



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MİKROAKIŞKAN SİSTEMLERİNDE YÜZEY AKUSTİK
DALGALARI İLE BESSEL DEMETİ ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

Yeşim YALÇIN

Fizik Anabilim Dalı

Katıhal Fiziği Programı

**DANIŞMAN
Prof. Dr. Ayşe EROL**

**II. DANIŞMAN
Doç. Dr. Ahmet ÇİÇEK**

Haziran, 2019

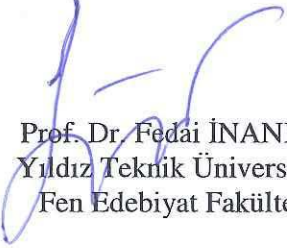
İSTANBUL

Handwritten signature

Bu çalışma, 25.06.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı, Katıhal Fiziği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi


Prof. Dr. Ayşe EROL(Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi


Prof. Dr. Fedai İNANIR
Yıldız Teknik Üniversite
Fen Edebiyat Fakülte


Doç. Dr. Ömer Dönmez
İstanbul Üniversite
Fen Fakülte



20.04.2016 tarihli resmi gazetede yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin FYL-2018-29788 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübeleriyle yol gösteren, her koşulda desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Ayşe EROL'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmaya başlamamız için bizleri teşvik eden ve kuramsal çalışmalarında görüşleriyle beni yönlendiren değerli eş danışman hocam Doç. Dr. Ahmet ÇİÇEK'e teşekkürlerimi sunarım.

Tüm deneysel çalışmalarında görüşleriyle ve tecrübesiyle destek ve yardımlarını esirgemeyen başta Prof. Dr. Bülent ULUĞ, Araş. Gör. Selman MUTLU, Öğr. Gör. Dr. Furkan KURUOĞLU ve Araş. Gör. Dr. Fahrettin SARCAN'a teşekkür ederim.

Beni çalışmalarım ile ilgili yüreklendiren, karşılaştığım tüm engellerde karşılıksız yardımlarını esirgemeyen değerli çalışma arkadaşlarım Agageldi MUHAMMETGULYYEV, Tülin ERUÇAR, Öğr. Gör. Erman ÇOKDUYGULULAR ve Araş. Gör. Çağlar ÇETİNKAYA'ya sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Sağladığı motivasyon ile pozitif bakış açısı kazanmamı sağlayan değerli hocalarım Doç. Dr. Barış KINACI ve Dr. Öğr. Üyesi Kamuran KARA'ya teşekkür ederim.

Çalışma boyunca desteklerini esirgemeyen Nano ve Optoelektronik Laboratuvarı çalışanlarına ve İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

Hayatımdaki tüm tercihlerimi ve kararlarımı destekleyen, bana olan inancını ve güvenini hiç kaybetmeyen aileme ve dostlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Lisans ve yüksek lisans hayatım boyunca her zaman yanımda olan ve beni destekleyen çok değerli arkadaşım Yasemin BEKTAŞOĞLU'na en içten dileklerle teşekkür ederim.

Haziran 2019

Yeşim YALÇIN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
TABLO LİSTESİ.....	xiii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xiv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR.....	5
2.1. MİKROAKIŞKAN SİSTEM TÜRLERİ	8
2.1.1. Damlacık tabanlı mikroakışkanlar	8
2.1.2. YAD tabanlı mikroakışkanlar	10
2.1.3. Eylemsizlik mikroakışkanları	11
2.1.4. Kâğıt tabanlı mikroakışkanlar	13
2.2. MİKROAKIŞKAN SİSTEMLERDE PARÇACIK MANİPÜLASYONU YÖNTEMLERİ	14
2.3. BESSEL DEMETLERİ.....	17
2.4. YÜZEY AKUSTİK DALGALARI	21
2.4.1. Rayleigh yüzey akustik dalgaları	23
2.4.2. Akustik dalga terminolojisi.....	23
2.4.3. Akustik dalga denklemi	26
2.4.4. Piezoelektrik etkilere sahip YAD	26
2.5. YÜZEY AKUSTİK DALGALARIN ÜRETİM GEREKSİNİMLERİ.....	28
2.5.1. Piezoelektrik etki.....	28
2.5.2. Piezoelektrik alttaş seçimi.....	28
2.5.3. Kristal kesimleri ve eksen dönüşümleri	30
2.5.4. İç içe geçmiş taraklı transdüserlar	31
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	33
3.1. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE IDT TASARIMININ MODELLENMESİ...	33
3.2. ÖRNEKLERİN YAPISI	37

3.3. ÜRETİM TEKNİKLERİ.....	39
3.3.1. Litografi ve Metalizasyon Aşamaları.....	40
3.4. ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ	43
3.4.1. Elektriksel ölçüm	43
3.4.2. Görüntüleme Yöntemleri	44
3.4.2.1. <i>Laser Doppler vibrometresi</i>	45
3.4.2.2. <i>Duman içerisinde nanoparçacıklar yardımı ile YAD görselleştirme</i>	45
3.4.2.3. <i>Schlieren Optiği</i>	46
3.4.2.4. <i>Girişim Yöntemi</i>	47
3.4.2.5. <i>İnce Sıvı Film Uygulanması</i>	48
3.4.2.6. <i>İnce Sıvı Filmlerin Girişim Yönteminde Kullanılması</i>	49
4. BULGULAR.....	50
4.1. MODELLEME SONUÇLARI.....	50
4.1.1. Sabit aralıklı durağan YAD IDT çifti örneği	50
4.1.2. Sabit aralıklı YAD Bessel IDT çifti örneği.....	51
4.1.3. Değişken aralıklı YAD Bessel IDT çifti örneği.....	52
4.2. FABRİKASYON SONUÇLARI	55
4.3. ELEKTRİKSEL ÖLÇÜM SONUÇLARI.....	55
4.3.1. Sabit aralıklı durağan YAD IDT çifti örneği	55
4.3.2. Sabit aralıklı YAD Bessel IDT çifti örneği.....	57
4.3.3. Değişken aralıklı YAD Bessel IDT çifti örneği	59
4.4. GÖRÜNTÜLEME SONUÇLARI	61
4.4.1. Duman içerisindeki nano parçacıklar yardımı ile YAD görselleştirme	61
4.4.2. Schlieren optiği	61
4.4.3. Girişim Yöntemi	62
4.4.4. İnce Sıvı Film Uygulanması	62
4.4.4.1. <i>Sabit aralıklı durağan YAD IDT çifti</i>	62
4.4.4.2. <i>Değişken aralıklı YAD Bessel IDT çifti</i>	64
4.4.5. İnce Sıvı Filmlerin Girişim Yönteminde Kullanılması	65
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	67
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ.....	81

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

- Şekil 1.1:** Mikroakışkanların manipülasyonu için farkı çalışma yöntemleri ve kuvvetler kullanılarak üretilen LOC sistemler: a) optik ayırma [16], b) akustik sıralama [17]. 3
- Şekil 2.1:** Çoklu kavisli kanallara sahip mikrokariştırmacı a) Dean akışı için ideal (i) iç ve (d) dış kanal duvarlarını gösterir, b) İncelenen kavisli mikrokanal geometrisinin şeması (genişlik 100 μm , yükseklik 29 μm ve eğrilik yarıçapı 630 μm). Enine akış alanı kavisli bölümün girişinden ve 1.5 mm genişliğindeki aşağı doğru akış bölgesinde incelenmiştir. Analitik olarak hesaplanan hız ve konsantrasyon profilleri (Sol Alt) ve yanında Reynold sayısının $2.6 < Re < 45.1$ ($0.7 < K < 12.1$) aralığında değiştiği akışa sahip mikrokanaldaki enine akışın eş odaklı kesit görüntüleri gösterilmiştir (Sağ Alt). Kutu içindeki alan enine akışın kanalın üst ve alt yarısında 90° döndüğü koşulları temsil eder. c) Mavi ve sarı boya ile etiketlenmiş sıvıların kanal içindeki akışının üstten görünümü. $K = 1$ de sıvılar tüm uzunluk boyunca paralel olarak akarken, $K = 14.2$ değerlerinde mavi sıvı içten dış duvara taşınırken [33]. 6
- Şekil 2.2:** Temsili bir LOC sistemi gösterimi [40]. 8
- Şekil 2.3:** (a) Sürekli fazın basınç gradyanı tarafından oluşturulan kesme kuvvetleri etkisinde dağınık fazın, boynunun incelenerek bir damlacık şekli aldığı T-kavşağı geometrisine sahip mikroakışkan damlacık aygıtı (b) Simetrik kesme kuvvetleri kullanılarak küresel damlacık şeklinin olduğu akış odaklama geometrisine sahip bir mikroakışkan damlacık aygıtı, c) T-kavşağına sahip damlacık tabanlı mikroakışkan aygıtlarda Ca 'nın değerine bağlı olarak oluşabilecek damlacık boyutlarını belirleyen damlacık parçalanma mekanizması, (1) sıkma, (2) damlama (3) püskürtme rejiminin gösterimi [55]. 10
- Şekil 2.4:** a) YAD'ın odaklanması: (1) akustik etkinin gözlenmesi için seçilen (I)-(IV) bölgeleri, (2) Seçilen bölgelerde parçacıkların görüntüsü, b) YAD pompalama: (1) zamana bağlı giriş IDT'sinin çalışması durumunda kanaldan sıvı boşaltımı, (2) çıkış IDT'sinin çalışması durumunda kanala su pompalanmasının renkli fotoğrafı [61], c) Bir YAD temassız damlacık taşıma sisteminde parçacıkların hareketi [62]. 11
- Şekil 2.5:** Farklı kesit şekillerine sahip kanallardan geçen parçacıkların odaklanma pozisyonlarının şematik gösterimi: a) dairesel kanal, b) kare kanal, c) yüksek en-boy oranı dikdörtgen kanal ve d) düşük en boy oranlı dikdörtgen kanal. 12
- Şekil 2.6:** Dikdörtgen kesitli kanala sahip eylemsizlik mikroakışkanlarının uygulamaları. a) Kırmızı kan hücrelerinin ve lökositlerin kandaki sayımı ve

