



Isıl Gerilmelerin MEMS Tabanlı Fabry-Pérot Optik Basınç Sensörünün Performansına Etkilerinin Araştırılması

Fikret Yıldız^{1*}

^{1*} Hakkari Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Hakkari, Türkiye, (ORCID: 0000-0003-4846-3998),
fikretyildiz@hakkari.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi XXXX ve Kabul Tarihi XXXX)

(DOI: 10.31590/ejosat.792956)

ATIF/REFERENCE: Yıldız, F. (2021). Isıl Gerilmelerin MEMS Tabanlı Fabry-Pérot Optik Basınç Sensörünün Performansına Etkilerinin Araştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (21), 572-580.

Öz

Bu çalışmada, Poly-Si ve Si₃Ni₄ malzemelerinden oluşan FPI (Fabry-Pérot Interferometer) diyaframları için ısıl gerilmelerin diyaframın hassasiyeti ve frekans cevabı üzerindeki etkileri teorik olarak incelenmiştir ve değerlendirilmiştir. Diyaframların kalınlıkları 3 µm ve 4 µm olarak seçilmiştir. Yarıçapları ise 100 µm, 120 µm ve 130 µm olarak seçilmiştir. Poly-Si diyafram sıkıştırma (compressive) gerilmesine sahip olduğu ve Si₃Ni₄ diyaframında da germe (tensile) gerilmesine sahip olduğu varsayılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, Poly-Si diyafram için -80 MPa ile -5 MPa aralığındaki sıkıştırma gerilme değerlerinde Si diyaframa göre daha yüksek hassasiyete sahip iken daha düşük frekans cevabına sahiptir. Benzer olarak germe gerilmesine sahip Si₃Ni₄ diyaframının hassaslığı gerilme arttıkça azalmaktadır ve frekans cevabı da gerilme arttıkça artmaktadır. 1000MPa ile 1750 MPa arasında gerilme gerilmesine sahip Si₃Ni₄ diyaframı Si(Silikon) diyaframa göre daha düşük hassasiyet göstermesine rağmen daha yüksek frekans cevabına sahiptir. Literatürde mevcut olan farklı geometrilerde diyafram tasarımı ve farklı özelliklere sahip malzeme kullanılmasına ek olarak diyaframın üretimi esnasında oluşan ısıl gerilmelerde göz önüne alınarak daha hassas ve daha geniş frekans cevabına sahip sensör tasarımı mümkün olabilir.

Anahtar Kelimeler: Isıl gerilme, Diyafram, MEMS tabanlı FPI optik basınç sensör.

Investigation of the Effects of Thermal Stress on the Performance of MEMS Based Fabry-Pérot Optical Pressure Sensor

Abstract

In this study, the effect of thermal stresses on FPI (Fabry-Pérot Interferometer) diaphragms made of Poly-Si and Si₃Ni₄ materials were theoretically investigated and evaluated in terms of the sensitivity and frequency response of the diaphragm. The thicknesses of diaphragms were chosen as 3 µm and 4 µm and radii were chosen as 100 µm, 120 µm and 130 µm, respectively. It was assumed that the Poly-Si diaphragm has compressive stress and Si₃Ni₄ diaphragm has tensile stress. Results showed that Poly-Si diaphragm with compression stress between -80 MPa and -5 MPa has higher sensitivity compared to Si diaphragm, however, it has a lower frequency response. Similarly, the sensitivity of the Si₃Ni₄ diaphragm with tensile stress decreases as the stress increases and the frequency response increases as the stress increases. The Si₃Ni₄ diaphragm with a tensile stress between 1000 MPa and 1750 MPa has a higher frequency response than the Si diaphragm although it shows lower sensitivity compared to Si diaphragm. In addition to the use of diaphragm design in different geometries and materials with different properties as available in the literature, it may possible to design a sensor with a higher sensitivity and a wider frequency response by considering the thermal stresses that occur during the fabrication of the diaphragm.

Keywords: Thermal stress, Diaphragm, MEMS Based FPI optic pressure sensor

* Sorumlu Yazar: fikretyildiz@hakkari.edu.tr

1. Giriş

Sanayi, endüstri, tıp ve diğer birçok alanda basınç değerinin ölçülmesi ve izlenmesi (zaman içinde değişimi) önem arz etmektedir. Bunun için farklı uygulamalara yönelik basınç ölçüm sistemleri geliştirilmektedir (Chandra Mukhopadhyay, 2015; J. O. Lee et al., 2017; Wu et al., 2013). Hafif ve hızlı olmaları, küçük boyutlarda olmaları ve daha doğru ölçüm sonuçları vermelerinden dolayı MEMS (Mikro Elektromekanik Sistem) tabanlı basınç ölçüm sensörleri rakiplerine göre avantajlara sahiptir (Bhat, 2007; Madhavi, Sumithradevi, Krishna, & Vijayalakshmi, 2011). MEMS basınç sensör sisteminin ana parçası ince bir diyaframdır ve ölçümler bu diyaframın mekanik olarak ortam basıncı tarafından deformasyonu sonucunda elde edilir. Diyaframın deformasyonun ölçülmesinde farklı çalışma mekanizmaları kullanılmaktadır. Bu mekanizmalar piezoresistif, kapasitif, optik, rezonans ve piezoelektrik olabilir (Hao et al., 2014; Song et al., 2020). MEMS tabanlı fiber optik basınç sensörleri diğer elektriksel mekanizmalara göre, küçük boyutlarda üretilebilmelerine ek olarak yüksek hassasiyet, hızlı ölçüm alma ve elektromanyetik etkilerden etkilenmemesi gibi avantajlarından dolayı bu alanda çalışan araştırmacıların daha çok ilgisini çekmektedir (Bao & Chen, 2012; Dakin, Ecke, Schroeder, & Reuter, 2009; Jensen et al., 2004; Jorgenson & Yee, 1993; Kersey et al., 1997; B. Lee, 2003; B. H. Lee et al., 2012; Patrick, Williams, Kersey, Pedrazzani, & Vengsarkar, 1996; Somer, Szendiuch, & Urban, 2018; Totsu, Haga, & Esashi, 2005; R. Wang, Xie, Xu, Chen, & Xiao, 2019; B. Xu, Liu, Wang, Jia, & Jiang, 2017). Optik basınç sensörleri arasında Fabry-Pérot interferometresi (FPI) en yaygın kullanılanıdır (Z. Li et al., 2015; Liao et al., 2014; Liu et al., 2017; Mihailov et al., 2011; F. Xu et al., 2012; Y. Zhang et al., 2013).

