

Details

[DOCUMENTS](#)[EXAMINATION REPORT](#)[SEARCH REPORT](#)

Application Information

Application Number	2021/016171	Application Date	04/18/2019
Application Type	-	Grant Number	2021-GE-702610
Grant Date	10/18/2021	Registration Number	2021 016171
Registration Date	11/21/2023	Protection Type	Patent
European Patent Publication Number (B1)	-	European Patent Application Number	-
PCT Publication Number	WO2020214108A1	PCT Application Number	PCT/TR2019/050262
PCT Publication Date	2020-10-22		

Applicants

Person No	Name	Address
5058220	ODTÜ STRATEJİ GELİŞTİRME DAİRE BAŞKANLIĞI	O.D.T.Ü.ÜNVERSİT MAH DUMLUPINAR BULV 1 YOK TÜRKİYE

Inventors

Person No	Name	Address
6206031	BARİŞ BAYRAM	--
6456542	ASAF BEHZAT ŞAHİN	--
7127494	DOĞA BUSE ÇAVDIR	--
7127492	GÖKTUĞ CİHAN ÖZMEN	--
7127493	EKİN MUHARREM KARACA	--
7127491	İLKER OĞUZ	--

Invention Information

Name of Invention	FİBER OPTİK MEMS MİKROFON
Summary of Invention	Buluş, optik fiberde yayılan optik enerjinin fotodiyot çipi ile elektrik enerjisine dönüştürülmesi yoluyla elektriksel bükülebilir MEMS membrana sahip fiber optik MEMS mikrofona ilgilidir.

Attorney Information

Name	UĞUR GÜRŞAD YALÇINER YALÇINER PATENT VE DAN. LTD. ŞTİ.
Address	Tunus Caddesi No:85/3-4 06680 - ÇANKAYA/ ANKARA

Details

Application Information

Application Number	2021/016171	Application Date	04/18/2019
Application Type	-	Grant Number	2021-GE-702610
Grant Date	10/18/2021	Registration Number	2021 016171
Registration Date	11/21/2023	Protection Type	Patent
European Patent Publication Number (B1)	-	European Patent Application Number	-
PCT Publication Number	WO2020214108A1	PCT Application Number	PCT/TR2019/050262
PCT Publication Date	2020-10-22		

Applicants

Person No	Name	Address
5058220	ODTÜ STRATEJİ GELİŞTİRME DAİRE BAŞKANLIĞI	O.D.T.Ü.ÜNVERSİT MAH DUMLUPINAR BULV 1 YOK TÜRKİYE

Inventors

Person No	Name	Address
6206031	BARIŞ BAYRAM	- -
6456542	ASAF BEHZAT ŞAHİN	- -
7127494	DOĞA BUSE ÇAVDIR	- -
7127492	GÖKTUĞ CİHAN ÖZMEN	- -
7127493	EKİN MUHARREM KARACA	- -
7127491	İLKER OĞUZ	- -

Invention Information

Name of Invention	FİBER OPTİK MEMS MİKROFON
Summary of Invention	Buluş, optik fiberde yayılan optik enerjinin fotodiyot çipi ile elektrik enerjisine dönüştürülmesi yoluyla elektriksel bükülebilir MEMS membrana sahip fiber optik MEMS mikrofona ile ilgilidir.

Attorney Information

Name	UĞUR GÜRŞAD YALÇINER YALÇINER PATENT VE DAN. LTD. ŞTİ.
Address	Tunus Caddesi No:85/3-4 06680 - ÇANKAYA/ ANKARA

ÖZET

FİBER OPTİK MEMS MİKROFON

- 5 Buluş, optik fiberde (7) yayılan optik enerjinin fotodiyot (3) çipi ile elektrik enerjisine dönüştürülmesi yoluyla elektriksel bükülebilir MEMS membrana (1) sahip fiber optik MEMS mikrofon (27) ile ilgilidir.

İSTEMLER

1. Bir fiber optik MEMS mikrofon (27) olup, aşağıdakileri içermektedir:

- 5
 - Fiber optik kablonun ucunda entegre bir MEMS aygıtı,
 - MEMS aygıtının üzerine yerleştirilmiş bir fotodiyot (3) çipi,
 - MEMS aygıtının SIGNAL ve GND pedlerine elektriksel olarak bağlanan fotodiyot (3) çipi tarafından üretilen gerilim,
 - Giren lazer ışığının (6) bir kısmını membrandan optik fibere (7) geri
 - 10 yansıtabilen ve giren lazer ışığının (6) kalan kısmını membrandan fotodiyot (3) çipine iletebilen MEMS aygıtı,
 - Giren lazer ışığını (6) yansıtan optik olarak yansıtıcı malzeme ile kaplanmış bir membrana sahip MEMS aygıtı,
 - Giren lazer ışığını(6) ileten hava deliklerine sahip bir membrana sahip MEMS
 - 15 aygıtı,
 - MEMS aygıtına farklı gerilim değerlerinde gerilim uygulayan lazer diyet (2) ile gücü ayarlanabilen lazer (26) ışını,
 - Giren lazer ışığının (6) faz modülasyonu veya şiddet modülasyonu yoluyla membran yer değiştirmesinin tespiti için kullanılan ışık,
 - 20 • Fotodiyot (3) çipi boyunca gerilim üretimi için optik fiber (7) yoluyla enerji iletiminde de kullanılan ışık.

25 2. MEMS aygıtının sırasıyla yukarıdan aşağıya METAL (13), POLY2 (12), POLY1 (11), POLY0 (10) ve SiN (9) ve Si alt tabakalarından (8) oluştuğu, İstem 1'e göre fiber optik MEMS mikrofon(27).

3. Hava deliklerinin ve çıkıntılarının çapının 36 μm ve 12 μm 'ye ayarlandığı, İstem 1'e göre fiber optik MEMS mikrofon (27).

30 4. Fotodiyot (3) çipinin Ge-TIA veya InGaAs P-I-N fotodiyot (3) olduğu, İstem 1'e göre fiber optik MEMS mikrofon (27).

5. Lazer(26) işlemi dalga boyu için değerin 1064 nm olduğu, İstem 1'e göre fiber optik MEMS mikrofon (27).

6. Aktif MEMS tabanlı fiber optik akustik mikrofondaki (27) ses dalgalarına karşılık gelen büyük delikli membranın yer değiştirmesinin, ışığın faz modülasyonu ile belirlendiği, İstem 1'e göre fiber optik MEMS mikrofon (27).

7. Fiber optik kablodan gelen lazer (26) ışınının, hem bir uzaktan güç iletimi olarak hem de MEMS aygıtı aracılığıyla bir akustik sinyal sensörü olarak kullanıldığı, İstem 1'e göre fiber optik MEMS mikrofon (27).

8. MEMS membranın (1) akustik uyarıma karşı kontrol aralığı ve ölçüm sisteminin hassasiyetinin, mikrofondaki (27) MEMS aygıtının geriliminin kontrol edilmesiyle ayarlandığı, İstem 1'e göre fiber optik MEMS mikrofon (27).

9. Membranın altında yeterince büyük oksit aşındırması elde etmek için, membran üzerindeki herhangi bir noktanın, aralarında maksimum 15 μm mesafe olan bir hava deliği ile erişilebilir olması gerektiği, İstem 1'e göre fiber optik MEMS mikrofon (27).

10. Membranın, altın elektriksel hatlar ve aralarında altın ince tele sahip bir çip taşıyıcı (28) üzerinde yer aldığı, İstem 1'e göre fiber optik MEMS mikrofon (27).

11. İstem 1'e göre fiber optik MEMS mikrofon (27) olup, burada membran tasarımının boyutları aşağıda belirtilmektedir,

- Alt tabaka (8) kalınlığı (t_{subs}) $>650 \mu\text{m}$ 'dir
- Membran çapı (d_{membrane}) $1000 \mu\text{m}$ 'dir
- delikten deliğe çap ($d_{\text{HOLE-TO-HOLE}}$) $50 \mu\text{m}$ 'dir
- çıkıntı çapı (d_{dimple}) $12 \mu\text{m}$ 'dir
- delik çapı (d_{hole}) $36 \mu\text{m}$ 'dir
- metal(13) kalınlığı (t_{metal}) $0.51 \mu\text{m}$ 'dir
- POLY2 (12) kalınlığı (t_{poly2}) $1.5 \mu\text{m}$ 'dir

- Çıkıntı kalınlığı (t_{dimple}) $0.75 \mu\text{m}$ 'dir
- POLY1 (11) kalınlığı (t_{poly1}) $2.0 \mu\text{m}$ 'dir
- POLY0 (10) kalınlığı (t_{poly0}) $0.51 \mu\text{m}$ 'dir
- SiN (9) kalınlığı (t_{SiN}) $0.61 \mu\text{m}$ 'dir.

5

12. MEMS aygıtının uzaktan çalıştırıldığı ve lazer(26) gücüyle kontrol edildiği, İstem 1'e göre fiber optik MEMS mikrofon(27).

10

13. Lazer (26) ışınının gücünün, MEMS aygıtıyla entegre fotodiyot(3) aracılığıyla MEMS aygıtını kontrol edecek bir gerilim kaynağına dönüştürüldüğü, İstem 1'e göre fiber optik MEMS mikrofon (27).

TARİFNAME

FİBER OPTİK MEMS MİKROFON

5 TEKNİK ALAN

Buluş, optik fiberde yayılan optik enerjinin fotodiyot çipi ile elektrik enerjisine dönüştürülmesi yoluyla elektriksel bükülebilir MEMS membrana sahip fiber optik MEMS mikrofon ile ilgilidir.

