Özgün MEMS Mikrofonların Geliştirilmesi

Program Kodu: 1001

Proje No: 215E090

Proje Yürütücüsü:

Prof. Dr. Barış Bayram

Araştırmacı:

Doç.Dr. Asaf Behzat Şahin

Bursiyerler:

Hanife Akdoğanbulut

İlker Oğuz

Selinay Karataş

İrem Kozakci

KASIM 2019

ANKARA

ÖNSÖZ

Bu proje kapsamında literatürdeki ilk fiber optik MEMS membranlı mikrofon tasarımı, mikroüretimi ve testi başarıyla tamamlanmıştır. Proje kapsamında geliştirilen buluşun patent başvurusu (PCT/TR2019/050262) 18 Nisan 2019 tarihinde gerçekleştirilmiştir. TÜBİTAK 1001 proje desteği kapsamında 215E090 nolu proje numarasıyla desteklenen Özgün MEMS Mikrofonların Geliştirilmesi projesi Orta Doğu Teknik Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü ULTRAMEMS Araştırma Laboratuvarında (http://ultramems.eee.metu.edu.tr/) 1 Kasım 2016 ile 1 Kasım 2019 tarihleri arasında gerçekleştirilmiştir. Proje çalışmalarımıza ayrıca Orta Doğu Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Koordinatörlüğü (BAP) tarafından BAP-03-01-2016-004 ve GAP-301-2018-2683 nolu proje destekleri ile T.C. Ekonomi Bakanlığı tarafından verilen 15/05/2018 tarih ve 137203 sayılı Yatırım Teşvik Belgesine istinaden KDV ve gümrük muafiyeti destekleri sağlanmıştır.

Proje ekibinde lisans bursiyeri olarak yer alan; İlker Oğuz mezuniyet sonrası burslu kabul aldığı ETH Zürih Üniversitesinde yüksek lisansa, İrem Kozakci mezuniyet sonrası burslu kabul aldığı Kore KAIST Üniversitesinde doktoraya, Selinay Karataş ASELSAN firmasında çalışmaya, Hanife Akdoğanbulut AYESAŞ firmasında çalışmaya başlamıştır. Proje ekibinde yer alan araştırmacı ve bursiyerler dışında gönüllü olarak araştırma faaliyetlerine katılan; Ar.Gör. Göktuğ Cihan Özmen (BİDEB bursiyeri) proje kapsamında yüksek lisans tezini tamamlayarak Amerika Birleşik Devletlerinde Georgia Institute of Technology Üniversitesinden burslu doktora çalışmasına, Ekin Muharrem Karaca (TÜBİTAK 1003-116E642 yardımcı personeli) proje kapsamında yüksek lisans tezini tamamlayarak ROKETSAN firmasında yüksek mühendis olarak çalışmaya, Doğa Buse Çavdır proje kapsamında çalışmasını tamamlayarak Amerika Birleşik Devletlerinde Stanford Üniversitesinden burslu doktora çalışmasına başlamışlardır.

Projenin başarıyla tamamlanması için özveriyle çalışan araştırmacılarımıza ve projeyi destekleyen kurumlarımıza teşekkür ederiz.

TÜBİTAK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ 1

İÇİNDEKİLER 2

TABLO LİSTESİ 5

ŞEKİL LİSTESİ 6

ÖZET 9

ABSTRACT 10

1. GİRİŞ 11

2. MEMS MEMBRAN VE OPTİK ÖLÇÜM SİSTEMİ TASARIMI 12

2.1. Mikro-Üretim Süreci Seçimi 12

2.2. POLYMUMPS Süreci 12

2.2.1. POLYMUMPS Süreç Akışı 12

2.2.2. POLYMUMPS Tasarım Kuralları 14

2.2.3. POLYMUMPS Süreci ve İnce Film Parametreleri 19

2.3. Membranın Teorik Tasarımı 19

2.3.1. Membranın Çapı 24

2.3.2. Delik Tasarımı 27

2.4. Optik Algılama Sistemi Tasarımı 28

2.4.1. Optik Elemanlar 29

2.4.2. Optoelektronik Elemanlar 32

2.4.3. Elektronik Elemanlar 34

2.5. Optik Sistem İçin Simülasyon Sistemi 35

3. MEMS MEMBRANIN MİKROÜRETİMİ 37

3.1. Mikrofabrikasyon Maske Tasarımı 37

3.1.1. POLY0 ve HOLE0 Maskeleri Tasarımı 37

3.1.2. ANCHOR1 Maske Tasarımı 38

3.1.3. DIMPLE Maske Tasarımı 39
3.1.4. POLY1 ve HOLE1 Maskeleri Tasarımı 40
3.1.5. POLY1-POLY2-VIA Maske Tasarımı....42
3.1.6. ANCHOR2 Maske Tasarımı 44
3.1.7. POLY2 ve HOLE2 Maskeleri Tasarımı 44
3.1.8. METAL ve HOLEM Maskeleri Tasarımı....47
3.2. Tasarımın Üç Boyutlu (3B) ve İki Boyutlu (2B) Modeli....49
3.3. Mikro-üretimi Tamamlanan MEMS Membran....53
4. MEMBRAN İÇİN ELEKTRİKSEL VE OPTİK KARAKTERİZASYON SİSTEMLERİ 55
4.1. Elektriksel Ölçüm Sistemi 55
4.2. Optik Ölçüm Sistemi 60
5. MEMBRAN KARAKTERiZASYON SONUÇLARI VE ANALİZ....62
5.1. U103 Çipi Elektriksel Karakterizasyon Sonuçları ve Analizi 62
5.2. U103 Çipi Optik Karakterizasyon Sonuçları ve Analizi 65
5.3. U109 Çipi Elektriksel Karakterizasyon Sonuçları ve Analizi 76
5.4. U109 Çipi Optik Karakterizasyon Sonuçları ve Analizi 78
6. OPTİK ALGILAMA SİSTEMİNİN OPTİMİZASYONU VE KURULUMU 84
6.1. Optik Algılama Sistemi Optimizasyonu İçin Elde Edilen Simülasyon Sonuçları 84
6.1.1 Simülasyon Temelleri....84
6.1.2. Alt Taş Kalınlığının Etkileri 87
6.1.3. Fiber Ucun Arka Yüzeye Optimum Mesafesi 89
6.1.4. Eşdeğer Mesafe Kavramı....91
6.2. Optik Algılama Sisteminin Kurulumu....94
6.3 Optik Algılama Sisteminin Kurulumunun Tamamlanması....104
6.3.1. Gürültü Analizi....106
6.3.2. Gerilim Uygulanarak Membranın Hareketlendirilmesi....109

6.3.3. Öz Eğimleme 113
6.4 Kalibreli Mikrofon Ölçümleri 114
SONUÇLAR 122
REFERANSLAR 127

TÜBİTAK

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. POLYMUMPS sürecindeki katmanlar, her birinin kalınlığı ve her kat için karşılık gelen maskeler. 15
Tablo 2.2. POLYMUMPS süreci katman özellikleri. 16
Tablo 2.3. POLYMUMPS süreç maskeleri için zorunlu tasarım kuralları. 17
Tablo 2.4. POLYMUMPS süreci katman özellikleri. 19
Tablo 2.5. Literatürde bulunan MEMS mikrofonlar ve özellikleri. 20
Tablo 2.6. Dairesel bir membranın ilk rezonans frekans parametreleri ve POLYMUMPS süreci için değerleri. 24
Tablo 3.1. Şekil 3.17'de verilen temsili boyutların değerleri 53
Tablo 4.1. Agilent 11667L güç ayırıcının teknik özellikleri. 57
Tablo 4.2. Çipin elektriksel karakterizasyonu için yapılan empedans analizörü ayarları. 60
Tablo 4.3. Optik karakterizasyon için gerekli sinyal kaynağı ayarları. 61
Tablo 5.1. Farklı koşullar altında teorik seri kapasitans değerleri. 62
Tablo 5.2. U103 çipi teknik özellikleri. 76
Tablo 5.3. U109 çipi teknik özellikleri. 83
Tablo 6.1. Simülasyonlarda kullanılan MEMS mikrofon fiziksel parametreleri. 85
Tablo 6.2. Ge Dedektörü genel özellikleri. 98
Tablo 6.3. 36 mm kalınlığındaki poliüretan köpük için deney sonucu elde edilmiş doğal frekanslar (Grosh ve Littrell, 2013) 108
Tablo 6.4. U109 çipi teknik özellikleri. 121

TÜBİTAK

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Delikli yapıdaki kapasitif diyafram (Martin vd., 2005) 21
Şekil 2.2. Kapasitif mikrofonun test sonuçları (Martin vd., 2010). 22
Şekil 2.3. Kapsitif mikrofonun diyaframının (a) üstten ve (b) kesit görüntüsü (Littrell, 2010). 23
Şekil 2.4. Farklı yarıçap değerleri için dairesel bir membranın ilk rezonans frekansı. 25
Şekil 2.5. İlgili frekans bölgesinde (25-30 kHz) farklı yarıçap değerleri için dairesel bir membranın ilk rezonans frekansı. 26
Şekil 2.6. Delik tasarımı ve yerleştirilmesi problemi.. 27
Şekil 2.7. Çok modlu ve tek modlu fiberlerin kesitleri.. 30
Şekil 2.8. Sirkülatörün Port 1'den Port 2'ye işletimi (Dutton, 1998)... 31
Şekil 2.9. Sirkülatörün Port 2'den Port 3'ye işletimi (Dutton, 1998)... 32
Şekil 2.10. Ticari fotodetektörlerin duyarlılık grafiği (Arndt vd.,1996).. 24
Şekil 2.11. MEMS mikrofonunun simülasyon modeli.. 36
Şekil 3.1. POLY0 maskesi. 38
Şekil 3.2. ANCHOR1 maskesi. 39
Şekil 3.3. DIMPLE maskesi 40
Şekil 3.4. POLY1 maskesi. 41
Şekil 3.5. POLY0, ANCHOR1 ve POLY1 maskeleri. 42
Şekil 3.6. POLY1 ve POLY1-POLY2-VIA maskeleri. 43
Şekil 3.7. DIMPLE ile birlikte POLY1-POLY2-VIA maskesi. 44
Şekil 3.8. POLY2 maskesi. 45
Şekil 3.9. POLY0, ANCHOR1, POLY1, POLY1-POLY2-VIA ve POLY2 maskeleri. 46
Şekil 3.10. POLY2 ve HOLE2 maskeleri. 47
Şekil 3.11. POLY2 ve METAL maskeleri. 48
Şekil 3.12. POLY2, HOLE2, METAL ve HOLEM maskeleri. 49
Şekil 3.13. Membranın 3B modeli. 50
Şekil 3.14. Membranın 3B modelinin enine kesit görüntüsü. 50
Şekil 3.15. Membranın 3B modelinin eğik görüntüsü. 51
Şekil 3.16. Membranın 3B modelinin (a) eğik ve (b) kesit görüntüsü. 52
Şekil 3.17. Membranın kesit görüntüsü. 52
Şekil 3.18. Üretilen membranın mikroskop altındaki görüntüsü. 54
Şekil 4.1. LF ölçüm bağlantıları. 56

Şekil 4.2. Elektriksel ölçüm sistemi.....58
Şekil 4.3. Çipin (a) table üzerindeki ve (b) mikroskop altındaki görüntüsü. 59
Şekil 4.4. Optik ölçüm sistemi. 61
Şekil 5.1. Farklı DC eğimleme gerilimleri altında ölçülen, frekansa bağlı (a) seri kapasitans ve (b) seri direnç. 64
Şekil 5.2. Çipin (a) çip taşıyıcısı üzerindeki ve (b) mikroskop altındaki görünüsü. 65
Şekil 5.3. Membranın (a) numaralandırılmış gösüntüsü ve (b) denge durumu tepkisi. 67
Şekil 5.4. Membranın sapmasının frekansa bağlı değişimi. 68
Şekil 5.5. Farklı dairesel uzaklıklar için birim alana düşen ortalama sapma miktarı. 72
Şekil 5.6. Membranın merkezine (a) 50 μm, (b) 150 μm, (c) 250 μm and (d) 350 μm mesafede bulunan iki noktanın frekans tepkileri. 73
Şekil 5.7. Membranın (a) 28 kHz, 51 kHz and 109 kHz frekanslardaki CW etkilere denge durumu tepkisi, ve (b) 28 kHz, (c) 51 kHz, (d) 109 kHz frekanslarındaki tek periyot sinüs etkilerine geçici tepkisi. 74
Şekil 5.8 Farklı DC eğimleme gerilimleri altında ölçülen, frekansa bağlı (a) seri kapasitans ve (b) seri direnç. 77
Şekil 5.9. Membranın denge durumu tepkisi. 78
Şekil 5.10. Membranın sapmasının frekansa bağlı değişimi. 79
Şekil 5.11. Farklı dairesel uzaklıklar için birim alana düşen ortalama sapma miktarı. 80
Şekil 5.12. Membranın merkezine (a) 50 μm, (b) 150 μm, (c) 250 μm and (d) 350 μm mesafede bulunan iki noktanın frekans tepkileri. 81
Şekil 5.13. Membranın 15 kHz frekansındaki CW etkilere denge durumu tepkisi, ve 15 kHz frekansındaki tek periyot sinüs etkilerine geçici tepkisi 82
Şekil 6.1. 3B olarak tasarlanmış MEMS mikrofonun ön yüzey görünüşü. 85
Şekil 6.2. 3B olarak modellenen fiber optik kablo ve emici yüzey. 86
Şekil 6.3. Alt taş kalınlığının etkilerini gözlemlemek için oluşturulan simülasyon kurulumu. 87
Şekil 6.4. Alt taş kalınlığı ve güç oranı grafiği. 89
Şekil 6.5. Alt tabakaya optimum mesafeyi tanımlamak için oluşturulan simülasyon kurulumu. ..90
Şekil 6.6. Alt taşın arka yüzeyine olan mesafe ve güç oranı grafiği 91
Şekil 6.7. Eşdeğer mesafe kavramı için oluşturulan simülasyon kurulumu 92
Şekil 6.8. MEMS mikrofonunun ön yüzeyine olan mesafe vs güç oranı. 93
Şekil 6.9. Ölçüm sisteminin optik kısmının şeması 95
Şekil 6.10. Si için emilim katsayısı ile dalga boyu grafiği 96

Şekil 6.11. T-Cube DC Servo Kontrolörler (solda) ve Z825B Motorlu Aktüatörler (sağda) 97
Şekil 6.12. ThorLabs PDA50B2.....97
Şekil 6.13. Ge dedektörün tepkisellik grafiği.....99
Şekil 6.14. Hoparlör (solda) ve hoparlörün sürüş devresi (sağda).. 100
Şekil 6.15. MEMS mikrofonun eğimleme ve topraklama pedleri ile birlikte ön yüzey görünümü..
.....101
Şekil 6.16. Kullanılan çipin laser vibrometre ölçümleri......101
Şekil 6.17. Stanford Research Systems SR850 kilitleme ampfilikatörü.....103
Şekil 6.18. MEMS mikrofonu ile çip taşıyıcı (solda) ve XYZ hareket tablasına monte edilmiş sivriltilmiş fiber ucu (sağda)......103
Şekil 6.19. Ölçüm sisteminin şeması.....104
Şekil 6.20. Ölçümsisteminin fiziksel olarak kurulumu.....104
Şekil 6.21. Ölçüm sistemiyle MEMS mikrofondan alınan gerilim ölçümleri.. 105
Şekil 6.22. Çeşitli ortam titreşim kaynakları......107
Şekil 6.23. Çip taşıyıcı ve XYZ hareketli tablasının altına yerleştirilen ayırıcı.. 108
Şekil 6.24. Uyarılmış diyafram FFT ölçümleri, 10 kHz ile (a), 15 kHz ile (b), 20 kHz ile (c), 25 kHz ile (d), 30 kHz ile (e) ve 50 kHz ile (f) yapılan FFT ölçümleri.....109
Şekil 6.25. Dışarıdan membran uyarılması yöntemi uygulanmış ölçüm sistemi şeması 110
Şekil 6.26. Çip taşıyıcı ve yöntem için modifiye edilmiş fiber uç. 111
Şekil 6.27. Gürültü zemini ve frekans ölçümü.....111
Şekil 6.28. Ölçülen gerilim ve frekans grafiği.....112
Şekil 6.29. Sinyal-gürültü oranı ve frekans grafiği 112
Şekil 6.30. Öz eğimlenen MEMS mikrofon şeması.....113
Şekil 6.31. Öz eğimlenen MEMS mikrofon ölçüm kurulumu.. 114
Şekil 6.32. Kalibreli mikrofon ölçüm düzeneği.. 115
Şekil 6.33. Kalibreli mikrofon ölçüm düzeneği (yakından görünüm.. 115
Şekil 6.34. Gürültü zemini ve frekans ölçümü.....116
Şekil 6.35. Ölçülen gerilim ve frekans grafiği 117
Şekil 6.36. Sinyal-gürültü oranı ve frekans grafiği.....118
Şekil 6.37. SpectraPLUS programı basınç-zaman(sol üstte), SPL- frekans(sağ üstte), 3D görüntü-zaman(sol altta), Spektrogram (sağ altta.....119
Şekil 6.38. Duyarlılık ve frekans grafiği.....120

ÖZET

Algılama elemanı, membran, fiber optik mikro-elektro-mekanik sistem (MEMS) mikrofonunun en kritik parçasıdır. Bu raporda belirtilen çalışma, istenen hassasiyette ve istenen aralıkta çalışan fiber optik mikrofon için MEMS membranının tasarımını ve karakterizasyonunu içerir. Mikrofabrikasyon, ticari olarak temin edilebilen bir MUMPS (Çok kullanıcılı MEMS) işlemi kullanılarak yapılır. Membranın elektriksel ve optik karakterizasyonları, empedans analizörü ve lazer vibrometresi kullanılarak yapılır. Membranın geçici ve sabit durum analizleri kullanılarak ve membranın zamansal ve uzamsal tepkileri elde edilir. Membranın temel rezonansı 28 kHz'dir. Membranın ortalama 1.5 nm'lik ortalama tepe yer değiştirmesi, 100 mV ac gerilim ve 1 V DC gerilim altında vibrometre ölçümlerinden elde edilir. Mikrofon, 20 Hz - 100 kHz de dahil olmak üzere geniş bir frekans aralığı için kullanılabilir. Membranın duyarlılığı 28 kHz'de 12 nm / Pa civarında ve kalite faktörü 2.8 olarak hesaplanmıştır. Çalışma, fiber optik MEMS mikrofon ölçüm sisteminin (Fabry-Perot interferometre) tasarımını ve gösterimini içerir. Ölçüm sistemi kurulumu optimize edilmiş simülasyon sonuçlarına göre tasarlanmış, yapılandırılmış ve işlevleri geliştirilmiştir. Sistem optik bileşenler ve membran ile test edilmiş ve fiber optik mikrofonun özellikleri elde edilmiştir. Fiber optik sistemde kullanılan membran, 15 kHz ilk rezonans frekansı ve 100 mV ac gerilim ve 1 V DC gerilimi altında ortalama 14 nm yer değiştirme özellikler'ne sahiptir. Membranın duyarlılığı 15 kHz'te 105 nm / Pa ve kalite faktörü 3'tür. Fiber optik sistemde kalibreli mikrofon ölçümleri ile mikrofonun hassasiyeti optik olarak test edilmiştir. Sinyal-gürültü oranı ortalama 38 dB olarak tespit edilmiştir. Mikrofonun duyarlılığı ilk rezonans frekansı olan 15 kHz frekans değeri için yaklaşık 50 µV/Pa, ortalama için ise 104.4 µV/Pa olarak gözlenmiştir. Bu çalışma, optik mikrofonlar için MEMS membranının tasarımı için yeni bir özellik sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Fiber optik mikrofon, MEMS membran, CMUT, POLYMUMPS, Fiber Optik, İnterferometre

ABSTRACT

Sensing element, membrane, is the most critical part of fiber optic micro-electro-mechanical systems (MEMS) microphone. The study involves the design and characterization of a MEMS membrane for a fiber optic microphone, so that the microphone operates in the desired range with desired sensitivity. Microfabrication is done using a commercially available MUMPS (Multi-user MEMS) process. Electrical and optical characterizations of the membrane are done using an impedance analyzer and laser vibrometer, respectively. The transient and steady state analyses of the membrane are utilized, and the temporal and spatial responses of the membrane are obtained. The fundamental resonance of the membrane is 28 kHz. The average peak displacement of 1.5 nm is obtained from vibrometer measurements under 100 mV peak-to-peak voltage and 1 V DC bias condition. The microphone is usable for a wide range of frequency including 20 Hz - 100 kHz. The sensitivity of the membrane is calculated to be around 12 nm / Pa at 28 kHz and the quality factor is calculated as 2.8. The study includes the design and demonstration of the fiber optic MEMS microphone measurement system (Fabry-Perot interferometer). The measurement system setup is designed, constructed and functionalized according to the optimized simulation results. The system is demonstrated with optical components and the membrane, and characteristics of the fiber optic microphone are obtained. The membrane that is utilized in the fiber optic system has characteristics as 15 kHz first resonant frequency and average displacement of 14 nm under 100 mV peak-to-peak voltage and 1 V DC bias. The sensitivity of the membrane is 105 nm / Pa at 15 kHz and the quality factor is 3. With calibrated microphone measurements on fiber optic system, sensitivity of the microphone is optically tested. Signal-to-noise ratio is found as 38 dB in average. Sensitivity of the microphone is found as approximately 50 µV/Pa for the first resonance frequency of 15 kHz and 104.4 µV/Pa in average. This study offers a new aspect for the design of MEMS membrane for optical microphones.

Keywords: Fiber optic microphone, MEMS membrane, CMUT, POLYMUMPS, Fiber Optics, Interferometer

1. GİRİŞ

Fiber optik mikro-elektro-mekanik sistem (MEMS) mikrofonunun en kritik parçası algılama elemanı olan membrandır. Özgün MEMS Mikrofonların Geliştirilmesi projesi kapsamında istenen hassasiyette ve istenen aralıkta çalışan fiber optik mikro-elektro-mekanik sistem (MEMS) mikrofon membranının tasarımını ve karakterizasyonunu hedeflemektedir. Üretilecek MEMS mikrofonu istenilen aralıkta çalışmasına yönelik teorik tasarımlar süreç içinde yapılarak mikrofon tasarımının geliştirilmesi amaçlanmıştır. MEMS mikrofonun test edilmesi için, mikroüretim için gerekli süreç adımlarının belirlenmesi ile üretimin tamamlanması gerekmektedir. Mikrofabrikasyon, ticari olarak temin edilebilen bir MUMPS (Çok kullanıcılı MEMS) işlemi kullanılarak proje kapsamında belirlenen süreçler ile gerçekleştirilir. Üretilen membranın elektriksel ve optik karakterizasyonları, empedans analizörü ve lazer vibrometresi kullanılarak gerçekleştirilir. Membranın geçici ve sabit durum analizleri kullanılarak ve membranın zamansal ve uzamsal tepkileri elde edilir. Üretilen çipler arasından fiber sistemde kullanılabilecek çiplerin ölçüm ve karakterisyonlarının tamamlanması, ardından fiber optik MEMS mikrofon ölçüm sisteminin (Fabry-Perot interferometre) tasarımı ve kalibrasyonu gereklidir. Ölçüm sistemi kurulumu optimize edilmiş simülasyon sonuçlarına göre tasarlanır, yapılandırılır ve işlevleri geliştirilir. Sistem optik bileşenler ve membran ile test edilir ve fiber optik mikrofonun özellikleri elde edilir. MEMS mikrofon, fotodiyot ve fiber-optik yapının birbirine entegre edilmesi ile MEMS aygıt üzerindeki ölçümler tamamlanır.

2. MEMS MEMBRAN VE OPTİK ÖLÇÜM SİSTEMİ TASARIMI

2.1. Mikro-Üretim Süreci Seçimi

Fiber optik MEMS mikrofon, membranın oluşturduğu algılama kısmı ve optik algılama kısmı olmak üzere iki temel parçadan oluşur. Fiber optik MEMS mikrofonunun algılama elemanının mekanik ve elektriksel özellikleri oldukça önemlidir. Yüksek kaliteli algılama ve uzun süreli kullanım için, mikrofonun membranı tekrarlanabilir, dayanıklı ve sağlam olmalıdır. Bu özelliklerin eksikliği, yüksek kaliteli bir optik algılama sistemiyle bile sesin hatalı algılanmasına neden olabilir.

Bu endişeler mikrofabrikasyon sürecinde göz önünde bulundurulur. Ticari olarak temin edilebilen çok kullanıcılı çoklu süreç (MUMPS) sunan farklı firmalar bulunmaktadır. Bu süreçlerin her biri farklı esneklikler ve avantajlar sunar. Bu süreçler, fiber optik MEMS mikrofon membranının tasarlanması amacıyla analiz edilmiştir ve sınırlayıcı olmayan MEMS tasarımları sunma kabiliyetinden ve araştırmacıların daha önce elde ettiği olumlu sonuçlardan dolayı POLYMUMPS sürecinin (MEMSCAP Inc., Fransa) proje hedefleri için en uygun süreç olduğuna kanaat getirilmiştir ve membran tasarımının POLYMUMPS süreci kurallarının da göz önüne alınacağı şekilde yapılması hedeflenmiştir (Chan vd., 2010 ; Sheplak vd., 1998).

2.2. POLYMUMPS Süreci

POLYMUMPS, üç katmanlı bir polisilisyum yüzey mikro işleme sürecidir. Bu sürecin temeli, 1980 ve 1990 yılları arasında California Üniversitesi'nde Berkeley Sensör ve Aktüatör Merkezi'nde (BSAC) yapılan çalışmalardan gelmektedir. Birkaç farklı mikro-üretim işlemini tamamladıktan ve kullanıcılardan gelen geri dönüşleri analiz ettikten sonra, süreç daha fazla geliştirilmiştir ve mikrofabrikasyon adımları en uygun yönde evrilmiştir. Bu gelişmeyle birlikte, yüksek teknoloji ürünü cihaz üretimi mümkün hale gelmiştir ve günümüzde, daha gelişmiş cihazlar tek bir çip üzerinde üretilebilmektedir. Günümüzde bu süreç yaygın olarak tüm dünyadaki üniversitelerde ve şirketlerde kullanılmaktadır.

2.2.1. POLYMUMPS Süreç Akışı

POLYMUMPS sürecinde <100> kristal yönlü, 1 - 2 Ω-cm dirençli ve 150 mm çaplı n-tipi katkılı silisyum pullar kullanılmaktadır. Pulun yüzeyi ilk önce fosfor (P) atomları tarafından yüksek oranda katkılıdır. Bu noktada, fosfor katkılı silikat camı (PSG) katkılama kaynağı olarak kullanılır. Bu tabakanın amacı, silisyum pul üzerindeki farklı tasarımlar arasındaki elektriksel kısa devreyi

önlemek ve statik elektrik akışını durdurmaktır. PSG katmanı, difüzyon yoluyla katkılama sağlandıktan sonra uzaklaştırılır. Daha sonra, düşük iç mekanik gerilime sahip 600 nm kalınlığında silikon nitrat tabakası, düşük basınçlı kimyasal buhar biriktirme (LPCVD) süreciyle pul üzerinde biriktirilir.

Silisyum nitrat tabakası biriktirildikten sonra, ilk polisilisyum tabakası, POLY0, LPCVD işlemi ile biriktirilir. POLY0 katmanının kalınlığı 500 nm'dir. Bu katman POLY0 ve HOLE0 maskeleri kullanılarak şekillendirilir. Daha sonra, 2 µm kalınlığındaki birinci oksit tabakası pul üzerinde biriktirilir. Bu oksit tabakası işlemin sonunda aşındırılacak ve bu oksit tabakasının üzerindeki diğer polisilisyum tabakaları havada serbestçe hareket edebilecektir. İlk oksit tabakası ayrıca ANCHOR1 ve DIMPLE maskeleri tarafından da şekillendirilir. ANCHOR1 maskesi, hangi noktalarda, ikinci polisilisyum tabakasının, POLY1'in, doğrudan POLY0'ın üzerine büyütüleceğini gösterir. Maskede belirtilen bu alanlarda, ilk oksit tabakası tamamen aşındırılmaktadır. DIMPLE maskesinin kullanılması isteğe bağlıdır ve belirtilen noktalardaki 750 nm kalınlığındaki oksidi aşındırır. Birinci oksit katmanındaki küçük delikler, işlemin yüzeyine kadar süreç boyunca ilerler. Delikler, ikinci veya üçüncü polisilisyum katmanları, POLY1 veya POLY2 ile doldurulacaktır. Oksit tabakaları ıslak aşındırma ve ardından kuru aşındırma ile aşındırılacağından, membran gibi hareketli tasarımlar sıvının yapışma kuvveti ile yüzeye yapışabilir. Tasarım bir kez yapıştığında, artık ayrılamaz ve tasarım kullanılamaz hale gelir. Bu küçük delikler, hareket eden eleman ile pul arasındaki temas yüzeyini azaltacaktır, bunun da yapışma problemi ihtimalini önemli ölçüde azaltacağı değerlendirilmiştir.

Birinci oksit tabakası biçimlendirildikten sonra, ikinci polisilisyum tabakası, POLY1, pul üzerinde büyütülür. Bu tabakanın kalınlığı 2 µm olmakla birlikte ve ilk mekanik polisilisyum tabakası olarak adlandırılır. MEMSCAP, POLY0 katmanının mekanik amaçlar için değil, POLY1 ve POLY2 katmanlarının mekanik amaçlar için kullanmasını önermektedir. POLY1'in üzerine ince PSG tabakası biriktirilir ve bu yapı 1050 ^{o}C'de bir saat tavlanır. Bu işlemin amacı, n-tipi katkılı bir polisilisyum elde etmek için polisilisyum tabakasını difüzyon yoluyla P atomları ile katkılamaktır. Bu tavlama işlemi aynı zamanda POLY1'deki iç mekanik stresi de ortadan kaldırmaktadır. İkinci polisilisyum katmanı, POLY1, POLY1 ve HOLE1 maskeleri ile şekillendirilir. POLY1'in biçimlendirilmesinden sonra, ikinci oksit tabakası pul üzerinde biriktirilir. İkinci oksit tabakası POLY1-POLY2-VIA ve ANCHOR2 maskeleri ile şekillendirilir. POLY1-POLY2-VIA maskesi, POLY2'nin doğrudan POLY1 üzerine biriktirileceği bölgeleri gösterir. ANCHOR2 maskesi ise, POLY2'nin doğrudan POLY0 üzerine biriktirileceği bölgeleri gösterir. ANCHOR2 maskesi akıllıca

kullanılmalıdır, çünkü uygun olmayan ANCHOR2 tasarımı hatalı sonuçlara yol açabilmektedir. Örneğin, doğrudan POLY0 üzerinde POLY2'yi büyütmek için, aralarında herhangi bir POLY1 katmanı olmamalıdır. Tasarımcı POLY1 katmanının ikinci oksidin bazı bölgelerinde bulunduğunu unutur ve ANCHOR2 maskesini ve POLY1 bölgelerini üst üste binecek şekilde tasarlarsa, POLY2 doğrudan POLY0 üzerinde büyütülemez.

İkinci oksit tabakası şekillendirildikten sonra, üçüncü polisilisyum tabakası, POLY2, pul üzerinde büyütülür. POLY2, ikinci mekanik polisilisyum tabakasıdır. POLY2 katmanı 1.5 μm kalınlığındadır ve üzerine ince bir PSG katmanı büyütülmüştür. Yapı, bir saat boyunca 1050 °C'de tavlanır. Tavlamanın amacı, n tipi yapmak için POLY2'yi P atomları ile karıştırmak ve içindeki mekanik baskıyı ortadan kaldırmaktır. POLY2 katmanı, POLY2 ve HOLE2 katmanları ile şekillendirilir.

Tüm polisilisyum ve oksit tabakaları şekillendirildikten sonra, metal tabaka pul üzerine biriktirilir ve METAL ve HOLEM maskeleri kullanılarak kaldırma (lift-off) işlemi ile şekillendirilir. Bu metal katman elektriksel bağlantı amacıyla kullanıldığı gibi optik olarak yansıtıcı yüzeyler oluşturmak için de kullanılabilir.

Son olarak, oksit tabakalarını aşındırmak için tasarım ıslak aşındırma kullanılmaktadır. Islak aşındırma sırasında, bir tasarımdaki çözünmüş oksit başka bir tasarım boyunca yayılabilir ve buna yapışabilir. Bu bir soruna neden olur. Bu amaçla, ilk önce, herhangi bir hasardan kaçınmak için, tek bir pul üzerindeki farklı tasarımlar kesim işlemi ile ayrılır. Ardından tasarımlar oda sıcaklığında %49 derişiminde HF çözeltisine konulur ve 1.5-2 saat bekletilir. Islak aşındırma işleminden sonra, çipler birkaç dakika damıtılmış suya konur ve ardından birkaç dakika tekrar alkole alınırlar. Son olarak, çipler bir fırında 100 °C'de 10 dakika boyunca tavlanır. Bazı tasarımlarda tasarımcı, oksidi süperkritik CO_2 kuru aşındırmasıyla daha da aşındırmak isteyebilir. Bu gibi durumlarda, çipler oksit tabakalarının kuru aşındırması için CO_2 gazına konulur.

Oksit tabakaların uzaklaştırılmasından sonra, mikro-üretim sonlandırılır ve çipler tasarımcıya teslim edilmek üzere hazır hale gelir.

2.2.2. POLYMUMPS Tasarım Kuralları

Tasarım kurallarının amacı, tasarımcıya hatasız tasarımlar için rehberlik etmektir. Bu tasarım kuralları MEMSCAP işverenlerinin tecrübesi ve tasarımcıların geri bildirimleri ile geliştirilmiştir. Tasarım kuralları, sürecin sınırlamaları göz önünde bulundurularak her bir süreç

adımı kuralına ilişkin sınırlamalarla oluşturulur. Tasarım kurallarının temel amacı kararlı ve tekrar edilebilir süreçler elde etmektir. Bu kurallar temel olarak, asgari özellik boyutu, fotolitografi, cihaz çözünürlüğü gibi mikrofabrikasyon cihazlarının sınırlamalarından gelir.

POLYMUMPS işlemi için iki tür tasarım kuralı vardır: zorunlu ve tavsiye edilen tasarım kuralları. Zorunlu tasarım kurallarının ihlali, tasarımlarda istenmeyen ve öngörülemeyen hasarlara neden olabilir. Aslında, MEMSCAP, zorunlu tasarım kurallarını ihlal eden bir tasarımı üretimden çıkarma hakkına sahiptir. Öte yandan, tavsiye edilen tasarım kuralları, tasarımın hatasız mikrofabrikasyonunu elde etmek için şirket işverenlerinin tavsiyesi olarak düşünülmelidir.

Genel olarak tasarım kuralları, farklı katmanlar arasındaki mesafeyi ve farklı katmanların üst üste binme durumundaki sınırlayıcı hususları belirtir. Bununla birlikte, tasarım kuralları en uç sınırlardır. Başka bir deyişle, tasarım kurallarının ötesinde bir miktar güvenlik payı olmalıdır. POLYMUMPS sürecindeki katmanlar, her birinin kalınlığı ve her kat için karşılık gelen maskeler Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. POLYMUMPS sürecindeki katmanlar, her birinin kalınlığı ve her kat için karşılık gelen maskeler.

Katman Malzemesi	Katman Kalınlığı (μm)	Mikro-üretim Maskesi
Silisyum Nitrat	0.6	--
POLY0	0.5	POLY0 (HOLE0)
Birinci Oksit	2.0	DIMPLE ANCHOR1
POLY1	2.0	POLY1 (HOLE1)
İkinci Oksit	0.75	POLY1-POLY2-VIA ANCHOR2
POLY2	1.5	POLY2 (HOLE2)
Metal	0.5	METAL (HOLEM)

Tablo 2.1'de, her polisilisyum katmanın iki maskeye sahip olduğu görülmektedir. Aslında, bu MEMSCAP'in tasarımcıya verdiği esnekliktir. Bu maskeler mikro-üretimden önce birleştirilecektir, ancak oksidin ıslak aşındırma sırasında aşındırma delikleri gerektiğinden, delik tasarımı zorunludur. Tasarımcı aşındırma delikleriyle ilgili kafa karışıklığı yaşayabilir. Bunu

önlemek için, POLY ve METAL maskeleri üzerine diğer şekillendirme yapıları çizilirken HOLE maskelerine aşındırma delikleri çizilebilir.

2.2.2.1. Zorunlu Tasarım Kuralları

Süreçte, polisilisyum tabaka maskeleri aydınlık olarak tanımlanırken, oksit tabaka maskeleri karanlık olarak tanımlanır. Aydınlık maskeleri tasarlarken, tasarımcının çıkarmak istemediği bölgeler çizilmelidir. Diğer yandan, karanlık maskeler tasarlanırken, tasarımcının çıkarmak istediği bölgeler çizilmelidir. Tasarım maskeleri, aydınlık/karanlık özellikleri ve amaçları Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. POLYMUMPS süreci maskeleri ve özellikleri.

Maske Adı	Maske Özelliği	Maske Amacı
POLY0	Aydınlık	POLY0 katmanını şekillendirmek
ANCHOR1	Karanlık	POLY1 ve POLY0 arasında bağlantı delikleri açmak
DIMPLE	Karanlık	POLY1 için küçük delikler açmak
POLY1	Aydınlık	POLY1 katmanını şekillendirmek
POLY1-POLY2-VIA	Karanlık	POLY2 ve POLY1 arasında bağlantı delikleri açmak
ANCHOR2	Karanlık	POLY2 ve POLY0 arasında bağlantı delikleri açmak
POLY2	Aydınlık	POLY2 katmanını şekillendirmek
METAL	Aydınlık	METAL katmanını şekillendirmek
HOLE0	Karanlık	POLY0 için delik açmak
HOLE1	Karanlık	POLY1 için delik açmak
HOLE2	Karanlık	POLY2 için delik açmak
HOLEM	Karanlık	METAL için delik açmak

Mikrofabrikasyon maskelerinin amaçları ve özellikleri tasarımcıya uygun tasarımlar için rehberlik etmelidir. Özelliklere ek olarak, mikrofabrikasyon maskeleri için zorunlu tasarım kuralları Tablo 2.3'de verilmiştir. Bu kurallar her adım için gereken minimum boyutlardır. Tekrarlanabilir tasarımlar için bu sınırlara güvenlik payları uygulanmalıdır.

Tablo 2.3. POLYMUMPS süreç maskeleri için zorunlu tasarım kuralları.

Kural	En küçük değer (μm)
POLY0 ve ANCHOR1 arasındaki mesafe	4.0
POLY0, ANCHOR1'i kapsamaktadır	4.0
POLY0, POLY1'i kapsamaktadır	4.0
POLY0, POLY2y'i kapsamaktadır	5.0
POLY0, ANCHOR2'yi kapsamaktadır	5.0
POLY1 ANCHOR1'i kapsamaktadır	4.0
POLY1, POLY1-POLY2-VIA'yı kapsamaktadır	4.0
POLY1, POLY2'yi kapsamaktadır	4.0
POLY1 ve ANCHOR2 arasındaki mesafe	4.0
POLY1 aşındırma delikleri arasındaki mesafe	**MAX** 30.0
POLY2, ANCHOR2'yi kapsamaktadır	5.0
POLY2, POLY1-POLY2-VIA'yı kapsamaktadır	4.0
POLY2 ve POLY1 çakışmaktadır	5.0
POLY2 ve POLY1 katmanlarının üst üste binmesi durumunda, POLY2 ve POLY1 kenarı arasındaki mesafe	4.0
POLY1, METAL'i kapsamaktadır	3.0
POLY2 ve POLY1 arasındaki mesafe	3.0
HOLE2, HOLE1'i kapsamaktadır	2.0
HOLEM, HOLE2'yi kapsamaktadır	2.0
POLY2 aşındırma delikleri arasındaki mesafe	**MAX** 30.0

2.2.2.2. Tavsiye Edilen Tasarım Kuralları

MEMSCAP firması, zorunlu tasarım kurallarına ek olarak tavsiye edilen tasarım kurallarını da kullanıcıları ile paylaşmıştır. Bu kurallar firmanın daha önceki tecrübelerine dayandırılmaktadır. Bu kurallara uyulması başarılı bir üretim için zaruri değildir ancak aksi durumda ortaya çıkabilecek öngörülemeyen sorunların sorumluluğu tasarımcıya bırakılmıştır. Bu sebeple, tavsiye edilen tasarım kurallarının da en az zorunlu tasarım kuralları kadar dikkate alınması gerekmektedir.

2.2.2.2.1. Delik Kullanımı ve Yoğunluğu

ANCHOR1, ANCHOR2 ve POLY1-POLY2-VIA maskeleri kullanılarak, farklı katmanlar arasında delikler elde edilebilir. Bu deliklerin aşındırma delikleri olmadığına dikkat etmek önemlidir. MEMSCAP'a göre, başlangıç seviyesindeki tasarımcılar bazen ihtiyaç duymadan oksit deliklerini kullanmaktadır ve sonra bu deliklere, onlara karşılık gelen polisilisyum tabakaları ile doldurmamaktadır. Bu durum iki problem yaratacaktır. İlk olarak, bu deliklerdeki polisilisyum tabakalar merdiven şeklinde aşındırılabilir ve bunun öngörülemeyen sonuçları olabilir. İkincisi ve en önemlisi ise, bu deliklerin altındaki polisilisyumun daha sonraki işlem adımlarında istenmeden aşındırılmasıdır. Sonuç olarak, faydalı polisilisyum tabakaları zarar görebilir.

2.2.2.2.2. Uygunsuz ANCHOR1 ve VIA Delik Boyutları

Uygun olmayan oksit deliklerinin boyutları bu deliklerin konumlarının sapmasına neden olabilir. Bu nedenle, önemli bir amaç olmadan, polisilisyum katmanın ebadı, delik ebadından daha büyük olmalıdır. Bu durum hem POLY1 hem de POLY2 katmanları için geçerlidir.

2.2.2.2.3. Uygunsuz PAD Tasarımı

Elektrik pedlerinin (elektriksel ölçüm noktalarının) farklı katmanlar arasında muhafaza sınırları gözetilmeksizin yanlış tasarlanması durumunda sorunlar olabilir. Bazı kullanıcılar daha önceki tasarımlarında elektrik pedlerinin istemeden aşındırılmış silisyum nitrat bölgelerine yerleştirilmesinin sorunlara yol açtığını bildirmiştir. Bunun nedeni, silisyum çip ve elektrik pedleri arasındaki elektriksel kısa devredir. Bu tür problemleri önlemek için, tasarımcı MEMSCAP'ten uygun elektrik ped tasarımını istemeli ve olduğu gibi kullanmalıdır. MEMSCAP bunun için hiçbir ek ücret talep etmemektedir ve ped tasarım dosyasını kullanıcıları ile paylaşmaktadır.

2.2.2.2.4. METAL Katmanının Kullanımı

POLYMUMPS sürecinde, POLY2'nin üstüne metal katman büyütmek en uygun yöntemdir. Bunun nedeni POLY2'nin oksijensiz yüzeyine dayanmaktadır. Bazı başlangıç seviyesindeki

tasarımcılar doğrudan oksit tabakaları üzerine metal kaplanacak şekilde tasarım yapmaktadır ve oksit aşındırmasından sonra, tasarımda elektriksel kısa devre gibi ciddi sorunlar ortaya çıkar.

Buna ek olarak, POLY2 katmanı üzerinde düzgün metal büyümesi için, bu tabakalar arasında krom tabakasıkullanılır. Bu krom katmanı, metalin POLY2'ye yapışmasını kolaylaştırır. Bu kaplama işlemi lift-off (kaldırma) yoluyla yapılmaktadır. Bazen, lift-off sırasında, bazı metal bölgeler istenmeden kaldırılabilir. Bunu sebebi fotolitografi hatalarına dayanmaktadır. MEMSCAP'e göre, metalin ince krom katmandan polisilisyum katmana yapışabileceği en uygun yüzey POLY2 yüzeyidir.

2.2.3. POLYMUMPS Süreci ve İnce Film Parametreleri

POLYMUMPS işleminde bir adet silikon nitrat tabakası, üç adet polisilisyum tabakası, iki adet oksit tabakası ve bir adet metal tabaka bulunmaktadır. MEMSCAP, mikrofabrikasyon işlemi sırasında ve sonrasında alınan ölçüme göre her katmanın özelliklerini kullanıcıları ile paylaşır. Bu veriler her mikrofabrikasyon çalışması için alınmış ve tasarımcıya ortalama ve aşırı değerler verilmiştir. Katmanların özellikleri Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.2. POLYMUMPS süreci katman özellikleri.

Katman	Kalınlık (A^o)			Mekanik İç Gerilim (MPa)			Elektriksel Direnç (Ω/sq)		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
Silisyum Nitrat	5300	6000	6700	0	90	180		N/A	
POLY0	4700	5000	5300	0	-25	-50	15	30	45
Birinci Oksit	17500	20000	22500		N/A			N/A	
POLY1	18500	20000	21500	0	-10	-20	1	10	20
İkinci Oksit	6700	7500	8300		N/A			N/A	
POLY2	14000	15000	16000	0	-10	-20	10	20	30
Metal	4600	5200	5800	0	50	100	0.05	0.06	0.07

2.3. Membranın Teorik Tasarımı

Fiber optik MEMS mikrofonunun membranı, sistemin temel algılama elemanıdır. Sistemin özellikleri temel olarak membran özellikleri ile sınırlıdır. Literatürde farklı membran tasarımları ve algılama yaklaşımları bulunmaktadır. Tablo 2.5'te, farklı MEMS mikrofonlar, çeşitli özellikleri ile gösterilmektedir. Kapasitif, piezorezistif ve piezoelektrik mikrofon örnekleri vardır.

Tablo 2.3. Literatürde bulunan MEMS mikrofonlar ve özellikleri.

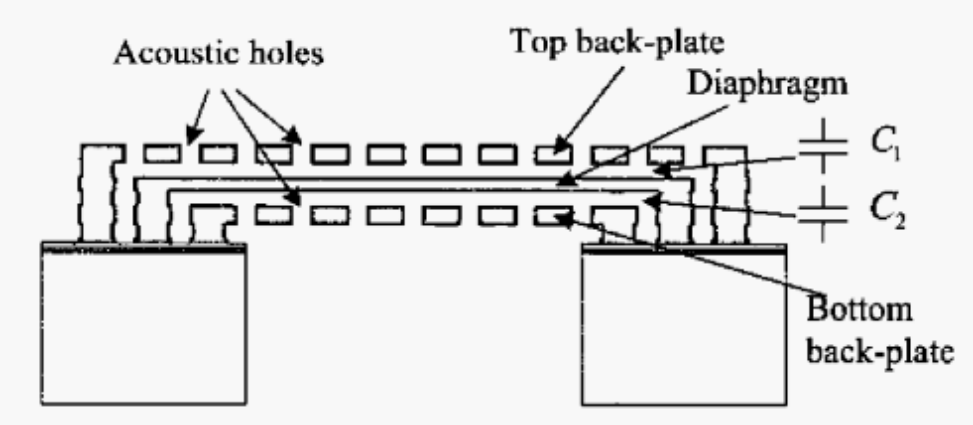
Makale Numarası ve İlgili Tasarım	Dönüştürücü Tipi	Sensör Boyutları	Hassasiyet	Dinamik Aralık	Bant Genişliği
1- Sheplak vd. (1998)	Piezorezistif	105μm x 0.15μm	2.24 μV/Pa/V	92 dB – 155 dB	200 Hz – 6 kHz
2- Huang vd. (2002)	Piezorezistif	710μm x 0.38μm	1.1 mv/Pa/V	53 dB – 174 dB	100 Hz – 10 kHz
3- Scheeper vd. (2003)	Kapasitif	1950μm x 0.5μm	22.4 mV/Pa	23 dB – 141 dB	251 Hz – 20 kHz
4- Martin vd. (2007)	Kapasitif	230μm x 2.25μm	390 mV/Pa	41 dB – 164 dB	300 Hz – 20 kHz
5- Martin vd. (2008)	Kapasitif	230μm x 2.25μm	166 μV/Pa	22.7 dB – 164 dB	300 Hz – 20 kHz
6- Chan vd. (2010)	Kapasitif	--	12.63 mV/Pa	--	500 Hz – 20 kHz
7- Yang vd. (2010)	Kapasitif	450μm diameter	14.45 mV/Pa	--	
8- Chao vd. (2013)	Kapasitif	--	1.7 mV/Pa	--	100 Hz – 10 kHz
9- Franz vd. (1988)	Piezoelektrik (AlN)	0.72mm^2 x 1μm	25 μV/Pa	68 dB - --	-- - 45 kHz
10- Horowitz vd. (2007)	Piezoelektrik (PZT)	900μm x 3.0μm	1.66 μV/Pa	35.7 dB – 169 dB	100 Hz – 6.7 kHz
11- Litrell vd. (2010)	Piezoelektrik (AlN)	0.62mm^2 x 2.3μm	1.82 mV/Pa	37 dB – 128 dB	50 Hz – 80 kHz
12- Grosh vd. (2013)	Piezoelektrik (AlN)	--	0.71 mV/Pa	--	--
13- Lee vd. (2008)	Piezoelektrik	--	8.1 mV/Pa	--	--

Membran üretiminde POLYMUMPS süreci kullanılacağı için, piezorezistif ve piezoelektrik tasarımlar detaylı olarak incelenmemektedir. Bununla birlikte, kapasitif MEMS mikrofonlarının diyaframları, fiber optik MEMS mikrofonlarının diyaframlarına oldukça benzemektedir. Temel olarak, bir tanesi hareketsiz bir tanesi hareketli olan iki plaka, her ikisinde de bulunur. Bu nedenle,

kapasitif mikrofonların diyafram tasarımlarının değerli olduğu değerlendirilmiştir ve ayırntılı incelenmiştir.

