Süperhidrofobik Yüzey Üzerinde Duran Sıvı Mikrodamlaların İnceltilmiş Optik Fiber ile Ultrayüksek Çözünürlükte Optik Spektroskopisi

Proje No: 109T734

Doç. Dr. Alper KİRAZ
Yasin KARADAĞ

HAZİRAN 2012
İSTANBUL

Önsöz

Bu raporda TÜBİTAK tarafından desteklenen 109T734 numaralı “Süperhidrofobik Yüzey Üzerinde Duran Sıvı Mikrodamlaların İnceltilmiş Optik Fiber ile Ultrayüksek Çözünürlükte Optik Spektroskopisi “ başlıklı araştırma projesinden elde edilen sonuçlar açıklanmaktadır. Proje kapsamında su tutmayan yüzey üzerinde duran su/gliserol mikrodamlalarının inceltilmiş fiberlerle ultrayüksek çözünürlükte optik spektroskopisi için gerekli deney düzenekleri kurulmuş, bu düzenekler kullanılarak literatürde ilk defa inceltilmiş fiber ile mikrodamla optik rezonansları arasında optik bağlaşmaya ulaşılmıştır. Ayrıca bu mikrodamlaların temel mekanik rezonansları periyodik dikey mekanik ve yatay elektriksel uyarılar ile karakterize edilmiştir.

Projedeki çalışmalar Dr. Alexandr Jonáš, Dr. Michael Mestre, Dr. Nevin Taşaltın, ve Yard. Doç. Dr. İbrahim Küçükkara’nın önemli katkıları ile Koç Üniversitesi Nano-Optik Araştırma Laboratuvarı’nda gerçekleştirilmiştir.

İçindekiler

1 Giriş 7
2 Deneysel Düzenek 8
2.1 Hidrojen Alevi ile Isıtılırken Doğrusal Motorize Hareket Sehpaları Tarafından Çekilerek Oluşturulan İnceltilmiş Fiber Düzeneğinin Tasarımı ve Kurulumu 8
2.2 Nemi Kontrol Edilebilen Odacıktaki Yüzey Üzerinde Duran Mikrodamların İnceltilmiş Fiber ile Optik Spektroskopisi için Geliştirilen Ters Mikroskopun Tasarımı ve Kurulumu 12
3 Deneysel Sonuçlar 15
3.1 Mikrodamla Mekanik Rezonanslarının İncelenmesi Deneyleri 15
3.1.1 Dikey Titretişimlerle Mikrodamla Mekanik Rezonanslarının İncelenmesi 15
3.1.2 Yatay Titretişimlerle Mikrodamla Mekanik Rezonanslarının İncelenmesi 21
3.1.3 Pozisyona Hassas Fotoalgılayıcı ile Mikrodamlaların Mekanik Rezonanslarının İncelenmesi 28
3.2 İnceltilmiş Fiber İle Mikrodamlaların Ultrayüksek Çözünürlükte Spektroskopisi 30
4 Sonuç 34
5 Referanslar 35
6 TÜBİTAK PROJE ÖZET BİLGİ FORMU 38

Şekiller Listesi

Şekil 2-1: İnceltilmiş fiber hazırlama düzeneği. Kontrollü olarak hidrojen gazı ile ısıtılan fiber kontrollü bir şekilde çekilerek inceltilir. Profesyonel bir fotoğraf makinası ve uzun çalışma mesafesine sahip bir hava objektifi yardımı ile inceltime işlemi izlenmektedir. Daha sonraki deneylerde inceltme işlemi sırasında fiberden lazer geçirilerek çıkan lazer tek mod özelliği taşıyana kadar inceltme işlemine devam edilecektir. 8
Şekil 2-2: Motorize hareket sehpalarını kontrol etmek için kullanılan LabVIEW programı. 9
Şekil 2-3: Üretilen inceltilmiş fiberlerin optik ve taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. Fiber kalınlıkları A: 125 μm, B: 25 μm, C: 6 μm, D: 7 μm, E: 1.6 μm ve F: 0.6 μm. 10
Şekil 2-4: Fiber inceltme işlemi sırasında fiberin ışık geçirgenliği kaydedilmiştir. Geçen ışık şiddetindeki salınımların ani düşmesi fiberin tekrar tek kip çalışma rejimine geçtiğini göstermektedir. 11
Şekil 2-5: Tasarlanan ters mikroskobun mekanik çizimleri. **(a)** Fiber hizalama sistemi ile deneylerde kullanılacak nem odacığı (merkezde), üç boyutlu örnek hizalandırma sehpası (merkezde aşağıda) ve mikroskop aydınlatma sistemi (yukarıda) görülmektedir. **(b)** İnceltilmiş fiberin hizalanmasında kullanılacak çift konumlandırma sisteminin yakın görünümü. Üç boyutlu piezoelektrik hareket sehpası (aşağıda) fiberi tutan üç boyutlu mekanik hareket sehpasının (yukarıda) hassas hizalanmasında kullanılır. Tasarımımızda mikroskop objektifinin pozisyonu sabit kalır, örnek (fiberin altında görünen cam lamel) nem odacığı ile birlikte hareket ettirilir. **(c)** Örnek hizalandırma sistemi ile birlikte nem odacığının görüntüsü. **(d)** Tüm hizalama sistemleri, fiber tutucuları ile birlikte deneylerde kullanılacak nem odacığının görüntüsü. 12
Şekil 2-6: Üretimi tamamlanan ters mikroskobun görüntüsü. 13
Şekil 2-7: (sol) İnceltilmiş fiberin seçilen mikrodamlacığa göre göreceli posizyonunu mikron-altı düzeyde ayarlamak için kullanılan 3-D poziyon kontrol sistemi. (sağ) Yüzey üzerinde duran su/gliserol karışımından oluşan mikrodamlacıkla kenarındaki inceltilmiş fiberin optik görüntüsü. 13
Şekil 2-8: (sol) Kurulan mikroskop sistemindeki nem odacığında dört değişik fısıldayan galeri kipi (FGK)'nin zamanla spektral değişimi. (sağ) Bu spektral değişimden elde edilen yarıçapın zamana göre değişim eğrisi. 14
Şekil 3-1: Mikrodamla kontak açısı ölçümleri için deneysel düzenek. (üst) Kontrollü nem hücresinin gösterimi. (alt sol) Alttaşın, harmonik piezoelektrik dönüştürücü sürümüne frekans cevabı, bir yardımcı paralel lazer ışını ve bir dörtlü fotodiyotun kullanılmasıyla karakterize edilir. (alt sağ) Mikrodamla rezonans frekansının fiili algılanması, bir spektrografik ile karakterize edilen ters mikroskop konfigürasyonu ile gerçekleştirilir. 16
Şekil 3-2: Tek Kristal safir (sol) ve amorf cam (sağ) alttaşlar için sürücü frekansının bir fonksiyonu olarak alttaştan lazer ışını sapması. Işın sapması, altlık titreşim genliği ile doğrudan orantılıdır. 16
Şekil 3-3: Yüzeydeki mikrodamlaların harmonik salınıcı sürücüye cevabı. (sol) R = 5.0 μm yarıçaplı salınım yapan küresel bir damlacığın 3 farklı sürücü frekansındaki ışıma spektrumu. 602.3 nm'de merkezlenen fısıldayan galeri kipleri, yarı maksimumdaki tam genişlikleri ile karakterize edilirler (sağ). Yarı maksimumdaki tam genişlik, f frekansının bir fonksiyonudur. Deneysel verideki çarpı işaretleri ve Gaussian eğrisi, damlacığın f_{res}^{exp} = 141.1 kHz rezonans frekansını verir. 18
Şekil 3-4: En düşük-kip rezonans frekansının damlacık büyüklüğüne bağlılığı. LE1/etanol ve LE1/kloroform süperhidrofobik yüzeylerdeki damlacıklara ait deneysel veriler, sırasıyla daireler ve üçgenlerle gösterilmiştir. Doğrusal çizgiler, 177^0'lik kontak açısı (düşük frekans limiti), 160^0 kontak açısı (frekans ortaaralığı) ve 139^0 kontak açısı (üst frekans limiti) için Eşitlik 3.1'den hesaplanan rezonans frekans değerlerini göstermektedir. NaCl-su mikrodamlayı için diğer hesap parametreleri: γ = 74.62 mN/m [26], yoğunluk ρ = 1144.7 kg/m^3, ve kırılım indisi n = 1.3677 [27,28]. 18
Şekil 3-5: Süperhidrofobik yüzeylerin kontak açısı ölçümleri. Bir NaCl-su damlacığının doğrudan görüntülemesi (a) LE1/etanol kaplı (b) LE1/kloroform kaplı süperhidrofobik yüzeyler. (c) LE1/etanol kaplı (70 ölçüm, θ_{etanol} =166.7^0) ve LE1/kloroform kaplı (68 ölçüm, $\theta_{kloroform}$ =153.8^0) süperhidrofobik yüzeylerin mikroskopik θ kontak açılarına ait histogram. Kontak açıları, Şekil 3-4'deki verilerden Eşitlik 3-1 kullanılarak hesaplanmıştır. 19
Şekil 3-6: Çalışılan süperhidrofobik yüzeylerin SEM görüntüleri: (a) LE1/etanol kaplı süperhidrofobik yüzey ve (b) LE1/kloroform kaplı süperhidrofobik yüzey. SEM görüntülerinin içinde, aynı yüzeye ait daha yüksek büyütmeli SEM görüntüleri verilmiştir. 20
Şekil 3-7: Au elektrotların hazırlanma aşamaları. 22
Şekil 3-8: Koç Üniversitesi Nano-Optik Araştırma Laboratuvarı örnek hazırlama odasından görünüm. 23

Şekil 3-9: Mikrodamlaların hazırlanmasında kullanılan (sol) ultrasonik püskürtücünün (sağ) doymuş bir tuz/su çözeltisini içeren nem odacığının fotoğrafları. 23
Şekil 3-10: Au elektrotların arasındaki hidrofobik yüzey üzerindeki mikrodamlaların fotoğrafı. 24
Şekil 3-11: Titreşen mikrodamlaların kullanıldığı kontak açısı ölçümleri için deneysel düzenek. Damlacıklar, sıralı olarak piezoelektrik dönüştürücü kullanılarak AC elektrik alan ile sürülmektedir.... 25
Şekil 3-12: (a) R = 5.4 μm küresel çaplı ve yatay AC elektrik alan ile 3 farklı f frekansında uyarılan bir damlacığın ışıma spektrumu. (b) yatay elektrik alanla (üstteki grafik) ve piezoelektrik dönüştürücü ile (alttaki grafik) sürülen aynı damlacığın (a)'daki fısıldayan galeri kiplerinin) f frekansının bir fonksiyonu olarak yarı maksimum tam genişliği. Deneysel verideki çarpılar ve Gaussian eğrisi, sırasıyla $f^{exp}_{res;EF}$ = 119.3 kHz ve $f^{exp}_{res;PZT}$ = 119.5 kHz damlacık rezonans frekanslarını ortaya çıkarmaktadır..... 26
Şekil 3-13: (a) Ölçülen mekanik rezonans frekanslarının ($f$res) damlacığın küresel R çapına bağlılığı. Deneysel verlerdeki daireler ve üçgenler, damlacığın sırasıyla yatay elektrik alan ve piezoelektrik dönüştürücü ile sürülmesine aittir. Düz eğriler, 178^0 (düşük frekans limiti) ve 152^0 (yüksek frekans limiti) kontak açıları için Strani-Sabetta teorisi kullanılarak hesaplanan $f$res değerlerini göstermektedir. NaCl-su mikrodamlalar için diğer hesap parametreleri: yüzey gerilimi = 80.1 mN/m, yoğunluk = 1144.7 kg/m^3 ve kırılım indisi n = 1.3677 [4,26,28]. (b) Strani-Sabetta teorisi kullanılarak (a)'daki rezonans frekansları için hesaplanan kontak açıları [18]. 26
Şekil 3-14: Mikrodamlaların mekanik rezonanslarının belirlenmesi için kurulan deney düzeneğinin şematik görüntüsü. 28
Şekil 3-15: Bir mikrodamladan değişik uyarı şiddetlerinde elde edilen mekanik rezonans cevap eğrileri. 29
Şekil 3-16: Yüzey üzerinde duran mikrodamlaların ultra-yüksek kalite faktörü spektroskopisi için kullanılan deneysel düzenek. Işık detektörleri (PD1 ve PD2) inceltilmiş fiberin giriş ve çıkışında lazer gücünün izlenmesini sağlar 30
Şekil 3-17: (a) Hava ile sarılı gliserol-su damlasının etkileşim halinde olduğu inceltilmiş optik fiber dalga kılavuzunun pompa lazeri dalga boyuna göre düşük çözünürlüklü iletim spektrası. Spektrum alınma süresi ~100 s. (b) 635 nm sabit dalga boyunda aynı inceltilmiş fiber/damla sistemi için inceltilmiş fiber iletiminin zamana bağlı değişimi. FSR mikrodamla kovuğunun serbest uzay aralığını gösterir, siyah artı işaretleri kalite faktörü analizi için kullanılan temsili FGK'leri belirtir..... 31
Şekil 3-18: İnceltilmiş fiber ile etkileşim halinde olan küçülürken(a) ve büyürken(b) damlanın yüksek çözünürlükteki spektrasının zamana göre değişimi. Noktalı siyah oklar spektral kaymanın yönünü ve her bir alt grafiğin ilk spektrasındaki siyah eğriler temsili FGK'lerin üzerine oturtulan Lorentz eğrisini belirtir. Ortlama damla yarıçapı 190 μmdir ve damla yarıçapındaki hızın değişimi -0.1 nm/s ve 1.1 nm/s dır..... 32

Özet

Proje kapsamında su tutmayan yüzey üzerinde duran mikrodamlaların inceltilmiş fiber ile ultrayüksek çözünürlükte spektroskopisi için gerekli tüm deney düzenekleri kurulmuştur. Bu düzenekler: İnceltilmiş fiber hazırlama düzeneği, ve inceltilmiş fiberin mikrodamlaya kontrollü yaklaştırılmasını sağlayan özgün ters mikroskop düzeneğidir. Kurulan deney düzenekleri kullanılarak inceltilmiş fiber ile mikrodamlaların optik bağlaşması deneyleri laboratuvarımızda gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde gliserol-su mikrodamlaların kullanılarak fısıldayan galeri kiplerinin kalite faktörü 10^6 mertebesine kadar ölçülmüştür. Ayrıca proje süresince geleneksel ışıma spektroskopisi tekniği kullanılarak su tutmayan yüzey üzerinde duran mikrodamlaların temel mekanik rezonansları incelenmiş ve elde edilen sonuçlar mevcut analitik model ile karşılaştırmıştır. Dikey ya da yatay titreşimler ile mikrodamlaların temel mekanik rezonans frekanslarının ölçümü yöntemi ile mikrodamlaların su tutmayan yüzey üzerindeki kontak açılarının belirlenebildiği görülmüştür. Bu yeni yöntem mikrodamlaların kontak açılarının ölçümü için uluslararası alanda hemen kabul görmüştür. Projede elde edilen sonuçlar şu ana kadar uluslararası degilerde iki yayına dönüştürülmüştür, bir başka yayın ise hazırlanma aşamasındadır ve yakında bir uluslararası dergiye gönderilecektir.

Anahtar Kelimeler

Fısıldayan galeri kipi, süperhidrofobik yüzey, inceltilmiş optik fiber, optik spektroskopi

Abstract

With this project all the experimental setups required for ultrahigh resolution spectroscopy of microdroplets with tapered optical fibers have been built. These include: A fiber tapering setup, and a home-built inverted microscope which enables controlled positioning of a tapered fiber next to a microdroplet. With these setups, optical coupling between a tapered optical fiber and a microdroplet has been achieved and quality factors more than 10^6 have been measured for whispering gallery modes of glycerol-water microdroplets on a superhydrophobic surface. Using traditional fluorescence microscopy, fundamental mechanical resonances of microdrolets standing on a superhydrophobic surface have also been characterized and the results have been compared with existing analytical models. Our studies using both vertical and horizontal vibrations showed that the measurement of the mechanical resoncance frequency can serve as a novel method for contact angle determination of microdroplets standing on a superhydrophobic surface. This new mothod has been immediately accepted by the international community. Up to now, project results have been published in two international journal poublications. One other publication is currently in preparation and will soon be submitted to an international journal.

Keywords

Whispering gallery mode, superhydrophobic surface, tapered optical fiber, optical spectroscopy

1 Giriş

Ayarlanabilir büyüklüklere, şekillere ve kırılım indislerine sahip sıvı mikrodamlalara dayanan optik mikrokovuklar, yüksek kaliteli optik rezonansları (fısıldayan galeri kiplerini) barındırırlar [1]. Bu özellikleri, mikrokodamlaarıı, ışık kaynakları, kimyasal sensörler ve biyosensörler gibi çip entegreli optofluidik uygulamalarda kullanışlı hale getirmiştir [2]. Mikrodamlaların optofluidik sistemlerde kullanılmasını içeren pek çok yöntem geliştirilmektedir [3]. Bu yöntemler arasında su tutmayan (süperhidrofobik) yüzeylerin kullanımı önemli bir yer tutar [4]. Bu gibi bir yüzey üzerinde duran damlaların küresel simetrik şeklini çok az bozarak onların pozisyonlarını sabitler ve bununla birlikte entegre dalgakılavuzları gibi çip-içinde-laboratuvar tipi (lab-on-a-chip) cihazlarının damlalarla etkileşimine imkan sağlar.

Projenin amacı su tutmayan yüzey üzerinde duran tek sıvı mikrodamlaların ultrayüksek çözünürlükte optik spektroskopisinin gerçekleştirilmesi olmuştur. Bu kapsamda en uygun yöntem olarak ilnceltilmiş fiber ile taranabilen bir lazerin mikrodamlaya optik bağlaşması yöntemi [5,6,7] seçilmiş ve bu yönde çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışmalarda optik fiber inceltmek için bir düzenek kurulmuş ve bu düzenek ile inceltilen fiberler karakterize edilmiştir. İnceltilmiş fiberlerin bir mikrodamlaya kontrollü bir şekilde yaklaştırılması için gerekli ters mikroskop kurulmuş ve bu mikroskop ile bir inceltilmiş fiberin mikrodamlaya kontrollü yaklaşması gösterilmiştir. Daha sonra inceltilmiş fiberler ile mikrodamlaların optik bağlaşması başarılmış ve fısıldayan galeri kiplerinde (FGKlerde) 10^6 değerinin üzerinde ultrayüksek kalite faktörleri ölçülmüştür.