ayrıştırılması [64]. b) 40 kademeli genişlemeye sahip sürekli mikrokannallar kullanarak Patojen bakteri hücrelerinin seyreltilmiş kandan ayrılması [70]. c) Euglena gracilis bakterisinin eylemsizlik mikrokışkanları ile odaklanması ve sıralanması [71].....	13
Şekil 2.7: Dört kanser biyobelirteçinin eşzamanlı ölçümü için 3B kağıt tabanlı bir ECL mikrokışkan sistemi: 1) serigrafi yöntemi ile basılan karbon elektrot, 2) ECL reaksiyonunu tetiklemek için kitosan (chitosan,CS) kaplama, 3) yakalama antikollarının bağlanması, 4) lift off, 5) antijen yakalama, 6) işaret antikolları ile ECL reaksiyonunu tetikleme [77].	14
Şekil 2.8: Kanser hücrelerinin ayrımı için YAD aygıtı şematik gösterimi ve görüntüsü: a) hücre ayrılmasının gösterimi, b)YAD tabanlı aygıtta hücre ayrılmasının arkasındaki çalışma mekanizmasındaki parçacıklar üzerine etki eden kuvvetlerin gösterimi, c) Daha büyük CTC'lere beyaz kan hücrelerine (White Blood Cells, WBCs) etki eden akustik radyasyon kuvvetinden (F_{aw}) daha büyük bir akustik radyasyon kuvveti (F_{ac}) etki eder ve sonuç olarak, CTC'ler WBC'lerden daha büyük bir dikey yer değiştirmeye (akış yönüne dik) sahiptir. F_{dc} ve F_{dw} sırasıyla CTC'lere ve WBC'lere etki eden sürüklenme kuvvetidir, c) YAD hücre ayırma aygıtının fotoğrafı [83].	15
Şekil 2.9: a) Sıfırıncı dereceden (J_0) ve b) 1. dereceden (J_1) Bessel demetlerinin kesit şiddet profilleri, c) $J_n(r)$ 'nin r 'ye bağlı değişimi [25].....	18
Şekil 2.10 : a) Bessel demetinin düzlem dalgalar (P) ve d çapında halka açıklık (S) ve b) Konik mercek ile eldesi.	18
Şekil 2.11: a) x yönünde ilerleyen Gaussian ve Bessel demet kesitlerinin karşılaştırılması [108], b) Bessel demetinin kendisini yeniden oluşturması: demet, x ekseninde merkezi koru kapsayan noktalı çember ile işaretli silindirik engelden sonra kendisini yeniden oluşturmaktadır [25].....	19
Şekil 2.12: a) Optik cımbız: (1) optik Bessel demeti boyunca tuzaklanan 5 μm büyüklüğündeki parçacıklar, (2) demetin merkezinde bir parçacığın tuzaklanması [115], b) Bessel demeti merkezinde 5 μm büyüklüğündeki silika küresinin: (1) tuzaklanması ve (2)-(4) havaya yükseltilmesi (levitasyonu) [121].	20
Şekil 2.13: a) Optik Bessel demeti eldesinde kullanılan fotonik kristal konik mercek ve elde edilen b) Bessel demetinin kesitsel görünümü [123].....	20
Şekil 2.14: Bir katı içinde yayılan akustik dalgaların yayılımı ve parçacık hareketleri [133,134].	22
Şekil 2.15: Gecikme hattı (delay line) konfigürasyonunda sabit parmak genişlikli iki IDT ile Rayleigh YAD üretimi.	23
Şekil 2.16: a) $f_0 = 10.07$ MHz değerindeki öz kipte yüzey davranışı, b) karşılıklı IDT'ler ile durağan YAD eldesinin FEM simülasyonu.	23
Şekil 2.17: a) Piezoelektrik ve b) tersine piezoelektrik etki prensibi.	28

Şekil 2.18: Piezoelektrik alttaşlar.	29
Şekil 2.19: a) Farklı kristal kesimleri b) Euler açıları ve kristal kesim yönleri [143].	30
Şekil 2.20: a) Lityum niobat (LiNbO_3) kristal yapısı b) 128° Y-X LiNbO_3 'ın kesim düzlemi.	31
Şekil 2.21: a) Sabit ve b) değişken parmak aralıklı IDT'ler, c) rezonans frekansları: (1) sabit aralıklı, (2) değişken parmak aralıklı IDT [146].	32
Şekil 3.1: FEM'de problem alanının ayrıklaştırılması [143].	33
Şekil 3.2: Lineer ve kuadratik elemanlarla alan yaklaşımı [143].	34
Şekil 3.3: Modellemede yapının 2B'ye azaltılması [143].	35
Şekil 3.4: a) IDT parmak çiftinin frekans öz değerlerinin FEM ile hesaplanması için model, b) modelin örgü işlemi.	36
Şekil 3.5: $f_0 = 13.3$ MHz değerindeki öz kipteki yüzey davranışı a) Simetrik modda ve b) Anti simetrik modda yüzey yer değiştirmesi.	37
Şekil 3.6: Durağan YAD oluşumu için tasarlanan sabit aralıklı IDT çifti.	37
Şekil 3.7: YAD Bessel demeti için LiNbO_3 alttaş üzerinde oluşturulacak Bessel IDT çiftinin a) 3 boyutlu gösterimi, b) demet oluşumu.	38
Şekil 3.8: YAD Bessel demeti oluşumu için tasarlanan sabit aralıklı YAD Bessel IDT çifti.	39
Şekil 3.9: a) Sabit aralıklı durağan YAD IDT çifti ve YAD Bessel IDT çifti örnekleri için b) Değişken aralıklı YAD Bessel IDT çifti örnekleri için kullanılan fabrikasyon akış diyagramı.	42
Şekil 3.10: Fabrikasyonu yapılan örnekler: a) Durağan YAD oluşturan sabit aralıklı IDT çifti örneği b) YAD Bessel demeti oluşturan sabit aralıklı YAD Bessel IDT çifti örneği c) YAD Bessel demeti oluşturan değişken aralıklı YAD Bessel IDT çifti örneği.	43
Şekil 3.11: a) YAD Bessel IDT çiftinin rezonans frekansının belirlenmesi için ve b) Durağan YAD IDT çiftinin rezonans frekansının belirlenmesi için elektriksel bağlantı konfigürasyonu.	44
Şekil 3.12: a) Kullanılan sistem b) Durağan YAD'ın rezonans frekansının belirlenmesi için ve c) YAD Bessel IDT çiftinin rezonans frekansının belirlenmesi için yapılan elektriksel bağlantılar.	44
Şekil 3.13: Laser Doppler vibrometresinin şematik gösterimi [159].	45
Şekil 3.14: Dumandaki karbon nanoparçacıkların piezoelektrik yüzey ile etkileşimini sağlamak amaçlı oluşturulan düzenek.	46

Şekil 3.15: Tek bir nokta ışık kaynağı ve çukur aynaya sahip basit Schlieren optiği sistemi.	46
Şekil 3.16: Schlieren optiği ile yüzey akustik dalgaların görüntülenmesi için oluşturulan düzeneğin ayna ve örnek kısmı.	47
Şekil 3.17: Girişim yönteminin şematik gösterimi.	48
Şekil 3.18: Girişim yöntemi için kurulan düzenek.	48
Şekil 3.19: a) İnce Sıvı Filmlerin Girişim Yöntemi için kullanılan sistem ve b) bu yöntem için yapılan elektriksel bağlantı.	49
Şekil 4.1: Sabit parmak aralıklı durağan YAD IDT'lerin FEM simülasyonları ile elde edilen 9-16 MHz arası frekans spektrumu.	50
Şekil 4.2: IDT'lerin yatayla yaptığı açıya bağlı olarak YAD Bessel demeti oluşumunun FEM simülasyon sonuçları. a) 5°, b) 10°, c) 15°, d) 20°, e) 25°, f) 30°	51
Şekil 4.3: YX-128° LiNbO ₃ yüzeyinde oluşturulan YAD Bessel demeti için yüzeydeki normalize edilmiş yer değiştirme miktarının $\theta =$ a) 5°, b) 10°, c) 15°, d) 20°, e) 25° ve f) 30° açılarında akustik eksen ($x=0$) boyunca (sol) ve odak noktasındaki dik kesitte (sağ) değişimi.	52
Şekil 4.4: Sabit ve değişken parmaklı IDT'lerin FEM simülasyonları ile elde edilen 7-19 MHz arası iletim özellikleri.	53
Şekil 4.5: Parmaklar arası mesafe 90-60 μm arasında düzgün değişen değişken taramalı IDT'ler ile 15° ve 20° açılarda oluşturulan Bessel çiftlerinin 10 MHz-16 MHz arasındaki FEM simülasyon sonuçları.	54
Şekil 4.6: LiNbO ₃ alttaş üzerine kaplanan Cr/ Au IDT'lerin a) Parmaklarının yakın görüntüsü, b) IDT bağlantısının mikroskop görüntüsü, c) Parmakların kalınlık profili, d) Sıyırma (Lift-off) işlemi sonrası genel görünüm.	55
Şekil 4.7: Sabit parmak aralıklı karşılıklı durağan YAD IDT çiftinin 5-20 MHz frekans aralığındaki teorik ve deneysel frekans spektrumu.	56
Şekil 4.8: IDT'lerde üretim ve ölçüm sırasında yaygın karşılaşılan örnek deformasyonları: a) bağlantı kopuklukları, b) kısa devreler.	56
Şekil 4.9: a) $\theta=15^\circ$ ve b) $\theta=20^\circ$ için karşılıklı Bessel IDT çiftlerinin 0-100 MHz frekans aralığındaki frekans spektrumları.	58
Şekil 4.10: a) $\theta=15^\circ$ ve b) $\theta=20^\circ$ için karşılıklı Bessel IDT çiftlerinin 13 MHz bölgesindeki spektral özellikleri.	59
Şekil 4.11: a) $\theta=15^\circ$ ve b) $\theta=20^\circ$ için karşılıklı değişken aralıklı Bessel IDT çiftlerinin 0-100 MHz frekans aralığındaki elektriksel iletim spektrumları.	60

Şekil 4.12: Piezoelektrik kristal yüzeyindeki Bessel çiftinin $\theta = 15^\circ$ 13 MHz'te 100 V'luk sinyal altında 15-30 saniye duman kaplandıktan sonraki görünümü.	61
Şekil 4.13: Schlieren optiği ile ateşin ısı etkisi altında havadaki oluşan kırılma indisi değişiminin görüntülenmesi.	62
Şekil 4.14: Sabit aralıklı durağan YAD IDT'lerin Şekil 3.18'deki düzenek ile tavana yansıtılmış görüntüsü.	62
Şekil 4.15: Şekil 3.10(b)'de $\theta = 15^\circ$ spektral özelliği verilen Bessel çiftinin farklı uyarım frekanslarındaki tepkileri: Uyarım frekansları, a) 13.27 MHz b) 13.30 MHz c) 13.40 MHz.	63
Şekil 4.16: a) $\theta = 15^\circ$ ve b) $\theta = 20^\circ$ Bessel çiftlerinin, sırası ile, 13.70 MHz ve 13.50 MHz'de uyarılmaları ile heptan ince film katmanındaki oluşumlar.	63
Şekil 4.17: Bessel çiftlerinin ($\theta = 20^\circ$) heptan ortamında 13.5 MHz'de uyarılması sırasında elde edilen ardışık kareler. Ok ile işaretlenen oluşum akustik eksen (kesikli çizgi) üzerinde kendiliğinden oluşmuştur.	64
Şekil 4.18: Parmaklar arası mesafe 90 μm -60 μm arasında doğrusal değişen IDT'lerin yatayla a) 15° , b) 20° açı yapacak şekilde oluşturulan Bessel çiftlerinin uyarılması sonucunda alttaş üzerindeki heptan katmanının tavan aydınlatması altında elde edilen görüntüleri. 1-5 arası görüntüler ilgili videolarda ardışık her 3 kareden birisi alınarak elde edilmiştir.	65
Şekil 4.19: Durağan YAD IDT çiftleri üzerinde etanol katmanının Şekil 3.18'deki düzenek ile 13 MHz'te yaklaşık 60 Voltluk uyarıcı sinyal altında elde edilen tavana yansıtılmış görüntüleri. a) IDT'ler arasındaki boş alanda gözlenen çizgiler, b) Etanol filmin hareketi ile görüntünün sağ tarafında küçük bir bölgede gözlenebilmektedir.	66