Tablo 2.5'deki kapasitif MEMS mikrofonlarının en önemli parametreleri bant genişliği ve boyuttur. Sesin duyulabilir frekans aralığında (20 Hz – 20 kHz) algılanması için membran bu aralıkta hassas olmalıdır (Martin vd., 2005). Diğer bir kaygı ise membranın faz tepkisidir. Sesi düzgün bir şekilde elde etmek için, frekanslar neredeyse sabit bir faz hissetmelidir, aksi takdirde ses bozulabilir. 25-30 kHz rezonans frekansına sahip bir membran, duyulabilir frekansları algılayabilir ve bunlara neredeyse sabit faz tepkisi verebilir.

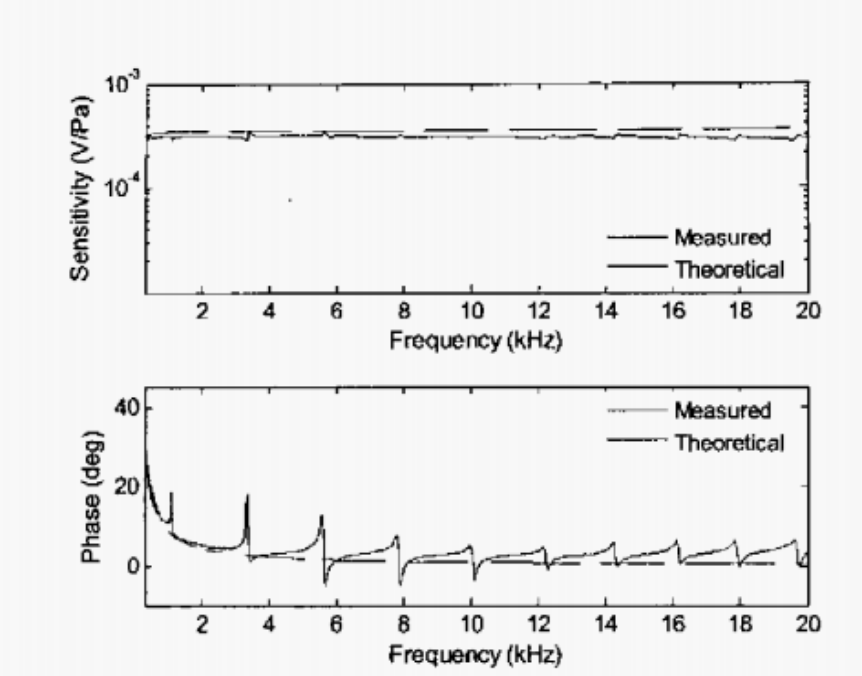
Bu rezonans frekansı ve duyulabilir frekans aralığı göz önüne alındığında, tablo 2.5'teki 4, 5 ve 6 numaralı mikrofonların incelenmesi en uygun tasarımlar olarak değerlendirilmektedir. 4 numaralı mikrofonun tasarımında hava delikleri bulunmaktadır. Bu tasarım POLYMUMPS işleminin zorunlu kıldığı aşındırma delikleri ile oluşan delikli membran yapısına oldukça benzemektedir ve bu özelliği sebebiyle oldukça önemlidir. 4 numaralı mikrofondaki membran tasarımı, Şekil 2.1'deki gibidir.



Şekil 2.1. Delikli yapıdaki kapasitif diyafram (Martin vd., 2005)

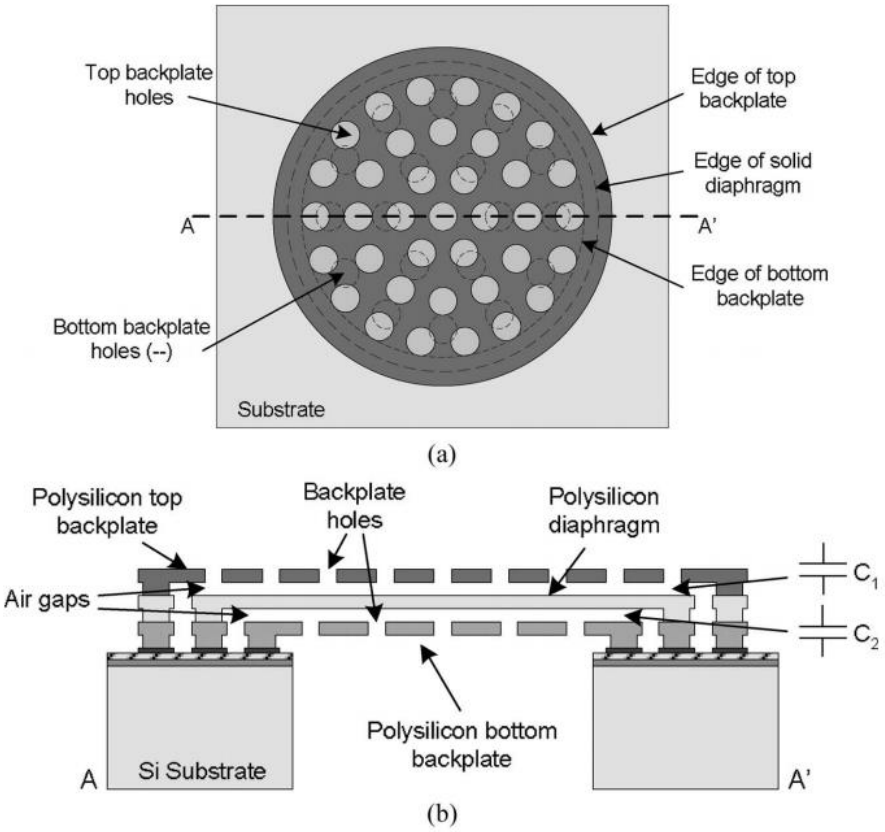
Şekil 2.1'deki akustik delikler, POLYMUMPS'ın gerektirdiği deliklere çok benzer yapıdadır; periyodik şekilde diyaframın tüm yüzeyine yerleştirilmişlerdir. Bu tasarımda, “SUMMIT V” olarak adlandırılan MEMS süreci kullanılmaktadır. Bu işlem POLYMUMPS'ta olduğu gibi feda edilebilir oksit tabakalarını içerir. 'SUMMIT V' de, feda edilebilir oksit tabakalarının işlemden sonra aşındırılacağı şekilde aşındırma delikleri gerekmektedir. Bu makalede, deliklerin diyaframın akustik performansını arttırdığı gösterilmiştir. Bu mikrofon için elde edilen hassasiyet ve faz yanıt verileri, Şekil 2.2'de gösterildiği gibidir.

Şekil 2.2'de, mikrofonun 300 Hz - 20 kHz frekans bandında çalıştığı ve sistemin giriş sinyallerine verdiği faz tepkisinin 1 kHz - 20 kHz frekans aralığı için çok küçük (10^{o}'den küçük) olduğu gösterilmiştir. Bu mikrofondaki diyafram daireseldir ve çapı 460 μm'dir. Diyaframın rezonans frekansı hakkında özel bir bilgi yoktur, ancak faz tepkisinden, ilgilenilen frekans aralığında birden çok rezonans frekansı olduğu sonucuna varılabilir. Bu nedenle, bu makalenin sonuçları, fiber optik MEMS mikrofonunda duyulabilir frekans tespiti için membran tasarımı konusunda oldukça önemlidir.



Şekil 2.2. Kapasitif mikrofonun test sonuçları (Martin vd., 2010)

5 numaralı mikrofon da “SUMMIT V” süreciyle üretilmiştir. Bu mikrofonun diyaframı, Şekil 2.3'te gösterildiği gibidir.



Şekil 2.3. Kapasitif mikrofonun diyaframının (a) üstten ve (b) kesit görüntüsü (Littrell, 2010)

Bu tasarımda, biri diyafram, diğeri diyaframın taşıyıcı malzemeleri olmak üzere üç farklı polisilisyum katmanı olduğu açıkça gösterilmiştir. Hava delikleri ayrıca Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Bu tasarımdaki diyafram 460 μm çapa ve 174 kHz'lik rezonans frekansına sahiptir. Ayrıca, bu diyafram 300 Hz - 20 kHz frekans aralığında tepki vermektedir. Bant genişliği ve zarın fiziksel yapısı, fiber optik MEMS mikrofonunun diyaframının gereklilikleri ile örtüşmektedir.

Literatürden anlaşıldığı üzere zarın fiziksel yapısı tepkisellik özellikleri açısından oldukça önemlidir. Bununla birlikte, incelenen makaleler kapasitif algılamayı kapsadığından, bu diyaframların rezonans frekansları duyulabilir frekans aralığından çok daha yüksektir. Fiber optik MEMS mikrofon için 25-30 kHz'lik rezonans frekansı gereklidir.

2.3.1. Membranın Çapı

Bir membranın ilk rezonans frekansını etkileyen parametreler, malzeme özellikleri ve boyutlarıdır. Dairesel bir membran için bu ilişki Denklem 2.1 ile gösterilmektedir.

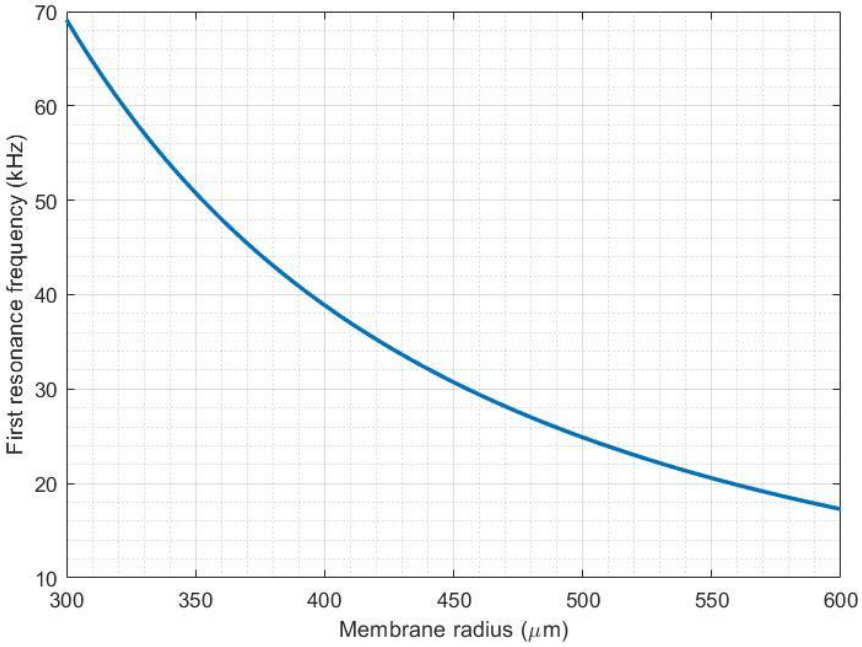
$$f = \frac{10.21}{2\pi a^2}\sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho(1-\mu^2)}} \quad (2.1)$$

Bu formüldeki parametrelerin anlamı ve MEMSCAP'ten elde edilen değerleri Tablo 2.6'da verilmiştir. Membranın üretimi için POLYMUMPS süreci kullanılacağı için tasarım esnasında burada verilen değerler kullanılmalıdır.

Tablo 2.4. Dairesel bir membranın ilk rezonans frekans parametreleri ve POLYMUMPS süreci için değerleri.

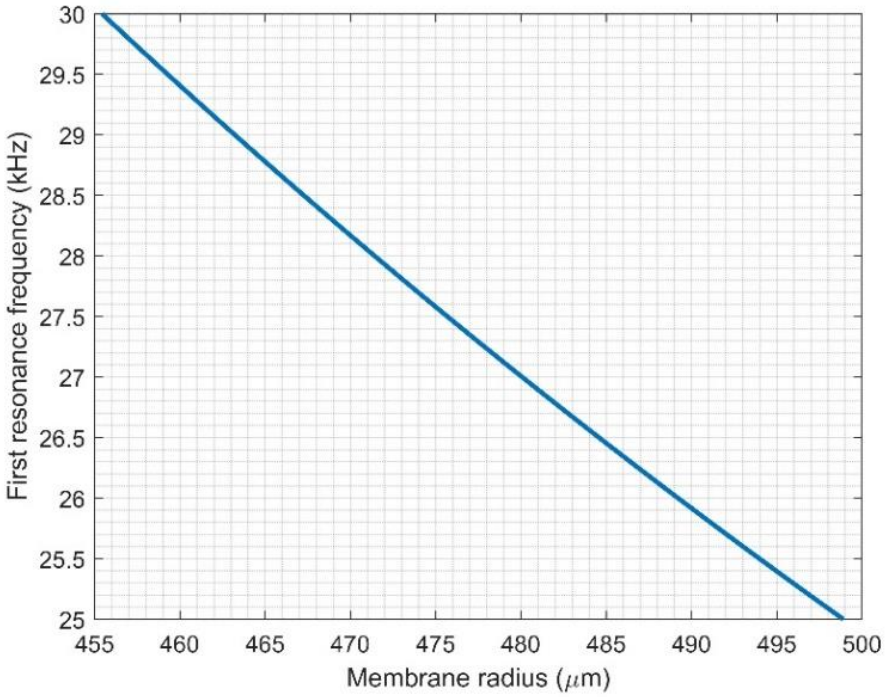
Parametre	Değer
E (Polisilisyumun Young's modulusu)	168 GPa
μ (Polisilisyumun Poisson oranı)	0.22
ρ (Polisilisyumun özkütlesi)	2.3 g/cm^3
h (Polisilisyum membran kalınlığı)	1.5239 μm
a (Membranın yarıçapı)	μm seviyesinde değişken

Farklı yarıçap değerleri için dairesel bir membranın ilk rezonans frekansı, Şekil 2.4'teki gibidir.



Şekil 2.4. Farklı yarıçap değerleri için dairesel bir membranın ilk rezonans frekansı.

Şekil 2.4'ten anlaşılacağı üzere, membranın yarıçapı arttıkça, ilk rezonans frekans değeri azalmaktadır. Fiber optik MEMS mikrofon için, ilk rezonans frekansı 25-30 kHz olan ve 450-500 μm diyafram yarıçapına karşılık gelen bir membran elde edilmesi amaçlanmaktadır. İlk rezonans frekansının farklı diyafram yarıçapı değerleri ile değişimini daha net bir şekilde gözlemlemek için ilgilenilen frekans bölgesi, Şekil 2.5'de gösterildiği gibi çizilmiştir.



Şekil 2.5. İlgili frekans bölgesinde (25-30 kHz) farklı yarıçap değerleri için dairesel bir membranın ilk rezonans frekansı.

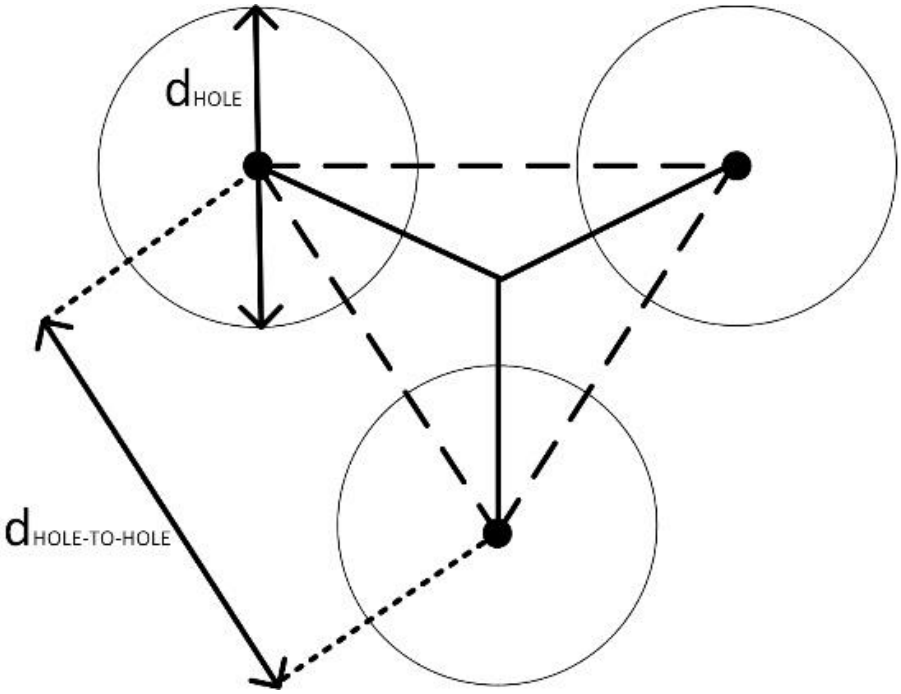
Karakteristiklerin 25-30 kHz frekans aralığında neredeyse doğrusal olduğu gözlenmiştir. Membran üretiminde POLYMUMPS süreci kullanılacağı için membran üzerinde hava deliklerinin olacağı unutulmamalıdır. Bir membranın rezonans frekansı temel olarak Denklem 2.2 gibi gösterilebilmektedir.

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{2.2}$$

Burada k yay sabiti, m ise membranın kütlesidir. Tasarımda bulunacak olan deliklerin membran kütlesini ve yay sabitini benzer oranda azaltacağı değerlendirilmektedir. Sonuç olarak membrandaki deliklerin birince rezonans frekansında büyük bir değişime sebep olacağı öngörülmemektedir.

2.3.2. Delik Tasarımı

Membranın çapı 1000 µm olarak seçildikten sonra, membranın incelenmesi gereken bir başka tasarım parametresi, membranın delik çapı ve hava delikleri arasındaki mesafedir. Tasarım kurallarına göre, membranın altında iyi bir oksit aşındırması elde etmek için, membrandaki herhangi bir nokta, en fazla 15 µm mesafeli hava deliklerinden herhangi biri ile ulaşılabilir olmalıdır. Bu problem, Şekil 2.6'daki gibi gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Delik tasarımı ve yerleştirilmesi problemi.

d_{HOLE} bir hava deliğinin çapı ve $d_{HOLE-TO-HOLE}$ iki hava deliğinin merkezi arasındaki mesafedir. Membran tamamen simetrik olduğundan, hava deliği boyutları ve herhangi iki hava deliği arasındaki mesafeler, membran üzerinde herhangi bir yerde aynıdır. Bu nedenle, delik tasarımında sadece iki değişken vardır.

Simetri nedeniyle, komşu hava deliklerinin merkezleri bir eşkenar üçgen oluşturur. Geometrik problem aşağıdaki Denklem 2.3 ve 2.4 ile gösterilebilir.

$$(\mathrm{d_{HOLE-TO-HOLE}}) * \frac{\sqrt{3}}{2} * \frac{2}{3} - \frac{\mathrm{d_{HOLE}}}{2} \lesssim 15\mu\mathrm{m} \qquad (2.3)$$

$$2\mathrm{d_{HOLE-TO-HOLE}} - \sqrt{3}\mathrm{d_{HOLE}} \lesssim 30\sqrt{3}\mu\mathrm{m} \qquad (2.4)$$

Boyutlardaki bir kısıtlama yukarıda verilen denklemler ile gösterilmektedir. Delik tasarımının bir diğer amacı doldurma faktörünü (FF) en üst düzeye çıkarmaktır. Polisilisyum ile doldurulmuş alan arttıkça, yansıtıcı alan da artar. FF Denklem 2.5 ve 2.6 gibi hesaplanabilir.

$$FF = \frac{d_{HOLE-TO-HOLE}{}^2 * \frac{\sqrt{3}}{4} - \pi \frac{(\frac{d_{HOLE}}{2})^2}{2}}{d_{HOLE-TO-HOLE}{}^2 * \frac{\sqrt{3}}{4}} \quad (2.5)$$

$$FF = 1 - \frac{\pi}{2\sqrt{3}} (\frac{d_{HOLE}}{d_{HOLE-TO-HOLE}})^2 \quad (2.6)$$

FF için bir sınır belirlemek için ışığın en az % 50'sinin membran yüzeyinden yansıyacağı şekilde % 50 FF elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu limiti belirleyerek, tasarım sorunu Denklem 2.7'deki eşitsizliğe indirgenebilmektedir.

$$\frac{d_{HOLE}}{d_{HOLE-TO-HOLE}} < 0.75 \quad (2.7)$$

Bu optimizasyon problemi d_{HOLE} = 36 µm ve $d_{HOLE-TO-HOLE}$ = 50 µm olınarak çözülmüştür. Bu optimizasyon ayrıca mikro-üretim için güvenlik marjlarını da içerir. Bu durumda, FF %53'tür ve membrandaki herhangi bir nokta ile bir hava deliği arasındaki maksimum mesafe, %7 güvenlik payıyla 14 µm'dir.

2.4. Optik Algılama Sistemi Tasarımı

Fiber optik MEMS mikrofon, membranın yansıtıcı yüzü üzerinden yansıyan ışığı gelen akustik basınç ile module eder. Işıkta oluşan değişimler fotodedektör ile elektriksel gerilime dönüştürülür. Bu nedenle, ölçüm kurulumu sırasında optik ve elektronik devrelerin birlikte kullanılmasını gerektirir. Optik system, ışığı taşıyıp ve MEMS mikrofon ile elde edilen Fabry-Perot interferometre aracılığıyla onu modüle ederken, elektronik sistem ışığın algılanmasından, verilerin toplanmasından ve verilerin işlenmesinden sorumludur. Enerji dönüşüm noktaları, yani optik enerjinin elektriksel enerjiye dönüştüğü yerler, sistemin sağlığı ve veriler için önemlidir. Net, özlü ve geçerli bir deneysel ortam oluşturmak için uygun enerji dönüşüm teknikleri ve cihazları kullanılmalıdır. Sistem minimum gürültü ve kayıp ile bir enerjiyi diğerine dönüştürmelidir. Sonraki bölümlerde, sistemi inşa etmek için oluşturulan elemanların rolleri ve çeşitliliği, ve sistemin amacına uygunluğu ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Ayrıca, veri toplamak için kullanılan kuvvet ve faz modülasyon teknikleri açıklanacak ve verilerin toplanmasının optimum yolunun seçilmesi

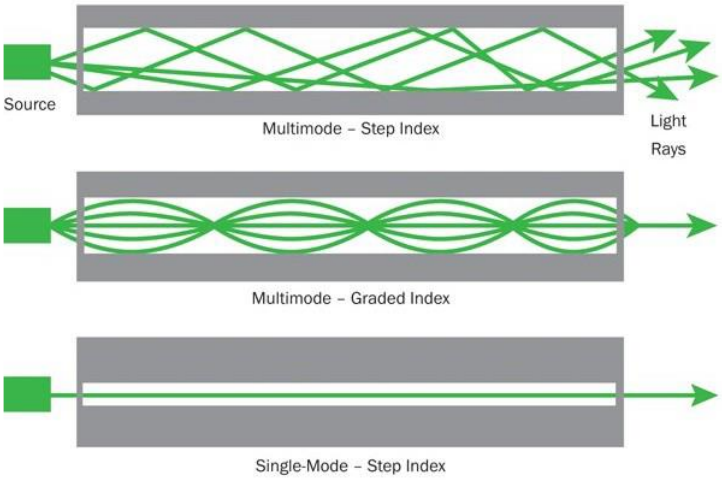
amacıyla karşılaştırılacaktır. Son olarak, ölçüm sisteminin fizibilitesini tahmin etmek için oluşturulan tasarım simülasyonu tanıtılacaktır.

2.4.1. Optik Elemanlar

2.4.1.1. Fiber Optik Kablolar

Daha önce belirtildiği gibi, farklı uygulamaların farklı beklentilerini karşılamak için kullanılan çeşitli fiber türleri vardır. Temel olarak 3 tip fiber kablo vardır; tek modlu, çoklu mod ve mikroyapılı optik fiberler. Tek modlu fiberler, adından da anlaşılacağı gibi, fiberlerin çekirdeğinde sadece bir modun ilerlemesine izin veren yapıdadırlar. Işık, diğer fiber türlerine göre nispeten küçük bir alana sınırlandırılmıştır. Çünkü çekirdeğin çapı aynı zamanda çekirdeğe izin verilen bir mod numarası parametresidir. Ayrıca, çap arttırıldığında izin verilen mod numarası arttırılır. Tek modlu elyafın tipik çekirdek çapı 9 μm civarındadır ve 8.3 ila 10 μm arasında değişebilir. Zayıflama kayıplarına karşı daha az hassastırlar ve çok modlu fiberlerden daha fazla veri taşırlar. Çekirdeğin içinde sadece bir mod taşıdıklarından, modal dağılımdan muzdarip olmazlar. Ayrıca, tek modlu fiberler, fiberin malzemesine bağlı olan pencerede belirli bir dalga boyunda sıfır dağılım gösterecek şekilde ayarlanabilir.

Çok modlu fiberler, aynı çekirdekte birden fazla modu yönlendirebilir. Çok modlu fiberler tipik olarak 50, 62.5 ve 100 μm çekirdek çapına sahiptirler ve bu değerler tek modlu fiberlere göre oldukça yüksektir. Tek modlu ve çoklu mod arasındaki ışık yayılımının ve çekirdek çapının karşılaştırılması Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Çekirdek içinde çok sayıda mod yönlendirilirken, çekirdeğin içinde yayılan ışığın toplam iç yansımaları olması zorunludur. Yayılan ışık her yansımadaki gücünün bir bölümünü kaybettiğinden, her yansıma ile zayıflama ve kayıplar artar. Böylece, çok modlu fiberler, tek modlu fiberlerden daha yüksek zayıflama katsayısına sahiptir. Ayrıca, bunlar modal dağılımdan muzdariptir.



Şekil 2.7. Çok modlu ve tek modlu fiberlerin kesitleri

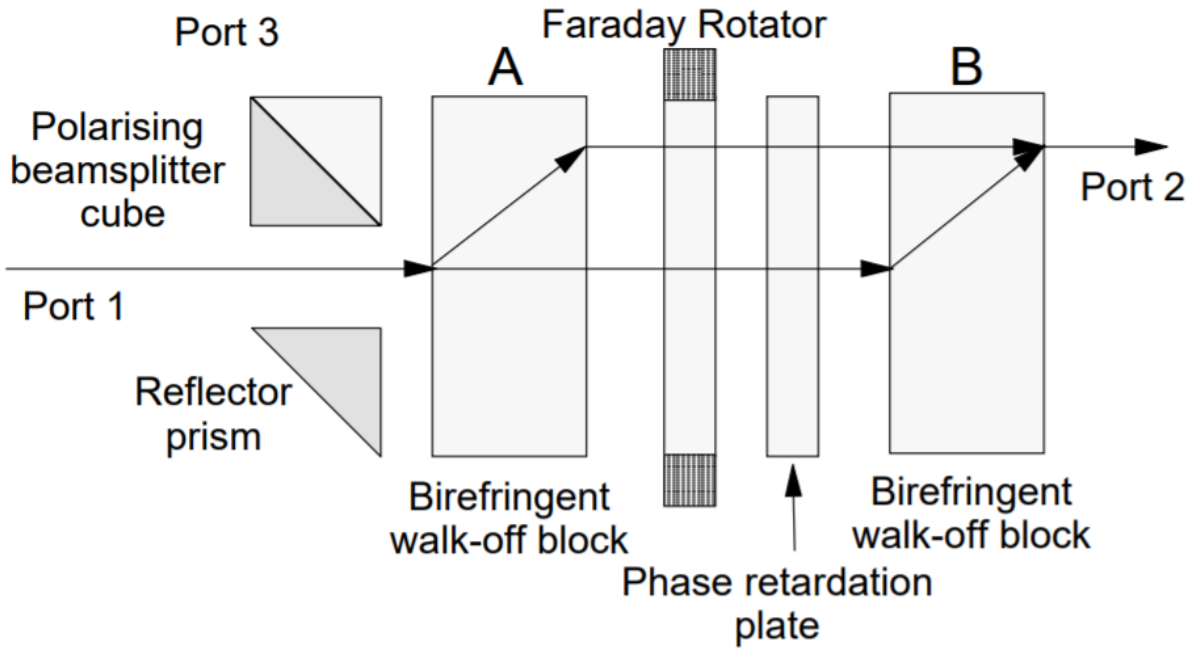
Dağılma, fiberden yayıldıkça ışık darbesinin genişlemesi olarak tanımlanabilir. Çok modlu fiberler çoğunlukla kromatik ve modsal dağılımdan muzdaripken, tek modlu fiberler yalnızca kromatik dağılmadan muzdariptir. Kromatik dağılım, spektral genişliğe sahip optik kaynakların doğal nedenidir. Spektral genişlik arttıkça, sağlanan dalga boyu aralığı artar. Farklı dalga boylarına sahip olan ışık, ortamdaki farklı bir hızda hareket ettiğinden, fiberin ucuna biraz farklı zamanlarda ulaşırlar. Bu nedenle titreşim genişlemesi meydana gelir. Modal dağılım durumunda, farklı modlar farklı yörüngelerde seyahat eder, bu da çekirdeğin içindeki farklı açılarda yansımalara neden olur. Optik yol yansımadaki artış nedeniyle artar. Böylece, optik yoldaki değişiklikler, fiberlerin ucunda modların farklı zamanlarda ulaşmasına neden olur.

Fiber optik MEMS mikrofon ölçüm sistemi için tek modlu ve çok modlu fiberleri karşılaştırarak, tek modlu fiber düşük zayıflama kaybı ve dağılması nedeniyle daha uygun olduğu değerlendirilmiştir. Fabry Perot interferometre uyumlu bir ışık kaynağı gerektirdiğinden lazer kaynağı kullanılmalıdır. Fiberden gönderilen ışık membrana gider, ondan yansır ve tekrar fiber çekirdeğine geri gelir. Bu nedenle, minimum dağılım sistem için faydalıdır. Ayrıca, tek modlu fiber, geri dönen ve yansıyan ışığın girişimini etkileyebilecek diğer herhangi bir modun ortaya çıkmasını önler. Yansıma sırasında kayda değer miktarda ışık kaybedildiğinden ve fibere geri gelen ışıktan dolayı, optik gücü mümkün olduğu kadar korumak sistem için önemlidir. Bu nedenle, tek modlu fiberin sistemde kullanılmasına karar verilmiştir.

2.4.1.2. Sirkülatör

Optik sirkülatör, bir porta giren ışığı ardışık porta yönlendiren, karşılıklı olmayan 3 veya 4 portlu bir optik elemandır. Örnek olarak, ışık giriş portu 1, port 2'den yayılmaktadır ve bu, ardışık diğer portlar için geçerlidir. Bununla birlikte, port 2'den yansıyan ışık port 3'e yönlendirilir. Genellikle, son port port 1'e geçmez, çünkü port 1 genellikle lazer gibi ışık kaynakları için kullanılır ve lazerin çalışması herhangi bir sahte ışık kaynağından olumsuz olarak etkilenir. Nispeten yüksek izolasyon ve düşük ekleme kaybı nedeniyle, fiber optik sensör uygulamalarında ve haberleşme sistemlerinde kullanılırlar (Dutton, 1998).

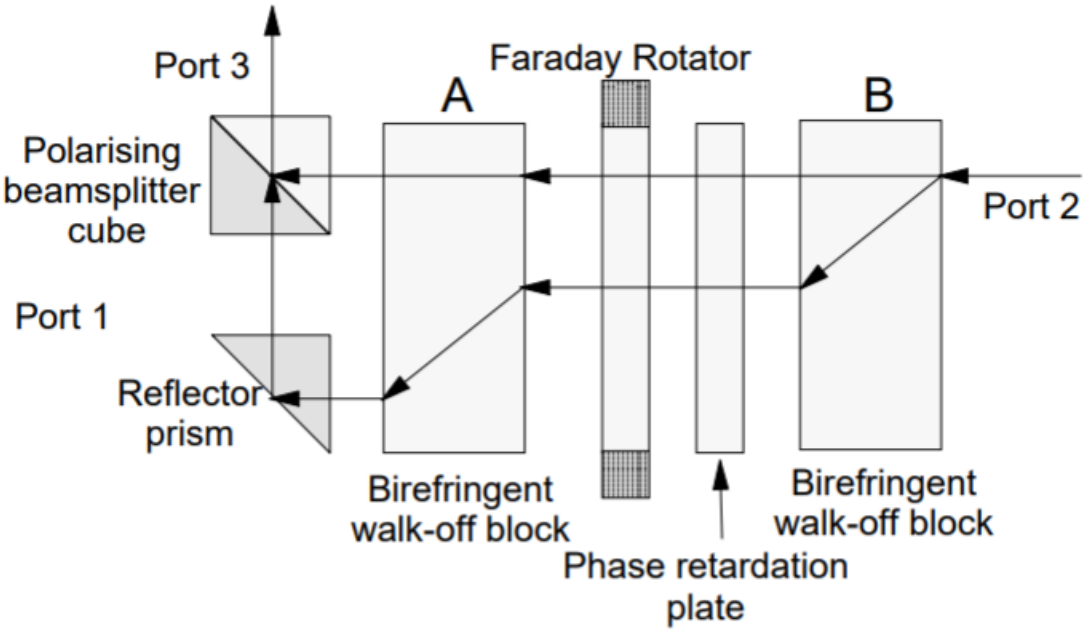
Port 1'den giren ışıktan sonra iki ayrı ortogonal polarize ışına bölünür. Işık, çift kırılma geçiş bloğu A'dan geçerken iki ayrı ışınla kırılır. Gelen ışığın kırılan kısmı başka bir optik yola aktarılır. Her iki ışın, Şekil 2.8'de gösterildiği gibi faz geciktirme plakası ve Faraday döndürücüsünden geçirilir. Işıklar Faraday döndürücüsünden geçirilirken, ikisinin de polarizasyonu 90 ° döndürülür. Daha sonra, her iki ışın çift kırılmalı geçiş bloğu B'de birleştirilir ve tekrar birleştirilen ışık Port 2'den yayılır.



Şekil 2.8. Sirkülatörün Port 1'den Port 2'ye işletimi (Dutton, 1998).

Şekil 2.9'de Port 2'den Port 3'e kadar sirkülatör işlemi gösterilmiştir. Port 2'den giren ışık, ışığın tekrar iki ortogonal polarize ışınlara kırılmasıyla B bloğunda bölünür. Bununla birlikte, Şekil 2.8'de gösterilen duruma göre hareket eden ışınların zıt doğrultuda kutuplanması, Faraday

döndürücüsünden geçerken değişmez. Gelen ışığın kırılan kısmı A bloğu tarafından tekrar kırılır. Daha sonra her iki ışın da reflektör prizma ve polarize edici kiriş ayırıcı küp aracılığıyla yeniden birleştirilir. Yukarıda tanımlanan sirkülatörün çalışması, lazer kaynağından üretilen ışığın MEMS mikrofonuna yönlendirilmesi ve membrandan yansıyan ışığın toplanması amacıyla kullanılır. Yansıyan ışık, ışık kaynağını etkilemeden ölçümler almak için başka bir fiber ucundan toplanmalıdır. Fiber ucundan ve MEMS mikrofonunun membranından yansıyan ışık aynı polarizasyon değişikliklerinden etkilendiğinden, sirkülatörün polarizasyon değişiklik özelliği, deneyin amacına uymaz.



Şekil 2.9. Sirkülatörün Port 2'den Port 3'ye işletimi (Dutton, 1998).

2.4.2. Optoelektronik Elemanlar

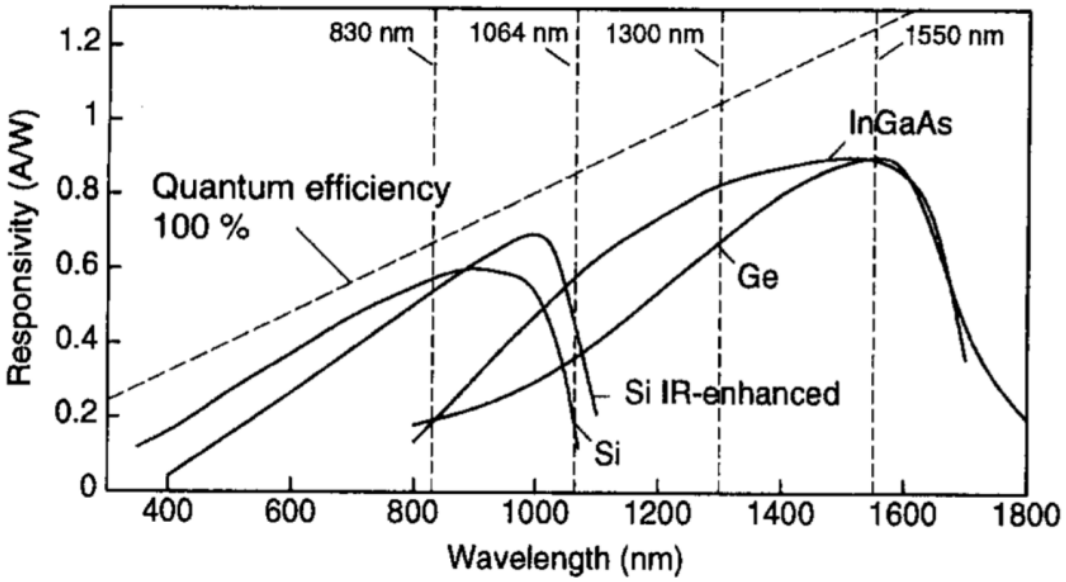
2.4.2.1. Fotodedektör

Fotodedektör, fotodetektörün sensör kısmının yüzeyine vurarak akıma neden olan yeterli enerjiye sahip fotonların neden olduğu foton-madde etkileşimi ile çalışan optoelektronik bir cihazdır. Genel olarak iki tür fotodetektör vardır: fotoiletken ve fotodiyot. Foto iletken türünün iletkenliği, gelen ışık akısı ile değiştirilir. Işık akısı arttıkça, cihazın iletkenliği artar. Fotodiyot tipi genellikle ters eğimleme gerilimi ile kullanılır. Ters eğimleme geriliminin uygulanmasının bir sonucu olarak, yüksüz bölge yaratılır. Yüksüz bölge, akımın diyottan geçişini önler. Elektron-delik çiftleri, fotodetektöre gelen fotonlar vasıtasıyla yeterli enerjiyle yaratılır. Yeterli enerjiye sahip olan

fotonlar bir elektronu değerlik bandından iletkenlik bandına taşır. Üretilen taşıyıcılar, yüksüz bölgenin yerleşik elektrik alanı ile birleşim yerlerinden toplanır. Böylece, delikler fotodiyot anoduna hareket etmeye başlar ve elektronlar fotodiyot katoduna hareket etmeye başlar. Yüklerin geçişi ile foto-akım üretilir.

Fotodedektörlerin performans özelliklerini tanımlayan çeşitli parametreler vardır. Kuantum verimi, akıma dönüşen elektron sayısının gelen foton sayısına oranıdır. Tüm fotodetektörün verimliliğini tam olarak tanımlamaz, ancak fotodetektörün algılama bölümünün etkinliği hakkında bilgi verir. Duyarlılık, fotodetektöre uygulanan gerilim başına üretilen akımdır. Tepkisellik, fotodetektörün özelliklerinin tamamını kapsamaz. İyice karşılaştırmak için, detektivite değeri hesaplanmalıdır. Detektivite değeri, fotodiyotlar özellikle termal görüntüleme uygulamaları için değerlendirildiğinde önemlidir. Ancak, arka plan ile ilgili gürültüler bu uygulama için önemsiz olduğundan, duyarlılık değeri, ölçüm sistemimiz için detektivite değerinden daha büyük öneme sahiptir. Karanlık akım, ışığa maruz kalmayan fotodiyottan geçen akım olarak tanımlanır. Doğrudan sinyal-gürültü oranını ve fotodetektörün kalitesini etkiler. Tepki süresi, temel olarak, üretilen yükler arasındaki elektriksel boşalma süresi olarak tanımlanmaktadır. Tepki süresi artarsa, azınlık taşıyıcılarının fotodiyotun yüksel olarak nötr kısmına ulaşması ve yeniden birleştirilmesi daha uzun zaman alır. Bu nedenle, rekombinasyon süresi artar ve bir limitin ardından rekombinasyon süresindeki artış fotodiyot doygunluğuna neden olur. Bu nedenle, gelen ışıktaki değişikliklerin tespiti yavaşlatılmış ve sınırlandırılmıştır.

Fotodedektör malzemeleri, ortak lazer kaynakları tarafından nispeten kolayca üretilebilen dalga boyu ile karşılaştırıldığında, Ge ve InGaAs diğer fotodetektör malzemeleri arasında daha yüksek bir duyarlılığa sahiptir (Arndt vd.,1996). Şekil 2.10'da, ticari foto algılayıcıların duyarlılık grafiği gösterilmektedir. Hem InGaAs hem de Ge, 1550 nm'de 0.85 A/W civarında duyarlılığa sahiptir. Ancak, InGaAs dedektörleri, Ge dedektörlerinden biraz daha iyi bant genişliğine sahiptir (Martin vd., 2008). Her ne kadar Ge dedektörleri InGaAs dedektörlerinden daha fazla karanlık akım sergilese de, karanlık akım uygulama için hayati değildir. Ge detektörleri yüzlerce pikoamper karanlık akım seviyesine sahiptir (Martin vd., 2008). Fotodedektörlerin maliyeti hesaba katıldığında, ölçüm sistemi için Ge dedektörü seçilmesinin uygun olacağı değerlendirilmiştir.



Şekil 2.10. Ticari fotodetektörlerin duyarlılık grafiği (Arndt vd.,1996).

2.4.3. Elektronik Elemanlar

2.4.3.1. Veri Toplama Sistemi

Veri toplama, gerçek dünya ile ilgili bir sistemin ölçümleri tarafından sağlanan verilerin toplanması, örneklenmesi ve depolanması olarak tanımlanmaktadır. Veri toplama sistemleri temel olarak bir sensör veya sensörlerden toplanan analog verileri dijital verilere dönüştürür ve toplanan verilerin manipülasyonunu kolaylaştıracak bir platform oluşturur. Bir veri toplama sistemi; sensörler, sinyal koşullandırma donanımı, veri toplama donanımı ve veri toplama yazılımını kolaylaştıran bir bilgisayardan oluşur. Veri toplama donanımı, analog veriyi sayısallaştırmaktan, PCI-ex, Ethernet, USB, vb. gibi evrensel veri aktarım protokolleri ile bilgisayarla arabirim yapmaktan sorumludur. Arayüzler, uygulamanın gerekliliklerine göre farklı bant genişliği ve farklı veri hatları ile oluşturulmuştur. Ayrıca, veri toplama sisteminin yazılım bölümü de karmaşık algoritmalar ve toplanan veriler üzerinde hesaplama yapmak, göstermek, çalıştırmak için uzmanlaşmıştır. Algoritmalar ve hesaplamalar da gerçek zamanlı çıktı sağlamak için optimize edilmiştir.

Ölçüm sistemimiz, toplanan verilerin incelenmesi için özel işlevler gösterebilen bir veri toplama sistemi gerektirir. Fonksiyonlar, tek bir grafikte zaman, genlik ve frekans eksenlerinden oluşan FFT, histogram, spektrogram ve 3-D yüzey grafiği olarak örneklenebilir. Yukarıda belirtilen

yeteneklere sahip veri toplama sistemi ile ölçümler yapılmakta ve karakterizasyon işlemi yapılmaktadır.

2.4.3.2. Hoparlör ve Kalibrasyon Mikrofonu

Hoparlör, deneme ortamında test tonları üretmek amacıyla ölçüm sistemine dahil edilmiştir. Bu amaçla, hoparlör ölçülen mesafeye yerleştirilir. Kalibrasyon mikrofonu, karakterizasyon amacı ile karakterize edilen bir mikrofondur. Karakterizasyon sayesinde, Pascal başına Volt cinsinden verilen çoklu hassasiyet grafikleri mikrofonla sağlanır. Çoklu grafiklerin verilmiş olmasının nedeni, mikrofonun hassasiyetinin çevresel koşullara bağlılığıdır. Böylece, serbest ve basınçlı alana göre iki grafik, mikrofonun çeşitli frekans spektrumları ile sağlanır.

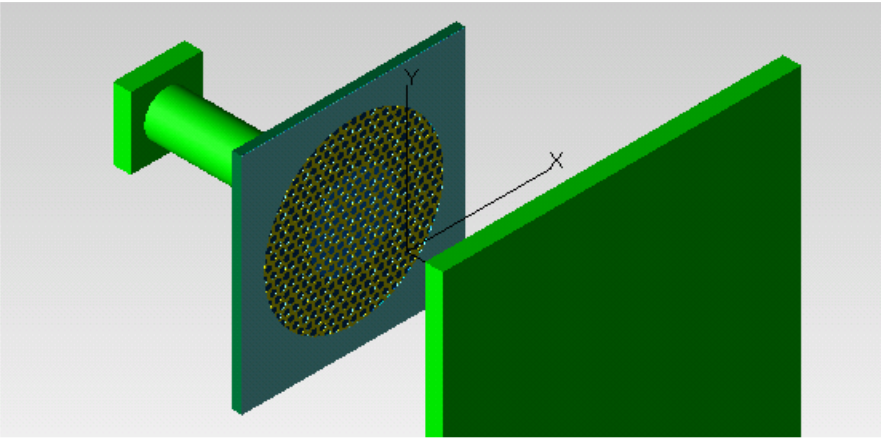
Hoparlör ve kalibrasyon mikrofonunun yardımıyla MEMS mikrofonunun kalibrasyon adımları açıklanmıştır. İlk olarak, hoparlör ve kalibrasyon mikrofonu aralarında mesafeye yerleştirilir. Mesafe yaklaşık olarak MEMS mikrofonunun tahmini konumuna göre ayarlanır. İkinci olarak, hoparlörden çeşitli test tonları uygulanır ve kalibrasyon mikrofonunun çıkışı gözlenir. Hoparlör üzerinden uygulanan basınç, kalibrasyon mikrofonuyla birlikte verilen karakterizasyon sayfasından elde edilir. Ardından, MEMS mikrofon türetilmiş basınca göre yerleştirilir. MEMS mikrofonundan alınan cevap basınç değerine dönüştürülür. Bu nedenle basınç-frekans ve hassasiyet-basınç grafikleri karşılaştırılır.

2.5. Optik Sistem İçin Simülasyon Sistemi

Simülasyon amacıyla, TracePro yazılımı kullanılmaktadır. TracePro, ışın optiği algoritmalarına dayanır. Aynı zamanda Monte Carlo ışın izlemesini de destekler. Ayrıca, 3 boyutlu modeller oluşturma, yazılım ile çeşitli analiz yöntemleri ve optimizasyon araçları sağlanmaktadır. Dolayısıyla, TracePro proje kapsamında optik sistem simülasyon aracı olarak kullanılmaktadır.