FPI-tabanlı basınç sensörünün yapısında genel olarak iki tane yansıtıcı yüzey ve bir tane kavite bulunmaktadır. Bu yansıtıcı yüzeylerin biri optik fiberin ucunda bulunurken diğeri de basınç altında hareket (deforme) edebilen diyaframdır. Diyafram basınç altında deforme olduğunda iki yansıtıcı yüzey arasındaki ışığın hareket ettiği yol değişir dolayısıyla ile faz farkı oluşur. Bir fotodedektör yardımı ile diyaframın yer değiştirmesi (deforme) ile ilişkili olan yansıyan ışığın genliği ölçülür (Hayber, Tabaru, & Saracoglu, 2019; Qi et al., 2019; Song et al., 2020). Diyaframın geometrisi ve yapıldığı malzemenin özellikleri sensörün hassasiyetini belirleyen en önemli faktörlerdendir. Silika, SiO₂ ve grafin optik basınç sensörü üretiminde en çok tercih edilen malzemelerdendir. MEMS basınç sensörlerinde mühürlenmiş (sealed) kavite oluşturmak için yüzey işleme veya katı (bulk) mikro işleme teknolojisi bazı durumlarda da bu iki teknoloji beraber kullanılmaktadır (A & T, 2016; Mishra & Kumar, 2019). Diyaframın seçimi yapılırken, diyaframı oluşturan malzemenin fiziksel özellikleri ve diyaframın üzerinde işlem yapılabilmesine dikkat edilir (R. Wang et al., 2019). Si malzemesi ile cam malzemesinin yapıştırılması sonucu aralarında kuvvetli bir bağ olmasından dolayı, diğer bir deyişle mühürlenmiş kavite üretimine imkan vermesinden dolayı, Si diyafram yaygın olarak basınç sensörü üretiminde kullanılmaktadır (Cheng et al., 2015; M. Li, Wang, & Li, 2006; Mehmood, Haneef, & Udrea, 2020; R. Wang et al., 2019; W. Wang, Wu, Tian, Niezrecki, & Wang, 2010; Yin et al., 2014).

Basınç sensöründe alıcı olarak kullanılan diyaframın üretimi esnasında kullanılan malzemelerin ısıl genleşme katsayılarındaki farklılıklardan dolayı (anodik yapıştırma) veya yüksek

sıcaklıklarda yapılan üretimler sonucunda diyaframda ısıl stress (gerilme) meydana gelmektedir (F. Yildiz, Matsunaga, & Haga, 2016, 2018; F. Yildiz, Matsunaga, & Haga, 2016; Fikret Yildiz, 2018). Basınç sensörünün hassaslığı ve doğrusalılığı da dolayısıyla ısıl gerilmelerden dolayı değişmektedir. Bununla ilgili çalışmalar literatürde mevcuttur. Bu çalışmalardan birinde Si ve cam malzeme anodik yapıştırma yöntemi ile 377 °C 'da yapıştırılmıştır. Oluşan ısıl gerilmelere bağlı olarak Si diyaframın deformasyonu 40 kPa basınç değerine kadar teorik ve nümerik olarak hesaplanmıştır ve karşılaştırılmıştır. Teorik ve nümerik sonuçlar arasında büyük farklılıklar olduğu görülmüştür (Ge, Cai, Wang, & Zhang, 2018). Diğer bir çalışmada ise, Pyrex cam ile Si diyafram arasında oluşan ısıl gerilmeler, kavite içinde farklı basınçta gaz olduğu düşünülerek nümerik olarak hesaplanmıştır. Diyaframın merkezinde ve kavite kenarlarında maksimum gerilmelerin olduğu tespit edilmiştir ve farklı sıcaklıklarda, dalgaboyunda meydana gelen kaymalar araştırılmıştır (R. Wang et al., 2019). Anodik yapıştırma yönteminde kullanılan Si-Cam ikilisine ek olarak yüzey işleme teknolojisi kullanılarak da üretilmiş basınç sensörü ile ilgili çok sayıda çalışma mevcuttur. Yüzey işleme yöntemi ile üretim düşünüldüğünde Poly-Si (Ertuğrul & Ülker, 2020), Si₃Ni₄, SiC, SiO₂ gibi malzemelerden oluşan diyafram yapıları sıklıkla literatürde gerçekleştirilmiş çalışmalarda kullanılmaktadır. Diyaframda oluşan gerilmelerin genel olarak iki kaynağı bulunmaktadır. Bunlar malzemenin kendinden kaynaklı ve dış faktörlerle alakalı gerilmelerdir. Dış faktörlerden kaynaklı gerilme sebeplerinden bazıları farklı malzeme özellikleri, ısıl genleşme farklılıkları ve üretim sırasında kullanılan işlem şartlarının (process condition) aynı olmamasıdır (Jiang, Cao, Xu, Zhang, & Liu, 2014; J. O. Lee et al., 2019; Mehmood et al., 2020; Totsu et al., 2005). Diyafram üzerinde oluşan gerilmeler, diyaframın ömrünü azaltmaktadır ve performansını etkilemektedir (Mishra & Kumar, 2019). Yukarıda bahsedildiği gibi yapılan çalışmalarda genel olarak gerilmelerin diyaframın yer değiştirmesine, diğer bir deyişle hassasiyetine, olan etkisi araştırılmıştır. Diyafram üzerindeki gerilmelerin diyaframın hassasiyeti kadar frekans üzerindeki gerilmelerin oluşturduğu etkilerinde incelenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, MEMS tabanlı FPI (Fabry-Perot Interferometre) basınç sensörü tasarımı için iki farklı malzemeden oluşan diyaframın frekans ve hassasiyet performansı teorik olarak hesaplanmıştır ve karşılaştırılmıştır. Bu hesaplamalarda ısıl gerilmelerin de etkisi göz önünde bulundurulmuştur. Farklı yarıçaplar ve kalınlıklardaki diyaframların Si₃Ni₄ ve Poly-Si malzemesinden oluştuğu varsayılmıştır ve gerilmelerin olmadığı varsayılan Si diyafram da sonuçları karşılaştırmak için referans olarak kullanılmıştır.

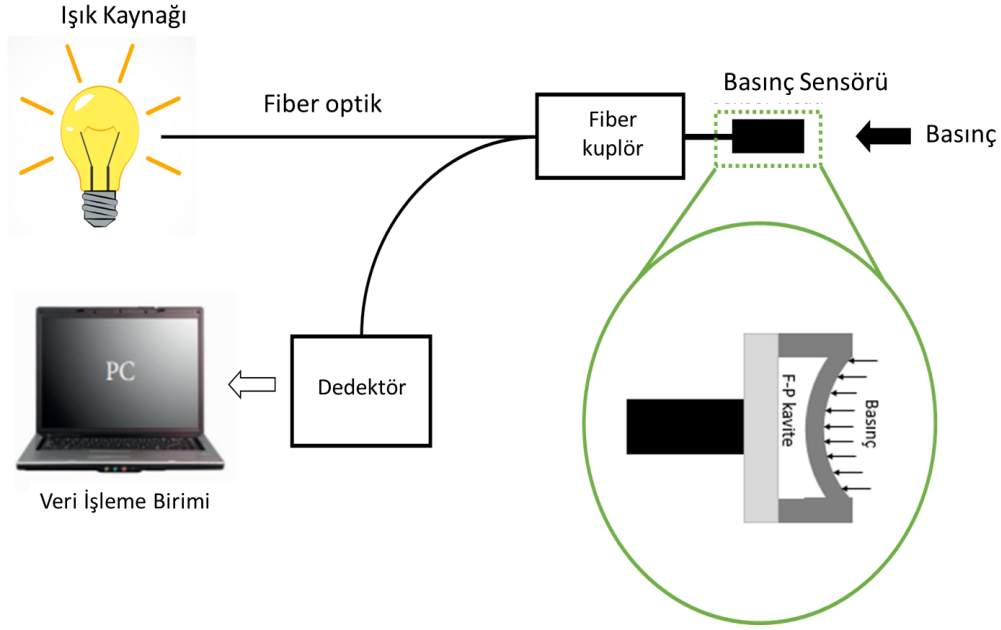
2. Materyal ve Metot

2.1. Sensör Tasarımı

Diyafram tabanlı Fabry-Perot optik sensörü Şekil.1'de gösterildiği gibi optik girişim teorisi ve diyafram dinamik titreşim analizine bağlı bir çalışma mekanizmasına sahiptir. Farklı dalgaboylarında ışık üreten ışık kaynağı, fiber kuplörü, basınç sensörü ve optik dedektör parçalarından oluşmaktadır. Fiber kuplörü yansıyan ışığı dedekte etmek için kullanılır. Diyafram ve kavite de gelen basınç değerini ölçmek için kullanılan sensörün parçalarıdır. Işık kaynağından gelen ışık iki farklı arayüzde