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Mikroakışkan sistemlerde yaygın olarak kullanılan yöntemler [33].	16
Tablo 2.2: Alt indislerin azaltılması [146].	25
Tablo 2.3: Akustik dalga üretimi için kullanılan bazı popüler altaşların özellikleri.....	29
Tablo 2.4: 128° Y-X LiNbO ₃ özellikleri.....	31
Tablo 3.1: Hazırlanan örneklerin geometrik parametreleri.	39
Tablo 3.2: Au ve Cr metalleri için aşındırıcıların karışım ve aşındırma oranları [158,159].	41

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
C_{YAD}	: Piezoelektrik alttaş üzerinde YAD hızı
C	: Sertlik sabiti
C_a	: Sıvı fazın kılcal sayısı
d	: Yarıçap
D	: Elektrik deplasman vektörü
E	: Elektrik alan
F	: Kuvvet
F_{ac}	: CTC _s 'lere etki eden akustik radyasyon kuvveti
F_{aw}	: WBC _s 'lere etki eden akustik radyasyon kuvveti
F_{dc}	: CTC _s 'lere etki eden sürüklenme kuvveti
F_{dw}	: WBC _s 'lere etki eden sürüklenme kuvveti
f	: Frekans
f_0	: Rezonans frekansı
h	: IDT genişliği
I	: Akustik/optik şiddet
J_n	: n. mertebeden 1. Tip Bessel fonksiyonu
K	: Dean sayısı
k	: Dalga sayısı
k_z	: Boyuna dalga sayısı
k_r	: Radyal dalga sayısı
k^2	: Elektromekanik eşleşim sabiti
μ	: Viskozite
N	: IDT parmaklarının sayısı
Re	: Reynolds sayısı
R	: Eğrilik yarıçapı
r	: Dönme yarıçapı
S	: Zorlanma tensörü
T	: Zor tensörü

t	: Zaman
u	: Sıvının karakteristik hızı
U	: Yerdeğiştirme
u_c	: Sürekli fazın akış hızı
V_0	: Uygulanan gerilim genliği
z_{max}	: Bessel demetinin akustik eksen boyunca maksimum uzanımı
a	: Örgü sabiti
λ	: Dalga boyu
λ_0	: Rezonans dalga boyu
ρ	: Yoğunluk
θ	: IDT'lerin akustik eksenle yaptığı açı
ω	: Açısal frekans
w	: IDT parmak genişliği
$\Delta\epsilon$	: Elektriksel geçirgenlik
Δx	: Manyetik yatkınlık
Δ	: IDT parmakları arasındaki mesafe

Kısaltmalar

Açıklama

2B	: İki Boyutlu
3B	: 3 Boyutlu
CTS_s	: Dolaşımdaki Tümör Hücreleri (Circulating Tumor Cells)
CS	: Citosan (Kitosan)
ECL	: Electrochemiluminescence (Elektrokimyasal lüminesans)
FEM	: Finite-Element Method (Sonlu Elemanlar Metodu)
FWHM	: Full Width at Half Maximum (Pikin Yarı Şiddetteki Genişliği)
IDT	: Inter-Digital Transducer (İç İçe Geçmiş Taraklı Transdüser)
ISFET_s	: Ion-Sensitive Field-Effect Transistors (İyonlara Duyarlı Alan Etkili Transistör)
LDV	: Laser Doppler Vibrometer (Laser Doppler vibrometresi)
LOC	: Lab On Cip (Yonga Üstü Laboratuvar)
MEM_s	: Microelectromechanical System (Mikroelektromekanik Sistemler)
μTAS	: Miniaturized Total Chemical Analysis System (Minyatürleştirilmiş Bütüncül Kimyasal Analiz Sistemi)
PSK	: Periyodik Sınır Koşulu

SAW : Surface Acoustic Wave (Yüzey Akustik Dalga)
YAD : Yüzey Akustik Dalgası
WBC_s : White Blood Cells (Beyaz Kan Hücreleri)



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MİKROAKIŞKAN SİSTEMLERİNDE YÜZEY AKUSTİK DALGALARI İLE BESSEL DEMETİ ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Yeşim YALÇIN

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Ayşe EROL

II. DANIŞMAN

Doç. Dr. Ahmet ÇİÇEK

Bu çalışmada, Lityum niyobat (LiNbO_3) piezoelektrik alttaş üzerinde iç içe geçmiş taraklı transdüserler (Inter-digital Transducer, IDT) kullanılarak durağan yüzey akustik dalgası (YAD) ve YAD Bessel demetleri üretilerek, YAD'ların optik ve elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır. Rayleigh YAD'ları ve YAD Bessel demetlerinin alttaş üzerindeki yüzey davranışlarının incelenmesi için sonlu elemanlar yöntemi (Finite Element Method, FEM) kullanılarak Comsol 5.3a programı ile simülasyonlar yapılmıştır.

Örneklerin fabrikasyonu standart fotolitografi yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmada ilk olarak, alttaş üzerinde durağan YAD'lar sabit parmak aralıklı IDT çiftleri kullanılarak üretilmiştir. Bu örnekten elde edilen simülasyon sonuçları ve deneysel veriler ışığında LiNbO_3 alttaş üzerinde sabit aralıklı IDT'lerin akustik eksenle belirli bir θ açısı yapacak şekilde konumlandırılması ile YAD Bessel demeti elde edilebileceği öngörülmüş ve akustik eksenle 15° ve 20° açı yapan sabit parmak aralıklı YAD Bessel demeti IDT çiftleri tasarlanmış ve fabrikasyonu tamamlanmıştır. Geniş bir frekans aralığında YAD Bessel demeti elde etmek için ise tez kapsamında YAD Bessel demeti IDT çiftleri değişken parmak aralıklı olarak tasarlanmıştır.

YAD'ların elektriksel karakterizasyonu için karşılıklı IDT'lerin birisi YAD uyarıcısı ve diğeri algılayıcı olarak kullanılarak spektrum analizöründe frekans spektrumları elde edilmiştir. YAD'ların görselleştirilmesi için, nano boyutlu duman parçacıkları, Schlieren optiğı, girişim yöntemi, ince sıvı film uygulaması ve ince sıvı filmlerin girişimi gibi farklı yöntemler denenmiştir.

Bu çalışmada üretilen IDT çiftlerinin rezonans frekansı simülasyonlar ile 13.3 MHz olarak hesaplanmıştır. Yapılan elektriksel ölçüm sonucunda ise rezonans frekansı simülasyonlar ile oldukça uyumlu bir şekilde 13.52 MHz olarak belirlenmiştir.

YAD Bessel demetleri ilk kez üretilmiştir. YAD Bessel demetleri yalnızca iki transdüser kullanan sade bir sistemle elde edildiğı için bu basit sistemin mikroakışkan sistemlerde basit parçacık manipölasyonunda kullanılacağı yaklaşımlarının geliştirilmesine katkıda bulunması beklenmektedir.

Haziran 2019, 100 sayfa.

Anahtar kelimeler: Yüzey akustik dalga, Bessel demeti, Sonlu elemanlar yöntemi, Mikroakışkan sistemler, Parçacık manipölasyonu.

SUMMARY

M.Sc. THESIS

BESSEL BEAM GENERATION AND CHARACTERIZATION BY SURFACE ACOUSTIC WAVES IN MICROFLUIDIC SYSTEMS

Yeşim YALÇIN

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Physics

Supervisor : Prof. Dr. Ayşe EROL

Co-Supervisor : Dr. Ahmet ÇİÇEK

In this study, the surface acoustic wave (SAW) and surface acoustic wave Bessel beams were generated by using the inter digital transducers (IDT) fabricated on the lithium niobate (LiNbO_3) piezoelectric substrate. Then SAWs were examined optically and electrically. Simulations were carried out with Comsol 5.3a program by using finite element method (Finite Element Method, FEM) in order to examine the surface behavior of Rayleigh SAWs and SAW Bessel beams.

The samples were fabricated by using standard photolithography method. Firstly, in this study, standing SAWs on the substrate were generated by using IDT pairs with constant finger widths. In the light of the simulation and experimental results obtained from this sample, it was foreseen that the SAW Bessel beams can be obtained with positioned IDTs with a certain tilt angle with the acoustic axis on the LiNbO_3 substrate. And the SAW Bessel beam IDT pairs with constant finger width were designed and fabricated having 15° and 20° tilt angles with acoustic axis. Also, in order to obtain SAW Bessel beam with a wide frequency range, SAW Bessel beam IDT pairs were designed and fabricated as having variable finger width.

Electrical characterization of SAWs has been obtained frequency spectrums in the spectrum analyzer by using as an sensing element the other and as SAW exciting one of the opposite IDTs. For the visualization of SAWs were experienced different methods such as nano-sized smoke particles, Schlieren optic, interference method, thin liquid film application and interference of thin liquid films.

The resonance frequency of the generated IDT pairs in this study was calculated as 13.3 MHz with simulations. As a result of the electrical measurement, the resonance frequency was determined as 13.52 MHz in good agreement with simulations.

SAW Bessel beams were generated for the first time. Since SAW Bessel beams were generated with a simple system using only two transducers, this simple system is expected to contribute to the development of simple particle manipulation approaches, which can be used in microfluidic systems.

June 2019, 100 pages.

Keywords: Surface acoustic wave, Bessel beam, Finite element method, Microfluidic systems, Particle manipulation