Öncelikle, MEMS mikrofon, membran, destek ve substrattan oluşan katman katman yapıyla modellenmiştir. Membrandaki gözenekli yapı, düz yüzeyde delikli olarak eşit aralıklarla yerleştirilmiş deliklerle gösterilmiştir. Farklı kalınlıklarda Si ve SiO_2 katmanları, lazer kaynağının merkezi dalga boyuna göre tanımlanan malzeme özellikleri ile birleştirilir. Si ve SiO_2 tabakaları, membranı dış kısımlarından destekleyecek şekilde ve membran ile aynı boyuttaki dairenin, tabakaların orta kısmından çıkarılacağı şekilde imal edilmiştir. MEMS mikrofonunun son yapılandırmasında, mikrofonun üst katmanı membrandır. Si ve SiO_2 katmanları membranın altına yerleştirilir. Son olarak, Si substratı tüm yapının alt katmanını tanımladığı için yapılar için temel oluşturur.

Ek olarak, ışık taşıyan ve toplanan optik fiber, tek modlu fiber konfigürasyonunda modellenmiştir. Fiberin çekirdek çapı 9 μm ve kaplama çapı 125 μm olarak tanımlanmıştır. Lazer kaynağı, fiberin çekirdeğine yerleştirilmiş bir ışık kaynağı olarak simüle edilir. Işık kaynağı ideal bir kaynak olarak modellenmez çünkü yansıma ve kırılmaların pratik koşullarda gerçekleşmesi beklenir. Ek olarak, kırılmaların simülasyonunun ışığın membrandaki dağılımı hakkında bilgi sağlaması beklenir. Optik fiberin membrana uzaklığı ile membrandaki ışıkla kaplı alan arasındaki ilişki beklenmektedir. Kırılma nedeniyle, gelen ışık ile kaplanan alandaki fiber ucunun mesafesi arasındaki pozitif bir korelasyon beklenmektedir. Mesafe, temel olarak alt tabaka kalınlığı ve desteklerin kattığı boşluklarla yaratılır. Temel simülasyon modeli, Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. MEMS mikrofonunun simülasyon modeli.

Silindirin arkasına yerleştirilen kare yeşil yapı, fiber ucundan ve membranın kendisinden yansıyan geri dönen ışığın ölçülmesi için oluşturulan bir yüzeydir. Silindir, MEMS mikrofonunun alt katmanına ulaşan fiberi temsil eder. En sağdaki kare, membrandan geçen ve dış dünyaya ulaşan ışığın gücünü ve yoğunluğunu ölçmek amacıyla yerleştirilir. Uzatılmış perspektifte, ışık kaynağı, geri dönen ışık yoğunluğunu ve gücünü ölçen yüzeyin önüne yerleştirilir. Membrana yönlendirilir ve kaynak yoluyla üretilen ışık fiberin çekirdeği içinde hareket eder. Sonra, ışık alt tabakadan geçer ve membrana ulaşır. Işığın bir kısmı alt tabakaya geri yansır ve geri kalanı daha büyük yüzeye gitmeye devam eder. Malzemelerden kaynaklanan emilmeler de simülasyonlarda ele alınmaktadır.

3. MEMS MEMBRANIN MİKROÜRETİMİ

POLYMUMPS tasarım kurallarına ve dairesel bir membranın teorik analizine göre, mikrofabrikasyon maskeleri tasarlanmıştır. Tasarımda, POLYMUMPS işleminin POLY0 ve POLY1 polisilisyum katmanları, membranın taşıyıcısı olarak ve POLY2 membran malzemesi olarak kullanılmıştır. Membran, yani POLY2 katmanı, hava delikleri ile şekillendirilir. Bu yapı örgülü yapı olarak adlandırılır. Ardından, membranın üzerine metal kaplanır. Metalin amacı, fiber optik kablodan gelen lazer ışığı için optik olarak yansıtıcı bir yüzey elde etmektir. Metal katman ayrıca, POLY2'nin hava deliklerinin çapından daha büyük çapa sahip ve herhangi bir üretim problemi oluşturmayacak şekilde hava delikleriyle şekillendirilir.

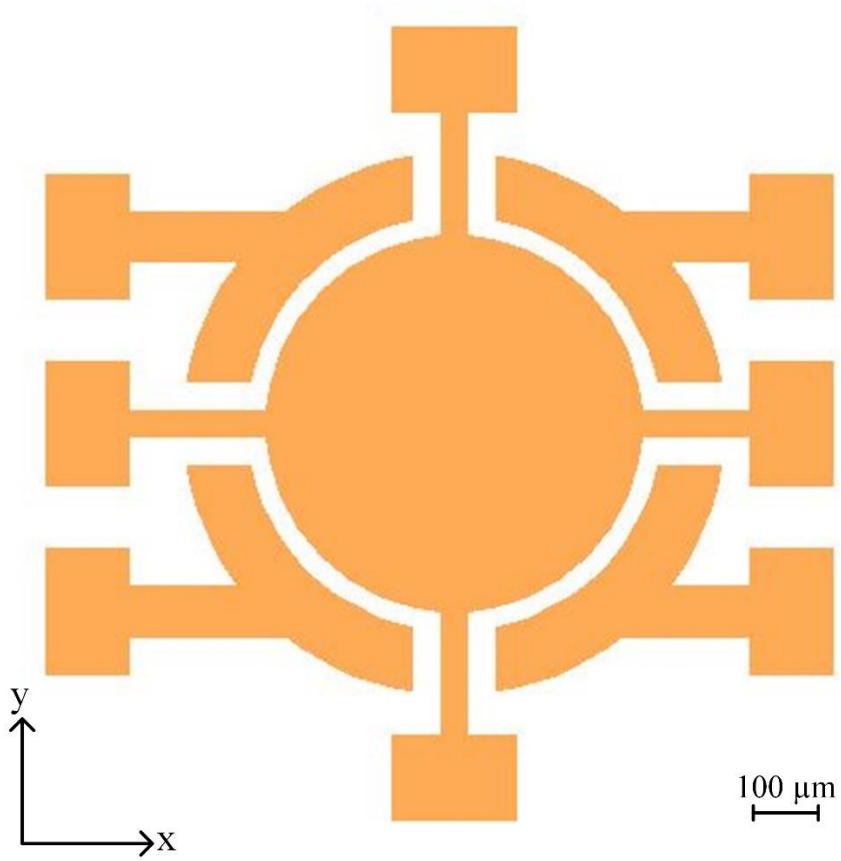
3.1. Mikrofabrikasyon Maske Tasarımı

POLYMUMPS sürecinde tasarlanması gereken 12 maske vardır; POLY0, HOLE0, ANCHOR1, DIMPLE, POLY1, HOLE1, POLY1-POLY2-VIA, ANCHOR2, POLY2, HOLE2, METAL, HOLEM.

3.1.1. POLY0 ve HOLE0 Maskeleri Tasarımı

POLY0 ve HOLE0 maskeleri, sürecin ilk polisilisyum katmanını, POLY0'ı, şekillendirmek için kullanılır. POLY0 tabakası tasarımda kapalı hacimler oluşturmak için kullanılmayacağından, ilk polisilisyum tabakasında hava deliklerine gerek yoktur. Bu nedenle, HOLE0 maskesi boş bırakılacaktır ancak POLY0 maskesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu maske aydınlık bir maskedir ve bu nedenle POLY0 tabakasında pul üzerinde muhafaza edilmesi hedeflenen bölgeler belirtilmelidir. POLY0 katmanı, üzerinde POLY1 ve POLY2'nin daha sonra işlem göreceği membran için ilk taşıyıcıdır.

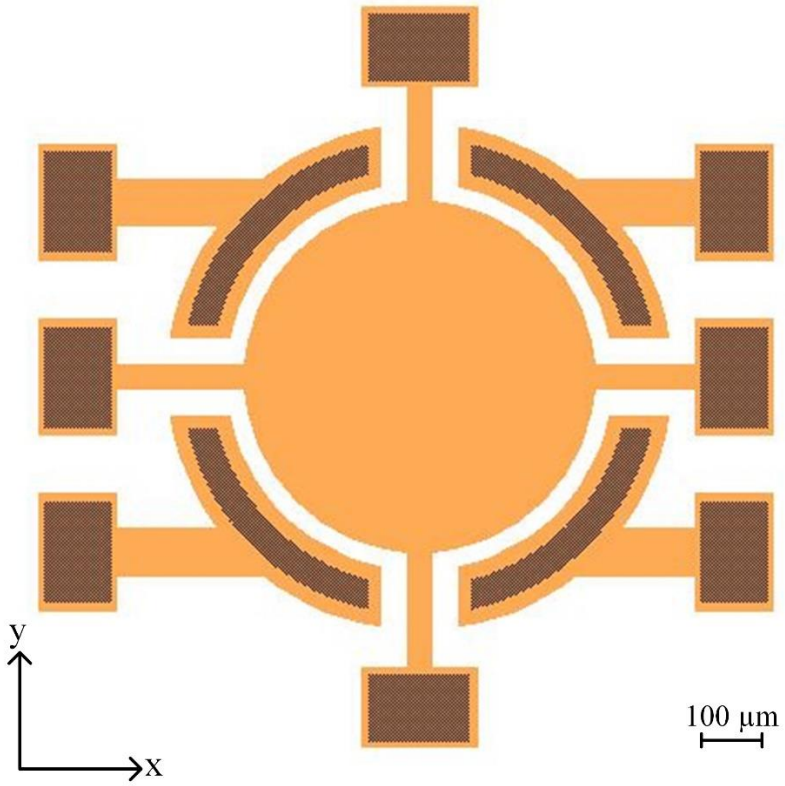
POLY0 tabakası ayrıca elektriksel olarak faydalanılan polisilisyum tabakası olarak kullanılacaktır. Membranın testi sırasında elektrik bağlantılarına, bir topraklamaya ve bir sinyal bağlantısına ihtiyaç duyulmaktadır. Membranın kendisi sinyal bağlantısı olarak kullanılabilir çünkü POLY1 ve POLY0 ile dış taşıyıcılar üzerinden elektriksel olarak kısa devre yapacaktır. Topraklama bağlantısı, tasarımın merkezine 900μm çapında bir POLY0 dairesi yerleştirilerek elde edilmektedir. Seri elektrik direncini en aza indirmek için toprak bağlantısı 4 elektrik pedine bağlanır. Sinyal bağlantısı aynı nedenle 4 elektrik pedine de bağlanır. Genel POLY0 maske tasarımı, Şekil 3.1'deki gibidir.



Şekil 3.1. POLY0 Maskesi.

3.1.2. ANCHOR1 Maske Tasarımı

POLY0 ve HOLE0 maskeleri ilk polisilisyum tabakasını, yani POLY0'ı, biçimlendirmek için kullanıldıktan sonra, birinci oksit tabakası pulun üzerine büyütülür. Bu oksit tabakası sürecin sonunda aşındırılacağı için feda eliecek oksit katmanı olarak adlandırılır. ANCHOR1 maskesi bu ilk oksit katmanını biçimlendirmek için kullanılmaktadır. ANCHOR1 maskesi karanlık bir maskedir, başka bir deyişle, bu maskede, tasarımcının aşındırmak istediği bölgeler ANCHOR1 maskesinde belirtilmelidir. Bu maskenin amacı, tasarımcının doğrudan POLY0'in üzerine POLY1'i büyütmek istediği oksit bölgelerini aşındırmaktır. POLY0 ve POLY1 katmanları POLY2 membrankatmanının taşıyıcıları olduğundan, POLY1 doğrudan POLY0 üzerinde büyütülmelidir. Bu nedenle, bağlantı bölgeleri Şekil 3.2'deki gibi gösterilmiştir. Burada, desenli bölgeler, oksidin aşındırılacağı ANCHOR1 maske bölgelerini göstermektedir. Bu bölgelerde, POLY1 katmanı doğrudan POLY0 katmanı üzerinde büyütülecektir.

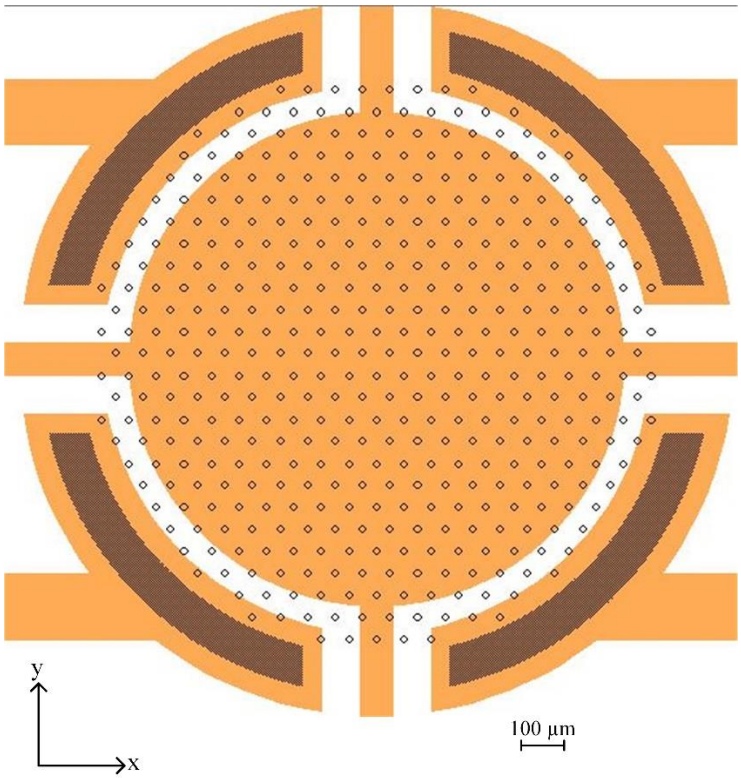


Şekil 3.2. ANCHOR1 maskesi.

3.1.3. DIMPLE Maske Tasarımı

Dimple adı verilen küçük bacaklar, iki yüzey arasındaki temas yüzeyini azaltmak için kullnılmaktadır, bu tasarımda bu yüzeyler POLY2 ve POLY0 olmaktadır. İlk oksit DIMPLE maskesinin gösterdiği alanlarda 0,75µm aşındırılmaktadır. Membran tamamen simetrik olduğundan, dimplelar de simetrik olarak yerleştirilir. Dimple yerlerine POLY2 etch deliklerinin pozisyonlarına göre karar verilir. HOLE2 maskesi daha sonra süreçte tartışılacaktır, ancak her bir dimple üç komşu oyuk merkezleri tarafından oluşturulan üçgenin ağırlık merkezine yerleştirilir. Dimple yerleşimi Şekil 2.6'daki delik tasarım problemini inceleyerek görselleştirilebilir. Çukurlar, Şekil 2.6'daki gibi üçgenlerin ağırlık merkezlerine yerleştirilir.

Elektrikli ped bölgelerinde dimplelara gerek yoktur, çünkü bu bölgelerde hareketli parça yoktur, tüm katmanlar birbirinin üzerine direk büyütülmektedir. DIMPLE maskesi Şekil 3.3'teki gibidir.



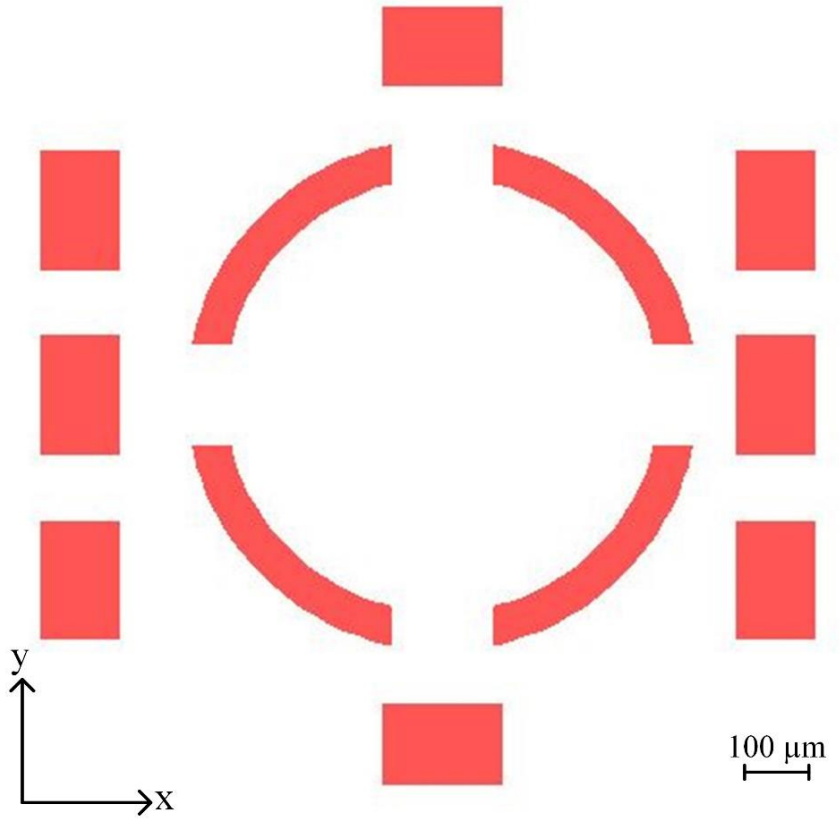
Şekil 3.3. DIMPLE maskesi

3.1.4. POLY1 ve HOLE1 Maskeleri Tasarımı

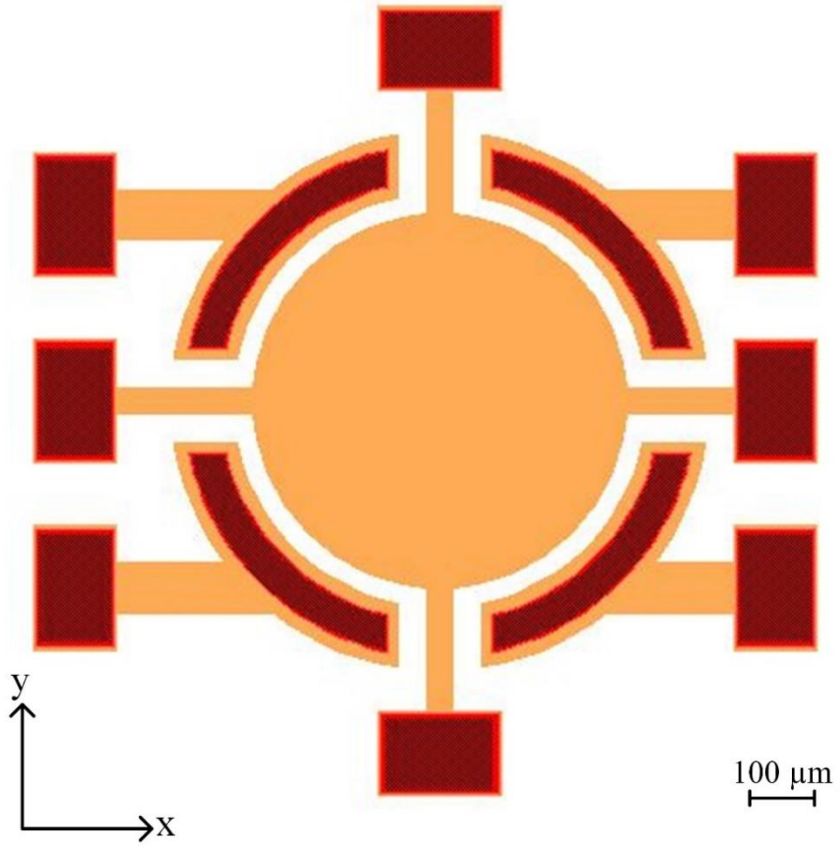
POLY1 ve HOLE1 maskeleri, POLY1'i, ikinci polisilisyum katmanını, biçimlendirmek için kullanılır. Bu maskelerin ana fikri POLY0 ve HOLE0 ile aynıdır. POLY1 katmanında POLY0 katmanına benzer sebeplerle hava deliklerine ihtiyaç yoktur. POLY1 katmanı, doğrudan POLY0 katmanı üzerinde büyütülecek olan ikinci taşıyıcı kısım olarak kullanılır. İlk olarak, POLY1 katmanı pulun her tarafında büyütülür. ANCHOR1 ve DIMPLE maskeleri ile gösterilen aşınmış oksit bölgeleri olduğu için, aşınmış bölgeler de POLY1 ile doldurulacaktır. Daha sonra, bu ikinci polisilisyum katmanı POLY1 maskesine göre şekillendirilecektir. Bu maske, tasarımcının POLY1 katmanını korumak istediği bölgeleri gösterecektir. POLY1 maskesi Şekil 3.4'te gösterildiği gibidir.

POLY1 maskesinin bölgeleri Şekil 3.4'te verilmiştir, ancak maskenin önceki maskelere göre tam konumunu anlamak için POLY0, ANCHOR1 ve POLY1 maskeleri Şekil 3.5'teki gibi bir arada verilmektedir. Kırmızı bölgeler, POLY1'in büyütüleceği bölgelerdir. ANCHOR1 ve DIMPLE oksit delikleri POLY1 tabakası ile doldurulur. Bu şekilde, POLY1, POLY0 tabakasının üzerinde durmakta ve taşıyıcılar elde edilmektedir. POLY1 katmanındaki bir diğer önemli şey, POLY1

katman kalınlığının, membranın en fazla sapma miktarını göstereceğidir. Membranın altında POLY0 tabakası tarafından kullanılan toprak bağlantısı vardır ve membran ile bu POLY0 toprak bağlantı bölgeleri arasındaki tek hava boşluğu POLY1'in kalınlığıdır. Bu nedenle, pul üzerinde POLY1'in uygun şekilde büyümesi, zarın çalışması için çok önemlidir.



Şekil 3.4. POLY1 maskesi.

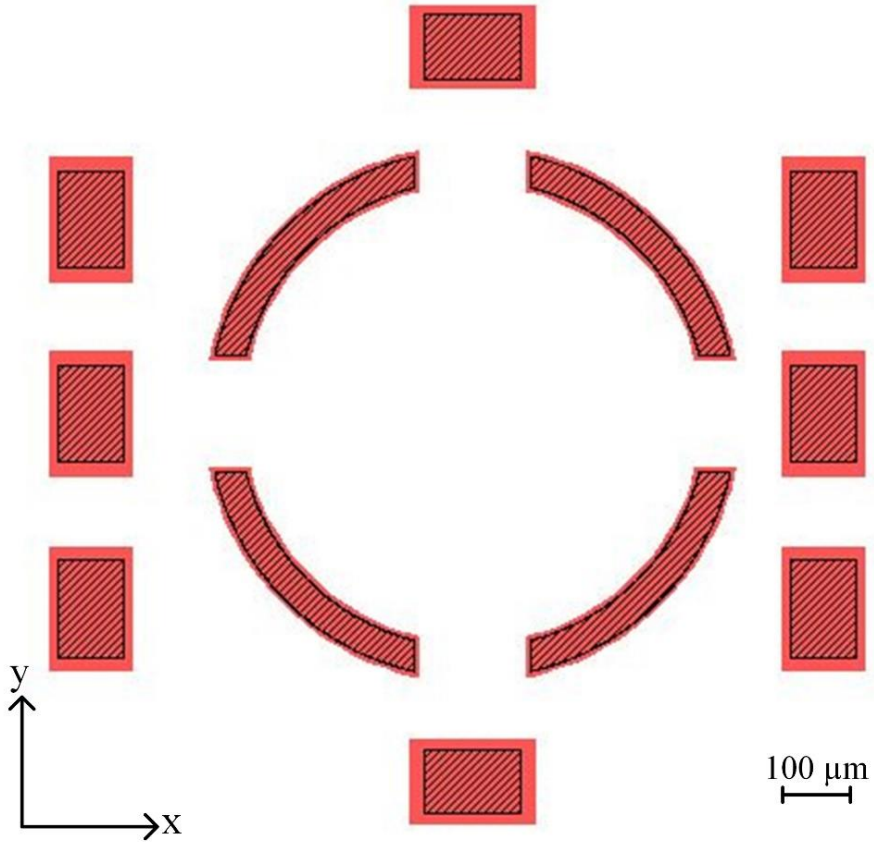


Şekil 3.5. POLY0, ANCHOR1 ve POLY1 maskeleri.

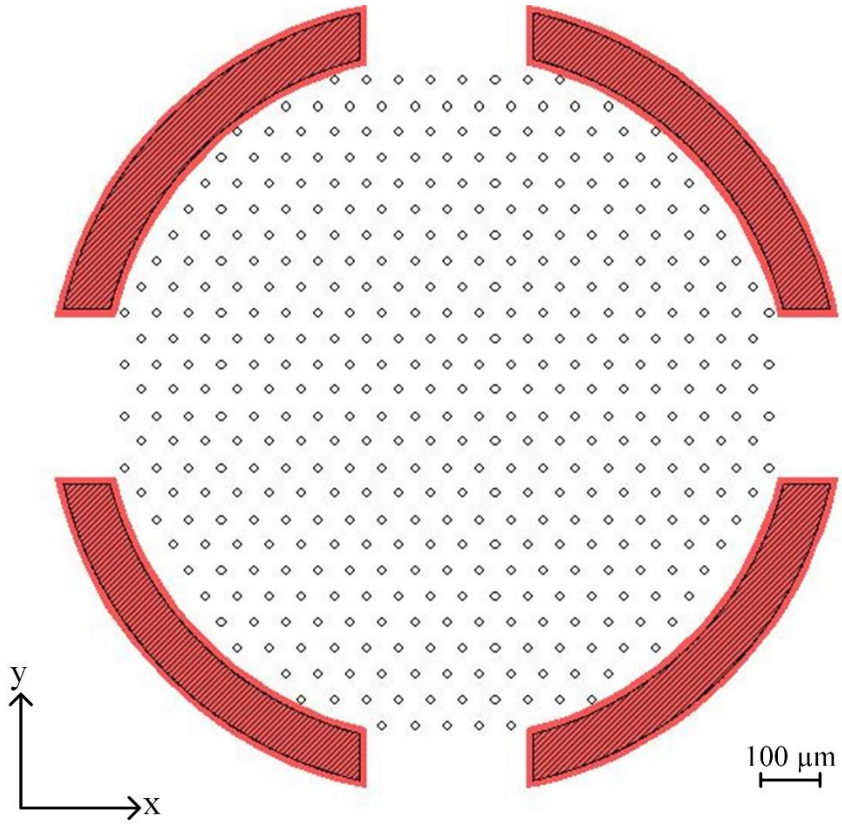
3.1.5. POLY1-POLY2-VIA Maske Tasarımı

POLY1 katmanı şekillendirildikten sonra, ikinci oksit tabakası pulun üstünde büyütülür. Bu katman, işlem sonunda aşındırılacak olan ikinci feda edilecek oksit tabakasıdır. Ayrıca, bu ikinci oksit katmanının üstünde, üçüncü polisilisyum katmanı, yani POLY2, büyütülecektir. Bu nedenle tasarımcı, POLY2'nin doğrudan POLY1 üzerine yetiştirileceği bölgeleri belirtmelidir. Bu membran tasarımında, bu bölgeler taşıyıcı olup dış, hareketli olmayan polisilisyum bölgeleridir. POLY1-POLY2-VIA maskesi karanlık bir maske olduğundan, ikinci oksidin aşındırılacağı bölgeler bu maskede belirtilmiştir. İşlemi daha iyi görselleştirmek için POLY1-POLY2-VIA maskesi, Şekil 3.6'daki gibi POLY1 maskesi ile birlikte verilmiştir.

Şekil 3.6'daki desenli bölgeler POLY1-POLY2-VIA bölgelerini ve kırmızı bölgeler POLY1 bölgelerini göstermektedir. Bu maskenin bir diğer önemli noktası DIMPLE maskesiyle ilgilidir. Standart kullanımda, DIMPLE maskesi birinci oksit üzerinde delikler üretir ve bu delikler ikinci oksit boyunca ilerler. Bununla birlikte, bu deliklerin keskinliği, ısıl işlemden dolayı bozulabilir. POLYMUMPS, POLY2 katmanı için dimple hedefleyen tasarımcılara POLY1-POLY2-VIA maskesinde de DIMPLE maskesiyle eş delikler tasarlamasını önermektedir. Bu şekilde, ikinci oksit dimple bölgelerinde 0,75 µm aşındırılmış olur. Bu işlem dimple kullanımını garanti eder ve çukur delikleri doğrudan ikinci oksit tabakasının üst yüzeyine yansıtılmış olur. Dimple deliklerine sahip POLY1-POLY2-VIA maskesi, Şekil 3.7'deki gibi verilmiştir.



Şekil 3.6. POLY1 ve POLY1-POLY2-VIA maskeleri.



Şekil 3.7. DIMPLE ile birlikte POLY1-POLY2-VIA maskesi.

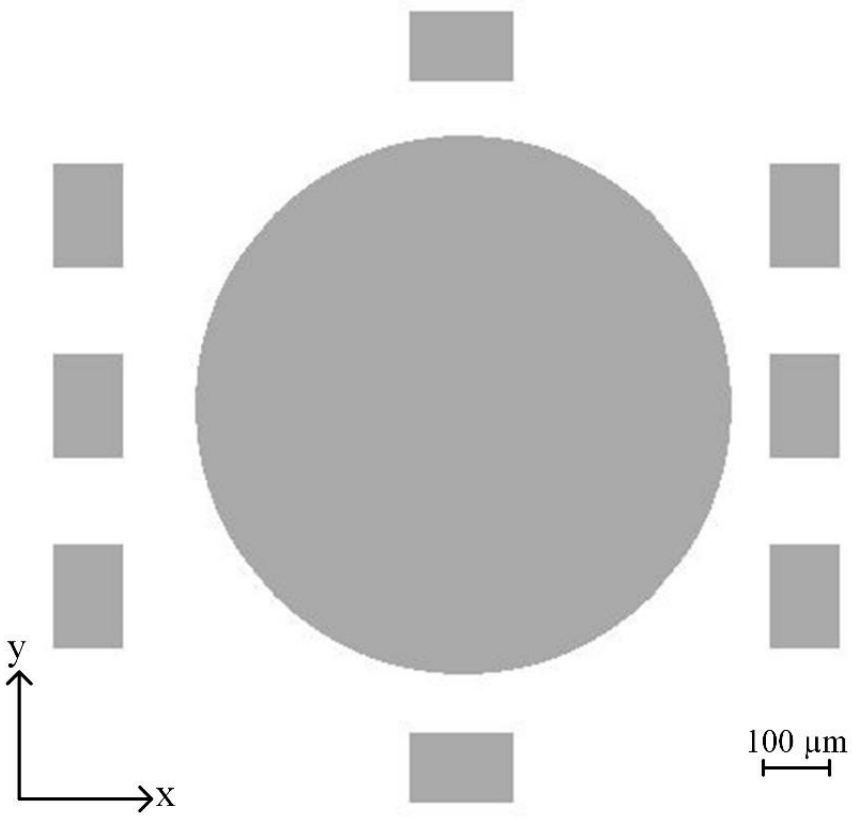
3.1.6. ANCHOR2 Maske Tasarımı

ANCHOR2 maskesi, ikinci oksidin ve birinci oksidin, POLY2'nin doğrudan POLY0 veya nitrat tabakalarında büyütüleceği şekilde aşındırılacağı bölgeleri belirtmek için kullanılır. Membranın tasarımında bu maskeye ihtiyaç yoktur; bu nedenle, süreçte kullanılmayacaktır.

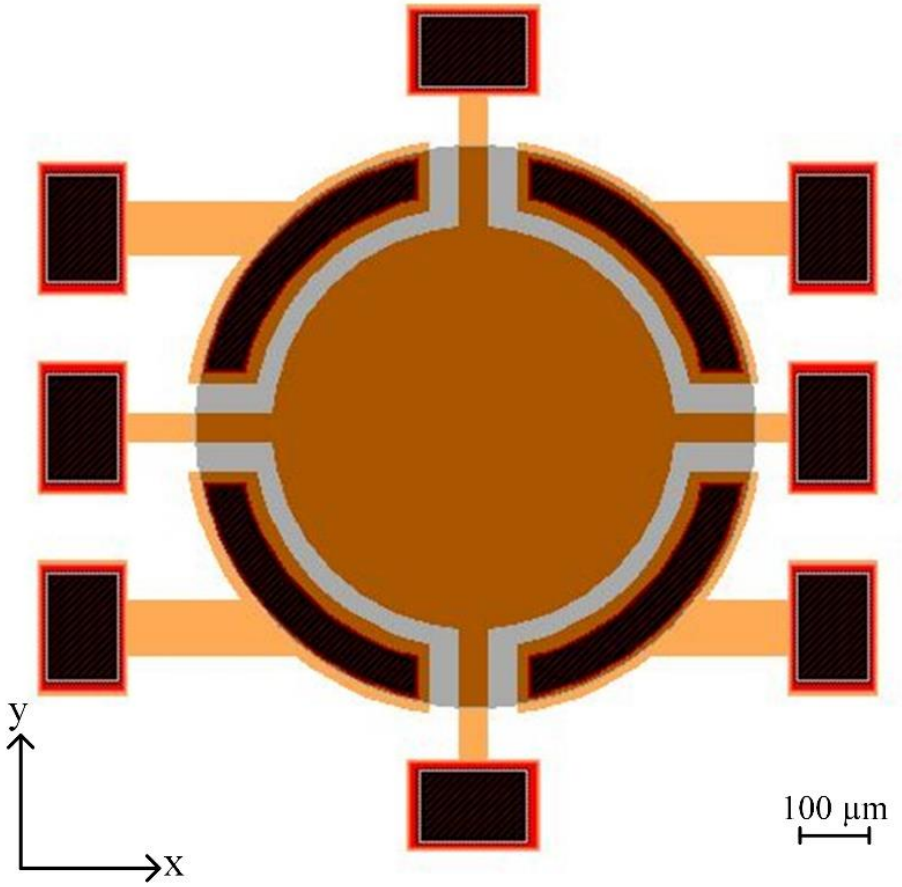
3.1.7. POLY2 ve HOLE2 Maskeleri Tasarımı

POLY2 ve HOLE2 maskeleri, POLY2 adlı üçüncü polisilisyum katmanını biçimlendirmek için kullanılır. POLY2 katmanı membranın kendisi olacağından, sürecin en önemli katmanıdır. İlk olarak, üçüncü polisilisyum tabakası pulun her tarafında büyütülür ve POLY1-POLY2-VIA maskelerinin ürettiği oksit delikleri POLY2 tarafından doldurulur. Taşıyıcı bölgelere ek olarak, çukur delikleri POLY2 tarafından doldurulur. İkinci oksidin üst yüzeyi aynı zamanda POLY2 ile kaplanmıştır. POLY2 maskesi, POLY2 katmanını şekillendirmek için kullanılır. POLY0 ve POLY1 maskelerinden farklı olarak, bu tabakanın orta kısmı aşınmaz, çünkü bu orta kısım membranın kendisini oluşturacaktır. POLY2 maskesi Şekil 3.8'deki gibidir.

POLY2 maskesinin diğer maskelere göre konumunu görselleştirmek için, POLY2 maskesi Şekil 3.9'da şu ana kadar tasarımı yapılan diğer tüm maskelerle birlikte verilmiştir. Şekil 3.9'da görüldüğü üzere, tasarımın merkez kısmı membran oluşturmak için sadece POLY2 katmanı ile bırakılmaktadır. Gri bölgeler POLY2 katmanını, kırmızı bölgeler POLY1 katmanını ve turuncu bölgeler POLY0 katmanını göstermektedir.

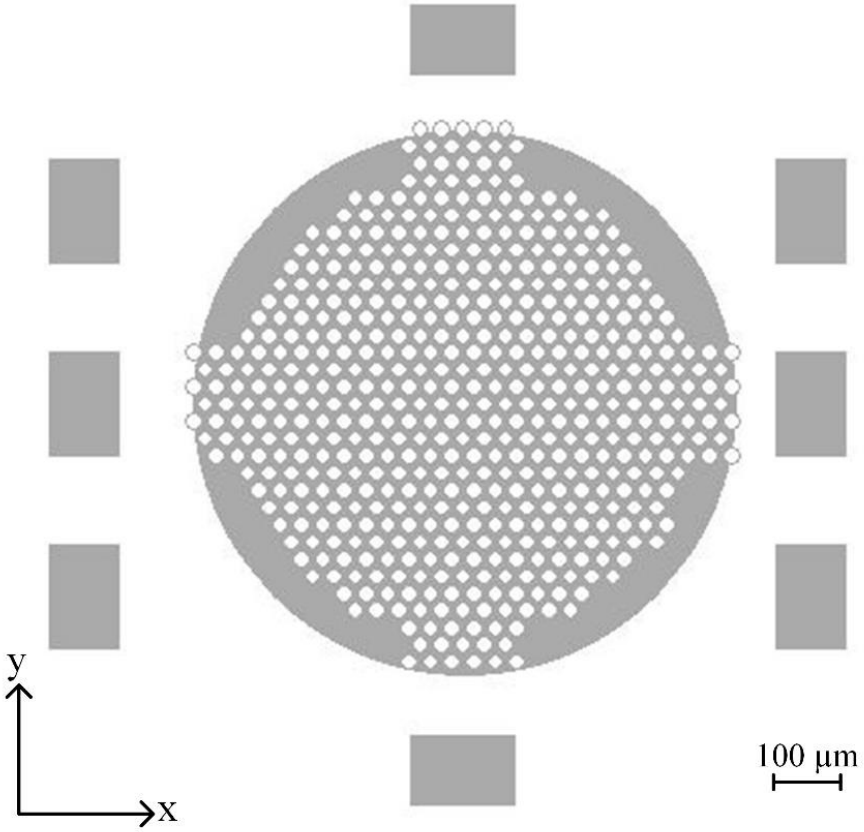


Şekil 3.8. POLY2 maskesi.



Şekil 3.9. POLY0, ANCHOR1, POLY1, POLY1-POLY2-VIA ve POLY2 maskeleri.

Bu aşamada, tasarımın orta noktasında membranın altında oksit tabasının aşındırılması gerektiği için delik maske tasarımına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla, POLY2 tabakasında delik aşındırması için HOLE2 maskesi tasarlanmıştır. Delik çapları ve yerleşimi 2.3.2 kısmında ayrıntılı olarak incelenmiş ve açıklanmıştır. HOLE2 maskesinin tasarımı bu analizlerin sonuçlarına göre tamamlanmıştır. POLY2 maskesi ile birlikte HOLE2 maskesi Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



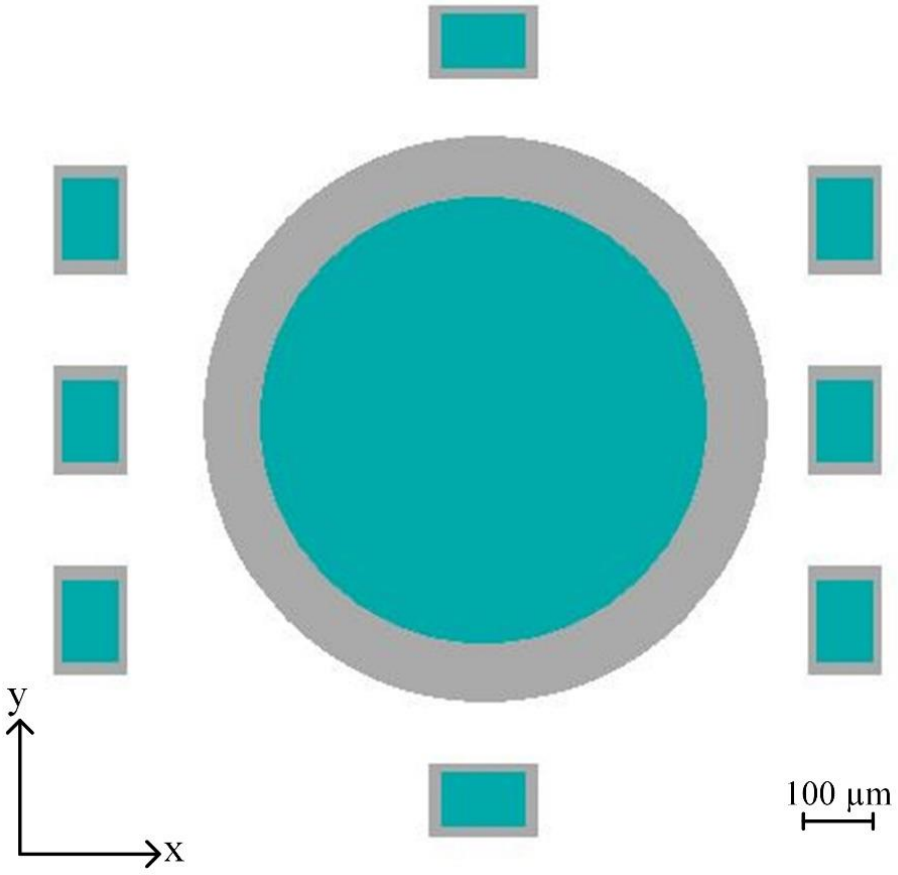
Şekil 3.10. POLY2 ve HOLE2 maskeleri.

Aşındırma deliklerinin yerleştirilmesi sırasında, sınır bölgelerinde simetri ihlal edilmiştir, çünkü bu bölgelerde delik tasarımının matematiksel incelemesi artık geçerli değildir. Başka bir deyişle, taşıyıcı polisilisyum bölgelerinde, dış kabuğun bir tarafta oksit varken, sınırın diğer tarafında ise oksit yoktur. Bu nedenle, POLY2'nin dış bölgelerinde delik düzenlemesi, Tasarım Kuralı Kontrolü'ne (DRC) göre yapılır. Bununla birlikte, bu bölgeler neredeyse hiç hareket etmediğinden, zarın simetrik işleminin bozulmadığı varsayılabilir.

3.1.8. METAL ve HOLEM Maskeleri Tasarımı

Tüm silikon tabakaları pulun üzerine yerleştirildikten ve düzgün şekilde şekillendirildikten sonra pulun üzerine metal büyütülür. Metal, membran tasarımı için oldukça kritiktir, çünkü optik olarak yansıtıcı bir yüzeye ihtiyaç vardır ve polisilisyum bu amaç için yeterli değildir. Sürecin bu aşamasında, pul önce fotorezist ile kaplanır ve sonra fotorezist, METAL ve HOLEM maskelerine göre fotolitografi ile şekillendirilir. Son olarak, kaldırma (lift-off) yöntemi metal yüzeyi

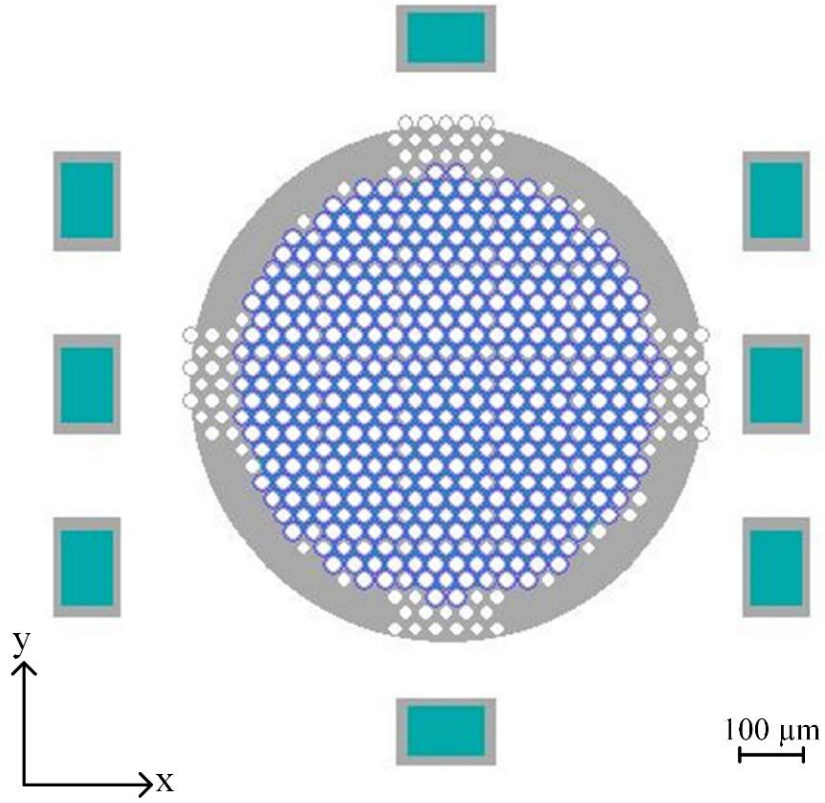
şekillendirmek için kullanılır. HOLEM maskesi aslında diğer delik maskelerine benzer amaçla, tasarımcıya kolaylık sağlamak için kullanılmaktadır, ancak maske tasarımının netliğini önemli ölçüde artırır. METAL maskesi, Şekil 3.11'de POLY2 ve HOLEM maskesi ile birlikte Şekil 3.12'de POLY2, HOLE2 ve METAL maskeleri ile birlikte verilmektedir.



Şekil 3.11. POLY2 ve METAL maskeleri.

Mavi bölgeler metal bölgeleri ve gri bölgeler POLY2 bölgelerini göstermektedir. Metal deliklerinin çapı, tasarım kurallarına göre POLY2 deliklerinin çapından daha büyüktür. Aksi takdirde, metal, POLY2 delikleri altında oksit üzerinde bırakılacak olup, feda edilecek oksit aşınması sırasında sorunlara neden olabilecektir.

Sürecin sonunda, oksit tabakaları ıslak aşındırma ve ardından kuru aşındırma ile aşındırılır. Bu nedenle, POLY2 katmanı, polisilisyum taşıyıcı dış kabukları tarafından desteklenirken yukarı ve aşağı yönde hareket etmekte serbesttir. Ayrıca, membranın elektriksel karakterizasyonu için tasarlanmış elektrik bağlantı pedleri de sürecin sonunda tamamlanmış olur.



Şekil 3.12. POLY2, HOLE2, METAL ve HOLEM maskeleri.

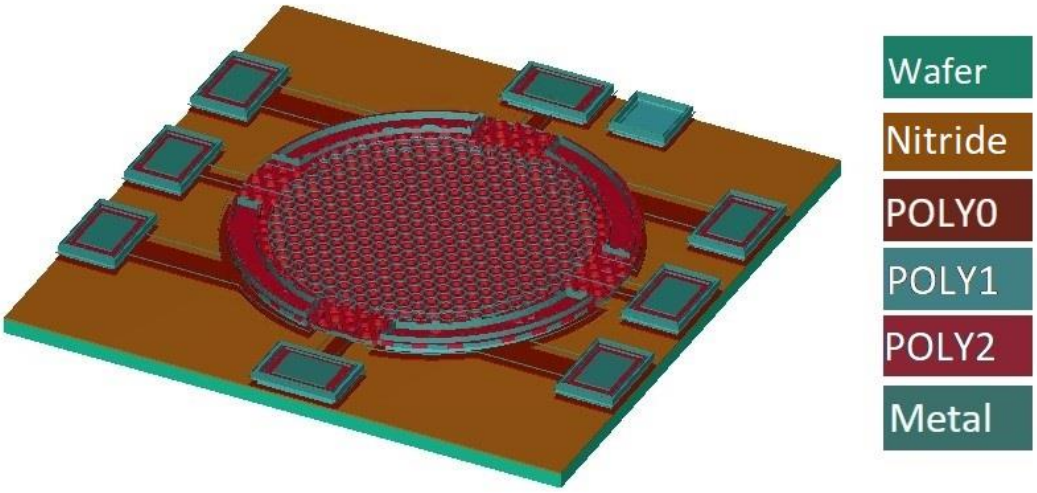
3.2. Tasarımın Üç Boyutlu (3B) ve İki Boyutlu (2B) Modeli

Mikro-üretim maskelerini POLYMUMPS'a göndermeden önce, maske tasarımını doğrulamak için membranın üç boyutlu olarak görselleştirmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, L-Edit yazılımının SOFTMEMS 3D Render uzantısı kullanılmıştır.

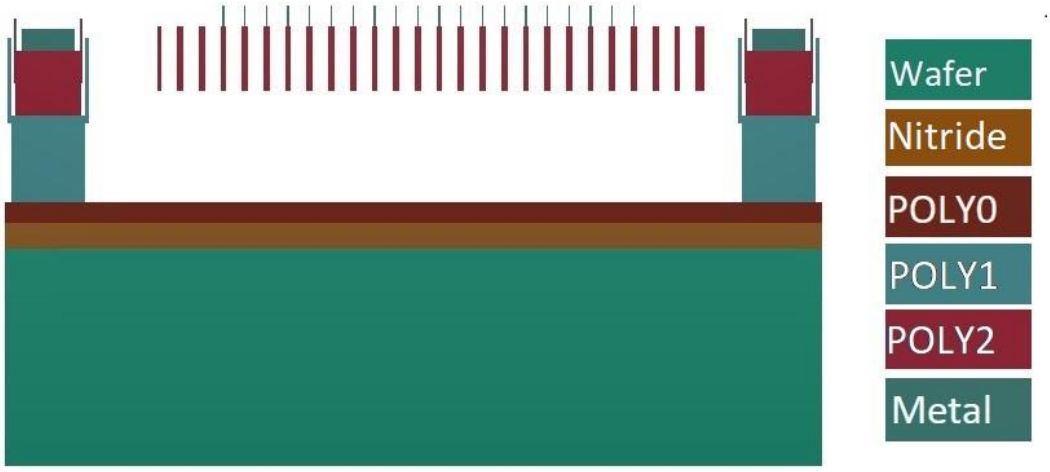
İlk olarak, sürecin akış sırası yazılımda tanımlanır; katmanlar ve her katmanın büyümesi ya da aşınması türleri ile birliktetasarımcı tarafından girilmelidir. Akış ve fiziksel parametreler de yazılıma girilmelidir. SOFTMEMS 3D Render uzantısı sadece işlemin geometrik sonucunu oluşturur, gerçek işlemin olası hataları veya membranın pula ıslak aşınmadan dolayı yapışması gibi ikincil etkiler dikkate alınmaz.