Ayrıca, ultrayüksek çözünürlükte spektroskopi deneylerinde gözlenmesi planlanan optomekanik bağlaşma konusu ile ilgili olarak mikrodamlaların mekanik rezonanslarının karakterizasyonu konusunda ilerlenmiş ve su tutmayan yüzey üzerinde duran mikrodamlaların temel mekanik rezonansları karakterize edilmiştir. Bu çalışmalarda mekanik rezonanslar iki şekilde uyarılmıştır: Alttaşın belli bir frekansta sallanması ile dikey yönde mekanik olarak ve yatay bir elektrik alan uygulanması ile elektriksel olarak. Bu deneylerin sonuçları kuramsal çalışmalar ile karşılaştırılmış ve bu tekniğin mikrodamlaların kontak açılarının ölçülmesi için yeni bir yöntem olarak kullanılabileceği anlaşılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar proje özet bilgi formunda belirtilen ve rapora eklenen uluslararası dergi makelelerii ve konferans sunumları ile uluslararası bilim topluluğuna sunulmuştur.

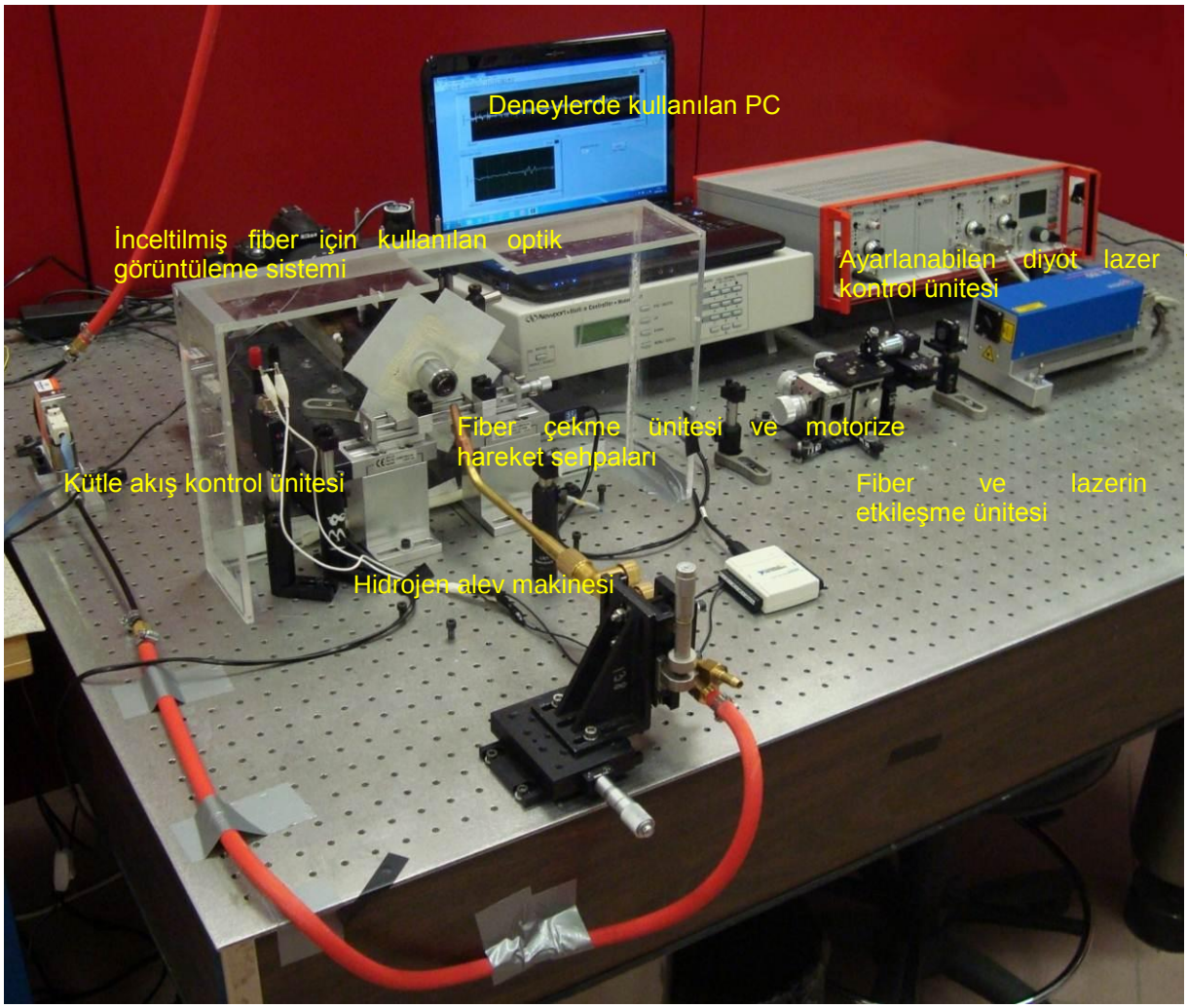
İki senelik proje süresince gerçekleştirilen çalışmalar aşağıdaki alt başlıklarda toplanmıştır:

a) Fiber inceltme düzeneğinin tasarımı, kurulumu ve testi
b) Deneysel sonuçlar:
    i) Dikey titretişimlerle mikrodamla mekanik rezonanslarının incelenmesi
    ii) Yatay titretişimlerle mikrodamla mekanik rezonanslarının incelenmesi
    iii) Pozisyona hassas fotoalgılayıcı ile mikrodamlaların mekanik rezonanslarının incelenmesi
    iv) İnceltilmiş fiber ile mikrodamla optik rezonanslarının ultreayüksek çözünürlükte karakterizasyonu

Bu altbaşlıklar ilerleyen bölümlerde detaylandırılmaktadır.

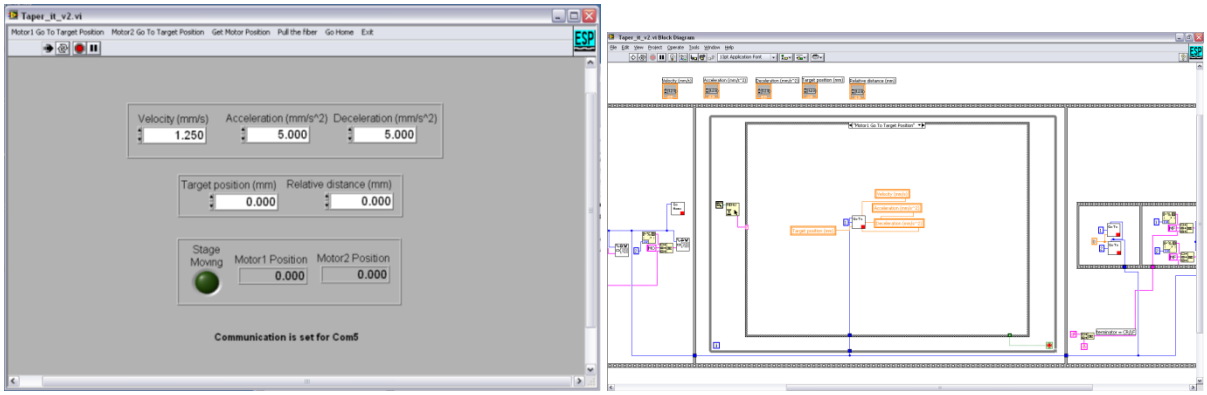
2 Deneysel Düzenek

2.1 Hidrojen Alevi ile Isıtılırken Doğrusal Motorize Hareket Sehpaları Tarafından Çekilerek Oluşturulan İnceltilmiş Fiber Düzeneğinin Tasarımı ve Kurulumu



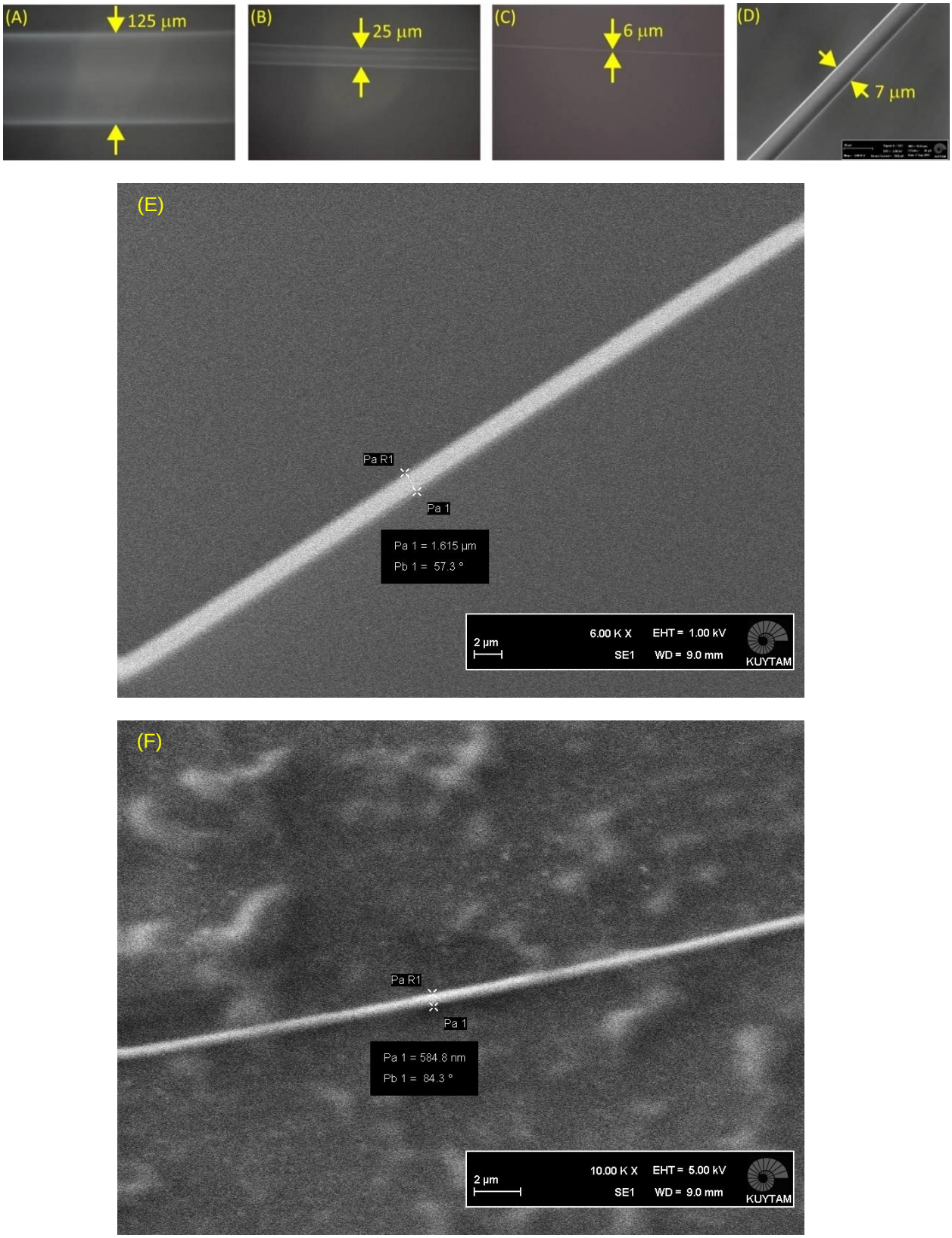
Şekil 2-1: İnceltilmiş fiber hazırlama düzeneği. Kontrollü olarak hidrojen gazı ile ısıtılan fiber kontrollü bir şekilde çekilerek inceltilir. Profesyonel bir fotoğraf makinası ve uzun çalışma mesafesine sahip bir hava objektifi yardımı ile inceltime işlemi izlenmektedir. Daha sonraki deneylerde inceltme işlemi sırasında fiberden lazer geçirilerek çıkan lazer tek mod özelliği taşıyana kadar inceltme işlemine devam edilecektir.

Fiber inceltme işlemi için kurulan düzenek Şekil 2-1'de görülmektedir. Fiber inceltme işlemi için lazer ile ısıtma gibi alternatiflere göre daha ucuz ve pratik olan hidrojen gazı kullanılmıştır. Fiber inceltme işlemine başlamadan önce fiberin dış kısmındaki plastik kaplama sıyırılarak kaldırılır. Isıtma işlemi sırasında fiber çekmek için iki tane motorize hareket sehpası (Newport MPA-PP) ve hareket kontrolörü (Newport, ESP301) kullanılmaktadır. Motorların hız, ivme ve pozisyonlarını kontrol etmek için Şekil 2-2'de gösterilen LabVIEW programı kullanılmaktadır. Fiberin ne kadar inceldiği düzeneğe monte edilen profesyonel bir fotoğraf makinası (Nikon D5000) ve uzun çalışma mesafesi olan bir mikroskop objektifi ile (Mitutoyo, 50X, 0.55 NA) izlenmektedir.

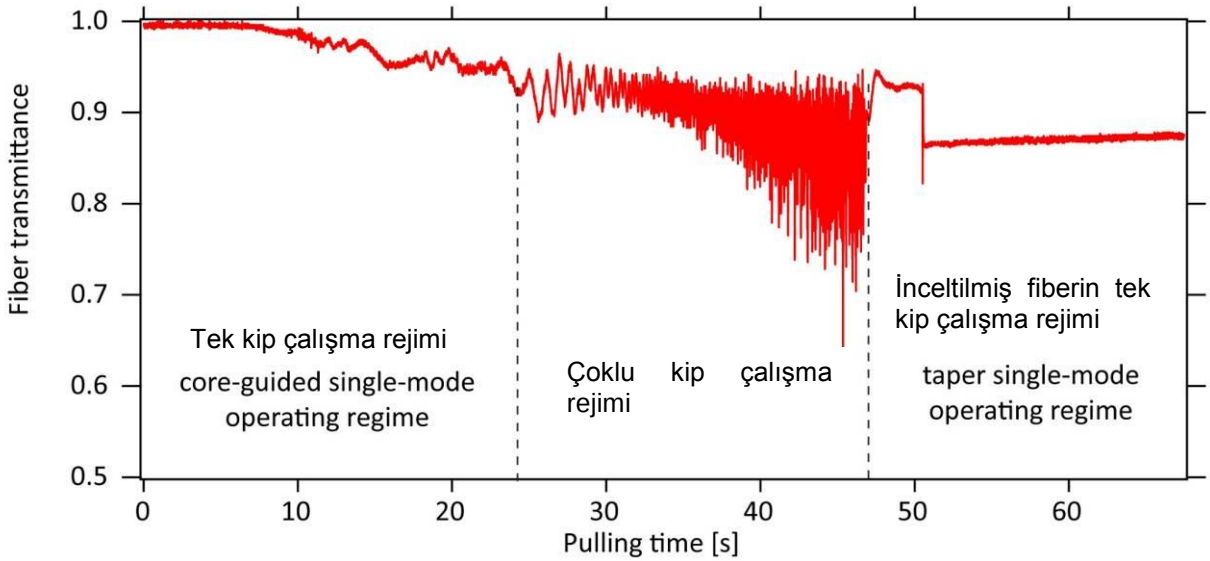


Şekil 2-2: Motorize hareket sehpalarını kontrol etmek için kullanılan LabVIEW programı.

İnceltilmiş fiber – mikrodamla optik bağlaşmasının sağlanması için gerekli olan kalınlığa sahip ve düşük kayıplı inceltilmiş fiber üretmek için kullanılıcak uygun deney parametrelerini (gaz akış miktarı, alev makinesinin yüksekliği, DC motorların hızı) bulmak üzere birçok deneme yapılmıştır. Bu denemeler sonucu fibe inceltmekte kullanılacak parametrelerin belirlenmesi tamamlanmıştır. Fiber inceltme deneylerinden elde edilen inceltilmiş fiberleri bazı optik ve taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 2-3'de sunulmaktadır. Şekil 2-3a'da, fiber inceltme işleminin başında fiber kalınlığının 125 μm olduğu görülmektedir. Fiber inceltme işlemi sırasında, motorların birinin hareket mesafesi arttıkça kaydedilen fiber görüntüleri Şekil 2-3b ve c'de gösterilmektedir. Motorların hareketiyle fiberin kalınlığının düzenli olarak inceldiği görülmektedir. Şekil 2-3'de görüldüğü gibi fiber kalınlığı yaklaşık 600 nm'ye kadar inceltilebilmiştir. Ulaşılan 1 μm altındaki fiber kalınlıkları mikrodamlaların optik rezonansları ile optik bağlaşma sağlanması için yeterli düzeydedir. Ayrıca fiber inceltme işlemi sırasında lazerin ışık geçirgenliği kaydedilerek fiberin tekrar tek kip çalışma rejimine geçtiği gözlemlenmiştir (Şekil 2-4) [8]. Elde edilen parametrelerle yapılan inceltme işlemi ile son geçen lazer ışık miktarının %90 dan fazla olduğu tespit edilmiştir.

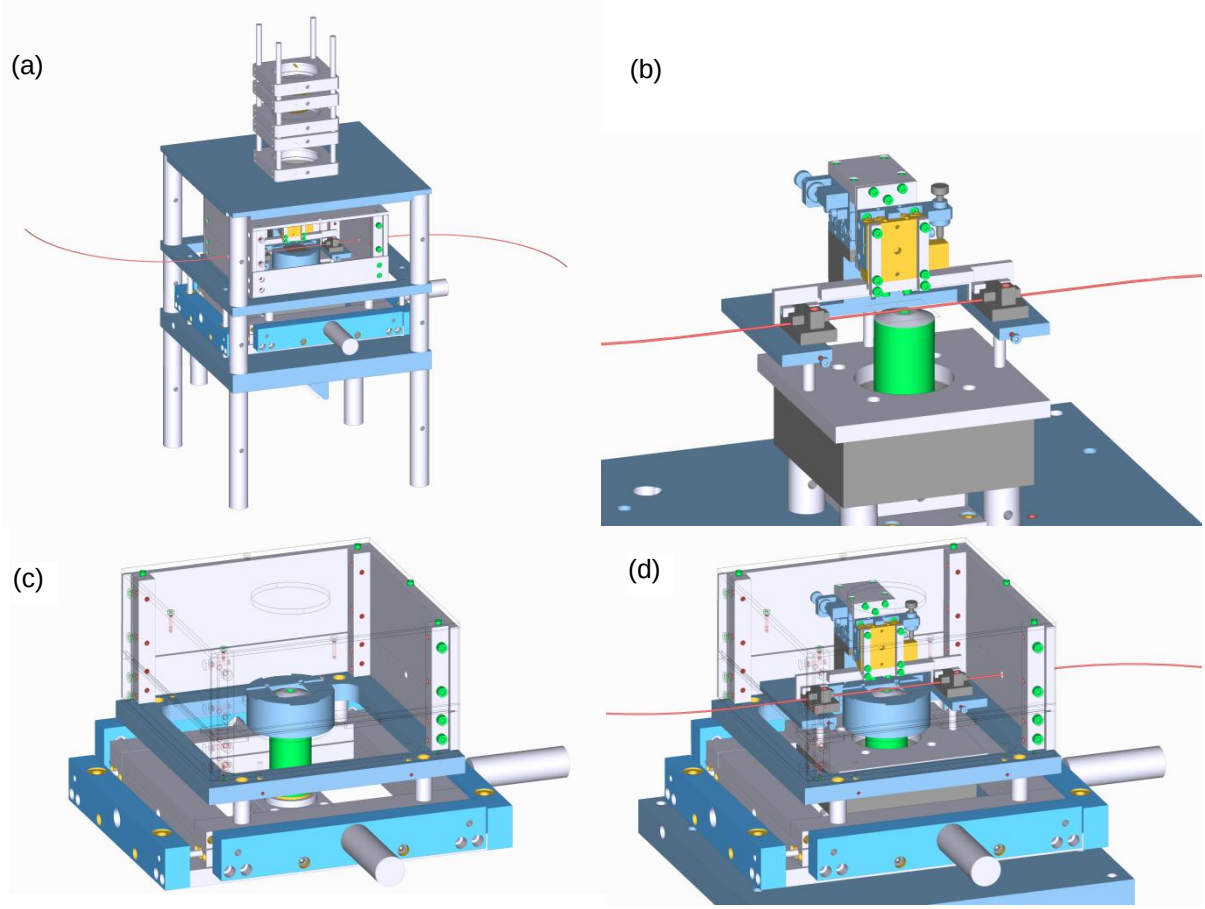


Şekil 2-3: Üretilen inceltilmiş fiberlerin optik ve taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. Fiber kalınlıkları A: 125 µm, B: 25 µm, C: 6 µm, D: 7 µm, E: 1.6 µm ve F: 0.6 µm.