yansıma maruz kalır. İlk fiber ucunda oluşurken diğerinde belirli basınç altında deforme olan diyaframdan dolayı oluşan yansımadır. Yansıyan ışık fiber yardımıyla fotodetektöre ulaşır ve dedektör gelen ışığı elektriksel sinyale dönüştürerek veri işleme birimine aktarır. Basınç ölçümü, gelen ışığın gücü (intensity) ile

diyafram etki eden basınç ilişkilendirildiğinde tamamlanmış olur(Fu et al., 2017; Hayber et al., 2019; Ma, Jiang, Hu, Jiang, & Zhang, 2020). Diyafram malzemesinin mekanik ve geometrik özellikleri bu nedenle diyafram tabanlı FPI sensörünün frekans ve hassasiyetini belirlemektedir(Hayber et al., 2019).



Şekil 1. Diyafram tabanlı MEMS Fabry-Perot İnterferometre optik basınç sensörünün şekilsel gösterimi

Düzgün bir P basıncı altında küçük deformasyon yaklaşımına göre, dairesel bir plakanın yerdeğiştirmesi, $w(r)$, Denklem 1’de verilmiştir (Chattopadhyay & Chowdhury, 2017; Gharaei & Koohsorkhi, 2016; W. Zhang et al., 2015).

$$\nabla^2 w \nabla^2 D = P \quad (1)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (2)$$

Burada P, diyaframa uygulanan basıncı, D, diyaframın eğilme rijitliğini, E, Young Modülünü, h, diyafram kalınlığını ve ν is the Poisson’s oranını göstermektedir. Silindirik koordinatlarda diferansiyel operatörü (∇), Denk.3’de olduğu gibidir. Denk.3’ü Denk.1’de yerine yazıp D’ nin tabaka boyunca sabit olduğu varsayılırsa diyaframın dikey yöndeki yerdeğiştirmesi, Denk.4 ‘de olduğu gibidir.

$$\nabla^2 = \frac{\partial}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \quad (3)$$

$$\nabla^2 w = P/D$$

Diyaframın radyal olarak dikey yöndeki yerdeğiştirmesi, $w(r)$, ve maksimum yerdeğiştirmesi, w_{max} , aşağıdaki gibidir.

$$w(r) = \frac{Pr^4}{64D} \left\{ 1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right\}^2 \quad (4)$$

$$w(r=0) = w_{max} = \frac{Pr^4}{64D}$$

Diyaframın üzerinde gerilme olduğu (σ) varsayılırsa Denk.4, Denk.5(Mishra & Kumar, 2019) gibi ifade edilebilir.

$$w(r=0) = w_{max} = \frac{Pr^4}{64D + 4\sigma hr^2} \quad (5)$$

Denklem 5 kullanılarak üzerinde gerilme olan diyaframın hassasiyeti (Sensitivity, S) Denk.6 ile hesaplanabilir.

$$S = \frac{w}{P} = \frac{r^4}{64D + 4\sigma hr^2} \quad (6)$$

Kenarları sabitlenmiş dairesel bir plakanın rezonans frekansı Denk.7 ile ifade edilir(Barauskas, D.; Pelenis, D.; Vanagas, G.; Viržonis, D.; Baltrušaitis, 2019).

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (7)$$

Burada, k, diyaframın elastik katsayısını ve m ise diyaframın kütesini göstermektedir. Diyafram üzerinde gerilme var ise diyaframın elastik katsayısı, Denk.8’de olduğu gibi ifade edilebilir(Raskin, Brown, Khuri-Yakub, & Rebeiz, 2000).

$$k = \frac{16\pi Eh^3}{3r^2(1 - \nu^2)} + 4\pi\sigma h \quad (8)$$

Bu çalışmada, MEMS alanında ve yüzey işleme teknolojisi alanında diyafram olarak sıklıkla kullanılan Poly-Si ve Si_3Ni_4 diyaframları, farklı kalınlık (3 μm ve 4 μm) ve yarıçaplarda (100 μm , 120 μm , 130 μm) FPI basınç sensörü diyaframı olarak kabul edilmiştir ve diyaframların hassasiyeti ve frekans cevapları farklı stress değerleri altında elde edilmiştir. Üzerinde stress olmadığı varsayılan Si malzemeden oluşan diyafram da Poly-Si ve Si_3Ni_4 diyaframlarının sonuçları ile karşılaştırma yapmak için referans

alınmıştır. Üç farklı diyaframlar ile ilgili bilgiler Tablo 1’de gösterilmiştir.

Poly-Si diyaframda sıkışma (compressive) gerilmesinin -400 MPa ile 400 MPa (Mishra & Kumar, 2019) aralığında değiştiği ve Si₃Ni₄ diyaframda da gerilme (tensile) gerilmesi (≥ 1 Gpa ve 700-1200 MPa)(Jiang et al., 2014; Laconte J, Flandre D, 2006) aralığında değiştiği literatür çalışması sonucu anlaşılmıştır. Literatürde verilen bu bilgilere göre 3 μ m ve 4 μ m kalınlığına sahip Poly-Si için sıkıştırma gerilimi -80 MPa ile -5 MPa arasında olduğu varsayılmıştır. Burada yapılan diğer bir yaklaşım da 1-2.5

μ m kalınlığına sahip Poly-Si diyafram için stres değeri -5 ve -20 MPa olduğu belirtilmiştir (Chen et al., 2008). Bu çalışma, da 1-2.5 μ m kalınlığındaki Poly-Si diyafram aralığı 1-3 μ m olarak kabul edilmiştir. Benzer olarak, 3 μ m ve 4 μ m kalınlığında Si₃Ni₄ diyaframı içinde gerilme gerilmesinin 1000 MPa ile 1750 MPa arasında olduğu varsayılarak sonuçlar elde edilmiştir ve değerlendirilmiştir. Maksimum kaplanabilir Si₃Ni₄ diyafram kalınlığı 2 μ m civarında olsa da katman halinde daha kalın Si₃Ni₄ diyafram üretilmesi de mümkündür(L.J. Ferná’ndez, E. Berenschot, J. Sese’ & J. Flokstra, 2005). Diyaframların yarıçapları 100 μ m, 120 μ m ve 130 μ m olduğu varsayılmıştır.