10

ÖNCEKİ TEKNİK

Ses dalgalarını elektrik sinyallerine çeviren aygıtlar olan mikrofonlar MEMS teknolojisi ile geliştirilmektedir. MEMS mikrofonlar, ivmelenmeye karşı dirençleri, düşük enerji tüketimi, uzun süreli dengeli performansları, yüksek hassasiyetleri ve küçük boyutları ile taşınabilir teknolojilerde kullanım için ideal hale gelmiştir. MEMS fiber optik mikrofonlar, elektromanyetik etkilere karşı dayanıklı oldukları için dağıtık sensör ağlarında ve tehlikeli endüstriyel ortamlarda kullanılmaktadır. Çok düşük kayıplı fiber optik kablolar ile kilometrelerce uzağa taşınabilmektedirler. MEMS tabanlı fiber optik mikrofon araştırmaları ile akademik ve endüstriyel literatürdeki patentler incelendiğinde MEMS aygıtlarının aktif gerilim uygulanmadan pasif olarak çalıştırıldığı ve çalışırken hassasiyetlerinin sınırlı ve sabit olduğu görülmektedir. Ticari erişilebilir mikroeletromekanik sistem (MEMS) mikrofonlarında, duyulabilir frekans aralığının (20 Hz - 20 kHz) tespiti, akım/gerilim veya kapasitif ölçümler gibi bazı elektriksel ölçümler yoluyla gerçekleştirilmektedir. Bu ölçümler, sistemin ve ortamın elektriksel gürültüsüne karşı hassastır. Ayrıca bu mikrofonlar, yüksek sıcaklık ve yüksek basınç gibi zor çevresel koşullarda doğru sonuçlar vermemektedir. Fiber optik sensörler, sıcaklık, titreşim, basınç, kırılma indisi algılama için çok çeşitli algılama uygulamalarında kullanılmaktadır. Dışsal Fabry-Perot interferometresi ile fiber optik algılamaya dayalı mikroeletromekanik sistem (MEMS) teknolojisini kullanmak, yüksek frekanslı ultrasonun yüksek hassasiyetli algılamasını sağlamaktadır. Günümüzde bazı uygulamalarda kondensatör mikrofonlar yerine fiber optik mikrofonlar tercih edilmektedir. Geleneksel kondensatör mikrofon, daha fazla sinyal işleme için bir yüksek giriş empedanslı önyükseltecin gerekliliğinden dolayı bir yüksek empedanslı aygıttır¹. Kondansatör mikrofon için, bu ek

yüksek empedanslı önyükselteç, bazı karmaşık elektronik tasarımlar için bile mikrofonun performansını azaltan tasarımda ek bir yükür. Ek olarak, kablo kapasitansları nedeniyle, mikrofon ve alıcı elektroniği arasındaki mesafe çok küçük olmalıdır, bu da mikrofonun sınırlı bir alanda uygulanmasını kısıtlar. Fiber optik MEMS mikrofon, tasarımda kullanılan tüm elektronik bileşenler sensör probunun dışında tutulduğundan elektromanyetik girişime karşı çok yüksek bağışıklığa sahiptir¹. MEMS teknolojisinin temel avantajı, temel olarak membranın boyutunu ayarlayarak istenen cevap aralığını, bant genişliğini ve hassasiyeti elde etme esnekliği sunmasıdır^{1,2}. Ayrıca fiber optik mikrofonlarda faz ve şiddet modölasyonu olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Faz modölasyonu tekniği, ölçüm aralığı ve dayanıklılık göz önüne alındığında daha iyi performans sağlamaktadır^{2,3}. Bu nedenlerle, duyulabilir frekans aralığı tespiti için bir MEMS mikrofonu tasarlayanın yeni bir yolunu bulma gerekliliği ortaya çıkmıştır. Ses dalgalarını algılama yöntemi olarak ışığın kullanılmasının, ses dalgalarını elektriksel olarak algılayan mikrofonlara göre çok daha iyi performans sağladığı gösterilmiştir⁴.

Küçük yer değiştirme ölçümü için optik algılama tekniği, endüstriyel zarar vermeyen teknikler, titreşim ve elektromanyetik girişimlere karşı bağışıklık ve denge, tekrarlanabilirlik, zorlu ortamlara karşı dayanıklılık, yüksek hassasiyet, yüksek çözünürlük ve hızlı cevap gibi benzersiz avantajları için mikroyapıların tasarımı ve test edilmesi için hayati öneme sahiptir³. Fiber optik mikrofon, geniş dinamik aralık, yüksek hassasiyet ve geniş bant genişliğinde düz frekans cevabı nedeniyle çeşitli uygulamalarda yenilikçi uygulamalara olanak sağlayabilmektedir¹.

Son yirmi yılda, dışsal Fabry-Perot interferometre tabanlı basınç sensörleri önemli bir gelişim göstermiştir ve üzerinde önemli araştırmalar yapılmıştır. Diyafram tabanlı dışsal Fabry-Perot interferometre sensörleri, düşük basınç ve akustik dalga tespiti için başarıyla kullanılmıştır⁵.

Yüksek güvenilir Fabry-Perot interferometre tabanlı basınç sensörü elde etmek için en önemli kısım MEMS membrandır. Fiber boyunca yayılan ışık, fiber ucundaki membrana çarpmaktadır ve ardından geri yansımaktadır. Bu noktada fiber ucu ile membran arasında Fabry-Perot boşluğu elde edilmektedir. Membrandaki küçük yer değiştirmeler, boşluktan gelen girişimsel saçakları analiz edilerek tespit edilmektedir. Faz modölasyon tekniğinin uygulanabilirliği ölçümlerle deneysel olarak kanıtlanmıştır⁴.

Membranın boyutu ayarlanarak, membranın havadaki elektriksel empedansı ayarlanabilmektedir¹. Fiber optik MEMS mikrofondaki hem giren hem de yansıyan ışınlar aynı optik fiberi paylaştığından, fiberdeki sıcaklık, basınç ve titreşimdeki değişiklikler gibi çevresel etkiler Fabry-Perot interferometre tarafından elde edilen girişim sinyalini önemli ölçüde etkilememektedir¹. Fiber optik mikrofon, gerçek zamanlı ve uzaktan algılama potansiyeline sahiptir. Bu tip sensör ayrıca titreşimi ve ivmeyi ölçmek için geliştirilebilmektedir. Yapının basitliği ve kullanım kolaylığı nedeniyle bu tasarım çeşitli uygulamalarda kullanılabilmektedir⁴. Basınç sensörleri, fiber optik fikri ile de kullanılabilmektedir. Bu basınç sensörleri ile 20 °C - 300 °C sıcaklık aralığında 0 kPa (94 dB) ile 600 kPa (210 dB) arasında lineer basınç hassasiyeti elde edildiği gösterilmiştir⁶.

Son zamanlarda, bir mikrofon uygulaması için Parylen-C ve grafen oksit gibi farklı membran malzemeleri önerilmiştir. Parylen-C, 20 Hz'de 2000 nm/Pa derecesinde güçlü cevap ortaya koymaktadır. Parylen-C'nin biyouyumluluğu nedeniyle, bu akustik sensörlerin biyomedikal uygulamalarda çok faydalı olduğu söylenmektedir⁷. Grafen oksit üretimindeki gelişmeler ile istenilen kalınlıkta güvenilir üretimi mümkün hale gelmektedir. Grafen oksit bazlı membranın 100 Hz-20 kHz aralığında düz cevap verdiği gösterilmiştir⁸. Optik fiber mikrofonlar için oluklu gümüş membranların kullanılabileceği de gösterilmiştir. Membran üzerinde oluşturulan olukların mikrofonun performansını iyileştirdiği gösterilmiştir ve yeni tasarım, 63 Hz - 1 kHz aralığında 50 nm/Pa derecesinde cevap ortaya koymaktadır⁹. Yeni membran malzemeleri bulma çabalarına ek olarak, MEMS membranların şekil ve boyutunun iyileştirilmesine yönelik araştırmalar devam etmektedir. Önerilen bir yöntem, bir halka şeklinde oluklu MEMS membranın mikroüretimini yapmaktadır. Bu yöntemde önerilen tasarım, 1 kHz'de 3 µPa/Hz^{1/2}'lik minimum ölçülebilir basınç seviyesini algılayabilmektedir¹⁰.

BULUŞUN AMAÇLARI VE KISA BİR AÇIKLAMA

MEMS teknolojisi için yeni bir yaklaşım olan fiber optik MEMS mikrofon bu dokümanda sunulmaktadır. Buluş, bir lazer güçlü aktif MEMS fiber optik akustik sensörlü mikrofondur.

Mikrofonların hayatımızda önemli bir yeri vardır. Geleneksel mikrofonların yerini artık MEMS mikrofonlar almaktadır. Küçük boyutlu MEMS mikrofonlar kapasitif ve piezoelektrik modeller olarak temin edilmektedir.

- 5 MEMS mikrofonlar, kapasitif veya piezoelektrik elektriksel ölçüm tekniklerine dayandıkları için RF ve mikrodalga sinyallerinden ve MRG gibi yüksek manyetik alanlardan etkilenmektedir.

- 10 Fiber optik MEMS mikrofonlar, MEMS pasif diyafram ve fiber optiklerin birleştirilmesiyle elde edilmektedir. Bu buluşta, MEMS pasif diyafram yerine elektriksel olarak ayarlanabilen bir MEMS membran sunulmaktadır. Ayrıca, bir fotodiyot çipi aracılığıyla MEMS membranın tam üzerine gelen giren lazer ışığından elektrik gücü üretilmektedir. Bunu yaparken, fiber optik kablo boyunca pratik olmayan elektriksel iletkenlik ortadan kaldırılmış ve büyük kapasiteli kullanım maliyeti önemli ölçüde azaltılmıştır. Bu noktada optik kablo içerisinde taşınan ışığın
15 enerjisinin bir fotodedektör vasıtasıyla membran üzerindeki elektrik gerilimine dönüştürülmesi fikrinden yararlanılmaktadır.

- Algılama elemanı, fiber optik MEMS mikrofonun en kritik parçasıdır. Bu algılama elemanı olan membran, mikrofon istenilen aralıkta istenilen hassasiyette çalışacak şekilde
20 tasarlanmıştır. Bu buluşta, bir fiber optik mikrofonda kullanılmak üzere özel tasarlanmış MEMS membranın tasarımı ve karakterizasyonu, duyulabilir frekans aralığında cevap verecek şekilde gerçekleştirilmektedir. Bu tasarım, üzerinde simetrik dağılımlı hava deliklerine sahip elektriksel bükülebilir membrana sahiptir. Mikroüretim, ticari erişilebilir çok-kullanıcılı ve çok-projeli bir servis (POLYMUMPS, MEMSCAP Inc., Fransa) kullanılarak yapılmaktadır.
25 Membranın tam elektriksel ve optik karakterizasyonları sırasıyla bir empedans analizörü ve lazer vibrometer kullanılarak yapılmaktadır. Tasarım, bunu optik enterferometre tabanlı mikrofonlar için uygun hale getiren yansıtıcı altın kaplı yüzey içermektedir. Membranın geçici ve kararlı durum analizinden yararlanılmaktadır ve membranın genel cevabının yanı sıra konumsal cevabı da elde edilmektedir. Membranın temel rezonansı, ilgili frekans aralığı olan
30 20 kHz'nin biraz üzerinde olan 28 kHz'dir. 10 nm'lik tepe yer değiştirmesi, 100 mV tepeden tepeye gerilim ve 1V DC gerilim koşulları altında vibrometer ölçümlerinden elde edilmektedir. Uygulanan AC gerilimi basınca dönüştürdükten sonra, membranın hassasiyetinin 28 kHz'de 40 nm/Pa civarında olduğu hesaplanmıştır.