1. GİRİŞ

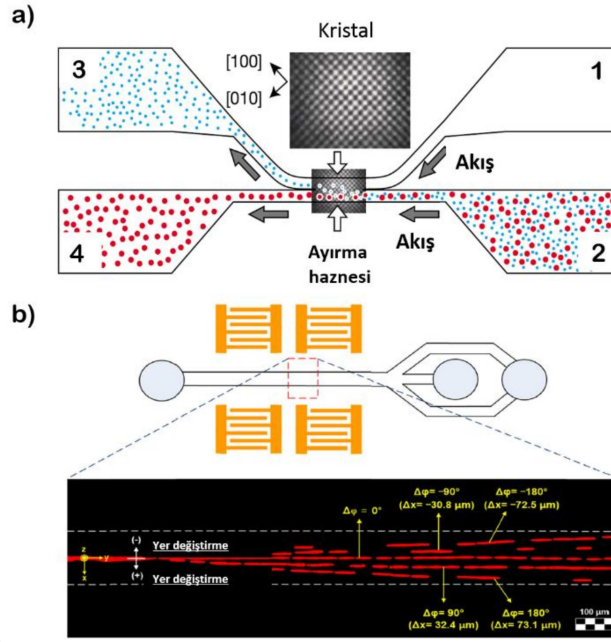
Günümüz teknolojisi daha küçük boyutlara sahip ancak yüksek performanslı aygıtlara dayalı olarak gelişmektedir. Mikro/nano boyutlu bu aygıtlar günlük hayatımızın hemen her alanında karşımıza çıkmaktadır. 1970'li yıllardan bu yana disiplinler arası işbirliği ile araştırmacılar tam donanımlı laboratuvarlarda yapılan farklı analiz ve testlerin daha küçük hacimlerde ve daha hızlı yapılabileceği mikro ölçeklerde analiz sistemleri üzerine çalışmaktadır. İlk Silisyum tabanlı minyatürleştirilmiş kimyasal analiz sistemi olan gaz kromatografi aygıtı *Stephen C. Terry* tarafından 1945 yılında üretildi [1,2]. Bu aygıt, geleneksel laboratuvar ekipmanları ile kıyaslandığında boyutları yaklaşık üçte bir kadar küçük olmasına rağmen gaz halindeki hidrokarbon karışımını sadece birkaç saniye içinde ayrıştırabilme yeteneğine sahiptir. Ancak yeterli teknoloji olmadığı için bu çalışma bilim dünyasında yeterli ilgiyi göremedi. Silisyum tabanlı çalışmalar bu yıllarda mikropompalar [3–7], mikrovalfler [8,9], iyonlara duyarlı alan etkili transistör (Ion-Sensitive Field-Effect Transistors, ISFETs) [10] ve mikro elektromekanik sistemler (Microelectromechanical system, MEMS) gibi farklı uygulama alanlarına odaklandı [11,12]. 1970 ve 1980 yılları arasında ise minyatürleştirilmiş analiz sistemlerinin üretimi için birçok metot geliştirildi [13]. 1990'lı yıllarda mikroakışkanlardaki gelişmeler ve ortaya çıkan yeni mikro üretim sistemleri sayesinde bütün laboratuvar işlemlerini aynı anda yapabilen silisyum tabanlı minyatür bütüncül sıvı kromatografi aygıtı üretildi [14]. Eş zamanlı olarak yine bu yıl içinde *Monz* [15] tarafından minyatürleştirilmiş bütüncül kimyasal analiz sistemi (Miniaturized Total Chemical Analysis System, μ TAS) kavramı ilk kez önerildi [15]. Başlangıçta aygıtları minyatürleştirme amacı aygıtın boyutlarını küçültmek değil, performansını arttırmaktı. Ancak bu aygıtların aynı zamanda daha az numune tüketimi ve analiz için gerekli olan tüm bileşenleri tek bir aygıt ile kontrol edebilme gücü sağladığı fark edildi. Bu sistemler ile analiz, parçacık manipülasyonu, taşınması ve sayımı yapılabileceği ön görüldü.

Günümüzde teknolojideki son gelişmeler ile minyatürleştirilmiş bütüncül kimyasal analiz sistemi veya yonga üstü laboratuvar (Lab on a chip, LOC) olarak bilinen yeni bir araştırma alanı ortaya çıkmıştır. Minyatür Laboratuvarlar olarak da bilinen bu aygıtlar

bilgisayarlarda bulunan mikroçiplerin üretim teknolojilerine benzer teknolojilerle üretilen ve bütün laboratuvar işlemlerinin eşzamanlı olarak birkaç cm^2 boyutundaki yonga üzerinde yapılabilmesini sağlayan aygıtlardır. Bu aygıtların üzerinde bulunan mikro üretim teknikleri ile üretilmiş valfler, kanallar, reaktörler, detektörler ve pompalar mikro-akışkanlar prensipleri ile örneklerin analiz edilmesine olanak sağlamaktadır. Mikro üretim teknikleri ile üretilen biyosensör ve kimyasal sensörleri geliştirmek için günümüzde halen yeni parçacık manipülasyon teknikleri geliştirilmektedir.

Mikroakışkan manipülasyonu için farklı teknikler kullanan LOC sistemleri Şekil 1.1’de verilmiştir. Şekil 1.1(a), optik kuvvetlere dayanan bir optik ayırma aygıtıdır. Düşük Reynolds sayısındaki akışlar laminar olduğu için bir uyarıcı (laser) olmadığı durumda, 2 odasındaki tüm parçacıklar, 4 odaya doğru akacaktır. Ancak aygıt içinden farklı parçacık akışına sahip akışkan geçtiğinde, ayırma haznesinde bulunan uzay merkezli tetragonal kristal üzerinden 45° ile kırılan laser ışını, optik gücün yeterli olduğu kütleye sahip parçacıkların optik kuvvet etkisi ile asıl yörüngelerinden saptırılmasını sağlar. Optik kuvvet etkisinde kuvvetli bir şekilde 45° saptırılan parçacıklar 3 odasında toplanırken diğerleri, engellenmeden doğrudan 4 odaya geçer. 1 odası ayırma odasında oluşan basınç dengesini sağlamak için boş bırakılmıştır.

Şekil 1.1(b)’de verilen akustik sıralama aygıtında beş farklı faz kayması ($-180^\circ, -90^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$) uygulanmış $5 \mu\text{m}$ boyutundaki parçacıklarının yörüngeleri gösterilmiştir. Aygıtta birinci IDT çifti tarafından indüklenen basınç düğümünün merkez pozisyonu deneyler sırasında sabitlenerek faz değişimine bağlı olarak parçacıkların manipülasyonunu göstermek için referans pozisyonu olarak kullanılır. İkinci IDT çiftinin birine, $\Delta\varphi = -180^\circ, -90^\circ, 0^\circ, 90^\circ$ ve 180° faz kayması uygulanarak parçacıklar, her faz kayması nedeniyle basınç düğümü pozisyonunu değiştirerek farklı yanal yer değiştirmeler ile manipüle edilir. Pozitif faz kaymaları ($90^\circ, 180^\circ$) uygulandığında, basınç düğümü, mikroakışkan kanalında pozitif x yönü boyunca Δx hareket eder ve parçacıklar, Şekil 1.1(b)’de görüldüğü gibi mikroakışkan kanalının alt kenarına doğru hareket eder. Benzer şekilde, negatif faz kaymaları ($-90^\circ, -180^\circ$) uygulandığında, basınç düğümünün negatif x yönü boyunca hareket etmesi ile parçacıkların kanalın üst kenarına doğru toplanır.



Şekil 1.1: Mikroakışkanların manipülasyonu için farklı çalışma yöntemleri ve kuvvetler kullanılarak üretilen LOC sistemler: a) optik ayırma [16], b) akustik sıralama [17].

Bu aygıtlarda parçacık manipülasyonu için yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında optik ve akustik cımbızlar yer almaktadır. İlk kez 1986 yılında *Arthur Ashkin, Steven Chu ve arkadaşları* tarafından optik cımbız olarak bilinen yöntemde bir laser demeti ile parçacık manipülasyonunun yapılabildiği gösterilmiştir [18]. Optik cımbızlarda [19] odaklanmış laser demetinin uyguladığı ışımaya basıncı esas alınırken, akustik cımbızlarda [20,21] genellikle durağan ultrases dalgalarından yararlanılmaktadır. Optik cımbızlarda güçlü laser demetinin kullanılmasının biyolojik malzemelerde ısınmaya hatta bozulmaya neden olabileceği gösterilmiştir [22]. Laser yerine koherent olmayan ışık demetinin kullanımı ise kırınım etkisi nedeniyle pratik olmamaktadır. Buna karşılık akustik cımbızlar, akustik enerji biyolojik materyaller tarafından yüksek düzeyde soğurulduğu için biyoyumludur [23]. Ancak parçacık manipülasyonu için sınırlı demet genişliğinden kaynaklanan kırınım etkisinden bağımsız akustik demetlerin elde edilmesi gereklidir. Bessel demetleri dalga boyunun on katı mertebesindeki uzunluklarda kırınımına uğramadan demet profilini koruyarak ilerleyebilmeleri ve bir engel ile etkileştikten sonra orijinal şekillerini geri kazanabilmeleri gibi iki önemli özelliği sayesinde bu gereksinimi karşılamak için en önemli adaylar arasındadır. Bu iki özellik sayesinde karmaşık odaklama ve hizalama düzenekleri gerektirmeden Bessel demetinin parçacık manipülasyonunda kullanılabileceği öngörülmüştür [24,25]. Akustik Bessel demetlerinin

su ve hava ortamında Fresnel merceği ve benzeri yapılar kullanılarak elde edilebildiği gösterilmiştir [26–31]. Ancak piezoelektrik bir alttaş üzerinde yüzey akustik dalgaları ile Bessel demetinin oluşturulmasına yönelik henüz bir çalışma yapılmamıştır.

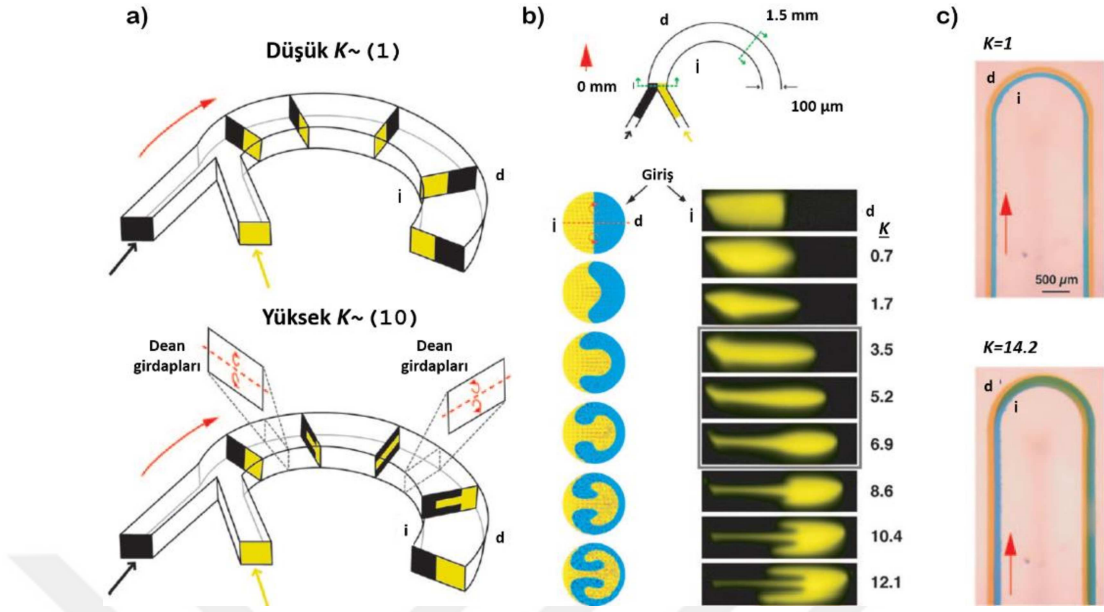
Bu tez kapsamında mikroakışkan sistemlerde piozelektrik alttaş üzerinde üretilecek YAD ile YAD Bessel demetinin oluşturulması için uygun IDT tasarlanması, tasarımın mikro-üretim teknikleri ile piezoelektrik alttaş üzerinde üretimi, oluşturulan Bessel demetinin görüntülenip, simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması ve bu demetlerin parçacık manipölasyonunda kullanılabilirliğinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Tezin Genel Kısımlar bölümünde mikroakışkan sistemlerde kullanılan tekniklere kısaca değinildikten sonra, akustik dalgaların fiziği, yüzey akustik dalgalarının özellikleri ve YAD Bessel demetinin karakteristiği ve elde edilme yöntemleri anlatılmıştır. Malzeme ve Yöntem kısmında piezoelektrik alttaş üzerinde Bessel demeti elde edilmesi için yapılan modelleme, modellemesi yapılan IDT’lerin mikroüretim teknikleri ile üretimi, YAD Bessel demetinin elektriksel ve görsel karakterizasyonu için kullanılan yöntemler açıklanmıştır. Bulgular kısmında elde edilen deneysel veriler sunulmuştur. Tartışma ve Sonuç kısmında ise yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar özetlenerek, bu alanda geleceğe yönelik yapılabilecek araştırmalara yön verebilecek öneri ve öngörölere yer verilmiştir.