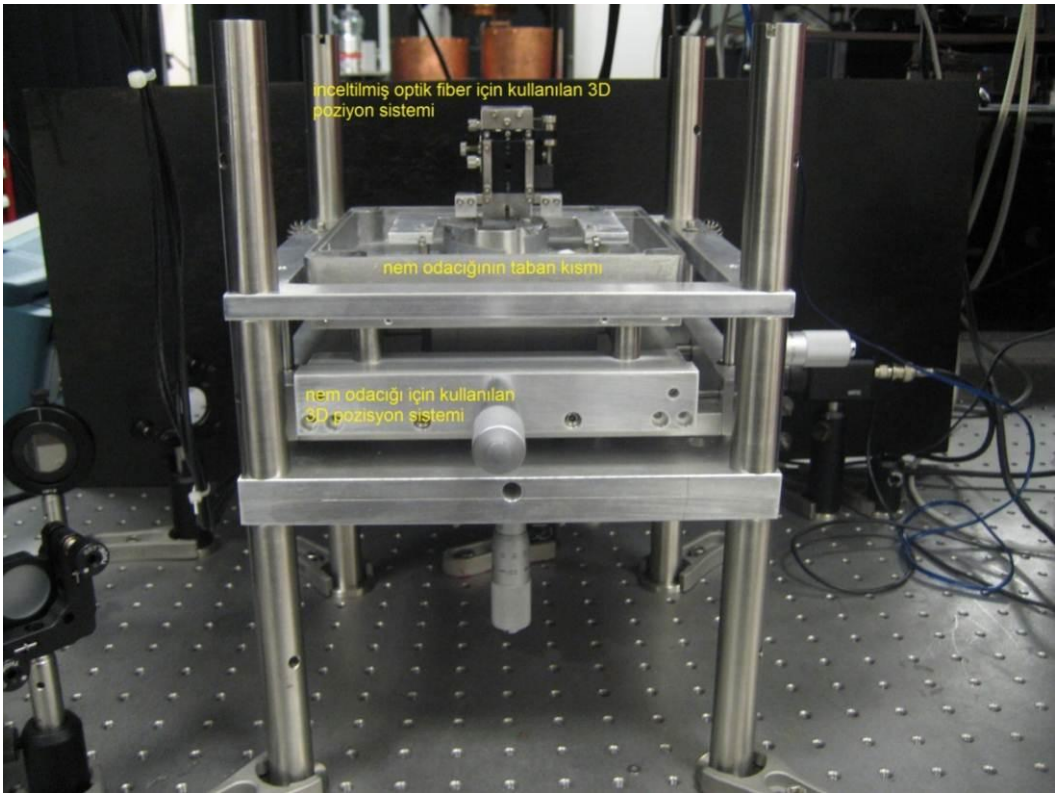
Şekil 2-4: Fiber inceltme işlemi sırasında fiberin ışık geçirgenliği kaydedilmiştir. Geçen ışık şiddetindeki salınımların ani düşmesi fiberin tekrar tek kip çalışma rejimine geçtiğini göstermektedir.

2.2 Nemi Kontrol Edilebilen Odacıktaki Yüzey Üzerinde Duran Mikrodamların İnceltilmiş Fiber ile Optik Spektroskopisi için Geliştirilen Ters Mikroskopun Tasarımı ve Kurulumu



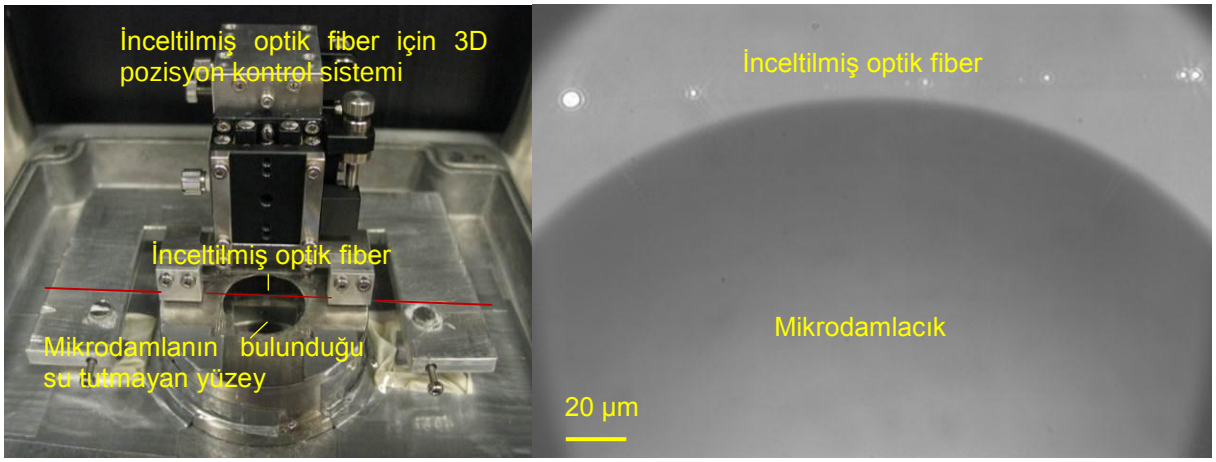
Şekil 2-5: Tasarlanan ters mikroskobun mekanik çizimleri. **(a)** Fiber hizalama sistemi ile deneylerde kullanılacak nem odacığı (merkezde), üç boyutlu örnek hizalandırma sehpası (merkezde aşağıda) ve mikroskop aydınlatma sistemi (yukarıda) görülmektedir. **(b)** İnceltilmiş fiberin hizalanmasında kullanılacak çift konumlandırma sisteminin yakın görünümü. Üç boyutlu piezoelektrik hareket sehpası (aşağıda) fiberi tutan üç boyutlu mekanik hareket sehpasının (yukarıda) hassas hizalanmasında kullanılır. Tasarımımızda mikroskop objektifinin pozisyonu sabit kalır, örnek (fiberin altında görünen cam lamel) nem odacığı ile birlikte hareket ettirilir. **(c)** Örnek hizalandırma sistemi ile birlikte nem odacığının görüntüsü. **(d)** Tüm hizalama sistemleri, fiber tutucuları ile birlikte deneylerde kullanılacak nem odacığının görüntüsü.

İnceltilmiş fiber ile mikrodamlaların ultrayüksek spektroskopisi [5,6,7] deneyleri için Şekil 2-5'de CAD çizimleri gösterilen özgün bir ters mikroskop geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen özgün tasarım ile inceltilmiş fiberin üç boyutlu olarak örneğe göre hassas konumlandırılması, örnek bir nem odacığının içinde iken başarılabilecektir. Tasarlanan ters mikroskopta örnek, örnek odacığıyla birlikte üç boyutlu olarak hareket ettirilirken mikroskop objektifi sabit kalır. Buna paralel olarak inceltilmiş fiber mikroskop gövdesini çiftli bir hassas konumlandırma sistemi ile bağlanır. Bu hassas konumlandırma sistemi mikrometre hassasiyetinde hareket eden bir üç boyutlu hareket sehpası ile nanometre hassasiyetinde hareket eden bir piezoelektrik hareket sehpasının birleştirilmesi ile elde edilir. Tasarlanan tüm hareket sistemleri modüler bir yapıdadır, gerektiğinde hizalamalar rahatça yapılabilecektir. Geliştirilen bu ters mikroskop inceltilmiş fiberlerin cam lamel üzerinde duran tek mikrodamlalara nanometre çözünürlüğünde yaklaştırılmasına imkan verecektir. Geliştirdiğimiz ters mikroskopun mekanik CAD çizimlerini takiben parçalarının tümünün üretimi tamamlanmış ve parçaların laboratuvarımızda birleştirilerek mikroskop tümüyle işlevsel hale getirilmiştir (Şekil2-6).



Şekil 2-6: Üretimi tamamlanan ters mikroskobun görüntüsü.

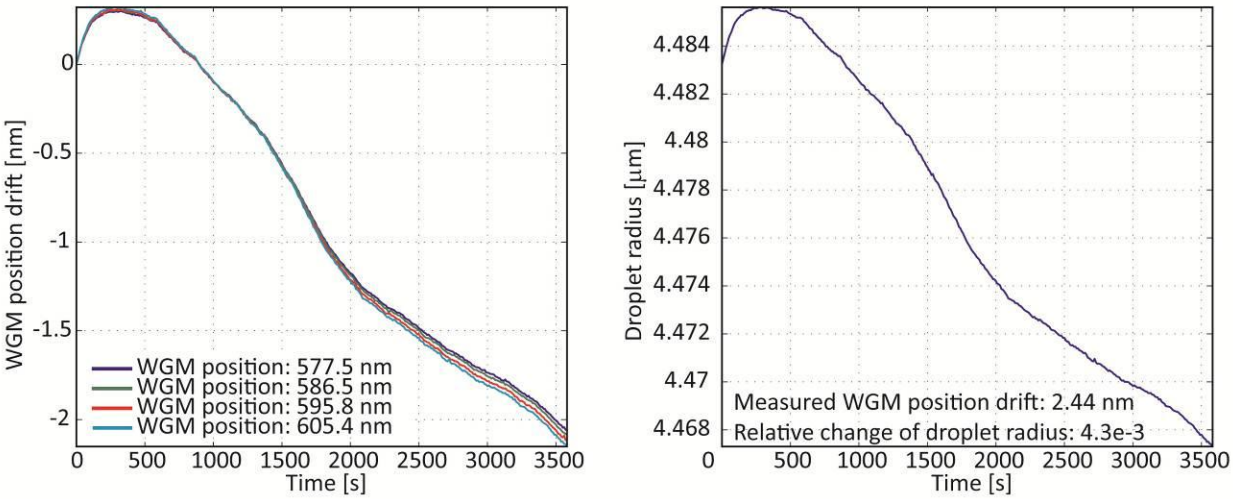
Yüzey üzerinde duran mikrodamlacıkların optik spektroskopisi için gerekli olan ısısal ve mekanik stabiliteyi sağlayan ve daha kullanışlı olan ters mikroskop tasarlanmış ve üretimi ile kurulumu gerçekleştirilmiştir (Şekil 2-7, sol). Tasarlanan bu mikroskobun detayları bir önceki gelişme raporumuzda sunulmuştur. Dönem süresince bu mikroskop kullanılarak ilk ölçüm denemeleri gerçekleştirilmiştir. Öncelikle inceltilmiş fiberin mikrodamlaya göre hassas konumlandırılması denemeleri gerçekleştirilmiştir. Piezoelektrik bir hareket sehpasının yardımıyla su tutmayan yüzey üzerinde duran tek bir mikrodamlacığa göre inceltilmiş fiberin 3-D pozisyonu mikron-altı çözünürlükte başarılmıştır (Şekil 2-7, sağ).



Şekil 2-7: (sol) İnceltilmiş fiberin seçilen mikrodamlacığa göre göreceli posizyonunu mikron-altı düzeyde ayarlamak için kullanılan 3-D poziyon kontrol sistemi. (sağ) Yüzey üzerinde duran su/gliserol karışımından oluşan mikrodamlacıkla kenarındaki inceltilmiş fiberin optik görüntüsü.

Mikrodamlacıkların hacimlerindeki sabitliği sağlamak için mikroskopta doymuş inorganik tuz çözeltileri ile nemi ayarlanabilen odacık yer almaktadır. (Tipik bağıl nem oranı magnezyum nitrat ile %53'den

potasyum sulfat ile %97'ye kadar değiştirilebilmektedir.) Kurulan mikroskobun performansı titreşen mikrodamlacıkların mekanik rezonanslarının ve nem odacığı içindeki damlacıkların hacimlerindeki sabitliğin zamana göre incelenmesiyle test edilmiştir (Şekil 2-8). Nem odacığı içindeki damlacığın fısıldayan galeri kiplerinin posizyonundaki tipik spektral kayma miktarının 3 nm/saat olduğu gözlenmiştir. Bu da mikrodamlacığın hacimdeki değişiminin 5e-3/saat ten daha küçük olmasına denk gelmektedir. Bu seviyelerde hacim sabitlenmesi ileriki bölümlerde açıklanan inceltilmiş fiber-mikrodamla optik bağlaşmasının gözlenmesi için yeterlidir.



Şekil 2-8: (sol) Kurulan mikroskop sistemindeki nem odacığında dört değişik fısıldayan galeri kipi (FGK)'nin zamanla spektral değişimi. (sağ) Bu spektral değişimden elde edilen yarıçapın zamana göre değişim eğrisi.

3 Deneysel Sonuçlar

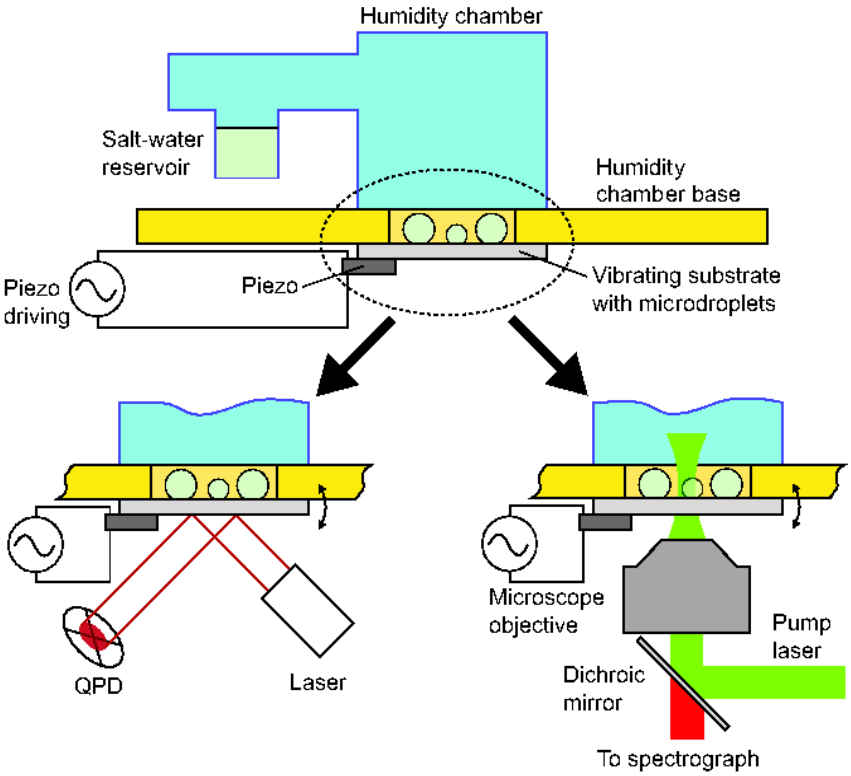
3.1 Mikrodamla Mekanik Rezonanslarının İncelenmesi Deneyleri

3.1.1 Dikey Titretişimlerle Mikrodamla Mekanik Rezonanslarının İncelenmesi

Mikroelektromekanik ve optofluidik sistemlerdeki potansiyel uygulamalarından dolayı süperhidrofobik yüzeylere olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır [4,9,10,11]. Süperhidrofobik bir yüzeyin ıslanma özellikleri, sıvı-katı-gaz etkileşiminin ortalama enerji dengesiyle karakterize edilen θ kontak açısıyla açıklanabilir [12]. Süperhidrofobik yüzeylerin makroskopik ölçülerin üzerindeki (>100 μm) θ kontak açısı değerini ölçmek için birçok teknik mevcuttur, fakat bu teknikler, yüzeyin kimyası ve/veya topografisinin milimetre ölçekli farklılıklarından kaynaklanan θ değişimlerinin araştırılmasına imkan vermemektedir [13,14,15]. Atomik kuvvet mikroskopisine (AFM) [16] veya taramalı elektron mikroskopisi (SEM) [17] görüntülemesine dayanan alternatif metotlar, sırasıyla θ kontak açısının elde edilebilir aralığı ($\theta < 90^0$) veya ortam atmosferinin nemi ile sınırlandırılmıştır.