Tasarımın simetrisi de konumsal analizle doğrulanmaktadır. Bu buluş, optik mikrofonlar için MEMS membranın tasarımına yönelik yeni bir yön sunmaktadır. Bu buluş, fiber optik mikrofon uygulamaları için yeni membran malzemeleri bulmak yerine yeni bir membran gerçekleştirerek için MEMS teknolojisini kullanmaktadır. Bu MEMS membran, duyulabilir frekans aralığına cevap verecek şekilde tasarlanmıştır. Bu yeni tasarım, membran yer değiştirmesinin tespiti için optik algılama ile uyumludur. Olgun mikroüretim süreçlerinin kullanılması, tasarımı güvenilir ve tekrarlanabilir hale getirmektedir. Membranın farklı uyarımlara karşı kararlı durum ve geçici cevaplarının kapsamlı analizleri yapılmaktadır ve tasarımın performansı doğrulanmaktadır.

Buluşun bir yönüdür, burada MEMS aygıtı sırasıyla yukarıdan aşağıya METAL, POLY2, POLY1, POLY0, SiN ve Si alt tabakasından oluşmaktadır.

Buluşun bir başka yönüdür, burada hava deliklerinin ve çıkıntılarının çapı 36 µm ve 12 µm'ye ayarlanmaktadır.

Buluşun bir başka yönüdür, burada bir fotodiyot çipi, Ge-TIA veya InGaAs P-I-N fotodiyottur.

Buluşun bir başka yönüdür, burada lazer işlemi dalga boyu için değer 1064 nm'dir.

Buluşun bir başka yönüdür, burada aktif MEMS tabanlı fiber optik akustik mikrofondaki ses dalgalarına karşılık gelen büyük delikli membranın yer değiştirmesi ışığın faz modülasyonu ile belirlenmektedir.

Buluşun bir başka yönüdür, burada fiber optik kablodan gelen lazer ışın, hem uzaktan güç iletimi hem de MEMS aygıtı aracılığıyla akustik sinyal sensörü olarak kullanılmaktadır.

Buluşun bir başka yönüdür, burada MEMS membranın akustik uyarıma karşı kontrol aralığı ve ölçüm sisteminin hassasiyeti, MEMS aygıtının mikrofondaki geriliminin kontrol edilmesiyle ayarlanmaktadır.

Buluşun bir başka yönüdür, burada membran altında yeterince büyük oksit aşındırması elde etmek için, membran üzerindeki herhangi bir nokta, aralarında maksimum 15 μm mesafe olan bir hava deliği ile erişilebilir olmalıdır.

- 5 Buluşun bir başka yönüdür, burada membran, altın elektriksel hatlar ve aralarında altın ince tele sahip bir çip taşıyıcı üzerinde yer almaktadır.

Buluşun bir başka yönüdür, burada membran tasarımının boyutları aşağıdaki gibidir:

- 10
- Alt tabaka kalınlığı (t_{subs}) $>650 \mu\text{m}$ 'dir
 - Membran çapı (d_{membrane}) $1000 \mu\text{m}$ 'dir
 - delikten deliğe çap ($d_{\text{HOLE-TO-HOLE}}$) $50 \mu\text{m}$ 'dir
 - çıkıntı çapı (d_{dimple}) $12 \mu\text{m}$ 'dir
 - delik çapı (d_{hole}) $36 \mu\text{m}$ 'dir
- 15
- metal kalınlığı (t_{metal}) $0.51 \mu\text{m}$ 'dir
 - POLY2 kalınlığı (t_{poly2}) $1.5 \mu\text{m}$ 'dir
 - Çıkıntı kalınlığı (t_{dimple}) $0.75 \mu\text{m}$ 'dir
 - POLY1 kalınlığı (t_{poly1}) $2.0 \mu\text{m}$ 'dir
 - POLY0 kalınlığı (t_{poly0}) $0.51 \mu\text{m}$ 'dir
- 20
- SiN kalınlığı (t_{SiN}) $0.61 \mu\text{m}$ 'dir.

Buluşun bir başka yönü olup, burada MEMS aygıtı, lazer gücü ile uzaktan çalıştırılmaktadır ve kontrol edilmektedir.

- 25 Buluşun bir başka yönü olup, burada lazer ışınının gücü, MEMS aygıtı ile entegre fotodiyot vasıtasıyla MEMS aygıtını kontrol edecek bir gerilim kaynağına dönüştürülmektedir.

BULUŞU AÇIKLAYAN ŞEKİLLERİN AÇIKLAMALARI

- 30 Bu buluş ile geliştirilen fiber optik MEMS mikrofön daha iyi açıklamak için kullanılan şekiller ve açıklamaları aşağıdaki gibidir:

Şekil 1, güçlü aktif MEMS tabanlı fiber optik akustik sensörlü

- Şekil 1a, Fabry Perot interferometre ölçüm sistemi
- Şekil 1b, Fotodiyot tarafından sağlanan aktif MEMS fiber optik mikrofonun yapısı
- Şekil 2, MEMS membran tasarımının en kesit görünümü
- Şekil 3, MEMS yapısının elektriksel empedans ölçümleri
- 5 Şekil 3a, gösterildiği gibi prob istasyonu tablasındaki membran
- Şekil 3b, Gösterildiği gibi prob istasyonundan alınan mikroskop görünümü
- Şekil 4, Lazer vibrometer kullanılarak MEMS yapısının yer değiştirme ölçümleri
- Şekil 5, Gösterildiği gibi membranın üstten görünümü
- Şekil 5a, Hava delikli membranın polisilisyum tabakası
- 10 Şekil 5b, Hava deliklerini ve çıkıntılarını gösteren membranın yakınlaştırılmış görünümü
- Şekil 6, Optimum membran tasarımı için delik düzeni
- Şekil 7, Elektriksel karakterizasyon kurulumu
- Şekil 8, Optik karakterizasyon kurulumu
- Şekil 9, Frekansın bir fonksiyonu olarak membranın bükülmesi
- 15 Şekil 10, Membrandan farklı radyal mesafeler için seçilen alan üzerindeki ortalama yer değiştirme
- Şekil 11, Membranın simetrisinin analizi. Membranın merkezinden (a) 50 μm , (b) 150 μm , (c) 250 μm ve (d) 350 μm ile ayrılan iki noktanın cevabı
- Şekil 12, Membranın (a) 28 kHz, 51 kHz ve 109 kHz'de sürekli dalga girişlerine (kararlı
- 20 durum) konumsal cevabı ve (b) 28 kHz, (c) 51 kHz, (d) 109 kHz'de (geçici) bir sinüs dalgası döngüsü

Referans Numaraları

1. Mems membran
- 25 2. Lazer diyot
3. Fotodiyot
4. Optik fiber sikülatör
5. Yansıyan ışık
6. Giren lazer ışığı
- 30 7. Optik fiber
8. Alt tabaka
9. SiN
10. POLY0

- 11. POLY1
- 12. POLY2
- 13. Metal
- 14. Triaks bağlantılı prob istasyonu
- 5 15. Mikroskop
- 16. İğne tutucu
- 17. İğne
- 18. Tabla
- 19. Monitör
- 10 20. Ağ ve empadans analizörü
- 21. Güç bölücü
- 22. Bilgisayar
- 23. Lazer vibrometre
- 24. Mikroskop & kompakt sensör kapağı
- 15 25. Altın teller
- 26. Lazer
- 27. Mems mikrofon
- 28. Çip taşıyıcı
- 29. Dijital osiloskop
- 20 30. Fonksiyon kaynağı

BULUŞUN DETAYLI AÇIKLAMASI

Mevcut buluş aşağıda ayrıntılı olarak tarif edilmiştir. Bu buluş, optik mikrofonlar (27) için
25 MEMS membranının (1) tasarımı için yeni bir yön sunmaktadır.

Bu bölümde bir yenilik gösterilecektir.

Buluş, bir lazer (26) güçlü aktif MEMS tabanlı fiber optik akustik sensörlü mikrofondur (27)
30 (Şekil 1). MEMS aygıtı, bir optik fiber (7) kablo uç yapısı ve bir fotodiyot (3) çipi ile entegre
edilmektedir. Fiber optik kablodan gelen lazer (26) ışınının bir kısmı, bir Fabry-Perot girişimi
oluşturmak için MEMS alt tabaka (8) ve membrandan geri geçmektedir ve fiber optik
girişimsel hareket sensörüne gitmektedir. Gelen lazer (26) ışınının geri kalan kısmı fotodiyot

(3) ipini aydınlatarak MEMS aygıtını aktive etmek için elektrik gücünü oluşturmaktadır. Lazer (26) ışını gücü değiştirilerek MEMS aygıtı farklı gerilim değerlerinde çalıştırılmaktadır. Bu sayede yüksek iletim faktörüne ve dinamik cevap aralıklarına sahip ayarlanabilir MEMS fiber optik mikrofon (27) aygıtları elde etmek mümkündür. Lazer (26) işlemi dalga boyu için 1064 nm değeri seçilmiştir, çünkü bu dalga boyu MEMS aygıtını düşük silisyum alt tabaka (8) yapısı kaybıyla geçebilmektedir ve MEMS aygıtını çalıştıracak InGaAs P-I-N fotodiyot(3)unu aydınlatabilmektedir.

MEMS membranı (1), Lazerdiyot (2), fotodiyot(3) Ge-TIA ve fiber optik sirkülatör (4) şekil 1a'da gösterilmektedir. şekil 1a'da 1064 nm değerinde gösterilen lazer diyot (2). MEMS membranı (1), fotodiyot (3), yansıyan lazer ışığı (5), giren lazer ışığı (6) ve Optik fiber (7) 1b'de gösterilmiştir. şekil 1b'de $\Phi 0125 \mu\text{m}$ ve $\Phi 0425 \mu\text{m}$ olarak gösterilen optik fiber (7).

