



شبیه‌سازی و بررسی تجربی پکیج فشارسنج میکرو الکترومکانیکی پیزومقاومتی بر اساس الزامات عملکرد صنعت پتروشیمی

نوید سیدکاظم ویلیانی^{1*}، مهدی هاشمی²، هادی وادی‌زاده³، حسن پوررستمی¹، سید محسن مصطفوی⁴، فرامند هاشمی‌زاده⁴

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ابهر، ابهر

2- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

3- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران، ایران

4- کارشناس ارشد، بخش پژوهش و فناوری شرکت پتروشیمی فن‌آوران، ماهشهر

* تهران، 1998664799، n.viliani@abhariau.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 تیر 1393

پذیرش: 24 مرداد 1393

ارائه در سایت: 24 آبان 1393

کلیدواژگان:

حسگر فشارسنج میکروالکترومکانیک

پیزومقاومت

صنایع پتروشیمی

بررسی تحلیلی و تجربی

در این مقاله به بررسی تحلیلی و تجربی پکیج فشارسنج میکروالکترومکانیکی پرداخته شده است. این پکیج فشارسنج از یک حسگر میکروالکترومکانیکی، برد مدار چاپی، نمایشگر خازنی تشکیل شده است. در ابتدا، مدل‌سازی ریاضی و سپس شبیه‌سازی کامپیوتری با استفاده از نرم‌افزار کامسول که بر اساس تحلیل اجزاء محدود می‌باشد، ارائه شده است. از این طریق مقادیر خروجی ولتاژ و حساسیت از حسگر فشار میکروالکترومکانیکی پیزومقاومتی محاسبه شده است. شایان ذکر است که عنصر مقاومتی در نظر گرفته شده روی دیافراگم از نوع ضربدری می‌باشد. علاوه بر تحلیل استاتیکی و مودال دیافراگم این فشارسنج، اثرات پارامترهای هندسی بر روی ولتاژ خروجی مورد بررسی قرار گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با تغییر ابعاد و موقعیت عنصر مقاومتی روی دیافراگم و همچنین ابعاد و ضخامت دیافراگم، حساسیت حسگر تغییر می‌یابد. سپس، با ساخت برد مدار چاپی و تعبیه نمودن اجزا بر روی آن، پکیج نهایی تهیه شده و مورد تست آزمایشگاهی قرار گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که پکیج فشارسنج میکروالکترومکانیکی دارای خطای کمتر از 0/5 درصد می‌باشد. این پکیج فشارسنج قادر است تا فشار 6 بار را با دقت مذکور اندازه‌گیری کند. نتایج تجربی حاصل از کار آزمایشگاهی در پایان مقاله ارائه شده است. از این پکیج می‌توان با توجه به الزامات طراحی در صنعت پتروشیمی در اندازه‌گیری فشار گاز در تعدادی از مخازن ذخیره و مخازن تحت فشار مشخص شده در پتروشیمی فن‌آوران استفاده کرد.

Simulation and empirical investigation of micro-electro-mechanical piezo-resistive pressure sensor package based on the requirements of petrochemical industry

Navid SeyedKazem Viliani^{1*}, Mehdi Hashemi², Hadi Vadizadeh³, Hassan Pourrostami¹, Seyed Mohsen Mostafavi⁴, Faramand Hashemizadeh⁴

1- Department of Engineering, Islamic Azad University, Abhar Branch, Abhar, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

3- Young Researchers and Elite Club, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

4- Department of Research and Development, Fanavaran Petrochemical Co., Mahshahr, Iran

* P.O.B. 1998664799 Tehran, Iran. n.viliani@abhariau.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 05 July 2014

Accepted 15 August 2014

Available Online 15 November 2014

Keywords:

Micro-electromechanical pressure sensor

Piezoresistive

Petrochemical industry

Analytical and empirical investigation

ABSTRACT

In this paper, a designed micro-electromechanical pressure sensor package is studied analytically and empirically. This package includes a piezoresistive micro-electromechanical pressure sensor, printed circuit board (PCB), the capacitance LCD. First, a mathematical model for the sensor is presented, then the behavior of the sensor is simulated using COMSOL computer software which is based on finite element method. As a consequence, the sensitivity of the micro-electromechanical pressure sensor and output voltage are determined. It should be noted that an Xducer resistor type is adopted in this study. In addition to static and modal analyses of the sensor, the effects of geometrical parameters on output voltage have also been studied. Simulation results show that by changing the size and position of the resistor, as well as the size and thickness of the diaphragm, the sensitivity of the sensor can alter. Then, with the construction and placement of components on printed circuit boards, the package has been prepared and tested in a laboratory. The experimental results of the package show that the error of the devised package in measuring the pressure is less than 0.5 percent. This pressure sensor package is capable of measuring the pressure with the mentioned accuracy within the range of 0-6 bar. For verification, the empirical results are presented at the end of the study. The package can be used according to the requirements of the petrochemical industry in measuring gas pressure of specific storage tanks and pressure vessels in FANAVARN petrochemical company.

Please cite this article using:

N. S. Viliani, M. Hashemi, H. Vadizadeh, H. Pourrostami, S. M. Mostafavi, F. Hashemizadeh, Simulation and empirical investigation of micro-electro-mechanical piezo-resistive pressure sensor package based on the requirements of petrochemical industry, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 349-357, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

N. S. Viliani, M. Hashemi, H. Vadizadeh, H. Pourrostami, S. M. Mostafavi, F. Hashemizadeh, Simulation and empirical investigation of micro-electro-mechanical piezo-resistive pressure sensor package based on the requirements of petrochemical industry, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 349-357, 2015 (In Persian)

1- مقدمه

اساس کار بیشتر محرک‌ها و حسگرهای نسل جدید بر پایه سیستم‌های الکترومکانیکی¹ می‌باشد. سیستم‌های الکترومکانیکی ترکیبی از سیستم‌های هوشمند مکانیکی و الکتریکی در ابعاد میکرو می‌باشند. از دیگر محصولاتی که می‌توان به شکل سیستم‌های الکترومکانیکی از آن‌ها استفاده کرد سوپاپ‌ها [1]، چرخ‌دنده‌ها [2] و میکروآینه‌ها [3] می‌باشند.

اساس عملکرد حسگرها در شکل‌های مختلفی می‌باشد که هر کدام دارای پایه و اساس فیزیکی مخصوص به خود می‌باشد. این پدیده‌های فیزیکی عبارتند از: نوری، خازنی، پیژوالکتریک، پیژومقاومتی، رزونانسی و ترموالکتریکی [4]. در بین روش‌های مذکور، روش پیژومقاومت دارای کارایی بیشتری نسبت به روش‌های دیگر می‌باشد. از مهمترین محصولات تولید شده در سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، حسگرهای فشار میکروالکترومکانیکی می‌باشند که از مقبولیت ویژه‌ای در صنایع مختلف از جمله صنعت پتروشیمی برخوردار هستند. علت این امر را می‌توان در بالا بودن دقت و پایین بودن هزینه ساخت آن‌ها جویا شد [5].

حسگرهای فشار در شکل رایج خود به شکل کرنش‌سنج می‌باشند که برای دهه‌های متوالی مورد استفاده قرار گرفته است [6] ولی پس از کشف خاصیت پیژومقاومتی در بعضی از نیمه‌هادی‌ها همچون سیلیسیم توسط اسمیت [7]، اساس کار حسگرهای فشار بر پایه پدیده‌ی پیژومقاومت تغییر یافت. پیژومقاومت به تنهایی یک خاصیت ماده می‌باشد که در اثر اعمال تنش مکانیکی، مقاومت کلی جسم تغییر می‌کند [8].