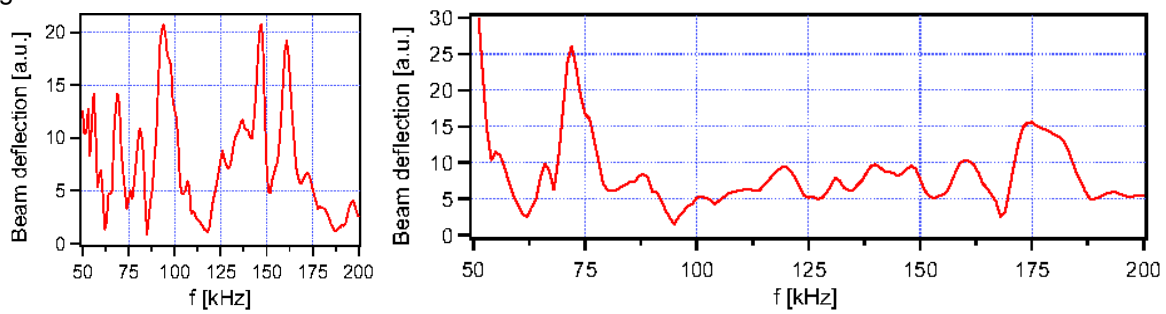
Projemiz süresince, titreştirilen süperhidrofobik bir yüzey üzerinde bulunan mikrometre ölçekli bireysel sıvı damlalarının mekanik rezonanslarının analizine bağlı olarak mikroskopik kontak açılarının ölçümü için yeni bir metot bulunmuştur. Bu amaçla, bu çalışmada, damlacığın mekanik rezonanslarının ve büyüklüklerinin eşzamanlı olarak belirlenebilmesi için ışıyan boya içeren damlacıkların lazer ışınıyla uyarılmasıyla elde edilen fısıldayan galeri kiplerinin (FGK) optik spektroskopisi kullanılmıştır. Damlacıklar, optik mikrokovuk rolü üstlenmişlerdir [4] ve damlacıkların ışıma spektrumu, spektral genişlikleri damlacığın titreşim genliklerine bağlı olan fısıldayan galeri kiplerini karakterize eder. Fısıldayan galeri kipinin genişliğini, farklı büyüklüklü damlaların altlık titreşim frekanslarının bir fonksiyonu olarak izleyerek, damlacıkların maksimal fısıldayan galeri kiplerinin genişlemesinin olduğu frekanslardaki rezonans frekansları belirlenmiştir. Ardından, damlacık büyüklüğü, Lorenz-Mie saçılma teorisi kullanılmasıyla fısıldayan galeri kiplerin kip-eşleştirmesi ile belirlenmiştir. Verilen bir damlacık için, θ kontak açısı, yüzeyde duran damlacığın aksisimektrik salınımları için geliştirilen teori kullanılarak, damlacık mekanik rezonans frekansının ve büyüklüğünün bağımsız ölçümlerinden elde edilmiştir [18,19]. Bu çalışmada, bu teknik kullanarak, farklı seviyede süperhidrofobikliklere sahip iki altlık üzerindeki damlacıkların mikroskopik kontak açıları ölçülmüştür ve aynı yüzeydeki milimetrik damlacıkların ortalama kontak açıları arasında iyi bir korelasyon bulunmuştur. Damlacık titreşim frekansının ölçümü kullanılarak kontak açısının ölçülmesi daha önceden sadece milimetrik damlalar için gösterilmiştir [20]. Ancak, Ref. 20'de, kontak açısı 110^0'den büyük değildir. Ayrıca, deneylerde, bir damlacığın mekanik rezonansının ve büyüklüğünün yüksek kesinlikle eşzamanlı olarak belirlenmesinde fısıldayan galeri kipleri kullanılmamıştır.

Deneylerde kullanılan süperhidrofobik yüzeyler, hidrofobik silika nanoparçacıklar (Aeroxide LE1, ortalama parçacık büyüklüğü 14nm; Evonik) içeren solüsyonun temiz lameller üzerine spin kaplama yöntemiyle kaplanmasıyla elde edilmiştir. Yüzeyin süperhidrofobiklik seviyesi, spin kaplama öncesinde nanoparçacıkların farklı çözücülerde çözünmesiyle hazırlanan çözeltiler (50 mg LE1/1 mL etanol veya kloroform) kullanılarak elde edilmiştir. Rhodamine B katkılı NaCl-su mikrodamlalar (2.5MNaCl, 100 μM Rhodamine B), süperhidrofobik yüzeye bir ultrasonik püskürtücü yardımıyla atmosferik ortam şartlarında püskürtülmüştür. Süperhidrofobik film kaplı lamelin diğer yüzeyine, lamele dik yönde damlacık salınımlarını uyaran bir piezoelektrik dönüştürücü yapıştırılmıştır (Şekil 3-1). Daha sonra, yüzeyinde mikrodamlaları bulunduran örnek, % 84 sabit su-nemine sahip ve sulu KCl solüsyonu içeren ölçüm hücresinin alt kısmına tutturulmuştur. Optik spektroskopi deneyleri, ters mikroskop geometrisi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3-1, alt sağ).



Şekil 3-1: Mikrodamla kontak açısı ölçümleri için deneysel düzenek. (üst) Kontrollü nem hücresinin gösterimi. (alt sol) Alttaşın, harmonik piezoelektrik dönüştürücü sürümüne frekans cevabı, bir yardımcı paralel lazer ışını ve bir dörtlü fotodiyotun kullanılmasıyla karakterize edilir. (alt sağ) Mikrodamla rezonans frekansının fiili algılanması, bir spektrografik ile karakterize edilen ters mikroskop konfigürasyonu ile gerçekleştirilir.

Deneylerde, seçilen bir damlacığın çeperine yakın bir bölgeye sürekli dalga kipinde çalışan yeşil bir pompa lazeri (λ = 532 nm, 4.5mW maksimum güç) dar hüzmeyle odaklamak için bir hava mikroskop objektifi (mümerik açı = 0.8, 60x; Nikon) kullanılmıştır. Damlacıkta uyarılan ışıma daha sonra aynı mikroskop objektifi ile toplanıp, ışığın spektroskopik bir CCD kamera ile algılanmasından önce dağıtılmasını sağlayan 1200 gr/mm kırınım ızgaralı 500 mm'lik monokromatöre (spektral çözünürlük = 0.07 nm, SpectraPro; Acton Research) gönderilmiştir. Bir yüksek gerilim yükselteci (WMA- 300; Falco Systems), bir sinyal jeneratörünün (33220A; Agilent) çıkışına bağlanarak piezoelektrik dönüştürücünün yaklaşık 300 V tepe-tepe sinüs sinyali ile değişen frekanslarda sürülmesi sağlanmıştır. Hazırlanan her örnek hücresi için, altlığın titreşim cevabı, bir dörtlü fotodiyot kullanılarak titreşen altlıktan yansıyan bir lazer ışınının sapması ölçülerek karakterize edilmiştir. (Şekil 3-1, alt sol). Şekil 3-2, deneylerde kullanılan tek Kristal safir ve amorf cam alttaşların tipik titreşim cevapları gösterilmektedir.



Şekil 3-2: Tek Kristal safir (sol) ve amorf cam (sağ) alttaşlar için sürücü frekansının bir fonksiyonu olarak alttaştan lazer ışını sapması. Işın sapması, altlık titreşim genliği ile doğrudan orantılıdır.

50 ile 200 kHz arasında oldukça büyük altlık titreşim genlikleri gözlenmiştir. Bu, bu çalışmadaki mikrometre büyüklüklü damlacıkların en düşük dereceli aksisimetrik mekanik rezonanslarını içeren kritik bir frekans aralığıdır [18]. Alttaşın elastiklik özelliğine ve yerleştirilmesine bağlı olarak, deneylerde

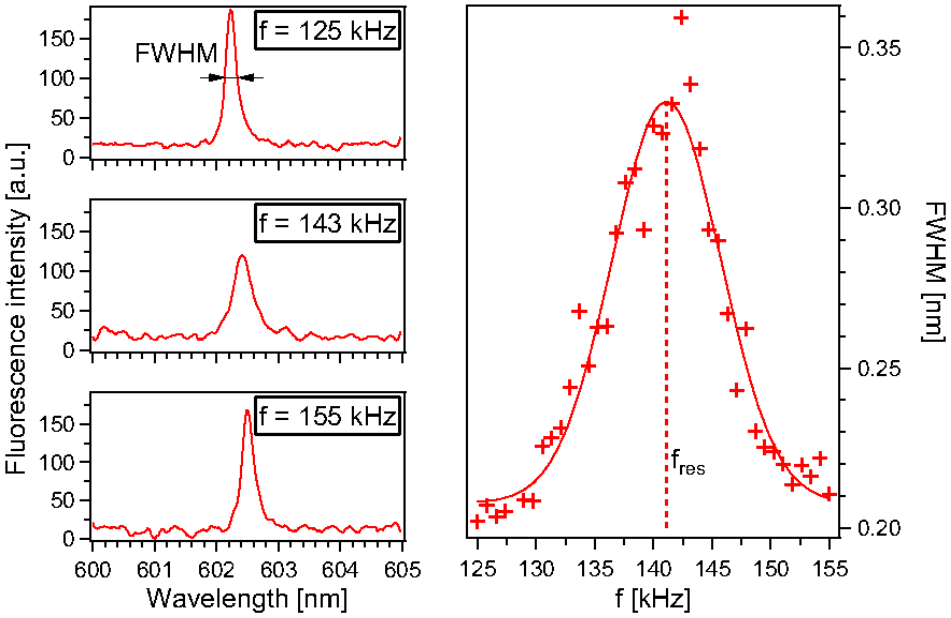
kullanılan farklı alttaşların titreşim cevaplarında çeşitlilik gözlenmiştir (Şekil 3-2). Mümkün olduğunca düz titreşim cevabına sahip oldukları için deneylerde amorf cam alttaş tercih edilmiştir. Böylece çalışılan her bir damlacığın mekanik rezonans frekansının civarında yaklaşık olarak sabit salınım kuvveti sağlanmıştır. Her bir mikrodamladan ışıma spektrumu kaydedilirken gerçekleşen piezosürücü frekansının taranması ile kontak açısı ölçümleri uyum içindedir. Damlacık mekanik rezonansları, sürücü frekansının bir fonksiyonu olarak fısıldayan galeri kiplerinin analiz edilmesiyle ortaya çıkarılmıştır. 50-200 kHz frekans aralığında, her bir çalışılan damlacık için sadece tek bir mekanik rezonans frekansı gözlenmiştir. Şekil 3-3, bir NaCl-su mikrodamlanın fısıldayan galeri kipinin yarı maksimumdaki tam genişliğinin mekanik sürücü f frekansıyla nasıl değiştiğini göstermektedir. Titreşen damlacığın ışıma spektrumundaki fısıldayan galeri kipleri, mekanik rezonans frekansına yaklaşıldıkça önemli ölçüde genişleme göstermektedir. Bu durum, rezonansta, damlacık kovuğunun optik kalite faktörünü düşüren şekilsel salınımlardan kaynaklanmaktadır [1]. Ölçülen veriden elde edilen Gaussian eğrisindeki asıl rezonans, kendini açıkça f_{res}^{exp} = 141.1 kHz frekansında belli eder. Duran damlacıkların titreşimi oldukça yoğun şekilde çalışılmaktadır ve damlacık rezonans frekansları için çeşitli modeller öngörülüp önerilmektedir [21,22,23]. Deneylerde, şekilleri, tamamen yerçekiminin etkisinin ihmal edildiği yüzey gerilimiyle belirlenen, dikey olarak sürülen mikrometrik küresel damlacıklar kullanılmıştır, buna en uygun model ise Strani ve Sabetta tarafından geliştirilen salınım modelidir [18]. Bu modelde, en düşük aksisimetrik salınım frekansı f_{res},

$$f_{res} = (2\pi)^{-1}\left[\frac{\gamma}{\rho R^3 \lambda_1(\theta)}\right]^{1/2} \quad (3\text{-}1)$$

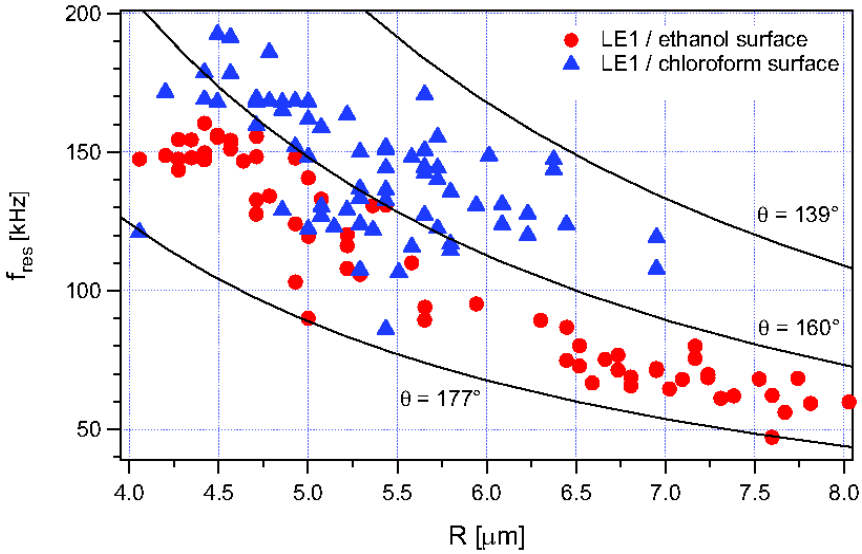
ile verilir. Burada γ, ρ ve R sırasıyla, sıvının yüzey gerilimi, sıvının yoğunluğu ve damlacığın küresel yarıçapına karşılık gelmektedir. $\lambda_1(\theta)$, θ kontak açısına bağlı olan en düşük frekans moduyla (mod sayısı 1) ilişkili olan özdeğerdir. Bu nedenle, malzeme özellikleri ve büyüklüğü bilinen bir damlacık için, θ kontak açısının değeri Eşitlik 3-1 ve ölçülen resonans frekansı f_{res}^{exp} kullanılarak belirlenebilir. Bununla birlikte, küçük damlacıkların titreşimleri oldukça hassas olduğunda, fısıldayan galeri kipleri, damlacığın küresel yarıçapı R ölçülebilir.

Deneylerimizde kaydedilen ışıma spektrumları, polarizasyon ve kip düzeni ile tanımlanan aynı kip ailesine sahip en az üç fısıldayan galeri kipini içeren 39.1 nm'lik bir spektral aralığı kapsamaktadır. Lorenz-Mie saçılma teorisi çerçevesinde, R'nin değeri, bu fısıldayan galeri kiplerinin doğrudan kip-eşleştirilmesiyle elde edilmiştir [1,24,25]. Bu yaklaşımda, R, ölçülen fısıldayan galeri kipi spektral pozisyonları arasındaki en iyi eşleşmeyi sağlayan damlacık büyüklük parametrelerinin $a_i = (2\pi R)/\lambda_i$ olarak bulunmasıyla belirlenmiştir ve bu parametreler, n = 1.3677 damlacık kırılım indisi için hesaplanmıştır. Burada, λ_i, verilen damlacık ışıma spektrumundaki fısıldayan galeri kiplerin deneysel olarak belirlenen vakum dalgaboylarını gösterir.

Şekil 3-3'deki durum için, Lorentz-Mie saçılması ile fısıldayan galeri modları eşleştirilerek yarıçap R = 5.0 μm olarak belirlenmiştir. R değerlerindeki belirsizliğin (esasen damlacık kırılma indisinin belirsizliğinden kaynaklanır) 100 nm'den az olacağı tahmin edilmiştir. Şekil 3-4, iki farklı süperhidrofobik yüzeyde (LE1/etanol kaplama, kırmızı daireler; LE1/kloroform kaplama, mavi üçgenler) duran çeşitli küresel R yarıçaplarına sahip mikrodamlalar için f_{res}^{exp} dağılımını gösterir. Çalışılan her iki yüzey için, deneysel veriler birçok altlık için kaydedilmiştir ve verilerin bir altlıktan diğer altlığa önemli bir değişiklik göstermediği görülmüştür. Ayrıca, grafikteki rezonans frekansları (f_{res}), kontak açısına bağlı $\lambda_1(\theta)$ özdeğerlerine sahip birçok kontak açısı için eşitlik 3-1 kullanılarak hesaplanmıştır. Ölçülen ve hesaplanan en düşük-kip rezonans frekansları kıyaslandığında, aslında damlacığın rezonans davranışının Strani ve Sabetta'nın geliştirdiği formalizm ile oldukça iyi açıklanabildiği anlaşılmıştır. R yarıçaplı damlacıklar için ölçülen rezonans frekanslarındaki dağılım, esasen ışık mikroskobu, AFM ve SEM görüntülerinden anlaşıldığı üzere, süperhidrofobik yüzeylerin yerel kimyasal yapısından ve/veya topografisinden kaynaklanmaktadır ve bu durum kontak açısı histerisisine yol göstermektedir. Ayrıca, rezonans frekansındaki ilave belirsizlikler, örnek hücresinin mekanik olarak salınan sürücüye düzensiz cevabından kaynaklanmaktadır (Şekil 3-1). Şekil 3-4'de verilen deneysel veriler, damlacığın mekanik rezonans frekanslarının, LE1/etanol-kaplı ve LE1/kloroform-kaplı süperhidrofobik yüzeylerdeki damlacıklarınkinden farklı olduğunu göstermektedir.



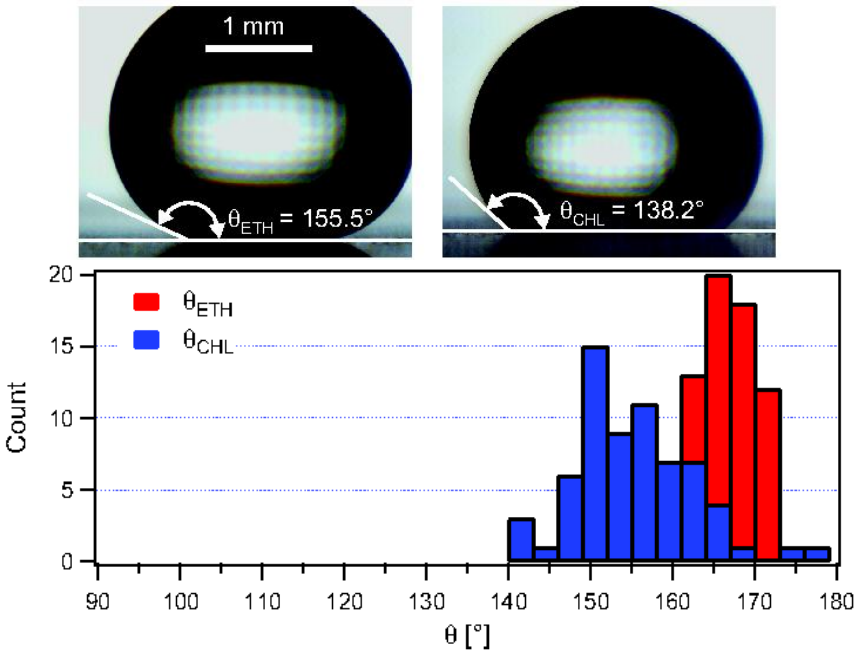
Şekil 3-3: Yüzeydeki mikrodamlaların harmonik salınıcı sürücüye cevabı. (sol) R = 5.0 μm yarıçaplı salınım yapan küresel bir damlacığın 3 farklı sürücü frekansındaki ışıma spektrumu. 602.3 nm'de merkezlenen fısıldayan galeri kipleri, yarı maksimumdaki tam genişlikleri ile karakterize edilirler (sağ). Yarı maksimumdaki tam genişlik, f frekansının bir fonksiyonudur. Deneysel verideki çarpı işaretleri ve Gaussian eğrisi, damlacığın f_{res}^{exp} = 141.1 kHz rezonans frekansını verir.



Şekil 3-4: En düşük-kip rezonans frekansının damlacık büyüklüğüne bağlılığı. LE1/etanol ve LE1/kloroform süperhidrofobik yüzeylerdeki damlacıklara ait deneysel veriler, sırasıyla daireler ve üçgenlerle gösterilmiştir. Doğrusal çizgiler, 177^0'lik kontak açısı (düşük frekans limiti), 160^0 kontak açısı (frekans ortaaralığı) ve 139^0 kontak açısı (üst frekans limiti) için Eşitlik 3.1'den hesaplanan rezonans frekans değerlerini göstermektedir. NaCl-su mikrodamlayı için diğer hesap parametreleri: γ = 74.62 mN/m [26], yoğunluk ρ = 1144.7 kg/m^3, ve kırılım indisi n = 1.3677 [27,28].