MEMS fiber optik mikrofonlar (27), akustik ses dalgasına karşılık gelen bir titreşimli diyaframa sahiptir. Bu diyafram hiçbir şekilde elektriksel olarak kontrol edilebilen bir yapı değildir, yani pasiftir. Diyafram rezonans frekansları sabittir. Fiber optik kablo ile gelen ışığın şiddeti veya faz modlasyonu, ses dalgasına karşılık gelen diyaframın yer değiştirmesi ile belirlenmektedir. Genel olarak diyafram yapısının farklı malzemeleri veya diyafram yüzeyi oluk şekilleri ile hassasiyet arttırılmaya çalışılmaktadır.

Buluşta, aktif MEMS tabanlı fiber optik akustik mikrofondaki (27) ses dalgalarına karşılık gelen büyük delikli membranın (şekil 2) yer değiştirmesi ışığın faz modlasyonu ile belirlenmektedir. Bu, membranın ses dalgalarına karşı hassasiyetini ayarlamasını sağlamaktadır.

1) MEMS aygıtı, lazer (26) gücü ile uzaktan çalıştırılmaktadır ve kontrol edilmektedir. Fiber optik kablodan gelen lazer (26) ışını, hem uzaktan güç iletimi hem de MEMS aygıtı aracılığıyla akustik sinyal sensörü olarak kullanılmaktadır. Lazer (26) ışınının gücü, MEMS aygıtı ile entegre fotodiyot (3) vasıtasıyla MEMS aygıtını kontrol edecek bir gerilim kaynağına dönüştürülmektedir. Literatürde lazer (26) gücü ile aktive edilen bir MEMS çalışmasına rastlanmamıştır.

2) Aktif MEMS tabanlı fiber optik akustik sensörde, MEMS membranının (1) akustik uyarıma karşı kontrol aralığı ve ölçüm sisteminin hassasiyeti, MEMS aygıtının mikrofondaki (27) gerilimi kontrol edilerek ayarlanmaktadır. Bu, geleneksel MEMS fiber optik mikrofonlardan (27) daha geniş bir dinamik cevap aralığı sağlamaktadır. Literatür araştırmasında aktif güç kaynağı ile çalışan MEMS fiber optik mikrofon (27) bulunmamıştır.

3) MEMS aygıtı, bir optik fiber (7) kablo uç yapısı ve bir fotodiyot (3) çipi ile entegre edilmektedir. Fiber optik kablodan gelen lazer (26) ışını hem uzaktan güç iletimi hem de MEMS aygıtı aracılığıyla akustik sinyal sensörü olarak kullanılacaktır. Bir sensör sisteminde uzaktan güç iletimi için lazer (26) ışını kullanan bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır.

Işık sadece yer değiştirme için değil, aynı zamanda enerji iletimi için de kullanılmaktadır. Bu enerji iletimi ile kullanım sırasında rezonans frekansını ayarlayabileceğimiz bir aktif membranın varlığı özellikle çok geniş bir frekans aralığında (20 Hz – 20,000 Hz) çalışan mikrofonlar (27) için önemlidir.

Bir fiber optik MEMS mikrofonun (27) membranı, onun algılama elemanıdır. Membran tasarımı, membranın tekrarlanabilirliği, dayanıklılığı, kararlı performansı gibi çeşitli konularla ilgilidir. Bu konular mikroüretim sürecine yöneliktir. Mikroüretim tesisleri tarafından sunulan ticari erişilebilir çok-kullanıcı çok-süreçlere (MUMPS) dayanarak, POLYMUMPS süreci (MEMSCAP Inc., Fransa), burada amaçlanan mikrofon (27) uygulaması için sınırlandırmayan süreç tasarım kuralları tarafından desteklenen havada çalışır membranların mikroüretimine uygunluğu nedeniyle seçilmektedir. Ayrıca, bu olgun sürecin tekrarlanabilirliği ve tutarlılığının, ışığın optik faz tespiti için son derece önemli olan yüksek kaliteli membranın gerçekleştirilmesi için avantajlı olduğu düşünülmektedir.

Bu süreç polisilisyum tabakalarına dayanmaktadır. Membran tasarlama yeteneği ve polisilisyum tabakalarının altına feda oksit tabakaları aşındırma yeteneği, bu süreci tasarım için değerli kılmaktadır. Feda oksit tabakalarının mükemmel bir şekilde aşındırılması, polisilisyum tabakalara deliklerin yerleştirilmesini gerektirmektedir. Herhangi bir aşındırma deliği arasındaki mesafe 30 μm 'den büyük olamamaktadır. Tasarımlarda, membranın tasarımındaki süreç varyasyonları da dikkate alınmaktadır. Membranın üzerine ışığın membrandan yansımaları için metal (13) bir tabaka yerleştirilmektedir. Oksit giderme için standart HF ıslak aşındırmaya

ek olarak CO₂ kuru aşındırma kullanılmaktadır. CO₂ kuru aşındırma, membranda kullanılan büyük en-boy oranı (1:500) için membran ve alt tabaka (8) arasındaki adezyonun yapışmasını önlemek için kullanılmaktadır. 2 µm kalınlığa sahip POLY2 (12) membran malzemesinin (9) çok düşük basma gerilmesi (< 7 MPa) ve membran üzerinde 0.51 µm METAL (13) kaplamanın çok düşük çekme gerilmesi (<24 MPa), 1 MPa'dan düşük olan bir eşdeğer gerilmeyle sonuçlanan neredeyse ideal bir gerilme dengelemesi ile sonuçlanmaktadır¹¹. Bu, en-boy oranlı membranın kalıntı gerilmesi nedeniyle ihmal edilebilir bir çökmeye sahip olmasını sağlamaktadır.

10 Membranın çapı, duyulabilir frekans aralığında yüksek cevap elde etmek için ayarlanmaktadır. Denklem 1'de verilen formül kullanılmaktadır¹². Bu formül, membran malzeme özelliklerini ve membran boyutlarını hesaba katarak bir dairesel membranın ilk rezonans frekansını vermektedir. Bu tasarım için malzeme özellikleri ve gerekli boyutlar MEMSCAP'tan alınmıştır¹².

15

$$f \cong \frac{20.42}{\pi a^2} \sqrt{\frac{D}{h\rho}} \quad , \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \quad (1)$$

burada a çap, h kalınlık, p 2330 kg/m³ olarak alınan kütle yoğunluğu, E 169 GPa olarak alınan Young Modülü ve µ 0.22 olarak alınan membranın Poisson oranıdır.

20

20 Hz - 20 kHz frekans bandında sesli sinyallerin algılanması istendiğinden, bu bandın üst sınırının biraz üzerinde olan rezonans frekansı gereklidir.

Membranın ortaya çıkan tasarımı, hava delikli bir polisilisyum membrandan oluşmaktadır ve buna örgülü-yapılı membran adı verilmektedir. Membranın üstten görünümü Şekil 5'te gösterilmektedir.

Hava deliklerinin ve çıkıntıların çapı sırasıyla 36 µm ve 12 µm'ye ayarlanmaktadır. İki hava deliğinin merkezleri arasındaki mesafe tasarım kurallarına göre belirlenmektedir. Membran altında yeterince büyük oksit aşındırma elde etmek için, tasarım kuralları gereği, membran üzerindeki herhangi bir nokta, aralarında maksimum 15 µm mesafe bulunan bir hava deliği ile erişilebilir olmalıdır. Çözülen geometrik problem Şekil 6'da gösterilmektedir.

30

Tasarım tamamen simetriktir ve delikler ve bunların ayrımları membran üzerinde her iki yönde de aynıdır. Bu tasarımda deliklerin çapı ve deliklerin merkezleri arasındaki mesafe olmak üzere iki değişken vardır. Deliklerin yerleşimi tam simetrik olduğundan, herhangi üç hava deliği merkezi olarak alınan köşelerle bir eşkenar üçgen elde edilmektedir. Hesaplamalardan sonra, $2d_{HOLE-TO-HOLE} - \sqrt{3}d_{HOLE} \lesssim 30\sqrt{3}\mu m$ olduğu bulunmaktadır. Diğer bir amaç ise dolgu oranını maksimize etmektir. Tasarımın dolgu oranı (FF) $FF = 1 - \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{d_{HOLE}}{d_{HOLE-TO-HOLE}} \right)^2$ olarak verilmiştir. Membrandan yansıyan ışığın miktarının, membranın yer değiştirmesinin tespiti için yeterince büyük olması gerektiğinden, en az %50 dolgu oranı hedeflenmektedir.

Bu nedenle, kısıtlama $\frac{d_{HOLE}}{d_{HOLE-TO-HOLE}} < 0.75$ olmaktadır. Her iki kısıtlamayı da optimize etmek için, güvenlik marjlarıyla $d_{HOLE} = 36 \mu m$ ve $d_{HOLE-TO-HOLE} = 50 \mu m$ seçilmektedir. Bu durumda, dolgu oranı %53 olmaktadır ve delikten deliğe mesafe $50 \mu m$ olmaktadır. Membran üzerindeki herhangi bir nokta ile hava deliği arasındaki maksimum mesafe $14 \mu m$ 'dir.

Elde edilen sonucun en kesit görünümü Şekil 2'de gösterilmiş ve bu şekildeki parametre değerleri Tablo I'de verilmiştir.

Tablo I. Tasarımın temsili boyutlarının değerleri.