فشارسنج‌های به چندین دسته تقسیم‌بندی می‌شوند که عبارتند از: حسگر فشار مطلق، حسگر فشار گیج و حسگر فشار دیفرانسیلی. در تمامی دسته‌های یاد شده، حس‌کننده فشار یک دیافراگم می‌باشد که در اثر اعمال فشار به آن تغییر شکل ایجاد می‌شود. از آن جا که تغییر شکل پدیدار شده در دیافراگم کوچک است نمی‌توان آن را مستقیماً به سادگی اندازه‌گیری کرد. این تغییر شکل مکانیکی یا به عبارت دیگر کرنش‌های ایجاد شده در دیافراگم با استفاده از خاصیت پیژومقاومتی مواد نیمه‌هادی به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌شوند که در نهایت می‌توان، فشار اعمال شده به دیافراگم را اندازه‌گیری کرد [6].

به‌طور کلی دو گروه اصلی در سیلیسیم می‌توان در نظر گرفت که در طراحی و ساخت دیافراگم در حسگرهای میکروالکترومکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این دو گروه عبارتند از نوع p و نوع n . تفاوت این دو گروه در نوع ناخالصی بکار رفته در آن‌ها می‌باشد [9].

تحقیقات در خصوص فشارسنج‌های میکروالکترومکانیکی پیژومقاومتی بسیار گسترده می‌باشد. برای اولین بار در سال 1979 میلادی، کلارک و وایز [10] یک نمونه از این فشارسنج‌ها را طراحی نمودند و برای آن به همراه میزان حساسیت آن یک مدل ریاضی ارائه نمودند. مدل آن‌ها، شامل چهار عنصر پیژومقاومت در وسط یک دیافراگم مربعی بود. در همان سال، کو و همکاران [11] بر همین اساس مدل فشار برای کاربردهای پزشکی طراحی کردند. لی و وایز [12] در سال 1982 میلادی برای فشارسنج مذکور، یک برنامه شبیه‌سازی پیشنهاد کردند. جوربج و همکاران [13] در سال 1990 میلادی به‌صورت تجربی به بررسی رفتار این فشارسنج‌ها پرداختند. یک سال بعد، موسر و همکاران [14] به بررسی حسگرهای فشار که از کریستال پلی‌سیلیسیم ساخته شده‌اند، پرداختند. در سال 1995 میلادی، الگامل [8]

یک حل بسته برای روابط بین تنش، جابه‌جایی دیافراگم و تغییرات مقاومت با فشار در حسگرهای فشار پیژومقاومتی سیلیسیمی ارائه نمود. کاندو و یاسکوا [15] در سال 1997 میلادی به بررسی ملاحظات طراحی بهینه برای این فشارسنج‌های پیژومقاومتی که دارای چهار المان پیژومقاومت می‌شد، پرداختند. در همان سال ایتون و اسمیت [16] به بررسی اجمالی فشارسنج‌هایی که از طریق میکروماشین‌کاری ساخته می‌شوند، پرداختند. در اواخر همان دهه، لین و همکاران [17] یک برنامه شبیه‌سازی برای بررسی حساسیت و خطی بودن رفتار حسگرهای فشار پیژومقاومتی ارائه نمودند. توریاما و سوگیاما [18] در سال 2002 میلادی اقدام به بررسی رفتار پیژومقاومتی در سیلیسیم نوع p در حسگرهای مکانیکی کردند.

تحقیقات در خصوص فشارسنج‌های میکروالکترومکانیکی پیژومقاومتی نه‌تنها به این‌جا محدود نگشت، بلکه در دهه‌ی اخیر رشد بیشتری نیز یافت. این تحقیقات را می‌توان در قالب مدل‌سازی (مانند مرجع [5])، بهینه‌سازی رفتار به‌منظور بالا بردن حساسیت فشارسنج (برای مثال در مرجع [19])، نحوه‌ی ساخت و تولید، (برای نمونه در مرجع [6])، بررسی اثرات مختلف از جمله دما (به عنوان مثال مرجع [20]) و بررسی مدارهای الکترونیکی خروجی (برای مثال در مرجع [21])، تقسیم‌بندی نمود. بدلیل کاربرد وسیع و مزایای منحصر بفرد این فشارسنج‌ها شرکت‌های فعال در زمینه‌ی سیستم‌های الکترومکانیکی از جمله موتورولا² بر اساس مطالعات وسیع انجام گرفته اقدام به ساخت نمونه‌های صنعتی نموده‌اند.

با توجه به اهمیت موضوع و کاربردهای وسیع، در این مقاله به بررسی تحلیلی و تجربی یک پکیج فشارسنج میکروالکترومکانیکی از نوع پیژومقاومتی پرداخته شده است. این پکیج فشارسنج شامل یک حسگر میکروالکترومکانیکی، برد مدار چاپی، نمایشگر خازنی می‌باشد. در ابتدا، مدل‌سازی ریاضی به‌منظور مشخص نمودن پارامترهای مهم و موثر بر حساسیت ارائه شده است. سپس مدل کامپیوتری با استفاده از نرم‌افزار کامسول³ که بر اساس تحلیل اجزاء محدود می‌باشد، ارائه شده و بدین ترتیب مقادیر خروجی ولتاژ و حساسیت حسگر فشار میکروالکترومکانیکی پیژومقاومتی محاسبه شده است. عنصر مقاومتی در نظر گرفته شده روی دیافراگم از نوع ضربدری⁴ می‌باشد که این عنصر توسط شرکت موتورولا مورد استفاده قرار گرفته شده است. علاوه بر تحلیل استاتیکی و مودال دیافراگم این حسگر فشارسنج، اثرات پارامترهای مختلف هندسی بر روی ولتاژ خروجی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با تغییر ابعاد و موقعیت عنصر مقاومتی روی دیافراگم و ابعاد و ضخامت دیافراگم، حساسیت حسگر تغییر می‌یابد. سپس، با ساخت برد مدار چاپی و تعبیه نمودن اجزا بر روی آن، پکیج نهایی تهیه شده و مورد تست آزمایشگاهی قرار گرفته است. همچنین چگونگی طراحی میکرو کنترلر و سایر اجزای این مدار در ادامه این مقاله تشریح شده است. در انتها، نتایج حاصل از کار آزمایشگاهی و کالیبراسیون آن ارائه شده است.

2- مدل‌سازی فشارسنج پیژومقاومتی

2-1- مدل‌سازی ریاضی

2-1-1- جهات اصلی در ویفر سیلیسیم

2- Motorola
3- COMSOL
4- Xducer

1- Micro-electro-mechanical systems (MEMS)

2-1-3 معادلات ساختاری حاکم بر سیلیسیم

به‌طور کلی رابطه تنش و کرنش در مواد با رابطه (3) تعریف می‌شود.

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} \quad (3)$$

در آن T نشان دهنده ماتریس تنش و S نشان دهنده ماتریس کرنش مواد می‌باشد. با توجه به تقارن کریستال سیلیسیم تعداد ضرایب به 3 ضریب مستقل کاهش می‌یابد که در رابطه (4) بیان شده است.

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} \quad (4)$$

در رابطه (4)، مقدار ضرایب برای سیلیسیم $C_{11} = 166 \text{ GPa}$ ، $C_{12} = 64 \text{ GPa}$ و $C_{44} = 80 \text{ GPa}$ می‌باشد [9]. با توجه به قانون اهم، رابطه میدان الکتریکی و جریان برای سه بعد مطابق رابطه (5) می‌باشد [9]:

$$E_i = \rho_{ij} j_j \quad (5)$$

رابطه (5) در فرم ماتریسی به صورت $\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_1 & \rho_6 & \rho_5 \\ \rho_6 & \rho_2 & \rho_4 \\ \rho_5 & \rho_4 & \rho_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix}$ می‌باشد.