Tablo 1. FPI Diyaframlarının Geometrik Özellikleri ve Diyafram Malzemelerinin Özellikleri

FPI Sensör Diyafram Özellikleri		Sembol	Değer (μ m)	
Yarıçap		r	100,120,130	
Kalınlık		h	3, 4	
Diyafram Malzemesi	Young Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)	Stress (MPa)
Si (Ge et al., 2018)	160	0.28	2320	-
Poly-Si	169	0.3	2329	(-80)-(-5)(Chen et al., 2008; Mishra & Kumar, 2019)
Si ₃ Ni ₄ (MTI Corporation, n.d.)	320	0.25	3260	≥ 1 GPa(Jiang et al., 2014), 700-1200(Laconte J, Flandre D, 2006)

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

3.1. Hassasiyet (nm/kPa) ve Frekans (kHz) Analizi

Bu çalışmada FPI basınç sensörü için hassasiyet (S,nm/kPa) ve frekans cevabı (kHz) analizi literatürde mevcut olan denklemler ile hesaplanarak analiz sonuçları iki farklı diyafram için yorumlanmıştır. Poly-Si ve Si₃Ni₄ diyaframları için hassasiyet (S,nm/kPa) ve frekans cevabı (kHz) analiz sonuçları Tablo 2’de gösterilmiştir. Hassasiyet, kullanılan diyaframın maksimum yerdeğiştirmesinin ortamdaki basınca oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada hassasiyet hesabı yapılırken Poly-Si diyaframda -80 MPa- (-5 MPa) aralığında ısı gerilmenin olduğu varsayılmıştır. Si₃Ni₄ diyaframı içinde ısı gerilmenin 1000-1750 MPa aralığında olduğu varsayılmıştır. Diyafram kalınlıkları (3 μ m ve 4 μ m) ve yarıçapları (100 μ m,120 μ m ve 130 μ m) diyaframın toplam yerdeğiştirmesinin diyafram kalınlığının %30’undan az olacak şekilde seçilmiştir. Diyaframa uygulanan basınç ile yerdeğiştirme arasında doğrusal bir ilişki olması için bu değerler dikkatli bir şekilde seçilmelidir (D. Giovanni, 1982; Hayber et al., 2019). Sonuçlar aynı boyut ve kalınlıkta Si diyafram sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Si diyafram, FPI sensör üretiminde sıklıkla kullanıldığı için sonuçları karşılaştırılırken referans olarak alınmıştır. Poly-Si diyafram için ısı kaynaklı gerilmeler genel olarak sıkıştırıcı özelliğe sahip olduğu varsayıldığında, Şekil 2-(a)’da 3 μ m kalınlığına sahip Poly-Si

diyafram için ısı gerilme değeri -80 MPa değerinden -5 MPa aralığında değiştirildiğinde, diyaframın hassasiyeti azalmaktadır. Başka bir ifade ile sıkıştırıcı gerilme değeri büyüklük (mutlak) olarak azaldıkça hassasiyet azalmaktadır. Diyaframın hassasiyet ve frekans cevabı hesaplamaları için kullanılan denklemler literatürde mevcut olduğu için nümerik sonuçlarla doğrulamak için tekrar karşılaştırma yapılmamıştır. Tablo 1’de gösterilen stres verileri literatürde deneysel olarak da elde edildiği için nümerik sonuçlar tekrar elde edilmemiştir. Sadece Poly-Si diyaframı için, yerdeğiştirmesinin ve frekans cevabının sıcaklığa bağlı olarak dolayısıyla ısı gerilmelere bağlı olarak nasıl değiştiği test edilmiştir. Bunun için Femtet yazılımı (Murata Co,Ltd.) kullanılarak 500 μ m kalınlığında Si alttaş üzerine 600 °C, 900 °C ve 1100 °C’ de 4 μ m kalınlığında ve 120 μ m yarıçapında Poly-Si kaplandığı varsayılarak sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Şekil 3 ‘de elde edilen nümerik sonuçlara göre sıcaklık arttıkça diyaframın maksimum yerdeğiştirmesi artmaktadır ve diyaframın kenarlarına doğru yerdeğiştirmesi azalmaktadır. Teorik olarak da (Denk.5), Poly-Si diyafram için stress değeri büyüklük olarak arttığında diyaframın maksimum yerdeğiştirmesi de artmaktadır. Bu üç farklı sıcaklıkta Femtet analizleri sonuçları, Poly-Si diyaframın frekans cevabınının da sırasıyla 213.9 kHz, 213.8 kHz ve 213.8 kHz olduğunu göstermiştir.

Sıkıştırıcı gerilim olduğu durumlarda Si diyaframa göre daha hassas olmasına rağmen, Si ve Poly-Si malzemelerin özellikleri benzer olmasından dolayı, gerilme değeri -5 MPa değerine

yaklaştıkça Si ve Poly-Si diyaframların hassasiyet değerleri birbirine yakın değerler almaktadır. Denklem 2 ve Denklem 6'dan anlaşılacağı gibi, diyaframın yarıçapı arttıkça hassasiyet artarken, diyaframın kalınlığı arttıkça hassasiyet azalmaktadır. Diyafram üzerindeki gerilme değeri -80 MPa değerinden -5 MPa değerine değiştirildiğinde 100 µm çapında ve 3 µm kalınlığında Poly-Si diyafram 5.8-3.8 nm, 120 µm çapında ve 3 µm kalınlığında Poly-Si diyafram 16-8 nm ve 130 µm çapında ve 3 µm kalınlığında Poly-Si diyafram 27.1-11.1 nm aralığında hassaslığa sahip olmaktadır.