Her iki durumda da damlacık malzemesi aynı olduğu için, bu farklılık, iki yüzey üzerindeki sadece kontak açılarının arasındaki farklılıklarına atfedilebilir (Eşitlik 3-1). Kontak açılarının, süperhidrofobik yüzeyi hazırlamada kullanılan çözücülere bağımlılığı incelenmiştir [29]. Şekil 3.5, çalışılan iki süperhidrofobik yüzeydeki makroskopik ve mikroskopik (titreşim esaslı) kontak açısı ölçümlerinin sonuçlarını özetlemektedir. θ makroskopik değerleri, bir şırınga yardımıyla yüzey üzerinde damlacıkların üretilip doğrudan görüntülenmesiyle elde edilmiştir (Şekil 3-4a, 3-4b). Bu yolla, LE1/etanol-kaplı süperhidrofobik yüzeydeki ortalama kontak açısı θ_{etanol}= (154.2±9.1)^0 (4 farklı damlacığın ölçümü için) ve LE1/kloroform-kaplı yüzeydeki ortalama kontak açısı $\theta_{kloroform}$= (139.4±3.6)^0

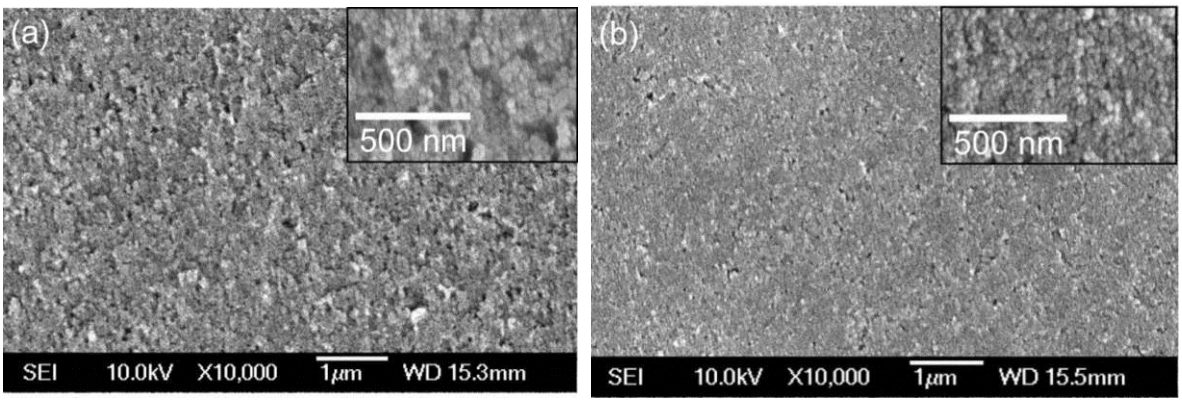
(4 farklı damlacığın ölçümü için) olarak elde edilmiştir. Şekil 3.1.1.4'deki veriden, Eşitlik 3-1 kullanılarak mikroskopik kontak açıları hesaplanmıştır. Mikroskopik kontak açılarının dağılımı, LE1/etanol-kaplı süperhidrofobik yüzey üzerindeki kontak açılarının ortalama değeri θ_{etanol} = 166.7^0 ve LE1/Kloroform-kaplı süperhidrofobik yüzey üzerindeki kontak açılarının ortalama değeri $\theta_{kloroform}$= 153.8^0 olmak üzere, Şekil 3-5'de verilmiştir. Bu değerler, elektriksel deformasyon kullanılarak benzer süperhidrofobik yüzeyler üzerindeki mikrodamlalar için belirlenen kontak açıları ile oldukça uyumludur [30]. Çalışılan her iki süperhidrofobik yüzey aynı hidrofobik silica nanoparçacıkların filmiyle kaplı olduğu için, bu yüzeyler üzerindeki kontak açılarının farklılığı, yüzeylerin kimyasal özelliklerinden kaynaklanmamaktadır. Çoklu pürüzlülüğe sahip süperhidrofobik yüzeylerdeki kontak açılarının aynı yüzey kimyasına sahip daha homojen yüzeylerdeki kontak açılarından daha yüksek olduğu kanıtlanmıştır [31,32]. Örnek süperhidrofobik yüzeylerimizin SEM görüntülerinin Şekil 3-6'da kıyaslanmasıyla, LE1/etanol kaplı yüzeyin, LE1/kloroform kaplı yüzeye kıyasla daha yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu gözlenmiştir. Böylece, iki yüzey üzerindeki kontak açıları arasındaki farklılık aslında yüzey topografisinin değişiminden kaynaklandığ anlaşılmıştır. Birçok araştırma grubu, bir yüzey üzerinde duran damlacığın kontak açısı azalmalarını veya yüzeyin ıslanma geçişini sağlamak için kontak açısı histerisisini göstererek altlık titreşimi uygulamaları yapmaktadır [33,34,35]. Burada rapor edilen ölçümlerde, frekans taraması esnasında fısıldayan galeri kipinin pozisyonu gözlenerek belirlendiği ve mekaniksel olarak sürme işlemi bittikten sonra pek fazla ıslanma geçişi gözlenmemiştir. Eğer damlacık ıslanma geçişine gitseydi, damlacığın kontak açısı ve bununla birlikte kiresel R çapı, fısıldayan galeri kipinin pozisyonlarının ani değişiminden dolayı değişecekti. Ancak, tekrarlanan birkaç deneyde de ani değişimler gözlenmemekle birlikte, sıcaklık kaymalarından dolayı kipin spektral pozisyonlarında küçük kademeli kaymalar (< 0.5 nm) gözlenmiştir. Böylece, burada rapor ettiğimiz mikroskopik ölçümler sayesinde, damlacıkların, şekillerinde bir değişim olmaksızın yüzeyde oluşturulma süresinden kaynaklanan ıslanma durumları irdelenmiştir. Süperhidrofobik yüzeylerimiz kontak açısı histerisisi gösterdiği için, bu başlangıç ıslanma durumları, belki küresel enerji minimumuna [33] karşılık gelmeyebilir.



Şekil 3-5: Süperhidrofobik yüzeylerin kontak açısı ölçümleri. Bir NaCl-su damlacığının doğrudan görüntülemesi (a) LE1/etanol kaplı (b) LE1/kloroform kaplı süperhidrofobik yüzeyler. (c) LE1/etanol kaplı (70 ölçüm, θ_{etanol} =166.7^0) ve LE1/kloroform kaplı (68 ölçüm, $\theta_{kloroform}$ =153.8^0) süperhidrofobik yüzeylerin mikroskopik θ kontak açılarına ait histogram. Kontak açıları, Şekil 3-4'deki verilerden Eşitlik 3-1 kullanılarak hesaplanmıştır.

Mikroskopik ve makroskopik kontak açılarının kıyaslanması, mikroskopik ölçümlerin sistematik olarak kaydığını göstermektedir. Bunu, gözlemlenen ıslanma durumlarının, damlacığın yüzey üzerinde kolayca döndüğü ve hareket edebildiği makroskopik ölçümlerdeki küresel enerji minimumuna yakın olmasına atfedebiliriz. Bu ölçümlerde kontak açısındaki gevşeme, şırınganın geri çekilmesi esnasında, mekanik çalkalama ile kolaylaştırılır. Küçük damlacıkların ölçülen mikroskopik kontak açısı değerleri, yüzeyin ıslanma özelliklerini yansıtan mikrofluidik uygulamalar için daha uygundur. Süperhidrofobik

yüzeydeki tipik damlacık yarıçapı ve kontak açısı değerleri için (R = 5 μm, θ = 165^0), damlacık ile altlık arasındaki kontak alanı, r = R sin(θ) ≈ 1.3 μm yarıçapına sahiptir ve bu değer kontak açısı ölçümlerinin uzaysal çözünürlük limitini belirler. Bu çözünürlük limiti, yüzey araştırmasında daha küçük damlacıkların kullanılmasıyla <1 μm indirgenebilir. Bunu başarmak için, damlacığın uyarılmasını 200 kHz'in üzerinde titreşim ile sağlayabilecek bir piezoelektrik dönüştürücü kullanılması gerekir. Sonuç olarak, süperhidrofobik yüzeyde duran her bir mikrometrik sıvı damlacığının mekanik rezonansları analiz ederek mikroskopik sıvı-katı kontak açıları deneysel olarak karakterize edilmiştir. Farklı süperhidrofobiklik seviyelerine sahip iki yüzeyde, bu metotla, makroskopik damlacık görüntülemesiyle belirlenen kontak açıları kıyaslanmıştır, makroskopik ve mikroskopik kontak açısı ölçümleri arasında oldukça iyi bir uyum elde edilmiştir. Mikroskopik kontak açıları ve altlık-sıvı birleşimi için küresel enerji minimumları arasındaki ilişkiyi araştırmak için daha fazla araştırma gereklidir. Mevcut mikroskopik kontak açısı araştırması, özellikle hedef yüzey alanı üzerinde sıvı damlacıklarının belli istenilen pozisyonda birleşimi gibi geniş aralıktaki ortam atmosferi şartları altında karmaşık yüzey kimyası modeline sahip yüzeylerin karakterizasyonunda potansiyel uygulamalara sahiptir.



Şekil 3-6: Çalışılan süperhidrofobik yüzeylerin SEM görüntüleri: (a) LE1/etanol kaplı süperhidrofobik yüzey ve (b) LE1/kloroform kaplı süperhidrofobik yüzey. SEM görüntülerinin içinde, aynı yüzeye ait daha yüksek büyütmeli SEM görüntüleri verilmiştir.

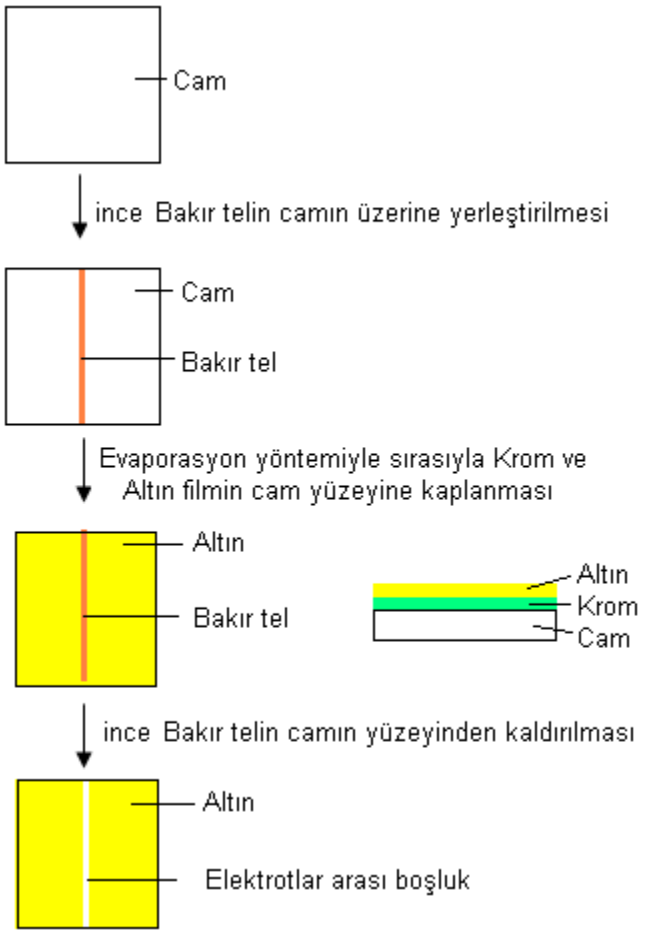
3.1.2 Yatay Titretişimlerle Mikrodamla Mekanik Rezonanslarının İncelenmesi

Bir önceki bölümde açıklandığı gibi araştırma grubumuz tarafından sıvı mikrokovuklar için, mikrometre-büyüklüklü kontak alanlarında θ sıvı-katı kontak açısının belirlenmesi için duran damlacık titreşimlerinin analizini kullanan yeni bir uygulama önerilmiştir [36]. Bu yaklaşımda, yüzeyde duran mikrodamlalar, bir piezoelektrik dönüştürücü kullanılarak yüzeye dik olarak titreştirilmiştir ve duran damlacıkların aksisimetrik osilasyonlarının önceden geliştirilen teorisine göre küresel yarıçap ve damlacık mekanik rezonans frekansı kullanılarak θ değeri hesaplanmıştır [18]. Titreşim rezonansları, boya katkılı mikrodamlaların ışıma spektrumunda damlacık titreşim frekansının bir fonksiyonu olarak fısıldayan galeri kiplerin spektral genişliklerinin analiz edilmesiyle belirlenmiştir. Rezonans frekansı analizlerine dayanan mikroskopik kontak açısı ölçümleri, farklı süperhidrofobikliklere sahip yüzeyler arasında ayırım yapmaya olanak sağlar.

Bu bölümde detayları açıklanan çalışmada, titreşim esaslı kontak açısı ölçüm tekniği, mikrodamla mekanik salınımlarının elektrik alanla sürülmesiyle sağlanmıştır. Bu bağlamda, mikrodamlalar, süperhidrofobik yüzey üzerinde iki düzlemsel altın elektrot arasında oluşturulan kanalda üretilmişlerdir ve elektrotlara yatay AC elektrik alan uygulanarak uyarılmıştır. Sızıntı dilektrik modeline göre, bu durum, uygulanan elektrik alanın karesiyle orantılı olan periyodik damlacık deformasyonlarına sebep olur [37,38]. AC elektrik alanın kullanılması, alttaşın direk mekanik sallanmasına gore mikrodamla titreşimlerini uyarmak için daha pratik alternative bir mekanizma sağlar. AC elektrik alan uyarısı yönteminde alttaşın mekanik rezonansları gözlenen damlacık mekanik rezonanslarını etkilemez.

Önceki bölümde açıklandığı gibi Strani-Sabetta teorisi [18], yerçekimi etkisinin ihmal edildiği rejimde, yüzey üzerindeki sıvı damlacıkların aksisimetrik titreşimlerini açıklar. En düşük-seviyeli titreşim kipi için, f_1 rezonans frekansı, Eşitlik 3-1 ile ifade edilir. Bu eşitllikte γ, ρ ve R sırasıyla, sıvının yüzey gerilimi, yoğunluğu ve damlacığın küresel yarıçapına karşılık gelmektedir. Böylece, bu parametreler bilindiğinde, bu eşitlik kullanılarak en düşük-kip özdeğerinden kontak açısı belirlenebilir [18,19,39]. Yatay AC elektrik alanla sürülen damlacık salınımlarının, duran bir damlacığın simetri eksenine dik sürücü kuvveti olarak sadece aksisimetrik titreşim kiplerine sebep olmadığı açıkça söylenebilir. Ancak, burada, aksisimetrik olmayan küçük deformasyonların limitinde ve büyük kontak açılarında, damlacık rezonans frekanslarının, aksisimetrik için piezoelektrik dönüştürücü ve aksisimetrik olmayan için yatay elektrik alan sürümünün ardı ardına kullanılmasıyla birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir. Böylece, Strani-Sabetta teorisinin kullanılması, bu çalışmadaki elektriksel olarak sürülen damlacık salınımlarına dayalı kontak açısı ölçümlerini doğrular.

Yatay elektrik alan geometrisinde elektriksel olarak sürülen salınımlar, milimetre büyüklüklü su damlacıklarının mekaniksel frekans cevabını karakterize etmek için daha önceden rapor edilmiştir [40]. Ancak, önceki çalışmada, damlacıkların salınımı esnasında, damlacıkların büyük deformasyonlarının, kontak açılarının önemli ölçüde değişimine sebep olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, nispeten küçük kontak açılarına ($\theta < 124^0$) sahip damlacıklarla çalışılmıştır ve teorik bir modelle nicel bir kıyaslama yapılmamıştır.

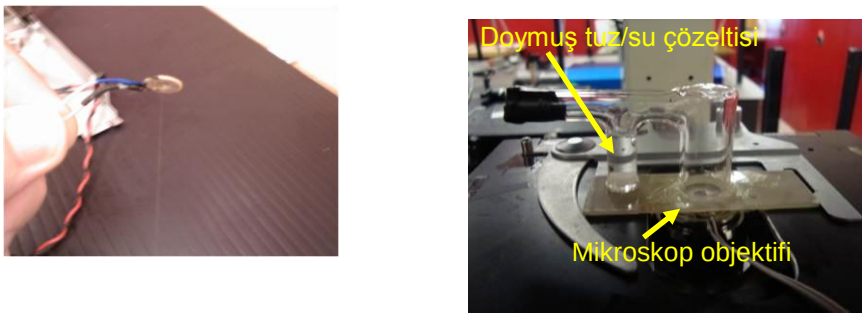


Şekil 3-7: Au elektrotların hazırlanma aşamaları.

Bu deneylerde mikrodamlalar iki elektrik kontrak arasındaki su tutmayan bir yüzeye konumlandırılmıştır. Kontaklar arasına uygulanan yüksek sinüsoydal elektrik alan ile mikdormamlaların mekanik rezonansları ölçülmüştür. Deneyler için, öncelikle yaklaşık 65 μm aralığa sahip Au elektrotlar üretilip elektrotların yüzeyi süperhidrofobik film ile kaplanmıştır ve süperhidrofobik filmin üzerinde duran tuz/su (NaCl/su) ve gliserol/su mikrodamlaları kullanılmıştır. Süperhidrofobik yüzeyler hidrofobik kaplamalı silika nanoparçacıkların (LE1, LE2) Au elektrotların üzerine spin kaplama yöntemi ile kaplanması ile elde edilmektedir. Süperhidrofobik yüzeyin üzerine kaplanacağı Au elektrotların üretimi için, öncelikle 2x2 cm lameller kimyasal temizleme işlemine tabi tutulmuşlardır. Yaklaşık 65 μm aralıklı Au elektrotların üretilebilmesi için lamellerin her birinin üzerine 70 μm kalınlıklı Bakır teller yerleştirilmiştir. Ardından, evaporasyon sisteminde lamellerin üzerine sırasıyla 500 nm kalınlıklı Ti film ve 1 μm kalınlıklı Au film 10^{-7} Torr yüksek vakumda kaplanmıştır. Lameller sistemden çıkartıldıktan sonra, üzerine yerleştirilen Bakır teller kaldırılarak cam/Ti/Au yapısındaki lamellerin yüzeyinde yaklaşık 65 μm aralıklı Au elektrotlar elde edilmiştir. Au elektrotların hazırlanma aşamaları Şekil 3-7'de verilmiştir.

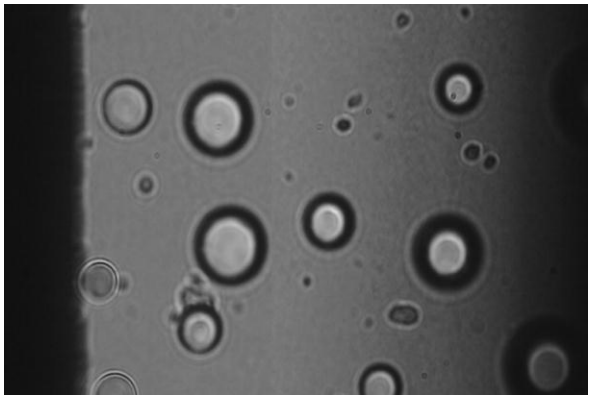
Şekil 3-8: Koç Üniversitesi Nano-Optik Araştırma Laboratuvarı örnek hazırlama odasından görünüm.