در رابطه (5) ماتریس ρ ماتریس مقاومت الکتریکی و i ماتریس جریان الکتریکی می‌باشد. با در نظر گرفتن خطی بودن خواص پیرو مقاومتی (که با توجه به کرنش کم ماده فرض درستی است) رابطه بین ضرایب پیرو مقاومت و مقادیر تنش به شکل رابطه (6) می‌باشد [9]:

$$\rho_{ij} = \rho_{ij}^0 + \pi_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (6)$$

که در آن ρ_{ij}^0 مقاومت الکتریکی برای سیلیکون در حالتی که هیچ‌گونه تنشی بر آن وارد نمی‌شود و π_{ijkl} تانسور پیرو مقاومت می‌باشد. به‌شکل ماتریسی مطابق رابطه (7) بیان می‌شود:

$$\frac{1}{\rho} \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ \rho_4 \\ \rho_5 \\ \rho_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \quad (7)$$

با توجه به روابط بالا و با ترکیب آن‌ها رابطه بین میدان الکتریکی و تنش

به‌طور کلی، در صنعت ساخت ترانزیستورها، استفاده از ویفر (100) به علت عیوب کم بین سیلیسیم و دی‌اکسیدسیلیسیم رایج می‌باشد. همانطور که قبلاً اشاره شد، سیلیسیم را براساس میزان ناخالصی آن به دو دسته n و p تقسیم بندی می‌کنند که با تغییر مقدار ناخالصی در سیلیسیم مقدار رسانایی و خواص الکتریکی آن تغییر می‌یابد. از آنجایی که سیلیسیم در گروه چهارم جدول تناوبی است در صورتی که با اتم دیگری از گروه سوم جدول تناوبی ناخالص شود، سیلیسیم به نوع p تبدیل می‌شود و اگر با مواد گروه پنجم جدول تناوبی این فرآیند ناخالصی صورت گیرد، سیلیسیم از نوع n می‌باشد. معمولاً در حسگرهای طراحی شده، دیافراگم را از سیلیسیم نوع n انتخاب می‌کنند و عنصرمقاومتی را از سیلیسیم نوع p بر می‌گزینند. در حسگر طراحی شده از ویفر (100) سیلیسیم استفاده شده که جهت آن مطابق شکل 1 نمایش داده می‌شود [9].

از آنجایی که قسمت اصلی فشارسنج به‌منظور حس فشار، دیافراگم می‌باشد، تحلیل ریاضی این حسگر مستلزم آن است که معادلات حاکم بر دیافراگم مورد بررسی قرار گیرد.

2-1-2 معادلات حاکم بر دیافراگم

در تحلیل دیافراگم این حسگر، از تئوری کلاسیک ورق‌ها استفاده می‌شود. در تئوری ورق‌ها معادله دیافراگم با توجه به کرنش‌ها و تنش‌های تولید شده به صورت رابطه (1) می‌باشد [9].

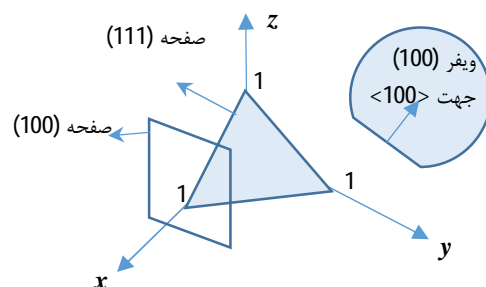
$$\frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial y^4} = \frac{P}{D} \quad (1)$$

که در آن w مقدار خیز ورق، P فشار وارده بر دیافراگم و مقدار $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ می‌باشد. مقادیر E ، ν و h به ترتیب عبارتند از مدول یانگ دیافراگم، ضریب پواسون و ضخامت دیافراگم می‌باشد.

حل معادله ارائه شده در رابطه (1) برای شکل‌های هندسی مختلف و شرایط مرزی‌های مختلف، متفاوت است. دیافراگم مورد تحلیل در حسگر طراحی شده به شکل مربع مستطیل می‌باشد که چهار ضلع آن به صورت گیردار مقید شده است. حل‌های تحلیلی مختلفی برای این شرایط مرزی ارائه شده که در این مقاله تابع شکل دیافراگم مطابق رابطه (2) تعریف می‌شود [9].

$$w(x,y) = \frac{c_1}{4} [1 + \cos(\frac{2\pi x}{a})][1 + \cos(\frac{2\pi y}{a})] \quad (2)$$

که در آن a طول یا عرض دیافراگم می‌باشد و c_1 مقدار خیز دیافراگم در نقطه $x=0$ ، $y=0$ می‌باشد.



شکل 1 جهت مختلف در ویفر سیلیسیم

به‌شکل رابطه (8) به‌دست می‌آید:

$$\begin{aligned} E_1 &= \rho^0 i_1 + \rho^0 \pi_{11} \sigma_1 i_1 + \rho^0 \pi_{12} (\sigma_2 + \sigma_3) i_1 + \rho^0 \pi_{44} (i_2 \tau_{12} + i_3 \tau_{13}) \\ E_2 &= \rho^0 i_2 + \rho^0 \pi_{11} \sigma_2 i_2 + \rho^0 \pi_{12} (\sigma_1 + \sigma_3) i_2 + \rho^0 \pi_{44} (i_1 \tau_{12} + i_3 \tau_{23}) \\ E_3 &= \rho^0 i_3 + \rho^0 \pi_{11} \sigma_3 i_3 + \rho^0 \pi_{12} (\sigma_1 + \sigma_2) i_3 + \rho^0 \pi_{44} (i_1 \tau_{13} + i_2 \tau_{23}) \end{aligned} \quad (8)$$

به‌منظور به‌دست آوردن رابطه میدان الکتریکی در جهات مختلف می‌بایست جهت <100> به جهت <110> انتقال یابد که این امر با ماتریس‌های انتقال محقق می‌شود. رابطه‌ی انتقال یافته میدان الکتریکی به شکل رابطه (9) است.

$$\begin{aligned} E'_1 / \rho^0 &= i'_1 [1 + \pi'_{11} \sigma'_1 + \pi'_{12} \sigma'_2] + i'_2 [\pi'_{11} \sigma'_1 + \pi'_{12} \sigma'_2] \\ E'_2 / \rho^0 &= i'_2 [1 + \pi'_{21} \sigma'_1 + \pi'_{11} \sigma'_2] + i'_1 [\pi'_{11} \sigma'_1 + \pi'_{12} \sigma'_2] \\ E'_3 / \rho^0 &= i'_3 \end{aligned} \quad (9)$$

که در رابطه (9) π'_{11} و π'_{12} عبارتست از:

$$\begin{aligned} \pi'_{11} &= \pi_{11} + 2(\pi_{44} + \pi_{12} - \pi_{11})(l_1^2 m_1^2 + l_1^2 n_1^2 + m_1^2 n_1^2) \\ \pi'_{12} &= \pi_{12} - (\pi_{44} + \pi_{12} - \pi_{11})(l_1^2 l_2^2 + n_1^2 n_2^2 + m_1^2 m_2^2) \end{aligned} \quad (10)$$

برای هر المان حسگر می‌توان ضرایب طولی و عرضی را به‌دست آورد که این ضرایب به‌شکل رابطه (11) است [9].

$$\begin{aligned} \pi_L &= \pi'_{11} = \pi_{11} + 2(\pi_{44} + \pi_{12} - \pi_{11})(l_1^2 m_1^2 + l_1^2 n_1^2 + m_1^2 n_1^2) \\ \pi_t &= \pi'_{12} = \pi_{12} - (\pi_{44} + \pi_{12} - \pi_{11})(l_1^2 l_2^2 + n_1^2 n_2^2 + m_1^2 m_2^2) \end{aligned} \quad (11)$$

ضرایب L و t برای تنش طولی و عرضی انتخاب شده است که با توجه به محور المان حسگر انتخاب می‌شوند. همچنین عبارات l_1, m_1, n_1 و l_2, m_2, n_2 کسینوس‌های هادی راستای طولی و عرضی عنصرمقاومتی با محورهای مختصات کریستال سیلیسیم می‌باشد.