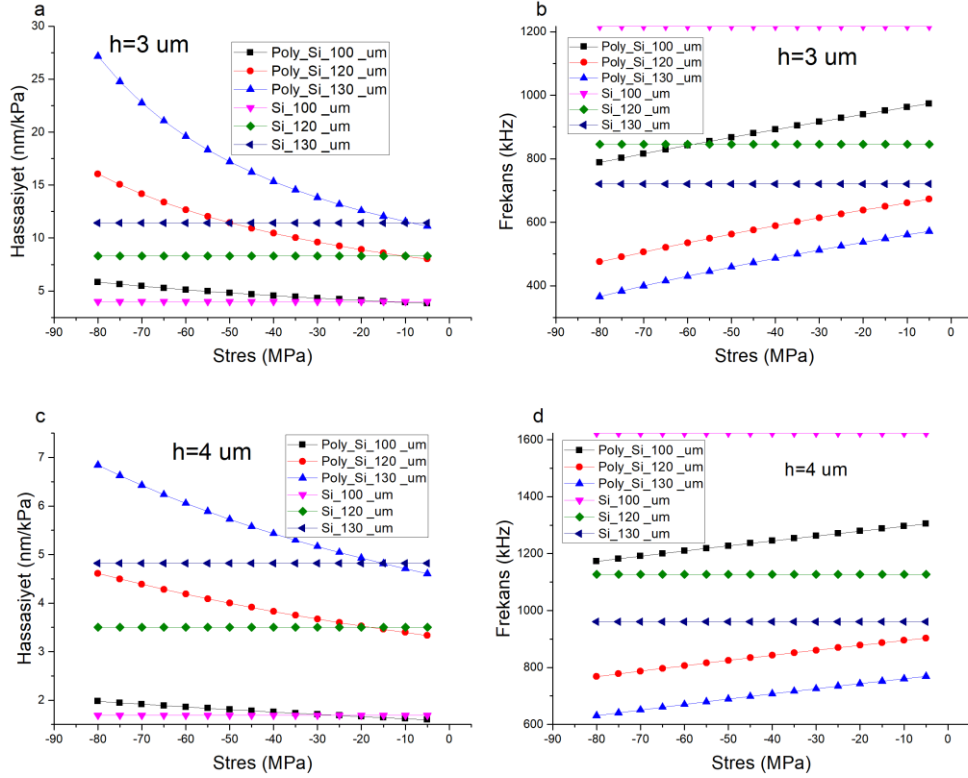
Şekil 2-(b)'de 3 µm kalınlığa sahip Poly-Si diyaframın frekans cevabına bakıldığında ise Si diyaframa göre daha düşük değerlere sahip olduğu anlaşılmıştır. Sıkıştırıcı gerilme değeri büyüklük (mutlak) olarak azaldıkça Poly-Si diyaframın frekans cevabında artmaktadır. Diyafram üzerindeki gerilme değeri -80 MPa değerinden -5 MPa değerine değiştirildiğinde 100 µm çapında ve 3 µm kalınlığında Poly-Si diyafram 788.3-962.3 kHz, 120 µm çapında ve 3 µm kalınlığında Poly-Si diyafram 475.2-661.3 kHz ve 130 µm çapında ve 3 µm kalınlığında Poly-Si diyafram 365.4-560.1 kHz aralığında frekans cevabına sahip olmaktadır. Kaplama şartlarının değiştirilerek Poly-Si üzerindeki oluşan ısıl gerilme değeri değiştirilebileceğinden (kontrol edilebileceğinden), Poly-Si malzemedan oluşan FPI basınç sensörünün hassaslığı ve frekans cevabı da uygulamaya göre kontrol edilebilir. Şekil 2-(c) ve (d)'de 4 µm kalınlığa sahip Poly-Si diyafram içinde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak 4 µm kalınlığa sahip Poly-Si diyafram 3 µm'ye göre daha düşük hassasiyet değerlerine sahip iken daha yüksek frekans cevabına sahiptir. 4 µm kalınlığa sahip Poly-Si diyafram için hassaslık ve frekans cevabı Tablo 2'de gösterilmiştir.

Si₃Ni₄ diyaframında genel olarak germe eğilimli gerilmeler gözlemlendiği için elde edilen sonuçlar Poly-Si diyafram için elde edilen sonuçlar ile zıt özelliğe sahiptir. Şekil 4-(a) ve (c)'de 3 µm ve 4 µm kalınlığına sahip Si₃Ni₄ diyaframın hassasiyet değerleri gösterilmiştir. Diyafram üzerindeki gerilme değeri 1000 MPa değerinden 1750 MPa değerine değiştirildiğinde 100 µm çapında ve 4 µm kalınlığında Si₃Ni₄ diyafram 0.36-0.25 nm, 120 µm çapında ve 4 µm kalınlığında Si₃Ni₄ diyafram 0.59-0.39 nm ve 130 µm çapında ve 4 µm kalınlığında Si₃Ni₄ diyafram 0.73-0.48 nm aralığında hassaslığa sahiptir. Her iki kalınlıktaki diyafram içinde hassasiyet değerleri referans olarak kabul edilen Si diyaframa göre düşüktür. Gerilme arttıkça hassasiyet azalmaktadır.

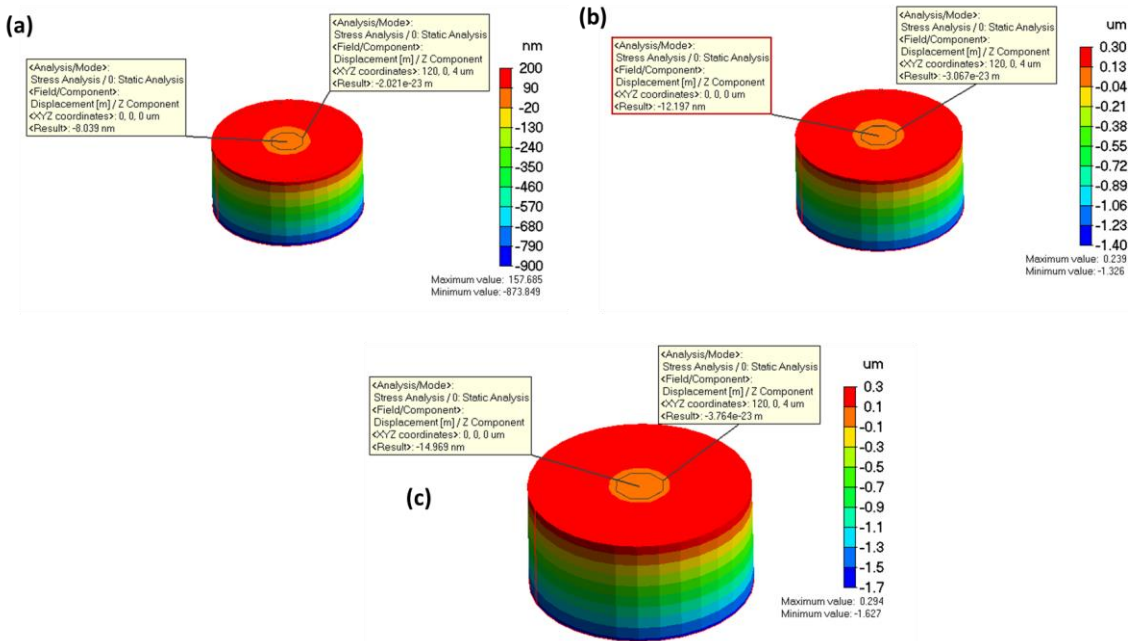
Şekil 4-(b) ve (d)'de 3 ve 4 µm kalınlığına sahip Si₃Ni₄ diyaframın frekans cevabına değerleri incelendiğinde gerilmeler arttıkça frekans değeride daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Referans olan Si diyaframın frekans cevabından daha yüksek değerlerde frekans değerine sahiptir. Diyafram üzerindeki gerilme değeri 1000 MPa değerinden 1750 MPa değerine değiştirildiğinde 100 µm çapında ve 4 µm kalınlığında Si₃Ni₄ diyafram 2317.5-2747.1 kHz, 120 µm çapında ve 4 µm kalınlığında Si₃Ni₄ diyafram 1802.7-2181.8 kHz ve 130 µm çapında ve 4 µm kalınlığında Si₃Ni₄ diyafram 1622.1-1979.1 kHz aralığında frekans cevabına sahiptir. 3 µm kalınlığa sahip Si₃Ni₄ diyafram için hassaslık ve frekans cevabı Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2 İki farklı kalınlığa sahip üç diyaframın hassasiyet (nm/kPa) ve frekans (kHz) analizi