Boyut parametresi	Değer
Membran çapı ($d_{MEMBRANE}$), μm	1000
Destek uzunluğu ($d_{SUPPORT}$), μm	150
Delikten deliğe çap ($d_{HOLE-TO-HOLE}$), μm	50
Çıkıntı çapı (d_{DIMPLE}), μm	12
Delik çapı (d_{HOLE}), μm	36
Metal kalınlığı (t_{METAL}), μm	0.51
POLY2 kalınlığı (t_{POLY2}), μm	1.5
Çıkıntı kalınlığı (t_{DIMPLE}), μm	0.75
POLY1 kalınlığı (t_{POLY1}), μm	2.0

POLY0 kalınlığı (t_{POLY0}), μm	0.51
SiN kalınlığı (t_{SiN}), μm	0.61
Alt tabaka kalınlığı (t_{SUBS}), μm	>650

ELEKTRİKSEL VE OPTİK ÖLÇÜM KURULUMU

Mikroüretilmiş MEMS membranın (1) performansını karakterize etmek ve doğrulamak için elektriksel empedans ve optik lazer vibrometre (23) ölçümleri kullanılmaktadır. Tüm membranın kümülatif cevabı elektriksel olarak elde edilirken, 2 μm kadar küçük noktaların konumsal cevabı optik ölçümlerle toplanabilmektedir. Membranın elektriksel olarak karakterize etmek için ağ ve empedans analizörü (5061B, Keysight Technologies, California, ABD) ve triaks bağlantılı prob istasyonu (EPS150X, Cascade MicroTech, Oregon, ABD) Şekil 7'de gösterildiği gibi kullanılmaktadır. LF-Out portunu kullanan Seri Kazanç-Faz modu kullanılmaktadır.

Bu kurulumda, membran, prob istasyonunun tablasına (18) yerleştirilmektedir. MEMS çipinin toprak ve sinyal pedlerinden gelen elektrik bağlantıları, tungsten iğneler (PTT-120-/4-25, Cascade MicroTech, Oregon, ABD) ve ardından ağa triaks-BNC adaptörü ve empedans analizörü kullanılarak yapılmaktadır. Yüksek empedanslı aygıtın düşük frekans ölçümünün önerilen yapılandırmasını uygulamak için aygıtı ağ analizörüne uygun şekilde bağlamak için bir güç bölücü (21) (Agilent 11667L) kullanılmaktadır.

1 kHz-100 kHz frekans aralığında herhangi bir rezonans frekansını tespit etmek için seri kapasitans (C_s) ve seri direnç (R_s) ölçümleri alınmaktadır. Ölçümler sırasında Ara Frekans Bant Genişliği (IFBW), 32 ortalaması ile 500 Hz olarak ayarlanmaktadır. 10 dBm (1 $V_{peak-to-peak}$) sinüzoidal sinyal kullanılmaktadır ve verilen frekans aralığında 1601 veri noktası alınmaktadır. DC gerilimi 0 V'dan 3 V'a değiştirilmektedir.

Optik karakterizasyon, Şekil 8'de gösterildiği gibi kurulum ile yapılmaktadır. Lazer Vibrometre (23) (OFV5000, Polytec, Almanya) üzerindeki dijital osiloskop (29) (DSO6014A, Agilent, California, ABD), fonksiyon kaynağı (30) (33250A, Agilent, California, ABD) ve LabView içeren bir kişisel bilgisayar (22) (National Instruments, Texas, ABD) ile birlikte kurulumdaki aygıtları kontrol etmek için kullanılmaktadır.

Optik karakterizasyon, elektriksel uyarımın bir sonucu olarak MEMS membranın (1) yer değiştirmesinin saptanmasına dayanmaktadır. Membrana 633 nm dalga boyunda bir lazer (26) ışığı gönderilmektedir ve yansıyan ışık (5), membran ve lazer (26) ışığı arasında kullanılan 5 interferometre aracılığıyla membranın bükülmesini anlamak için kullanılmaktadır. Nitekim, bu yer değiştirme ölçümü yöntemi, fiber optik mikrofonlarda (27) kullanılan yöntemle çok benzerdir.

Membran üzerinde akustik bir basınç oluşturmak için, elektriksel uyarım, 1 V'lık bir DC 10 gerilimi ile 0.1 V tepeden tepeye sinüzoidal sinyal üreten bir fonksiyon kaynağı (30) tarafından yapılmaktadır. Uyarım frekansı 3 kHz'den 150 kHz'e taranmaktadır. Membranın genel cevabının yanı sıra, bu optik karakterizasyon kurulumu, membranın konumsal incelemesini sağlamaktadır. Yani lazer (26) ışığını membran üzerinde farklı noktalara yönlendirerek, membranın herhangi bir uyarıma karşı konumsal cevabı da elde edilebilmektedir.

SONUÇLAR

Elektriksel karakterizasyon kurulumu, membranın Şekil 3(a)'da gösterildiği gibi prob istasyonu tablasına (18) yerleştirilmesiyle hazırlanmaktadır. İğneler kullanılarak elektriksel 20 bağlantılardan yararlanılmaktadır. Prob istasyonundan alınan mikroskop (15) görüntüsü Şekil 3(b)'de gösterildiği gibidir.

Toprak plakadaki membranın çökmesini önlemek için mikrofon (27) plakaları arasında maksimum 3V DC gerilim uygulanmaktadır. Ölçülen C_s ve R_s değerleri Şekil 3'te 25 gösterilmiştir. Sırasıyla 30 kHz ve 56 kHz'de iki rezonans frekansı gözlemlenmektedir.

Optik ölçüm kurulumunda membran, Şekil 4(b)'de gösterildiği gibi bir çip taşıyıcıya (28) yerleştirilmektedir ve elektrik pedleri, Şekil 4(b)'de gösterildiği gibi çip taşıyıcı (28) üzerindeki elektriksel olarak iletken altın hatlara altın ince tellerle bağlanmaktadır. Çip taşıyıcı 30 (28), membranı pedleri aracılığıyla elektriksel olarak uyarmak için kullanılan iki SMA (SubMiniature versiyon A) konektörüne sahiptir. Sinyal üretici MEMS aygıtına bağlanmaktadır ve ayrıca vibrometrenin çıkışı için tetikleme sinyali olarak osiloskopa (29) da bağlanmaktadır.

Optik ölçümde, tüm veriler, membran üzerindeki 21 noktadan, genel cevabının yanı sıra konumsal cevabını anlamak için alınmıştır. Bu 21 nokta, Şekil 4(a)'da gösterildiği gibi membranın merkezindeki 11'inci nokta ile birbirinden 50 µm uzaklıktadır. Giriş frekansı, sürekli dalga (CW) sinüzoidal uyarım ile 3 kHz'den 150 kHz'e taranmaktadır. Membranın hem konumsal hem de frekans alanındaki cevabı Şekil 2(b)'de gösterilmektedir. 28 kHz, 51 kHz ve 109 kHz olmak üzere üç rezonans frekansı olduğu görülmektedir. Membranın merkezi etrafındaki bölge, herhangi bir girişe karşı en yüksek cevabı vermektedir.

10 Membranın bükülme miktarı dikkate alınarak toplam cevabı da konumsal veriler işlenerek elde edilmektedir. Genel cevap ve merkezi noktanın cevabı Şekil 9'da gösterilmektedir. 28 kHz'de, membranın ortalama yer değiştirmesi ortalama olarak 5 nm ve merkezde 10 nm'dir. Bu rezonansın oransal 3-dB bant genişliği %32'dir.

15 Alan başına maksimum bükülmeyi elde etmek için lazer (26) ışığının nereye odaklanacağını belirlemek için 28 kHz'deki veri noktalarının cevapları analiz edilmektedir. Membranın merkezinden farklı radyal mesafeler için seçilen alan üzerindeki ortalama yer değiştirme elde edilmektedir ve elde edilen özellikler Şekil 10'da gösterilmektedir. Işığı odaklamak için optimum alan 150 µm'lik bir yarıçapa sahiptir. Ortalama yer değiştirme, yarıçapı 50 µm ile 20 250 µm arasında değişen dairesel alanlar için neredeyse sabittir.

Membranın cevabındaki simetriyi analiz etmek için, membranın merkezinden 50 µm, 150 µm, 250 µm ve 350 µm uzakdaki noktalardan alınan veriler kullanılmaktadır. Bu karakteristikler Şekil 11'de gösterilmektedir.

25 Membranın merkezinden 50 µm uzaklıktaki noktalar için tepe cevaplarının aynı frekanslarda olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum 100 µm uzaklıktaki noktalar için de geçerlidir. 250 µm uzaklıktaki noktalar için, ikinci rezonans frekansının konumu %3.8 oranında hafifçe değişmektedir. 350 µm uzaklıktaki noktalar için başka küçük sapmalar gözlemlenmektedir. 30 Birinci, ikinci ve üçüncü rezonans frekansları sırasıyla %3.6, %5.9 ve %4 oranında değişmektedir.

Membranın 28 kHz, 51 kHz ve 109 kHz'deki giriş sinyallerine konumsal kararlı durum cevapları Şekil 12(a)'da gösterilmektedir. Membranın zamansal geçici cevabını elde etmek için, 28 kHz, 51 kHz ve 109 kHz rezonans frekanslarında tek döngülü sinüzoidal sinyaller kullanılmaktadır. Cevaplar Şekil 12(b-d)'de gösterildiği gibidir. Membranın 28 kHz'de girişe verdiği geçici cevabın en uzun çınlama cevabına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Tüm geçici cevaplar zamanla bozulmaktadır.

Seri kapasitör ve seri direnç olarak modellenemediğinden, elektriksel karakterizasyon membrana uygulanabilmektedir. Paralel plakalı kapasitör, membran ve alt tabaka (8) paralel plakalar olarak düşünülerek görselleştirilebilmektedir. Mikrofonun (27) tasarımında, membranın hemen altında 2 μm olan alt tabaka (8) üzerine 450 μm yarıçaplı, 0.5 μm kalınlığında polisilisyum tabaka eklenmektedir. Bu parça toprak plaka olarak adlandırılmaktadır ve polisilisyum hatlarla toprak pedlerine bağlanmaktadır. Hareketli membran da polisilisyumhatlar vasıtasıyla sinyal pedlerine bağlanmaktadır.

Şekil 3'te gösterilen elektriksel ölçümlerden, 30 kHz'deki ilk rezonans frekansı, Denklem (1)'den 26 kHz olarak hesaplanan beklenen değere yakındır. Seri kapasitans verilerinden, uygulanan DC gerilimi 0V'dan 3V'a değiştirildiğinde bu frekansın 29.4 kHz'den 30.6 kHz'e değiştiği görülmektedir. Rezonans frekansı 56 kHz civarında gözlemlenmektedir ve uygulanan DC gerilimi ile 3 kHz değişmektedir. Bu nedenle, membranın rezonans frekansı, uygulanan DC gerilimi ile ince ayarlanabilmektedir. 0V'dan 2V'a ilk rezonans frekansı, gerilimle sertleşmeye bağlı olarak 750 Hz artmaktadır ve 0V'dan 3V'a, stresle sertleşmeyi baskılayan yayın yumuşamasının etkisine bağlı olarak 250 Hz azalmaktadır¹⁴.

