طراحی و ساخت سنسورهای فشار دینامیکی با استفاده از فیلم‌های ضخیم پیزوسرامیک

جمال زمانی[۱]، محمدهادی همتی[۲] و محمود بیدخوری[۳]

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۱/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۲/۱۷)

چکیده

در مقاله حاضر به بررسی طراحی و ساخت یک نوع سنسور فشار دینامیکی متکی بر ساختار پیزوالکتریک پرداخته شده است. عناصر مهم و اصلی سنسور از پیزوالکتریک اسکرین پرینت شده که به‌عنوان عنصر حسگر عمل می‌کند و همچنین ۵ قطعه اساسی شامل دیافراگم، هوسینگ، الکترودها و کانکتور تشکیل شده است. از فرایندهای جوش لیزر به‌همراه وایرکات، ماشینکاری تخلیه الکتریکی، قالب پرس، تراشکاری، فرزکاری و... در روش ساخت استفاده شده است. المان حسگر، شامل یک لایه پیزوالکتریک دایره‌ای است که در بین دو لایه هادی اسکرین با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر و قطر ۵ میلی‌متر پرینت شده است. المان حسگر ساختاری متشکل از یک خازن صفحه‌ای با فیلم پیزوالکتریک به‌عنوان دی‌الکتریک و دو لایه هادی، براساس ماده نقره به‌عنوان پوشش الکترود است. فیلم پیزوالکتریک در یک محفظه فولاد ضد زنگ برای آزمون‌های دینامیکی بسته‌بندی شده است. محدوده اندازه‌گیری، فشارهای تا ۱۰۰ MPa را دربر می‌گیرد، درحالی‌که زمان پاسخ کمتر از ۱۰μs می‌باشد. این سنسور فشار دینامیکی برای اندازه‌گیری فشارهای گذرا یا تغییرات دینامیکی فشار در مایعات یا گازها مناسب است.

واژه‌های کلیدی: سنسور پیزوالکتریک، فناوری فیلم ضخیم، سنسورهای فشار بالا

Designing and Manufacturing Dynamic Pressure Sensors Using Piezoceramic-Based Thick Films

J. Zamani, M.H. Hemati and M. Bidkhori

Department of Mechanical Engineering

K.N.T. University of Technology

(Received:09 april,2014; Accepted:07 may,2014)

ABSTRACT

In this article, design and manufacturing of a dynamic pressure sensor based on piezoelectric structure has been put on the agenda. Essential sensor elements are consists of a piezoelectric element that screen printed as sensor element and The five basic components consists of diaphragm, housing, the electrodes and the connector. laser welding, Wire Cut, electrical discharge machining, mold pressing, turning, milling and ... are used in Manufacturing processes. The sensitive element, consisting of a circular piezoelectric layer sandwiched in two conductive layers, is screen printed, it has 0.5 mm thickness and 5 mm diameter. The sensitive element has a structure of a plane capacitor with the piezoelectric film as dielectric and the two conductive layers, based on Ag material, as armatures. Device was encapsulated in a stainless steel housing for the dynamic test. The measuring range covers pressure up to 100 MPa while the reaction time is less than 10 μs. This dynamic pressure transducer is ideal for measuring pressure transients or dynamic pressure pulsations in liquids or gases.

Keywords: Piezoelectric Sensor, Thick-Film Technology, High-Pressure Sensors

۱- دانشیار (نویسنده پاسخگو): zamani@kntu.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد: mhhemati@yahoo.com

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد: mahmoudbidkhori@gmail.com

Archive of SID

www.SID.ir

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، به‌علت نیازهایی که در حوزه خدمات نظامی تا حوزه خدمات تجاری مانند بالستیک، انفجار، بلست، موج شوک، آکوستیک شدت بالا، فشار هیدرولیک و ... ایجاد شده، اندازه‌گیری فشار دینامیک توجه زیادی را به خود جلب کرده است. با این وجود، به‌دلیل عدم شناخت دقیق پدیده و سختی توسعه فنی در زمینه فشار دینامیک [۱] سنسورهای تجاری کمی برای اندازه‌گیری فشار دینامیک وجود دارد.