Süreç doğru bir şekilde tanımlandıktan sonra, tasarımın 3B modeli Şekil 3.13-15'teki gibi elde edilir. Katmanlar 3B modelde açıkça gözlemlenmektedir. Her katman farklı renklerle temsil edilir. Membran, hava delikleri ile örülmüş bir yapıya sahiptir ve membranın üst yüzeyi metal tabaka ile kaplanmaktadır. Metal tabakanın hava delikleri de 3B modelde gösterilmektedir. Şekil 3.14'te, enine kesit görünümü gösterilmektedir ve Şekil 3.15'te, tasarımı açıkça doğrulayan

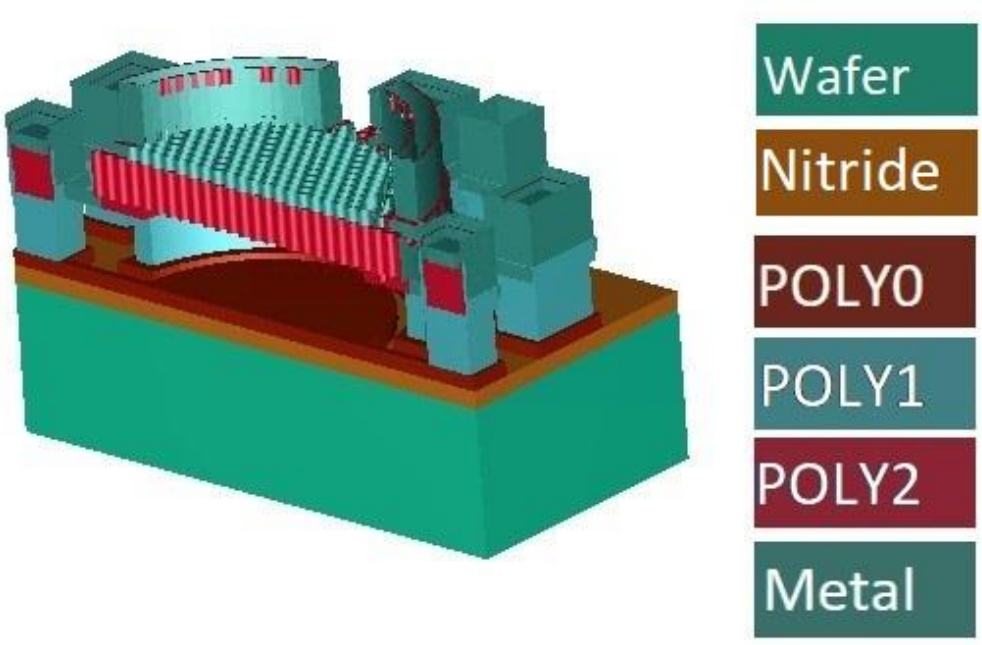
tasarımın eğik görünümü verilmiştir. ANCHOR1 ve POLY1-POLY2-VIA tarafından oluşturulan oksit delikleri, sırasıyla POLY1 ve POLY2'nin büyüdüğü yerlerde görülmektedir.



Şekil 3.13. Membranın 3B modeli.



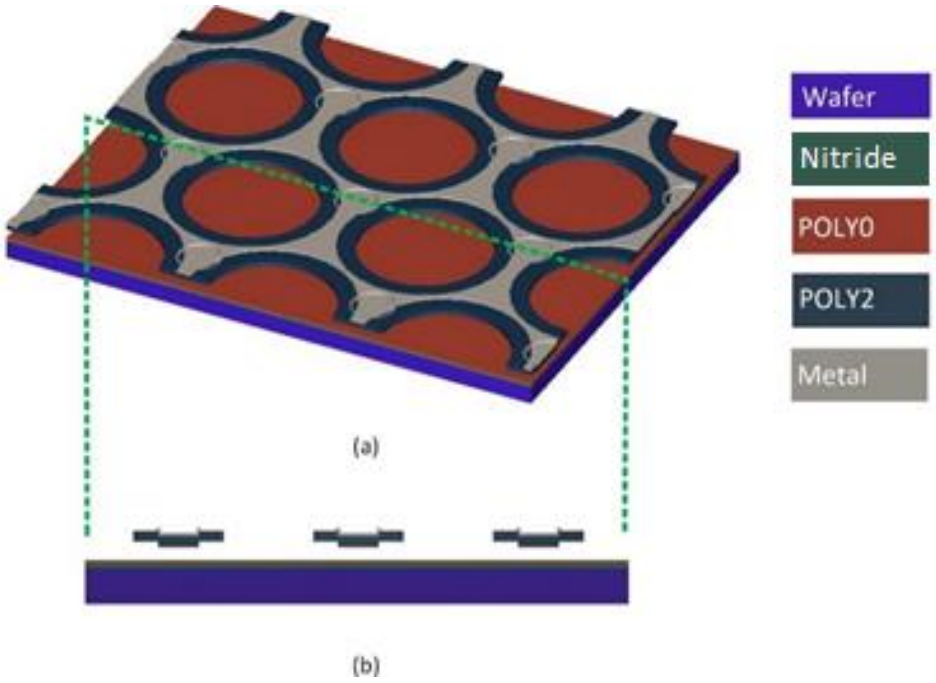
Şekil 3.14. Membranın 3B modelinin enine kesit görüntüsü.



Şekil 3.15. Membranın 3B modelinin eğik görüntüsü.

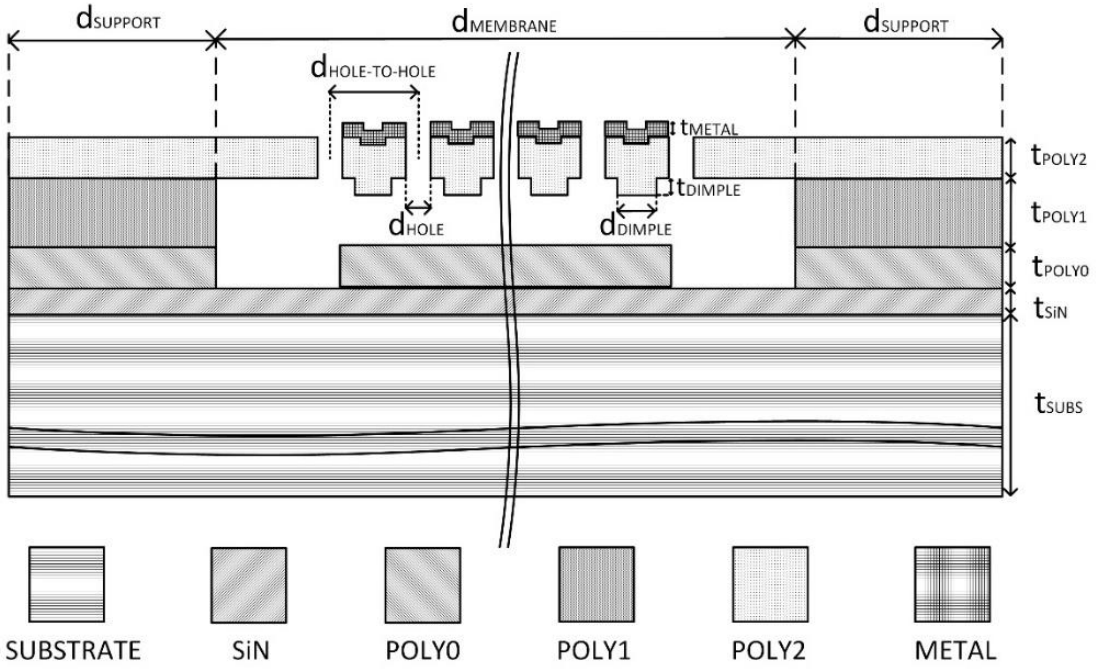
Bu modelde, hesaplama süresini arttırdığı ve zaman aşımı gerçekleştiği için DIMPLE maskesi uygulanmamıştır. Bu sorunun üstesinden gelmek ve DIMPLE maskesini doğrulamak için, tasarımın küçük bir kısmı Şekil 16'daki gibi 3 boyutlu olarak modellenmiştir.

Şekil 3.16 (a)'da, orta kısımdan alınan tasarımın küçük bir kısmının 3B modeli gösterilmiştir ve Şekil 3.16 (b)'de kesit görünümü verilmiştir. Dimplelar, Şekil 3.16 (b)'de açıkça gözlemlenebilmektedir. Dimplelar, membranın altındaki herhangi bir katmana olan temas yüzeyini azaltmaktadır ve bu sayede membranın ıslak aşındırma sırasında ortaya çıkacak yapışma kuvveti karşısında pula yapışmadan havada kalmasını sağlamaktadır.



Şekil 3.16. Membranın 3B modelinin (a) eğik ve (b) kesit görüntüsü.

Şekil 3.14 ve Şekil 3.16 (b) ile, tasarımın iki boyutlu kesit modeli görselleştirilmiştir. Kesit görünümü daha ayrıntılı ve gerçek boyutlarla incelemek için, Şekil 3.17'deki görünüm elde edilmiş ve temsili boyutların değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.17. Membranın kesit görüntüsü.

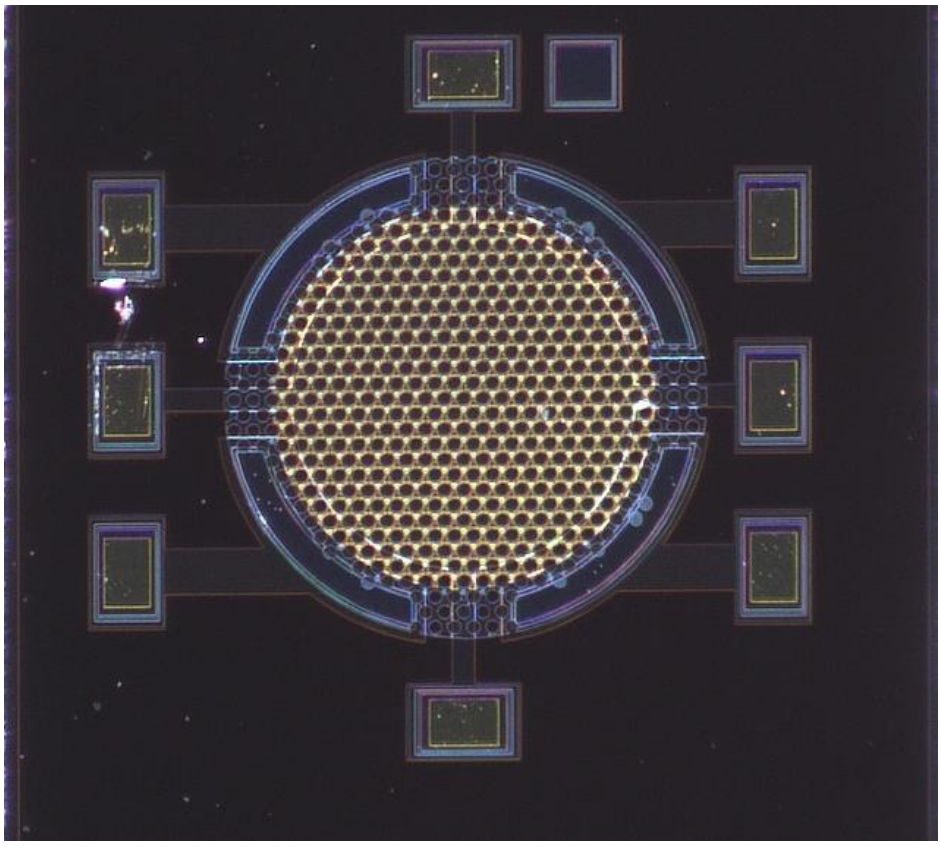
Tablo 3.1. Şekil 3.17'de verilen temsili boyutların değerleri

Temsili boyut adı	Değeri
Membrane diameter (Membran çapı) ($d_{MEMBRANE}$), µm	1000
Support length (Destek uzunluğu) ($d_{SUPPORT}$), µm	150
Hole-to-hole diameter (Delikten deliğe çap) ($d_{HOLE-TO-HOLE}$), µm	50
Dimple diameter (Dimple çapı) (d_{DIMPLE}), µm	12
Hole diameter (Delik çapı) (d_{HOLE}), µm	36
Metal thickness (Metal kalınlığı) (t_{METAL}), µm	0.51
POLY2 thickness (POLY2 kalınlığı) (t_{POLY2}), µm	1.5
Dimple thickness (Dimple kalınlığı) (t_{DIMPLE}), µm	0.75
POLY1 thickness (POLY1 kalınlığı) (t_{POLY1}), µm	2.0
POLY0 thickness (POLY0 kalınlığı) (t_{POLY0}), µm	0.51
SiN thickness (SiN kalınlığı) (t_{SiN}), µm	0.61
Substrate thickness (Pul kalınlığı) (t_{SUBS}), µm	>650

Şekil 3.17'de, nihai tasarım modellenmiştir ve üretilen tasarımların, küçük mikrofabrikasyon hataları ile birlikte olan bu modelle aynı şekilde olması beklenmektedir. Dimple'ın tasarım üzerindeki etkisi ve bunun yüzey boyunca yayılması da gösterilmektedir.

3.3. Mikro-üretimi Tamamlanan MEMS Membran

Mikro-üretim maskeleri POLYMUMPS'a iletildikten sonra üretilmiş tasarımlar şirket tarafından tasarımcıya iletilir. Cihazlar teslim alındıktan sonra, herhangi bir makro hata için mikroskop altında denetlenmiştir. Tasarımlar, Şekil 3.18'deki görüldüğü üzere makro boyutta hatalar olmadan üretilmiştir.



Şekil 3.18. Üretilen membranın mikroskop altındaki görüntüsü.

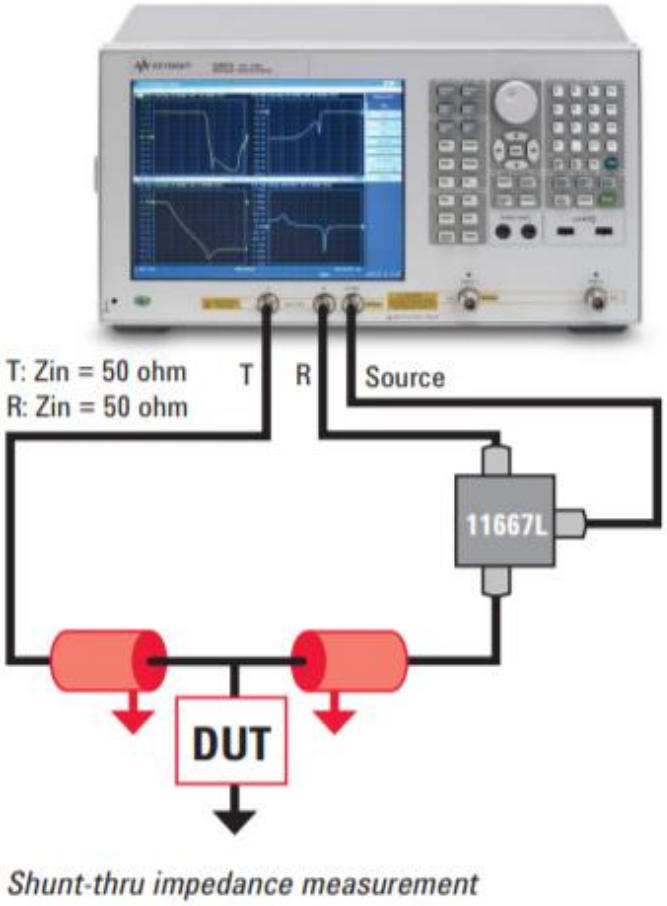
Elektrik bağlantı pedleri uygun şekilde yerleştirilmiş ve tasarımdaki POLY2 katmanından oluşan membranın hava delikleri, mikro-üretim maskelerine göre uygun şekilde üretilmiştir.

4. MEMBRAN İÇİN ELEKTRİKSEL VE OPTİK KARAKTERİZASYON SİSTEMLERİ

Mikro-üretim sonrası tasarımın ilk incelemesinden sonra, onu karakterize etmek ve performansını doğrulamak amaçlanmaktadır. Bu amaçla iki farklı yöntem kullanılır. İlk önce elektriksel empedans karakterizasyonu gerçekleştirilir. Cihazın rezonans frekansları, farklı eğimleme gerilimleri altında seri kapasitans ve direnç ölçümleriyle elde edilebilir. İkincisi, lazer vibrometre sistemi kullanılır. Bu optik sistemde, membranın herhangi bir noktasının frekans tepkisi elde edilebilir. Bu şekilde, rezonans frekans analizine ek olarak, zarın herhangi bir etkiye karşı pozisyona bağlı tepkisi de analiz edilebilir. Her rezonansın mod şekilleri elde edilebilir ve cihazın simetrisi doğrulanabilir.

4.1. Elektriksel Ölçüm Sistemi

Membranın elektriksel karakterizasyonu için empedans ve ağ analizörü (Keysight Technologies 5061B) kullanılır. Bu cihaz, yüksek frekanslı çalışma devrelerinin karakterizasyonu için kullanılır. Bu amaçla s-parametresi ölçüm portu kullanılır. Bununla birlikte, fiber optik MEMS mikrofonunun membranın karakterizasyonu için düşük frekans ölçümüne ihtiyaç duyulmaktadır. Cihazın kullanım kılavuzunda, cihazın LF çıkış portunun kullanılması ve güç ayırıcının (Agilent 11667L) “shunt-through” konfigürasyonunda kullanılması önerilir. Düşük frekans ölçümü için önerilen kurulum Şekil 4.1'deki gibidir. Bu ölçüm için kritik tamamlayıcı donanım, güç ayırıcıdır ve teknik özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir.



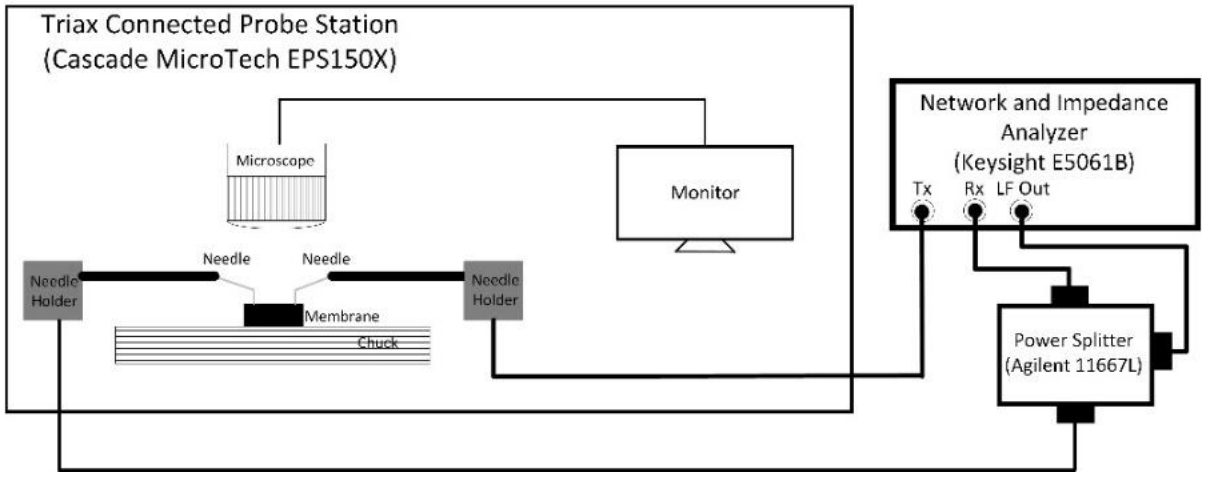
Şekil 4.1. LF ölçüm bağlantıları.

Tablo 4.1. Agilent 11667L güç ayırıcının teknik özellikleri.

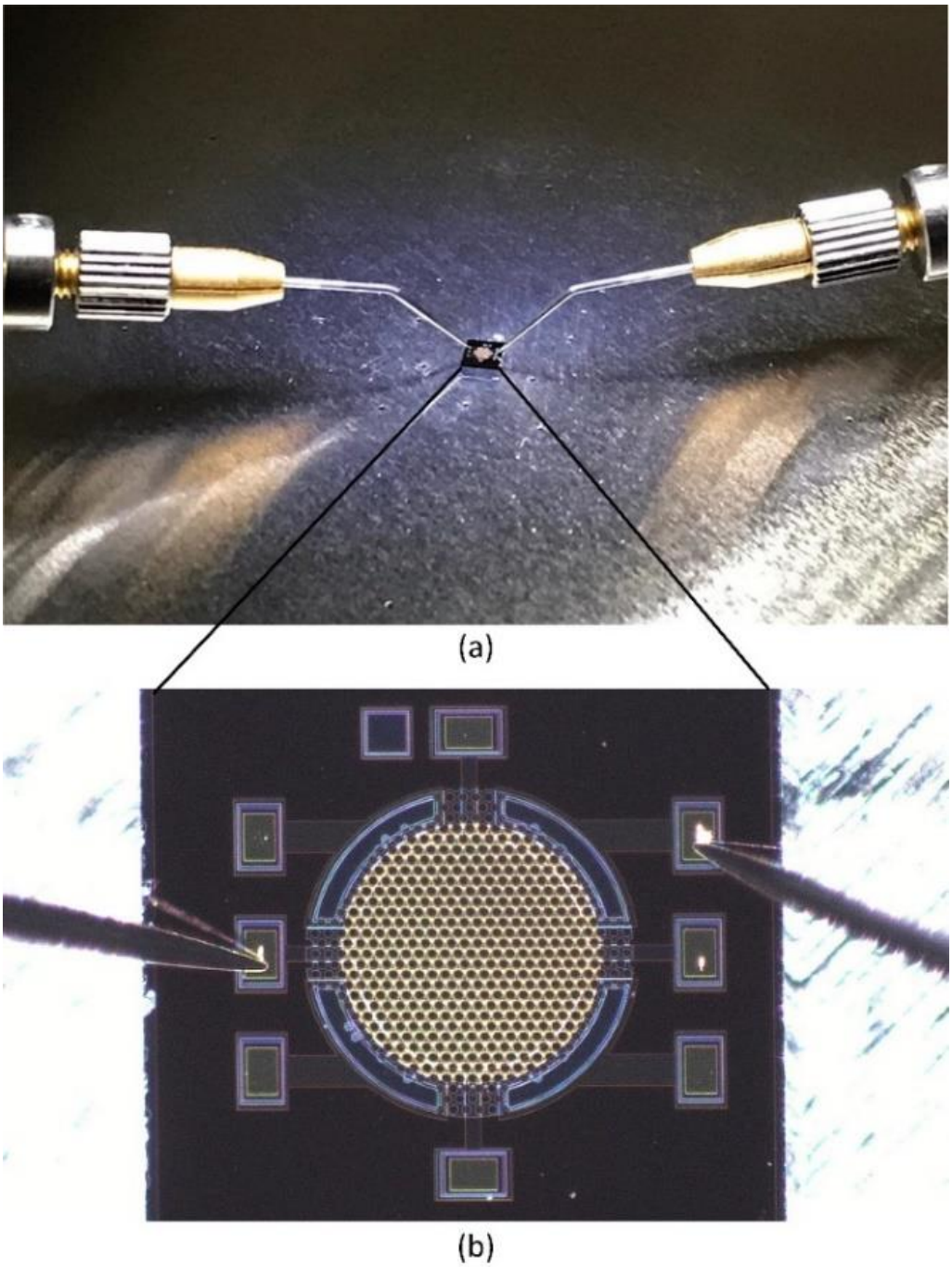
Özellik	Keysight 11667L
Frekans aralığı	DC to 2 GHz
Konektör	BNC(f)
6 dB üzerinde ekleme kaybı (en yüksek)	DC to 100 MHz : 0.2 dB
	100 MHz to 2 GHz : 0.6 dB
İzolasyon (en düşük)	DC to 2 GHz : 11dB
Tipik dönüş kaybı (SWR)	Input : 18 dB (1.3)
	Output : 11 dB (1.78)
Genlik takibi (en yüksek)	DC to 100 MHz : 0.1dB
	100 MHz to 2 GHz : 0.2 dB
Faz takibi (en yüksek)	DC to 100 MHz : 1 deg
	100 MHz to 2 GHz : 3 deg
En yüksek giriş gücü	500 mW

Tablo 4.1'den, güç ayırıcının 0 - 100 kHz frekans aralığında çalıştığı açıktır. S-parametresi ölçümünün hatalı sonuçlar vermesinin nedeni, bu portun kalibrasyonunun yüksek frekanslar (1-10 GHz) için yapılması ve fiber optik MEMS mikrofonunun ilgili frekansının, yüksek frekanslar dikkate alındığında neredeyse DC olarak görünmesidir.

Ölçüm sistemi Şekil 4.2'de gösterildiği gibidir. Düşük gürültülü ölçümler yapmak için, triax bağlantılı probe istasyonu (Cascade MicroTech EPS150X) kullanılır. Sistemdeki gürültüyü azaltmak için, probe istasyonunda tungsten iğneleri (Cascade MicroTech PTT-120- / 4-25) tercih edilir. Probe istasyonunun tablası üzerindeki MEMS tasarımı ve bunun mikroskop altında görünümü Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Elektriksel ölçüm sistemi



Şekil 4.3. Çipin (a) table üzerindeki ve (b) mikroskop altındaki görüntüsü.

1 kHz -100 kHz aralığında herhangi bir rezonans frekansını tespit etmek için, elektriksel ölçüm düzeneğinde empedans analizöründen seri kapasitans ve seri direnç ölçümleri alınır. Empedans analizörünün ayarları Tablo 4.2'deki gibidir.

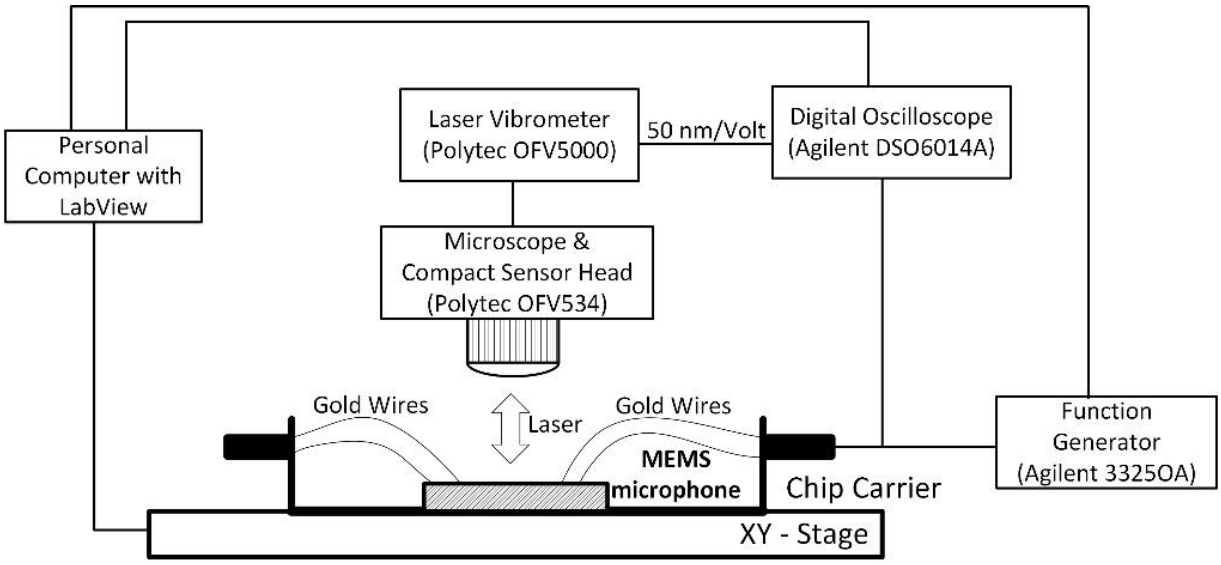
Tablo 4.2. Çipin elektriksel karakterizasyonu için yapılan empedans analizörü ayarları.

Ayar	Değer
Frekans tarama aralığı	1 kHz – 100 kHz
Ortalama bant genişliği (IFBW)	500 Hz
Ortalama sayısı	32
Frekans aralığındaki veri noktası sayısı	1601
AC gerilim	10 dBm
DC eğimleme gerilimi aralığı	0V – 3V

4.2. Optik Ölçüm Sistemi

Tasarımın elektriksel karakterizasyonu, membranın farklı frekanslardaki ve farklı eğimleme gerilimi seviyelerindeki etkilere genel tepkisini tasarımcıya vermektedir. Tasarımın özelliklerini daha ayrıntılı olarak incelemek için optik karakterizasyon sistemi kullanılır.

Optik ölçüm sistemi; lazer vibrometre (Polytec OFV5000), dijital osiloskop (Agilent DSO6014A), fonksiyon jeneratörü (Agilent 33250A) ve sistemde bulunan donanımı kontrol etmek için üzerinde LabView yazılımı (National Instruments, Texas, USA) kurulu olan kişisel bir bilgisayardan oluşur. Optik ölçüm sistemi, Şekil 4.4'te gösterildiği gibidir. Optik ölçüm kurulumunun ayarları Tablo 4.3'teki gibidir.



Şekil 4.4. Optik ölçüm sistemi.

Tablo 4.3. Optik karakterizasyon için gerekli sinyal kaynağı ayarları.

Ayar	Değer
Frekans tarama aralığı	3 kHz – 150 kHz
AC gerilim	100 mV_{pp}
DC eğimleme gerilimi	1V

Optik ölçüm sisteminde, membran elektriksel olarak uyarılır ve membran yüzeyindeki yerel tepkiler lazer ışığıyla ölçülür. Sistemdeki lazer ışığının dalga boyu 633 nm'dir ve ışık, 2 μm kadar küçük noktalara odaklanabilmektedir ve bu sayede sistem hassas ölçümler alabilmektedir. Membran ile fotonları membrana gönderen fiber optik kablonun ucu bir interferometre oluşturur. Membran hareket ettikçe ışığın hareket ettiği mesafe değişir ve interferometre çıkışından, membrandaki sapma, ışıktaki faz kayması ile ölçülmektedir. Optik ölçüm düzeneğinde ışığın kullanılması, membranın çalışmasının doğrulanması için çok kritiktir, çünkü membran, optik olarak membran sapmasını tespit eden bir fiber optik MEMS mikrofonda kullanılacaktır.

5. MEMBRAN KARAKTERİZASYON SONUÇLARI VE ANALİZ

5.1. U103 Çipi Elektriksel Karakterizasyon Sonuçları ve Analizi

Tasarımın empedans analizörü ile karakterizasyonu sırasında, membranın çip üzerinde çökmesini önlemek için DC eğimleme gerilimi 3 V ile sınırlandırılmıştır. Membranın çökmesi elektriksel kısa devreye sebep olabilir ve yüksek akım nedeniyle membran elektriksel olarak yanabilir.

Membran tasarımı, paralel iki kapasitör olarak modellenebilir, çünkü iki paralel plakaya ve bunların arasında bulunan havaya sahiptir. Plakalar daireseldir ve boyutlar tasarım ve MEMSCAP'den gelen bilgilere dayanarak bilinmektedir. Membran paralel bir plaka kapasitör olarak modellenebildiğinden, elektriksel karakterizasyon uygulanabilir. Membranın kapasitansı farklı durumlar için paralel plaka kapasitör kapasitans formülü Denklem 5.1 ile hesaplanabilir.

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \qquad (5.1)$$

Denklem 5.1'de, ε kapasitörün iki plakası arasındaki malzemenin elektrik geçirgenliğidir, A paralel plakaların alanıdır ve d farklı durumlar ve membrandaki farklı yerler için değişen iki plaka arasındaki mesafedir. Elektriksel geçirgenlik değeri, plakalar arası malzemenin hava olduğu göz önünde bulundurularak, $\varepsilon_0 = 8.85 * 10^{-12} F/m$ olarak alınmıştır. Paralel plaka alanı olarak ise daha küçük olan toprak plakasının alanı alınmıştır. Farklı koşullar altındaki teorik seri kapasitans değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

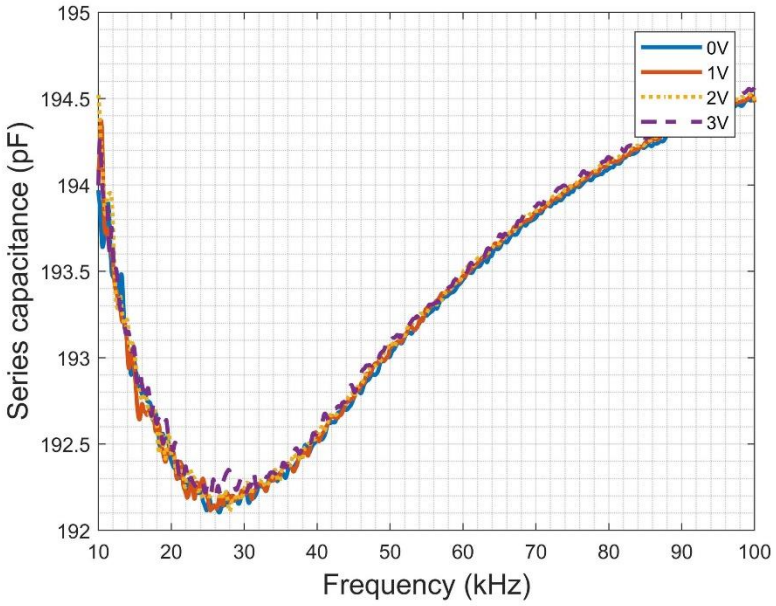
Tablo 5.1. Farklı koşullar altında teorik seri kapasitans değerleri.

Koşul, plakalar arası mesafe (d)	Kapasitans Değeri (pF)
POLY2'den alınan elektriksel bağlantı, d = 2.00 μm	1.3678
POLY2'den alınan elektriksel bağlantı, d = 1.32 μm	2.0517
POLY2'den alınan elektriksel bağlantı, d = 1.00 μm	2.7356
METAL'den alınan elektriksel bağlantı, d = 2.00 μm	0.5696
METAL'den alınan elektriksel bağlantı,d = 1.32 μm	0.8293
METAL'den alınan elektriksel bağlantı, d = 1.00 μm	1.0742

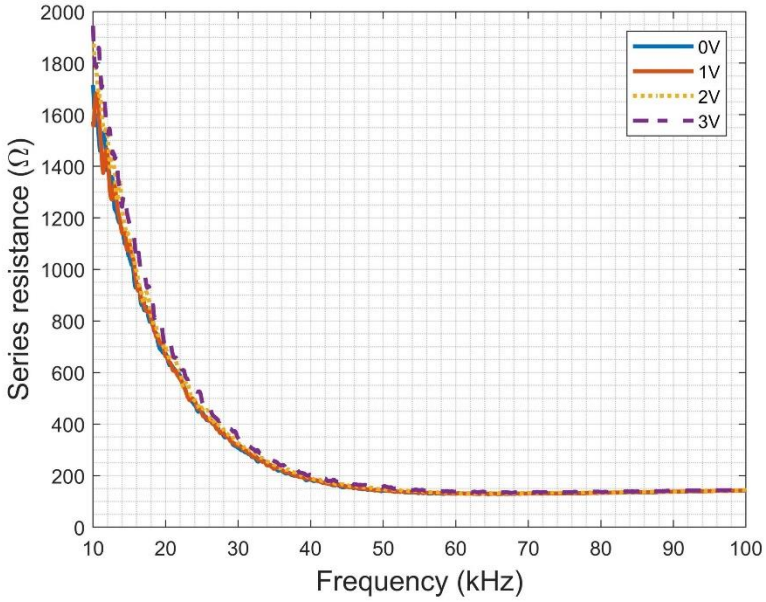
Tablo 5.1'de altı farklı koşul ele alınmıştır. İlk üç durumda, membranın elektrik bağlantısının POLY2 katmanından alındığı varsayılmaktadır. Bu şart altında, membran ile topraklama pedi arasındaki mesafe, DC eğimleme gerilimi değiştikçe değişir. Bu nedenle, üç farklı mesafe göz önünde bulundurulur. Bundan sonra, son üç koşulda, membranın elektrik bağlantısının METAL katmanından alındığı varsayılmaktadır. Benzer şekilde, ilk üç durumda olduğu gibi üç farklı mesafe göz önünde bulundurulur. Elektrik bağlantısının POLY2 veya METAL katmanlarından gelip gelmediği, uygulanan frekansa bağlıdır. Uygulanan farklı frekanslara bağlı olarak, elektrik bağlantısı sadece POLY2'den veya sadece METAL'den alınabilir.

Teorik hesaplamalardan, her durum için seri kapasitans değerinin sadece birkaç pF olduğu gözlenmiştir. Bu şartlar altında, kesin kapasitans değerlerinin yüksek kalitede ölçümü, cihazların ve kabloların ilave kapasitif etkileri nedeniyle imkansız hale gelir. Bununla birlikte, rezonans frekanslar elektriksel karakterizasyon ile elde edilebilir, çünkü rezonans frekanslarda membranın hızlıca salınması ve seri kapasitansın önemli ölçüde değişmesi beklenir.

Ölçülen seri kapasitans (C_s) ve 1 kHz - 100 kHz frekans aralığında seri direnç (R_s) değerleri, Şekil 5.1'de gösterildiği gibidir. Seri kapasitans değerlerinin 193 pF etrafında çok az değiştiği gözlemlenmiştir. Kabloların ve cihazın eklediği seri kapasitanslar düşünüldüğünde ölçülen değerin uygun olduğu değerlendirilmektedir. Seri direnç değerleri ise genel olarak 1000 Ω değerinden az ölçülmüştür. Çip üzerinde bulunan polisilisyum yollar ve kablolar nedeniyle bu seviyelerde direnç değerlerinin ölçülmesi de beklenen bir durumdur. Elektriksel ölçüm esnasında herhangi bir rezonans frekans yakalanamamıştır. Bunun nedeni olarak düşük kalitedeki rezonansların neden olacağı çok küçük kapasitans değişimleri düşünülmektedir. Çipin rezonans frekansları ile ilgili ayrıntılı bilgi optik karakterizasyon sistemi ile elde edilebilecektir.



(a)

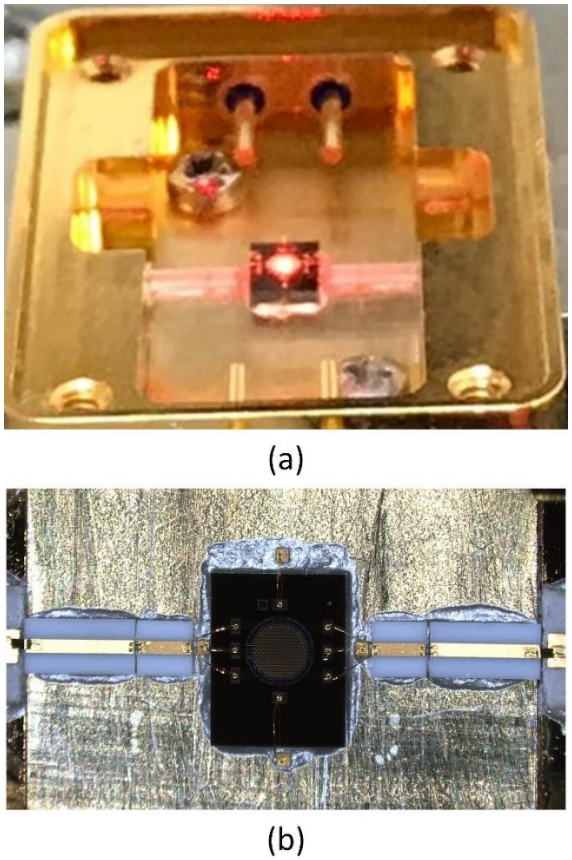


(b)

Şekil 5.1. Farklı DC eğimleme gerilimleri altında ölçülen, frekansa bağlı (a) seri kapasitans ve (b) seri direnç.

5.2. U103 Çipi Optik Karakterizasyon Sonuçları ve Analizi

Membranın lazer vibrometre ile optik karakterizasyonu için çip, Şekil 5.2 (a) 'da gösterildiği gibi bir çip taşıyıcısının üzerine yerleştirilir. Çip taşıyıcısı, taşıyıcı üzerindeki altın yollara elektriksel olarak bağlanmış SMA tipi bağlantı portlarına sahiptir. Çipin elektriksel bağlantı pedleri bu altın yollara elektriksel olarak kablo bağıyla bağlanır. Elektrik bağlantıları ve çip taşıyıcısındaki altın yollar Şekil 5.2 (b)'de gösterilmektedir.



(a)

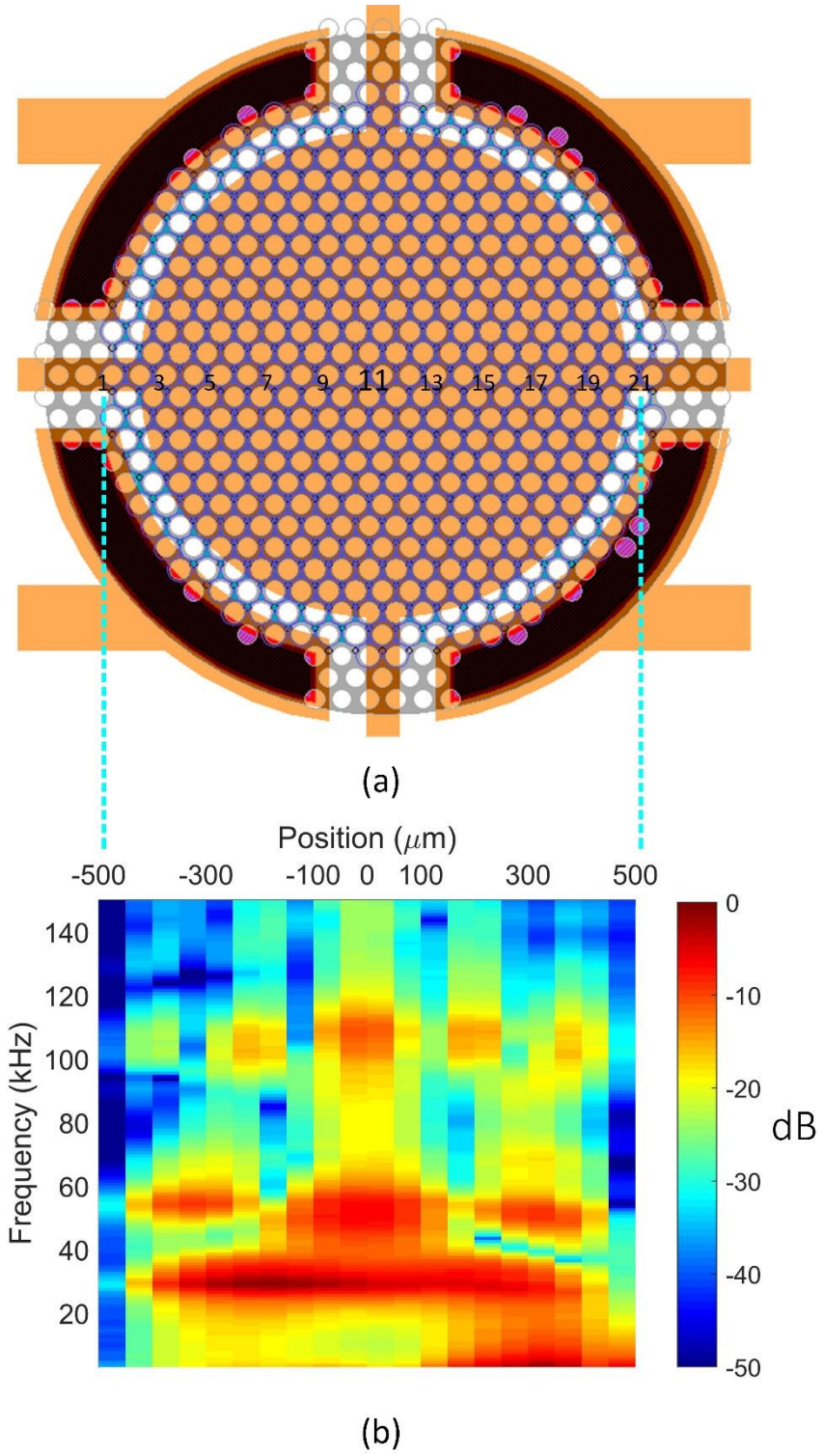
(b)

Şekil 5.2. Çipin (a) çip taşıyıcısı üzerindeki ve (b) mikroskop altındaki görünüsü.

Optik ölçümlerden önce, ölçüm sistemi uygun şekilde hazırlanır. İlk olarak, çip taşıyıcı vibrometrenin tablasına yerleştirilir ve BNC-SMA konektörleri sinyal oluşturucuyu MEMS çipine bağlamak için kullanılır, böylece membran elektriksel olarak uyarılır. Bundan sonra, sinyal üreteci çıkışı ve lazer vibrometre çıkışı osiloskopa bağlanır. Sinyal jeneratörünün çıkışını bağlama amacı onu tetikleyici sinyal olarak kullanmaktır. Son olarak, vibrometrenin tablası, lazeri membranın üzerinde istenen noktalara odaklamak için LabView yüklü PC ile kontrol edilir. Membranın mikroskobik görünümü de PC'ye geri beslenir ve bu durum kullanıcının odak noktasının konumunu tam olarak gözlemlemesine ve kontrol etmesine yardımcı olur.

Optik karakterizasyon sırasında, birbirlerinden 50 μm uzakta olan membranın çapı üzerinde 21 nokta seçilir. Noktalara, 11. nokta membranın merkezi olacak şekilde sayılar verilmiştir. Bu 21 noktanın, 3 kHz ile 150 kHz arasında değişen frekanslara sahip elektriksel etkilere tepkisi elde edilerek, mod şekilleriyle farklı rezonans frekansları elde edilebilir. Membranın numaralandırılmış görünüşü ve membranın elektriksel etkilere karşı verdiği denge durumu tepkisi Şekil 5.3'de verilmiştir.

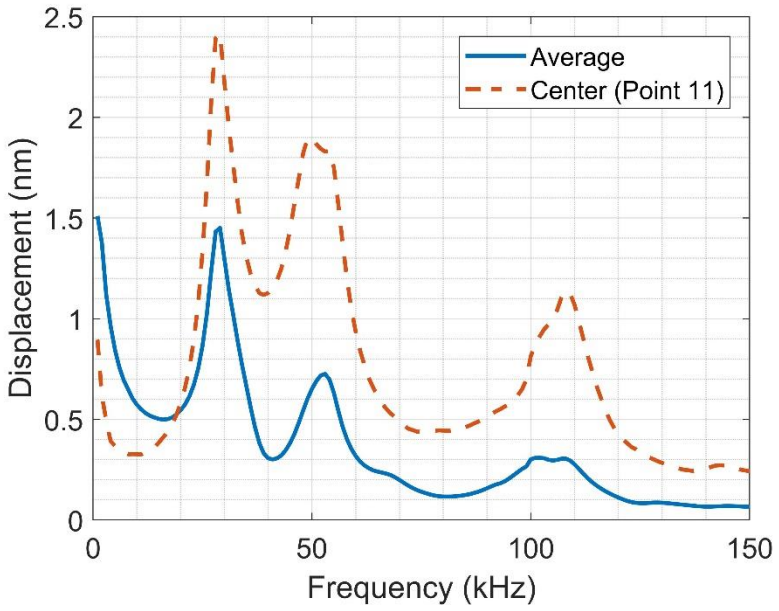
Şekil 5.3 (b) 'deki verilerden, membranın birkaç önemli özelliği elde edilebilir. İlk olarak, yaklaşık 28 kHz, 51 kHz ve 109 kHz olmak üzere üç frekans çevresinde güçlü yanıtlar elde edilmiştir. Bu tepki bölgeleri membranın ilk üç rezonansı olarak değerlendirilirler. Bu frekansların her birinde en güçlü tepki, membranın merkezi çevresinde elde edilir. İlk rezonans değeri teorik olarak öngörülen değere çok yakındır. İkinci olarak, her rezonansın modal şekilleri (veya mod) Şekil 5.3 (b)'de açıkça görülmektedir. Temel mod olan 28 kHz'teki ilk mod, mod biçiminde düğüm değere sahip değildir ve merkezde güçlü bir tepki göstermektedir. 51 kHz'teki ikinci mod, mod şeklinde iki düğüm ve 109 kHz'teki üçüncü mod, mod şeklinde 4 düğüm barındırmaktadır. Mod şekilleri incelendiğinde sadece simetrik mod şekillerinin membranda barınabildiği gözlemlenmektedir ve bu durum membranın simetrisini doğrulamaktadır. Modal şekiller ayrıca 28 kHz'deki rezonansın membranın temel modu olduğunu da doğrular. Bu nedenle, fiber optik MEMS mikrofon sisteminde zarın düzgün çalışması için oldukça önemli olan 28 kHz'in altında rezonans frekansının olmadığı sonucuna varılabilir. Sistemin teorik tasarımında, sabit faz tepkisi göz önüne alındığında ilk rezonans frekansının 20 kHz'in üzerinde olması hedeflenmişti.