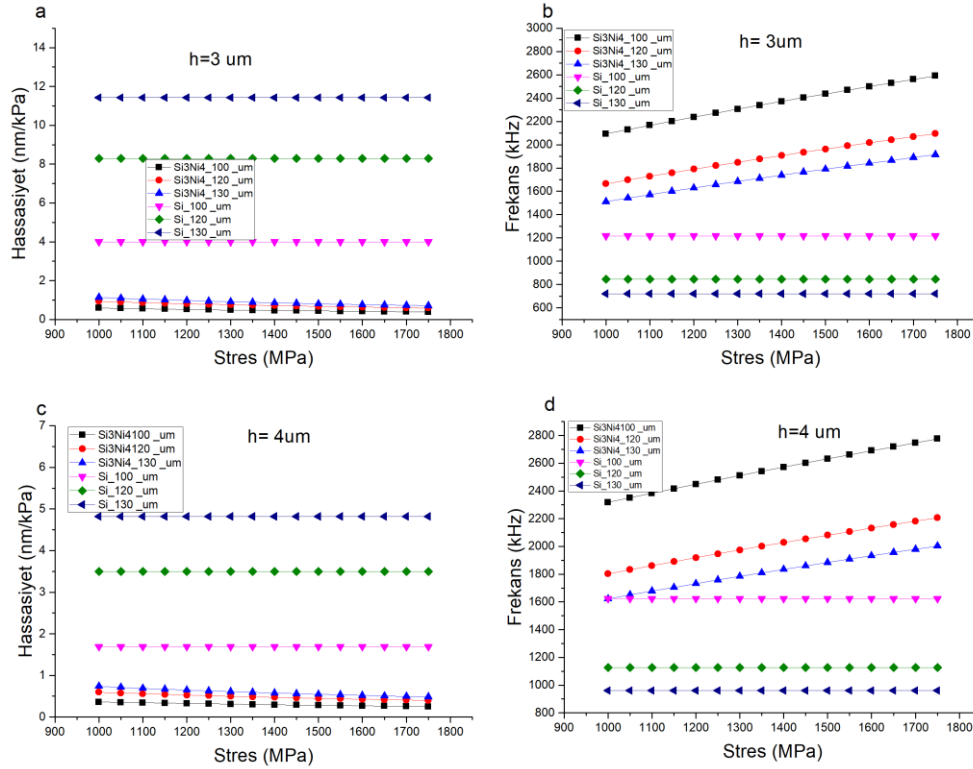
Hassasiyet (nm/kPa)						
r ₀ (µm)	h (µm)=3			h(µm)=4		
	Si	Poly-Si	Si ₃ Ni ₄	Si	Poly-Si	Si ₃ Ni ₄
100	4	5.8-3.8	0.59-0.38	1.7	1.97-1.59	0.36-0.25
120	8.3	16-8	0.93-0.58	3.5	4.61-3.3	0.59-0.39
130	11.4	27.1-11.1	1.13-0.7	4.8	6.83-4.6	0.73-0.48
Frekans Cevabı (kHz)						
r ₀ (µm)	h (µm)=3			h(µm)=4		
	Si	Poly-Si	Si ₃ Ni ₄	Si	Poly-Si	Si ₃ Ni ₄
100	1217.4	788.3-962.3	2093.1-2560.6	1623.2	1172.8-1296.1	2317.5-2747.1
120	845.4	475.2-661.3	1665-2069.5	1127.2	767.8-894.9	1802.7-2181.8
130	720.3	365.4-560.1	1511.5-1890	960.4	630.5-760	1622.1-1979.1



Şekil 2. Poly-Si diyaframın 3 μm ve 4 μm kalınlıklarında ve 100 μm , 120 μm ve 130 μm yarıçaplarında olması durumunda hassasiyet ve frekans analiz sonuçları. (a) 3 μm kalınlığındaki Poly-Si diyaframın hassasiyeti (nm/kPa), (b) 3 μm kalınlığındaki Poly-Si diyaframın frekans analiz sonucu, (c) 4 μm kalınlığındaki Poly-Si diyaframın hassasiyeti (nm/kPa), (d) 4 μm kalınlığındaki Poly-Si diyaframın frekans cevabı analiz sonucu (Poly_Si_XXX_μm: Poly-Si diyaframın yarıçapı, Si_XXX μm: Si diyaframın yarıçapı)



Şekil 3. 500 μm kalınlığında Si alttaş üzerine (a) 600 $^{\circ}\text{C}$, (b) 900 $^{\circ}\text{C}$ ve (c) 1100 $^{\circ}\text{C}$ ' de 4 μm kalınlığında ve 120 μm yarıçapında Poly-Si kaplanması sonucu diyaframın maksimum yerdeğiştirmesinin sonlu elemanlar analizi ile değerlendirilmesi



Şekil 4. Si₃Ni₄ diyaframın 3 μm ve 4 μm kalınlıklarında ve 100 μm, 120 μm ve 130 μm yarıçaplarında olması durumunda hassasiyet ve frekans analiz sonuçları. (a) 3 μm kalınlığındaki Si₃Ni₄ diyaframın hassasiyeti (nm/kPa), (b) 3 μm kalınlığındaki Si₃Ni₄ diyaframın frekans analiz sonucu, (c) 4 μm kalınlığındaki Si₃Ni₄ diyaframın hassasiyeti (nm/kPa), (d) 4 μm kalınlığındaki Si₃Ni₄ diyaframın frekans analiz sonucu (Si₃Ni₄_xxx_μm: Si₃Ni₄ diyaframın yarıçapı, Si_ xxx_μm: Si diyaframın yarıçapı)

4. Sonuç

FPI basınç sensörleri için hassasiyet ve frekans cevabı, üretilen cihazın karakterizasyonunda sıklıkla değerlendirilen başlıca parametrelerdir. Ayrıca belirtmek gerekir ise ortamdaki basınç değişimi sonucu FPI diyaframında oluşan yerdeğiştirme arasındaki doğrusal ilişki içinde bu parametrelerin değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Diyaframın yerdeğiştirme miktarını ve frekans cevabını değiştirerek farklı uygulamalarda kullanmak için çeşitli geometrilere sahip diyafram tasarımı ve farklı malzemeler kullanılmaktadır. Bu çalışmada da diyaframların üretimi sırasında veya sensörün montajı (ambalajlanması) esnasında diyafram üzerinde oluşabilecek ısı gerilmelerin FPI basınç sensörünün hassaslığına ve frekans cevabına olan etkisi teorik olarak incelenmiştir. Diyafram olarak Poly-Si ve Si₃Ni₄ seçilmiştir. Poly-Si diyaframda genellikle sıkıştırma (compressive) gerilime sahip olduğundan dolayı hesaplamalar -80 MPa ile -5 MPa aralığında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sıkıştırma gerilmesi olan Poly-Si diyaframın Si diyaframa göre ortamdaki basınç değişimine karşı daha hassas olduğunu göstermiştir. Frekans cevabı ise Si diyaframa göre daha düşüktür. Si₃Ni₄ diyafram üzerinde germe (tensile) gerilmesi olduğu düşünüldüğünde elde edilen sonuçlar gerilme arttıkça diyaframın basınç değişimine gösterdiği hassasiyet azalmaktadır. Si₃Ni₄ diyaframı Si diyaframa göre daha düşük hassasiyete sahiptir. Ancak gerilme değerinin artması frekans değerinde

arttırmaktadır. Dolayısı ile Si₃Ni₄ diyaframı Si diyaframa göre daha yüksek frekans cevabına sahiptir. Sonuç olarak, geometrik tasarım ve malzeme çeşidine ek olarak diyafram üzerindeki ısı gerilmeleri de göz önüne alarak farklı uygulamalar için sensörün hassasiyet ve frekans değeri değerlendirilebilir/ayarlanabilir.