Şekil 3(a)'da ölçülen kapasitans değerleri, kablolama ve prob uçlarında kalibrasyon eksikliği nedeniyle, MEMS membranın (1) teorik olarak 1.4 pF olarak hesaplanan gerçek kapasitans değerleri değildir. Sadece rezonans frekanslarının varlığını göstermektedirler ve yüksek kapasitans değerleri, 30 kHz ve 56 kHz civarındaki rezonansların güçlü olduğunu göstermektedir. Yüksek iletkenliğe sahip metale (13) kıyasla, dirençli hafif katkılı polisilisyum hatlar nedeniyle ölçülen direnç değerleri nispeten yüksektir.

Rezonansların mod şekilleri Şekil 4(b)'de gösterilmektedir. Mod şeklinde geçersiz değer olmadığı için birinci rezonans frekansının temel rezonans frekansı olduğu

gözlemlenebilmektedir. 51 kHz'deki ikinci rezonans frekansı ve 109 kHz'deki üçüncü rezonans frekansı, beklendiği gibi radyal yön boyunca sırasıyla bir ve iki sıfır değere sahiptir. Bu veriler, bunların membranın ilk üç rezonansı olduğunu desteklemektedir.

- 5 Şekil 4(b)'de aygıtın 28 kHz civarında çalışmasına ek olarak, bu membran 58 kHz ve 109 kHz'de çalışmak üzere kullanılabilir. Işığı 150 µm ve 100 µm yarıçaplı dairesel alanlara odaklayarak, bu membran sırasıyla 58 kHz ve 109 kHz'de çalışabilir.

10 Paralel plakalı kapasitör varsayımı kullanılırsa, uygulanan gerilim, kapasitörün plakalarına, yani membrana etki eden kuvveti modellemek için kullanılabilir. Bu bilgi, membranın ses basıncına cevap vermesi gerektiğinden değerlidir. Şekil 9'daki ortalama yer değiştirme verilerinden bu hesaplama, paralel plakalı bir kapasitörün plakalarına etki eden basınç

15 miktarını temsil eden $P = \frac{1}{2} \epsilon E^2 = \frac{1}{2} \epsilon \left(\frac{V}{d_{eff}} \right)^2$ formülü ile yapılmaktadır. Bu formülde, ϵ aslında ϵ_0 'dır ve bu, boş alanın permitivitesidir ve çıkıntılı bölgeler için plakalar arasındaki boşluk 1.25 µm'dir. İlk olarak, plakalar arasındaki boşluk hesaplanmalıdır. Paralel plakalı bir kapasitör

için, uygulanan gerilimin bir fonksiyonu olarak plakanın bükülmesi $V_n^2 = \frac{27}{4} x_n (1 - x_n)^2$ olarak

verilmektedir, burada $V_n = \frac{V}{V_{collapse}}$, $V_{collapse}$ membranın çökme gerilimidir ve

$x_n = \frac{x}{d_{eff}}$, d_{eff} kapasitörlerin plakaları arasındaki etkin boşluktur¹³.

20 Bu tasarımda $V_{collapse}$ 'nin 3V'den büyük olduğu gözlemlenmektedir. d_{eff} , membranın farklı bölgelerinden, yani çıkıntılı polisilisyum bölgesi, bölge-1 ve çıkıntısız polisilisyum bölgeleri, bölge-2'den hesaplanabilmektedir. Bölge-1'in hava boşluğu $g_1 = 1.25$ µm ve bölge-2'nin hava boşluğu $g_2 = 2$ µm'dir. Efektif boşluk, d_{eff} 'nin 1.86 µm olmasıyla sonuçlanarak

25 $\frac{1}{9} \left(\frac{1}{g_1} \right)^2 + \left(\frac{1}{g_2} \right)^2 = \frac{10}{9} \left(\frac{1}{d_{eff}} \right)^2$ ile hesaplanabilmektedir. Bu değer denkleme eklendiğinde, optik ölçüm kurulumunda olduğu gibi 1V DC gerilimi için $x_n = 0.01$ olduğu bulunabilmektedir, bu da $x = 18.6$ nm ile sonuçlanmaktadır. Bu değer $d_{eff} = 1.86$ µm ile karşılaştırıldığında ihmal

edilebilir olduğundan göz ardı edilebilmektedir. Uygulanan gerilim $V = V_{DC} + v_{ac} \cos(wt)$ olarak DC ve ac gerilimlerin toplamıdır. Bunun karesini alarak üç ifade elde edilmektedir: halihazırda plakalar arasındaki etkin boşluğun değişiminden sorumlu olan saf DC ifadesi, ihmal edilen uyarım frekansının iki katı frekanslı ac ifadesi ve uyarım frekansı ile aynı frekanslı ac ifadesi.

Bu son ifade basınç formülünde kullanılmalıdır. $d_{eff} = 1.86 \mu\text{m}$ alınarak, membranın 28 kHz'de basınç başına ortalama yer değiştirmesinin yaklaşık 40 nm/Pa olduğu bulunmaktadır. Membranın yüksek yansıtıcı yüzeyi ve yüksek basınç hassasiyeti, mikrofon (27) uygulamaları için uygun olmasını sağlamaktadır. Membranın ortalama yer değiştirmesinin, daha büyük DC gerilimleri ile artacağı tahmin edilmektedir. Bu nedenle, bu aygıtı 3V DC gerilim çevresinde çalıştırmak en yüksek cevabı sağlamaktadır ve bu da yer değiştirmenin tespitini kolaylaştırmaktadır.

Uzaklaştıkça ışık demetinin genişliği arttığı için lazer (26) ışığının tespit edileceği alan önemlidir. Yansıma sonrası fibere iletilen güç miktarı, fiber çapına eşit olan ışın kritik genişliğinden sonra azalmaya başlamaktadır. Işık kat ettiği mesafe sabit alındığında, değiştirilecek tek parametre ışının membrana çarptığı andaki genişliğidir. Bu genişlik, membrandan yeterli miktarda bükülme bilgisi elde etmek için yeterince büyük olmalıdır. Şekil 10'dan, optimum genişlik 300 μm (150 μm yarıçaplı daire) olarak hesaplanmaktadır. Bu nedenle ışığı 150 μm yarıçaplı alana odaklamak, hem hassasiyet hem de fibere geri iletilen ışık miktarı göz önüne alındığında en iyi çözüm olacaktır.

Membran, Şekil 11'de gösterildiği gibi 250 μm yarıçaplı alan içinde oldukça simetrik bir cevap gösterir. Simetri, aynı zamanda, Şekil 12(b, c, d)'de gösterildiği gibi, membranın bir döngü sinüzoidal uyarımlara olan geçici cevabından da doğrulanabilmektedir. Simetri özelliğinden, membranın merkezi çalışması doğrulanır; membran, merkezine göre dairesel simetriye sahiptir.

Fiber optik mikrofon (27) için algılama elemanı olarak tasarlanan, 36 μm çapında hava deliklerine sahip, 1.5 μm kalınlığında, 1000 μm çapında MEMS membranlı (1) özel tasarım 1300 $\mu\text{m} \times 1300 \mu\text{m}$ 'nin karakteristikleri POLYMUMPS süreci ile mikroüretime tabi tutulmuş ve karakteristikleri araştırılmıştır. Membran altında oksit tabakalarının feda aşındırmasını elde etmek için tasarımda hava delikleri kullanılmıştır. Bu delikler tasarımın dolgu oranı %53 olacak şekilde tasarlanmıştır. Membranın yüzeyi, ışık için yansıtıcı bir yüzey kullanan altın kaplamadır. Tasarımın rezonans frekansları, elektriksel ve optik ölçüm kurulumları ile elde edilmektedir. Uygulanan dc geriliminin 0V'dan 3V'a değişmesiyle tasarımın temel rezonans frekansı %3 oranında değişmiştir. Yüksek dereceli modlar da gözlemlenmektedir ve membranın merkezi daha yüksek modlara da güçlü cevap vermektedir. Tasarımın cevabı

konumsal olarak simetriktir ve mod şekilleri, 28 kHz'deki rezonansın membranın temel modu olduğunu göstermektedir. Duyulabilir frekans aralığının biraz üzerinde rezonans frekansı elde ederek, güçlü cevap elde edilirken, neredeyse hiç faz tersinimi elde edilmemiştir. Tasarımın yüksek hassasiyeti, yani 40 nm/Pa, onu fiber optik mikrofonlar (27) için uygun hale getirmektedir. Lazer (26) ışıklarının dairesel noktaları nedeniyle membranın yüksek dairesel simetrisi de önemlidir. Bu tasarım, 250 µm yarıçaplı alanda hemen hemen aynı cevabı verdiği için, ışığın membrana odaklanacağı alanı seçme esnekliği de sunmaktadır. Membranın karakteristikleri ile, bu tasarımın fiber optik mikrofonlar (27) için uygun olduğu doğrulanmıştır.

Yukarıdaki detaylı açıklamadan, bir fiber optik MEMS mikrofon (27), aşağıdakileri içermektedir;

- Fiber optik kablonun ucunda entegre bir MEMS aygıtı,
- MEMS aygıtının üzerine yerleştirilmiş bir fotodiyot (3) çipi,
- MEMS aygıtının SIGNAL ve GND pedlerine elektriksel olarak bağlanan fotodiyot (3) çipi tarafından üretilen gerilim,
- Giren lazer ışığının (6) bir kısmını membrandan optik fibere (7) geri yansıtabilen ve giren lazer ışığının (6) kalan kısmını membrandan fotodiyot (3) çipine iletebilen MEMS aygıtı,
- Giren lazer ışığını (6) yansıtan optik olarak yansıtıcı malzeme ile kaplanmış bir membrana sahip MEMS aygıtı,
- Giren lazer ışığını (6) ileten hava deliklerine sahip bir membrana sahip MEMS aygıtı,
- MEMS aygıtına farklı gerilim değerlerinde gerilim uygulayan lazer diyot (2) ile gücü ayarlanabilen lazer (26) ışını,
- Giren lazer ışığının (6) faz modülasyonu veya şiddet modülasyonu yoluyla membran yer değiştirmesinin tespiti için kullanılan ışık,
- Fotodiyot (3) çipi boyunca gerilim üretimi için optik fiber (7) yoluyla enerji iletiminde de kullanılan ışık.