با توجه به روابط بالا رابطه بین تنش و تغییرات مقاومت عنصر مقاومتی به‌شکل رابطه (12) می‌باشد:

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_L \sigma_L + \pi_t \sigma_t \quad (12)$$

در بسیاری از حسگرهای میکروالکترومکانیکی، عنصر پیرومقاومتی در راستای <110> قرار دارد در صورتی‌که ویفر سیلیسیمی آن ویفر <100> می‌باشد بدین منظور ضرایب پیرو مقاومت برای این حالت به‌صورت

$$\pi_{L,110} = \frac{1}{2}(\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44}) \quad \text{و} \quad \pi_{t,110} = \frac{1}{2}(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})$$

ضرایب پیرومقاومتی به میزان ناخالصی سیلیسیم وابسته است که در جدول 1 ارائه شده است. از آن جایی‌که این ضرایب با افزایش دما تغییر کرده (کم می‌شوند) با افزایش میزان ناخالصی سیلیسیم می‌توان اثرات تغییر دما را کاهش داد.

با توجه به مقادیر تحلیلی به‌دست آمده در بالا می‌توان با تشکیل مدار پل وتسون برای عنصرمقاومتی موجود بر روی صفحه سیلیسیمی، مقدار ولتاژ

تولید شده در اثر اعمال فشار را به‌دست آورد.

فشارسنج مدل ضربدری، یک نمونه از فشارسنج‌های میکروالکترومکانیکی می‌باشد که اساس کار آن از نوع پیرومقاومتی است. هندسه‌ی دیافراگم این فشارسنج به‌صورت مربعی می‌باشد که از جنس سیلیکن نوع n بوده و نوع عنصرمقاومتی نیز از جنس سیلیکن نوع p می‌باشد که به‌صورت یک تکه و ضربدری در راستای 45 درجه بر روی لبه دیافراگم مطابق شکل 2 قرار گرفته شده است.

با توجه به مطالب ارائه شده در بخش تعریف صفحات و کریستال سیلیسیم، جهت سیلیسیم در لبه‌ها <110> می‌باشد و جهت عنصر پیرومقاومتی با چرخش 45 درجه در راستای <100> خواهد بود. با توجه به جهت عنصر مقاومتی معادلات میدان الکتریکی از رابطه (13) به‌دست می‌آید [9].

$$\begin{aligned} E_1 &= \rho^0 i_1 + \rho^0 \pi_{11} \sigma_1 i_1 + \rho^0 \pi_{12} (\sigma_2) i_1 \\ E_2 &= \rho^0 \pi_{44} i_1 \tau_{12} \\ E_3 &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

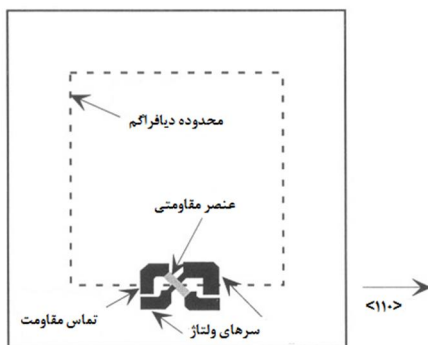
در رابطه (13)، معادلات مربوط به میدان الکتریکی با فرض تنش صفر در راستای 3 (بدلیل تنش صفحه‌ای دیافراگم) و وجود جریان در راستای 1، ارائه شده‌اند. بر این اساس، مقدار ولتاژ با انتگرال‌گیری از روابط (13) در طول عنصرمقاومتی با رابطه (14) بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \left\{ \begin{aligned} V_1 &= \int E_1 dl \approx \rho^0 i_1 L_r \\ V_2 &= \int E_2 d2 = \rho^0 \pi_{44} \tau_{12} i_1 W_r \end{aligned} \right. \\ \rightarrow \frac{V_2}{V_1} &= \pi_{44} \tau_{12} \frac{W_r}{L_r} \end{aligned} \quad (14)$$

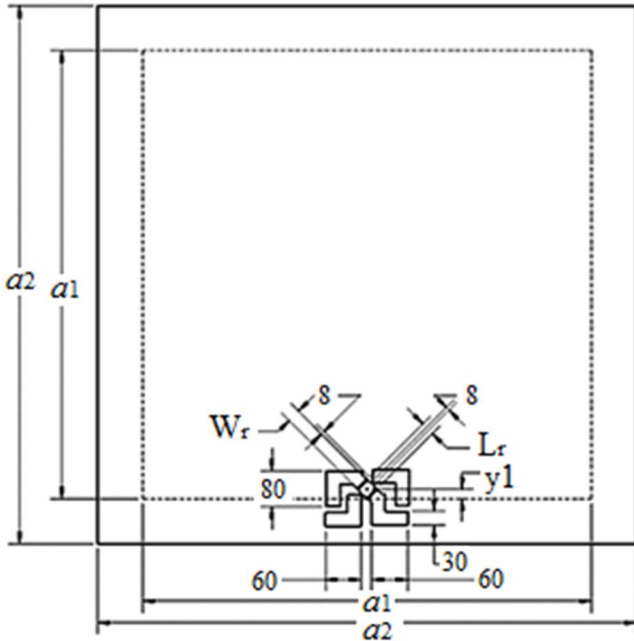
با توجه به رابطه بالا، اختلاف ولتاژ دو سر عنصرمقاومتی با ابعاد آن، ضریب 44 پیرومقاومت π_{44} و تنش برشی τ_{12} دیافراگم بستگی دارد. تنش برشی با استفاده از روش انرژی و همچنین مقادیر جابه‌جایی دیافراگم که در قبل ارائه شد قابل محاسبه است.

جدول 1 مقادیر ضرایب پیرومقاومتی ویفر سیلیسیم <100> [9]

نوع	مقاومت	π_{11}	π_{12}	π_{44}
واحد	$\Omega - \text{cm}$	10^{-11} Pa^{-1}	10^{-11} Pa^{-1}	10^{-11} Pa^{-1}
نوع n	11/7	-102/2	53/4	-13/6
نوع p	7/8	6/6	-1/1	138/1



شکل 2 نمایش شماتیک مدل پیرومقاومت ضربدری [9]



شکل 3 نمایش شماتیک مدل فشارسنج مدل‌سازی شده (ابعاد بر حسب میکرومتر)

شده از سیلیسیم نوع n می‌باشد، درحالی که جنس پیرومقاومت همرا با کانکتورهای آن، سیلیسیم نوع p می‌باشد. شایان ذکر است که میزان ناخالصی بر روی لایه پیرومقاومت به میزان $1/32 \times 10^9$ بر سانتی متر مکعب و چگالی ناخالصی بر روی کانکتورها، $1/45 \times 10^{10}$ بر سانتی متر مکعب تعریف شده است. همچنین فرض می‌شود، که لبه‌های دیافراگم تا a_2 به‌صورت درگیر می‌باشد.

از چهار کانکتور موجود، دو به دو کانکتورهای روبروی هم جهت انتقال جریان و اعمال ولتاژ به عنصر پیرومقاومتی، در نظر گرفته می‌شود. از دو کانکتور روبروی هم به یکی ولتاژ 3 ولت و دیگری را متصل به زمین تعریف می‌شود. اختلاف ولتاژ دو کانکتور دیگر را به عنوان ولتاژ خروجی خوانده می‌شود. بدین ترتیب مدار پل وتسون شکل می‌گیرد.

نتایج مربوط به تحلیل این فشارسنج پیرومقاومتی مدل ضربدری در ادامه آورده شده است. در شکل 4، میزان و چگونگی جابه‌جایی دیافراگم مربعی شکل تحت فشار 100 کیلوپاسکال نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، حداکثر جابه‌جایی دیافراگم در وسط آن و به میزان $1/223$ میکرومتر می‌باشد. از آن جا که تنش برشی صفحه‌ای با توجه به معادلات ریاضی حاکمه بر مسئله نقش تعیین کننده‌ای بر ولتاژ خروجی این نوع از فشارسنج پیرومقاومتی دارد، می‌بایست توزیع آن مورد بررسی قرار گیرد. از این رو در شکل 5 نیز توزیع تنش برشی داخل صفحه ناشی از این بار بر روی صفحه در سرتاسر دیافراگم و بر روی لبه‌های آن نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، حداکثر مقدار این مولفه از تنش بر روی وسط لبه‌ها می‌باشد که مقدار آن برابر $38/43$ مگاپاسکال است. از این رو وسط لبه‌های دیافراگم مکان مناسبی برای نصب پیرومقاومت مورد نظر است. به‌منظور تحلیل رفتار ارتعاشی این دیافراگم، نتایج حاصل از تحلیل مودال دیافراگم در این‌جا ارائه شده است. بر این اساس، فرکانس اول 270kHz ، فرکانس دوم 550kHz ، فرکانس سوم 786kHz حاصل شده‌اند. همچنین شکل مودهای نظیر هر یک در شکل 6 ترسیم شده است.