Şekil 5.3. Membranın (a) numaralandırılmış görüntüsü ve (b) denge durumu tepkisi.

Membranın temel amacı 50 Hz - 20 kHz frekans aralığında olan ses sinyallerini algılamak olsa da, membran, 50 kHz ve 110 kHz civarında gelen tepkilere da oldukça duyarlıdır. 50 kHz veya 110 kHz civarında çalışan bir membran kullanmayı amaçlayan bazı potansiyel uygulamalarda, bu tasarım da düşünülebilir.

Membranın normalize edilmiş düzlemsel tepkisini farklı frekanslarda analiz ettikten sonra, membranın ortalama yer değiştirmesi ve merkez noktasının yer değiştirmesi, Şekil 5.4'teki gibi hesaplanmış ve çizilmiştir.



Şekil 5.4. Membranın sapmasının frekansa bağlı değişimi.

Membranın ilk rezonans frekansındaki yer değiştirmesi ortalama olarak 1.5 nm ve merkezde 2.4 nm'dir. Bu tepkinin kısmi 3-dB bant genişliği %32'dir. Membran için paralel plaka kapasitör modeli göz önüne alındığında, uygulanan gerilim, membran üzerinde etkiyen kuvvet olarak da modellenebilir. Aslında, bu yüzden optik karakterizasyondan elde edilen bilgiler önemlidir; membranın ses basıncına duyarlı olması gerekir.

Paralel bir kapasitörün plakaları üzerinde etkili olan basınç Denlem 5.2'deki gibi gösterilebilir.

$$P = \frac{1}{2}\varepsilon E^2 = \frac{1}{2}\varepsilon\left(\frac{V}{d_{eff}}\right)^2 \qquad (5.2)$$

Denklem 5.2, $\varepsilon = \varepsilon_0$ plakalar arasındaki malzeme hava olduğu için boş alanın geçirgenliğidir ve iki levha arasındaki mesafe, membrandaki farklı noktalarda değişir, çünkü bazı noktalarda dimplelar vardır. Bu sebeple iki plaka arasındaki etkili boşluğun tanımı gereklidir.

Paralel plaka kapasitörü için, uygulanan gerilime bağlı membranın sapması Denklem 5.3 ile gösterilebilir.

$$V_n{}^2 = \frac{27}{4} x_n (1 - x_n)^2 \qquad (5.3)$$

Denklem 5.3'da V_n, Denklem 5.4 ile hesaplanabilir, burada $V_{collapse}$ membranın çökme gerilimidir.

$$V_n = \frac{V}{V_{collapse}} \qquad (5.4)$$

Denklem 5.3'da, diğer parametre x_n'dir, burada d_{eff} kapasitör plakaları arasındaki etkili boşluktur, Denklem 5.5 ile hesaplanabilir. (Yaralioglu vd., 2003)

$$x_n = \frac{x}{d_{eff}} \qquad (5.5)$$

Membranın elektriksel karakterizasyonundan, çökme geriliminin 3V'un üzerinde olduğu sonucuna varılabilir, çünkü 3 V membrana uygulandığında hala herhangi bir çöküş olmadan düzgün şekilde çalıştığı anlaşılmaktadır. Diğer taraftan, d_{eff}, membranın farklı bölgelerinden hesaplanabilir. Yani, bölge-1 olarak dimple olan polisilisyum bölgeleri ve bölge-2 olarak dimple olmayan polisillisyum bölgeler diyelim. Bölge-1'deki kapasitör plakaları arasındaki hava boşluğu g_1 = 1.25μm ve bölge-2'de g_2 = 2 μm'dir. Her bir plaka üzerine etkiyen kuvvet, Denklem 5.6 ile hesaplanabilir; burada A1 bölge-1 alanı ve A2 bölge-2 alanıdır.

$$F = \frac{1}{2}\varepsilon\left(\frac{V}{g_1}\right)^2 A_1 + \frac{1}{2}\varepsilon\left(\frac{V}{g_2}\right)^2 A_2 = \frac{1}{2}\varepsilon\left(\frac{V}{d_{eff}}\right)^2 (A_1 + A_2) \qquad (5.6)$$

Burada, membran tasarımından A_1 / A_2 = 1/9 olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle, Denklem 5.7'ün, kapasitör plakaları arasındaki etkili boşluğun hesaplanması için geçerli olduğu sonucuna varılabilir.

$$\frac{A_1}{A_2}\frac{1}{g_1{}^2} + \frac{1}{g_2{}^2} = (1 + \frac{A_1}{A_2})\frac{1}{d_{eff}{}^2} \qquad (5.7)$$

Bilinen parametreler Denklem 5.7'e konulursa, kapasitör plakaları arasındaki etkin boşluk d_{eff} = 1.86 μm olarak bulunabilir.

Hesaplanan efektif boşluk Denklem 5.5'e eklenirse, çökme gerilimi 3V olarak alınır ve uygulanan gerilim 1V olarak alınırsa, $x_n = 0.01$ olarak bulunur ve bu da x = 18.6 nm değerini verir. Bu değer 1.86 μm ile karşılaştırıldığında çok küçüktür, bu nedenle göz ardı edilebilir. Bunun anlamı, uygulanan DC gerilim nedeniyle membranın sapmasının, kapasitör plakaları arasındaki ilk etkili boşluğa kıyasla ihmal edilebilir olmasıdır.

Bu noktada membranın duyarlılığını hesaplamak önemlidir. İlk önce, kapasitör plakalarına uygulanan basınç Denklem 5.8 ile bulunmalıdır. Ancak burada uygulanan gerilim hem DC hem de ac terimlerini içerdiğinden incelenmelidir. Uygulanan gerilim $V = V_{DC} + v_{ac}$ olarak yazılabilir. Uygulanan gerilimin karesi basınç hesaplamasında gereklidir. Gerilimin karesi göz önüne alındığında, üç terim olacaktır: kapasitörün plakaları arasındaki etkin boşluğun değişmesinden sorumlu olan tamamen DC terimi, diğerine kıyasla ihmal edilebilecek derecede küçük olan tamamen ac terimi ve karışık terim, $2V_{DC}v_{ac}$. İfadede karışık terim kullanılmalıdır. Basınç hesaplaması, $\varepsilon_0 = 8.854 * 10^{-12}\frac{F}{m}, d_{eff} = 1.86\ \mu m, V_{DC} = 1\ V, v_{ac} = 0.05V$ değerleri için Denklem 5.8 - 5.11'de olduğu gibidir.

$$P = \frac{1}{2}\varepsilon E^2 = \frac{1}{2}\varepsilon\left(\frac{V}{d_{eff}}\right)^2 = \frac{1}{2}\varepsilon\left(\frac{V_{DC}+v_{ac}}{d_{eff}}\right)^2 \quad (5.8)$$

$$P = \frac{1}{2}\frac{\varepsilon}{{d_{eff}}^2}\left({V_{DC}}^2 + 2V_{DC}v_{ac} + {v_{ac}}^2\right) \quad (5.9)$$

$$P \cong \frac{1}{2}\frac{\varepsilon}{{d_{eff}}^2}(2V_{DC}v_{ac}) \quad (5.10)$$

$$P = \frac{8.854*10^{-12}}{2*(1.86*10^{-6})^2}(2 * 1 * 0.05) = 0.128\ Pa \quad (5.11)$$

Optik ölçüm düzeneğinden elde edilen ortalama yer değiştirme verilerinden, membranın 28 kHz'deki ortalama yer değiştirmesinin 1.5 nm olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, duyarlılık Denklem 5.12'den yaklaşık olarak 12 nm / Pa olarak hesaplanabilir.

$$Duyarlılık = \frac{\Delta d_{membrane}}{P} = \frac{1.5\ nm}{0.128\ Pa} = 11.7\ nm/Pa \quad (5.12)$$

Şekil 5.4'teki membranın ortalama yer değiştirmesi ve merkez noktasının yer değiştirmesi grafiğinden yola çıkılarak kalite faktörü hesaplanabilmektedir. Kalite faktörü Denklem 5.13 ile hesaplanabilir. Membranın ortalama yer değiştirme bilgisinde ilk rezonans frekansı f parametresine, yer değiştirmenin $\frac{1}{\sqrt{2}}$'sine karşılık gelen frekanslar arasındaki fark ise f_{BW} parametresine karşılık gelmektedir.

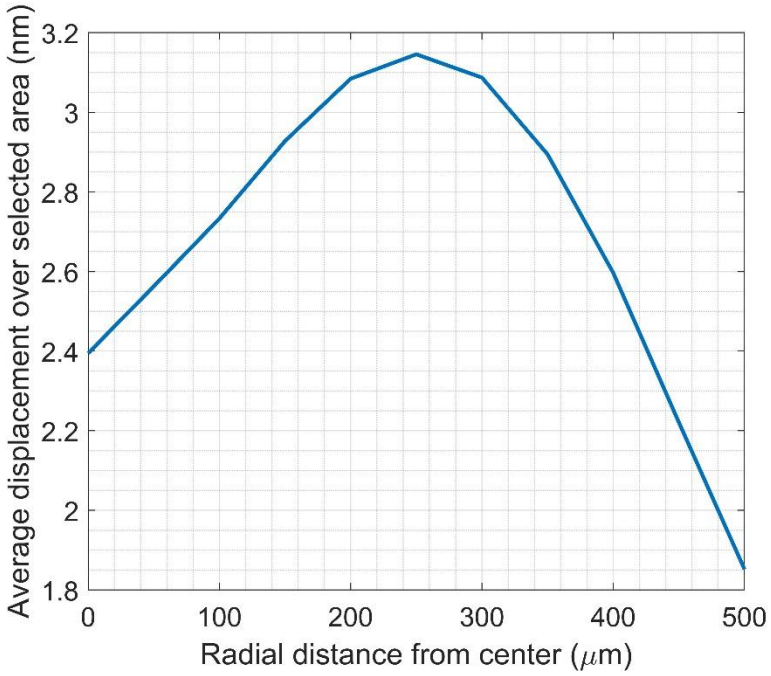
$$Q = \frac{f}{f_{BW}} \tag{5.13}$$

Membranın ilk rezonans frekansının 28 kHz olduğu göz önünde bulundurulduğunda ($f = 28\ kHz$) ve ortalama yer değiştirme bilgisinde 28 kHz'deki yer değiştirme miktarının $\frac{1}{\sqrt{2}}$'sine karşılık gelen frekanslar arasında fark hesaplandığında ($f_{BW} = 10\ kHz$), Denklem 5.13 yardımı ile ilk rezonans frekansı için kalite faktörün 2.8 olduğu görülür.

Uygulanan artan DC gerilimi ile ortalama yer değiştirmenin artacağı tahmin edilmektedir. Bu nedenle, membranın 3 V'luk bir DC geriliminde çalıştırarak, fiber optik MEMS mikrofon uygulamasında lazer ışığıyla yer değiştirmenin daha kolay tespit edilmesini sağlayacak şekilde membrandan daha yüksek tepki elde edilebilir.

Membran, fiber optik MEMS mikrofon uygulamasında kullanılacağından, membrana lazer ışığı yönlendirilecektir. Lazer ışığının tespit edilebileceği alan, ışının genişliği, mesafe ile arttığından oldukça kritiktir. Başka bir deyişle, önce ışık membrane gönderilecek, sonra membranın metal kaplı, yansıtıcı yüzeyinden geri dönecektir. Bu hareket sırasında, ışığın genişliği artacak ve fiberin sabit çapı nedeniyle sadece yansıtılan ışığın sınırlı bir miktarı algılanacaktır. Yansıyan ışığın en fazla miktarını optimum sapma bilgisi ile elde etmek için ışığın odaklanacağı alanın incelenmesi gerekir. Fiber kabloya giren ışığın miktarı azaldıkça, ışığın gücü azalır ve bu da foto algılayıcıdan elde edilen sinyal seviyesini azaltır. Sonuç olarak, ölçümün sinyal-gürültü oranı (SNR) azalır.

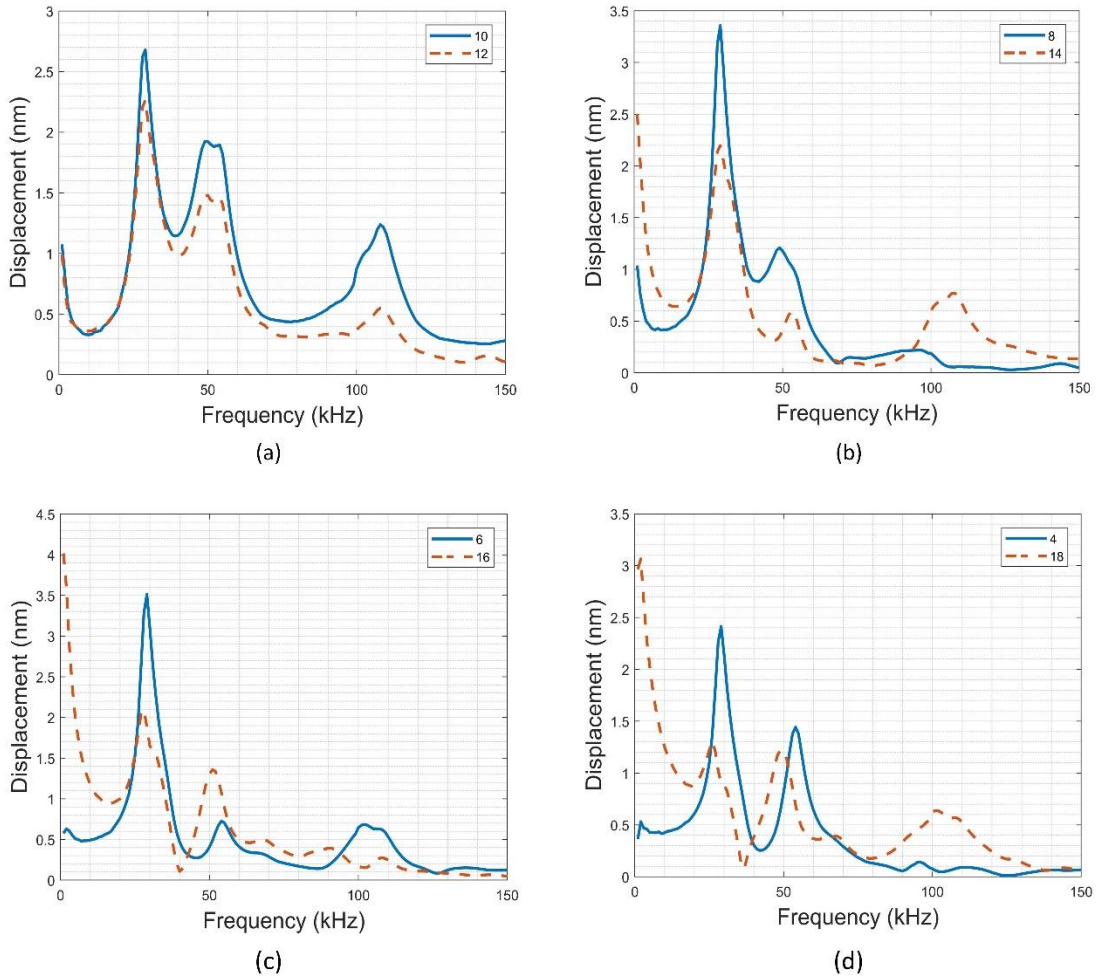
İlk rezonans frekans, 28 kHz, fiber optik MEMS mikrofon sistemindeki membranın çalışması için kritik olduğundan, bu analiz sadece bu frekans için yapılacaktır. Alan başına maksimum sapma bilgisini elde etmek için lazer ışığının nereye odaklanacağına karar vermek için veri noktalarının tepkileri kullanılır. Lazer ışığı spotu dairesel şekilde olacağından dairesel şekilli alanlar göz önünde bulundurulur. Seçilen alan üzerinde ortalama yer değiştirme, zarın merkezinden farklı dairesel mesafeler için elde edilir. Elde edilen özellikler Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Farklı dairesel uzaklıklar için birim alana düşen ortalama sapma miktarı.

Işığı odaklamak için optimum alanın yarıçapı 150 μm'dir. Ayrıca, seçilen alan başına ortalama yer değiştirmenin yarıçapı 50 - 250 μm olan dairesel bölgeler için neredeyse sabit kaldığı görülmektedir. Bu nedenle, lazer ışığını 300 μm çapında dairesel alana odaklamak en uygunu olacaktır. Bu seçim, hem ölçümün hassasiyetini hem de fiber kabloya geri dönen ışık miktarını optimize eder.

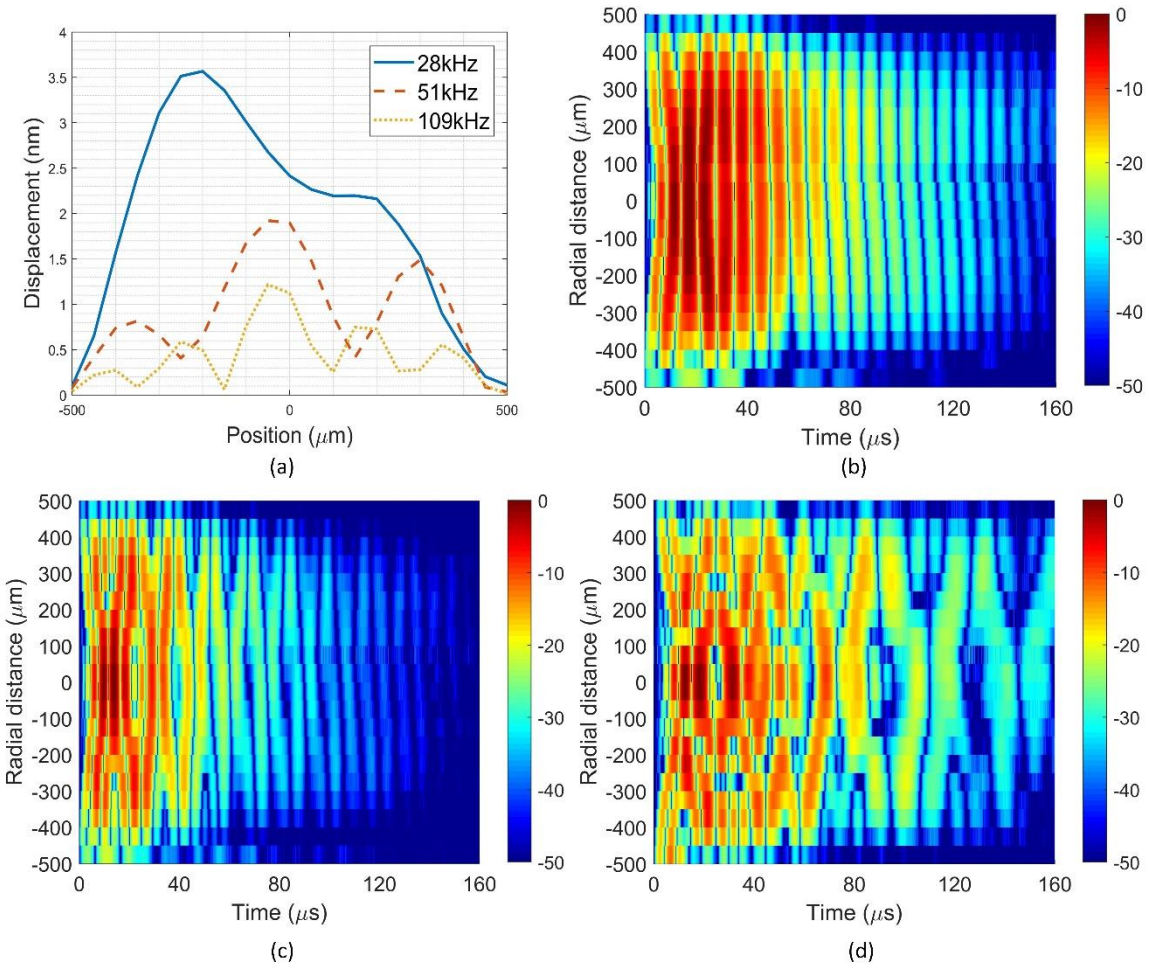
Membranın simetrisinin, düzgün çalışması ve mikrofabrikasyon işleminin güvenilirliği ve tekrarlanabilirliği açısından doğrulanması için önemlidir. Hatta simetri konusundaki bazı bilgiler Şekil-5 (b) 'de verilen denge durumu tepkilerinden çıkarılmaktadır. Membranın simetrisini daha fazla araştırmak için, membran merkezinden 50 μm, 150 μm, 250 μm ve 350 μm uzaklıktaki noktalardan gelen veriler kullanılır. Elde edilen özellikler Şekil 5.6'daki gibidir.



Şekil 5.6. Membran merkezine (a) 50 μm, (b) 150 μm, (c) 250 μm and (d) 350 μm mesafede bulunan iki noktanın frekans tepkileri.

Şekil 5.6 (a) 'da, membran merkezinden 50 μm uzaklıktaki noktaların tepe tepkilerinin aynı frekanslarda olduğu görülmektedir. Bu simetri, membranın merkezinden 150 μm mesafedeki noktalar için Şekil 5.6 (b) 'de de görülebilir. Membranın merkezinden 250 μm uzaktaki noktalar incelendiğinde, Şekil 5.6 (c) 'de, ikinci rezonans frekansının yeri %3.8 oranında biraz değişir. Şekil 5.6 (d) 'de, membranın merkezinden 350 μm uzaktaki noktalar için küçük sapmalar gözlenir: birinci, ikinci ve üçüncü rezonans frekansları sırasıyla %3.6, %5.9 ve %4 oranında değişir. Şekil 5.6 (a), (b), (c) 'deki verilerden, membranın 250 μm yarıçaplı dairesel alanda oldukça simetrik olduğu sonucuna varılabilir.

Kısa süreli geçici tepki, membranın bir başka önemli özelliğidir. Membranın geçici tepkisini elde etmek için, 28 kHz, 51 kHz ve 109 kHz'de tek periyot sinüs sinyalleri kullanılır. Membranın 28 kHz, 51 kHz ve 109 kHz'de giriş sinyallerine verdiği denge durumu tepkileri, Şekil 5.7 (a) 'da verilmiştir. Geçici tepkiler, sırasıyla 28 kHz, 51 kHz ve 109 kHz frekanslarında Şekil 5.7 (b), (c), (d) 'de verilmiştir.



Şekil 5.7. Membranın (a) 28 kHz, 51 kHz and 109 kHz frekanslardaki CW etkilere denge durumu tepkisi, ve (b) 28 kHz, (c) 51 kHz, (d) 109 kHz frekanslarındaki tek periyot sinüs etkilerine geçici tepkisi.

Membranın simetrisi Şekil 5.7 (a) 'dan gözlenebilir. Membranın rezonans frekanslarındaki sinus etkilere verdiği denge durumu tepkisi, membranın dairesel simetrisini doğrular. Şekil 5.7 (b), (c), (d) 'de, geçici tepkiler gözlenir ve membranın 28 kHz'deki girişe verdiği geçici tepkisi en uzun salınım cevabına sahiptir. Geçici tepkileri tümü zamanla azalır. Geçici tepki, membranın ana çapındaki 21 nokta için elde edildiğinden, simetri, geçici tepkilerden de gözlenebilir.

Membranın kalite faktörü, rezonans frekanslarında verilen tek periyot sinüs dalgasına gösterdiği geçici tepkiden de hesaplanabilir. Membranın tek periyot sinüse verdiği denge durumu tepkisinde tepkinin en yüksek olduğu değerin 1/e katına düşmesine kadar geçen süre τ ile belirtilip, gönderilen sinüs dalgasının periyodu T ile belirtildiğinde Denklem 5.13 yardımıyla membranın kalite faktörü hesaplanır.

$$Q = \pi * \frac{\tau}{T} \qquad (5.13)$$

Denklem 5.13 kullanılarak membranın ilk rezonans frekansındaki tek periyot sinüs dalgasına tepkisinden kalite faktörü hesaplandığında kalite faktörünün 4 olduğu görülür.

Membranın vibrometer sistemi ve empedans analizörü ile yapılan ölçümler sonucunda gerekli teknik özellikleri hakkındaki bilgiler elde edilmiştir. Tablo 5.2. U103 çipinin ölçülen ilk, ikinci ve üçüncü mod frekanslarını, temel moddaki seri kapasitans ve seri direnç değerlerini, membranın yer değiştirme miktarını, hesaplanan duyarlılık ve kalite faktörünün bilgilerini göstermektedir.

Tablo 5.2. U103 çipi teknik özellikleri.

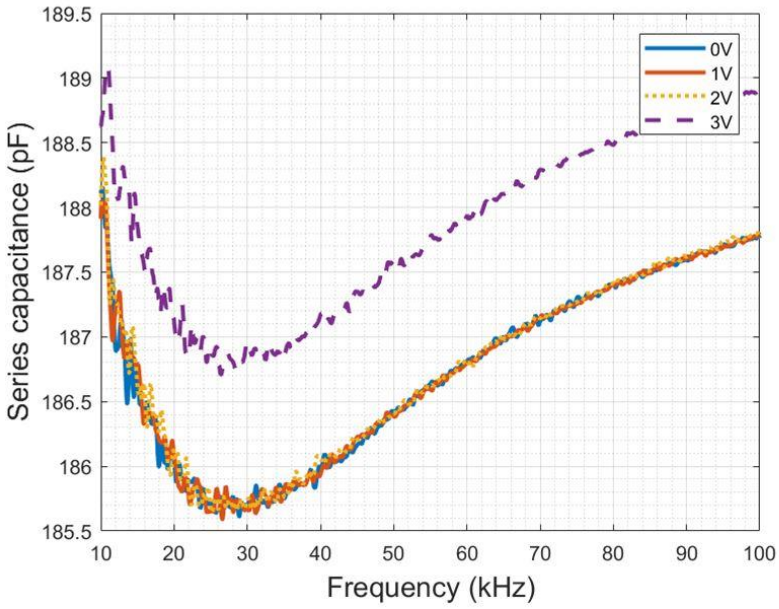
Teknik Özellikleri	Değerler
Temel (ilk) mod frekansı (f_o), kHz	28
İkinci mod frekansı, kHz	51
Üçüncü mod frekansı, kHz	109
Seri kapasitans değeri (C_s) @ f_o,pF	192.2
Seri direnç değeri (R_s) @ f_o, Ω	350
Membranın merkez noktasının yer değiştirmesi (1V DC, 100 mV_{pp} AC) @ f_o, nm	2.4
Membranın ortalama yer değiştirmesi (1V DC, 100 mV_{pp} AC) @ f_o, nm	1.5
Duyarlılık @ f_o,nm/Pa	12
Kalite faktörü @ f_o	2.8-4
Verimli çalıştığı ön gerilim, V	~1
3-dB bant genişliği	%32

Membranın lazer vibrometre ile optik karakterizasyonu için çip, Şekil 5.2 (a) 'da gösterildiği gibi bir çip taşıyıcısının üzerine yerleştirilir. Bu işlemde çip deliksiz bir tabla üzerine oturtulur, fiber sistemde yapılacak ölçümler ve gözlemler için kullanılacak çip delikli bir tabla üzerine oturtulmalıdır. Fiber sistemde kullanılmak için mikroüretimde ürettiğimiz en verimli ve yüksek performanslı çip (U109) seçilip, delikli bir çip taşıyıcısı üzerine oturtulmuştur. U109 çipi üzerinde empedans analizörü ve vibrometer sistemi ile U103 çipi için uygulanan ölçümler tekrarlanmış ve membranın karakteristik özellikleri hesaplanmıştır. Fiber sistemde kullanılmak için seçilen yüksek performanslı çipin elektriksel ve optik karakterizasyon sonuçları ve analizleri raporun 5.3 ve 5.4 bölümlerinde görülebilir.

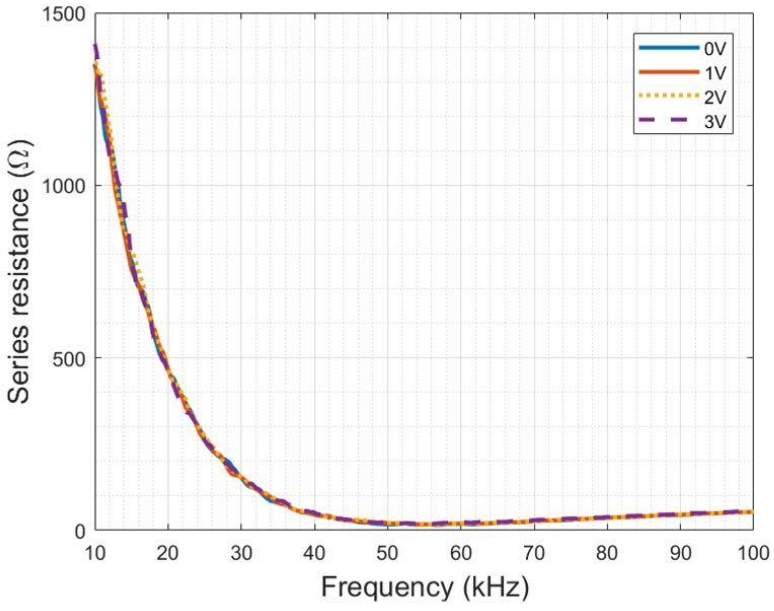
5.3. U109 Çipi Elektriksel Karakterizasyon Sonuçları ve Analizi

Tasarımın empedans analizörü ile karakterizasyonu sırasında ölçülen seri kapasitans (C_s) ve 1 kHz - 100 kHz frekans aralığında seri direnç (R_s) değerleri, Şekil 5.8'de gösterildiği gibidir. Seri kapasitans değerlerinin 187 pF etrafında çok az değiştiği gözlemlenmiştir. Kabloların ve cihazın eklediği seri kapasitanslar düşünüldüğünde ölçülen değerin uygun olduğu

değerlendirilmektedir. Seri direnç değerleri ise gerekli frekans aralığında 1500 Ω değerinden az ölçülmüştür.



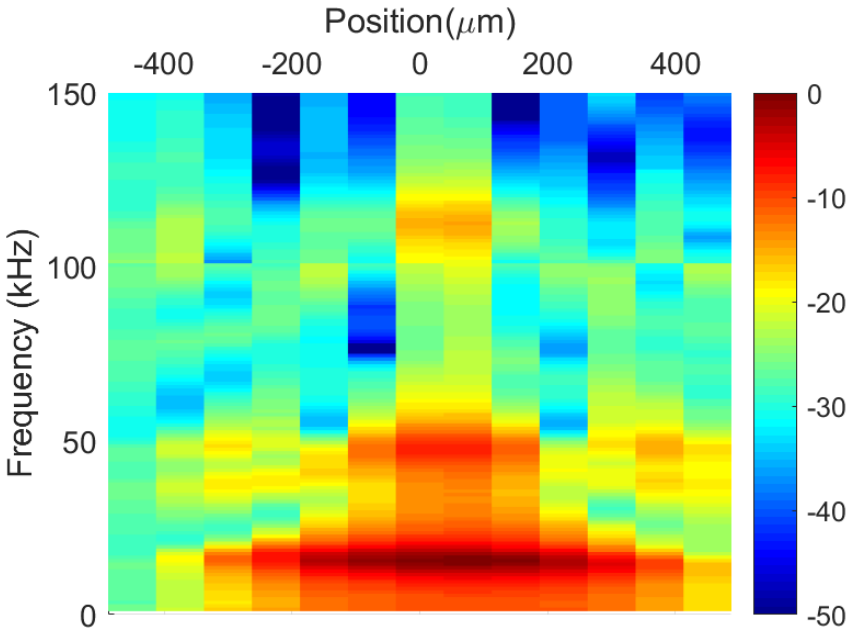
(a)



(b)

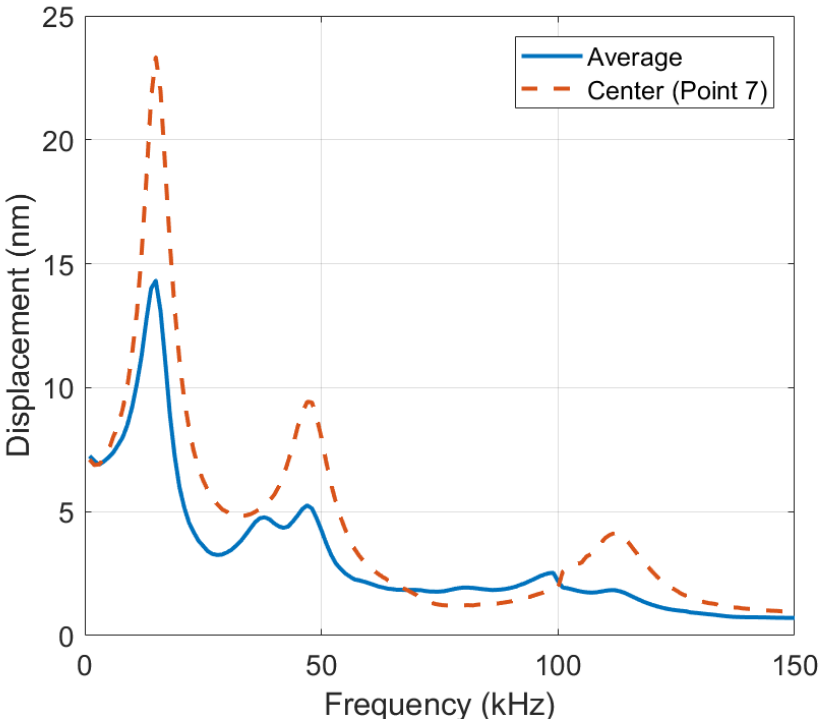
Şekil 5.8. Farklı DC eğimleme gerilimleri altında ölçülen, frekansa bağlı (a) seri kapasitans ve (b) seri direnç.

5.4. U109 Çipi Optik Karakterizasyon Sonuçları ve Analizi



Şekil 5.9. Membranın denge durumu tepkisi.

Optik karakterizasyon sonucunda elde edilen Şekil 5.9'daki verilerden, membranın birkaç önemli özelliği elde edilebilir. Yaklaşık 15 kHz, 48 kHz ve 110 kHz olmak üzere üç frekans çevresinde güçlü yanıtlar elde edilmiştir. Bu tepki bölgeleri membranın ilk üç rezonansı olarak değerlendirilirler. Bu frekansların her birinde en güçlü tepki, membranın merkezi çevresinde elde edilir. Ayrıca, her rezonansın modal şekilleri Şekil 5.9 'de açıkça görülmektedir. Temel mod olan 15 kHz'teki ilk mod, mod biçiminde düğüm değere sahip değildir ve merkezde güçlü bir tepki göstermektedir. 48 kHz'teki ikinci mod, mod şeklinde iki düğüm ve 110 kHz'teki üçüncü mod, mod şeklinde 4 düğüm barındırmaktadır. Mod şekilleri incelendiğinde sadece simetrik mod şekillerinin membranda barınabildiği gözlemlenmektedir ve bu durum membranın simetrisini doğrulamaktadır. Modal şekiller ayrıca 15 kHz'deki rezonansın membranın temel modu olduğunu da doğrular niteliktedir.



Şekil 5.10. Membranın sapmasının frekansa bağlı değişimi.

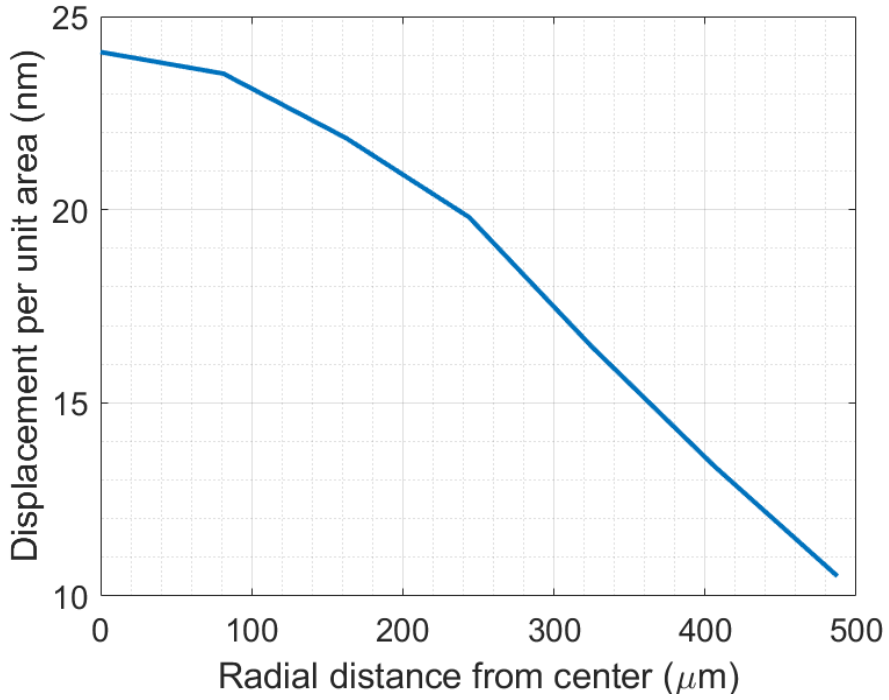
Membran, 48 kHz ve 110 kHz frekanslarında gelen tepkilere da oldukça duyarlıdır. Membranın normalize edilmiş düzlemsel tepkisini 150 kHz'e kadar ölçülüp analiz ettikten sonra, membranın ortalama yer değiştirmesi ve merkez noktasının yer değiştirmesi, Şekil 5.10'teki gibi hesaplanmış ve çizilmiştir. U109 çipinin ilk rezonansının U103 çipine göre daha düşük bir frekansta olması, membranın yer değiştirme miktarının daha fazla olmasını açıklar niteliktedir.

Membranın ilk rezonans frekansındaki yer değiştirmesi ortalama olarak 14 nm ve merkezde 23.5 nm'dir. U103 için yapılan analizler tekrarlandığında Denklem 5.12'den membranın duyarlılığı 105.3 nm/Pa olarak hesaplanır.

Membranın ilk rezonans frekansının 15 kHz olduğu göz önünde bulundurulduğunda ve Denklem 5.12 yardımı ile ilk rezonans frekansı için analizler yapıldığında kalite faktörünün 3 olduğu görülür.

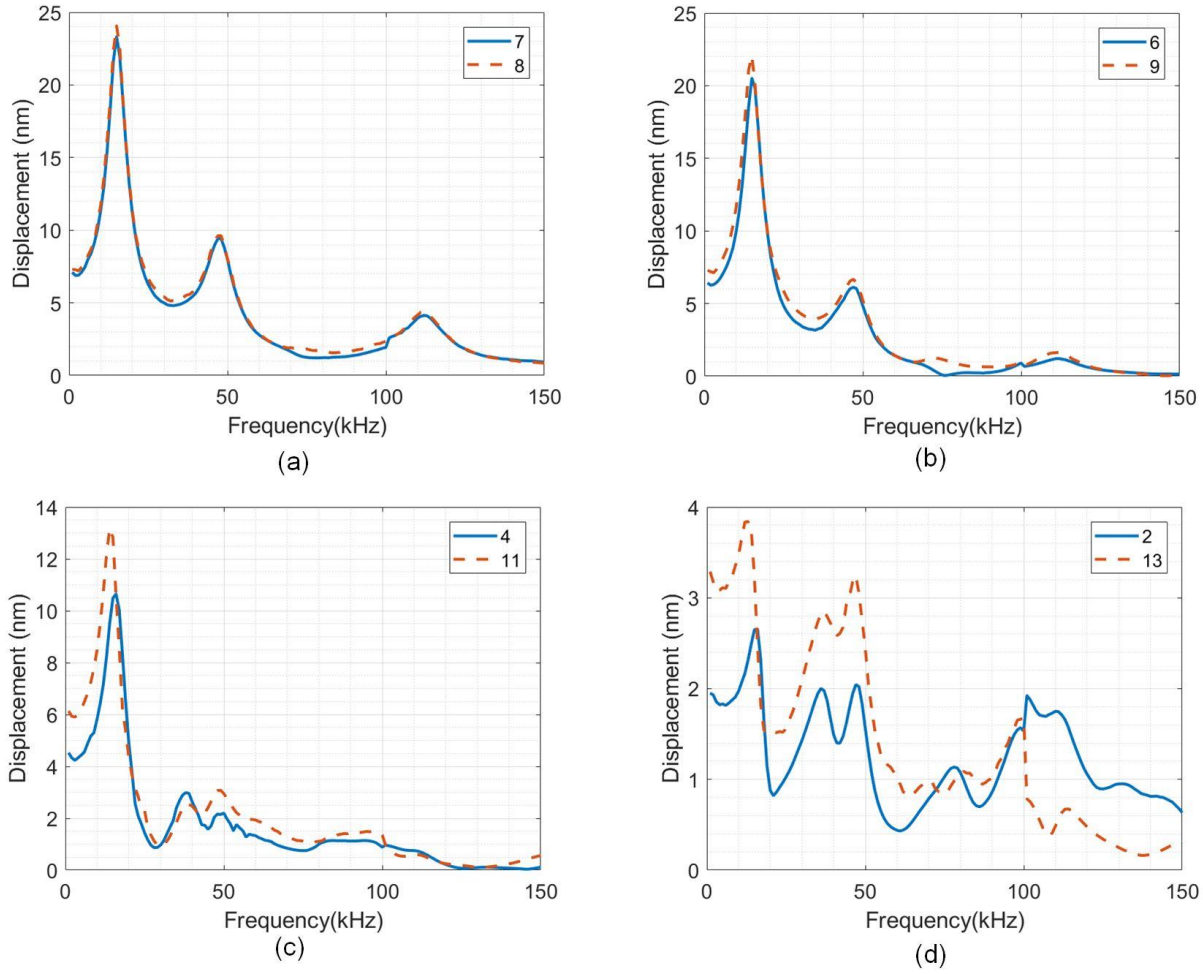
Temel mod olan 15 kHz için fiber optik MEMS mikrofon sistemindeki membranın çalışması için kritik olduğundan, farklı dairesel uzaklıklar için birim alana düşen yer değiştirme miktarı analizi sadece bu frekans için yapılmıştır. Seçilen alan üzerinde ortalama yer değiştirme, zarın

merkezinden farklı dairesel mesafeler için elde edilir. Elde edilen özellikler Şekil 5.11'te gösterilmiştir.



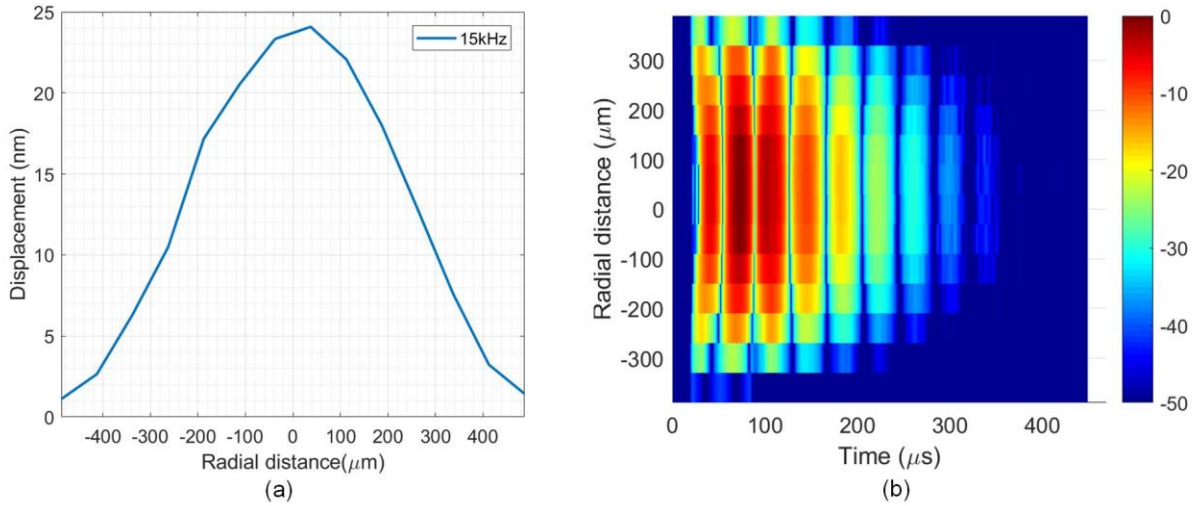
Şekil 5.11. Farklı dairesel uzaklıklar için birim alana düşen ortalama sapma miktarı.

Membranın simetrisi Şekil 5.12 membranın simetrisini göstermek için çizdirilmiştir. Membranın merkezine eşit uzaklıklardaki noktaların tepkilerine bakıldığında merkeze yaklaştıkça simetrinin hedeflendiği gibi yüksek oranda sağlandığı görülebilir. U109 çipinin özellikle rezonans frekanslarında oldukça simetrik olduğu gözlenmiştir. U103 çipi ile karşılaştırıldığında, merkezden eşit uzaklıktaki noktaların sadece tepeye ulaştığı frekanslarının aynı olmadığı, aynı zamanda membranın tepe noktalarındaki tepkilerinin de neredeyse aynı miktarda olduğu görülebilir.



Şekil 5.12. Membranın merkezine (a) 50 μm, (b) 150 μm, (c) 250 μm and (d) 350 μm mesafede bulunan iki noktanın frekans tepkileri.

Membranın bir diğer önemli özelliği kısa süreli geçici tepkisidir. Membranın geçici tepkisini elde etmek için, 15 kHz frekansında tek periyot sinüs sinyali kullanılır. Membranın 15 kHz giriş sinyallerine verdiği denge durumu tepkisi, Şekil 5.13 (a)'da verilmiştir. Geçici tepki ise Şekil 5.13 (b)'de verilmiştir.



Şekil 5.13. Membranın 15 kHz frekansındaki CW etkilere denge durumu tepkisi, ve 15 kHz frekansındaki tek periyot sinüs etkilerine geçici tepkisi.

Membranın simetrisi Şekil 5.13 (a)'dan da gözlenebilir. Membranın rezonans frekansındaki sinus etkilere verdiği denge durumu tepkisi, membranın dairesel simetrisini doğrular.

Membranın vibrometer sistemi ve empedans analizörü ile yapılan ölçümler sonucunda gerekli karakter özellikleri hakkındaki bilgiler elde edilmiştir. Tablo 5.3. U109 çipinin ölçülen ilk, ikinci ve üçüncü mod frekanslarını, temel moddaki seri kapasitans ve seri direnç değerlerini, membranın yer değiştirme miktarını, hesaplanan duyarlılık ve kalite faktörünün bilgilerini göstermektedir.

Her iki çip dizaynı için de membran sapmasının frekansa bağlı değişimden, Tablo 5.2. ve Tablo 5.3.'ten gözlemlenebileceği gibi, U103 çipi projede amaçlanan aralıktaki (20 Hz- 20 kHz) frekanslarda düz ve stabil varsayılabilecek bir tepki göstermektedir. İlk rezonans frekansı (28 kHz), duyulabilir frekans aralığın dışında olarak tasarlanmıştır, ve çipin mikrofon olarak kullanılacağı aralıkta düz bir tepkiye sahip olması sağlanmıştır. İlk rezonans frekansının bu aralık dışında olması, duyulabilir frekans aralığında duyarlılığın, U109 ile karılaştırıldığında, daha düşük olmasına neden olmuştur. U109 çipinin ise ilk rezonans frekansı (15 kHz), mikrofon olarak kullanılacak frekans aralığında olacak şekilde tasarlanmış olup, duyulabilir frekans aralığında yüksek duyarlılıkta çalışması sağlanmıştır. U109 çipinin temel mod frekansının 15 kHz'de olması sebebiyle duyulabilir frekans aralığında membranın tepkisinin, U103 ile karşılaştırıldığında, daha değişken olduğu gözlenebilir.