Referanslar

- ¹Chonghua Zhou, Stephen V. Letcher, and Arun Shukla, “Fiber-optic microphone based on a combination of Fabry–Perot interferometry and intensity modulation”, *The J. Acoust. Soc. Am.*, 98, 1042 (1995).
- 5 ²Ming Li, Ming Wang, “Optical MEMS pressure sensor based on Fabry-Perot interferometry”, *Optics Express*, Vol. 14, No.4 (2006).
- ³Ji-Huan Chen, Xu-Guang Huang, Jia-Rong Zhao, Jin Tao, Wei-Xin He, Song-Hao Liu, "Fabry–Perot interference-based fiber-optic sensor for small displacement measurement",
10 *Optics Communications* 283, 3315–3319 (2010).
- ⁴J. A. Bucaro, H. D. Dardy, and E. F. Carome, “Fiber-optic hydrophone”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 62, 1302 (1998).
- 15 ⁵Qingxu YU and Xinlei ZHOU, “Pressure Sensor Based on the Fiber-Optic Extrinsic Fabry-Perot Interferometer”, *Photonic Sensors* Vol. 1, No. 1: 72-83 (2011).
- ⁶G.C Fanga, P.G Jia, Q. Caoa, and J.J Xiong,” MEMS Fiber-optic Fabry–Perot pressure sensor for high temperature application”, *Proc. of SPIE* Vol. 10155, 101552H (2016).
20
- ⁷Zhenfeng Gong, Ke Chen, Xinlei Zhou, Yang Yang, Zhihao Zhao, Helin Zou, and Qingxu Yu, “High Sensitivity Fabry-Perot Interferometric Acoustic Sensor for Low-Frequency Acoustic Pressure Detections”, *J. Lightwave Tech.*, Vol. 35, No. 24 (2017).
- ⁸Yu Wu, Caibin Yu, Fan Wu, Chen Li, Jinhao Zhou, Yuan Gong, Yunjiang Rao, Yuanfu Chen,
25 “A Highly Sensitive Fiber-Optic Microphone Based on Graphene Oxide Membrane”, *J. Lightwave Tech.*, Vol. 35, No. 19 (2017).
- ⁹Bin Liu, Han Zhou, Lei Liu, Xing Wang, Mingguang Shan, Peng Jin, Zhi Zhong, “An Optical Fiber Fabry-Perot Microphone Based on Corrugated Silver Diaphragm”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 67, No. 8 (2018).
30

¹⁰Xueqi Lu, Yu Wu, Yuan Gong, Yunjiang Rao, “A miniature fiber-optic microphone based on annular corrugated MEMS diaphragm”, J. Lightwave Tech., doi: 10.1109/JLT.2018.2868964 (2018).

5 ¹¹Steve T. Cho, Khalil Najafi, Kensall D. Wise, “Internal Stress Compensation and Scaling in Ultrasensitive Silicon Pressure Sensor”, IEEE Transaction on Electron Devices Vol. 39, No.4 (1992).

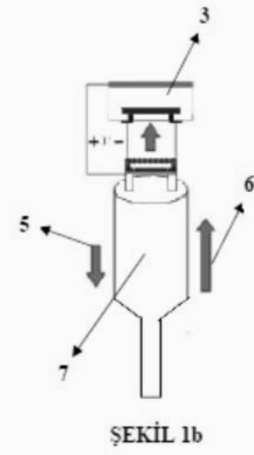
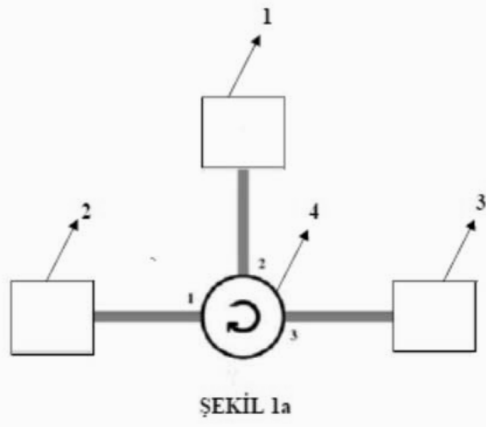
¹²M. Giovanni, Flat and Corrugated Diaphragm Design Hand-book (1982).

10

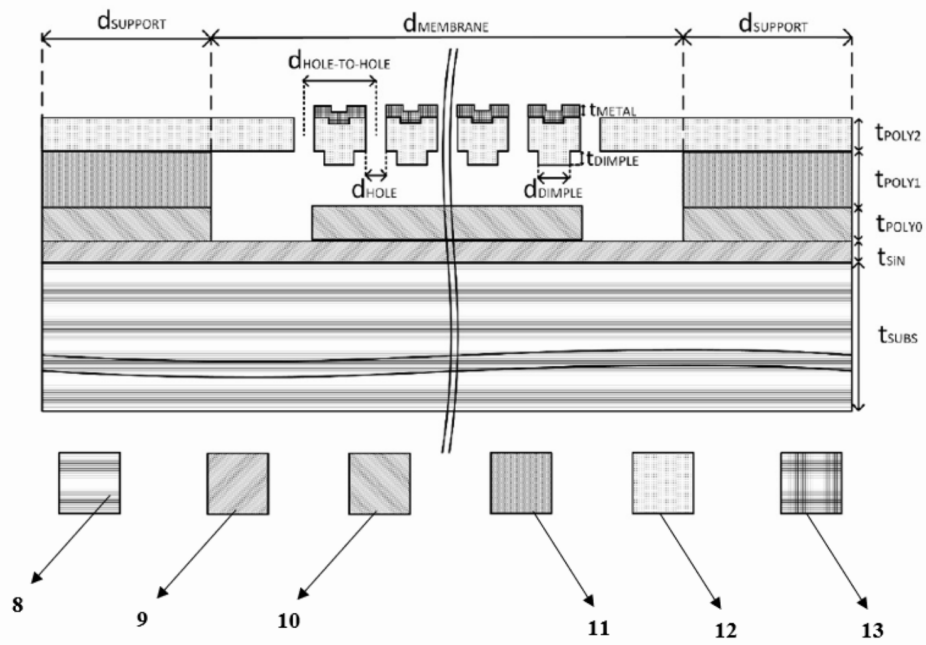
¹³G. G. Yaralioglu, A. S. Ergun, B. Bayram, E. Haeggstrom and B. T. Khuri-Yakub, "Calculation and measurement of electromechanical coupling coefficient of capacitive micromachined ultrasonic transducers," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 50, no. 4, pp. 449-456, (2003).

15

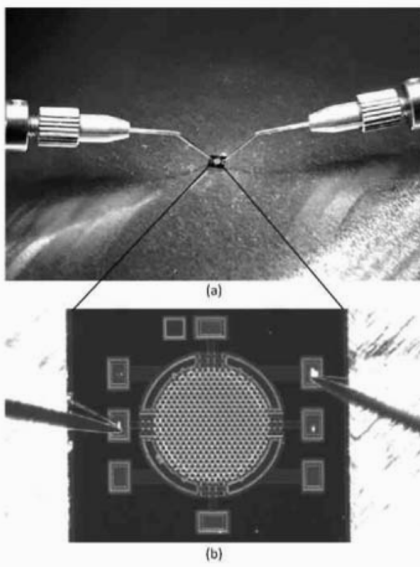
¹⁴I. O. Wygant, M. Kupnik and B. T. Khuri-Yakub, "Analytically calculating membrane displacement and the equivalent circuit model of a circular CMUT cell," IEEE Ultrasonics Symposium, Beijing, 2008, pp. 2111-2114, (2008).



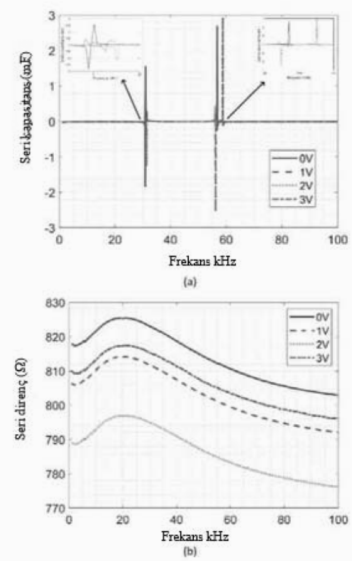
ŞEKİL 1



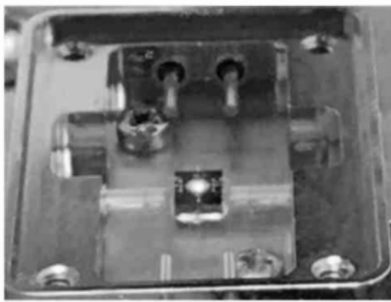
ŞEKİL 2



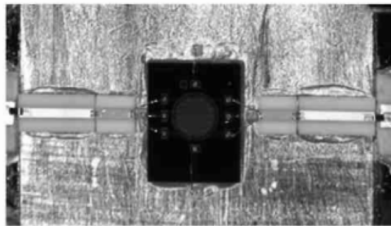
ŞEKİL 3a



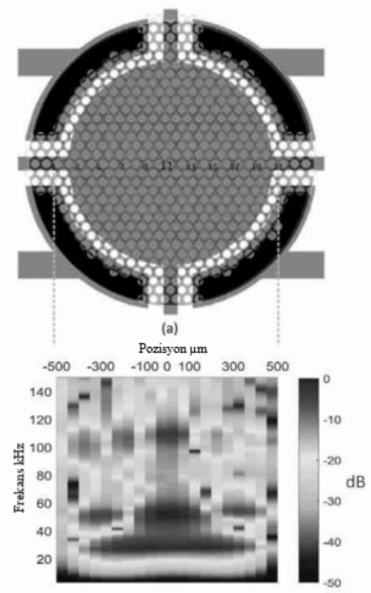
ŞEKİL 3b



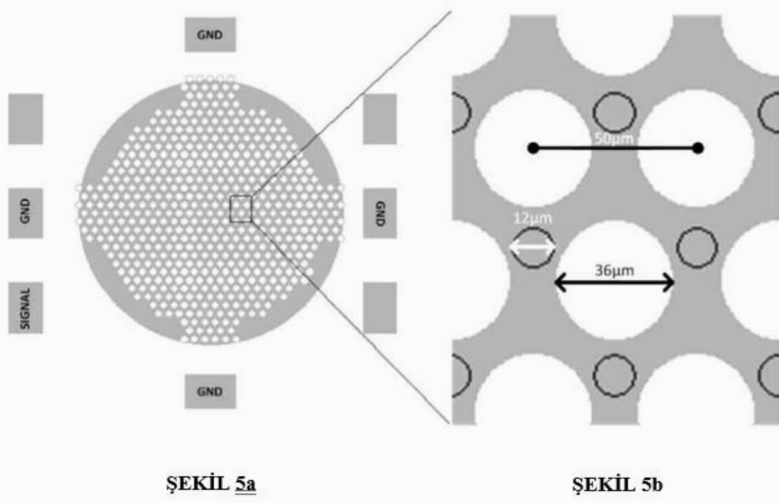
(a)