5. Teşekkür

Yazar, sonlu elemanlar analizinde kullanılan Femtet yazılımının kullanımı ve destekleri için Murata Software Co.,Ltd'ye teşekkür eder.

Kaynakça

- A, N., & T, S. (2016). Design and Analysis of Perforated Si-Diaphragm Based Mems Pressure Sensor for Environmental Applications. *ICTACT Journal on Microelectronics*, 2(1), 209–215. <https://doi.org/10.21917/ijme.2016.0036>
- Bao, X., & Chen, L. (2012). Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors. *Sensors (Switzerland)*, 12(7), 8601–8639. <https://doi.org/10.3390/s120708601>
- Barauskas, D.; Pelenis, D.; Vanagas, G.; Virzonis, D.; Baltrušaitis, J. (2019). Methylated Poly(ethylene)imine Modified Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer for Measurements of CO₂ and SO₂ in Their Mixtures. *Sensors*, 19.

- Bhat, K. N. (2007). Silicon micromachined pressure sensors. *Journal of the Indian Institute of Science*, 87(1), 115–131.
- Chandra Mukhopadhyay, S. (2015). Wearable Sensors for Human Activity Monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 15(3), 1039–1040.
- Chattopadhyay, M., & Chowdhury, D. (2017). Design and performance analysis of MEMS capacitive pressure sensor array for measurement of heart rate. *Microsystem Technologies*, 23(9), 4203–4209. <https://doi.org/10.1007/s00542-016-2842-2>
- Chen, J., Cheng, X., Chen, C., Li, P., Liu, J., & Cheng, Y.-T. (2008). A Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer Array for Minimally Invasive Medical Diagnosis. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 17(3), 599–610.
- Cheng, L., Liu, Q., Guo, T., Jun, X., Fan, S., & Wei, J. (2015). An ultra-high sensitivity Fabry-Perot acoustic pressure sensor using a multilayer suspended graphene diaphragm. 2015 IEEE SENSORS - Proceedings, (October). <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2015.7370318>
- D. Giovanni. (1982). *Flat and Corrugated Diaphragm Design Handbook* (first ed.,). CRC Press.
- Dakin, J. P., Ecke, W., Schroeder, K., & Reuter, M. (2009). Optical fiber sensors using hollow glass spheres and CCD spectrometer interrogator. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(10), 1034–1038. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.05.005>
- Ertuğrul, İ., & Ülker, O. (2020). MEMS Tabanlı Mikro Rezonatörün Tasarımı ve Analizi Design and Analysis of MEMS Based Micro Resonator, (18), 25–29.
- Fu, C., Si, W., Li, H., Li, D., Yuan, P., & Yu, Y. (2017). A novel high-performance beam-supported membrane structure with enhanced design flexibility for partial discharge detection. *Sensors* (Switzerland), 17(3). <https://doi.org/10.3390/s17030593>
- Ge, Y., Cai, K., Wang, T., & Zhang, J. (2018). MEMS pressure sensor based on optical Fabry-Perot interference. *Optik*, 165, 35–40. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.03.112>
- Gharaei, H., & Koohsorkhi, J. (2016). Design and characterization of high sensitive MEMS capacitive microphone with fungus coupled diaphragm structure. *Microsystem Technologies*, 22(2), 401–411. <https://doi.org/10.1007/s00542-014-2406-2>
- Hao, X., Tanaka, S., Masuda, A., Nakamura, J., Sudoh, K., Maenaka, K., ... Higuchi, K. (2014). Application of silicon on nothing structure for developing a novel capacitive absolute pressure sensor. *IEEE Sensors Journal*, 14(3), 808–815. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2288681>
- Hayber, S. E., Tabaru, T. E., & Saracoglu, O. G. (2019). A novel approach based on simulation of tunable MEMS diaphragm for extrinsic Fabry-Perot sensors. *Optics Communications*, 430(August 2018), 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.08.021>
- Jensen, J. B., Pedersen, L. H., Hoiby, P. E., Nielsen, L. B., Hansen, T. P., Folkenberg, J. R., ... Bjarklev, A. (2004). Photonic crystal fiber based evanescent-wave sensor for detection of biomolecules in aqueous solutions. *Optics Letters*, 29(17), 1974. <https://doi.org/10.1364/ol.29.001974>
- Jiang, H., Cao, G., Xu, C., Zhang, Z., & Liu, S. (2014). Effects of residual stress in the membrane on the performance of surface micromachining silicon nitride pressure sensor. *Proceedings of the Electronic Packaging Technology Conference, EPTC*, 664–670. <https://doi.org/10.1109/ICEPT.2014.6922742>
- Jorgenson, R. C., & Yee, S. S. (1993). A fiber-optic chemical sensor based on surface plasmon resonance. *Sensors and Actuators: B. Chemical*, 12(3), 213–220. [https://doi.org/10.1016/0925-4005\(93\)80021-3](https://doi.org/10.1016/0925-4005(93)80021-3)
- Kersey, A. D., Davis, M. A., Patrick, H. J., LeBlanc, M., Koo, K. P., Askins, C. G., ... Friebele, E. J. (1997). Fiber grating sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8), 1442–1462. <https://doi.org/10.1109/50.618377>
- L.J. Ferna´ndez, E. Berenschot, J. Sese´, R. J. W., & J. Flokstra, H. V. J. and M. E. (2005). Fabrication of thick silicon nitride blocks for integration of RF devices. *Electronics Letters*, 41(2), 40–41. <https://doi.org/10.1049/el>
- Laconte J, Flandre D, R. J. (2006). *Micromachined thin-film sensors for SOI-CMOS co-integration*. Springer Berlin Heidelberg.
- Lee, B. (2003). Review of the present status of optical fiber sensors. *Optical Fiber Technology*, 9(2), 57–79. [https://doi.org/10.1016/S1068-5200\(02\)00527-8](https://doi.org/10.1016/S1068-5200(02)00527-8)
- Lee, B. H., Kim, Y. H., Park, K. S., Eom, J. B., Kim, M. J., Rho, B. S., & Choi, H. Y. (2012). Interferometric fiber optic sensors. *Sensors*, 12(3), 2467–2486. <https://doi.org/10.3390/s120302467>
- Lee, J. O., Narasimhan, V., Balakrishna, A., Smith, M. R., Du, J., Sretavan, D., & Choo, H. (2019). Fabry-Pérot Optical Sensor and Portable Detector for Monitoring High-Resolution Ocular Hemodynamics. *IEEE Photonics Technology Letters*, 31(6), 423–426. <https://doi.org/10.1109/LPT.2019.2896840>
- Lee, J. O., Park, H., Du, J., Balakrishna, A., Chen, O., Sretavan, D., & Choo, H. (2017). A microscale optical implant for continuous in vivo monitoring of intraocular pressure. *Microsystems and Nanoengineering*, 3(July), 1–9. <https://doi.org/10.1038/micronano.2017.57>
- Li, M., Wang, M., & Li, H. (2006). Optical MEMS pressure sensor based on Fabry-Perot interferometry. *Optics Express*, 14(4), 1497. <https://doi.org/10.1364/oe.14.001497>
- Li, Z., Liao, C., Wang, Y., Xu, L., Wang, D., Dong, X., ... Zhou, J. (2015). Highly-sensitive gas pressure sensor using twin-core fiber based in-line Mach-Zehnder interferometer. *Optics Express*, 23(5), 6673. <https://doi.org/10.1364/oe.23.006673>
- Liao, C., Liu, S., Xu, L., Wang, C., Wang, Y., Li, Z., ... Wang, D. N. (2014). Sub-micron silica diaphragm-based fiber-tip Fabry-Perot interferometer for pressure measurement. *Optics Letters*, 39(10), 2827. <https://doi.org/10.1364/ol.39.002827>
- Liu, S., Wang, Y., Liao, C., Wang, Y., He, J., Fu, C., ... Zhang, F. (2017). Nano silica diaphragm in-fiber cavity for gas pressure measurement. *Scientific Reports*, 7(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00931-0>
- Ma, W., Jiang, Y., Hu, J., Jiang, L., & Zhang, T. (2020). Microelectromechanical system-based, high-finesse, optical fiber Fabry-Perot interferometric pressure sensors. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 302, 111795. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111795>
- Madhavi, K. Y., Sumithradevi, K. A., Krishna, M., & Vijayalakshmi, M. N. (2011). Analysis of square and circular diaphragms for a MEMS pressure sensor using a data mining tool. *Proceedings - 2011 International Conference on Communication Systems and Network Technologies, CSNT 2011*, (July), 258–261. <https://doi.org/10.1109/CSNT.2011.63>
- Mehmood, Z., Haneef, I., & Udrea, F. (2020). Material selection for optimum design of MEMS pressure sensors. *Microsystem Technologies*, 26(9), 2751–2766. <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04601-1>
- Mihailov, S. J., Grobncic, D., Smelser, C. W., Lu, P., Walker, R. B.,