Tablo 5.3. U109 çipi karakter özellikleri.

Teknik Özellikleri	Değerler
Temel (ilk) mod frekansı (f_o), kHz	15
İkinci mod frekansı, kHz	48
Üçüncü mod frekansı, kHz	110
Seri kapasitans değeri (C_s) @ f_o,pF	186.5
Seri direnç değeri (R_s) @ f_o, Ω	700
Membranın merkez noktasının yer değiştirmesi (1V DC, 100 mV_{pp} AC) @ f_o, nm	23.5
Membranın ortalama yer değiştirmesi (1V DC, 100 mV_{pp} AC) @ f_o, nm	14
Duyarlılık @ f_o,nm/Pa	105.3
Kalite faktörü @ f_o	3-8.3
Verimli çalıştığı ön gerilim, V	~1
3-dB bant genişliği	%130

6. OPTİK ALGILAMA SİSTEMİNİN OPTİMİZASYONU VE KURULUMU

6.1. Optik Algılama Sistemi Optimizasyonu İçin Elde Edilen Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde, fiber optik kablo aracılığıyla algılama amacıyla ışığın gönderilmesi ve MEMS mikrofondan yansıyan ışığın toplanmasının optimize edilmesi amacıyla simülasyon çalışmaları yapılmış ve incelenmiştir. MEMS mikrofonunun fiziksel parametreleri kullanılarak tüm katmanlar ve delikli membranın yapısı da dahil olmak üzere mikrofonun 3B modellemesi yapılmıştır. MEMS mikrofonun 3 boyutlu modellenmesi ve simülasyon çalışmaları, ışık izdüşümü ve takibi üzerine özelleşmiş olan TracePro yazılımı platformunda yapılmıştır. Simülasyon çalışmaları sırasında ışık takibi (ing. Ray Tracing) yöntemi kullanılmakla birlikte MEMS mikrofonu oluşturan katmanların materyal özellikleri TracePro yazılımına aktarılmıştır.

Bu bölümde elde edilen sonuçlar MEMS mikrofon ölçüm sisteminin geliştirilmesi, detaylıca incelenmesi ve daha iyi ölçüm alınabilmesine olanak sağlamıştır. Simülasyonlar 3 farklı kurulum yapısında koşturulmuştur. İlk kurulum, alt taş kalınlığının fiber optik uç tarafından toplanılan ışık gücüne etkisini kavramsallaştırmak için yapılmıştır. İkinci kurulan simülasyon düzeneği, fiber optik ucun MEMS mikrofonun arka yüzeyine olan optimum mesafenin hesaplanabilmesi ve mesafe değişiminin toplanan ışık gücüne etkisini incelemek amacı ile oluşturulmuştur. Son olarak, üçüncü simülasyon düzeneği **6.1.4 Eş Değer Mesafe Kavramı** bölümünde açıklanan alternatif ölçüm yönteminin tanımlanmasını ve uygulanabilirliğini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır.

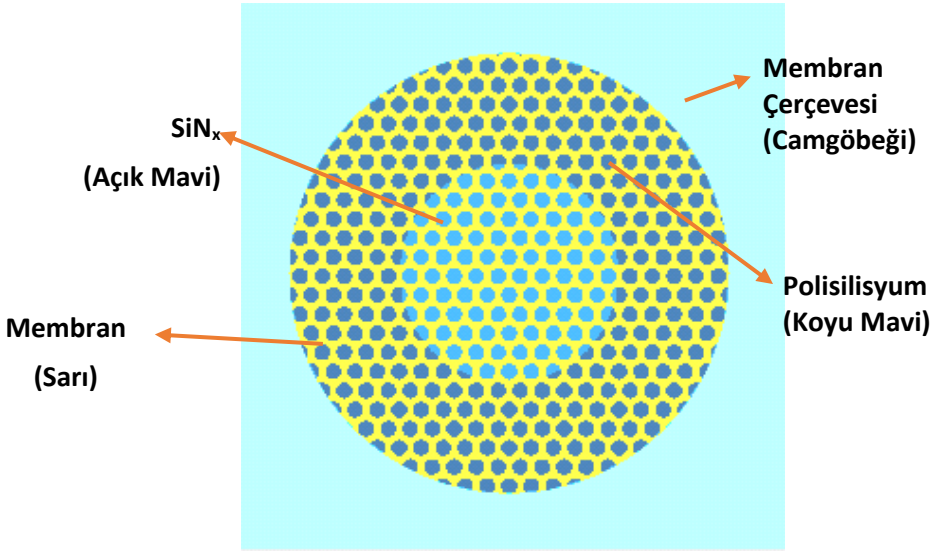
6.1.1 Simülasyon Temelleri

MEMS mikrofon simülasyonları ve 3 boyutlu modeli TracePro yazılımı platformunda gerçekleştirilmiştir. TracePro yazılımı, aydınlatma tasarımı gibi çok çeşitli yeni problemleri çözmek için Monte Carlo ışın takibi, analizi ve optimizasyon yöntemlerini yaygın kullanımda olan bir makro dili ile birleştirmektedir. TracePro yazılımında materyal özellikleri lazer dalga boyu olarak kullandığımız 1.31 um için aktarılmıştır. Bu kapsamda fiber optik kabloyu oluşturan silika camı, MEMS mikrofonu oluşturan silisyum, polisilisyum ve silisyum nitrat malzemelerinin kırılma indisi, emilim katsayısı ve sönme katsayısı değerleri simülasyona dahil edilmiştir. Tablo 6.1’de simülasyona aktarılan değerler listelenmiştir.

MEMS mikrofonun 3B tasarım TracePro yazılımı içerisinde gerçekleştirilmiş olup Tablo 6.1'de belirtilen fiziksel parametrelere göre tasarlanmıştır. Şekil 6.1'de MEMS mikrofonun ön yüzü ve katmanların model üzerinde gösterimi verilmiştir.

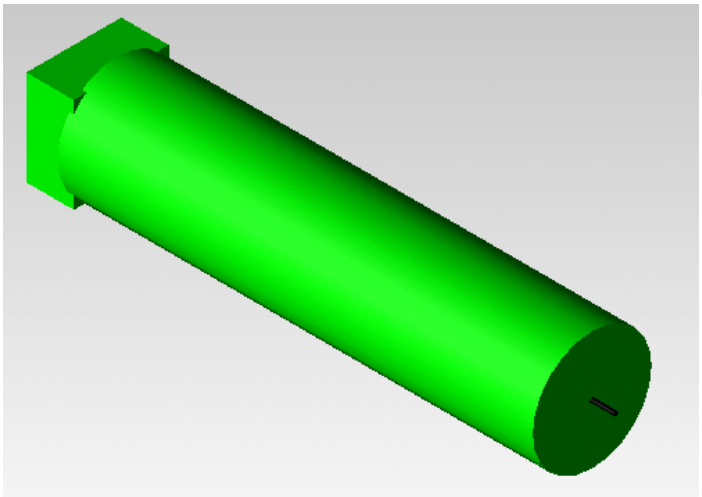
Tablo 6.1. Simülasyonlarda kullanılan MEMS mikrofon fiziksel parametreleri

Fiziksel Parametre, Birim	Değer
Membranın çapı ($d_{MEMBRANE}$), µm	1000
Destek Uzunluğu ($d_{SUPPORT}$), µm	150
Delikten deliğe çap ($d_{HOLE-TO-HOLE}$), µm	50
Delik çapı (d_{HOLE}), µm	36
Metal kalınlığı (t_{METAL}), µm	0.51
POLY2 kalınlığı (t_{POLY2}), µm	1.5
POLY1 kalınlığı (t_{POLY1}), µm	2.0
POLY0 kalınlığı (t_{POLY0}), µm	0.51
SiN kalınlığı (t_{SiN}), µm	0.61
Alt taş kalınlığı (t_{SUBS}), µm	>650



Şekil 6.1. 3B olarak tasarlanmış MEMS mikrofonun ön yüzey görünüşü.

Fiber optik kablo içi oyuk bir silindir içine yerleştirilmiş başka bir silindirden oluşmaktadır. İçi oyuk silindir fiber optik kablonun kaplama (ing. Cladding) kısmını temsil ederken içine yerleştirilen silindir çekirdek (ing. Core) kısmını temsil etmektedir. Şekil 6.2'de 125 µm çapına sahip kaplama, 9 µm çapına sahip çekirdek kısmı ve emici yüzey gösterilmiştir. Kaplama ve çekirdek kısımları farklı kırıma indislerine sahip olduklar için ayrık olarak modellenmiştir. Lazer kaynağından üretilen ışık, çekirdek kısmının merkezinden başlayan bir ışın kaynağı olarak modellenmiş olup toplam 100 mW ışın gücüne sahip 1147 adet ışın üretmektedir. Simülasyon temelinde üretilen ışınların temsil edilen fiber optik kablo içerisinde ilerlemesi MEMS mikrofon ile etkileşime geçerek geri yansıyan ışın demetlerinin toplanması amaçlanmaktadır. Bu sebeple modellenen fiber optik kablo arkasına tamamen emici yüzey yerleştirilerek fiber optik kablonun fotodedektöre iletebileceği ışın gücünün hesaplanması amaçlanmıştır. Ayrıca, MEMS mikrofonun arka kısmına yerleştirilmiş olan başka bir tamamen emici yüzey ile MEMS mikrofondan geçerek dış dünyaya saçılan ışın demetlerinin izlenmesi planlanmıştır.



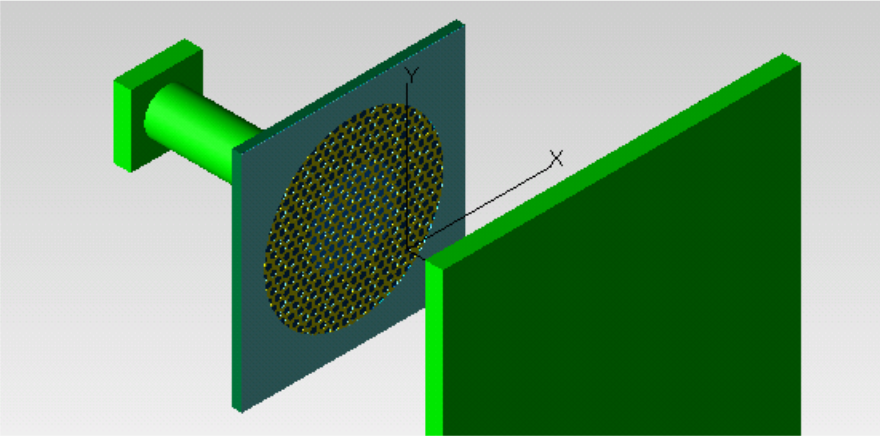
Şekil 6.2. 3B olarak modellenen fiber optik kablo ve emici yüzey.

3B modellerin, ışın demetlerinin yanı sıra genel olarak simülasyonların anlaşılmasını kolaylaştırmak amacıyla güç oranı (ing. Power Ratio) tanımlanmıştır. Güç oranı fiber optik kablonun ucundan toplanan gücün gönderilen toplam ışın gücüne oranı ile bulunmaktadır. Bu sebeple güç oranı yüzde olarak gösterilmiştir.

6.1.2. Alt Taş Kalınlığının Etkileri

Oluşturulan simülasyon düzeneğinde, ışık demeti MEMS mikrofonunun arka yüzeyine modellenen fiber optik kablo aracılığıyla gönderilmektedir. Işık huzmesi, sırasıyla MEMS mikrofonun alt taşı, polisilisyum, SiN ve Metal (Altın) katmanlarıyla etkileşime girmektedir. Katmanlardan ilerleyerek geçen ışın demeti en son olarak Metal katmanından geri yansır ve fiber optik kabloya kadar diğer arada kalan katmanları tekrar kat ederek geri döner.

Şekil 6.3, çipin ışık ışını üzerindeki etkilerini gözlemlemek için oluşturulan simülasyon modelini göstermektedir. Toplanan ışın gücünün yüksekliğinin mümkün olduğu kadar yüksek olması ölçüm sisteminin kararlılığının artması ve sinyal-gürültü oranını yükselmesine katkıda bulunduğu için istenmektedir. Temel olarak gürültü zemini fotodedektörün gürültü zemini, foton gürültüsü ve lock-in yükseltgecinin gürültü tabanına bağlı olduğundan toplanın gücün artması sinyal-gürültü oranının artmasını sağlayacaktır. Alt taşta ve diğer katmanlarda kat edilen mesafe arttıkça, ışın demeti daha fazla saçılıma ve emilime maruz kalacaktır. SiN ve polisilisyum tabakaları mikron altı kalınlıkta tabakalar olduklarından dolayı, alt taş katmanından kaynaklanan emilim ve etkisine kıyasla ışık ışınının emilmesi ve saçılması üzerindeki etkileri önemli değildir. Bu nedenle, emilim ve saçılmayı en çok etkileyebilecek olan alt taş kalınlığının değişken olduğu bir deney düzeneği kurulmuştur. Alt tabaka kalınlığı, 50 μm adımlarla 50 μm ile 500 μm arasında değiştirilmiştir ve fiber ucu, alt tabakanın arka yüzeyine yerleştirilmiştir.



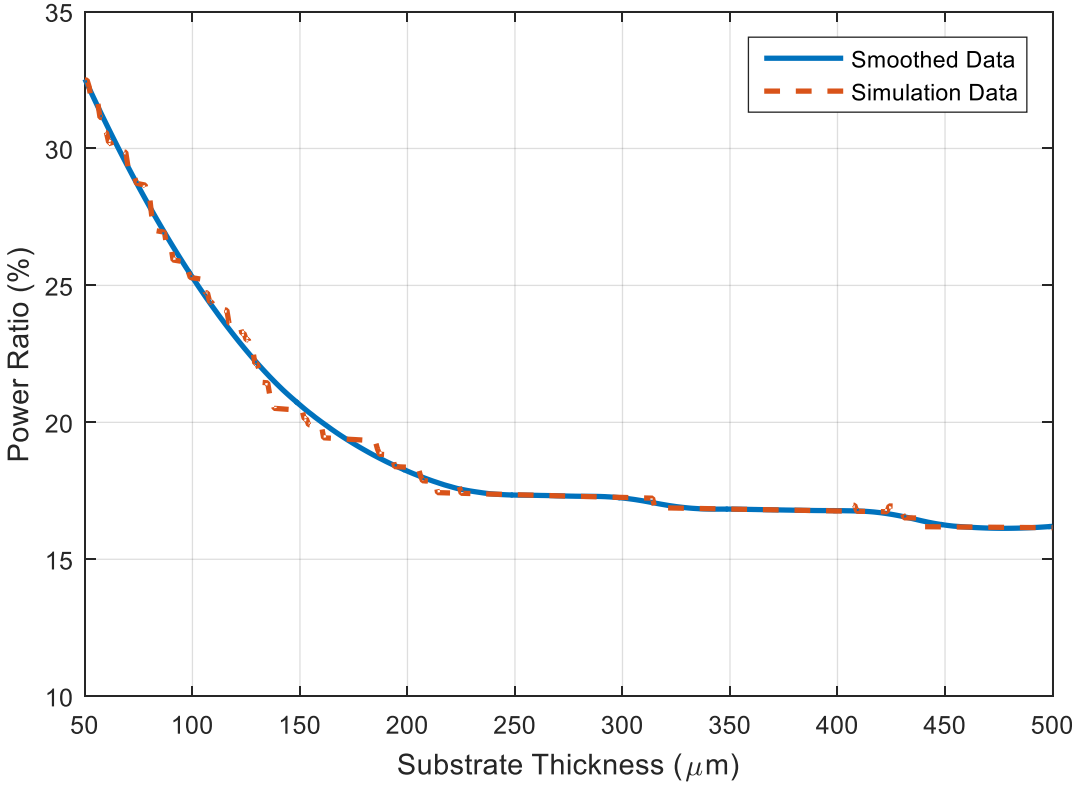
Şekil 6.3. Alt taş kalınlığının etkilerini gözlemlemek için oluşturulan simülasyon kurulumu.

Şekil 6.4'te, alt taş kalınlığının değişimine göre güç oranının değişimi verilmiştir. Güç oranı, 6.1.1'de de tanımlandığı gibi alınan gücün ve giriş gücünün oranı olarak tanımlanmaktadır. 500 μm ila 250 μm substrat kalınlığı, güç oranı noktasında önemli bir değişiklik yaratmamaktadır. Güç

oranındaki değişim yaklaşık olarak %1 olarak gözlemlenmiştir. 500 µm ile 250 µm arasındaki fark, alt taştan kaynaklanan emilimden dolayı oluşmaktadır. Substrat kalınlığı 250 µm'den 50 µm'ye doğru düşerken, güç oranı üssel bir davranış izlemektedir. Üstel eğilim, yansıyan ışın demetinin geri toplanması olasılığının alt taş kalınlığının azalmasıyla orantılı olduğunu göstermektedir. Alt taş kalınlığı azalırken, membran ve fiber ucu arasındaki mesafe azalır. Bu nedenle, membrandaki fiber ucundan çıkan ışık huzmeleri, 500 µm kalınlığındaki alt taşa göre daha fazla merkezlenir ve membrandan yansıyan ışınlar merkezi eksenden daha az ayrılır. Buna ek olarak, alt taş kalınlığının azalmasıyla birlikte malzeme içi emilim kayıpları da azalacaktır. Bu yüzden, alt taş kalınlığının azalmasıyla güç oranında artış beklenir. Bu artışın üssel olması, Denklem 6.1'de gösterilen ışın emilimini temsil eden Beer-Lambert Kanunu'nun üssel olması ile açıklanabilir.

$$\frac{I_{attenuated}}{I} = e^{-\alpha x} \tag{6.1}$$

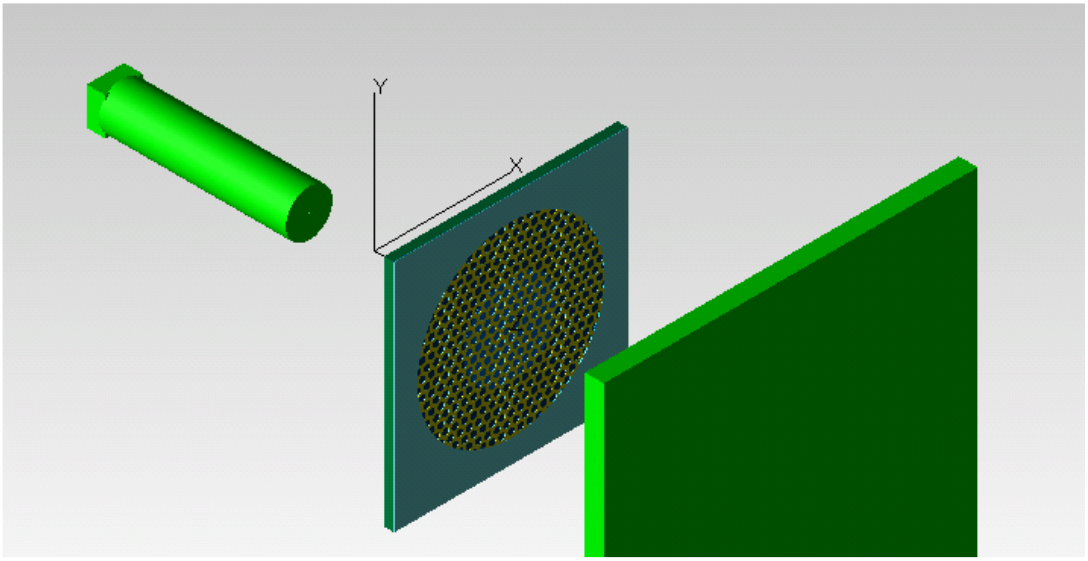
Simüle edilen veri yumuşatılarak üssel davranışın daha belirgin olarak gösterilmesi sağlanmıştır. Bu simülasyondan alt taş kalınlığının 250 µmden daha az kalınlığa azaltılması gerektiği değerlendirilmektedir. Bu nedenle, farklı kalınlıklardaki güç oranını elde edebilmek için **6.1.4 Eş Değer Mesafe Kavramı** bölümünde değerlendirilecektir.



Şekil 6.4. Alt taş kalınlığı ve güç oranı grafiği.

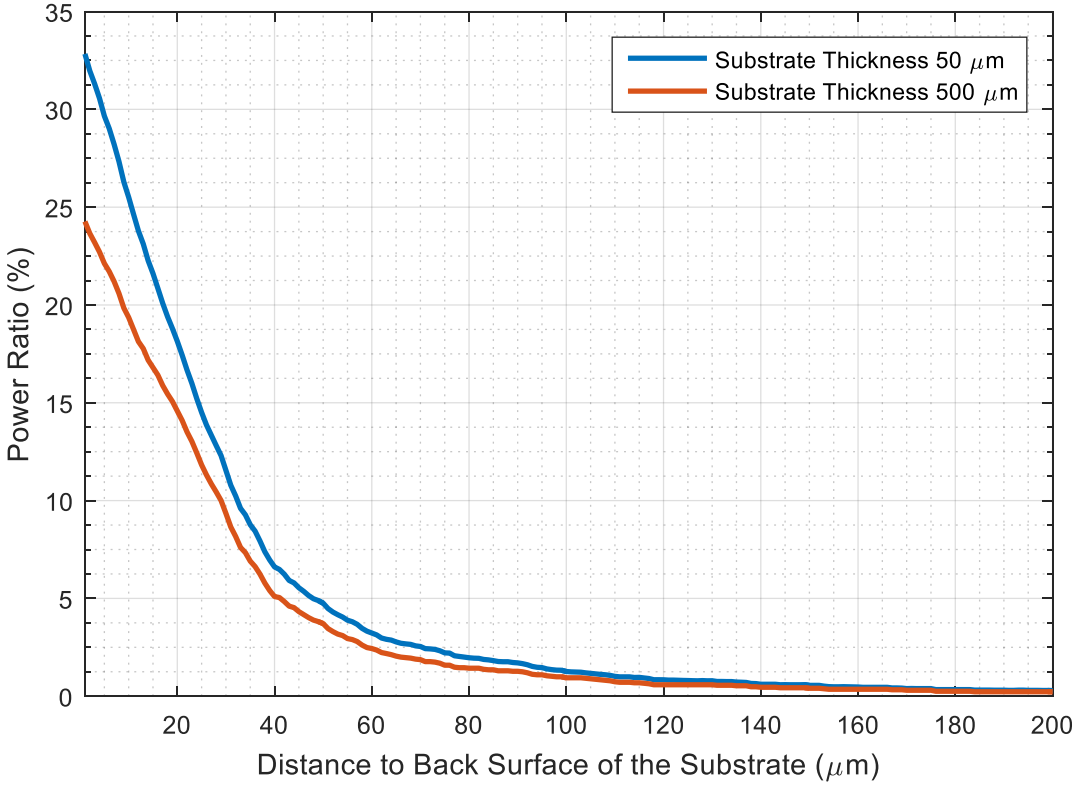
6.1.3. Fiber Ucun Arka Yüzeye Optimum Mesafesi

Şekil 6.5'te, fiber optik ucun alt taşa olan mesafesinin güç oranı üzerindeki değişimlerini gözlemlemek için oluşturulan simülasyon kurulumu gösterilmiştir. Optimum mesafenin bulunarak ölçüm sisteminin en uygun şekilde kurulması amaçlanmaktadır. Fiber optik uç ile alt taş arasındaki mesafe değiştirilerek güç oranı hesaplanmış ve güç oranının değişimi gözlenerek simülasyon gerçekleştirilmiştir. Simülasyon, 50 µm ve 500 µm alt taş kalınlığı için gerçekleştirilmektedir. Ara alt taş kalınlıklarının etkileri **6.1.2. Alt Taş Kalınlığının Etkileri** bölümünde değerlendirildiği için iki marjinal uçta simülasyon yapmanın yeterli olduğu değerlendirilmiştir. Bu sebeple, ara kalınlıklar için hesaplanarak güç oranının 50 µm ve 500 µm alt taş kalınlığı arasındaki değişiminin benzeri şekilde Şekil 6.4'de gösterilen davranışa benzer bir eğilime sahip olması beklenmektedir. Dolayısıyla MEMS mikrofon alt taşının arka yüzeyi ile fiber optik uç arasındaki mesafe 1 µm'lik adımlarla 0 µm'den 1 mm'ye kadar 50 µm ve 500 µm alt taş kalınlıkları için değiştirilmiştir.



Şekil 6.5. Alt tabakaya optimum mesafeyi tanımlamak için oluşturulan simülasyon kurulumu.

Şekil 6.6'da, alt taşın arka yüzeyine olan mesafeye bağlı olarak güç oranının değişimi verilmiştir. 200 µm'den fazla mesafelerdeki güç oranı değerleri 0'a yaklaştığından dolayı, 200 µm ile 1 mm arasındaki sonuçlar Şekil 6.6'ya dahil edilmemiştir. Güç oranı, 50 µm'den 0 µm'ye önemli ölçüde arttığı gözlemlenmektedir. 50 µm substrat kalınlığı için, güç oranı% 32.83'e ulaşmaktadır. Ayrıca, güç oranı 500 µm alt taş kalınlığı için %16.15'e ulaşmaktadır. Alt taşın arka yüzeyi ile fiber optik uç arasındaki 0 µm mesafe için, güç oranı değerleri hem 50 µm hem de 500 µm alt taş kalınlığı için en yüksek seviyeye ulaşmaktadır. Bu nedenle, maksimum yansıtılan optik gücü toplayabilmek için fiber optik ucu, alt taşın arka yüzeyine mümkün olduğunca yakın yerleştirilmelidir. Bununla birlikte, yüzey kalınlığı, yüzey işleme gibi yöntemlerle 50 µm'ye düşürülememektedir. 50 µm alt taş kalınlığını simüle etmek için alternatif bir yol olan "eşdeğer mesafe" kavramı oluşturulmuştur. Kavram bir önceki bölümde de belirtildiği gibi **6.1.4 Eş Değer Mesafe Kavramı** bölümünde değerlendirilecektir.



Şekil 6.6. Alt taşın arka yüzeyine olan mesafe ve güç oranı grafiği.

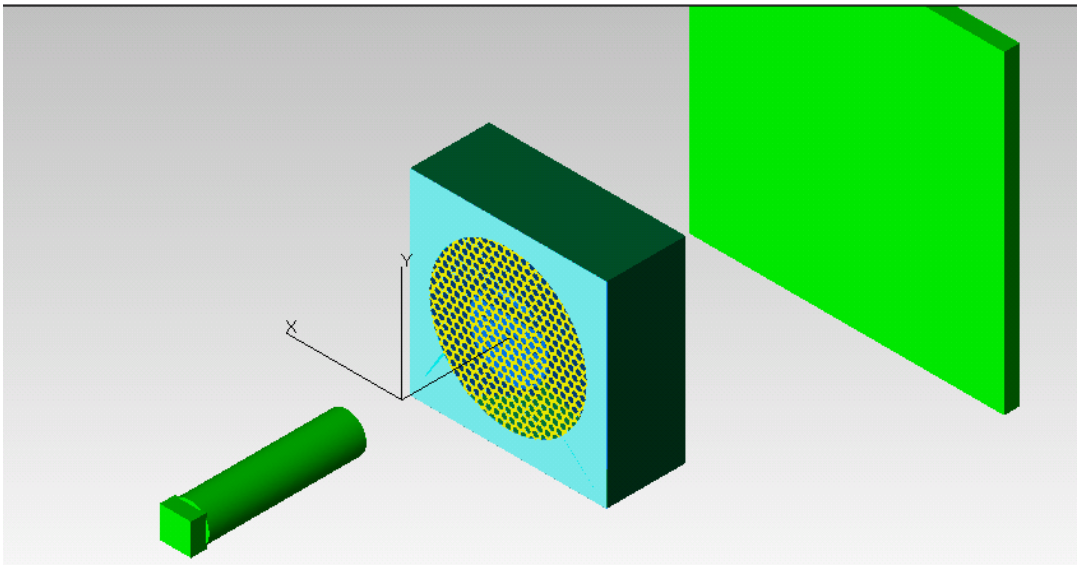
6.1.4. Eşdeğer Mesafe Kavramı

MEMS mikrofonun alt taş kalınlığı, taşlama işlemi ile 50 µm civarında azaltılamamaktadır. Öğütme işlemi çipe kuvvet uyguladığı ve çip, alt taş kalınlığı azaldıkça daha kırılgan hale geldiğinden dolayı, kırılma ve geri döndürülemez zarar görme riski altındadır. Ayrıca, çipin öğütme tablasına sabitlenmesi, çipin büyüklüğü yaklaşık 2 mm x 2 mm olduğundan zor olmaktadır. Yeterince vakum gücü sağlanamayacağından ve mengene türevi tutamaçlar çipe zarar verebileceğinden dolayı öğütme işlemi alt taş kalınlığını sağlıklı olarak azaltabilecek yöntemler arasında değerlendirilmemiştir. Öğütme işlemi yerine, öğütülmüş çipin sağlayabileceği güç oranı ve aynı zamanda membran hareketinin gözlemlenmesine olanak verebilecek bir alternatif ölçüm yoluna ihtiyaç duyulmuştur.

MEMS mikrofon ölçüm sisteminin temel amacı, membranın sapmasını algılayarak bundan ses titreşimlerini türetebilmektir. Fiber optik ucun 500 µm'den daha kısa mesafeye alt taştan dolayı yerleştirilememektedir. Bu yüzden, fiber optik uç MEMS mikrofona çipin ön yüzeyinden

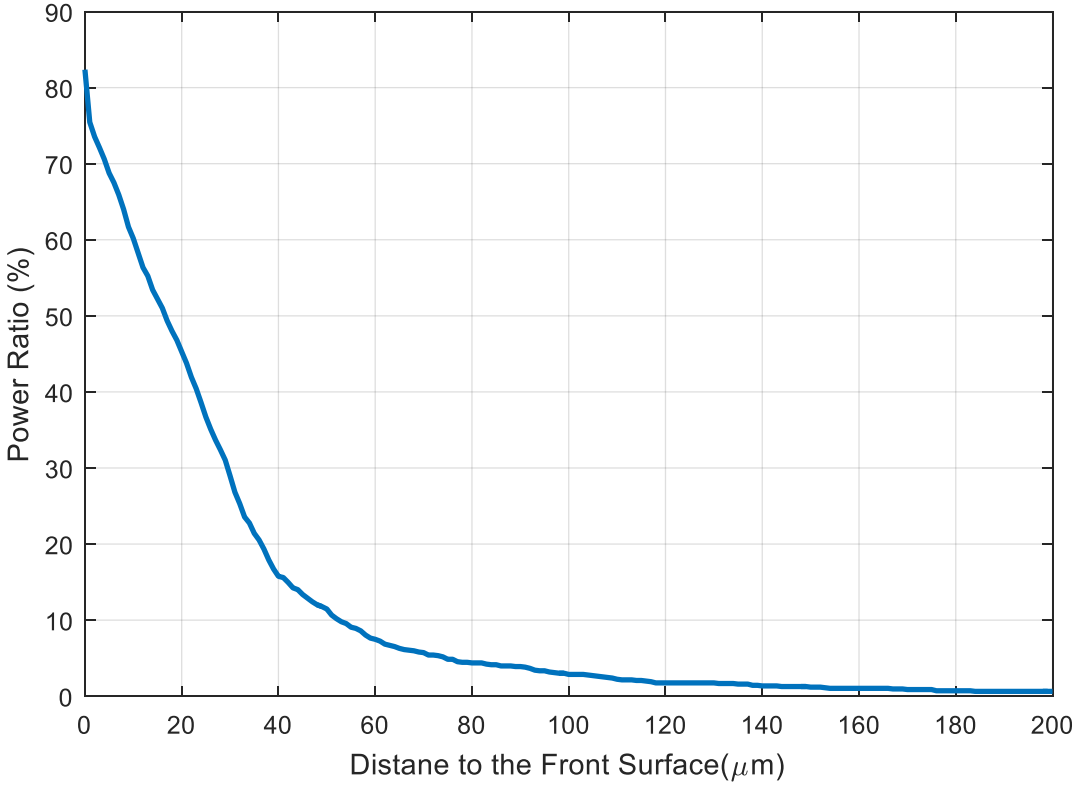
yaklaştırılmasının daha uygun olabileceği değerlendirilmiştir. Bu yöntem membran ve fiber optik uç arasındaki mesafenin daha geniş aralıkta ve 500 μm'den daha kısa mesafelerde değiştirilebilmesine imkan vermektedir. Konseptin temel amacı, farklı kurulumlarda benzer güç oranlarını yakalayarak farklı alt taş kalınlıklarını simüle edebilmektir. Bu sayede farklı alt taş kalınlıkları çipler tekrar üretime gönderilmeden, üretim sonrası işlemlerden geçmeden ve tedarik zamanını kaybedilmeden simüle edilebilecektir.

Şekil 6.7'de gösterilen bu tip topoloji kullanılarak, yaklaşık olarak ±10 nm olarak ölçülen membran sapmasının, MEMS mikrofonunun membranın hareketini engellemeden ölçülebileceği öngörülmektedir. MEMS mikrofonunun ön yüzeyi ile fiber ucu arasındaki mesafe değiştirilerek, istenilen kalınlıktaki ulaşılmak istenen eşdeğer güç mesafesi aranır. İstenilen mesafe, güç oranının % 32,83 civarında olduğu yerdedir. Fiber optik ucun MEMS mikrofonunun arka yüzeyine bitişik olduğu durumda elde edilen güç oranı Şekil 6.7'de gösterilen simülasyon düzeneği ile eşitlenmeye çalışılmaktadır.



Şekil 6.7. Eşdeğer mesafe kavramı için oluşturulan simülasyon kurulumu.

Simülasyon 0 μm ila 1000 μm arası mesafelerde gerçekleştirilmiştir. 50 μm alt taş kalınlığı için elde edilen güç oranı %32.83'tür. % 32,83'lük güç oranı "eşdeğer mesafe" göz önünde bulundurularak elde edilmek istendiğinde fiber optik ucun MEMS mikrofonun ön yüzeyine olan uzaklığının 28 μm olması gerekmektedir. Membranın hareketi fiber optik uca doğru azami olarak 10 nm olarak beklendiği için, fiber uç membranın hareketini 28 μm mesafeden etkilememektedir. Bu sayede membranın hareketini, ölçümün ve çipin sağlığını etkilemeden ölçüm yapılabilecektir.



Şekil 6.8. MEMS mikrofonunun ön yüzeyine olan mesafe vs güç oranı.

Yapılan simülasyonlar sonucunda alt taş kalınlığının asgari düzeyde azaltılması gerektiği öğrenilmiştir. Ancak bu durum çip sağlığı göz önünde bulundurulduğunda sağlıklı görünmemektedir. Ayrıca çip ile fiber optik ucun kaynaştırılmamış olması sebebiyle fiber optik uç ile alt taş arka yüzeyi arasındaki en uygun mesafe aranmıştır. Bu topoloji üzerinde yapılan simülasyon ise fiber optik uç ile alt taş arka yüzeri arasındaki mesafenin asgari düzeyde tutulması gerektiği çıkartılmıştır.

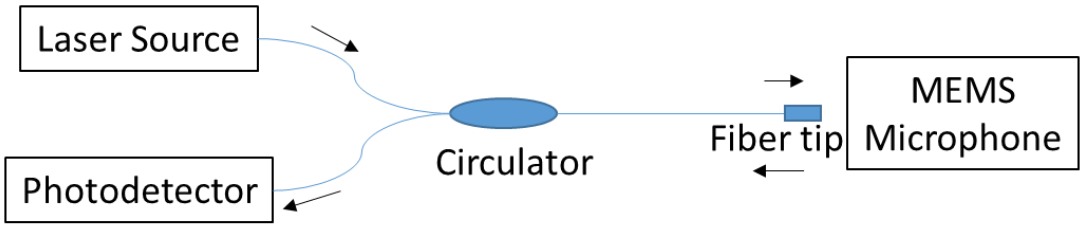
Alt taş kalınlığının indirilememesi farklı topolojilerle benzer güç oranlarının elde edilmek istenmesine yol açmıştır. Bu sebeple “eşdeğer mesafe” kavramı geliştirilerek çip üzerinde bulunan membranın hareketi engellenmeden ölçüm alınıp alınamayacağı araştırılmak istenmiştir. Yapılan simülasyon çalışmaları fiber optik uç ile çipin ön yüzeyi arasındaki mesafenin 28 μm olarak ayarlandığında 50 μm alt taş kalınlığına sahip çipden elde edilebilecek güç oranın elde edilebileceğini göstermektedir.

Bu yöntem ile farklı alt taş kalınlıkları değerlendirilebilmekte olup var olan membran yapıları ve alt taş kalınlıklarının çeşitli kombinasyonlarının sonuçlarının tahmin edilebilmesine de

imkan verecektir. Aynı işlemle üretilmiş olan farklı membran yapısına sahip çipler simülasyon parametreleri ve 3B modelleri düzenlendikten sonra güç oranları hesaplanabilecektir. Farklı alt taş kalınlıklarının yanı sıra üretim yöntemi değiştirilmek istenirse yine 3B model ve fiziksel parametreler değiştirilerek farklı üretim yöntemleriyle elde edilebilecek sonuçlar tahmin edilebilecektir. Bu sayede çip üretimi yapılmadan önce çiplerin istenilen davranışa sahip olup olmadığı değerlendirilebilecektir. Simülasyonlar sayesinde deney zamanının kısalması, tedarik sürecine gerek kalmaması ve üretim dönemlerinin beklenmeye gerek kalmaması gibi zaman kazanımları gerçekleştirilebilecektir. Ek olarak zorunlu durumlarda başvurulan deneme yanılma amaçlı yapılan üretim maliyetlerinin bertaraf edilmesi de mümkün kılınabilecektir. Genel olarak bakıldığında simülasyonlar ile zaman, para ve işçilik kazanımı sağlanabilecektir.

6.2. Optik Algılama Sisteminin Kurulumu

Ölçüm sisteminin optik kısmı lazer diyot, dondürücü, fiber optik kablo, MEMS mikrofon ve fotodedektörden oluşmaktadır. Ölçüm sisteminin optik kısmını temsil eden şema Şekil 6.9'da gösterilmiştir. Lazer diyot, döndürücüye yönlendirilmiş lazer demetleri üretmektedir. Döndürücü, lazer diyottan gelen ışın demetlerini MEMS mikrofona doğru yönlendiriken MEMS mikronun altın kaplı membranından yansıyan ışın demetlerini fotodedektöre yönlendirmekle sorumludur. Fiber optik kablodan geçen ışın demetleri fiber ucuna ulaşır. Burada fiberden çıkan ışın alt taşın arka yüzeyinden yansıdığı gibi alt taştan ışın demeti membrana kadar ilerler. Bu yol sırasında bir çok katmandan geçerken yansıyan ışık en çok membrandan yansıyarak geri fiber optik uca döner. Geri dönen ışık demetlerinin bir kısmı optik fiberin çekirdek kısmına ulaşmaktadır. Çekirdek yerine kaplama kısmına ulaşan ışın demetleri hızlıca emildiğinden dolayı foto dedektöre kadar ilerleyemezler. Fiber optik kablonun çekirdek kısmına gelen ışınlar az miktarda emilim ile fotodedektöre kadar ilerlemektedir. Fotodedektöre ulaşan ışın demetleri elektriksel sinyallere dönüştürülerek ölçülmektedir. Ölçüm sisteminin optik kısmının genel çalışma prensibi bu şekilde özetlenebilmektedir. Sistemin çalışma prensibi kavramsallaştırıladıktan sonra, optik parça elemanlarının özellikleri ve uyumluluğu ölçümün sağlıklı yapılabilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, sistemi oluşturan elemanların önemli özellikleri ve elemanların uyumlandırılması aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir.

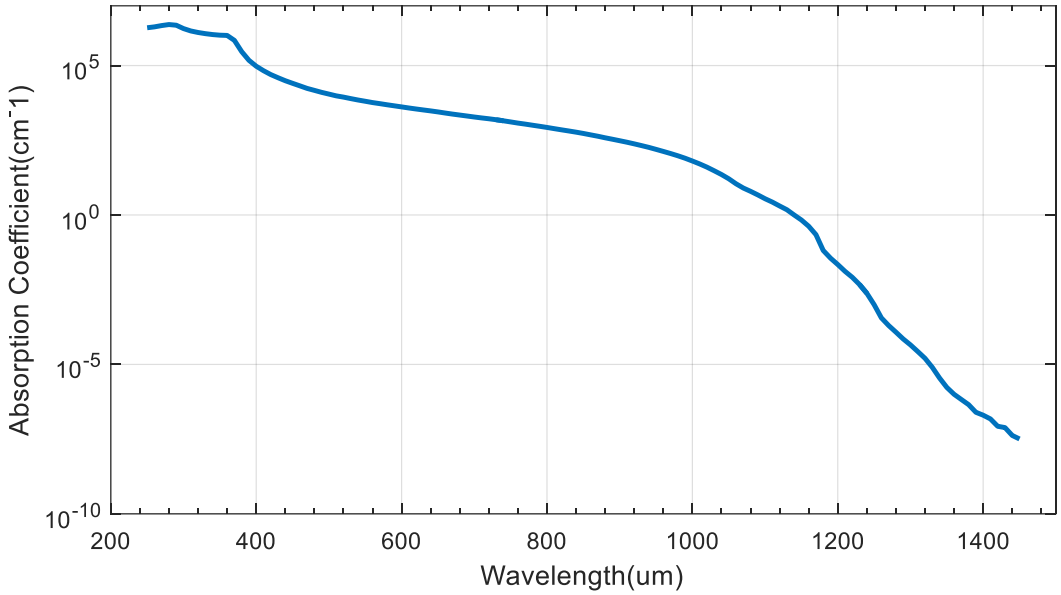


Şekil 6.9. Ölçüm sisteminin optik kısmının şeması.

Işık kaynağı olarak lazer kullanılmaktadır. Işın demeti fotodedektörde ışın yoğunluğunun miktarı olarak ölçüleceği için membrandan yansıyarak dönendalga boyuna sahip olduklarından dolayı girişim oluşturacaktır. Girişimin oluşması için girişen dalgaların aynı dalgaboyuna sahip olması gerekmektedir. Girişimin sonucu olarak oluşan tepe ve çukur bölgeleri temel olarak ışın demetlerinin faz farkından dolayı değişmektedir. Bu sayede faz farkına dair bilgiye sahip olunarak membranın titreşimi algılanabilir. Bu nedenle, mümkün olduğu kadar dar aralıkta ışın demetleri üretebilecek bir ışık kaynağı olarak lazer diyot seçilmiştir. Üretilen dalga boyu aralığı genişledikçe fotodedektör diğer dalga boyundaki ışın demetlerine de tepki verdiğinden dolayı gürültü zemini yükselecek ve sinyal-gürültü oranı düşecektir. Fotodedektörün özellikleri aşağıda daha ayrıntılı şekilde açıklanmıştır.

Lazer diyodun çalışma dalga boyu 1310 nm olarak seçilmiştir. Bunun sebebi olarak fiber optik kablolarda az kayıp noktalarından birisi olması (diğeri ise 1550 nm'dir) ve diğeri ise optik sinyalin iletimi sırasında en düşük saçılım kayıplarını en aza indirgemesidir. Ayrıca yüksek güçlerde fiber optik kablo üzerinden gönderilen sinyallerin davranışı değiştiğinden lazer diyodun gücü azami 100 mW olarak seçilmiştir. MEMS mikrofonunun en kalın katmanı olarak yaklaşık 500 µm kalınlığında olan alt taş katmanının malzemesi silisyumdur. Gönderilen ve geri yansıyan ışık demetlerinin alt taş katmanından geçmesi sebebiyle en çok emilim bu katmanda gerçekleşmektedir. Bu nedenle fotodedektör, alt taş tabakası tarafından iki kez emilime maruz kalan ışık demetlerini alır. Şekil 6.10'da silisyumun dalga boyuna göre emilim katsayısı grafiği verilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi 980 nm'de 95.9 cm^{-1} emilim katsayısına ve 1310 nm'de 2.7x 10^{-5} cm^{-1} emme katsayısına sahiptir. Her iki dalga boyu lazer kaynaklarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Görüldüğü gibi, 1310 nm dalga boyunda lazer kaynağı kullanılırsa, Si'deki emilim büyük miktarda indirgenmektedir. 1550 nm'nin 1310 nm dalgaboyuna göre daha az emilim sağlamasına rağmen seçilmemesinin sebebi ise 1310 nm dalga boyunda en az saçılımın sağlanabilmesidir. Döndürücü ve fotodedektör bu dalga boyuna göre seçilerek sisteme dahil

edilmiştir. Optik elemanların bu dalga boyuna göre seçilmesine ek olarak simülasyonlar yine 1310 nm'ye göre koşturulmuştur.



Şekil 6.10. Si için emilim katsayısı ile dalga boyu grafiği.

Fiberin optik kablonun ucu, Şekil 6.11'de gösterilen T-Cube DC Servo Kontrolörleri ve 3 Z825B Motorlu Aktüatörlere (ThorLabs, New Jersey, ABD) takılır ve monte edilir. Her motorlu aktüatör, fiber ucunun hassas pozisyonlandırılması için X, Y ve Z eksenlerinde bağımsız olarak hareket edebilen tablalara bağlanmaktadır. Aktüatörler 29 nm konumlandırma hassasiyetine ve 25 mm hareket uzunluğuna sahiptir. MEMS mikrofonunun membranın boyutu, optik fiber kalınlığı ile karşılaştırılabildiğinden, membranın merkezi ile optik fiberin çekirdeği arasındaki hizalama için fiber ucunun hassas konumlandırılması gerekmektedir. Aktüatörlerin hassas konumlandırma özelliği **6.1.4. Eşdeğer Mesafe Kavramı** bölümünde anlatılan deney düzeneğinin gerçeklenmesini sağlayabilecek düzeydedir.



Şekil 6.11. T-Cube DC Servo Kontrolörler (solda) ve Z825B Motorlu Aktüatörler (sağda).

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, Şekil 6.12'de gösterilen Ge fotodedektör (ThorLabs PDA50B2) ölçüm sisteminin algılama kısmı için kullanılmaktadır. PDA50B2, kullanıcının kazancını 10 dB adımlarla değiştirebilmesine olanak tanıyan ve 800 ile 1800 nm arasında değişen dalga boyundaki ışın demetlerinin tespiti için tasarlanmış sekiz pozisyonlu kazanç anahtarına sahip bir fotodedektördür. Fotodedektörün görünümü Şekil 6.12'de ve genel özellikleri Tablo 6.2'de verilmiştir. Sirkülatörün dönen elyafı fotodedektöre bağlıdır.

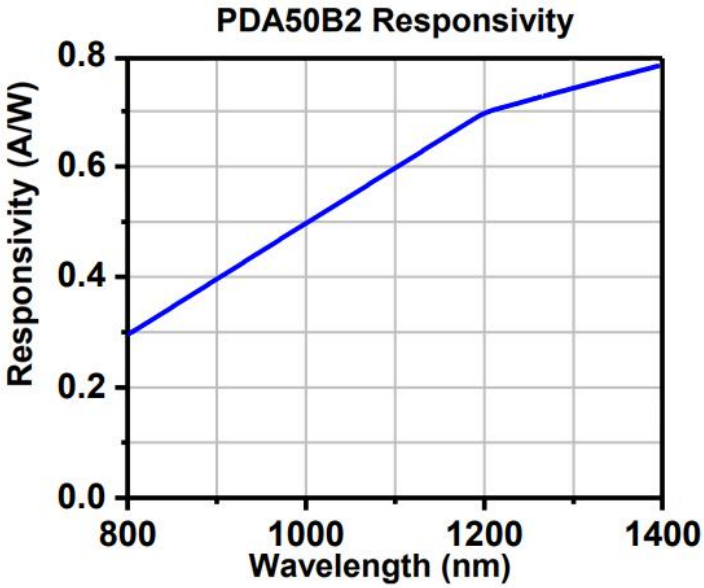


Şekil 6.12. ThorLabs PDA50B2.