سنسورهای فشار پیزوالکتریک مزیت‌های زیادی از جمله حساسیت بالا، رفتار خطی نسبتاً عالی، هیسترزیس کم و تطبیق‌پذیری گسترده را دارند [۲]. استفاده اصلی آنها در زمانی است که دقت بالا، بدون توجه به هزینه بالا ملاک باشد. برای این نوع سنسورها اندازه‌گیری‌های با حجم بالا و کم‌هزینه، به‌طور کلی نادیده گرفته می‌شوند. فناوری فیلم ضخیم[1] (TFT) مقاوم، فشرده، کوچک و ارزان است. گرچه سنسورهای فیلم ضخیم تجاری در دسترس می‌باشند، ولی تعدادی از کاربردهایشان به‌دلیل فقدان چسب مخصوص سنسور در دسترس صنعت محدود شده است. عمل مطلوب این است که سعی شود تا مزایای استفاده از سنسور فشار پیزوالکتریک همراه با فناوری فیلم ضخیم ادغام شود تا یک استراتژی قدرتمند و اقتصادی برای توسعه سنسور در آینده فراهم شود.

بریگنل[2] و همکارانش در تحقیقاتشان بررسی نمودند که در سه حوزه اصلی فناوری، فیلم ضخیم می‌تواند به پیشرفت سنسورها در آینده کمک کند: در مرحله اول، ارائه مدار الکترونیک کوچک که می تواند درون محفظه حسگر نصب شود. مرحله دوم، فناوری‌ای که باعث ایجاد ساختارهای محافظ مانند الگوهای الکترود می‌شود که بر روی مواد حس‌کننده می‌توان رسوب داد. آخرین زمینه مربوط به استفاده از خود مواد فیلم ضخیم به‌عنوان عنصر اصلی سنجش می‌باشد [۳].

باودری[3] [۴] همچنین مورتن[4] و همکارانش [۵]از یک صفحه پیزوالکتریک قابل چاپ به‌عنوان ماده اولیه سنسور استفاده کردند، این ماده از نوع فیلم ضخیم خمیری بود و از پودر سرب تیتانات زیرکونات[5] (PZT)، سرب بور، سیلیکات شیشه‌ای و یک حامل آلی، که ویسکوزیته مورد نیاز خمیر را برای چاپ روی صفحه ارائه می‌داد، تشکیل شده بود. برای فرآیند ساخت آن می‌توان از تجهیزات معمولی فیلم ضخیم استفاده کرد.

مطالعه‌های گسترده روی پیزوسرامیک‌های فیلم ضخیم نشان داده است که آنها دارای خواص مشابه به PZT می‌باشند، با این تفاوت که مقدار گذردهی الکتریکی نسبی آنها کمتر است و این تفاوت ناشی از اختلاف بین مورفولوژی فیلم با مورفولوژی PZT می‌باشد.

۲- انواع سنسور فشار

در مبحث اندازه‌گیری فشار، تعداد قابل توجهی سنسور وجود دارد که عبارتند از: خازنی، فیبر نوری، الکترومغناطیسی، پتانسیومتری، رزونانسی، پیزوالکتریک و پیزورزیستیو. البته در این میان دو مورد انتهایی توان اندازه‌گیری فشارهای دینامیکی با سرعت رشد بالا را نیز دارا می باشند. ولی با توجه به اینکه این تحقیق در خصوص سنسورهای پیزوالکتریک است، در این خصوص به‌صورت مشروح‌تر مباحثی مطرح می شود.

۲-۱- سنسور فشار پیزو الکتریک

ترانسدیوسرها عموماً از دو بخش اصلی مکانیکی و الکتریکی تشکیل شده‌اند. در مقاله حاضر یک مبدل فشار ارائه شده که جزء مکانیکی آن یک دیافراگم و جزء الکتریکی آن فیلم پیزوالکتریک است. در این بخش سنسورهای فشار فیلم ضخیم پیزو الکتریک ارائه می‌شوند.

سنسور فشار از سه جز اساسی بدنه سنسور، المان حس‌کننده (TFT) و دیافراگم تشکیل شده است. از دیافراگم برای انتقال فشار به المان حس‌کننده استفاده می‌شود. در شکل **۱** سطح مقطع سنسور فشار TFT نشان داده شده است.

