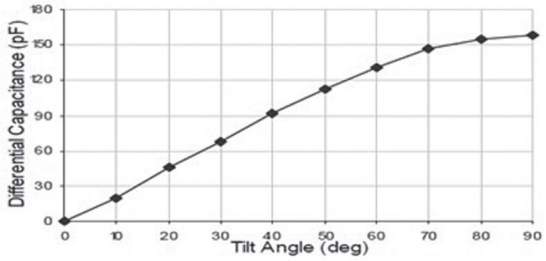
$$C = \frac{(l_0 \pm \Delta x)h\varepsilon N}{G} = \frac{A_0 \varepsilon N}{G} \qquad (۱۲)$$

$$\Delta x = mg\sin(\theta)\,/k_x \qquad (۱۳)$$

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



(الف)



(ب)

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

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-02-05]

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 قرارگرفته‌اند.

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 تغییر در تعداد الکترودها، ابعاد، فاصله بین الکترودها و ضریب گذردهی الکتریکی بستر عایق و ماده‌ی دی‌الکتریک بر روی الکترودها تغییر می کند. ظرفیت خازن بین انگشتی با طول و ضریب دی‌الکتریک ماده قرار گرفته بر رو و بین الکترودها رابطه خطی دارد که اساس کار بسیاری از سنسورهای مبتنی بر خازن‌های بین انگشتی است.

ویژگی‌های برجسته خازن‌های بین انگشتی، 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 بین انگشتی مورد بررسی قرار گیرند. این سنسورها در تشخیص آسیب عایق سیم و کابل، اندازه‌گیری فشار، جابجایی، زاویه کاربرد دارند. از خازن‌های بین انگشتی می‌توان در سنسورهای شیمیایی، گاز، رطوبت سنجی و بیوسنسورها نیز استفاده کرد .

مراجع

[1]N. Maluf, “An introduction to microelectromechanical systems engineering.” Measurement Science and Technology, Vol. 13, N0. 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.

[۹] زینب ورع 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 interdigital 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. Dücso, 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. Varshney 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. Žlebič, 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

***

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-02-05]