Tablo 6.2. Ge Dedektörü genel özellikleri.

Aktif Alan	Ø5.0 mm (19.6 mm^2)
Dalga Boyu Aralığı	800 - 1800 nm
Tepe Dalga boyu	1550 nm (Typ.)
Pik Tepkisellik	0.85 A/W (Typ.)
Amplifikatör Kazanç Aralığı (İng. Gain Bandwidth)	25 MHz
Maksimum Çıkış Akımı	100 mA
Kazanç Ayar Aralığı	0 dB to 70 dB
Çıkış Gerilimi	0 to 5 V (50 Ω)

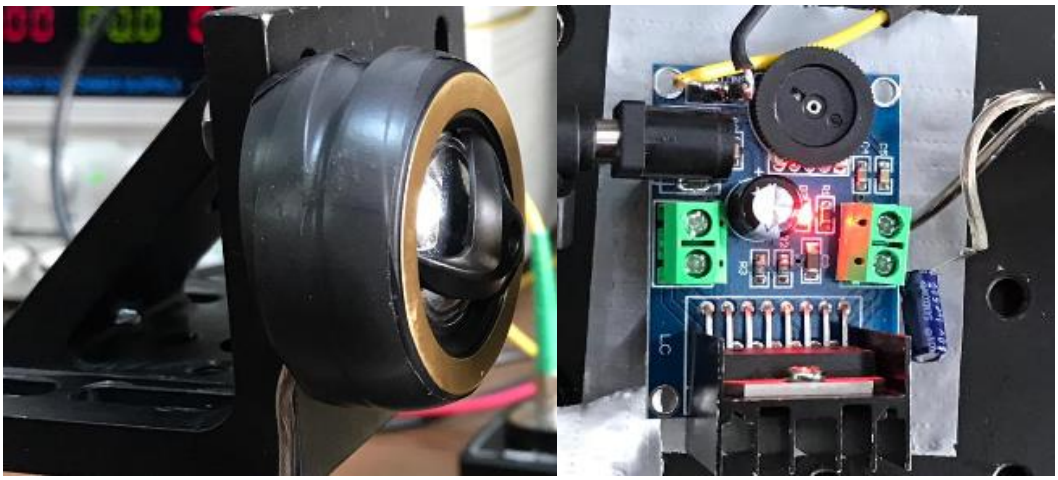
Tablo 6.2'de belirtildiği gibi, fotodetektörün ön yükselticisinin kazanç bant genişliği 25 MHz'dir. Ancak, kazanç arttıkça bant genişliği azalmaktadır. Ölçüm sırasında, algılanan sinyal, bant genişliğinden daha yüksek frekans bileşenleri içerebilirmektedir. Örneğin; bant genişliği 50 dB kazançta 2 kHz'e düşmektedir. Bu sebeple duyulabilir frekans aralığının önemli bir kısmı algılanmayabilir. Ayrıca, yüksek frekanslarda MEMS mikrofonun karakterizasyonu için veri toplamak, kilitleme amplifikatörü (İng. Lock-in amplifier) olmadan çok zorlaşmaktadır. MEMS mikrofonunu yüksek frekanslarda karakterize edebilmek ve düşük frekanslarda daha kolay karakterize etmek için kilitleme amplifikatörü (Stanford Research Systems SR850) ölçüm sistemine dahil edilmiştir.



Şekil 6.13. Ge dedektörün tepkisellik grafiği.

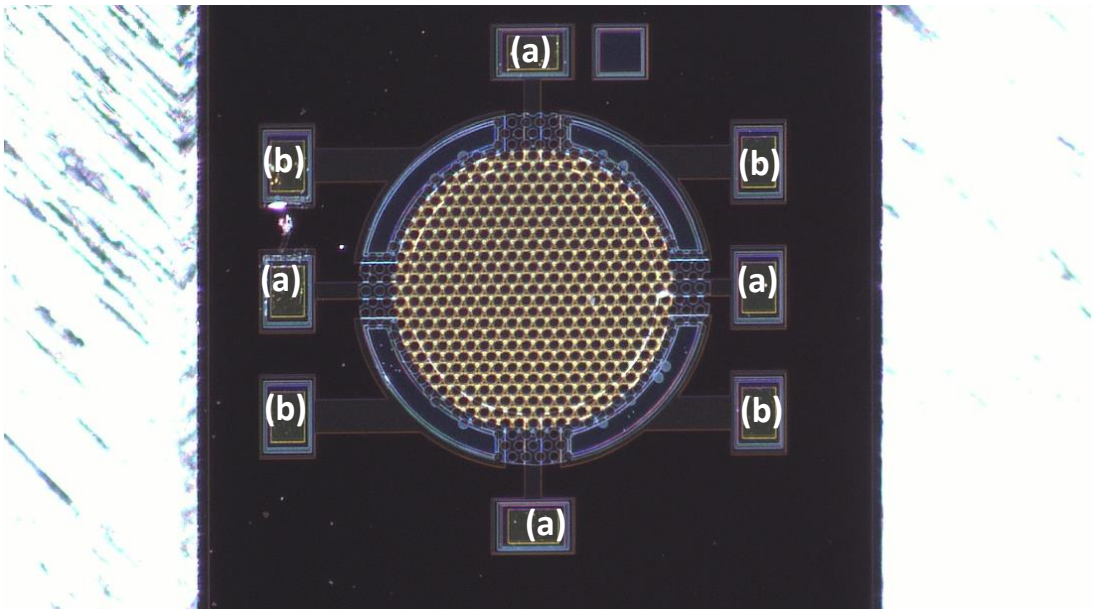
Çalışma dalga boyu olan 1310 nm fotodetektör tarafında 980 nm kullanımına göre daha büyük bir avantaja sahiptir. Şekil 6.13'te, dedektörün tepkisellik grafiği gösterilmektedir. 1310 nm dalga boyunda tepkisellik yaklaşık olarak 0.76 A / W iken, 980 nm dalga boyunda tepkisellik 0.48 A / W'dir. PDA50B2 fotodetektörü ile birlikte 980 nm lazer kaynağının kullanılması, 1310 nm ışık kaynağının kullanılmasına göre algılanan ışık yoğunluğunda % 37'lik bir kayba neden olmaktadır. Zayıflama ve düşük tepkisellikten muzdarip olmak yerine, 1310 nm dalga boyunda işlem, düşük emilim ve tepe duyarlılığına yakın olan duyarlılığı olan ölçüm sistemi için en uygun çözümü sağlamaktadır. Özetlemek gerekirse, sistemin optik kısmı temel olarak ölçümü önemli ölçüde etkilemeyecek, ancak tüm sistemin yapımı için mümkün olan düşük zayıflama, soğurma ve tepkisellik değerlerini elde etmeye odaklanmıştır. Ölçüm sisteminin optik kısmının yanında elektriksel kısmı da ayrı bir öneme sahiptir.

Ölçüm sisteminin elektriksel kısmı bir hoparlör, dalga formu üreteci, bir çip taşıyıcısı ve kilitleme amplifikatöründen oluşur. Ticari örneklerinden farklı olan hoparlör, MEMS mikrofona yaygın hoparlörden farklı olarak daha geniş frekans bant aralığında (10 - 18 kHz) ses sağlamak için kullanılır. Hoparlör, Agilent 33220A Dalga Formu üretecinden sinyal girişlerini alan sürüş devresi ile tahrik edilir. Dalga formu üretecinden çıkan BNC kablosu, sürüş devresine lehim ile bağlanmaktadır. Sürücü devresi Şekil 6.14'te gösterilmiştir.

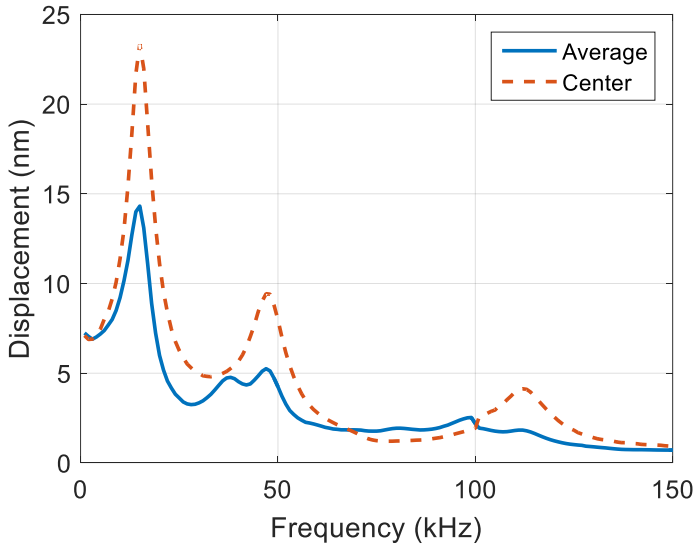


Şekil 6.14. Hoparlör (solda) ve hoparlörün sürüş devresi (sağda).

Çip taşıyıcı, MEMS mikrofonunu hareketsiz hale getirmek ve çipe gerilim eğimlemesi uygulamak için tasarlanmış ve üretilmiştir. MEMS mikrofon, çip taşıyıcı üzerine lehimlenmiştir ve lehimlenen kısım 4 ayrı toprak hattıyla topraklanmıştır. BNC konnektörleri yerine, eğimleme gerilimini taşımak için SMA tipi konnektörler kullanılmıştır. SMA konektörleri, çipe, çok sayıda toprak hattı ve çoklu kablo ile düşük seri direnç sağlar. Düşük seri direnç, eğimleme geriliminin düzgün aktarılması ve gürültünün azaltılması için önemlidir. Çip alt taştan özelleştirilmiş bağlantılarla dış dünyaya açılan yukarı, aşağı, sol ve sağ pedlerinden alınan wirebond hatlarıyla topraklanır. Toprak hattının ayrıca, eğimleme gerilimi uygulaması için ayrılan çip üzerinde 4 ped vardır. Şekil 6.15'te, eğimleme gerilimi için pedler (b) ile ve topraklama pedleri (a) ile gösterilmiştir.



Şekil 6.15 MEMS mikrofonun eğimleme ve topraklama pedleri ile birlikte ön yüzey görünümü.



Şekil 6.16 Kullanılan MEMS mikrofonun laser vibrometre ölçümleri.

Çipin karakteristiği lazer vibrometre ölçüm sistemi ile elde edilir. Ölçüm sırasında mikrofonun zarı sürekli olarak hareketlendirilir ve zarın yer değiştirmesi çip üzerindeki çeşitli noktalarda ölçülür. Mikrofonun merkezi en çok sapan kısım olduğu için ve fiber optik uç mikrofonun membranın merkezine odaklandığından, lazer vibrometre ölçümünün merkezinin verileri ölçülmüştür. Veriler Şekil 6.16'da gösterilmiştir. Verilere göre membranın ilk rezonans

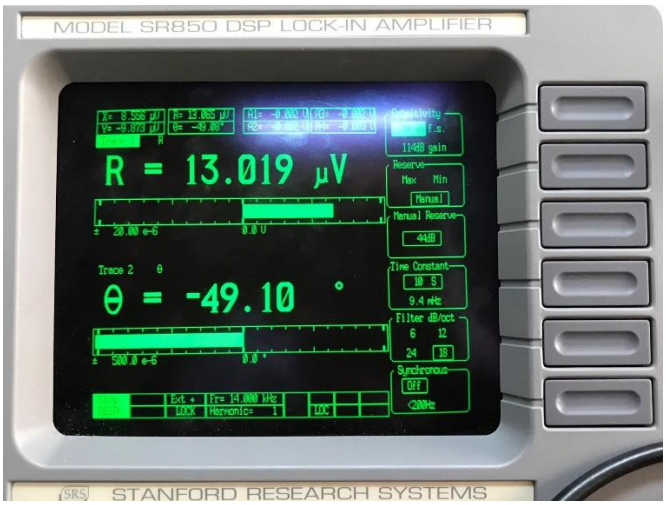
frekansı 15 kHz'dir. İlk rezonans frekansında, membran merkezinin yer değiştirmesi maksimum değerine ulaşmaktadır.

Kalibrasyon ve deney sırasında, fotodetektörün çıktısı T konektörle ikiye ayrılarak bir ucu kilitleme yükseltgeci ve bir ucu osiloskop tarafından kullanılmak dağıtılmaktadır. Osiloskopa fotodedektörden ulaşan sinyal 0 V ila 5 V arasında değişen analog sinyaldir. Bu durum fotodedektörün 0 dB kazanımla kullanıldığı zaman geçerlidir. Kazanım artırıldığında bu genlik artmaktadır. Ancak bu durum kilitleme ampfilikatörü tarafından hiçbir problem teşkil etmemektedir. Kilitleme ampfilikatörü frekans spektrumunda sadece 1 frekansa odalandığı için diğer frekanslara ait genlik ve ofset değerleri ilgili frekansta yapılan ölçümü etkilememektedir.

Kilitleme ampfilikatörünün işlevine benzer olarak osiloskop üzerinden, elektrik sinyalinin frekans bileşenlerini ayırt etmeye yardımcı olan Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) özelliği kullanılmaktadır. FFT, kalibrasyon ve deney sırasında ilgilenilen frekanstaki sinyalin artış olup olmadığını görselleştirmek amacıyla faydalı olmaktadır.

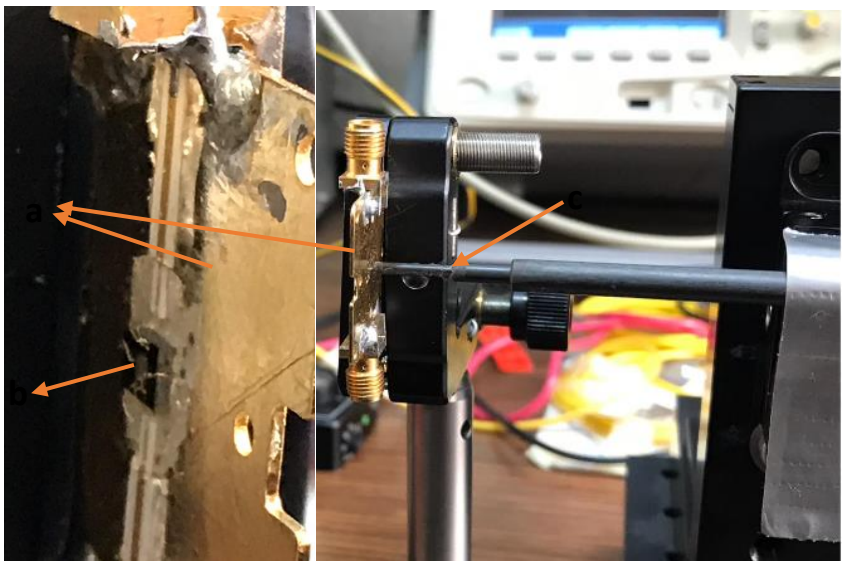
Gelen ışık huzmeleri, fiberin çekirdeğinin içinde girişim deseni oluşturur. Böylece, ışık yoğunluğu ışığın fazına bağlı olarak değişmektedir. Işık huzmeleri arasındaki faz farkı, akustik basıncın veya dalgaların değişmesine bağlı olduğundan, foto algılayıcının çıktısı, akustik basıncın değişimini göstermektedir. Böylece, uygulanan ses dalgalarının frekans bileşenleri FFT aracılığıyla gözlenir. Bu ön gözlem sayesinde sistemde problem olup olmadığı, osiloskopa ulaşan sinyalde var ise gürültü, gürültü tipi veya hangi frekans spektrumuna sahip olup olmadığı incelenerek sistemin kalibrasyonu bu duruma göre yapılabilmektedir.

Fotodedektörün kazancının artırıldıkça kazanç bantgenişliği çarpımının sabit kalmasından dolayı gözlemlenebilcek frekans bant genişliği düşmektedir. Bu sebeple 70 dB'ye kadar artırılabilen kazanç değeri 30 dB'ye kadar artırılmıştır. 30 dB kazanç değerinde bant genişliği 22 kHz'tir. Daha yüksek kazançlarda bantgenişliği duyulabilir frekans aralığının altına düştüğü için duyulabilir frekans aralığını kaybetmemek adına 30 dB'den yukarıya yükseltilmemiştir. Ölçümleri yüksek hassasiyetle inceleyebilmek adına Stanford Research Systems firmasına ait SR850 model numaralı kilitleme ampfilikatörü kullanılmıştır. Şekil 6.17'de kullanılan kilitleme ampfilikatörünün ekran görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 6.17. Stanford Research Systems SR850 kilitleme ampfilikatörü.

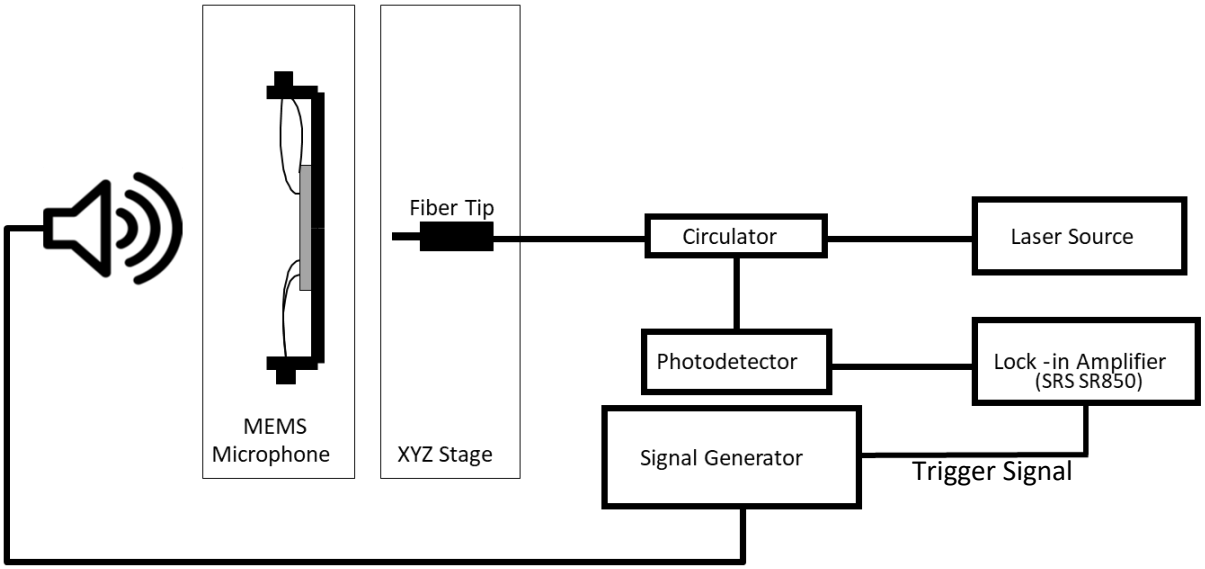
Şekil 6.18'de üretilmiş çip taşıyıcısı (a) ile gösterilmiştir. Çip taşıyıcısına sabitlenmiş MEMS mikrofon ise (b) ile gösterilmiştir. (c) ile MEMS mikrofonun arkasına gelecek şekilde yerleştirilmiş olan fiber optik uç gösterilmiştir. Ölçümlerin detayı sonraki bölüm olan 6.4 Optik Algılama Sisteminin Kurulumunun Tamamlanması bölümünde aktarılmıştır.



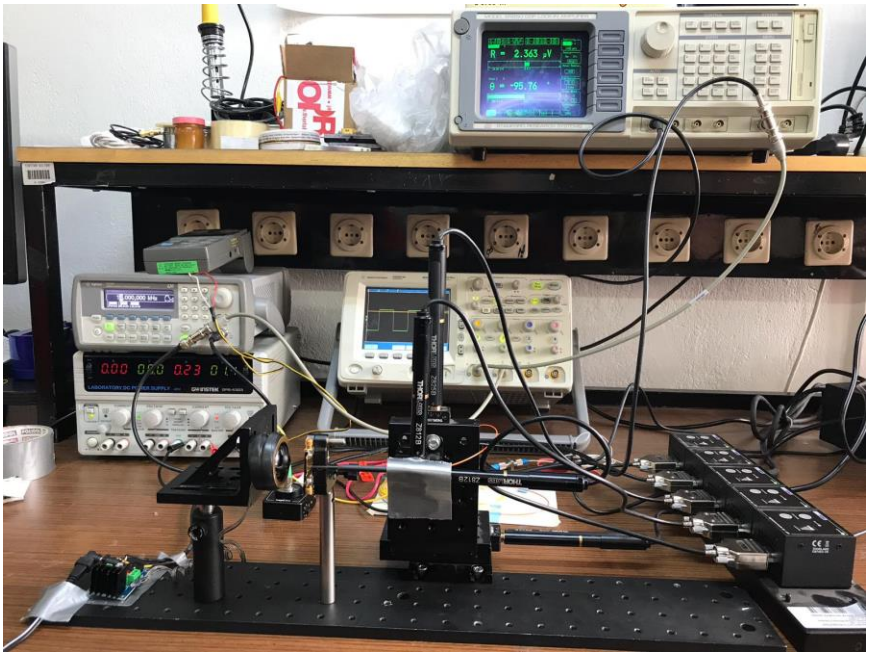
Şekil 6.18. MEMS mikrofonu ile çip taşıyıcı (solda) ve XYZ hareket tablasına monte edilmiş sivriltilmiş fiber ucu (sağda).

6.3 Optik Algılama Sisteminin Kurulumunun Tamamlanması

Ölçüm sistemi yukarıda belirtilen bileşenlerle tamamlanıp çalıştırılmıştır. Şekil 6.19'da tüm sistemin şeması verilmiştir. Şekil 6.20'de kurulan ölçüm sistemi gösterilmektedir. Optik ve elektriksel kısımlar birleştirilerek başarıyla ölçüm alınmıştır.

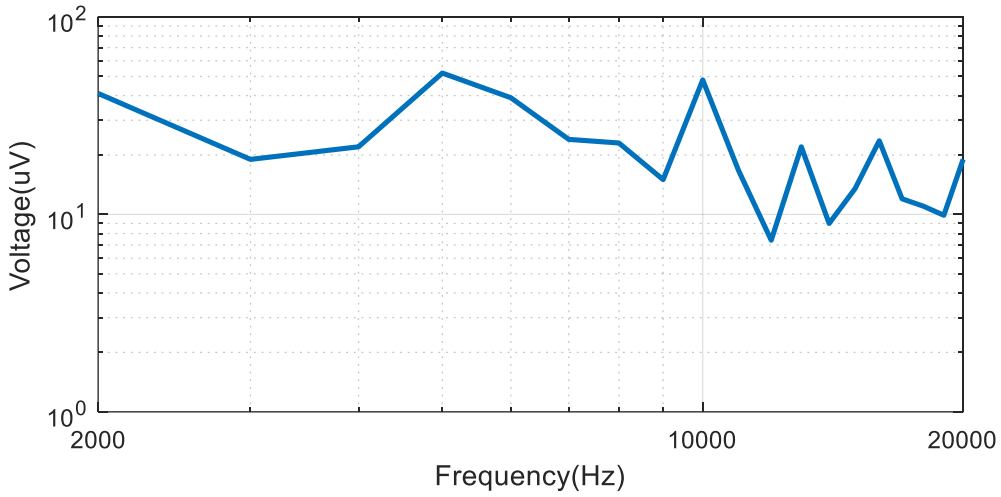


Şekil 6.19. Ölçüm sisteminin şeması.



Şekil 6.20. Ölçüm sisteminin fiziksel olarak kurulumu.

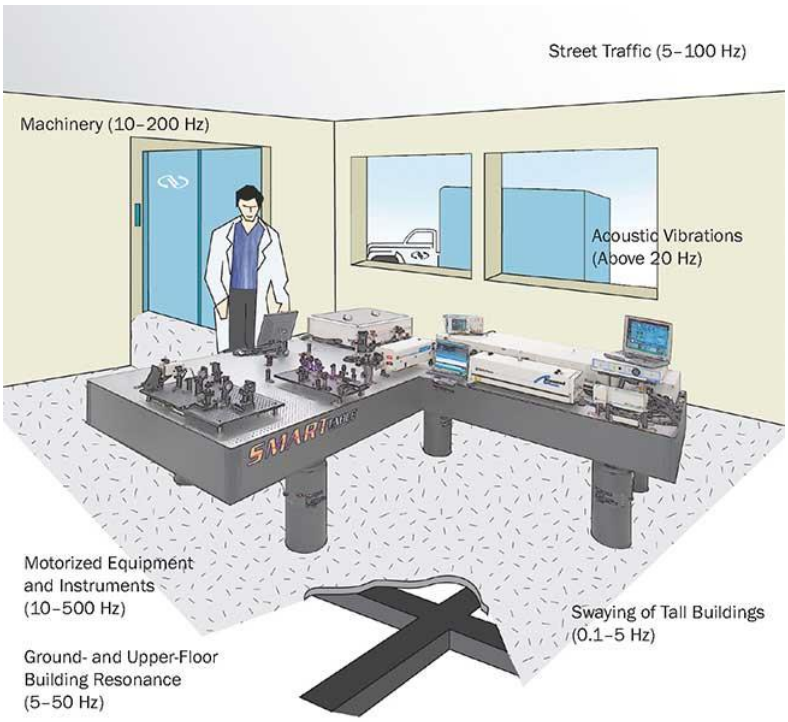
Bölüm 6.2'de kilit amplifikatörün kullanım amacından bahsedilmiştir. Fotodedektörü düşük kazançlı kullanma zorunluluğunun yanı sıra, ölçüm sisteminin düşük sinyal gürültü oranı nedeniyle kilitleme amplifikatörü kullanılmıştır. Her ne kadar hoparlör yüksek frekanslar için özelleştirilmiş olsa da hoparlörün 2 kHz'ten düşük frekanslar için tepkiselliği diğer frekanslara göre az olduğundan dolayı, 2 kHz frekans altında veri toplanmamıştır. Ölçümler başarıyla 2 kHz'den 20 kHz'e kadar 1 kHz adımla yapılmıştır. Alınan ölçümler mikrofonun ilk rezonans frekansının altında olduğundan, gerilim tepkisinin sabit olması beklenmektedir. Şekil 6.20'de gösterildiği gibi ölçümlerde çeşitli zirveler gözlenmiştir. MEMS mikrofon ve fiber uç arasındaki bağlantı veriminin azalmasına bağlı olarak gürültü sebebiyle dalgalanmalar ve gerilim düşüşleri gözlemlenebilmektedir. Buna bağlı olarak ölçümleri geliştirmek ve daha geniş aralıkta hareketlendirebilmek adına ölçüm methodu geliştirilmiştir. Mikrofonun membranın 2 kHz ile 20 kHz arasında daha geniş aralıkta hareketlendirmek için membran hoparlör ile hareketlendirmekten farklı bir yöntem kullanılmıştır. Kullanılan yöntem Bölüm 6.3.2 Gerilim Uygulanarak Membranın Hareketlendirilmesi sunulmaktadır. Olası gürültü tipleri ve kaynakları Bölüm 6.3.1 Gürültü Analizi'nde incelenmiştir.



Şekil 6.21. Ölçüm sistemiyle MEMS mikrofondan alınan gerilim ölçümleri.

6.3.1. Gürültü Analizi

Ölçüm sistemi göz önünde bulundurulduğunda, gürültünün iki ana kaynağı vardır. Bunlar titreşimli ve elektrikli seslerdir. Foton gürültüsü ve termal gürültü gibi diğer gürültü parametreleri, ölçüm üzerindeki etkileri göz ardı edilebileceğinden dikkate alınmamıştır. Sistemi etkileyebilecek elektriksel faktörler nedeniyle ortaya çıkan gürültü, birbirine yakın birden fazla ölçüm cihazının bulunmasından kaynaklanan elektromanyetik girişm, ölçüm cihazlarının toprak hattı seviyesini etkileyebilecek AC güç hattı gürültüsü ve ölçüm cihazlarının fanlarından kaynaklanan 60 Hz titreşimlerinden kaynaklanmaktadır. AC güç hattı gürültüsü, gücü veya fotodedektörün güç hattı ve fotodetektörden kilitlenen amplifikatöre sinyal taşıyan kablo gibi ölçüm hatlarını etkileyebilir. Korumalı koaksiyel kablo, fotodetektörden kilitleme amplifiliktörüne sinyal taşırken kullanıldığından, AC güç hattı gürültüsü önemli bir gürültü faktörü olarak kabul edilmemektedir. Çünkü sinyal taşıyan kablolar ya koaksiyel ya da fiber optik kablolar olduğundan dolayı ölçüm cihazlarının yaratacağı elektromanyetik dalgaların sistemi büyük oranda etkilememesi beklenmektedir. 60 Hz AC güç hattı ile çalışan bileşenlerden kaynaklanan titreşim gürültüsü, DC güç kaynağı, sinyal üreteci, kilitleme amplifikatörü, bilgisayar, fotodetektörün güç kaynağı ve ayrıca laborauvarda vakum pompası gibi AC güç hattı ile çalışan cihazlardan kaynaklanmaktadır. Titreşim kaynaklarının etkisi, cihazlardan birinin başka bir masaya taşınması veya birinin kapatılması ile kontrol edilmiştir. Ölçüm stabilitesinde ve gürültü faktörlerinde iyileşmeler gözlenmiştir.



Şekil 6.22 Çeşitli ortam titreşim kaynakları.

Şekil 6.21'de gösterildiği gibi, kontrol edilemeyen ve ölçümlere etki edebilecek çeşitli titreşimsel gürültü kaynakları vardır. Şekil 6.18'de, fiber uç çip taşıyıcısının arkasına doğru uzatılmıştır. Kullanılan masa metal ayaklara ve ahşap tablaya sahip olduğundan ölçüm cihazları tarafından oluşturulan titreşimleri metal fiksatöre ve XYZ hareketli tablasına iletilmektedir. Titreşim, fiber uç boyunca ilerlemektedir ve fiber uç XYZ hareketli tablasından uzatıldığı için etkisi artarak fiber uca ulaşmaktadır. MEMS mikrofonun 36 µm delikleri ve 1 mm'lik membran çapı olduğundan dolayı fiber ucuyla titreşimden dolayı yanlış hizalanmaya meyillidir. Şekil 6.18'de gösterilen çip taşıyıcısının, teleskopik taşıyıcı ile güçlendirilmiş fiber ucu yerleştirmek için deliğe sahip olmasına rağmen, fiber ucundaki titreşimlerin önlenebileceği kesin değildir. Bu nedenle, fiber ucu fiksatörü masadan ayrılmalıdır.

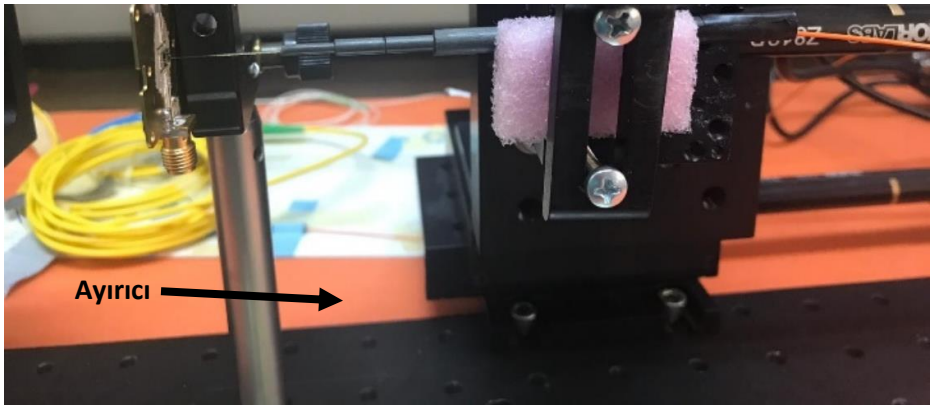
Ayırıcı malzeme, 50 ve 60 Hz'de doğal frekanslarına sahip modlara sahip olmamalıdır. Eğer bu modlara sahip malzeme kullanılırsa titreşimlerin sistemde sönümlenmesi yerine sistemi titreşim halinde tutulmasına sebep olacaktır. Modal analizi yapılmış ticari izolasyon malzemesi araştırılmıştır. Binada izolasyon amaçlı kullanılan poliüretan köpük, kolay ulaşılabilir bir malzemedir. Malzemenin modal analizi, 60 Hz titreşimsel gürültünün bastırılması için uygun

özellikler gösterir çünkü 50 Hz ve 60 Hz, aşağıda listelenen doğal frekanslarla çakışmamaktadır. Poliüretan köpüğün modal analizi Tablo 6.3'te gösterilmektedir.

Tablo 6.3. 36 mm kalınlığındaki poliüretan köpük için deney sonucu elde edilmiş doğal frekanslar (Grosh ve Littrell, 2013).

Mod	36 mm Poliüretan Köpük
	Doğal Frekans (Hz)
1	42,59
2	54,21
3	69,43
4	78,52
5	88.56

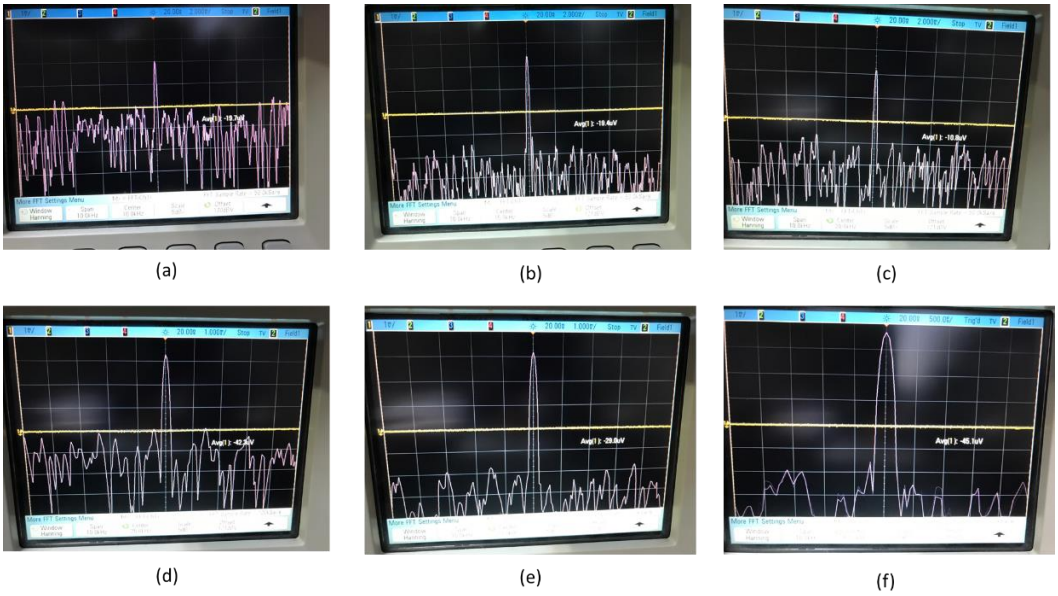
Ayırıcı hazırlandıktan sonra poliüreten köpüğün üzerinde fazladan daha ince bir köpük katmanı eklenmiştir. Ayırıcı, Şekil 6.23'de gösterilen çip taşıyıcısının, fiber optik kablo fiksatörünün ve XYZ hareketli tablasına yerleştirilmiştir.



Şekil 6.23. Çip taşıyıcı ve XYZ hareketli tablasının altına yerleştirilen ayırıcı.

6.3.2. Gerilim Uygulanarak Membranın Hareketlendirilmesi

MEMS mikrofonunun tasarımı, membrana eğimleme gerilimi uygulamak için pedler içermektedir. Mikrofona eğimleme gerilimi uygulanarak, hava aralığı mesafesi değiştirilebilmektedir. Membranın davranışı uygulanan eğimleme geriliminin türüyle birlikte değişmektedir. Membran, yalnızca DC eğimleme gerilimi uygulandığında daha kısa hava aralığı mesafesine sabitlenmektedir. AC ve DC eğimleme gerilimi birlikte uygulanarak hava aralığı mesafesi kontrol edilebilmektedir ve membran AC eğimleme gerilim ile uyarılarak AC eğimleme geriliminin uygulama frekansıyla titreşmesi sağlanabilmektedir. Deneysel olarak difayramın uyarılması, Şekil 6.24'de gösterilmektedir. DC ve AC eğimleme geriliminin MEMS mikrofona uygulanabilirliğini doğrulamak için, 10 kHz ila 50 kHz aralığında değişen 6 farklı frekansta 0.5 V DC ve 0.5 Vpp AC eğimleme gerilimi uygulanmıştır. Membrana eğimleme gerilimi uygulandıktan sonra, sapmayı ölçmek için fiber uç zarın yakınına yerleştirilir. Optik ölçüm sisteminin çalışma prensibine benzer şekilde, fiber ucu yansıyan ışığı toplar ve fotodedektöre iletir. Fotodedektör, ışığı osiloskopa beslenen elektrik sinyallerine dönüştürür. Fotodedektör tarafından verilen sinyal FFT ile analiz edilmiştir. Uyarılan frekanslar, deneyin FFT sonuçları ile doğrulanmıştır.



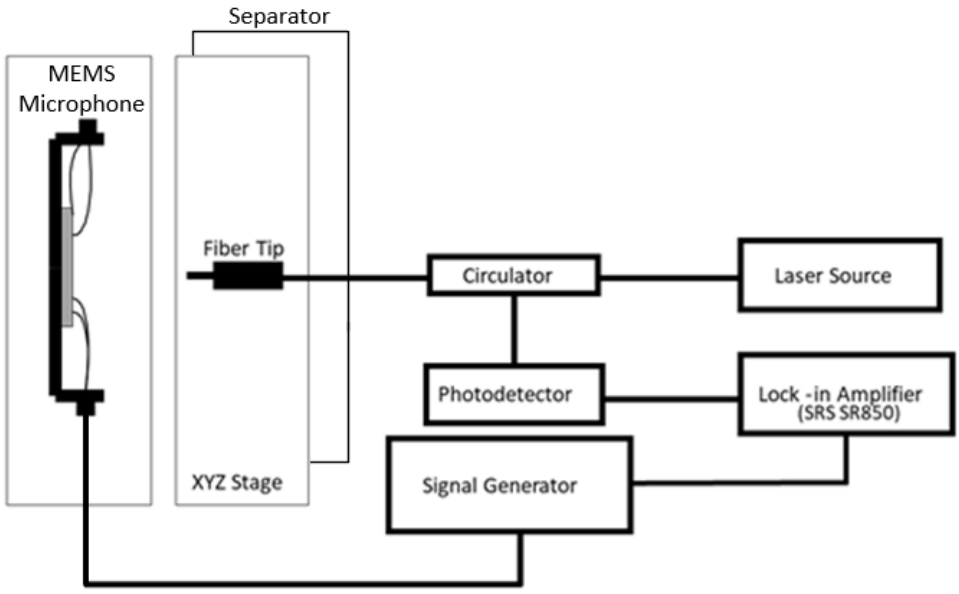
Şekil 6.24. Uyarılmış diyafram FFT ölçümleri, 10 kHz ile (a), 15 kHz ile (b), 20 kHz ile (c), 25 kHz ile (d), 30 kHz ile (e) ve 50 kHz ile (f) yapılan FFT ölçümleri.

AC ve DC eğimleme gerilimi mikrofona uygulanabilirliği doğrulandığından, ölçüm düzeneği, mikrofon zarının dıştan uyarılmasıyla geliştirilebilir. Hoparlör, farklı frekanslardaki

tonlara düz olmayan bir tepki vermektedir. Hoparlör, 50 Hz'den 10 kHz'e artan frekansla artan ses seviyesine sahiptir. Ses seviyesi zirvesine ulaştıktan sonra, hoparlörün ses seviyesi 10 kHz ila 20 kHz arasında artan frekansla azalan ses seviyesine sahiptir. Membranın eğimleme gerilimi uygulanarak uyarılması yönteminin uyarlanmasıyla, mikrofonun karakteristik özellikleri hoparlörün karakterizasyonu gerekmeksizin elde edilebilmektedir. Mikrofonu doğrudan karakterize etmek için sabit genlik ve değişken frekansta DC ve AC eğimleme gerilimleri uygulanır.

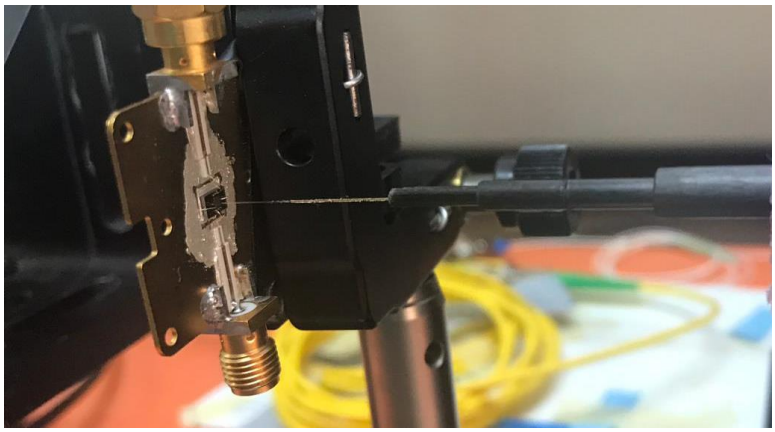
Şekil 6.19 ve Şekil 6.25'te önerilen ölçüm sistemleri arasındaki farklar aşağıda listelenmiştir:

- Ayırıcı, fiber ucunu fiksatörle tutan XYZ aşamasının altına yerleştirilmiştir.
- Çiğ taşıyıcı 180° çevrilmiştir. MEMS mikrofonunun üst kısmı fiber ucuyla karşı karşıyadır.
- Sinyal üreteci, hoparlör yerine çip taşıyıcıya bağlanmıştır.



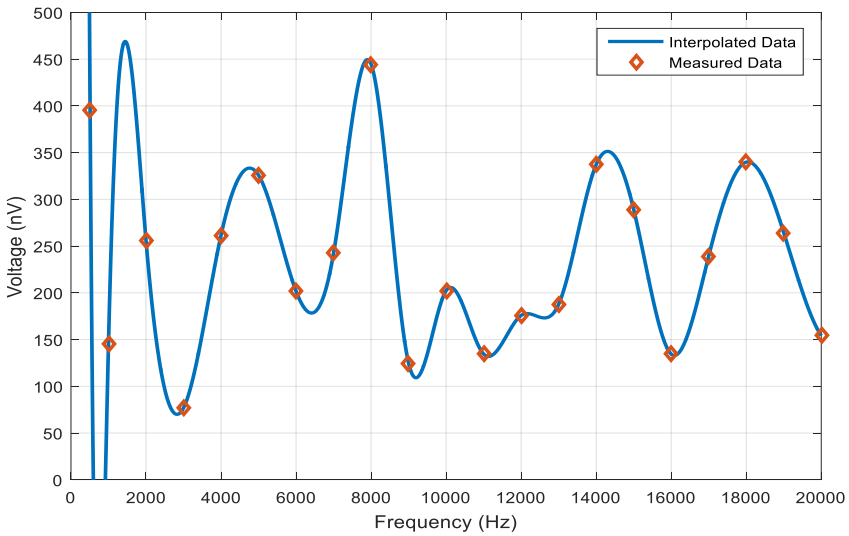
Şekil 6.25. Dışarıdan membranın uyarılması yöntemi uygulanmış ölçüm sistemi şeması.

Ölçüm yöntemi, Bölüm 6.1.4 Eşdeğer Mesafe Konseptinde tanımlanan yöntemle aynıdır . Bu yapılandırmada, istenen güç oranı için gereken eşdeğer mesafeyi belirlemek yerine membranın sapması ölçülür.

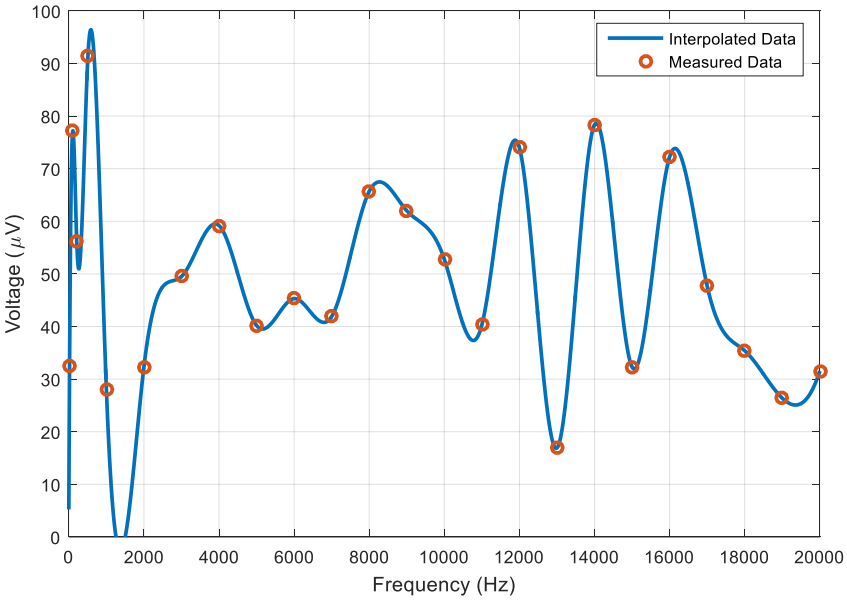


Şekil 6.26. Çip taşıyıcı ve yöntem için modifiye edilmiş fiber uç.

Ölçümler, 0,5V DC ve 100 mV Vpp AC eğimleme gerilimi uygulanarak, 20 Hz - 20 kHz frekans tarama aralığı ve kilitleme amplifikatörü 10 sn ortalama veri toplama süresi ile başarıyla gerçekleştirilmiştir. Gürültü tabanı ölçümü Şekil 6.27'de gösterildiği gibidir. Gürültü tabanının ortalaması 235 nV ve 95 nV standart sapmaya sahiptir. Mikrofonun gerilim tepkisi Şekil 6.28'de gösterilmektedir. Sinyalin ortalaması 49.57 µV ve standart sapması 20 µV'tur.

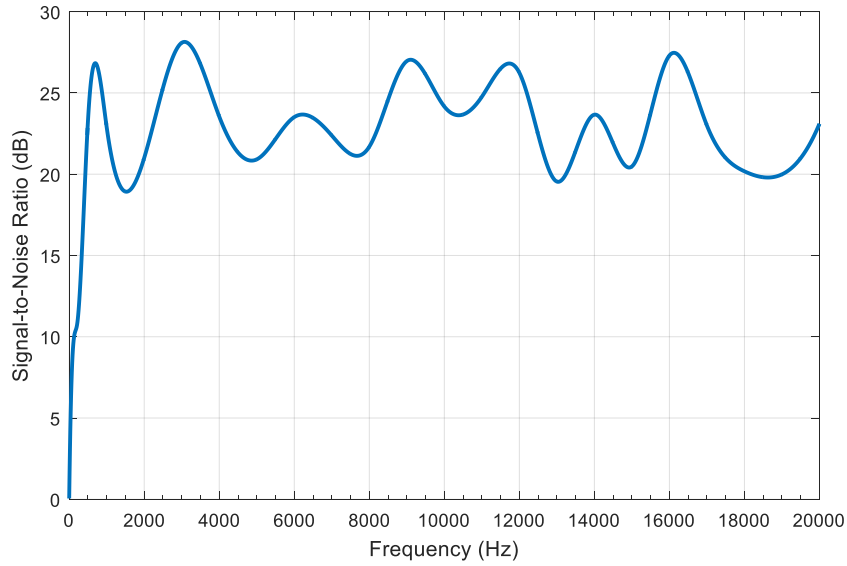


Şekil 6.27. Gürültü zemini ve frekans ölçümü



Şekil 6.28. Ölçülen gerilim ve frekans grafiği.