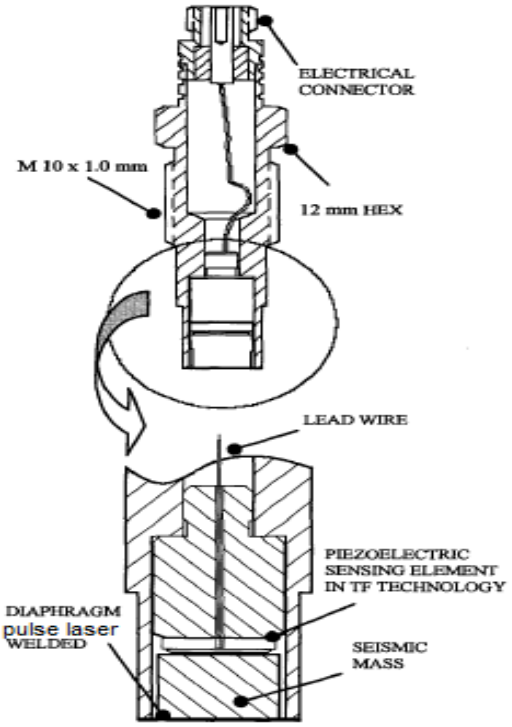
عنصر حساس، متشکل از یک لایه پیزوالکتریک مدور ساندویچ شده در دو لایه رسانا و اسکرین پرینت شده است که ضخامت و قطر آن به ترتیب برابر ۰/۵ و ۵ میلی‌متر می‌باشد. عنصر حساس، دارای ساختار خازن صفحه‌ای با فیلم پیزوالکتریک به‌عنوان دی‌الکتریک و دو لایه رسانا، بر اساس ماده نقره، به‌عنوان الکترود می‌باشد [۶و۷]. فیلم پیزوالکتریک، یک لایه فروالکتریک $PbNb_2O_6$ است. قطبش الکتریکی، پس از فرآیند گرمایی با میدان الکتریکی $3\times10^{6}V/m_{dc}$ در مدت ۱۵ دقیقه در درجه حرارت $380^{o}C$ ایجاد شده و پس از آن بدون از بین بردن میدان

1 -Thick Film Technology
2 - Brignell
3- Baudry
4- Morten
5- Lead Zirconate Titanate

Archive of SID

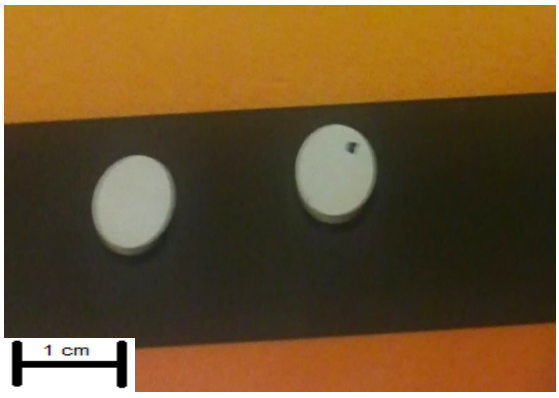
www.SID.ir

الکتریکی، مواد تا دمای اتاق سرد شده‌اند. با این شیوه، لایه پیزوالکتریک یک ضریب ولتاژ d_{33} در حدود ۸۰ pC/N را نشان می‌دهد. این فیلم دارای جهت قطبش موازی با راستای ضخامت فیلم پیزوالکتریک می‌باشد.



شکل (۱): سطح مقطع سنسور فشار TFT [۳].

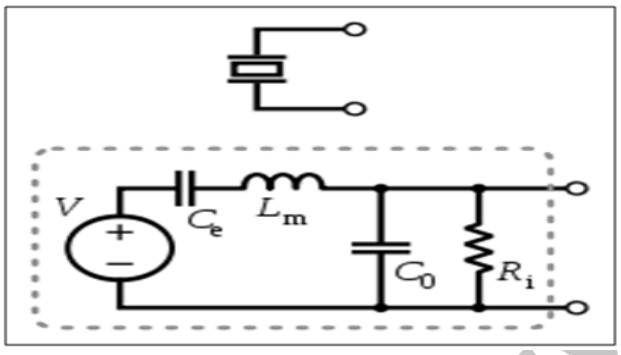
در شکل **۲** تصویری از المان حسگر به‌همراه الکترودهای لایه‌نشانی شده آن ارائه شده است.



شکل (۲): نمای شماتیکی از المان حسگر TFT.