Düzlemsel elektrotlar, aralarında 70-90 μm- yalıtkan kanal oluşturulmak üzere, bakır maske kullanılarak 10^{-5} Pa vakumda lamel altlıklar üzerine Ti (kalınlık: 0.5 μm) and Au (kalınlık: 1 μm) metallerinin buharlaştırılmasıyla hazırlanmıştır. Süperhidrofobik yüzeyler, düzlemsel elektrotlara sahip lamellerin yüzeyine hidrofobik silica nanoparçacıklar içeren (50 mg Aeroxide LE1/1 mL etanol, ortalama parçacık büyüklüğü size: 14 nm; Evonik) solüsyonun spin ile kaplama yöntemiyle kaplanmasıyla elde edilmiştir [4,27]. Laboratuvarımızda süperhidrofobik yüzey elde etmek için kullanılan cihazlar Şekil. 3-8'de verilmiştir. Bu yüzeylerin hazırlanması laboratuvarımızda rutin olarak gerçekleştirilmektedir. Hazırlanan yüzeylerin üzerinde duran milimetrik su damlalarının kontak açıları 150°-160° aralığında ölçülmektedir (180° ideal bir küreyi ifade eder).



Şekil 3-9: Mikrodamlaların hazırlanmasında kullanılan (sol) ultrasonik püskürtücünün (sağ) doymuş bir tuz/su çözeltisini içeren nem odacığının fotoğrafları.

Mikrodamlaların üretiminde laboratuvarımızda mevcut bulunan ultrasonik bir püskürtücü kullanılmıştır. Ultrasonik püskürtücü ile yarıçapları birkaç mikrometre ile yaklaşık 30 μm arasında değişen birçok mikrodamla aynı anda hazırlanabilmektedir. Sırasıyla, Şekil. 3-9'da mikrodamlaların hazırlanmasında kullanılan ultrasonik püskürtücünün, mikrodamlaları ve doymuş bir tuz/su çözeltisini içeren nem odacığının, Şekil. 3-10'da ise Au elektrotların arasındaki hidrofobik yüzey üzerindeki mikrodamlaların fotoğrafları verilmiştir.

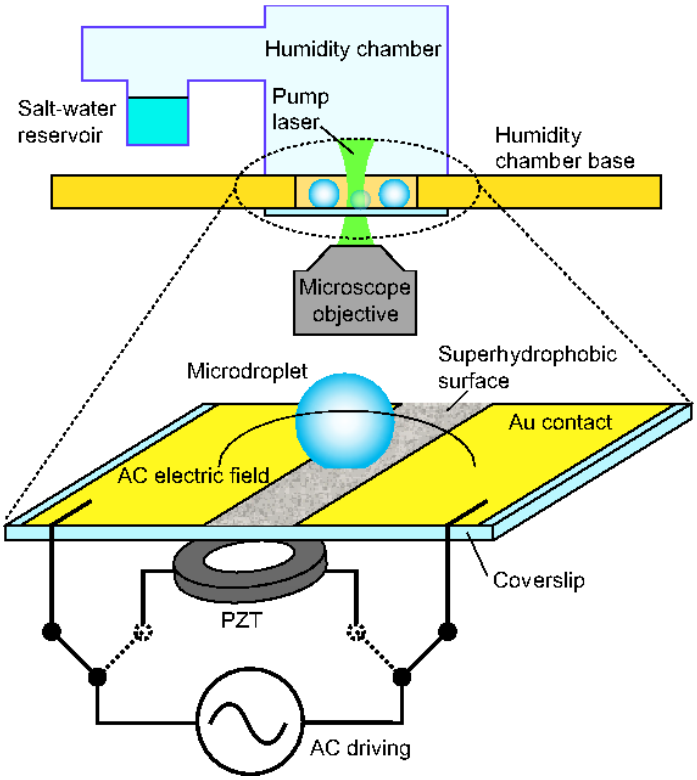


Şekil 3-10: Au elektrotların arasındaki hidrofobik yüzey üzerindeki mikrodamlaların fotoğrafı.

Ölçümlerde kullanılan nem kontrollü-hücre Şekil 3-11'de gösterilmiştir. Au elektrotlar arasındaki kanal içinde Rhodamine B katkılı NaCl-su mikrodamlaları (2.5 M NaCl, 100 μM Rhodamine B) atmosferik ortam koşullarında ultrasonik püskürtücü kullanılarak yerleştirilmiştir. Süperhidrofobik film kaplı lamelin diğer yüzeyine, lamele dik yönde damlacık salınımlarını uyaran bir piezoelektrik dönüştürücü yapıştırılmıştır (Şekil 3-9sol). Daha sonra, yüzeyinde mikrodamlaları bulunduran örnek, % 84 sabit su-nemine sahip ve sulu KCl solüsyonu içeren ölçüm hücresinin alt kısmına tutturulmuştur. Ölçüm hücresinin sızdırmazlığı sağlandıktan ve damlacıkların büyüklüğü dengeye ulaştıktan sonra deneyler yaklaşık olarak bir saatte gerçekleştirilmiştir.

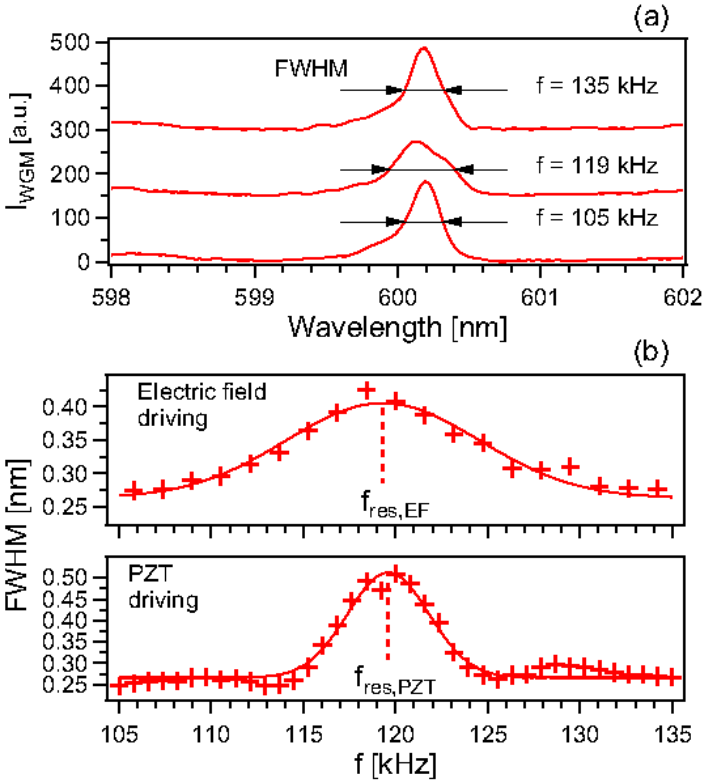
Boya katkılı damlacıkların fısıldayan galeri kipleri, ışıma spektroskopisi kullanılarak gözlenmektedir [4,27,36]. Deneylerde, seçilen her bir damlacığın çeberine yakın bir bölgeye pompalı sürekli dalga yeşil lazeri (λ = 532 nm, 4.5mW maksimum güç) dar hüzmeyle odaklamak için bir hava mikroskop objektifi (sayısal ışık aralığı = 0.8, 60x; Nikon) kullanılmıştır. Damlacıkta uyarılan ışıma daha sonra aynı mikroskop objektifi ile toplanıp, ışığın spektroskopik bir CCD kamera ile algılanmasından önce dağıtılmasını sağlayan 1200 gr/mm kırınım ızgaralı 500 mm monokromatöre (spektral çözünürlük = 0.07 nm, SpectraPro; Acton Research) gönderilmiştir. Bir yüksek gerilim yükselteci, bir sinyal jeneratörünün çıkışına bağlanarak piezoelektrik dönüştürücünün yaklaşık 300 V tepe-tepe sinüs sinyali ile değişen frekanslarda sürülmesi sağlanmıştır. Deneyler süresince, mekanik rezonanslar, her bir mikrodamla için hem piezoelektrik dönüştürücü hem de yatay elektrik alan sürücü kullanılarak karakterize edilmiştir. Her iki durumda, ardı ardına ışıma spektrumları, uyarma frekansının bir fonksiyonu olarak kaydedilmiştir ve mekanik rezonanslar, fısıldayan galeri kipinin spektral genişliklerinin frekans bağlılığının analiz edilmesiyle ortaya çıkarılmıştır. Damlacıkların küresel yarıçapları, daha önceden tanımlandığı gibi [36] fısıldayan galeri kiplerinin Lorentz-Mie saçılma teorisi kullanılarak kip-eşleştirmesiyle belirlenmiştir. Hazırlanan her örnek hücresi için, alttaşın titreşim cevabı, bir dörtlü fotodiyot kullanılarak titreşen alttaştan yansıyan bir lazer ışınının sapması ölçülerek karakterize edilmiştir.

Şekil 3-12a, 105 kHz, 119 kHz ve 135 kHz'lik frekanslarla yatay elektrik alan kullanılarak sürülen 5.4 μm küresel çaplı bir damlacığın kaydedilen örnek bir ışıma spektrumudur. Yatay elektrik alan ile sürme durumunda, uyarma frekansları, elektrotların arasına uygulanan AC gerilimin ikinci frekansına eşittir çünkü damlacık deformasyonu, elektrik alan kuvvetine ikinci dereceden bağlıdır. 600.2 nm de merkezlenen fısıldayan galeri kipi, damlacığın mekanik rezonansından dolayı 119 kHz'de maksimum genişlik gösterir. Mekanik rezonans frekansı, uyarma frekansının bir fonksiyonu olan fısıldayan galeri kipinin yarı maksimumdaki tam genişliğinin analiz edilmesiyle belirlenmiştir (Şekil 3-12b, üst). Deneysel veriden elde edilen Gaussian eğrisi, bu damlacık için bir mekanik rezonans frekansının 119.3 kHz olduğunu ortaya çıkarır. Kıyaslama için, Şekil 3-12b, alt, piezoelektrik dönüştürücü ile sürülen aynı damlacıktan elde edilen aynı fısıldayan galeri kipinin yarı maksimumdaki tam genişliğinin frekansa bağımlılığını gösterir. Bu durumda, Gaussian eğrisi, elektriksel uyarma ile elde edilen değere çok yakın olan 119.5 kHz'lik bir mekanik rezonans frekansını verir. Genelde, rezonansa yakında, elektrik alanla sürülen bir damlacığın mekanik frekans cevabı, piezoelektrik dönüştürücü ile sürüldüğündekinden daha geniştir. Bu, piezoelektrik dönüştürücü ile sürme durumunda, süperhidrofobik alttaşın spektral olarak düzensiz frekans cevabı tarafından damlacığın gözlenen frekans cevabının daralmasına atfedilmiştir [36].

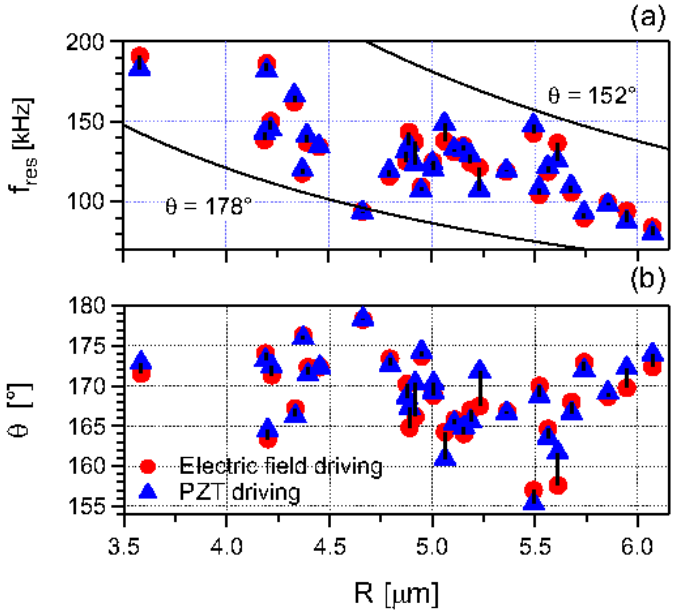


Şekil 3-11: Titreşen mikrodamlaların kullanıldığı kontak açısı ölçümleri için deneysel düzenek. Damlacıklar, sıralı olarak piezoelektrik dönüştürücü kullanılarak AC elektrik alan ile sürülmektedir.

Şekil 3-13a, 3.5 - 6 μm arasında değişen küresel yarıçaplara sahip damlacıkların, ardı ardına yatay elektrik alan (kırmızı daireler) piezoelektrik dönüştürücü (mavi üçgenler) ile sürümünden elde edilen rezonans frekanslarını göstermektedir. Şekil 3-13a'da gösterilen deneysel veriler ile Strani- Sabetta theory kullanılarak hesaplanan kontak açıları Şekil 3-13b'de gösterilmiştir. Yatay elektrik alan ve piezoelektrik dönüştürücü ile sürülen damlacıkların rezonans frekansları ve kontak açıları asasında sadece küçük göreli bir farklılık gözlenmiştir. Bu küçük farklılık, piezoelektrik dönüştürücü ile sürüm esnasında, alttaşın düzensiz mekanik cevabına atfedilmiştir ve her iki durumda da Strani-Sabetta teorisinin öngördüğü yaklaşık aksisimetrik titreşimlerin uyarılmışdığı sonucuna varılmıştır. Bu sonuç, damlacığın sürülmesinde kullanılan elektrik alan şiddetlerinden dolayı damlacıkların aksisimetrik olmayan deformasyonlarının göreli olarak küçük (< % 0.2) oluşundan kaynaklanır [30]. Bu düşük yatay deformasyon rejiminde, Strani-Sabetta teorisinin, kontak açısı ölçümlerinde kullnılması oldukça uygundur.



Şekil 3-12: (a) R = 5.4 µm küresel çaplı ve yatay AC elektrik alan ile 3 farklı f frekansında uyarılan bir damlacığın ışıma spektrumu. (b) yatay elektrik alanla (üstteki grafik) ve piezoelektrik dönüştürücü ile (alttaki grafik) sürülen aynı damlacığın (a)'daki fısıldayan galeri kiplerinin) f frekansının bir fonksiyonu olarak yarı maksimum tam genişliği. Deneysel verideki çarpılar ve Gaussian eğrisi, sırasıyla $f^{exp}_{res;EF}$ = 119.3 kHz ve $f^{exp}_{res;PZT}$ = 119.5 kHz damlacık rezonans frekanslarını ortaya çıkarmaktadır.

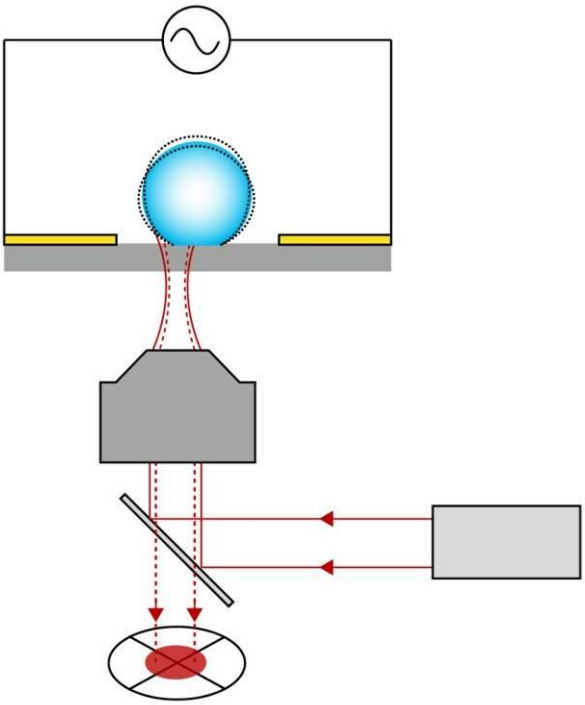


Şekil 3-13: (a) Ölçülen mekanik rezonans frekanslarının (*f*res) damlacığın küresel *R* çapına bağlılığı. Deneysel verlerdeki daireler ve üçgenler, damlacığın sırasıyla yatay elektrik alan ve piezoelektrik dönüştürücü ile sürülmesine aittir. Düz eğriler, 178^0 (düşük frekans limiti) ve 152^0 (yüksek frekans limiti) kontak açıları için Strani-Sabetta teorisi kullanılarak hesaplanan *f*res değerlerini göstermektedir. NaCl-su mikrodamlalar için diğer hesap parametreleri: yüzey gerilimi = 80.1 mN/m, yoğunluk = 1144.7 kg/m^3 ve kırılım indisi n = 1.3677 [4,26,28]. (b) Strani-Sabetta teorisi kullanılarak (a)'daki rezonans frekansları için hesaplanan kontak açıları [18].

Sonuç olarak, bu çalışmada, hem yatay AC elektrik alanla hem de piezoelektrik dönüştürücü ile sürülen damlacık osilasyonları için, süperhidrofobik yüzeylerdeki mikrodamlaların en düşük-seviyeli titreşim rezonansları incelenmiştir. Deneysel sonuçlarımız, küçük deformasyonlar için, yatay elektrik alan sürümünün $\theta > 150^0$ kontak açıları için yaklaşık aksisimetrik damlacık titreşim modlarını uyardığını gösterir. Bu nedenle aksisimetrik damlacık salınımlarına ait teorik model, bu durum için damlacık-yüzey kontak açısını hesaplamada kullanılabilir. Piezoelektrik dönüştürücü sürümüne kıyasla, yatay elektrik alan sürümü, kontak açılarının ölçümü için, alttaşın mekaniksel cevabı tarafından etilenme olmaksızın damlacıkların doğrudan salınıcı uyarımını sağlayan daha pratik bir mekanizma sağlar. Elektrik alan sürümü ayrıca, mikrofluidik sistemler içine kolaylıkla entegre edilebilen uygunca tasarlanmış elektrik alan geometrisi kullanılarak seçilen mikrodamlaların seçici uyarımına kolay bir erişim sağlar.