با فرض اینکه جابه‌جایی دیافراگم با رابطه (2) بیان شود، C_1 از رابطه (15) به‌دست می‌آید.

$$C_1 = \frac{3(1-\nu^2)a^4}{2\pi^4 E h^3} P \quad (15)$$

همچنین تنش در جهت x و y بر روی لبه دیافراگم با رابطه (16) بیان می‌شود [9].

$$\sigma_x = \frac{6M_x}{h^2}, \quad \sigma_y = \frac{6M_y}{h^2} \quad (16)$$

که در آن ضخامت دیافراگم و M_x و M_y به ترتیب عبارتند از برآیند گشتاور خمشی در راستای x و y که از رابطه (17) محاسبه می‌شوند.

$$M_x = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right),$$

$$M_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (17)$$

با توجه به فرارگیری عنصر مقاومتی در مختصات $(x=0, y=-a/2)$ و از آنجایی که مقدار ضریب پواسون در راستای $\langle 110 \rangle$ برابر است با $0/06$ مقدار تنش برشی با استفاده از مولفه‌های تنش عمودی داده شده در رابطه (16) از طریق رابطه (18) محاسبه می‌شود.

$$\tau_{12} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} = 0.07143 \left(\frac{a}{h} \right)^2 P \quad (18)$$

با توجه به رابطه‌ی (14)، نسبت بین ولتاژها از رابطه (19) به‌دست می‌آید.

$$\frac{V_2}{V_1} = (0.0984 \times 10^{-9}) \left(\frac{a}{h} \right)^2 \left(\frac{W_r}{L_r} \right) P \quad (19)$$

از رابطه (19) می‌توان نتیجه گرفت که ولتاژ خروجی (V_2) نسبت خطی با نسبت عرض به طول عنصر مقاومتی دارد و با توان دوم نسبت طول ورق به ضخامت آن رابطه مستقیم دارد. همچنین این ولتاژ با فشار وارده بر دیافراگم رابطه مستقیم دارد. شایان ذکر است که این روابط تا زمانی که دیافراگم دچار تغییر شکل بزرگ نشده است، برقرار می‌باشد. اگر فشار وارده از یک حد فراتر رود، دیگر فرض تغییر شکل‌های کوچک صحیح نمی‌باشد و از این رو رابطه (19) برقرار نخواهد بود.

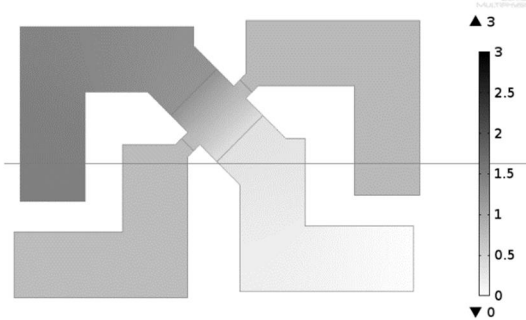
2-2- مدل‌سازی کامپیوتری

به‌منظور مدل‌سازی کامپیوتری، این نوع فشارسنج از نرم‌افزار کامسول¹ استفاده شده است. در ابتدا، مطابق شکل 3 یک ورق مربعی با ابعاد مشخص $(a_1$ در $a_1)$ به مقدار $1000\mu\text{m}$ و ضخامت $20\mu\text{m}$ به‌صورت یک دیافراگم در نرم‌افزار تعریف می‌شود. سپس عنصر مقاومتی ضربدری نیز با ابعاد مشخص بر روی دیافراگم در نرم‌افزار تعریف می‌شود. جنس دیافراگم در نظر گرفته

به‌منظور بررسی چگونگی توزیع میدان الکتریکی در پیرومقاومت و کانکتورها در شکل 7 این توزیع در اثر اعمال فشار 100 کیلوپاسکال نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در کانکتورها بدلیل ناخالصی بالا، تغییرات ولتاژ بسیار ناچیز می‌باشد، چرا که مقاومت آن‌ها در مقایسه با پیرومقاومت بخاطر میزان ناخالصی تقریباً 10 برابر آن، بسیار کم می‌باشد.

به‌منظور بررسی تغییرات ولتاژ خروجی بر حسب فشار اعمالی در این فشارسنج پیرومقاومتی، بارهای مختلفی بر روی صفحه (دیافراگم) اعمال شده است. این فشار از 0 تا 300 کیلوپاسکال اعمال شده و ولتاژ خروجی آن مورد محاسبه قرار گرفته شده است. نتایج حاصل از این تغییرات در شکل 8 نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تغییرات به‌صورت خطی می‌باشد. به‌طوری که در فشار 0 کیلوپاسکال ولتاژ خروجی در حدود صفر (0/259 میلی‌ولت) می‌باشد و با افزایش فشار، ولتاژ خروجی با شیب ثابت 0/598 افزایش می‌یابد. (میزان حساسیت 0/598 mV/kPa می‌باشد).

اثرات پارامترهای هندسی فشارسنج مقاومتی از جمله نسبت پهنا به طول عنصرمقاومتی و نسبت عرض به ضخامت دیافراگم مربعی، بر روی ولتاژ خروجی مورد بررسی قرار گرفته شده و نتایج آن در جدول 2 و 3 آورده شده است. مطابق با رابطه (19)، این دو نسبت سهم مهمی در میزان ولتاژ خروجی و به عبارت دیگر حساسیت حسگر دارند. همانطور که در جدول 2 مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت عرض به ضخامت دیافراگم، ولتاژ خروجی بیشتر می‌شود. همچنین، تغییرات این ولتاژ بر حسب این نسبت، با توان دوم آن مطابق روابط ریاضی حاکم (رابطه 19)، رابطه خطی دارد. البته افزایش بیش از اندازه این نسبت سبب می‌شود تا تنش‌های وارد بر دیافراگم بشکل قابل توجهی افزایش یابد و دیافراگم دچار واماندگی شود. همچنین سبب می‌شود تا جابه‌جایی‌ها بزرگ شود و از این رو تحلیل‌ها و جواب‌های حاصله غیرخطی شود که برای طراحی مناسب نمی‌باشد. علاوه بر آن، همانطور که در جدول 3 مشاهده می‌شود، هرچه نسبت پهنا به طول پیرومقاومت کاهش می‌یابد، میزان ولتاژ خروجی بازای یک فشار مشخص کاهش می‌یابد. با توجه به آن که رابطه (19) بیانگر آن است که ولتاژ خروجی با نسبت پهنا به طول عنصرمقاومتی رابطه خطی دارد، اما نتایج برای این نسبت دقیقاً خطی نمی‌باشد. علت اصلی آن است که رابطه (19) یک رابطه تقریبی است که با فرض ثابت بودن تنش برشی در محدوده قرارگیری عنصر پیرومقاومت ارائه شده در حالی که تنش برشی در این محدوده تغییر می‌کند.