۳- نحوه عملکرد سنسور پیزوالکتریک

فشار دینامیک به دیافراگم سنسور وارد می‌گردد و این فشار به صفحات کوارتز (المان حسگر) که تحت پیش‌بار قرار گرفته‌اند اعمال می‌گردد. بر اثر این فشار دینامیک، بار الکتریکی در کوارتز ایجاد می‌گردد که میزان این بار به حساسیت سنسور بستگی دارد. به‌دلیل تغییر فشار یک سیگنال، ولتاژ متناوب ایجاد می‌گردد. این ولتاژ توسط یک کابل با نویز بسیار پایین به یک آمپلی‌فایر (جریان یا ولتاژ) وارد می‌شود. ولتاژ خروجی آمپلی‌فایر به بار الکتریکی القاء شده و ظرفیت خازنی آن بستگی دارد. در اینجا فیلم را می‌توان به‌عنوان یک خازن با ظرفیت c درنظر گرفت که با مقاومت مبدل موازی است. بنابراین، یک مدار RC وجود داردکه می‌توان به صورت شکل **۳** نشان داد.



شکل (۳): مدار سنسور پیزوالکتریک.

۴- روابط ریاضی حاکم بر سنسور پیزوالکتریک

در مبحث قبل ذکر شد که چگونه اعمال نیرو به یک سنسور پیزو، موجب تولید بار می‌شود، بنابراین رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$q = d.F, \quad (۱)$$

که در آن، q بار الکتریکی سطحی تولید شده در اثر اعمال نیروی مکانیکی F به کریستال و d ثابت پیزوالکتریک می‌باشد.

$$i = \frac{dq}{dt} = d\dot{x}, \quad (۲)$$

که در آن، i جریان ناشی از بارهای سطحی در پیزوالکتریک است. کریستال پیزو دارای ظرفیت الکتریکی می‌باشد و امپدانس تطبیقی الکتریکی آن به صورت زیر است.

$$Z_E(s) = \frac{\Delta\bar{V}(s)}{\Delta\bar{i}(s)} = \frac{1}{C_s}, \quad (۳)$$

که در آن، V(s) =ولتاژ الکتریکی کریستال، i(s) جریان الکتریکی کریستال و Cs ظرفیت الکتریکی کریستال می‌باشد.

Archive of SID

www.SID.ir

همچنین عاملی تحت عنوان "عامل کیفی مکانیکی " به علامت اختصاری Q نیز به‌صورت زیر در کریستال‌های پیزوالکتریک تعریف می‌شود:

$$Q = \frac{1}{2\xi} = \frac{\sqrt{mk}}{\lambda}, \quad (۴)$$

که در آن، ε گذردهی الکتریکی (ثابت دی‌الکتریک)، k ضریب الکترومکانیکی پیزو، λ طول موج و m جرم پیزو می‌باشد.

انتقال امواج فراصوتی معمولاً یا به‌صورت باند باریک و یا باند پهن هستند. در سامانه‌های باند باریک هم فرستنده و هم گیرنده باید دارای Q بالایی باشند که تشدید پیک گردد، کوارتز نیز در اینجا از خود کارایی خوبی نشان می‌دهد. در سامانه‌های باند پهن هم فرستنده و هم گیرنده دارای Q پایین هستند.

اگر به یک کریستال پیزو، نیرو یا فشار اعمال شود، بار الکتریکی در آن تولید می‌شود اما بار تولید شده متناسب با فشار اعمالی به کریستال است:

$$q = d.A.\sigma, \quad (۵)$$

که در آن، d ضریب حساسیت شارژ کریستال، A سطح مقطع کریستال که توسط الکترود پوشیده شده است و σ فشار اعمالی است. ضریب حساسیت شارژ برای فیلم پیزوالکتریک استفاده شده در این تحقیق حدود 80 PC/N می‌باشد.

ولتاژ خروجی که توسط سنسور پیزو به‌دست می‌آید از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$E_0 = \frac{q}{C} = \frac{d.A.\sigma}{\frac{\varepsilon.\varepsilon_0.A}{t}} \Rightarrow E_0 = \left(\frac{d}{\varepsilon.\varepsilon_0}\right) t.\sigma. \quad (۶)$$

چون ضریب حساسیت ولتاژ پیزو برابر است با:

$$g = \frac{d}{\varepsilon.\varepsilon_0}. \quad (۷)$$

بنابراین ولتاژ خروجی برابر است با:

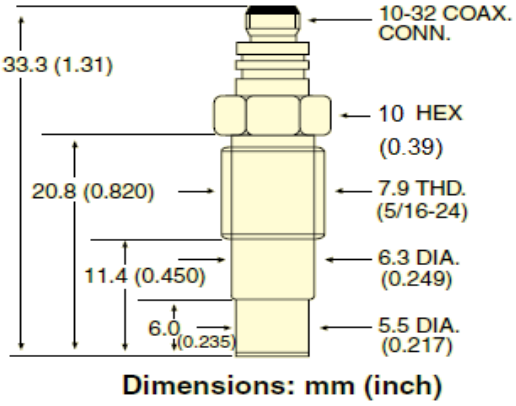
$$E_0 = g.t.\sigma. \quad (۸)$$

ضریب حساسیت ولتاژ پیزو برای ماده پیزوالکتریک استفاده شده در این تحقیق برابر $۲۷/۴\times۱۰^{-۳}$V.m/N است.

۵- عناصر متشکل در این نوع سنسور

در طراحی و ساخت سنسور مورد نظر ۵ بخش متفاوت مدنظر قرار گرفت که هر کدام طراحی و ساخته شد.

اندازه سنسور با توجه به سازگاری با سامانه اندازه‌گیری تجاری برای سنسور فشار درنظر گرفته شد. نقشه ساخت در شکل **۴** قابل مشاهده است.



شکل (۴): طرح اولیه بدنه سنسور فشار دینامیکی مورد نظر.

۵-۱- بدنه

برای ساخت هوسینگ، ابتدا فولاد ضد زنگ ۳۰۴ با توجه به خواص مکانیکی و الکتریکی آن انتخاب شد. سپس با توجه به نقشه مورد نظر که در شکل **۴** آورده شده است، ماشینکاری‌های لازم انجام گرفت.

۵-۲- کانکتور

با توجه به نقشه طراحی و قطر داخلی بدنه، کانکتور مناسب برای سنسور تهیه شد.

۵-۳- عنصر پیزوالکتریک

با توجه به اینکه در ساخت سنسورهای فشار برای اندازه‌گیری تغییرات بسیار زیاد فشار مهم‌ترین فاکتور ثوابت پیزوالکتریک کم است [۸] تهیه ماده پیزوالکتریک با ثوابت پیزوالکتریک پایین در دستور کار قرار گرفت. جدول **۱** خواص فیلم پیزوالکتریک سرب نیوبات اکسید ($PbNb_2O_6$) که از خارج از کشور تهیه شده را نشان می‌دهد.

۵-۴ دیافراگم

برای تهیه دیافراگم ابتدا یک ورق فولاد ضد زنگ ۳۰۴ (همجنس با بدنه) به ضخامت ۰/۳ میلی‌متر تهیه شد، سپس به‌علت ضخامت خیلی کم ورق و حفظ دقت و صافی سطح با یک دستگاه وایرکات ۵ محور، قرص‌هایی به قطر ۶/۴ میلی‌متر از آن تهیه شد.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول (۱): خواص فیلم پیزوالکتریک $PbNb_2O_6$.

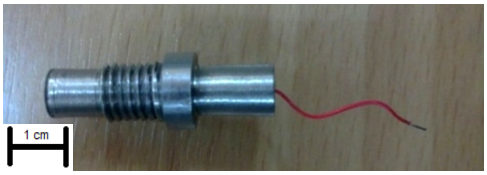
Density (10^3 kg/m^3)	ρ	۵/۴
Curie point(^oC)	T_C	۴۰۰
Poisson`s ratio	v	۰/۴۱
Mechanical Q	Q_m	۱۵
Frequency constant (Hz. m)	N_t	۱۷۲۰
Dielectric constant	ε	۲۸۰
Piezoelectric voltage constant (10^{-3}Vm/N)	g_{33}	۲۷/۴
Piezo charge constant (pC/N)	d_{33}	۸۰
Coupling factor	k_p	۰/۲

۵-۵- جرم لرزه‌ای

جرم لرزه‌ای به عنصر کریستال متصل می‌شود، وقتی که سنسور یک حرکت را تجربه می‌کند، جرم لرزه‌ای تغییرناپذیر باری برطبق قانون دوم نیوتن (F=ma) به عنصر وارد می‌کند. این قرص‌ها به‌دلیل ضخامت و قطر کم با سنبه و ماتریس ۵ میلی‌متری ساخته شدند.