2. GENEL KISIMLAR

Genel anlamda düşünülduğünde mikroakışkan sistemler on ile yüz mikrometre boyutlara sahip kanallar kullanılarak çok küçük nanolitre ve attolitre hacimlerde sıvı hareketinin kontrol edildiği sistemlerdir. Mikro ölçekte çalışmanın en önemli sebeplerinden biri sıvının kontrolü için ortaya yeni birçok fırsat çıkarabilecek boyutsal değişiklikleri yapmaktır. Bu hacimlerde sıvılar ile çalışmanın doğal olarak getirdiği birçok avantaj vardır. Akışkanlar mekaniğinde *laminer* ve *türbülans* (girdaplı) akım olmak üzere iki tür akım mekanizması bulunmaktadır [32]. Bir akışkanda laminar akımın girdaplı akıma dönüştüğü noktada eylemsizlik kuvvetlerinin, viskozluk kuvvetlerine oranı sabittir. Bu sabite *Reynolds sayısı* (Re) denir. $Re = \rho U L / \mu$ ifadesi ile verilir. Burada ρ, U, L ve μ sırasıyla sıvı yoğunluğu, karakteristik hız, sistemin skalasını belirleyen karakteristik lineer boyut ve viskozitedir. Düşük Reynolds sayısının en önemli etkilerinden biri, tipik olarak türbülans akımı yoluyla ortaya çıkabilecek olan kaotik akış durumunu önlemektir. Bu durum, sadece difüzyon gradyanları ile farklı tür akışkanları yonga üzerinde ayrılmış halde tutmak için avantajlıdır. Ancak aynı zamanda parçacık karıştırma konumu ve zamanı üzerinde de kontrol sahibi olmak istenildiği durumlar için uygun değildir. Mikro boyutlarda sıvı karıştırma işleminde girdaplı akış mekanizmasının hidrodinamik olarak gerçekleştirilmesi için, yüzey alanını arttırmak amacıyla sıvı akışını büken yöntemler geliştirilmiştir (Şekil 2.1).

Bir akışkanın kavisli bir boru içindeki hareketi ilk kez İngiliz bilim adamı *Dean* [34] tarafından incelenmiştir. Dean, basınç düşüşünün aynı akış hızında kavisli bir boruda düz bir borudan çok daha küçük olduğunu göstermektedir. Kavisli bir kanaldaki bu dengesiz akış, girdaplı akış olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2.1: Çoklu kavisli kanallara sahip mikrokariştirici a) Dean akışı için ideal (i) iç ve (d) dış kanal duvarlarını gösterir, b) İncelenen kavisli mikrokanal geometrisinin şeması (genişlik 100 μm , yükseklik 29 μm ve eğrilik yarıçapı 630 μm). Enine akış alanı kavisli bölümün girişinden ve 1.5 mm genişliğindeki aşağı doğru akış bölgesinde incelenmiştir. Analitik olarak hesaplanan hız ve konsantrasyon profilleri (Sol Alt) ve yanında Reynold sayısının $2.6 < Re < 45.1$ ($0.7 < K < 12.1$) aralığında değiştiği akışa sahip mikrokanaldaki enine akışın eş odaklı kesit görüntüleri gösterilmiştir (Sağ Alt). Kutu içindeki alan enine akışın kanalın üst ve alt yarısında 90° döndüğü koşulları temsil eder. c) Mavi ve sarı boya ile etiketlenmiş sıvıların kanal içindeki akışının üstten görünümü. $K=1$ de sıvılar tüm uzunluk boyunca paralel olarak akarken, $K=14.2$ değerlerinde mavi sıvı içten dış duvara taşınırken [33].

Bu durumda kavisli bir kanalda girdap oluşumu koşullarını tanımlamak için kullanılan karakteristik parametre *Dean sayısı* (K)'dır ve $K = (d/R)^{0.5} Re$ ifadesi ile verilir [35]. Burada d borunun yarıçapı, R borunu eğrilik yarıçapıdır. Şekil 2.1(a)'da görüldüğü gibi çok düşük akış hızlarında ($K \sim 1$) kavisli bir mikro kanala giren farklı türdeki (sarı ve siyah) iki paralel sıvının laminar akışları minimum bozulmaya uğrar. Ancak akış hızı arttıkça ($K \sim 10$) kanalın alt ve üst yarısında Dean girdapları tarafından oluşturulan enine akış, dış (siyah) akımı iç duvarlara doğru çekerken iç (sarı) akımı kanalın iç duvarından radyal olarak dış duvara doğru taşınmasını sağlar. Santrifüj etkileri, aksel hızın maksimum olduğu merkez doğrultusu boyunca en fazladır. Bu durumda duvarların yakınında daha yavaş hareket eden sıvı, içeri doğru süpürülürken orta düzlem boyunca akışın dışarı doğru olmasına sebep olur (Şekil 2.1(b)). Sonuçta, iki paralel sıvı akışının akış doğrultusu neredeyse tamamen 180° dönüş yapabilir (Şekil 2.1(c)).

Mikroakışkan sistemler ile çalışmanın ticari ve pratik avantajı ise geleneksel analiz yöntemlerine nazaran daha kısa sürede daha az bileşen ve numune ile sıvı analizinin gerçekleştirilebilmesidir. Bu sistemlerin uygulanabilirliği potansiyelinin ortaya çıkmasından bu yana farklı alanlarda da mümkün olan uygulamaları çeşitlendiren teknikler geliştirilmiştir. Mikroakışkan pompalar [6], valfler [4], akışlı hücre ölçümü (akış sitometrisi), sensörler ve DNA dizileme ve analizi gibi farklı kullanım alanları için geliştirilen bu teknikler dünya çapında çok sayıda şirketten oluşan büyük bir endüstriyi desteklemektedir. Kimyasal tehdit algılama, mürekkep püskürtmeli baskı teknolojisi ve gösterge teknolojisi olmak üzere mikroakışkan tekniklerini kullanan çok çeşitli uygulamalar olmasına rağmen mikroakışkanlar klinik tanı ve tedavi alanında en büyük ilgiyi çekme potansiyeline sahiptir. Aksi halde kanser gibi erken tanı ve teşhisin hayati önem taşıdığı hastalıklar için gelişen bir sağlık sistemi içinde artan klinik testlerin yapılması sırasında gerekli zaman ve masrafın azaltılması mümkün değildir. Akışkanlar için mikro ölçekte geliştirilen bu teknikler çok çeşitli uygulamalara entegre edilebilir ve/veya birçok fonksiyonu bir araya getirebilen LOC uygulamalarının gelişimine katkıda bulunabilir. Bu alanın sağladığı potansiyel avantajlar maliyetleri önemli derecede düşürürken, tanı ve tedavi işlemlerinin yalnızca klinik ortamda gerçekleştirebilme noktasından kaydırarak özellikle kaynak ve altyapıca zayıf bölgelerde bu işlemin kolayca ve az miktarda numune ile yapılabilmesine olanak sağlamasıdır. LOC sistemleri çoğunlukla tanı uygulamalarına odaklanmış olsa da kanda uyuşturucunun belirlenmesi [36–38] ve çevresel analizler [38,39] gibi diğer uygulamalarda da kullanılabilmektedir. Şekil 2.2’de bir numunenin analizi için gerekli birden fazla adımı aynı anda gerçekleştirebilen, maliyetleri azaltan tek ve kompakt bir LOC sisteminin temsili gösterimi verilmiştir. Hücreler, parçacıklar, biyomoleküller dahil olmak üzere mikroakışkan türlerin manipülasyonu Şekil 2.2’de de görüldüğü gibi mikroakışkan sistemlerde bütünsel olarak yapılan bir işlemdir. Mikroakışkanların filtrelenmesi, ayrıştırılması ve konsantrasyonunun belirlenmesi, hastanın ön tedavisi ve hastalığın tespiti için gerekli adımlardır. Bununla birlikte laboratuvar ortamında bu işlemleri gerçekleştirmek için kullanılan yöntemlerin çoğu mikro ölçeğe aktarılacak zorunda değildir.

Şekil 2.2: Temsili bir LOC sistemi gösterimi [40].

Örneğin geleneksel santrifüjlemede üretilen kuvvet ($F \sim r\omega^2$ burada r , dönme yarıçapı ve ω ise açısal hızdır) yarıçap ile orantılıdır. Bu yöntem boyutlar ve hız küçüldükçe çok kullanışlı değildir. Bu nedenle bu işlemleri mikro ölçekte gerçekleştirmek için, elektriksel [41], optik [42], manyetik [43], hidrodinamik [44] ve akustik [45,46] kuvvetler kullanarak yapan yonga üzerinde manipülasyon yöntemleri geliştirilmiştir. Makro ölçekte biyomoleküllerin veya hücrelerin manipülasyonu için işlevleri mümkün olmayan bu kuvvetlerin kullanımı mikro ölçekte mümkün hale getirilmiştir. Akustik yöntemlerin hala araştırma aşamasında olma nedeni, mikroakışkan sistemlerde akustik kuvvetin yonganın belli bir bölgesinde lokalize hale getirilmesinin mevcut yöntemler ile imkansız olmasa da oldukça zor olmasıdır. Ancak YAD mikroakışkan sistemlerinin parçacık manipülasyonu için önerilmesi ile birlikte akustik kuvvetleri kontrollü bir şekilde oluşturarak lokalize olmasını sağlamak ve mikroakışkan aygıtlara entegre etmek mümkün hale gelmiştir [47].

2.1. MİKROAKIŞKAN SİSTEM TÜRLERİ

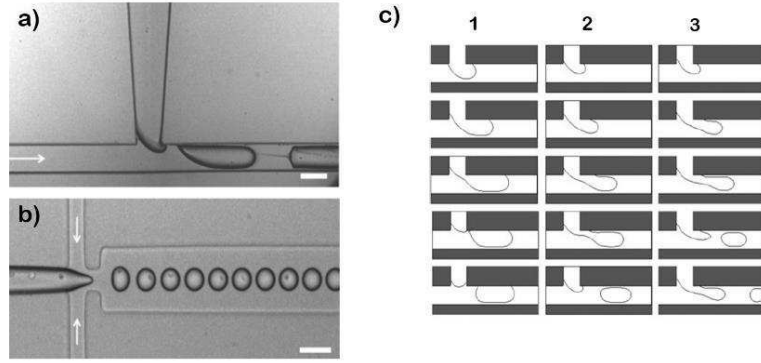
2.1.1. Damlacık tabanlı mikroakışkanlar

Mikroakışkan sistem türlerinden biri olan damlacık tabanlı mikroakışkanlar, Reynolds sayısı dolayısıyla laminar akış rejimlerinin düşük olduğu ve karışmayan fazlarda ayrık sıvı hacimlerinin daha kolay kontrol edilerek manipülasyonuna olanak sağlar [48,49]. Damlacık tabanlı sistemlerde damlacık oluşumunun gerçekleşmesi için, sürekli faz

(damlacıkların üretildiği ortam) ve dağılmış faz (damlacık fazı) olarak adlandırılan iki karışmaz faz kullanılmalıdır. Üretilen damlacıkların boyutu esas olarak sürekli fazın ve dağılık fazın akış oranı, iki faz arasındaki ara yüzey gerilimi ve damlacık üretimi için kullanılan kanalların geometrisi ile kontrol edilir [50,51].