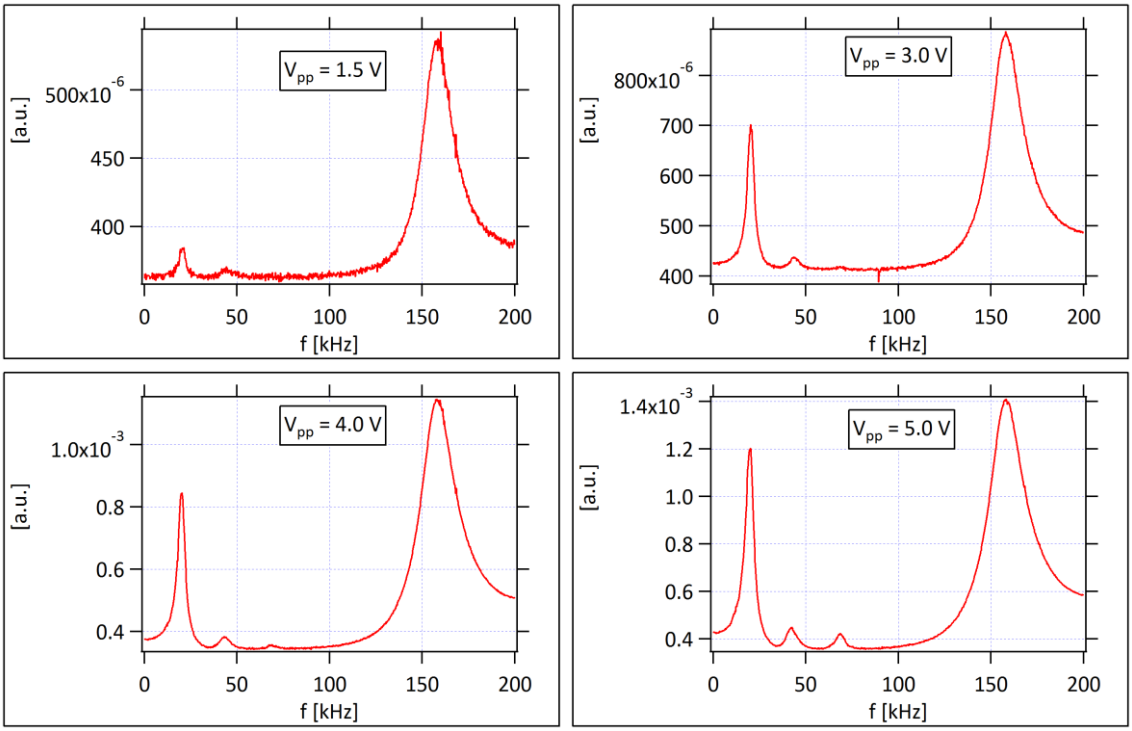
3.1.3 Pozisyona Hassas Fotoalgılayıcı ile Mikrodamlaların Mekanik Rezonanslarının İncelenmesi

Bu raporun 3.1.2 ve 3.1.3 bölümlerinde açıkladığımız ve araştırma grubumuzun iki yayınına konu olan mikrodamlaların mekanik rezonanslarının belirlenmesi çalışmalarına halen devam etmekteyiz. Daha önceki bölümlerde açıklanan çalışmalardan farklı olarak halen yürüttüğümüz çalışmalarda mikrodamlaların mekanik rezonansları harekete hassas bir fotodetektör (position sensitive detector - PSD) kullanılarak ölçülmektedir. Bu sayede mekanik rezonans ölçümleri küçük kontak açılarında dahi yapılabilmektedir ve ayrıca mikrodamlalardan elde edilen ışımaya dayanmadığı için ölçümler fotosönme (photobleaching) fenomeninden etkilenmeden uzun süre yapılabilmektedir. Bu çalışmalarda kulllanılan deneysel düzenek Şekil 3-14'de gösterilmektedir. Bu düzenekte elektrik kontakların arasına yerleştirilen mikrodamla sinüsoydal elektrik alanla uyarılır ve mikrodamla yüzeyindeki salınımların genliği PSD ile ölçülür.



Şekil 3-14: Mikrodamlaların mekanik rezonanslarının belirlenmesi için kurulan deney düzeneğinin şematik görüntüsü.

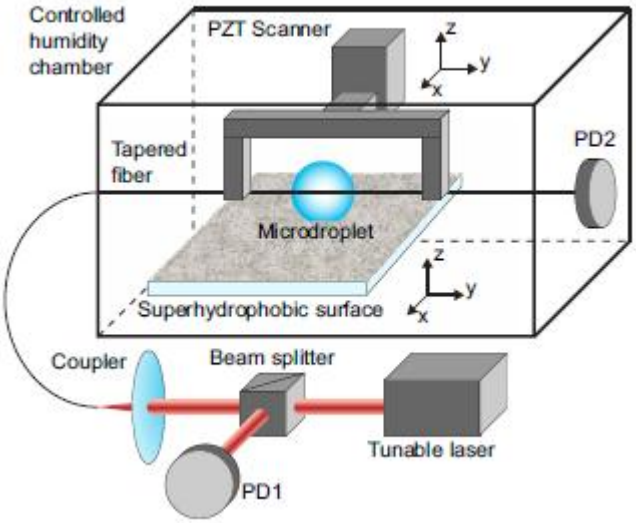
Deneylerimizden elde edilen örnek sonuçlar Şekil 3-15'de sunulmaktadır. Bu şekilde 4 değişik uyarı şiddetinde uyarılan bir mikrodamladan elde edilen frekans cevap eğrileri verilmektedir. Frekans cevap eğrilerinde bazı rezonansların belirdiği açık bir şekilde görülmektedir. En düşük uyarı genliğinde (V_{pp}=1.5 V) elde edilen eğride 20 kHz ve 160 kHz civarındaki rezonans tepeleri görülmektedir. Bu tepelerden 160 kHz civarında olan enstrümanların frekans cevabından kaynaklanmaktadır. 20 kHz civarında bulunan rezonans tepesi ise mikrodamlanın temel mekanik rezonansını gösterir. Uyarı genliği daha arttırıldığında (V_{pp}=3 V, 4 V ve 5 V için) frekans cevap eğrisinde 20-160 kHz arasında yüksek seviyeli mekanik rezonansların ortaya çıktığı da görülmektedir.



Şekil 3-15: Bir mikrodamladan değişik uyarı şiddetlerinde elde edilen mekanik rezonans cevap eğrileri.

3.2 İnceltilmiş Fiber İle Mikrodamlaların Ultrayüksek Çözünürlükte Spektroskopisi

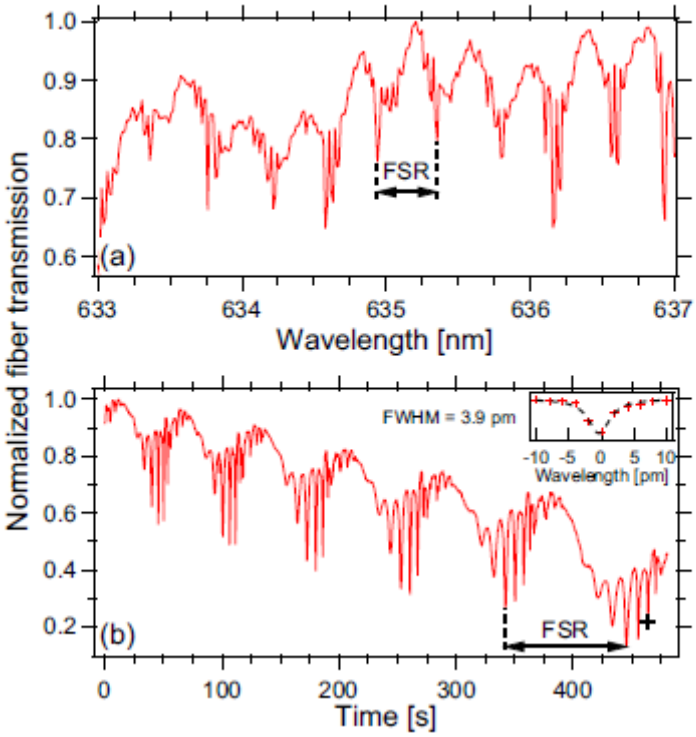
Bu çalışmada uyarılan sıvı mikrodamlaların fısıldayan galeri kiplerinin (FGK) ulta-yüksek kalite faktörleri ilk kez direk olarak ölçülmüştür. Damlalar su tutmayan yüzey üzerine yerleştirilmiştir ve kipleri inceltilmiş optik fiber dalga kılavuzu ile incelenmiştir. Su tutmayan yüzeyler kullanılarak oluşturulan deney konfigürasyonu uygulaması kolay olmasının yanı sıra microdamlaların pozisyonlarını sabitlerken küresel şekillerini de korur [5]. Bizim deneylerimizde damla hacmi sıvı damlacıklara gliserol eklenerek ve nemi kontrol edilebilen kapalı bir odacık kullanılarak sabit tutulur. Dalga boyu ayarlanabilen dar bant genişliğine sahip lazeri yüzey üzerinde duran gliserol-su damlası ile etkileştirmek için inceltilmiş optik fiber dalga kılavuzu kullanıldı ve fiberin ışık geçirgenliği lazer dalga boyu fonksiyonu olarak ölçüldü. İnceltilmiş optik fiber ile uyarma yüksek kalite faktörlü mikrokovukları karakterize etmek için yaygın olarak kullanılır [5]. Serbest uzay uyarılmasına göre, inceltilmiş fiber ile uyarmak faz uyuşması olan tek bir FGK'nin %90'dan daha fazla bir verimlilikle uyarılmasını sağlar ve spektral çözünürlük sadece kullanılan lazerin bant genişliği ile ilgilidir [41,42]. Daha önceki çalışmalarda 1.15×10^5 kalite faktörüne sahip ve sıvı ortam içinde bulunan tek bir su damlası inceltilmiş fiber ile karakterize edilmiştir [43].



Şekil 3-16: Yüzey üzerinde duran mikrodamlaların ultra-yüksek kalite faktörü spektroskopisi için kullanılan deneysel düzenek. Işık detektörleri (PD1 ve PD2) inceltilmiş fiberin giriş ve çıkışında lazer gücünün izlenmesini sağlar

Yüzey üzerinde bulunan sıvı mikrodamlaların yüksek kalite faktörlü spektroskopisi için kullanılan deney düzeneği Şekil 3-16'da gösterilmiştir. İnceltilmiş optik fiber dalga kılavuzları tek kipli optik fiberden sabit hidrojen alevi kullanılarak ısıtma-çekme yöntemi ile elde edilmiştir [8]. Fiber inceltme işlemi sırasında fiberden geçen yardımcı lazer ışığı görüntülenerek tek kipli inceltilmiş fiber elde edildiği emin olunmuştur [15]. Tipik olarak inceltilmiş fiber ışık geçirgenliği %90 dan fazladır ve SEM görüntülerine göre inceltilmiş fiber çapları 500 nm ile 700 nm arasındadır. 3-eksenli piezo sehpaya monte edilen inceltilmiş fiberin damlaya göre pozisyonu 2 nm'den daha hassas olarak kontrol edilebilmiştir. Su tutmayan yüzeyler hidrofobik silica nanoparçacıklar içeren etanol solüsyonunun cam üzerine spin kaplama yöntemi ile kaplanmasıyla elde edilmiştir [4]. Tek bir gliserol-su damlacığı dış ortamda şırıngaya monte edilen cam bir mikrokapilar kullanılarak su tutmayan yüzey üzerine yerleştirilmiştir. Karışımın başlangıç gliserol konsantrasyonu %47.8 olmasına rağmen ortamın düşük neminden dolayı damlanın içindeki su miktarı azalmaktadır. Daha sonra üzerinde tek bir damla bulunan yüzey yaklaşık olarak 1.9 L hacmi sahip ve nemi doymuş magnezyum nitrat solüsyonu ile %53 civarında sabit tutulan odacığa yerleştirilmiştir. Bu nemde ve 23°C oda sıcaklığında damlada

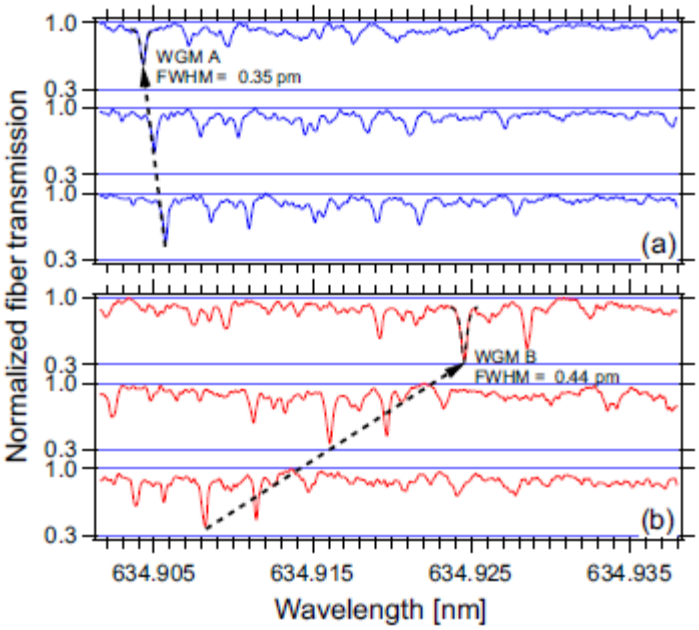
bulunan gliserol konsantrasyonu %77.1 dir [44]. Bu nemde damlanın kırılma indisi n_D=1.439 dur [5]. Deneyler damla yerleştirildik 2 saat sonra yapılmıştır. Bu süre boyunca odacığın nemi denge değeri olan %53 'e yavaş yavaş yaklaşırken, damlanın hacmi artmaktadır. Şekil 3-17'de görüldüğü gibi damlanın yarıçapının büyüme hızı azalmaktadır. İnceltilmiş fiber ile damla arasındaki etkileşimin sağlanması için ayarlanabilen harici optik salınıcılı diyot lazer kaynağından (ayarlanabilen dalga boyu aralığı 632.5-637 nm, bant genişliği < 300 kHz) çıkan ışığın gönderildiği fiber damlanın yakınlarına getirildi. Damla sıvısının pompa lazer ışığı emilimini minimize etmek için, su ve gliserol için hemen hemen emilimin olmadığı spektrumun görünür kısmında deneyler gerçekleştirilmiştir. Lazer ışığının gücü inceltilmiş fibere girmeden önce ve girdikten sonra ölçülmüştür. Dalga boyu değişirken meydana gelen lazer gücündeki değişimleri elimine etmek için ölçülen inceltilmiş fiberin iletimi, giriş gücüne göre normalize edilmiştir.



Şekil 3-17: (a) Hava ile sarılı gliserol-su damlasının etkileşim halinde olduğu inceltilmiş optik fiber dalga kılavuzunun pompa lazeri dalga boyuna göre düşük çözünürlüklü iletim spektrası. Spektrum alınma süresi ~100 s. (b) 635 nm sabit dalga boyunda aynı inceltilmiş fiber/damla sistemi için inceltilmiş fiber iletiminin zamana bağlı değişimi. FSR mikrodamla kovuğunun serbest uzay aralığını gösterir, siyah artı işaretleri kalite faktörü analizi için kullanılan temsili FGK'leri belirtir.

Şekil 3-17'de bir mikrodamla ile etkileşimde olan inceltilmiş optik fiber dalga kılavuzunun düşük çözünürlükte iletim spektrumu gösterilmektedir. İnceltilmiş fibere giren ortalama giriş gücü yaklaşık olarak 60 μW tır. Dalga boyu taranırken rezonans olmama durumunda fiber iletim grafiğinde görülen bölgesel değişimlere rağmen, iletim grafiğinde damla kovuğunun her bir FGK'nin uyarılması nedeni ile meydana gelen keskin düşüşler açık şekilde görülmektedir. Bütün FGK spektrasına baktığımızda görülen karmaşık yapılı kip bozulmaları, damlanın şeklindeki ufak deformasyonlara işaret etmektedir. Bu nedenle gözlemlenen düşüşlerin kip numaralarını ve gruplarını belirlemeye çalışmadık. Qian tarafından rapor edilin asimptotik formül [45] ve gliserol-su karışımının %53 bağıl nemdeki kırılım indisi ve damlanın 635 nm deki serbest spektral aralığı kullanılarak (0.414 nm), damlanın yarıçapı(a) 120 μm olarak bulunmuştur. Tekrarlanan düşük çözünürlükteki spektral taramalarda bütük FGK yapısının uzun dalga boylarına doğru kayması (veri gösterilmemiştir) damlanın yarıçapının yavaş yavaş arttığını göstermektedir. Şekil 3-17a daki spektrum alındıktan hemen sonra, ölçülen FGK spektrasının zamana bağlı sabitliğini karakterize etmek için, sabit pompa lazer dalga boyunda (λ = 635 nm) inceltilmiş fiber iletimi zamana bağlı olarak izlenmiştir. Bu ölçümün sonucu Şekil 3-17b'de gösterilmektedir. Sabit pompa dalga boyunda damla FGK yapısının kaymasından dolayı damlanın yarıçapındaki yavaş ve azalan bir artışlar inceltilmiş fiber iletimindeki değişimlere neden olur. Bu işlem sabit hacimdeki damla

için yapılan yüksek çözünürlükle dalga boyu taranması işlemine benzer. Böylece Şekil 2b deki zamana bağlı değişim Şekil 3-17a'daki spektrum kullanılarak spektral taramaya dönüştürebilir. Bu dönüşüm ardı ardına yapılan spektral ve zaman taramalarında görülen boş uzay aralıkları (FSRs) karşılaştırılarak yapılır. Bu dönüşüm kullanılarak zaman eğrilerinde kaydedilen FGK'lerin kalite faktörünün hesap edilmesi mümkündür. Şekil 3-17b'deki siyah artı işareti ile gösterilen keskin FGK'nin kalite faktörü 1.6×10^5 den büyük olarak bulunmuştur. Şekil 3-17b'deki FGK'yi gösteren yetersiz veri noktası kalite faktörünü düşük çıkmasının tek sebebidir.



Şekil 3-18: İnceltilmiş fiber ile etkileşim halinde olan küçülürken(a) ve büyürken(b) damlanın yüksek çözünürlükteki spektrasının zamana göre değişimi. Noktalı siyah oklar spektral kaymanın yönünü ve her bir alt grafiğin ilk spektrasındaki siyah eğriler temsili FGK'lerin üzerine oturtulan Lorentz eğrisini belirtir. Ortlama damla yarıçapı 190 µmdir ve damla yarıçapındaki hızın değişimi -0.1 nm/s ve 1.1 nm/s dır.