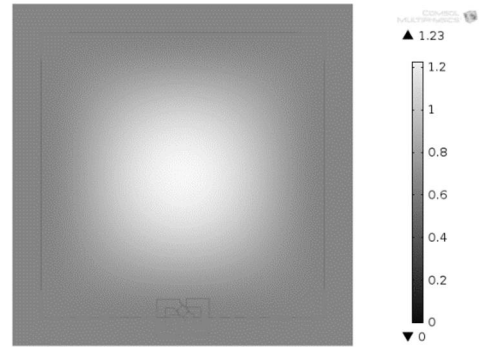


شکل 7 توزیع میدان الکتریکی در کانکتورها و عنصر مقاومتی بر حسب ولت

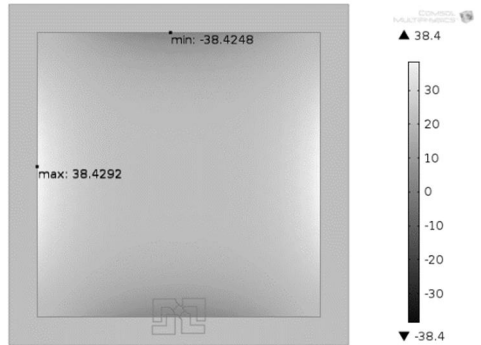
جدول 2 میزان ولتاژ خروجی به ازای فشار 100 کیلوپاسکال بر حسب تغییرات نسبت

عرض به ضخامت دیافراگم برای $W/L_r = 1$ (بر حسب میلی‌ولت)

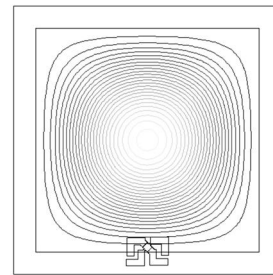
a/h	60	50	40
V_2	88/38	59/53	36/39



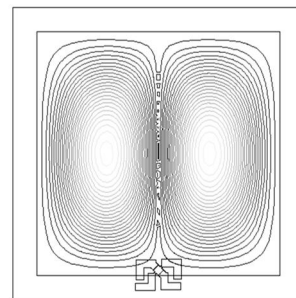
شکل 4 جابه‌جایی دیافراگم تحت فشار 100 کیلوپاسکال (بر حسب میکرومتر)



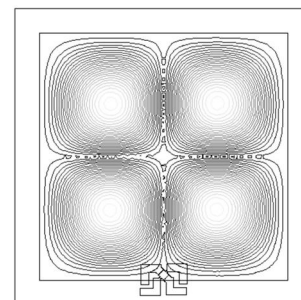
شکل 5 توزیع تنش برشی صفحه‌ای بر روی دیافراگم (بر حسب مگاپاسکال)



(الف)



(ب)



(ج)

شکل 6 شکل مودهای مود (الف) اول، (ب) دوم (ج) سوم

حسگر 4/889 ولت می‌شود. بنابراین ورودی مدار می‌بایست قدرت اندازه‌گیری ولتاژ 0 تا 5 ولت را داشته باشد. با توجه به تغییرات کم ولتاژ به ازای تغییرات فشار ورودی مدار می‌بایست از دقت خوبی برخوردار باشد. برای اندازه‌گیری تغییرات ولتاژ و نمایش آن به صورت دیجیتال نیاز به یک مبدل آنالوگ به دیجیتال (ADC) می‌باشد، مبدل انتخاب شده یک مبدل آنالوگ به دیجیتال از نوع سیگما دلتا به دقت 24 بیت و ضریب تقویت قابل برنامه‌ریزی با رابط سریال SPI ساخته شرکت آنالوگ دیوایس¹ به شماره AD7714 می‌باشد (شکل 10). ورودی این مبدل به صورت دیفرانسیلی بوده و برای اندازه‌گیری ولتاژ پل وتسون بهینه می‌باشد.

برای بهینه‌سازی مدار و نمایش دما از یک حسگر دمای دیجیتال با رابط سریال I2C به شماره LM75 استفاده می‌شود. برای نمایش مقادیر از یک نمایشگر رنگی از نوع TFT به اندازه 3/2 اینچ بزرگنمایی 320 در 240 پیکسل استفاده شده است. برای اعمال تنظیمات از یک نمایشگر لمسی مقاوتی به اندازه 3/2 اینچ به همراه یک درایور لمسی استفاده شده است. به عنوان پردازشگر و قلب مدار به یک میکرو کنترلر نیاز است که میکرو کنترلر ARM به شماره LPC1768 ساخت شرکت NXP انتخاب شده است.

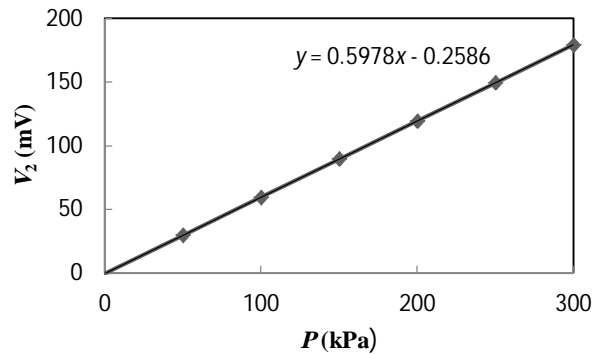
عملکرد کلی مدار به این صورت است که میکروکنترلر در ابتدا تنظیمات مربوط به ADC را انجام داده و فرمان‌های حذف آفست و کالیبراسیون را از طریق رابط SPI به مبدل آنالوگ به دیجیتال می‌دهد. بعد از این کار پیکربندی نمایشگر تماسی صورت می‌گیرد. سپس مقادیر تبدیل شده از ADC و همچنین مقدار حسگر دما را خوانده و پس از محاسبه فشار از طریق مقادیر از قبل کالیبره شده که به صورت دستی به برنامه وارد شده مقدار حسگر فشار، حسگر دما و ولتاژ ورودی مبدل را بر روی نمایشگر نمایش می‌دهد. در قسمتی از برنامه مقدار حسگر همواره با مقدار از قبل مشخص شده مقایسه شده و در صورت بیشتر بودن مقدار حسگر از مقدار تعیین شده یک رله وصل می‌شود و در صورت کمتر شدن مقدار حسگر از مقدار تعیین شده دوباره رله قطع می‌شود.

تغذیه ورودی مدار 12 ولت بوده و برای قسمت‌های مختلف مدار نیاز به ولتاژهای خاصی می‌باشد. ولتاژ 12 ولت ورودی با استفاده از یک رگولاتور سوئیچینگ با فرکانس کلید زنی 40 کیلوهرتز و با تپولوژی باک به ولتاژ 5 ولت با حداکثر جریان دهی 3 آمپر تبدیل می‌شود. شماره فنی این رگولاتور LM2576 می‌باشد. با توجه به سوئیچینگ بودن این قسمت از مدار راندمان این قسمت از مدار در بیش از 80% بوده پس توان تلف شده بسیار پایینی دارد.

تغذیه مبدل آنالوگ به دیجیتال 5 ولت بوده و مستقیماً از خروجی رگولاتور سوئیچینگ تامین می‌شود. تغذیه نمایشگر، میکرو و سایر قسمت‌ها 3/3 ولت بوده از طریق رگولاتور خطی به شماره LM1117 تامین می‌شود. حداکثر جریان خروجی این رگولاتور 800 میلی‌آمپر می‌باشد که با توجه به توان مصرفی مدار کافی می‌باشد.

برای رفرنس مبدل آنالوگ به دیجیتال نیاز به یک ولتاژ 2/5 ولت با دقت بالا می‌باشد که از طریق رگولاتور ولتاژ رفرنس به شماره TL431 تامین می‌شود. تفاوت این رگولاتور با رگولاتورهای معمولی در ثبات بالای حرارتی و جریان دهی کم می‌باشد.