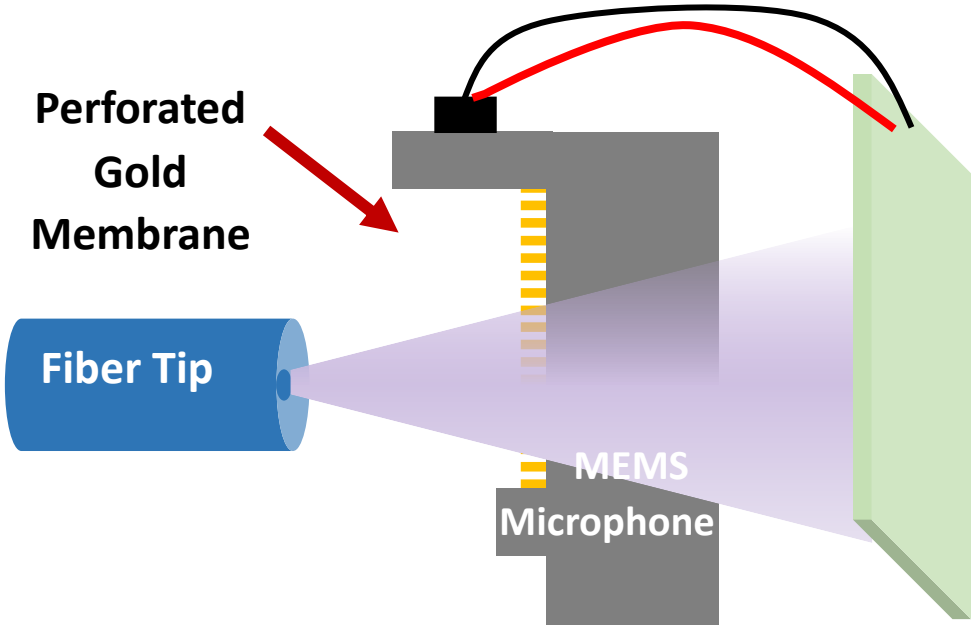
Gürültü zemini ve mikrofonun ölçülen gerilim tepkisini birleştirerek, Şekil 6.29'de gösterilen sinyal-gürültü oranı elde edilir. Sinyal-gürültü oranı ortalama 22.88 dB ve standart sapma 3 dB'dir. Sinyal-gürültü oranı beklendiği gibi düzdür ve 20 dB üzerinde sinyal-gürültü oranı sağlanmıştır.



Şekil 6.29. Sinyal-gürültü oranı ve frekans grafiği.

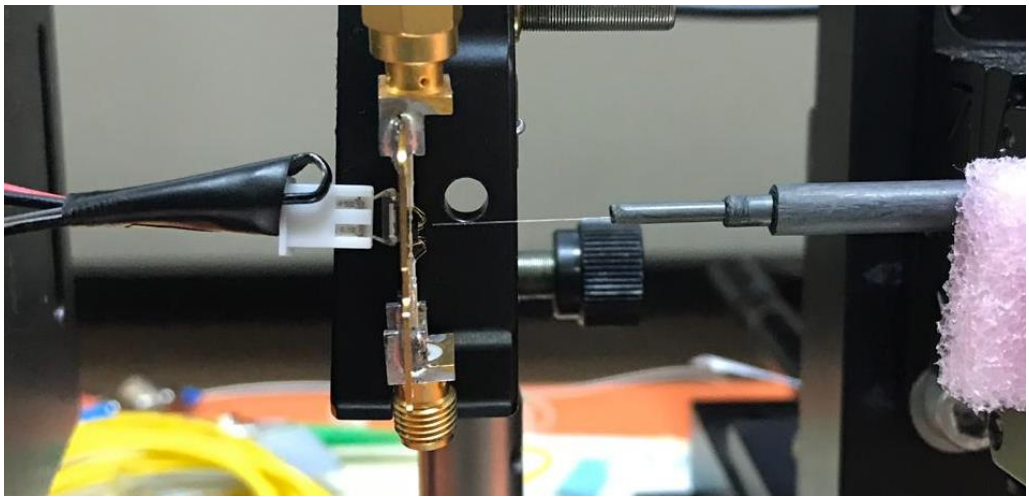
6.3.3. Öz Eğimleme

MEMS mikrofonunun tepesinden gönderilen ışınlar da mikrofondan geçerken modüle edilmektedir. Yansıyan ışık, membranın sapması nedeniyle modüle edilirken membrandan geçen ışık, yansıyan ışığa göre 180° faz kayması ile modüle edilmektedir. İletilen ışık gücü yansıyan ışık gücü hakkında bilgi verdiğinden, fotodedektör üzerine düşen ışınlardan dolayı oluşan gerilim mikrofonu eğimlemek için kullanılabilmektedir. Mikrofonun eğimleme gerilimi genliği ve frekansına göre karakterizasyonundan sonra, ek fotodetektör sisteme eklenerek geri bildirim amacıyla kullanılabilir. Gelecekteki çalışmalar için mikrofonun hassasiyetini otomatik ve anlık olarak kontrol etmesi beklenmektedir. İşlemi açıklayan şematik, Şekil 6.29'de gösterilmektedir.



Şekil 6.30. Öz eğimlenen MEMS mikrofon şeması.

Ölçüm kurulumu Şekil 6.30'da gösterilmektedir. MEMS mikrofonu, fotodetektör tarafından üretilen gerilimle eğimlenmektedir. Fotodetektörde yaratılan gerilim, MEMS mikrofonu fotodetektör ve fiber uç arasına yerleştirildiğinde 51.6 mV olarak ölçülmektedir. Bu kurulumda, MEMS mikrofon olmadan fotodetektörde yaklaşık 500 mV oluşmaktadır. Kayıp, alt taşta gerçekleşen emilimden kaynaklanır. Bu sayede öz eğimlenen mikrofonun elde edilmesi mümkündür.

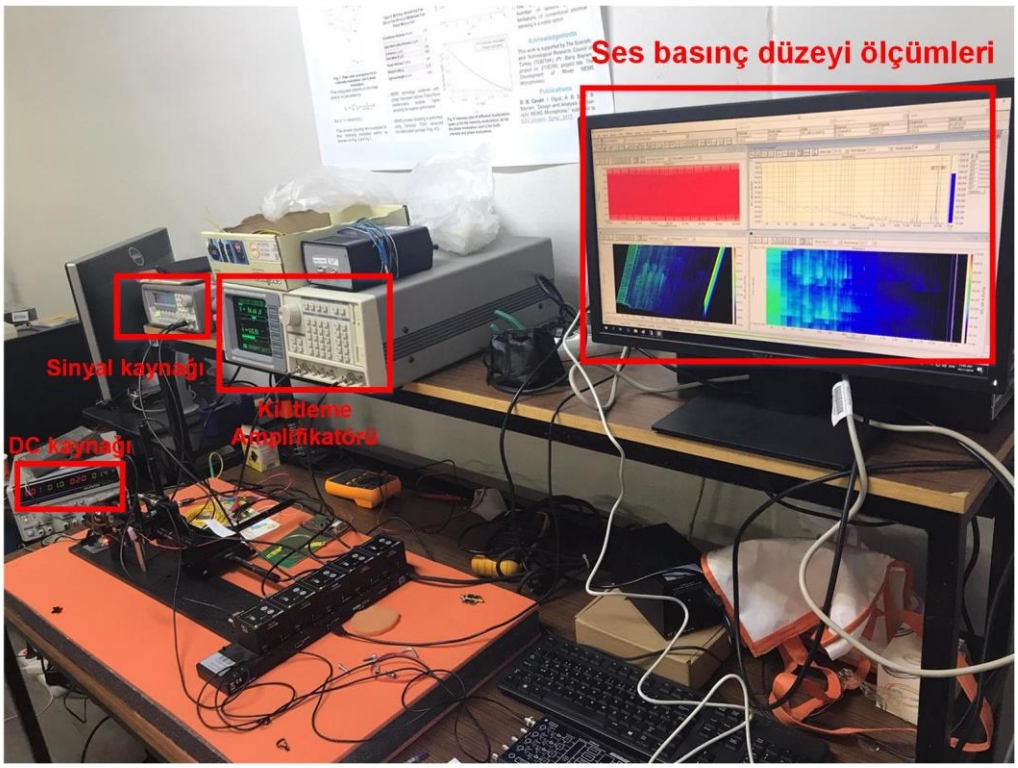


Şekil 6.31. Öz eğimlenen MEMS mikrofon ölçüm kurulumu.

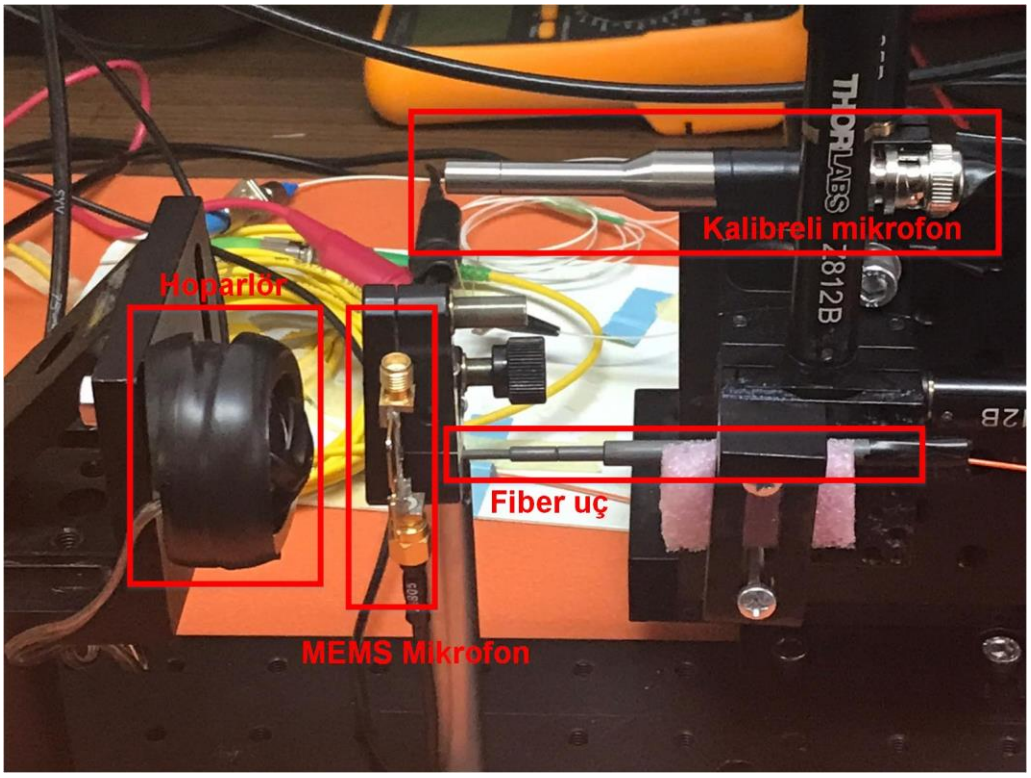
Hoparlör ile yapılan ölçümlere göre daha geniş ölçüm aralığı sağlamak için ölçüm düzeneği geliştirilmiştir. Modifikasyonlar, mikrofonun membranı harici olarak ölçüm sistemine eklenmesine imkân vermektedir. Modifiye edilmiş ölçüm sistemi, modifiye edilmemiş ölçüm sistemine göre gürültü faktörlerine karşın daha az hassas hale getirilmiştir. Ek olarak, ölçüm cihazlarının 50-60 Hz titreşimlerinden kaynaklanan gürültüyü azaltmak için ayırıcı ölçüm sistemine eklenmiştir.

6.4 Kalibreli Mikrofon Ölçümleri

Kalibreli mikrofon (iSEMcon EMM-130D082-CCP) ölçümleri için gerekli düzenek Şekil 6.32'de gösterilmiştir. Çipi DC gerilim ile beslemek amacıyla DC kaynağı kullanılmış olup, hoparlörden gelen sesin frekansının kontrolü için sinyal kaynağı kullanılmıştır. Ses basınç düzeyi ölçümleri Şekil 6.32'de gösterilen ekran üzerinden takip edilebilmektedir. Şekil 6.33'de ise MEMS mikrofonun ses düzeyi ölçümlerinde yakından bir görüntüsü gösterilmiştir.

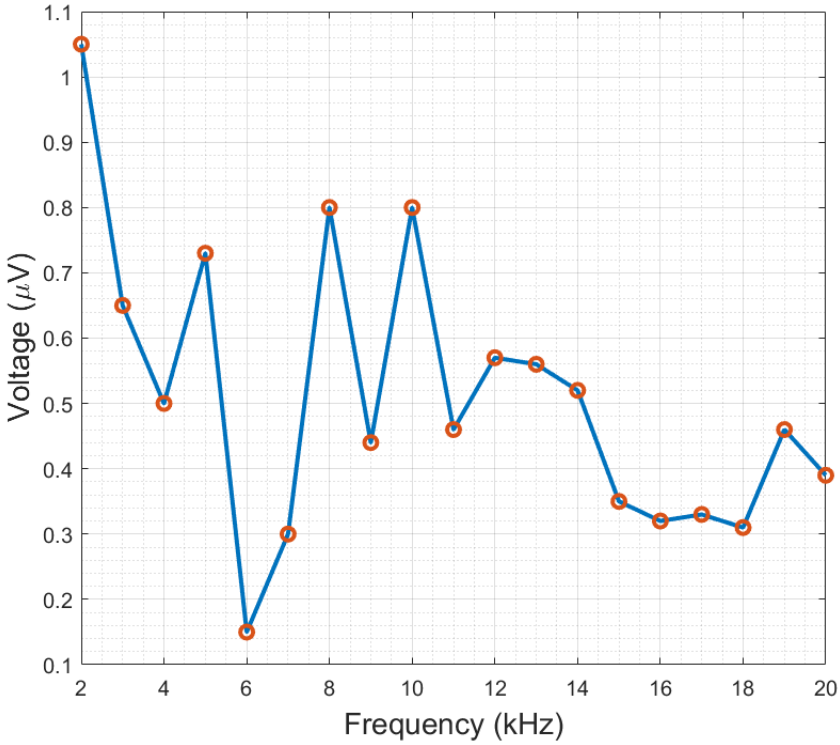


Şekil 6.32. Kalibreli mikrofon ölçüm düzeneği.



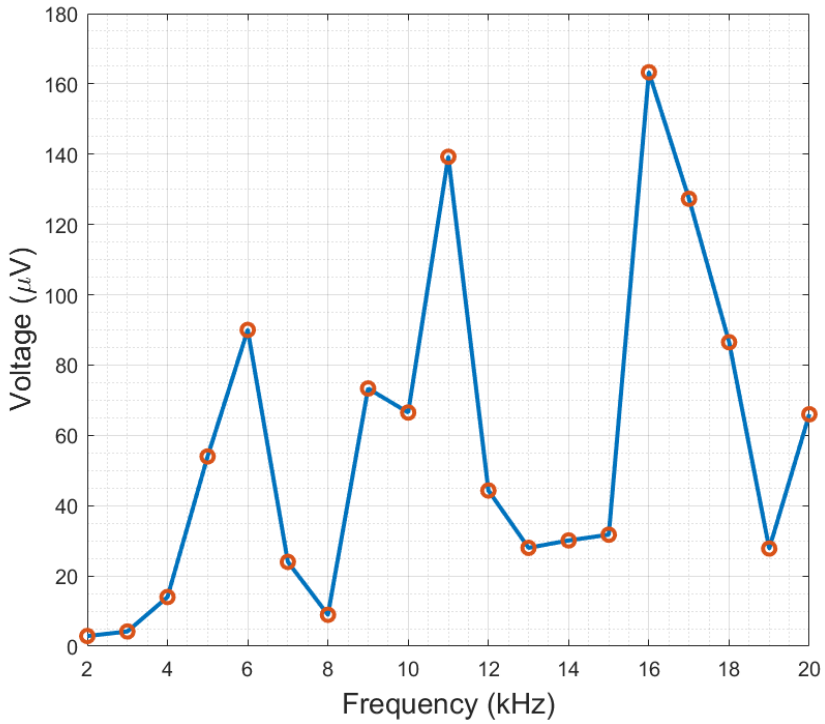
Şekil 6.33. Kalibreli mikrofon ölçüm düzeneği (yakından görünüm).

Kalibreli mikrofon ile gerçekleştirilen ölçümler, çipe 1 V DC besleme gerilimi uygulanarak ve hoparlörden 2 kHz - 20 kHz frekans tarama aralığında ses uygulanarak, kilitleme amplifikatöründe 10 sn ortalama veri toplama süresi ile başarıyla tamamlanmıştır. Gürültü tabanı ölçümü Şekil 6.34'de gösterildiği gibidir. Gürültü tabanının ortalaması 0.49 µV ve 0.22 µV standart sapmaya sahiptir.



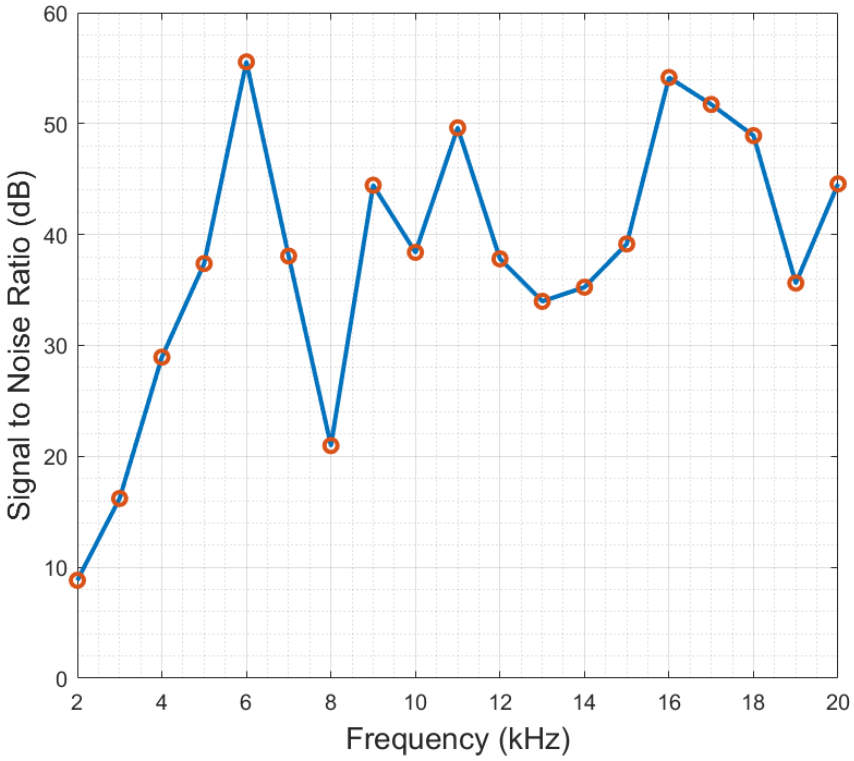
Şekil 6.34. Gürültü zemini ve frekans ölçümü.

Mikrofonun gerilim tepkisi Şekil 6.35'de gösterilmektedir. Sinyalin ortalaması 56.95 µV ve standart sapması 46.90 µV'tur.



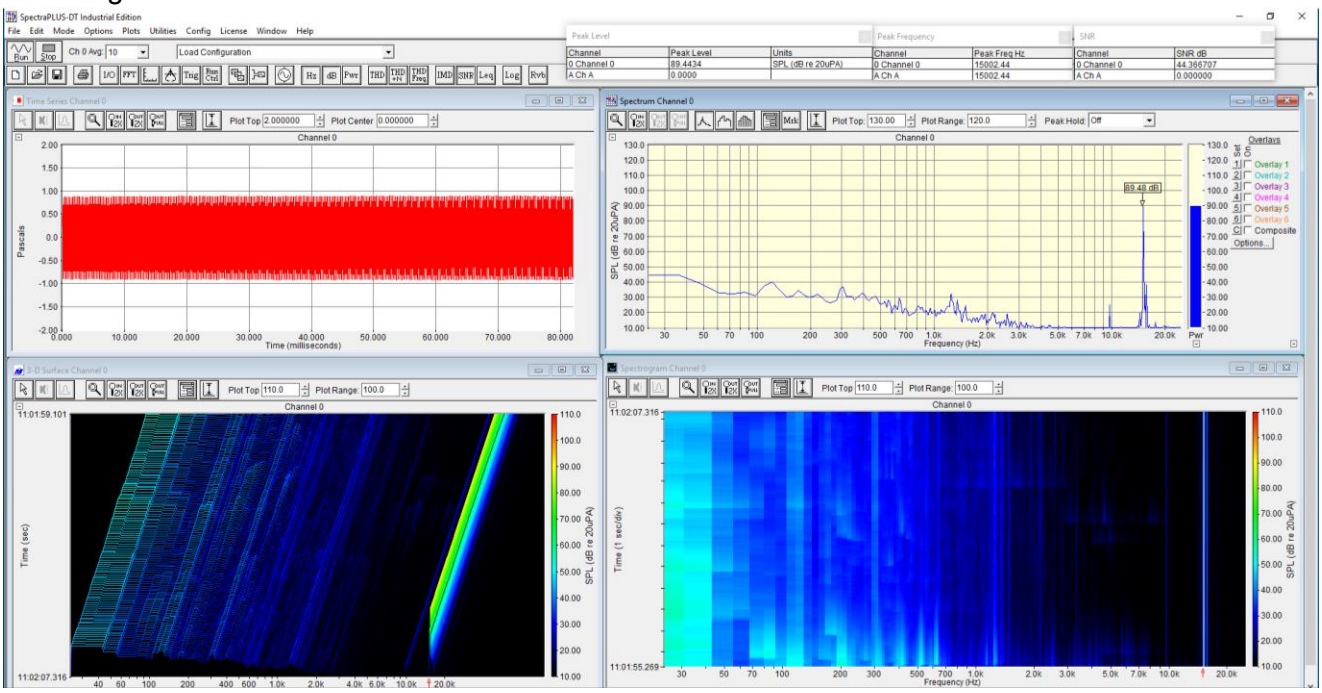
Şekil 6.35. Ölçülen gerilim ve frekans grafiği.

Gürültü zemini ve mikrofonun ölçülen gerilim tepkisini birleştirerek, Şekil 6.36'de gösterilen sinyal-gürültü oranı elde edilir. Sinyal-gürültü oranı ortalama 37.87 dB ve standart sapma 12.52 dB'dir.



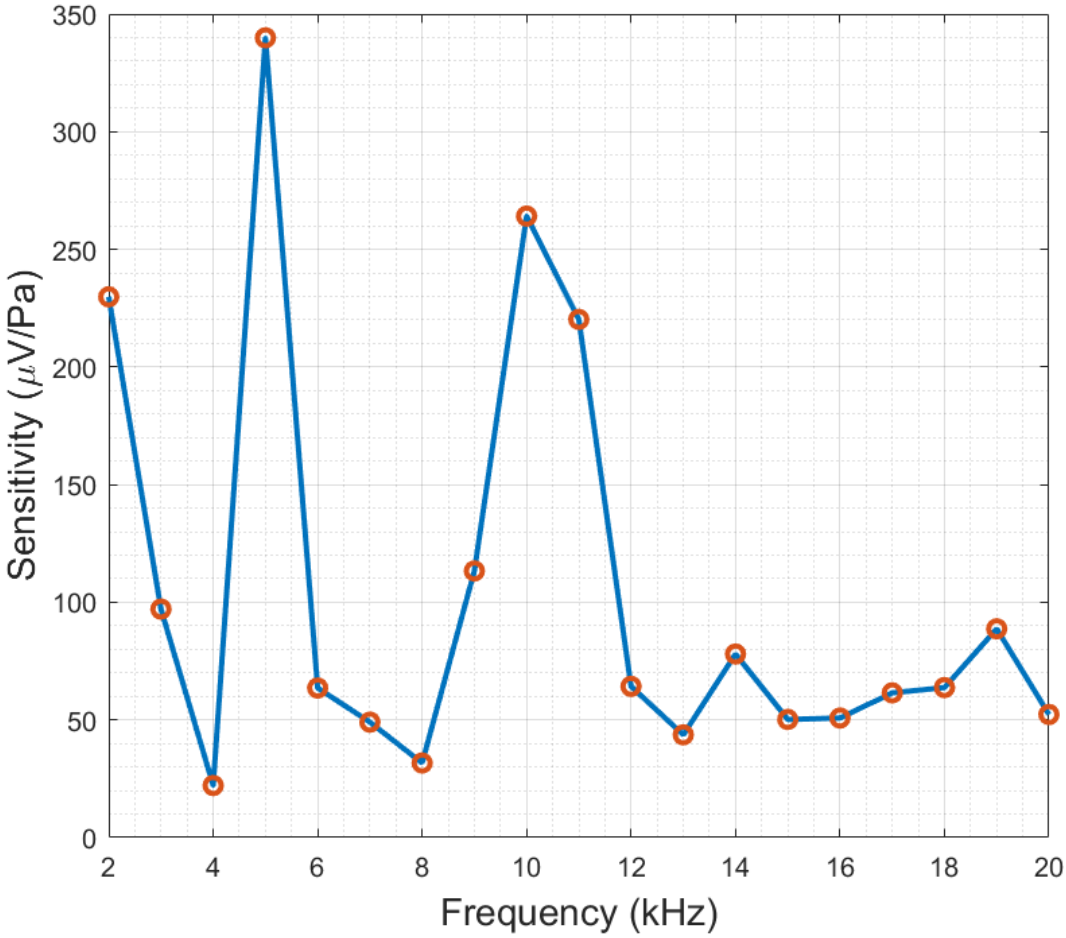
Şekil 6.36. Sinyal-gürültü oranı ve frekans grafiği.

Kalibreli mikrofon ölçümlerini geliştirmek adına, hoparlör ile verdiğimiz sesin SpectraPLUS programını (Pioneer Hill Software, WA, USA) kullanarak ses basınç düzeyinin ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ses basınç düzeyi (ing. Sound pressure level)(SPL) dB skalasında ölçülmüştür. Ses basınç ölçümü sırasında elde edilen SPL değerlerinin 15 kHz için örneği Şekil 6.37'de görülmektedir.



Şekil 6.37. SpectraPLUS programı basınç-zaman(sol üstte), SPL- frekans(sağ üstte), 3D görüntü-zaman(sol altta), Spektrogram (sağ altta).

Mikrofonların çalışma prensiplerinde ses basınç değişimlerini (Pascal) ses voltajına (Volts) çevirdiği göz önünde bulundurulursa, mikrofonun duyarlılığını (µV/Pa) cinsinden hesaplamanın gerekliliği görülmüştür. SPL ölçümü dB skalasında yapılıp sonrasında ses basıncına dönüştürülmüştür. Kilitleme amplifikatöründen elde edilen voltajlar ile ses basıncı ölçümlerinin birleştirilmesi ile mikrofonun duyarlılığı analiz edilmiştir. Mikrofonun frekansa bağlı duyarlılık değerleri Şekil 6.38'de görülmektedir. İlk rezonans frekansı olan 15 kHz frekans değeri için yaklaşık 50 µV/Pa duyarlılık gözlenmiştir. Ortalama olarak 104.4 µV/Pa duyarlılık gözlenmiştir.



Şekil 6.38. Duyarlılık ve frekans grafiği.

Kalibreli mikrofon ölçümleri ile birlikte U109 çipinin elektriksel ve optik karakterizasyonları tamamlanmış ve çipin mikrofon amacı ile kullanılacağından ses düzeyi ölçümleri ile duyarlılığının analizi yapılmıştır. U109 çipi teknik özellikleri Tablo 6.4'de görülebileceği üzere genişletilmiştir.

Proje önerisinde öngörülen ortalama duyarlılık değeri yaklaşık 50 mV/Pa olmasına rağmen projede gerçeklenen ölçüm sisteminde elde edilen değer 104.4 µV/Pa olarak belirlenmiştir. Bunun başlıca sebepleri öngörülen ve gerçeklenen ölçüm sistemleri arasında maliyet ve tedarik güçlüklerinden dolayı çeşitli farklılıklar bulunmasındandır. Örneğin, öneride belirtilen 250 mW lazer diyot yerine 20 mW lazer diyot kullanılmıştır. Ayrıca, ölçüm esnasında toprak hattından gelen SMPS kaynaklı gürültülerin yükseltilmemesi için PDA30B fotoalıcı düşük kazanç ayarında çalıştırılmıştır. Bundan dolayı öneride belirtilen 20 dB high-Z 1.5×10^4 V/A kazanç yerine 0 dB high-Z 1.5×10^3 V/A kazanç değeri ölçümlerde kullanılabilmiştir. Bir diğer farklılık da fiber ucun silisyum pulla tam temas etmediği durumda oluşan geri yansıma kayıplarından

kaynaklanmaktadır. Lazer gücü, fotoalıcı hassasiyeti ve ek yansıma kayıpları kaynaklı farklılıklar dolayısıyla önerilen ve gerçeklenen duyarlılık değerlerinin farklı olduğu değerlendirilmektedir. Lazer gücünün artırılması, uygun düşük gürültü yükselteç kullanılması ve geri yansıma kayıplarını azaltacak bağlantı teknikleri ile sistemde önerilen değerlere ulaşılabileceği düşünülmektedir.

Tablo 6.4 U109 çipi teknik özellikleri

Teknik Özellikleri	**Değerler**
Temel (ilk) mod frekansı (f_o), kHz	15
İkinci mod frekansı, kHz	48
Üçüncü mod frekansı, kHz	110
Seri kapasitans değeri (C_s) @ f_o,pF	186.5
Seri direnç değeri (R_s) @ f_o, Ω	700
Membranın merkez noktasının yer değiştirmesi (1V DC, 100 mV_{pp} AC) @ f_o, nm	23.5
Membranın ortalama yer değiştirmesi (1V DC, 100 mV_{pp} AC) @ f_o, nm	14
Duyarlılık @ f_o,nm/Pa	105.3
Kalite faktörü @ f_o	3-8.3
Verimli çalıştığı ön gerilim, V	~1
3-dB bant genişliği	%130
Ortalama duyarlılık, µV /Pa	104.4
Duyarlılık @ f_o, µV /Pa	50
Sinyal-gürültü oranı @ $f_{o,}$, dB	43
Ortalama Sinyal-gürültü oranı, dB	38

SONUÇLAR

Fiber optik MEMS mikrofon, algılama kısmı ve optik algılama kısmı olmak üzere iki temel parçadan oluşmaktadır. Bu proje kapsamında yüksek kaliteli algılama ve uzun süreli kullanım için, mikrofonun algılama elemanı tekrarlanabilen bir üretim süreciyle, dayanıklı ve sağlam olacak şekilde tasarlanıp, üretilmiştir. Ticari olarak temin edilebilen POLYMUMPS sürecini kuralları da göz önünde bulundurularak membran tasarımı yapılmıştır. Bu aşamada tasarım kuralları ve süreç akışının sınırlamaları düşünülerek süreçteki her adım raporda belirtilen uygun sınırlamalarla oluşturulmuştur. Fiber optik MEMS mikrofonunun membranı, sistemin temel algılama elemanı olduğu için sistemin özellikleri, temel olarak membran özellikleri tarafından belirlenmektedir. Bu nedenle membranın elektriksel ve mekanik analizleri yapılmıştır. Sesin duyulabilir frekans aralığında (20 Hz – 20 kHz) algılanması için membran bu aralıkta hassas olmalıdır, başka bir deyişle duyarlılığının yüksek olması gerekmektedir. Bu özellikleri sağlama amacıyla mikro-üretime gönderilecek membran tasarımları yapılmıştır.

Membranın ilk rezonans frekansını istenilen frekansta ayarlayabilmek için malzeme özellikleri ve boyutları göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca, farklı yarıçap değerleri için dairesel bir membranın ilk rezonans frekansı araştırılmış ve dairesel bir membrane için ilk rezonans frekans değerinin yarıçap arttıkça azaldığı tespit edilmiştir. Fiber optik MEMS mikrofon için, ilk rezonans frekansı 25 - 30 kHz olan ve 450 - 500 μm membran yarıçapına karşılık gelen bir membran tasarlanmıştır. Membranın tasarımında incelenmesi gereken bir başka tasarım parametresi olan membranın delik çapı ve hava delikleri arasındaki mesafe, tasarım kurallarına göre belirlenmiştir. Bu kısımda problem delik çapı ve delikler arası mesafe optimize edilerek çözümlenmiştir. Bu optimizasyon ayrıca mikro-üretim için güvenlik marjlarını da içermektedir.

POLYMUMPS tasarım kurallarına ve dairesel bir membranın teorik analizine göre, mikro-fabrikasyon maskeleri tasarlanmıştır. Tasarımda, POLYMUMPS işleminin POLY0 ve POLY1 polisilisyum katmanları, membranın taşıyıcısı olarak ve POLY2 membran malzemesi olarak kullanılmıştır. Membran, yani POLY2 katmanı, hava delikleri ile şekillendirilmiştir. Ardından, fiber optik kablodan gelen lazer ışığı için optik olarak yansıtıcı bir yüzey elde etmek amacıyla membranın üzerine metal kaplanmıştır. Metal katman ayrıca, POLY2'nin hava deliklerinin çapından daha büyük çapa sahip ve herhangi bir üretim problemi oluşturmayacak şekilde hava delikleriyle şekillendirilmiştir.

Hazırlanan mikro-üretim maskeleri POLYMUMPS'a iletilip üretim gerçekleştikten sonra, herhangi bir makro hata olup olmadığı mikroskop altında denetlenmiştir.

Üretilen çip tasarımları arasından seçilen U103 çipi membranını karakterize etmek ve istenilen performansı gösterdiğini doğrulamak amacıyla elektriksel empedans karakterizasyonu ve optik karakterizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Elektriksel empedans karakterizasyonu sonucu ölçülen seri kapasitans değerlerinin 193 pF etrafında çok az değiştiği gözlemlenmiştir. Seri direnç değerleri ise genel olarak 1000 Ω değerinden az ölçülmüştür.

Optik karakterizasyon sırasında ise birbirlerinden 50 μm uzakta olan membranın çapı üzerinde 21 nokta seçilip noktalara 11. nokta membranın merkezi olacak şekilde sayılar verilmiştir. Bu 21 noktanın, 20 Hz ile 150 kHz arasında değişen frekanslara sahip elektriksel etkilere tepkisi elde edilerek, mod şekilleriyle farklı rezonans frekansları elde edilebilmiştir. Yaklaşık 28 kHz, 51 kHz ve 109 kHz olmak üzere üç frekans çevresinde güçlü yanıtlar elde edilmiştir. Bu frekansların her birinde en güçlü tepki, membranın merkezi çevresinde elde edilir. Rezonans değerleri teorik olarak öngörülen değerlere çok yakındır. Temel mod olan 28 kHz'teki ilk mod, mod biçiminde düğüm değere sahip değildir ve merkezde güçlü bir tepki göstermektedir. 51 kHz'teki ikinci mod, mod şeklinde iki düğüm ve 109 kHz'teki üçüncü mod, mod şeklinde 4 düğüm barındırmaktadır. Mod şekilleri incelendiğinde sadece simetrik mod şekillerinin membranda barınabildiği gözlemlenmektedir ve bu durum membranın simetrisini doğrulamaktadır. Membranın ilk rezonans frekansındaki yer değiştirmesi ortalama olarak 1.5 nm ve merkezde 2.4 nm'dir. Bu tepkinin kısmi 3-dB bant genişliği %32'dir. Duyarlılık ise yaklaşık olarak 12 nm / Pa olarak hesaplanmıştır. İlk rezonans frekansı için kalite faktörün 2.8 olduğu görülmüştür.

Membranın bir başka önemli özelliği olan kısa süreli geçici tepkisini elde etmek için, 28 kHz, 51 kHz ve 109 kHz'de tek periyot sinüs sinyalleri kullanılmıştır. Membranın rezonans frekanslarındaki sinüs etkilere verdiği denge durumu tepkisi de, membranın dairesel simetrisini doğrulamaktadır. Membranın kalite faktörü, rezonans frekanslarında verilen tek periyot sinüs dalgasına gösterdiği geçici tepkiden de hesaplanabilir, ve kalite faktörünün bu hesaplama yöntemi sonucunda 4 olduğu görülmüştür.

Membranın lazer vibrometre ile optik karakterizasyonu için kullandığımız çip deliksiz bir tabla üzerine oturtulmuştur fakat fiber sistemde yapılacak ölçümler ve gözlemler için kullanılacak çip delikli bir tabla üzerine oturtulmalıdır. Fiber sistemde kullanılmak için ise mikro-üretimde ürettiğimiz en verimli ve yüksek performanslı çip (U109) seçilip, delikli bir çip taşıyıcısı üzerine

oturtulmuştur. U109 çipi üzerinde empedans analizörü ve vibrometer sistemi ile U103 çipi için uygulanan ölçümler tekrarlanmış ve membranın karakteristik özellikleri hesaplanmıştır.

Tasarımın empedans analizörü ile karakterizasyonu sırasında ölçülen seri kapasitans ve 1 kHz - 100 kHz frekans aralığında seri kapasitans değerlerinin 187 pF etrafında çok az değiştiği, seri direnç değerleri ise gerekli frekans aralığında 1500 Ω değerinden az olduğu ölçülmüştür. Fiber sistemde kullanılacak çipin optik karakterizasyonu sonucunda yaklaşık 15 kHz, 48 kHz ve 110 kHz olmak üzere üç rezonans frekansı olduğu gözlenmiştir. Elde edilen modal şekiller 15 kHz'deki rezonansın membranın temel modu olduğunu da göstermektedir. Membranın normalize edilmiş düzlemsel tepkisini 150 kHz'e kadar ölçülüp analiz ettikten sonra, membranın ilk rezonans frekansındaki yer değiştirmesi ortalama olarak 14 nm ve merkezde 23.5 nm olarak ölçülmüştür. U109 çipinin ilk rezonansının U103 çipine göre daha düşük bir frekansta olması, membranın yer değiştirme miktarının daha fazla olmasını açıklamaktadır. Membranın duyarlılığı 105.3 nm/Pa olarak hesaplanmıştır. Kalite faktörünün ise 3 olduğu görülür.

Membranın merkezine eşit uzaklıklardaki noktaların tepkilerine bakıldığında merkeze yaklaştıkça simetrinin istenildiği gibi yüksek oranda sağlandığı gözlenmiştir. U109 çipinin özellikle rezonans frekanslarında oldukça simetrik olduğu gözlenmiştir. U103 çipi ile karşılaştırıldığında, merkezden eşit uzaklıktaki noktaların sadece tepeye ulaştığı frekanslarının aynı olmadığı, aynı zamanda membranın tepe noktalarındaki tepkilerinin de neredeyse aynı miktarda olduğu görmüştür. Her iki çip dizaynı için de membran sapmasının frekansa bağlı değişimden anlaşılabileceği üzere, U103 çipi projede amaçlanan aralıktaki (20 Hz- 20 kHz) frekanslarda düz ve sabit varsayılabilecek bir tepki göstermektedir. İlk rezonans frekansı (28 kHz), duyulabilir frekans aralığın dışında olarak tasarlanmıştır, ve çipin mikrofon olarak kullanılacağı aralıkta düz bir tepkiye sahip olması sağlanmıştır. İlk rezonans frekansının bu aralık dışında olması, duyulabilir frekans aralığında duyarlılığın, U109 ile karılaştırıldığında, daha düşük olmasına neden olmuştur. U109 çipinin ise ilk rezonans frekansı (15 kHz), mikrofon olarak kullanılacak frekans aralığında olacak şekilde tasarlanmış olup, duyulabilir frekans aralığında yüksek duyarlılıkta çalışması sağlanmıştır. U109 çipinin temel mod frekansının 15 kHz'de olması sebebiyle duyulabilir frekans aralığında membranın tepkisinin, U103 ile karşılaştırıldığında, daha değişken olduğu gözlenmiştir.

Proje kapsamında ayrıca fiber optik MEMS mikrofon ölçüm sistemi tasarlanmış, monte edilmiş ve doğrulanmıştır. Öncelikle fiber optik kablo aracılığıyla algılama amacıyla ışığın gönderilmesi ve MEMS mikrofondan yansıyan ışığın toplanmasının optimize edilmesi amacıyla simülasyon çalışmaları yapılmış ve incelenmiştir. Sistemin tasarımı Fabry-Perot İnterferometre

kurulumuna dayanmaktadır. Fabry-Perot interferometresi, altın ile kaplı membran ile bölünmüş fiberin ucu arasında oluşturulur. MEMS mikrofonunun fiziksel parametreleri kullanılarak tüm katmanlar ve delikli membranın yapısı da dahil olmak üzere mikrofonun 3B modellemesi yapılmıştır. MEMS mikrofonun 3 boyutlu modellenmesi ve simülasyon çalışmaları, ışık izdüşümü ve takibi üzerine özelleşmiş olan TracePro yazılımı platformunda yapılmıştır. Simülasyonlarda elde edilen sonuçlar MEMS mikrofon ölçüm sisteminin geliştirilmesi, detaylıca incelenmesi ve daha iyi ölçüm alınabilmesine olanak sağlamıştır. Simülasyonlar 3 farklı kurulum yapısında koşturulmuştur. İlk kurulum, alt taş kalınlığının fiber optik uç tarafından toplanılan ışık gücüne etkisini kavramsallaştırmak için yapılmıştır. İkinci kurulan simülasyon düzeneği, fiber optik ucun MEMS mikrofonun arka yüzeyine olan optimum mesafenin hesaplanabilmesi ve mesafe değişiminin toplanan ışık gücüne etkisini incelemek amacı ile oluşturulmuştur. Son olarak, üçüncü simülasyon düzeneği alternatif ölçüm yönteminin tanımlanmasını ve uygulanabilirliğini değerlendirek amacıyla kullanılmıştır. Optik algılama sisteminin kurulumu için lazer diyot, döndürücü, fiber optik kablo, MEMS mikrofon ve fotodedektör bir araya getirilmiştir. Fiber optik kablolarda az kayıp noktalarından birisi olması ve optik sinyalin iletimi sırasında en düşük saçılım kayıplarını en aza indirgemesi nedeniyle lazer diyodun çalışma dalga boyu 1310 nm olarak seçilmiştir. Kısaca, sistemin optik kısmı temel olarak ölçümü önemli ölçüde etkilemeyecek, ancak tüm sistemin kurulumunun sağlanması için mümkün olan düşük zayıflama, soğurma ve tepkisellik değerlerini elde etmeye odaklanmıştır.

Ölçüm sisteminin elektriksel kısmı bir hoparlör, dalga formu üreteci, bir çip taşıyıcısı ve kilitleme amplifikatöründen oluşur. Çip taşıyıcı, MEMS mikrofonunu hareketsiz hale getirmek ve çipe gerilim eğimlemesi uygulamak için tasarlanmış ve üretilmiştir. Çipde sağlanan düşük seri direnç, eğimleme geriliminin düzgün aktarılması ve gürültünün azaltılması için önemlidir. Gürültü zemini ve mikrofonun ölçülen gerilim tepkisini birleştirerek, sinyal-gürültü oranı ortalama 22.88 dB ve standart sapma 3 dB olarak bulunmuştur. Sinyal-gürültü oranı istenildiği gibi düzdür ve 20 dB üzerinde sinyal-gürültü oranı sağlanmıştır.

Hoparlör ile yapılan ölçümler ile karşılaştırıldığında daha geniş bir ölçüm aralığı sağlamak amacıyla ölçüm düzeneği modifiye edilmiştir. Geliştirilmiş ölçüm sistemi, gürültü faktörlerine karşı daha az hassas hale getirilmiştir. Ayrıca, ölçüm cihazlarının 50-60 Hz titreşimlerinden kaynaklanan gürültüyü azaltmak için ayırıcı ölçüm sistemine eklenmiştir. Öz eğimlenen MEMS mikrofon ölçüm sistemi de incelenip, gösterilmiştir.

Kalibreli mikrofon ölçümleri ile mikrofonun hassasiyeti optik olarak test edilmiştir. Kalibreli mikrofon sistemi ile yapılan ölçümler sonucunda, gürültü zemini ve mikrofonun ölçülen gerilim tepkisini birleştirilmiştir. Sinyal-gürültü oranı ortalama 38 dB olarak tespit edilmiştir. Mikrofonların çalışma prensiplerinde ses basınç değişimlerini (Pascal) ses voltajına (Volts) çevirmesi düşünüldüğünden, mikrofonun duyarlılığı (µV/Pa) cinsinden hesaplanmıştır. Kilitleme amplifikatöründen elde edilen gerilimler ile ses basıncı ölçümlerinin birleştirilmesi ile mikrofonun duyarlılığı ilk rezonans frekansı olan 15 kHz frekans değeri için yaklaşık 50 µV/Pa, ortalama için ise 104.4 µV/Pa olarak gözlenmiştir.

Lazer gücünün artırılması, uygun düşük gürültü yükselteç kullanılması ve geri yansıma kayıplarını azaltacak bağlantı teknikleri ile sistemde daha yüksek duyarlılık değerlerine ulaşılabileceği düşünülmektedir.

REFERANSLAR

Arndt, V., Müller, H. and Dopheide, D. (1996). Comparison measurements for selection of suitable photodetectors for use in Nd: YAG LDA systems. Experiments in Fluids, 20(6), pp.460-465.

Chan, C. K., Lai, W. C., Wu, M., Fang, W. 2010. "Design and implementation of a novel double-poly microphone with rigid acoustic receiver, flexible spring supporter, and harm backplate", *Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2010 IEEE 23rd International Conference ,* 651-654.

Chao, P. C. P., Tsai, C. Y., Chiu, C. W., Tsai, C. H., Tu, T. Y. 2013." A new hybrid fabrication process for a high sensitivity MEMS microphone", *Microsystem technologies*, *19*(9-10), 1425-1431.

Dutton, H. (1998). Understanding optical communications. Upper Saddle River (New Jersey): Prentice Hall.

Grosh, K., Littrell,R. 2013. "Piezoelectric MEMS Microphone *".*Patent Numarası: US 8,531,088.

Huang, C., Naguib, A., Soupos, E., Najafi, K. 2002. "A silicon micromachined microphone for fluid mechanics research". *J. Micromecha. Microeng., 12(6)*, 767–774.

Horowitz, S.,Nishida, T., Cattafesta, L.,Sheplak, M. 2007. "Development of a micromachined piezoelectric microphone for aeroacoustics Applications". *J. Acoust. Soc. Amer*. *122(6)*, 3428–3436.

Franz, J. 1988. "Piezoelektrische sensoren auf siliziumbasis für akustische anwendungen," Ph.D. tezi, Darmstadt Teknoloji Üniversitesi, Darmstadt, Almanya.

Lee, W. S., Lee, S. S. 2008. "Piezoelectric microphone built on circular diaphragm". *Sensors and Actuators A: Physical*, *144*(2), 367-373.

Littrell, R.J. 2010. "High performance piezoelectric MEMS microphones," Ph.D. tezi, Univ. Michigan, Ann Arbor, MI.

Martin, D.T., Jian, L., Kadirvel, K., Fox, R.M., Sheplak, M., Nishida, T. 2007. "A micromachined dual-backplate capacitive microphone for aeroacoustic measurements", *J. Microelectromech. Syst., 16(6)*, 1289–1302.

Martin, D.T., Kadirvel, K., Nishida, T., Sheplak,M. 2008. "A surface micromachined capacitive microphone for aeroacoustic applications", *Proc. Solid-State Sens., Actuator, Microsyst. Workshop*, Hilton Head, SC, 1–4.

Martin,D.T., Kadirvel, K., Liu, J.,Fox, R.M., Sheplak, M., Nishida, T. 2005. “Surface and bulk micromachined dual back-plate condenser microphone”, *Proc. 18th IEEE Int. Conf. MEMS*, Miami, FL,319–322.

S.Fouladi, M. Bakri-Kassem, R.R Mansour, “Suspended on-chip RF MEMS components fabricated using PolyMUMPs technology”, Can. J. Elect. Comput. Eng., Vol. 31, No. 2 (2016)

Sheplak, M., Breuer, K.S., Schmidt, M.A. 1998 “A wafer-bonded, silicon nitride membrane microphone with dielectrically-isolated single crystal silicon piezoresistors”, *Proc. Solid-State Sens. Actuator Workshop*, Hilton Head Island, SC, 23–26.

Sheplak, M., Seiner, M., Breuer, K.S., Schmidt, M.A. 1999 “A MEMS microphone for aeroacoustic measurements”, 37th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV.

Scheeper, P.R., Nordstrand,B., Gullov, B.L.J.O., Clausen, T., Midjord, L., Storgaard-Larsen, T. 2003.” A new measurement microphone based on MEMS technology”, *J. Microelectromech. Syst., 12(6)*,880–891.

Xin Guo, Konying Xie, Raobert J. Campbell, Yongjun Lai, “A study on three-dimentional electrode arrays fabricated by PolyMUMPs for AC electo-osmotic pumping”, Microelectronic Engineering, Vol. 88, Issue 10 (2011).

Yang, C. T. 2010. “The sensitivity analysis of a MEMS microphone with different membrane diameters.”, *Journal of Marine Science and Technology*,*18*(6), 790-796.

Yaralioglu, G.G., Ergun, A.S., Bayram, B., Haeggström, E., Khuri-Yakub, B.T. 2003. "Calculation and Measurement of Electromechanical Coupling Coeffcient of Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Cont., 50, 449-456.