بعد از لحیم‌کاری سیم به این قرص‌ها، به‌دلیل اینکه این سیم باید در انتهای دیگر به کانکتور متصل شود و به‌دلیل قطر کم سیم و حفظ استحکام بدنه، بدنه توسط ماشین EDM (ماشینکاری تخلیه الکتریکی[1]) برای عبور سیم سوراخ‌کاری شد. سوراخ سراسری است و قطر آن ۱ mm می‌باشد.

بعد از جاسازی جرم لرزه‌ای و المان حسگر در بدنه، با یک لیزر با توان ۱۰ وات دیافراگم به بدنه جوش داده شد. شکل **۵** نمونه کامل سنسور فشار پیزوالکتریک شارژ مد با محفظه فولاد ضد زنگ AISI 304 L را نشان می‌دهد.

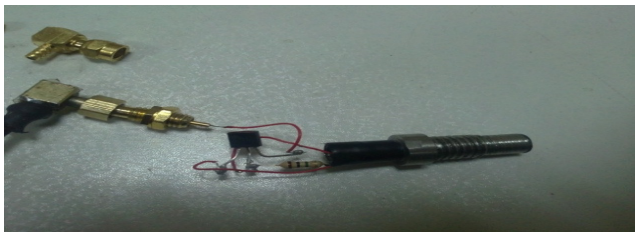


شکل (۵): تصویری از سنسور فشار TFT در محفظه AISI 304 L (شارژ مد[2]).

در بررسی‌های به‌عمل آمده به‌دلیل اینکه هزینه تهیه آمپلی‌فایر برای سنسورهای فشار شارژمد بسیار بالا می‌باشد، در نتیجه علاوه بر ساخت سنسور فشار شارژمد تلاشی جهت ساخت سنسور فشار ولتاژمد صورت گرفت.

۵-۶- ادوات الکترونیکی

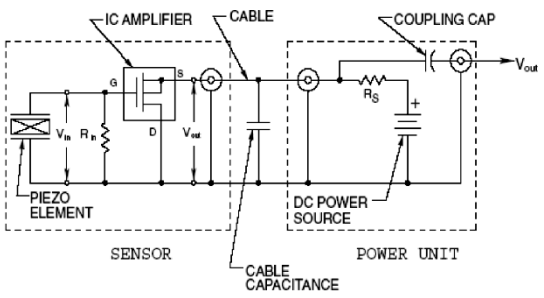
از یک مدار کاهنده برای کاهش امپدانس در شکل **۶** استفاده می‌شود.



شکل (۶): سنسور پیزوالکتریک به همراه مدار کاهنده امپدانس (ولتاژ مد).

به‌دلیل اینکه در این حالت بار الکتریکی تولید شده بر اثر ضربه و به علت وجود امپدانس بالای فیلم پیزوالکتریک دارای مقدار کمی است و همچنین برای خواندن بهتر آن نیاز به تقویت دارد، یک مدار تقویت کننده نیز به مدار اضافه شد. شکل **۷** مدار تقویت کننده به‌همراه سنسور را نشان می‌دهد و شکل **۸** شماتیک مدار را نشان می‌دهد.

شکل (۷): سنسور پیزوالکتریک به‌همراه مدار کاهنده امپدانس و مدار تقویت کننده.



شکل (۸): شماتیک مدار سنسور پیزوالکتریک فشار ولتاژ مُد.

1 - Electro Discharge Machining
2 - Charge Mode

Archive of SID
www.SID.ir

۶- نتایج تجربی

در آزمایشگاه سنسور فشار TFT به‌منظور ارزیابی پاسخ سنسور به فشارهای شناخته شده، جهت بررسی پاسخ دینامیکی و برای نشان دادن تکرارپذیری آزمایش شده است. در این آزمایش مراحل زیر دنبال شده است:

- تحلیل خطی بودن و حساسیت
- تحلیل تکرارپذیری
- تحلیل پسماند

فرکانس طبیعی نمونه TFT در حدود ۱۰۰ کیلو هرتز است و زمان خیز[1] حتی کمتر از ۱۰ µs می‌باشد. اطمینان از آزمون تکرارپذیری و ثبات طولانی‌مدت، نیازمند بررسی بیشتر است.

در سقوط گوی با وزنه‌هایی که به ترتیب جرمشان زیاد می‌شود، پاسخ سنسور به ترتیب به‌صورت جدول **۲** می‌باشد.

جدول (۲): جرم گویی‌ها و ولتاژ تئوری و ولتاژ اسیلوسکوپ در آزمایش سقوط گوی.