کریستال مدار برای ایجاد کلاک مورد نیاز میکرو 12 مگاهرتز انتخاب شده که از طریق ضرب‌کننده داخلی میکرو (PLL) به فرکانس 100 مگاهرتز



شکل 8 تغییرات ولتاژ خروجی (بر حسب میلی‌ولت) بر حسب فشار اعمالی (بر حسب کیلوپاسکال)

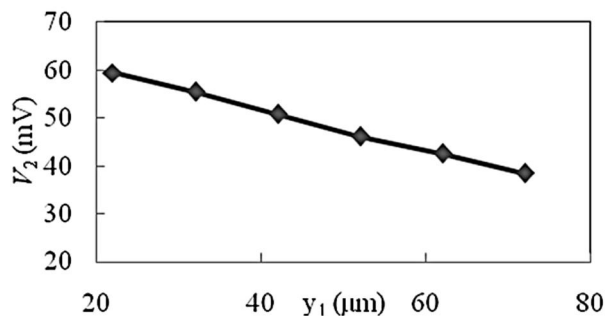
جدول 3 میزان ولتاژ خروجی به ازای فشار 100 کیلوپاسکال بر حسب تغییرات نسبت طول به عرض عنصر مقاوتی برای $a/h=50$ (بر حسب میلی‌ولت)

1	0/5	0/25	0/2	W/L_r
59/53	49/99	29/84	24/49	V_2

در انتها، اثر موقعیت عنصر مقاوتی یا پیرومقاومت از لبه دیافراگم (y_1) بر روی ولتاژ خروجی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحلیل در شکل 9 نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با دور نمودن پیرومقاومت از لبه دیافراگم و حرکت به سمت مرکز ولتاژ خروجی کاهش می‌یابد. از این رو موقعیت اولیه آن در لبه دیافراگم در مقایسه با بقیه موارد موقعیت مناسبی می‌باشد. چرا که بیشترین مقدار ولتاژ خروجی بدلیل بیشینه بودن تنش برشی داخل صفحه در این موقعیت حاصل می‌شود.

3- طراحی و ساخت پکیج فشارسنج میکروالکترومکانیکی پیرومقاومتی

در این قسمت به تشریح مدار خروجی و در نهایت پکیج فشارسنج خروجی ساخته شده، پرداخته شده است. حسگر فشار استفاده شده از نوع حسگر پیرومقاومتی ساخت شرکت موتورولا می‌باشد که از یک المان حسگر ضربه‌ری ساخت شده است با توجه به مدار وتسون، خروجی حسگر از جنس ولتاژ می‌باشد. حداکثر فشار قابل اندازه‌گیری با این حسگر برابر 600 کیلوپاسکال می‌باشد. با توجه به مشخصات ارائه شده از طرف شرکت موتورولا حداکثر ولتاژ خروجی حسگر 4/48 ولت است که با اضافه کردن حداکثر ولتاژ آفست حسگر که برابر 409 میلی‌ولت است مقدار حداکثر خروجی واقعی



شکل 9 تغییرات ولتاژ خروجی (بر حسب میلی‌ولت) بر حسب فاصله‌ی پیرومقاومت از لبه دیافراگم (بر حسب میکرومتر)

1- Analog Device

در تست انجام شده از سیال هوا به عنوان سیال عامل استفاده شده که با اعمال آن توسط دستگاه مرجع و نتایج خوانده شده از پکیج فشارسنج میکروالکترومکانیکی می‌توان میزان خطای پکیج را به دست آورد. نتایج حاصل از آزمایش و همچنین میزان خطای تولید شده در جدول 4 و 5 آورده شده است:

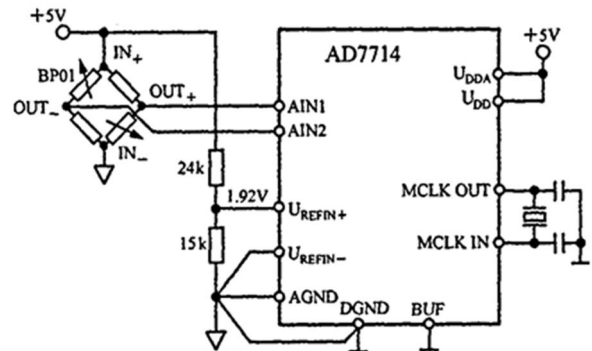
جدول 4 نتایج حاصل از تست فشار و کالیبراسیون پکیج فشارسنج حین بارگذاری

شماره	فشار مرجع (kPa)	فشار دستگاه طراحی شده (kPa)	خطا (%)	عدم قطعیت (±%)
1	10	10/2	0/03	
2	35	35/6	0/10	
3	60	60/3	0/05	
4	100	100/6	0/00	
5	125	124/5	-0/08	
6	150	149/5	-0/08	
7	175	175/2	0/03	
8	200	200/0	0/00	
9	225	225/3	0/05	
10	250	249/8	-0/03	
11	275	276/2	0/20	
12	300	301/5	0/25	0/53
13	325	326/6	0/27	
14	350	351/7	0/28	
15	375	376/4	0/23	
16	400	401/9	0/32	
17	425	427/0	0/33	
18	450	451/9	0/32	
19	475	477/0	0/33	
20	500	502/5	0/42	
21	525	527/7	0/45	
22	550	552/6	0/43	
23	575	577/9	0/48	
24	600	602/5	0/42	

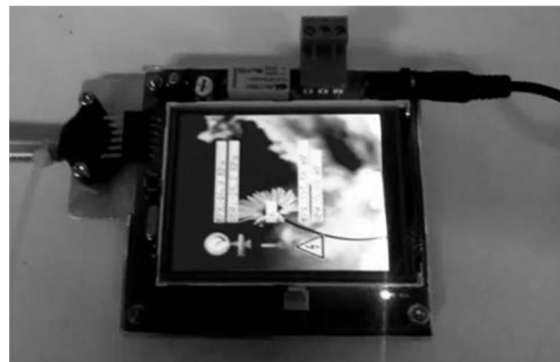
می‌رسد. تمامی خازن‌های الکترولیت مدار از نوع سالیید¹ انتخاب شده که دارای طول عمر بالا و جریان نشتی (ESD) فوق العاده پایین می‌باشند. سایر خازن‌ها از جنس تانتالیوم بوده که دارای دقت و عمر بالا می‌باشند. شایان ذکر است که برد مدار از جنس فایبر گلاس و به صورت متالیزه و PCB مدار دولایه می‌باشد. در نهایت پکیج این فشارسنج میکروالکترومکانیکی پیژومقاومتی مطابق شکل 11 حاصل شده است.

4- تست آزمایشگاهی پکیج فشارسنج میکروالکترومکانیکی

به منظور تست پکیج فشار سنج و همچنین کالیبراسیون آن از یک دستگاه فشار مرجع مطابق شکل 12 استفاده شده است.



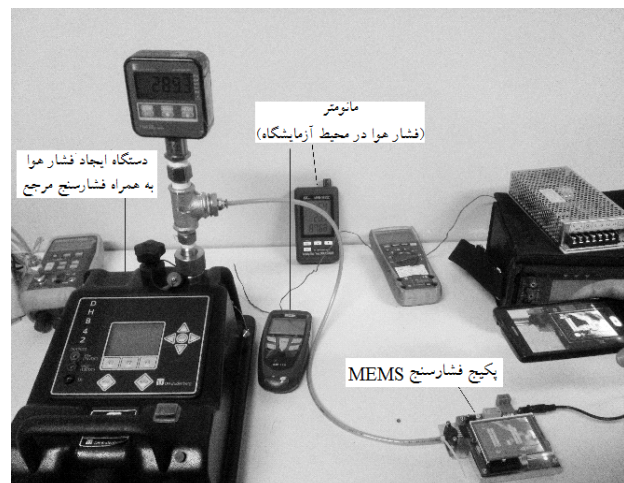
شکل 10 مدار شماتیک مبدل آنالوگ به دیجیتال



شکل 11 پکیج فشارسنج میکروالکترومکانیکی پیژومقاومتی طراحی شده

جدول 5 نتایج حاصل از تست فشار و کالیبراسیون پکیج فشارسنج حین باربرداری

شماره	فشار مرجع (kPa)	فشار دستگاه طراحی شده (kPa)	خطا (%)	عدم قطعیت (±%)
1	600	602/5	0/42	
2	550	552/6	0/43	
3	500	502/2	0/37	
4	450	452/1	0/35	
5	400	401/8	0/30	
6	350	351/5	0/25	
7	300	301/1	0/18	0/53
8	250	251/1	0/18	
9	200	201/1	0/18	
10	150	150/3	0/05	
11	100	100/7	0/12	
12	50	50/4	0/07	
13	10	10/0	0/00	



شکل 12 نحوه‌ی کالیبراسیون و تست پکیج فشارسنج

همانطور که مشاهده می‌شود درصد خطای تولید شده در مسیر افزایش فشار و در مسیر برگشت آن حداکثر 0/5 درصد می‌باشد و همچنین حداکثر فشار خوانده شده از پکیج فشارسنج میکروالکترومکانیکی 6 بار می‌باشد.