Damlacıklar hem pasif hem de aktif olarak oluşturulabilir [52]. Aktif damlacık oluşumu genellikle pasif oluşuma benzer aygıtlar kullanır ancak damlacık manipülasyonu için harici bir enerji girişi (elektrik, manyetik, santrifüj) gerektirir [52]. Pasif damlacık oluşumu, basit aygıt tasarımları ile benzer sonuçlar ürettiği için aktiften daha yaygın olma eğilimindedir. Genel olarak, pasif damlacık oluşumu için üç tip mikroakışkan geometrisi kullanılır: Çapraz Akış, Akış Odaklanması ve Ortak Akış [52]. Şekil 2.3 (a) ve (b), bir mikroakışkan sisteminde damlacık oluşturma temel prensibini göstermektedir; burada (a) bir T-kavşağı ve (b) akış odaklama yapısını göstermektedir. Her ikisinde de sürekli (yağ) bir faz, dağılık (su) bir faz ile karıştırılır, bu da kendiliğinden ve kontrol edilebilir bir damlacık oluşumu ile sonuçlanır, daha yüksek yüzey gerilimine sahip sıvı (su), daha küçük yüzey gerilimine sahip sıvı (yağ) içinde damlacıklar oluşturur [49,53,54]. Bu sistemlerdeki damlacık oluşum mekanizması $C_a = \mu u_c / L$ ile belirlenen sürekli fazın kılcal (capillary) sayısı ile belirlenir, burada u_c , sürekli fazın akış hızıdır. Bu mekanizmalar Şekil 2.3(c)'de de görüldüğü gibi genellikle C_a 'nın değerine bağlı olarak sıkma, damlama veya püskürtme olmak üzere üç rejimden birine uyar. Düşük C_a değerleri için, yüzey geriliminin baskın olduğu, sıkma rejimi ile damlacık oluşumu gözlenir [55].

Mikroakışkan aygıtlarda damlacık üretimi için en çok sıkma rejimi veya bazen damlacık boyutlarının daha titizlikle kontrol edilebildiği damlama rejimi kullanılır. Damlacık tabanlı bu sistemler, nanolitre ve attolitre hacimlerdeki sıvıların rahatlıkla taşınabilmesi, daha iyi karıştırılabilmesi, kapsüllenebilmesi, ayrılması ve kolay algılanmasına olanak tanır [48,56].

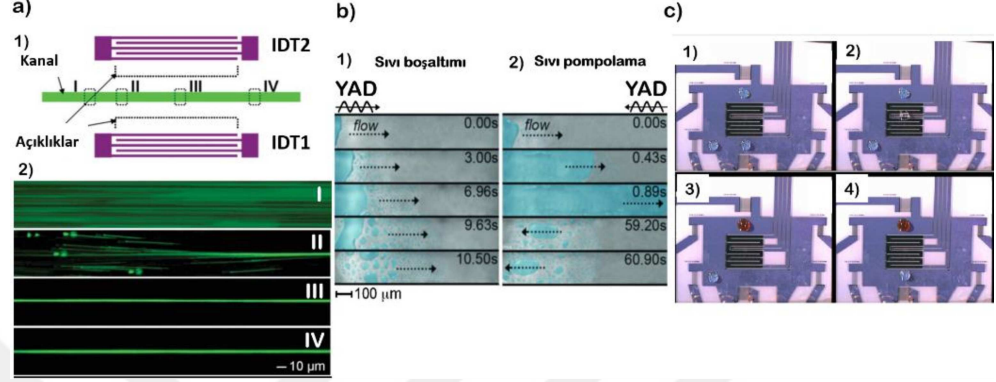


Şekil 2.3: (a) Sürekli fazın basınç gradyanı tarafından oluşturulan kesme kuvvetleri etkisinde dağınık fazın, boynunun incelererek bir damlacık şekli aldığı T-kavşağı geometrisine sahip mikroakışkan damlacık aygıtı (b) Simetrik kesme kuvvetleri kullanılarak küresel damlacık şeklinin olduğu akış odaklama geometrisine sahip bir mikroakışkan damlacık aygıtı, c) T-kavşağına sahip damlacık tabanlı mikroakışkan aygıtlarda C_a 'nın değerine bağlı olarak oluşabilecek damlacık boyutlarını belirleyen damlacık parçalanma mekanizması, (1) sıkma, (2) damlama (3) püskürtme rejiminin gösterimi [55].

2.1.2. YAD tabanlı mikroakışkanlar

Sürekli sıvı akışının olduğu mikroakışkan sistemlerde YAD'lar kullanılır. YAD, bir malzemenin toplu titreşiminden ziyade, yalnızca yüzeyinde dolaşan özel bir akustik dalga türüdür. YAD aygıtları ilk olarak telekomünikasyon endüstrisi için geliştirilmiş olup, ayrıca RF cihazlarında bant geçirici filtreler olarak da kullanılmaktadır [57]. Günümüzde YAD'lar, yonga üstü laboratuvar mikroakışkan aygıtlarında akustik alanlar üretmede diğer yöntemlere göre önemli avantajlara sahip olduğu için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu avantajlardan bazıları şunlardır: Mekanik yer değiştirmenin, malzeme ara yüzünde (genellikle piezoelektrik alüminyum ve su) yoğunlaşarak akışkan içine verimli enerji aktarımı sağlanabilmesine ve mikroakışkan uygulamalarında tipik YAD aygıtlarının, mikroakışkan kanallarının boyutlarına göre akustik dalga boyunun ($\sim 1 \mu\text{m}$ ile $300 \mu\text{m}$) [58] ve frekansının 10 MHz ile 10 GHz arasında değişebilmesine olanak tanınmasıdır [59]. Bu aygıtlar, düz bir piezoelektrik alüminyum üzerinde desenli bir dizi metal IDT'ler kullanılarak oluşturulur ve mikroakışkan sistemlere kolayca entegre edilebilir [60]. Bu avantajları sayesinde YAD'ların oluşturduğu akustik alanlar, parçacık odaklama, pompalama ve temassız damlacık taşınması dahil olmak üzere mikroakışkan sistemlerde çeşitli kullanım alanlarına sahiptir (Şekil 2.4(a)), YAD parçacık odaklama sistemini göstermektedir. Akustik etkinin gözlenmesi için seçilen (I)-(IV) bölgelerinde parçacık hareketi incelenmiştir. Burada I bölgesi, YAD yayılımının olmadığı bölgedir ve parçacıklar rastgele dağılmıştır. II bölgesinde parçacıklar YAD'ın yayıldığı bölgeye girer

ve akustik kuvvet etkisi ile basınç düğümlerinin bulunduğu kanalın merkezine doğru hareket eder. Kanalın merkezinde bulunan III bölgesinde parçacıklar daha güçlü akustik kuvvet etkisinde odaklanır ve YAD yayılımının olmadığı IV bölgesinde odaklanma genişliği laminar sıvı akışının doğası gereği sabit kalır.



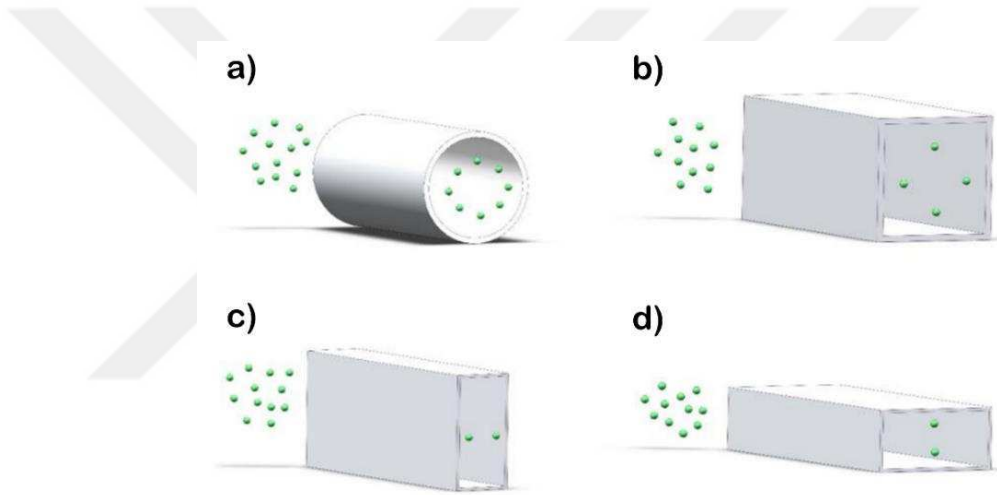
Şekil 2.4: a) YAD'ın odaklanması: (1) akustik etkinin gözlenmesi için seçilen (I)-(IV) bölgeleri, (2) Seçilen bölgelerde parçacıkların görüntüsü, b) YAD pompalama: (1) zamana bağlı giriş IDT'sinin çalışması durumunda kanaldan sıvı boşaltımı, (2) çıkış IDT'sinin çalışması durumunda kanala su pompalanmasının renkli fotoğrafı [61], c) Bir YAD temassız damlacık taşıma sisteminde parçacıkların hareketi [62].

Şekil 2.4(c); bir dizi birbirine entegre edilmiş ve programlanabilir IDT'lerden oluşan YAD temassız damlacık taşıma sisteminde parçacıkların hareketini göstermektedir. Burada, birleştirildiğinde ve karıştırıldığında renk değişikliği gösteren üç farklı kimyasal damlacık kullanılarak damlacıkların harekete geçmesi ve birleşmesi anlık olarak görüntülenmiştir. Parçacıkların hareketi sırasında iç kısımlarında sıradan bir difüzyon işlemi ile oluşacak reaksiyon ile karşılaştırıldığında YAD'ın çok daha hızlı kimyasal reaksiyonlara yol açtığı gözlenmiştir.