جرم گوی‌ها (گرم)	ولتاژ تئوری (میلی‌ولت)	ولتاژ اسیلوسکوپ (میلی‌ولت)
۳	۲۰/۹۳	۰/۸۰۵
۷	۴۸/۸۴	۱/۸۸
۱۴	۹۷/۶۹	۳/۷۶

که در آن، ولتاژ تئوری طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V = -gF\frac{L}{A}, \qquad (۹)$$

که در آن، g ثابت ولتاژ پیزوالکتریک است. L و A به ترتیب ضخامت و سطح مقطع دیسک پیزوالکتریک می‌باشند و F نیروی اعمال شده بر دیافراگم است.

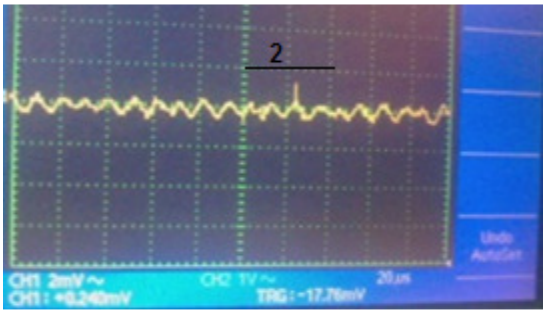
با توجه به مداری که با اتصال اسیلوسکوپ به سنسور تشکیل می‌شود، ولتاژ اسیلوسکوپ از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$Vo = Vs\frac{Ro}{Ro+Rin}, \qquad (۱۰)$$

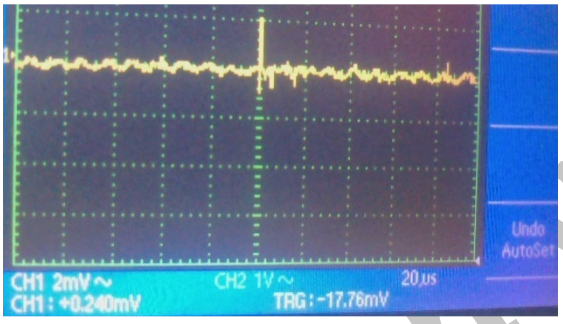
که در آن، Vs ولتاژ تولیدی توسط ضربه نوعی به پیزوالکتریک و Rin امپدانس پیزوالکتریک و Ro مقاومت اسیلوسکوپ می‌باشد.

با مقایسه مقادیر ولتاژ اسیلوسکوپ جدول **۲** با شکل **۹** نتیجه گرفته شد که سنسور ساخته شده دقت مورد انتظار را داشته و با الزامات و معیارهای مورد نظر تطابق لازم را دارد.

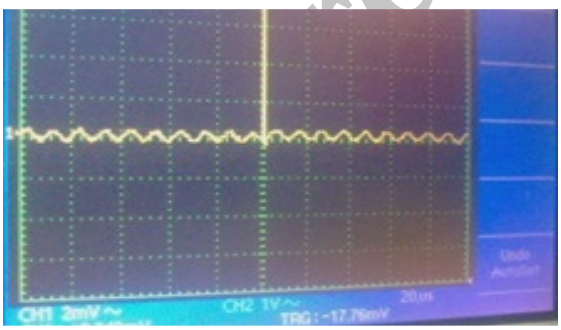
در شکل **۱۰** مدارهای تقویت‌کننده به سنسور اضافه شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، مقیاس مقادیر ولتاژ از ۲ mv به ۰/۵ v تغییر کرده‌اند.



(الف)



(ب)



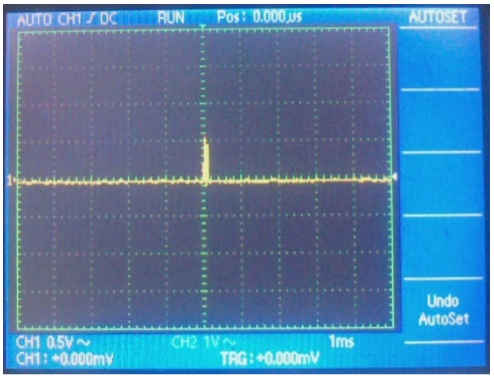
(ج)

شکل (۹): پاسخ مشاهده شده توسط اسیلوسکوپ در سقوط وزنه‌هایی با جرم‌های مختلف و به ترتیب افزایش جرم در تصاویر.