در صنایع پتروشیمی، مخازن ذخیره و تحت فشار مختلفی از انواع گازهای گوناگون مانند متانول وجود دارد که تحت فشار حداکثر 6 بار می‌باشند. برای مثال در شرکت پتروشیمی فن‌آورن مخازن ذخیره و تحت فشار مشخصی وجود دارد که فشار بخار بالای سیال در آن‌ها به‌منظور ملاحظات ایمنی می‌بایست به دقت مورد اندازه‌گیری قرار گیرد. از این رو، با توجه به الزامات موجود حداکثر خطای خواندن فشار در این مخازن نباید از 1 درصد فراتر رود. همچنین بخاطر تغییرات دمایی بالایی که در سایت‌های این صنایع وجود دارد، حسگرهای فشار بکار رفته در این مخازن نباید به این تغییرات حساسیت داشته باشند. با توجه به این توضیحات و نتایج به‌دست آمده از تست پکیج فشارسنج طراحی شده وابستگی پایین حسگرهای میکروالکترومکانیکی پیرومقاومتی می‌توان از این دستگاه به عنوان فشارسنج ثابت یا پرتابل در اندازه‌گیری فشار گاز مخازن ذخیره و مخازن تحت فشار و یا دستگاه عیب‌یاب در صنعت پتروشیمی فن‌آورن استفاده کرد. شایان ذکر است که هزینه ساخت این دستگاه در مقایسه با فشارسنج‌هایی با این دقت بسیار کمتر می‌باشد. از این رو از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر می‌باشد.

5- نتیجه‌گیری

از آن جا که اندازه‌گیری فشار سیالات در صنعت پتروشیمی از اهمیت بالایی برخوردار است بدین منظور در این مقاله به بررسی تحلیلی و تجربی یک پکیج فشارسنج میکروالکترومکانیکی پرداخته شده است. این پکیج فشارسنج از یک حسگر میکروالکترومکانیکی، برد مدار چاپی، نمایشگر خازنی تشکیل شده است. چگونگی مدل‌سازی حسگر فشار میکروالکترومکانیکی پیرومقاومتی به‌صورت ریاضی و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار کامسول در این مقاله تشریح شد. نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های انجام شده با نرم‌افزار کامسول و مدل‌سازی ریاضی نشان می‌دهد که با تغییر ابعاد عنصر مقاومتی و ابعاد دیافراگم می‌توان به یک حسگر با حساسیت مناسب دست یافت. همچنین نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که درصد خطای پکیج فشارسنج میکروالکترومکانیکی پیرومقاومتی طراحی شده حدودا 0/5 درصد می‌باشد. که با توجه به دقت دستگاه، حساسیت کم آن به تغییرات دمایی و پارامترهای اقتصادی و کاربردی (اندازه کوچک آن) می‌توان از آن در صنایع پتروشیمی استفاده نمود. شایان ذکر است که فشارسنج رایج در صنعت پتروشیمی که بتواند در محدوده فشاری مذکور کار کند دارای ابعاد و وزن بسیار بیشتر نسبت به فشارسنج طراحی شده، می‌باشد. از این پکیج می‌توان با توجه به الزامات طراحی در صنعت پتروشیمی در اندازه‌گیری فشار گاز مخازن ذخیره و مخازن تحت فشار پتروشیمی فن‌آوران استفاده نمود.

6- مراجع

- [1] K. W. Oh, C. H. Ahn, A review of microvalves, *Journal of Micromechanics and Microengineering* Vol. 16, No. 5, pp. 13-39, 2006.
- [2] F. Karpát, S. Ekwaro-Osire, M. P. Khandaker, Probabilistic Analysis of MEMS Asymmetric Gear Tooth, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 130, pp. 042306-042306, 2008.
- [3] Y.-C. Cheng, C.-L. Dai, C.-Y. Lee, P.-H. Chen, P.-Z. Chang, A MEMS micromirror fabricated using CMOS post-process, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 120, pp. 573-581, 2005.
- [4] A. A. S. Mohammed, W. A. Moussa, E. Lou, High-Performance Piezoresistive MEMS Strain Sensor with Low Thermal Sensitivity, *Sensors*, Vol. 11, pp. 1819-1846, 2011.
- [5] M. Rajavelu, D. Sivakumar, R. J. Daniel, K. Sumangala, Simulation of Perforated Diaphragms Employed Piezoresistive Pressure Sensor for Sensitivity Enhancement and Validation with Modified Analytical Model, *Procedia Engineering*, Vol. 38, pp. 3495-3508, 2012.
- [6] K. N. Bhat, M. M. Nayak, MEMS Pressure Sensors- An Overview of Challenges in Technology and Packaging, *Journal of Smart structures and systems*, Vol. 2, pp. 1-10, 2013.
- [7] C. S. Smith, Piezoresistance effect in germanium and silicon, *Physics Review*, Vol. 94, pp. 42-49, 1954.
- [8] H. E. Elgamel, Closed-form expressions for the relationships between stress, diaphragm deflection, and resistance change with pressure in silicon piezoresistive pressure sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 50, pp. 17-22, 1995.
- [9] S. D. Senturia, *Microsystem design*. London: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [10] S. K. Clark, K. D. Wise, "Pressure sensitivity in anisotropically etched thin-diaphragm pressure sensors," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-26, pp. 1887-1896, 1979.
- [11] Wen Hsiung Ko, Jaroslav Hynecj, S. F. Boettcher, Development of a Miniature Pressure Transducer for Biomedical Applications, *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-26, 1979.
- [12] K.-W. Lee, K. D. Wis, SENSIM: a simulation program for solid state pressure sensors, *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-29, pp. 34-41, 1982.
- [13] M. M. Z. Djuric, J. Matovic, R. Petrovic, Simicic, Experimental determination of silicon pressure sensor diaphragm deflection, *Sensors and Actuators A*, Vol. 24, pp. 175-179, 1990.
- [14] V. Musser, J. Suski, J. Goss, Piezoresistive pressure sensors based on polycrystalline silicon, *Sensors and Actuators A*, Vol. 28, pp. 113-132, 1991.
- [15] Y. Kanda, A. Yasukawa, Optimum design considerations for silicon piezoresistive pressure sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 62, pp. 539-542, 1997.
- [16] W. P. Eaton, J. H. Smith, Micromachined pressure sensors: review and recent developments, in *Proc. SPIE 3046, Smart Structures and Materials*, vol. 6, pp. 30-41, 1997.
- [17] L. Lin, H.-C. Chu, Y.-W. Lu, "A Simulation Program for the Sensitivity and Linearity of Piezoresistive Pressure Sensors," *Journal of microelectromechanical systems*, Vol. 8, pp. 514-522, 1999.
- [18] T. Toriyama, S. Sugiyama, Analysis of Piezoresistance in p-Type Silicon for Mechanical Sensors, *Journal of microelectromechanical systems*, Vol. 11, No. 5, pp. 598-604, 2002.
- [19] M. Rajavelu, D. Sivakumar, R. Joseph Daniel, K. Sumangala, Perforated diaphragms employed piezoresistive MEMS pressure sensor for sensitivity enhancement in gas flow measurement, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 35, pp. 63-75, 2014.
- [20] R. Otmani, N. Benmoussa, B. Benyoucef, The Thermal Drift Characteristics of Piezoresistive Pressure Sensor, *Physics Procedia*, Vol. 21, pp. 47-52, 2011.
- [21] J. Jordana, R. Pallàs-Areny, A simple, efficient interface circuit for piezoresistive pressure sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 127, pp. 69-73, 2006.