2.1.3. Eylemsizlik mikroakışkanları

Eylemsizlik etkisi ilk olarak 1961 yılında Segre ve Silberberg tarafından önerildi [63]. Başlangıçta dairesel kesitli bir tüpe (~ 1 cm çapında) rastgele dağıtılan milimetrik büyüklükte parçacıkların, borunun merkezinde bulunan yarıçapın 0.6 katı yarıçapa sahip bir halkanın içine doğru yaptığı hareket gözlemlendi. Parçacıklar düşük Reynolds sayısına sahip akışın olduğu bir boruda akarken, parçacıklar üzerine ana akım doğrultusunda etkiyen ana itici kuvvetten ayrı olarak, ana akıma dik bir yanal kaldırma kuvvetinin dinamik denge durumu için parçacıkları yanal bir göçe zorladığı gözlenmiştir [64]. Bu olay birçok araştırmacının dikkatini çekerek farklı kesit şekillerine sahip geometrik

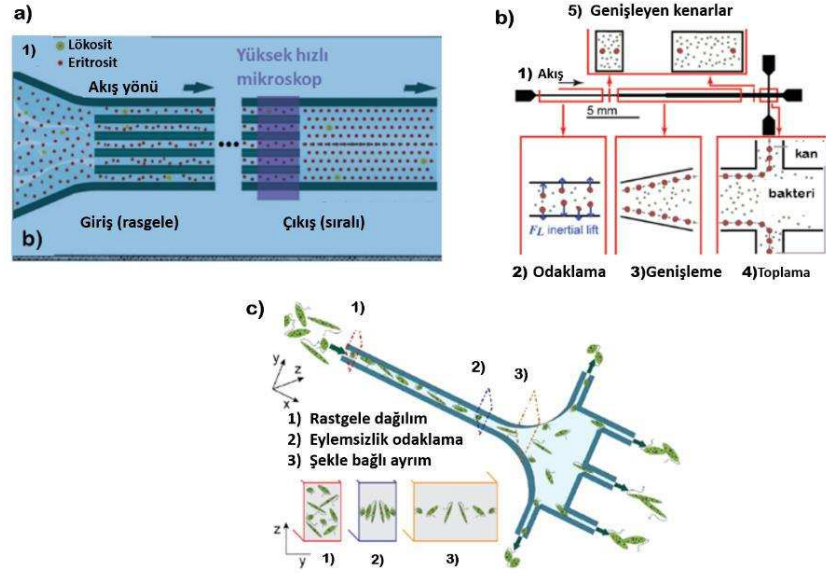
yapılarda ilerleyen parçacıklar üzerine eylemsizlik etkisinin araştırılmasına sebep olmuştur [65]. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi parçacıkların son denge pozisyonu kanalın geometrisine bağlıdır. Dairesel bir kanalda ilerleyen parçacıklar, çemberin simetrisi nedeniyle Segre-Silberberg halkası adı verilen bir halka oluşturur (Şekil 2.5(a)) [66]. Kare kesitli bir kanalda taşınan parçacıklar, kenar açısının hız ve basınç dağılımı üzerindeki etkisinden dolayı, kanal duvarının orta noktasına yakın dört denge pozisyonuna konumlanarak denge durumuna gelir (Şekil 2.5(b)). Dikdörtgen kesitli bir kanalda, kısa kanal duvarındaki kayma gradyanı, uzun kanal duvarından çok daha büyüktür. Bu nedenle, parçacıklar mikrokandalda, uzun kanal duvarının orta noktasına yakın iki denge pozisyonuna doğru hareket ederler (Şekil 2.5(c) ve (d)) [67].



Şekil 2.5: Farklı kesit şekillerine sahip kanallardan geçen parçacıkların odaklanma pozisyonlarının şematik gösterimi: a) dairese kanal, b) kare kanal, c) yüksek en-boy oranı dikdörtgen kanal ve d) düşük en-boy oranlı dikdörtgen kanal.

Eylemsizlik mikrokışkanları, yakın geçmişte odaklama, sıralama, ayırma, transfer ve karışım gibi süreçlerle parçacıkların manipülasyonu konusunda geniş çaplı bir araştırma konusu olmuştur [68]. Hücrelerin ayrıştırılması eylemsizlik mikrokışkanlarının en popüler uygulamasıdır [69]. 2009 yılında, *Di Carlo* [64], kandaki kırmızı kan hücrelerinin ve lökositlerin sayılmasını ve ayrıştırılmasını gerçekleştirmek için dikdörtgen kesitli bir kanalda parçacıkların odaklanması prensibini kullanmaya başladı. Bu yöntem, akış sitometrisinde hücre odaklaması için bir alternatif haline gelmiştir (Şekil 2.6(a)). *Mach* [70], yüksek verimli, 40 kademeli genişlemeye sahip mikrokanaallar kullanarak patojenik bakteri hücrelerini seyreltilmiş kandan ayıran bir mikrokışkan aygıtı üretmiştir. Bu sistem, patojen bakterilerin %80'ini kandan 400 milyon hücre/dak verim ile

ayırabilmektedir (Şekil 2.6(b)). Düz bir dikdörtgen kanal bakteri, eksozomlar gibi diğer biyolojik parçacıklara ve DNA için de uygulanabilir. *Li* [71], düz dikdörtgen bir mikrokanal, kademeli olarak genişleyen bir bölge ve akışkan dirençli beş çıkıştan oluşan bir mikroakışkan aygıt kullanarak *Euglena gracilis*'in odaklanmasını ve sıralamasını gerçekleştirdi (Şekil 2.6(c)). *Hassan* [72] bakterileri tam kandan konsantre etmek için kültüresüz bir bakteri zenginleştirme yönteminin geliştirmiştir. Bu yöntem, bakteri hücrelerini ve bunların DNA'larını, numune hacminde 500 kat azalma ile konsantre edebilmiştir. Sert parçacık manipülasyonlarının yanı sıra, kabarcıklar ve damlacıklar gibi deforme olabilen yapıların manipülasyonu eylemsiz mikroakışkan sistemlerde mümkündür.

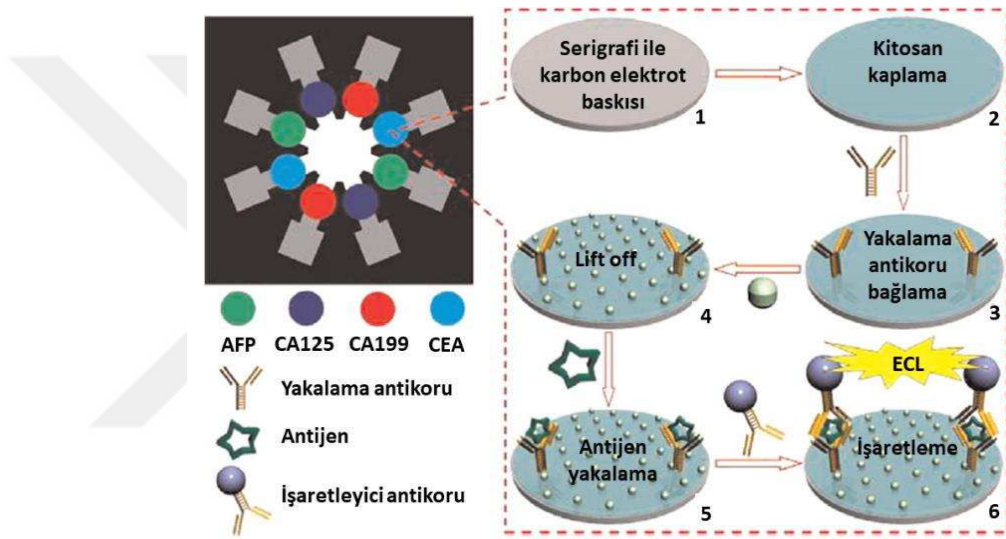


Şekil 2.6: Dikdörtgen kesitli kanala sahip eylemsizlik mikroakışkanlarının uygulamaları. a) Kırmızı kan hücrelerinin ve lökositlerin kandaki sayımı ve ayrıştırılması [64]. b) 40 kademeli genişlemeye sahip sürekli mikrokanallar kullanarak patojen bakteri hücrelerinin seyreltilmiş kandan ayrılması [70]. c) *Euglena gracilis* bakterisinin eylemsizlik mikroakışkanları ile odaklanması ve sıralanması [71].

2.1.4. Kâğıt tabanlı mikroakışkanlar

Kâğıt tabanlı mikroakışkanlar, 2007'den bu yana genişleyen bir araştırma alanı haline gelmiş [73] olup, kullanıcı tarafından kolayca kullanılabilen, basit ve ucuz mikroakışkan aygıtlar üretmenin alternatif bir yolunu sunmaktadır [74]. Kâğıt sadece son derece düşük maliyetleri nedeniyle değil, aynı zamanda esnek, hafif ve ince olmaları gibi mekanik özelliklerinden dolayı ilgi çekici ve gelecek vaat eden bir alttaş olarak kabul edilir. Kâğıt,

lifli ve gözenekli yapısı sayesinde kılcal etki ile sıvıların dış kuvvet gerektirmeden taşınmasını sağlar. Ayrıca emiciliği, kağıdın içinde sıvının depolanmasını mümkün kılar, hava geçirgenliği özelliği sayesinde hava kabarcığı sorununu giderir, sahip olduğu ağısı yapısı sıvının filtrelenmesini sağlar ve doğaya zararsızdır [74–76]. Kağıt tabanlı mikroakışkanlar üzerine yapılan araştırmaların çoğu tanı teşhis aygıtlarına odaklanmıştır [77], diğer uygulamalar ise çevresel analiz [78], gıda ve su analizi alanlarındadır [79]. Elektrokimyasal lüminesans (Electrochemiluminescence (ECL) tekniği kullanılarak üretilen 3D kağıt bazlı mikroakışkan sistemi Şekil 2.7’de gösterilmektedir.

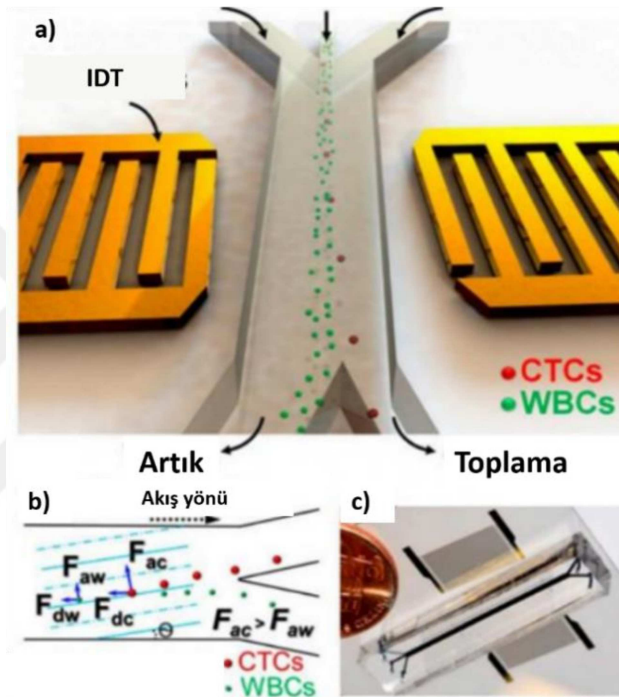


Şekil 2.7: Dört kanser biyobelirteçinin eşzamanlı ölçümü için 3B kağıt tabanlı bir ECL mikroakışkan sistemi: 1) serigrafi yöntemi ile basılan karbon elektrot, 2) ECL reaksiyonunu tetiklemek için kitosan (chitosan,CS) kaplama, 3) yakalama antikollarının bağlanması, 4) lift off, 5) antijen yakalama, 6) işaret antikolları ile ECL reaksiyonunu tetikleme [77].