Yukarda gösterildiği gibi nem odacığı kullanarak uygulanan pasif sabitlemeye rağmen, buharlaşma ve yoğunlaşma işlemleri arasındaki karmaşık değişim damlanın yarıçapının değişmesine neden olmaktadır. Genellikle damla FGK'lerinin uzun dalga boyuna gittiği gözlemlenmesine rağmen, bazı durumlarda ters yöne doğru gidişata rastlanmıştır. Deneysek düzeneğimizde ölçülebilecek en yüksek kalite faktörünü kaydetmek için, 2.06 saniye içinde, 42 pm gibi dar bir spektral aralıkta seri olarak hızlı ve yüksek çözünürlükte spektral taramalar yapılmıştır. Şekil 3-18'deki gibi bu taramalar sırasında damlanın çabuk geçen FGK'lerini yakalamayı başardık. Burada hacmi önce küçülen (a) daha sonra büyüyen (b) ve inceltilmiş fiber dalga kılavuzun ile uyarılan mikrodamlanın iletim spektrasını gösterdik. Her iki durumda keskin kiplerden oluşan karışık yapının toplu bir biçimde spektrumun uzun dalga boyu sonuna veya kısa dalga boyu sonuna doğru kaydığını gözlemledik. Temsili FGK'lerin üzerine uygun Lorentz eğrisi yerleştirildi ve bu eğrilerin yarı maksimumdaki tam genişlikleri kısa dalga boyuna doğru kayan durum için 0.35 pm (WGM A) ve uzun dalga boyuna kayan durum için 0.44 pm (WGM B) olarak bulundu. Spektral kayma için ölçülen yarı maksimumdaki tam genişlikler doğrulandıktan sonra damlanın hacmi değişirken ki kalite faktörleri hesaplanabildi. Hızlı spektral taramalarımızı ele aldığımızda (uzun dalga boyundan kısa dalga boyuna doğru), WGM A için kalite faktörü 1.85×10^6 ve WGM B için kalite faktörü 1.21×10^6 olarak bulundu.

Özet olarak, inceltilmiş optik fiber dalga kılavuzu ile uyarılan ve yüzey üzerinde duran sıvı mikrodamlaların ultrayüksek kalite faktörlerinin direk olarak spektral karakterizasyonunu gösterdik. Ölçülen kalite faktörleri 10^6 dan büyük olmakla beraber temek olarak damlanın ışık emiliminden daha çok damlanın hacmindeki dengeden kaynaklanmaktadır. Bu problemler damlanın hacminin aktif fototermal kontrolü ile çözülebilir [44]. Böylece sıvı damlaların ölçülebilicek maksimum kalite faktörü ölçülebilir.

İnciletilmiş fiber mikrodamla optik bağlaşması ile ultrayüksek kalite faktörlerini gösteren bu ölçümlerimiz şu anda yayına hazırlanmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar kısa süre içerisinde uluslararası dergilerde yayınlara dönüştürülecektir.

4 Sonuç

Bu proje ile su tutmayan yüzey üzerinde duran mikrodamlaların inceltilmiş fiberle spektroskopisi için gerekli tüm düzenekler kurulmuş ve ultrayüksek çözünürlükte spektroskopi deneyleri gerçekleştirilip mikrodamla FGK'lerinde 10^6 mertebesinde ultrayüksek kalite faktörleri ölçülmüştür. Gerçekleştirilen ilk deneylerde mikrodamlalarda gözlenmesi beklenen optomekanik bağlaşmanın anlaşılması için, mikrodamlaların mekanik rezonanslarınn karakterizasyonu çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalarda dikey mekanik ve yatay elektriksel uyarılar ile mikrodamlaların temel mekanik rezonansları ölçülmüş ve bu ölçümler mikrodamlaların kontak açılarının belirlenmesinde kullanılmıştır. Böylece yeni bir kontak açısı belirleme yöntemi bulunmuştur. Bu yeni kontak açısı belirleme yöntemi iki adet uluslararası makalede yayınlanmıştır. Laboratuvarımızda yürütülen çalışmalarda mekanik rezonansların geleneksel ışıma spektroskopisi yöntemiyle değil harekete hassas bir fotodetektör ile ölçülmesi de başarılmıştır. Bu yöntem küçük kontak açısına ($\theta<150^\circ$) sahip mikrodamlaların incelenmesine izin verdiği gibi kendinden sönme (photobleaching) fenomeninden etkilenmemektedir.

Bu çalışmalara paralel olarak projemizde inceltilmiş fiber ile mikrodamla arasında optik bağlaşmasına literatürde ilk defa ulaşılmıştır. Gliserol-su mikrdamlalarının FGK'lerinde 10^6 mertebesinde ultrayüksek kalite faktörleri ölçülmüştür. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar kısa süre içerisinde uluslararası yayınlara dönüştürülecektir. Ayrıca bu sonuçların yakın zamanda heyecan verici başka sonuçlara da öncülük etmesi beklenmektedir.

5 Referanslar

[1] Fields, M. H., Popp, J., Chang, R. K., *Nonlinear Optics in Microspheres,* Progress in Optics; Ed.: Wolf, E., *Vol.* 41**,** Elsevier, Amsterdam, (2000)., Pp 1-95.

[2] Tang S. K. Y., Derda R., Quan Q., Loncar M., and Whitesides G. M., Continuously Tunable Droplet-based Optical Microcavities, *Opt. Express* **19**, 2204 (2011).

[3] Psaltis D., Quake S. R., and Yang C., Developing optofluidic technology through the fusion of microfluidics and optics, *Nature* **442**, 381 (2006).

[4] Kiraz, A., Kurt, A., Dundar, M. A., Demirel, A. L., Simple largely tunable optical microcavity, *Appl. Phys. Lett*, **89**, 081118 (2006).

[5] Vahala, K. J, Optical microcavities, *Nature*, **424**, 839-846 (2003).

[6] Kippenberg, T. J., Rokhsari, H., Carmon, T., Scherer, A., and Vahala, K. J., Analysis of Radiation-Pressure Induced Mechanical Oscillation of an Optical Microcavity, *Phys. Rev. Lett.*, **95**, 033901 (2005).

[7] Ma, R., Schliesser, A., Del'Haye P., Dabirian A.,; Anetsberger G., and Kippenberg, T. J., Radiation-pressure-driven vibrational modes in ultrahigh-Q silica microspheres, *Opt. Lett.*, **32**, 2200-2202 (2007).

[8] Orucevic, F., Lefèvre-Seguin V., and Hare, J., Transmittance and near-field characterization of sub-wavelength tapered optical fibers, *Opt. Express*, **15**, 13624-13629 (2007).

[9] Nosonovsky, M., and Bhushan, B., Superhydrophobic surfaces and emerging applications: non-adhesion, energy, green engineering, *Current Opinion in Coll. Interface Sci,* **14**, 270–280 (2009).

[10] Bhushan, B., Nanotribology and Nanomechanics of MEMS/NEMS and BioMEMS/BioNEMS Materials and Devices, *Microelectron. Eng*., **84**, 387–412 (2007).

[11] Rothstein, J. P., Slip on Superhydrophobic Surfaces, *Annual Review of Fluid Mechanics*., **42**, 89–109 (2010).

[12] de Gennes, P. G., Wetting: statics and Dynamics, Rev. Mod. Phys., **57**, 827–863 (1985).

[13] Lau, K. K. S., Bico, J., Teo, K. B. K., Chhowalla, M., Amaratunga,G. A. J., Milne, W. I., McKinley, G. H., and Gleason, K. K., Superhydrophobic carbon nanotube forests, *Nano Lett.,* **3**, 1701–1705 (2003).

[14] Journet, C., Moulinet, S., Ybert, C., Purcell, S. T., and Bocquet, L., Contact angle measurements on superhydrophobic carbon nanotube forests: Effect of fluid pressure, *Europhys. Lett.,* **71**, 104–109 (2005).

[15] Hung, Y.-L., Chang, Y.-Y., Wang, M.-J., and Lin, S.-Y., A simple method for measuring the superhydrophobic contact angle with high accuracy, *Rev. Sci.Instrum*, **81**, 065105 (2010).

[16] Checco, A., Guenoun, P., and Daillant, J., Nonlinear dependence of the contact angle of nanodroplets on contact line curvature, *Phys. Rev. Lett.,* **91**,186101 (2003).

[17] Cheng, Y.-T., Rodak, D. E., Angelopoulos, A., and Gacek, T., Microscopic observations of condensation of water on lotus leaves, *Appl. Phys. Lett*., **87**, 194112 (2005).

[18] Strani, M., and Sabetta, F., Free vibrations of a drop in partial contact with a solid support, *J. Fluid Mech*., **141**, 233–247 (1984).

[19] Smithwick R. W., and Boulet J. A. M., Electrically driven oscillations of a mercury-droplet electrode, *J. Colloid Interface Sci.* **150**, 567 (1992).

[20] Yamakita, S., Matsui, Y., and Shiokawa, S., New method for measurement of contact angle (droplet free vibration frequency method), *Jpn. J. Appl. Phys*., **38**, 3127–3130 (1999).

[21] Noblin, X., Buguin, A., and Brochard-Wyart, F., Vibrated sessile drops: Transition between pinned and mobile contact line oscillations*, Eur. Phys. J. E*,**14**, 395–404 (2004).

[22] Celestini, F., and Kofman, R., Resonant control of spin dynamics in ultracold quantum gases by microwave dressing, *Phys. Rev. E*, **73**, 041602 (2006).

[23] McHale, G., Elliott, S. J., Newton, M. I., Herbertson, D. L., and Esmer, K., Levitation-Free Vibrated Droplets: Resonant Oscillations of Liquid Marbles, *Langmuir,* **25**, 529–533 (2009).

[24] Eversole, J. D., Lin, H.-B., and Campillo, A., Cavity-mode identification of fluorescence and lasing in dye-doped microdroplets, *J. Appl. Opt.,* **31**, 1982–1991 (1992).

[25] Eversole, J. D., Lin, H.-B., and Campillo, A. J., Input/output resonance correlation in laser-induced emission from microdroplets, *J. Opt. Soc. Am. B*, **12**, 287 (1995).

[26] Marcus, Y., Surface Tension of Aqueous Electrolytes and Ions*, J. Chem. Eng. Data,* **55**, 3641–3644 (2010).

[27] Kiraz, A., Karadag, Y., Yorulmaz, S. C., and Muradoglu, M., Reversible photothermal tuning of a salty water microdroplet , *Phys. Chem. Chem. Phys*., **11**, 2597–2560 (2009).

[28] Lide D. R., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press (2005).

[29] Yuce, M. Y., *Preparation and Characterization of Hydrophobic Surfaces*, (Yüksek Lisans Tezi), Koç University Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul (2006).

[30] Yorulmaz, S. C., Mestre, M., Muradoglu, M., Alaca, B. E., and Kiraz, A., Controlled observation of nondegenerate cavity modes in a microdroplet on a superhydrophobic surface, *Opt. Commun*., **282**, 3024–3027 (2009).

[31] Nosonovsky, M., Multiscale Roughness and Stability of Superhydrophobic Biomimetic Interfaces, *Langmuir,* **23**, 3157–3161 (2007).

[32] Shirtcliffe, N. J., McHale, G., Newton, M. I., Chabrol, G., and Perry,C. C., Dual-scale roughness produces unusually water repellent surfaces, *Adv. Mater.,* **16**, 1929–1932 (2004).

[33] Mettu, S., and Chaudhury, M. K., Stochastic Relaxation of the Contact Line of a Water Drop on a Solid Substrate Subjected to White Noise Vibration: Roles of Hysteresis, *Langmuir*, **26**, 8131–8140 (2010).

[34] Meiron, T. S., Marmur, A., and Saguy, I. S., Contact angle measurement on rough surfaces, *J. Colloid Interface Sci*., **274**, 637–644 (2004).

[35] Bormashenko, E., Pogreb, R., Whyman, G., and Erlich, M., Resonance Cassie-Wenzel wetting transition for horizontally vibrated drops deposited on a rough surface, *Langmuir*, **23**, 12217–12221 (2007).

[36] Jonas A., Karadag Y., Tasaltin N., Kucukkara I., and Kiraz A., Probing Microscopic Wetting Properties of Superhydrophobic Surfaces by Vibrated Micrometer-Sized Droplets, *Langmuir* **27,** 2150 (2011).

[37] Torza S., Cox R. G., and Mason S. G., Electrohydrodynamic Deformation and Burst of Liquid Drops, *Phil. Trans. R. Soc. A* **269,** 295 (1971).

[38] Bentenitis N., and Krause S., Droplet Deformation in DC Electric Fields: The Extended Leaky Dielectric Model, *Langmuir* **21**, 6194 (2005).

[39] Smithwick, R. W., and Boulet, J. A. M., Vibrations of microscopic mercury droplets on glass, *J. Colloid Interface Sci.,* **130**, 588–596 (1989).

[40] Yamada T., Sugimoto T., Higashiyama Y., Takeishi M., and Aoki T., Resonance phenomena of a single water droplet located on a hydrophobic sheet under AC electric field, *IEEE Transactions on Industry Applications* **39**, 59 (2003).

[41] Knight J. C., Cheung G., Jacques F., and Birks T. A., Phase-matched excitation of whispering-gallery-mode resonances by a fiber taper, *Opt. Lett.* **22**, 1129 (1997).

[42] Cai M., Painter O, and Vahala K. J., Observation of critical coupling in a fiber taper to a silica-microsphere whispering-gallery mode system, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 74 (2000).

[43] Hossein-Zadeh M., and Vahala K. J., Fiber-taper coupling to Whispering-Gallery modes of fluidic resonators embedded in a liquid medium, *Opt. Express* 14, 10800-10810 (2006).

[44] Kiraz A., Karadağ Y., and Muradoğlu M., Large spectral tuning of a water-glycerol microdroplet by a focused laser: characterization and modeling, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **10**, 6446-6454 (2008).

[45] Qian S.-X., Snow J. B., Tzeng H. M., and Chang R. K., Lasing Droplets - Highliting The Liquid-Air Interface by Laser-Emission, *Science* **231**, 486-488 (1986).

6 TÜBİTAK PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje No: 109T734

Proje Başlığı: Süperhidrofobik Yüzey Üzerinde Duran Sıvı Mikrodamlaların İnceltilmiş Optik Fiber ile Ultrayüksek Çözünürlükte Optik Spektroskopisi

Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Doç. Dr. Alper Kiraz (Yürütücü)

Araştırmacılar: Yasin Karadağ

Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: Koç Üniversitesi, Fizik Bölümü,

Rumelifeneri Yolu, Satıyer, 34450, İstanbul

Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: Destekleyen kuruluş yoktur.

Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 15/04/2010 – 15/04/2012

Öz (en çok 70 kelime)

Literatürde ilk defa, su tutmayan yüzey üzerinde duran mikrodamlalar ile inceltilmiş fiberler arasında optik bağlaşma sağlandı. Bu teknik ile gliserol-su mikrodamlalarının fısıldayan galeri kiplerinde 10^6 mertebesinde ultrayüksek kalite faktörleri ölçüldü. Su tutmayan yüzey üzerinde duran mikrodamlaların temel mekanik rezonansları incelendi. Bu rezonanslar dikey titreşimler ve yatay elektriksel alan uyarısı yöntemleriyle belirlendi. Sonuçlar kuramsal çalışmalar ile karşılaştırılarak mikrodamlaların kontak açıları belirlendi. Böylece literatüre yeni bir kontak açısı ölçüm yöntemi sunulmuş oldu.

Anahtar Kelimeler:

Fisildayan galeri kipi, süperhidrofobik yüzey, inceltilmiş optik fiber, optik spektroskopi

Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu mu? **Evet** ☐ **Gerekli Değil** ☒

Fikri Ürün Bildirim Formu'nun tesliminden sonra 3 ay içerisinde patent başvurusu yapılmalıdır.

Projeden Yapılan Yayınlar:

Tez:

No	Yayın Bilgileri
T1	Karadağ, Y., *Optical Spectroscopy of Liquid Microdroplets Standing on a Super-hydrophobic Surface with Tapered Fiber,* (Doktora Tezi), Koç Üniversitesi, Fizik Bölümü, beklenen mezuniyet tarihi 2013.

Uluslararası Dergilerde Yapılan Yayın: Yayın kopyaları rapora eklenmiltir.

No	Indeks	Yayın Bilgileri
Y1	SCI	A. Jonáš, Y. Karadag, N. Tasaltin, I. Kucukkara, and A. Kiraz, "Probing Microscopic Wetting Properties of Superhydrophobic Surfaces by Vibrated Micrometer-Sized Droplets", Langmuir, **27**(6)

		2150- 2154 (2011).
Y2	**SCI**	Y. Karadag, A. Jonáš, N. Tasaltin, and A. Kiraz, “Determination of Microdroplet Contact Angles Using Electrically Driven Droplet Oscillations”, Appl. Phys. Lett. **98**, 194101 (2011).

Sunulan Bildiriler: Bildiri özetleri ektedir. Sunum tipleri uluslararası (UA) ve ulusal (U) olarak belirtilmiştir.

No	**Sunum Tipi**	**Yayın Bilgileri**
S8	UA	(SÖZLÜ SUNUM) Karadag, Y., Jonas A., and Kiraz, A., *Ultrahigh Resolution Spectroscopy and Size-Stabilization of Individual Liquid Microdroplets Using Tapered Optical Fiber Waveguides,* 3rd European Conference on Microfluidics, 3-5 Aralık 2012 (kabul edildi)
S7	UA	(POSTER SUNUM) Karadag, Y., Jonáš, A., Mestre, M, and Kiraz, A., *Direct measurement of ultrahigh optical Q-factors of individual liquid microdroplets using tapered optical fiber waveguides*, EOS Annual Meeting 2012, 25-28 Eylül 2012 (kabul edildi)
S6	UA	(SÖZLÜ SUNUM) Karadag, Y., Jonáš, A., Tasaltin, N., and Kiraz, A., *Determination of microdroplet contact angles using electrically driven droplet oscillations*, OSA’s 95th Annual Meeting, Frontiers in Optics 2011, 16-20 Ekim 2011
S5	UA	(DAVETLİ SÖZLÜ SUNUM) Kiraz, A., *Liquid microdroplets on a superhydrophobic surface: A promising system for optofluidics research*, 4th EOS Topical Meeting on Optical Microsystems (OµS’11), Capri, 2011, 26-28 Eylül 2011
S4	U	(POSTER SUNUMU) Karadag, A., Jonáš, A., and Kiraz, A., *Tapered Optical Fibers for High-Resolution Spectroscopy of Whispering Gallery Modes of Microdroplet-Based Optical Resonant Cavities*, 13. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalışma Toplantısı, Bilkent Üniversitesi, Ankara (23 Eylül 2011)
S3	UA	(DAVETLİ SÖZLÜ SUNUM) Kiraz, A., *Liquid microdroplets on a superhydrophobic surface: A promising system for optofluidics research*, Photonics Prague 2011 (The 7th International Conference on Photonics Devices, and Systems), Prague, 2011, 24-26 Ağustos 2011
S2	UA	(SÖZLÜ SUNUM) Jonas, A., Karadag, Y., Tasaltin, N., Kucukkara, I., and Kiraz, A., *Probing local wetting properties of superhydrophobic surfaces by vibrated micrometer-sized droplets*, 1st EOS Conference on Optofluidics (EOSOF 2011), Munich, Germany, 23-25 Mayıs 2011
S1	UA	(SÖZLÜ SUNUM) Jonas, A., Karadag, Y., Tasaltin, N., Kucukkara, I., Kiraz, A., *Resonant Vibrations of Surface-Supported Microdroplets: An Optical Spectroscopy Study*, 2011 IEEE Photonics Society Winter Topical Meetings, USA, 10-12 Ocak 2011.