- & Ding, H. (2011). Bragg grating inscription in various optical fibers with femtosecond infrared lasers and a phase mask. *Optical Materials Express*, 1(4), 754. <https://doi.org/10.1364/ome.1.000754>
- Mishra, R. B., & Kumar, S. S. (2019). Pre-stressed Diaphragm based Capacitive Pressure Sensor for Blood Pressure Sensing Application. *Proceedings - 2018 2nd International Conference on Advances in Computing, Control and Communication Technology, IAC3T 2018*, 70–74. <https://doi.org/10.1109/IAC3T.2018.8674028>
- MTI Corporation. (n.d.). MTI Corporation. Retrieved from <https://www.mtixtl.com/index.aspx>
- Patrick, H. J., Williams, G. M., Kersey, A. D., Pedrazzani, J. R., & Vengsarkar, A. M. (1996). Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination. *IEEE Photonics Technology Letters*, 8(9), 1223–1225. <https://doi.org/10.1109/68.531843>
- Qi, X., Wang, S., Jiang, J., Liu, K., Wang, X., Yang, Y., & Liu, T. (2019). Fiber Optic Fabry-Perot Pressure Sensor with Embedded MEMS Micro-Cavity for Ultra-High Pressure Detection. *Journal of Lightwave Technology*, 37(11), 2719–2725. <https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2876717>
- Raskin, J. P., Brown, A. R., Khuri-Yakub, B. T., & Rebeiz, G. M. (2000). Novel parametric-effect MEMS amplifier. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 9(4), 528–537. <https://doi.org/10.1109/84.896775>
- Somer, J., Szendiuch, I., & Urban, F. (2018). Optical pressure sensors for harsh environment. *EMPC 2017 - 21st European Microelectronics and Packaging Conference and Exhibition, 2018-Janua(September)*, 1–5. <https://doi.org/10.23919/EMPC.2017.8346868>
- Song, P., Ma, Z., Ma, J., Yang, L., Wei, J., Zhao, Y., ... Wang, X. (2020). Recent progress of miniature MEMS pressure sensors. *Micromachines*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/mi11010056>
- Totsu, K., Haga, Y., & Esashi, M. (2005). Ultra-miniature fiber-optic pressure sensor using white light interferometry. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 15(1), 71–75. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/15/1/011>
- Wang, R., Xie, X., Xu, X., Chen, X., & Xiao, L. (2019). Comparison of Measurements with Finite-Element Analysis of Silicon-Diaphragm-Based Fiber-Optic Fabry-Perot Temperature Sensors Rongkun.
- Wang, W., Wu, N., Tian, Y., Niezrecki, C., & Wang, X. (2010). Miniature all-silica optical fiber pressure sensor with an ultrathin uniform diaphragm. *Optics Express*, 18(9), 9006. <https://doi.org/10.1364/oe.18.009006>
- Wu, N., Tian, Y., Zou, X., Zhai, Y., Barringhaus, K., & Wang, X. (2013). A miniature fiber optic blood pressure sensor and its application in in vivo blood pressure measurements of a swine model. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 181, 172–178. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.02.002>
- Xu, B., Liu, Y., Wang, D., Jia, D., & Jiang, C. (2017). Optical fiber fabry-pérot interferometer based on an air cavity for gas pressure sensing. *IEEE Photonics Journal*, 9(2). <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2017.2685939>
- Xu, F., Ren, D., Shi, X., Li, C., Lu, W., Lu, L., ... Yu, B. (2012). High-sensitivity Fabry-Perot interferometric pressure sensor based on a nanothick silver diaphragm. *Optics Letters*, 37(2), 133. <https://doi.org/10.1364/ol.37.000133>
- Yildiz, F., Matsunaga, T., & Haga, Y. (2016). CMUT arrays incorporating anodically bondable LTCC for small diameter ultrasonic endoscope. In *2016 IEEE 11th Annual International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, NEMS 2016*. <https://doi.org/10.1109/NEMS.2016.7758198>
- Yildiz, F., Matsunaga, T., & Haga, Y. (2018). Fabrication and packaging of CMUT using low temperature co-fired ceramic. *Micromachines*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/mi9110553>
- Yildiz, F., Matsunaga, T., & Haga, Y. (2016). Capacitive micromachined ultrasonic transducer arrays incorporating anodically bondable low temperature co-fired ceramic for small diameter ultrasonic endoscope. *Micro and Nano Letters*, 11(10), 627–631. <https://doi.org/10.1049/mnl.2016.0281>
- Yildiz, Fikret. (2018). Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer (CMUT): Analytical Evaluation of Membranes Performance Under Fabrication Related Stress. *Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, 21(3), 217–225.
- Yin, J., Liu, T., Jiang, J., Liu, K., Wang, S., Qin, Z., & Zou, S. (2014). Batch-producible fiber-optic fabry-pérot sensor for simultaneous pressure and temperature sensing. *IEEE Photonics Technology Letters*, 26(20), 2070–2073. <https://doi.org/10.1109/LPT.2014.2347055>
- Zhang, W., Zhang, H., Du, F., Shi, J., Jin, S., & Zeng, Z. (2015). Pull-In Analysis of the Flat Circular CMUT Cell Featuring Sealed Cavity. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/150279>
- Zhang, Y., Yuan, L., Lan, X., Kaur, A., Huang, J., & Xiao, H. (2013). High-temperature fiber-optic Fabry-Perot interferometric pressure sensor fabricated by femtosecond laser. *Optics Letters*, 38(22), 4609. <https://doi.org/10.1364/ol.38.004609>