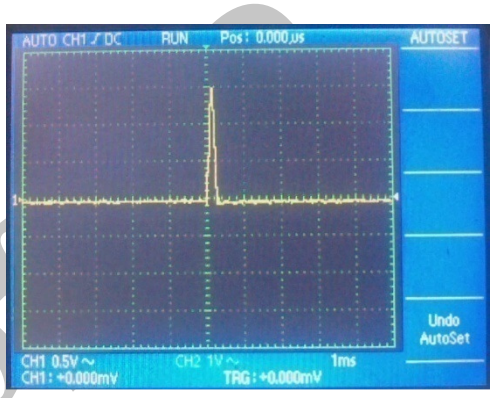
1- Rise Time

Archive of SID

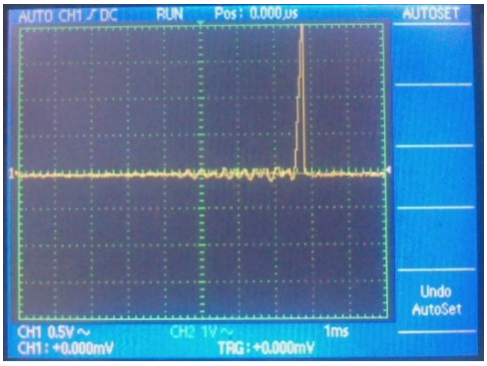
www.SID.ir



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱۰): پاسخ سنسور به‌همراه مدارات تقویت‌کننده به ضربه‌های مختلف که به ترتیب وزن وزنه‌ها ۳، ۷ و ۱۴ گرمی بوده است.

۷- نتیجه‌گیری

برای اولین بار در کشور یک سنسور فشار دینامیکی پیزوالکتریک ساخته شد. در مقاله حاضر نشان داده شده است که مواد فروالکتریک/پیزوالکتریک فیلم ضخیم با تبدیل موثر الکتریکی/مکانیکی می‌توانند با فناوری فیلم ضخیم استاندارد تحقق یابند. سیگنال شارژ خروجی به خواص پیزوالکتریک و دی‌الکتریک مواد بستگی دارد. علاوه بر ساخت سنسور فشار شارژمد یک نمونه سنسور فشار ولتاژمد آزمایشگاهی ساخته شد. با مقایسه مقادیر ولتاژ به‌دست آمده از اسیلوسکوپ با فرمول‌های تئوری موجود در مورد اصول پیزوالکتریک نتیجه گرفته شد که سنسور ساخته شده با الزامات و معیارهای مورد نظر تطابق لازم را دارد.

۸- منابع

1. Song, H.W., Kim, S.Y. “Fabrication and Evaluation of a Pressure Sensor for the Measurement of Dynamic, Pressure”, Metrology for Green Growth, Vol. 9, No.14, pp. 757, 2012.
2. Bean, V.E. “Dynamic Pressure Monitoring Systems Using Piezoelectric Pressure Sensors”, Metrologia., Vol. 30, No.1, pp. 737-741, 1993.
3. Brignell, J.E., White, N.M., and Cranny, A.W.J. “Sensor Applications of Thick-Film Technology”, IEE Proc. Pt. I, Vol. 135, No. 4, pp. 77-84, 1988.
4. Baudry, H. “Screen Printing Piezoelectric Devices”, Proc. 6th Eurap. Microel. Conf., Bournemouth, pp. 456-463, 1987.
5. Morten, B., Cicco, G. De, Gandolfi, A., and Tonelli, C. “Advances In Ferroelectricthick- Film Materials and Sensors”, Proc. 8th Europ, Microel. Conf., Rotterdam, Pp. 392-399, 1991.
6. Crescini, D., Marioli, D., Sardini, E., and Taroni, A. “Large Baudwith and Thermal Compensated Piezoelectric Thick-Film Accelerometer Transducer”, Sensor and Transducer A, Vol. 87, No.3, pp. 131-138, 2001.
7. Crescini, D., Marioli, D., Ferrari, V., and Taroni, A. “Vibration and Vibrating Sensorin Thick-Film Technology”, Machine Vibration, Vol. 4, No.1, pp.161-167, 1995.
8. Andenende, D.A., Groen, W.A., and Van Der Zwaag, S. “Development of Temperature Stable Charge Based Piezoelectric Composite Quasi-Static Pressure Sensors”, Sensors and Actuators A, Vol.163, No.1, pp. 25–31, 2010.

Archive of SID

www.SID.ir