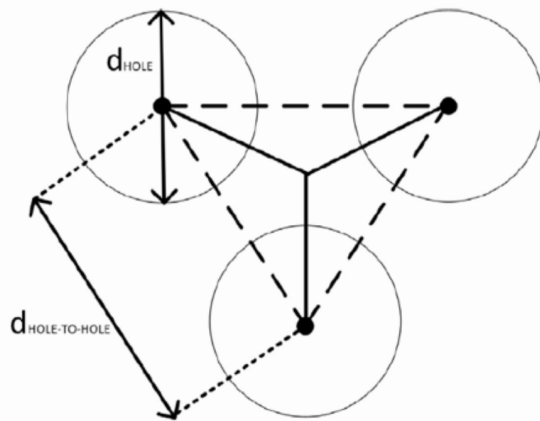
(b)



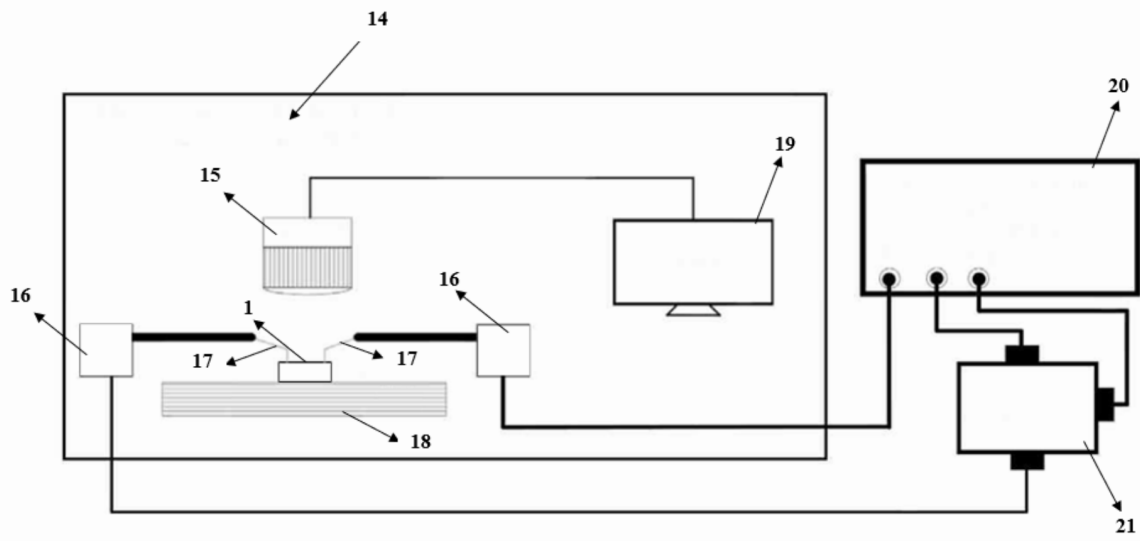
ŞEKİL 4



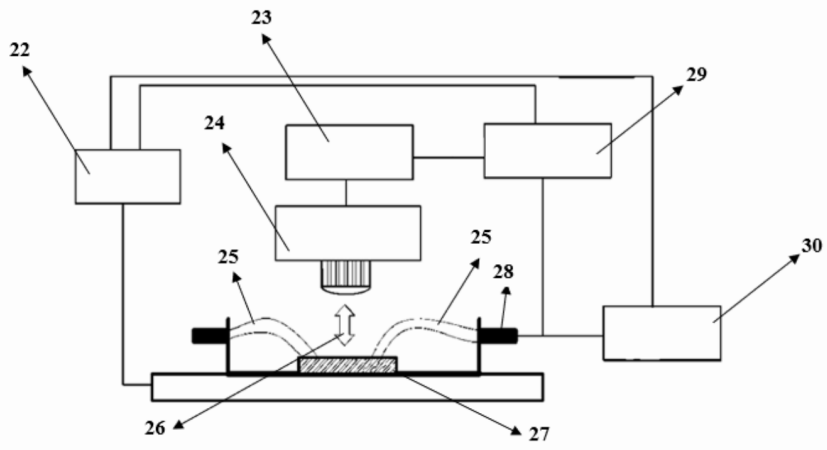
ŞEKİL 5.



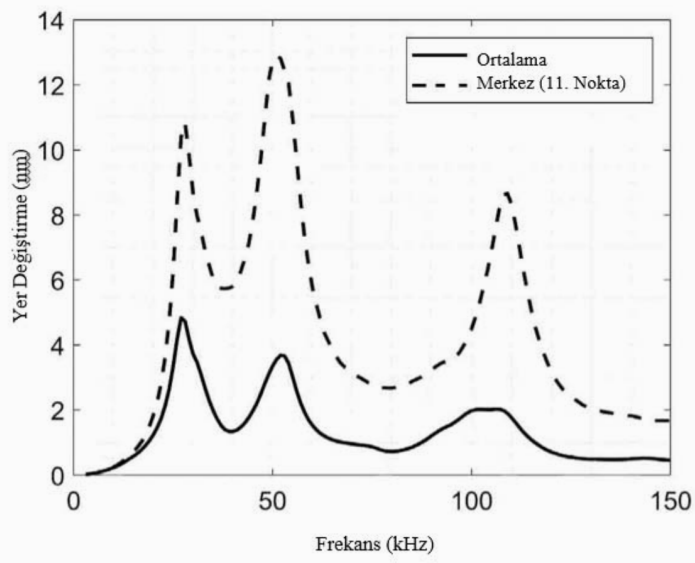
ŞEKİL 6



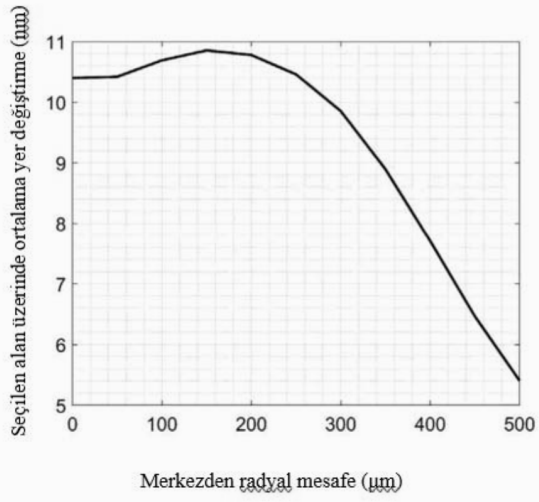
ŞEKİL 7



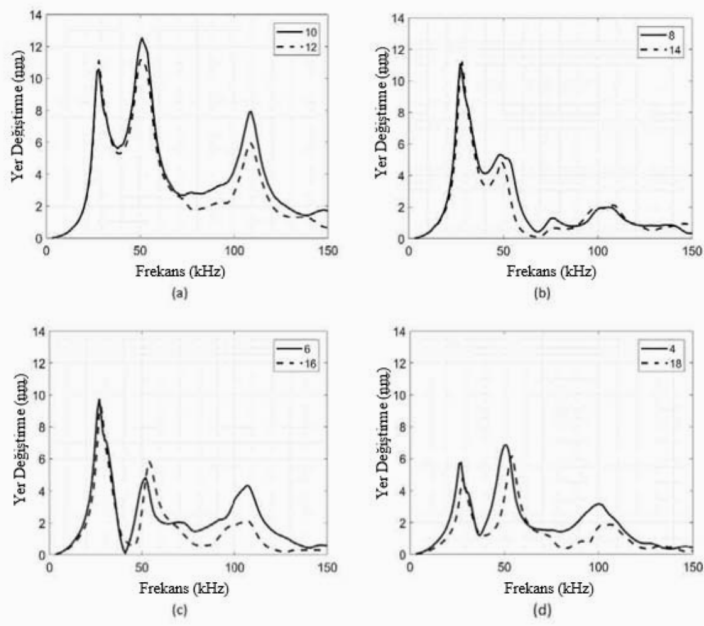
ŞEKİL 8



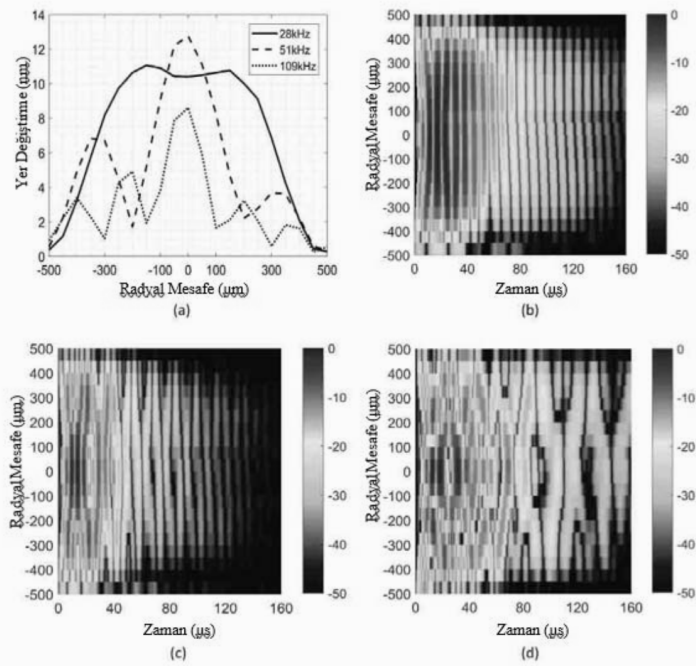
ŞEKİL 9



ŞEKİL 10



ŞEKİL 11



ŞEKİL 12