2.2.MİKROAKIŞKAN SİSTEMLERDE PARÇACIK MANİPÜLASYONU YÖNTEMLERİ

İnorganik mikro parçacıkların ve hücrelerin manipülasyonu, mikro ölçekte manyetik, optik, elektrik ve yüksek frekanslı akustik dalgalar dahil olmak üzere farklı kuvvetlerden yararlanılarak, çeşitli teknikler ile geliştirilmiş mikroakışkan sistemlerde gerçekleştirilir. Bu alanların kuvvetleri kısa mesafede etkin kuvvetler olarak mikroakışkan sistemler için uygun olup, temassız oldukları için mikroakışkan sistemlerde kanalların dışında da

üretilebilir. Mikroakışkanlar sistemlerde akışkan türleri için boyut ayırımı, tuzaklama, manipülasyon, karıştırma, hücre şekillendirme, transfeksiyon, kültürleme ve hücre tedavisi gibi uygulamalar yapılmıştır [80–82]. Dolaşımdaki tümör hücrelerinin (circulating tumor cells, CTCs) ayrılması ve analizi doktorlara kanser hastalarının çeşitli tedavilere verdikleri yanıtları izlemek için kolay bir yol sağlar. Şekil 2.8’de dolaşımdaki tümör hücrelerinin ayrılması ve analizinin temsili gösterimi ve mikroakışkan aygıtının fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 2.8: Kanser hücrelerinin ayrımı için YAD aygıtı şematik gösterimi ve görüntüsü: a) hücre ayrılmasının gösterimi, b) YAD tabanlı aygıtta hücre ayrılmasının arkasındaki çalışma mekanizmasındaki parçacıklar üzerine etki eden kuvvetlerin gösterimi, c) Daha büyük CTC'lere beyaz kan hücrelerine (White Blood Cells, WBCs) etki eden akustik radyasyon kuvvetinden (F_{aw}) daha büyük bir akustik radyasyon kuvveti (F_{ac}) etki eder ve sonuç olarak, CTC'ler WBC'lerden daha büyük bir dikey yer değiştirmeye (akış yönüne dik) sahiptir. F_{dc} ve F_{dw} , sırasıyla CTC'lere ve WBC'lere etki eden sürüklenme kuvvetidir, c) YAD hücre ayırma aygıtının fotoğrafı [83].

Bu işlemleri gerçekleştirebilmek için kullanılan çok farklı teknikler ve uygulanabileceği çok geniş bir yelpazesi mevcut olsa da her tekniğin daha üstün olduğu uygulamalar vardır. Mikroakışkan sistemlerde yapılmak istenen işleme göre işlem hacmi, kuvvetin büyüklüğü, bu kuvvetin yerinin belirlenebilme yeteneği, aygıtın esnekliği, diğer mikroakışkan bileşenler ile entegre edilebilirlik ve malzeme maliyeti gibi etkenler göz önüne alınarak kullanılacak yöntemi seçmek önemlidir.

Mikroakışkan sistemlerde kullanılan bazı yaygın yöntemler ve bunların avantajları ve dezavantajları, Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1: Mikroakışkan sistemlerde yaygın olarak kullanılan yöntemler [32].

Teknikler	Manyetik	Optik	Akustik	Elektriksel
Kuvvet	Manyeto foretik	Optik cımbızlar	Akustik basınç	Dielektro foretik
Avantajlar	Basit, ucuz	Yüksek uzaysal kararlılık, yüksek hız, hızlı cevap verebilirlik	Yüksek özgünlük, işleme kapasitesi, yüksek verimlilik	Yüksek verimlilik
Dezavantajlar	Zayıf kuvvet, sınırlı uygulama (magnetik türleri/gerekli sıvı), özgünlük kaybı	Düşük verim, Örnek tahribatı, karmaşık ve hassas ölçüm tekniklerinin gerekliliği	Aygitlara entegre etme güçlükleri, yüksek dalga boylarının örnek üzerine küçük etkileri,	Yüksek voltaj gerekliliği, bölgesel ısınma sorunu, küçük kuvvetler
Çalışmalar (Ref.)	[84–88]	[16,89–91]	[58,92–96]	[97–100]

Uygulanan kuvvet ve kuvvet ölçeklendirmesi açısından mikroakışkan türlerine uygulanan yöntemlerin bazı sınırlamaları vardır. Örneğin elektriksel ve optik manipülasyon yöntemleri, boyut, manyetik yatkınlık (susceptibility, $\Delta\chi$) ve elektriksel geçirgenlik (permittivity, $\Delta\epsilon$) farklılıklarına dayalı değişim gösteren kuvvet uygulayabilir. Ayrıca çoğu akışkan yeterince yüksek kuvvetli alanlarda paramagnetizma özelliği sergileyebilmesine rağmen manyetik kuvvetler, mikro boyutlarda gerekli olan manyetik alanın küçük bir elektromagnet tarafından üretilebilmesi için manyetik parçacıkların veya sıvıların kullanıldığı uygulamalar için kullanışlıdır. Fakat ortamın, parçacığın ya da hücrenin geçirgenliği arasında benzerlik ya da ayrıştırılması gereken mikroakışkan türlerin elektriksel özelliklerinde küçük farklar varsa farklı yöntemler kullanılmalıdır.

Akustik kuvvetler, elektriksel yöntemlerden ziyade, aktif kontrol metodu olarak mekanik özelliklerin kullanıldığı ve optik yöntemler gibi parçacık boyutuna göre kuvvet ölçeklendirme ve temassız olma gibi avantajlar sağladığı için böyle durumlarda

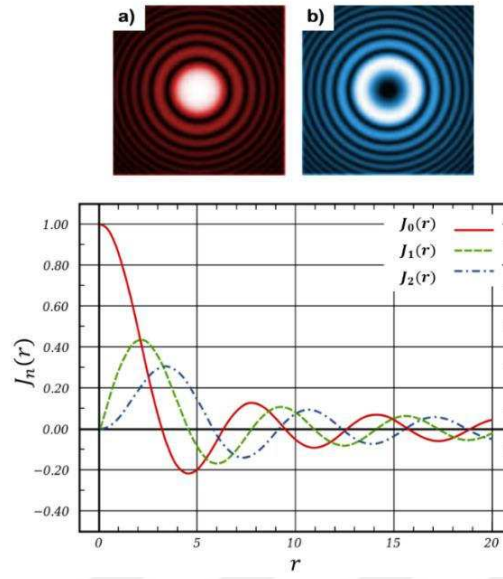
kullanılması en uygun yöntemdir. Elektriksel kuvvetlere benzer şekilde, akustik kuvvetlerin yonga üzerine uygulandıklarında manipülasyon [58], sınıflandırma [96], damlacık üretimi [101] gibi çok yönlü kullanım alanları mevcuttur. Bu kuvvetlerin mikroakışkanlar sistemine uygulanmasında kısıtlayıcı faktör, kuvvetleri rastgele lokalize edebilmektir. Bu kısıtlamaları ortadan kaldırmak için son yıllarda akustik mikroakışkan sistemlerde manipülasyon için YAD'lar yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda yalnızca yüzey akustik dalgalar ile çalışıldığından Tablo 2.1'de verilen yöntemlerden yalnızca akustik dalgaların fizikine değinilecektir.

2.3. BESSEL DEMETLERİ

Mikroakışkan sistemlerde parçacık manipülasyonu için sınırlı demet genişliğinden kaynaklanan kırınım etkilerinden bağımsız olarak akustik demetin elde edilmesi önemlidir. Bessel demeti bu gereksinimi karşılayacak niteliktedir. Bessel demetlerinin matematiksel ifadesi ilk olarak *Durnin* [102] tarafından Helmholtz diferansiyel denkleminin Bessel tipi çözümlerinin ilerleme doğrultusundan bağımsız olduğunu görmesi ile yapılmıştır. İdeal Bessel demeti dalga eşitliği

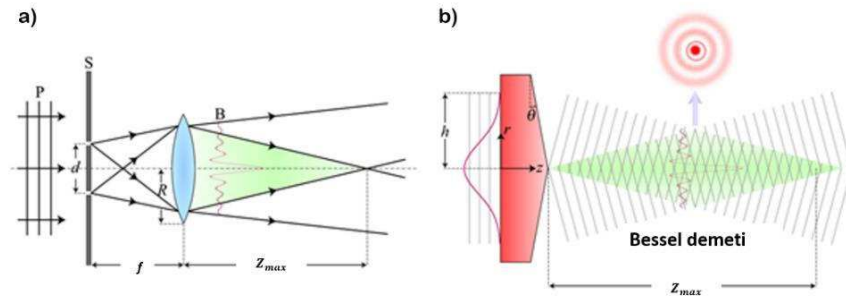
$$\psi(r, \phi, z) = A_0 \exp(ik_z z) J_n(k_r r) \exp(\pm i n \phi) \quad (2.1)$$

ifadesi ile tanımlanmaktadır. Burada $A_0 = A(r, \phi)$ ' e bağlı uzaysal bir sabit, J_n , n. derece Bessel fonksiyonu k_z ve k_r ise $k = (k_z^2 + k_r^2)^{1/2} = 2\pi/\lambda$ şeklinde birbiri ile ilişkili boyuna ve radyal dalga sayıları, λ Bessel demetini oluşturan dalganın dalgaboyu r , ϕ ve z ise, sırası ile, radyal, açısal ve boyuna koordinatlarıdır. Demet adını, Denklem (2.1)'deki Bessel fonksiyonundan almakta ve demetin kesit profili de yine bu fonksiyon tarafından belirlenmektedir. Dalga kesiti iç içe geçmiş sonsuz sayıda halkalardan oluşmaktadır (Şekil 2.9) ve en ortada $3/4\lambda$ çapındaki kor dağılmadan ilerleyebilmektedir. Yüksek dereceden Bessel fonksiyonları ($n > 0$) tarafından tanımlanan Bessel demetleri eksen boyunca uzanan tekilliğe sahiptirler (Şekil 2.9(c)). Bessel demetini oluşturan sonsuz sayıdaki halkaların her birisi eşit enerji taşımaktadır. Bu nedenle demet sonsuz enerji taşıyacağından tam bir Bessel demeti eldesi mümkün değildir. Ancak, yaklaşık Bessel demeti (quasi-Bessel beam) elde edilebilmektedir.



Şekil 2.9: a) Sıfırıncı dereceden (J_0) ve b) 1. dereceden (J_1) Bessel demetlerinin kesit şiddet profilleri, c) $J_n(r)$ 'nin r 'ye bağlı değişimi [25].

Durnin ve arkadaşları [103], yaklaşık Bessel demetini halkanın Fourier dönüşümü olarak ele alıp Şekil 2.10(a)'daki düzenek yardımıyla ilk kez elde etmiştir. Şekil 2.10'da S düzlemi R yarıçaplı merceğin f odağında olacak şekilde yerleştirilmiştir. Kesit profili (B) verilen Bessel demeti, z_{max} ilerleme mesafesine sahiptir. Ancak bu yöntemde, orijinal dalganın büyük bir kısmı halka yarık (S düzlemi) tarafından engellendiği için elde edilen demet zayıf kalmaktadır. Bu sorun, Şekil 2.10(b)'de görülen ve literatürde “axicon” mercek olarak adlandırılan konik mercek kullanımı ile giderilerek, şiddetli ve daha kararlı bir Bessel demeti elde edilebilmiştir [104–107]. Bu yöntem halen yaygın şekilde kullanılmaktadır [103,104].

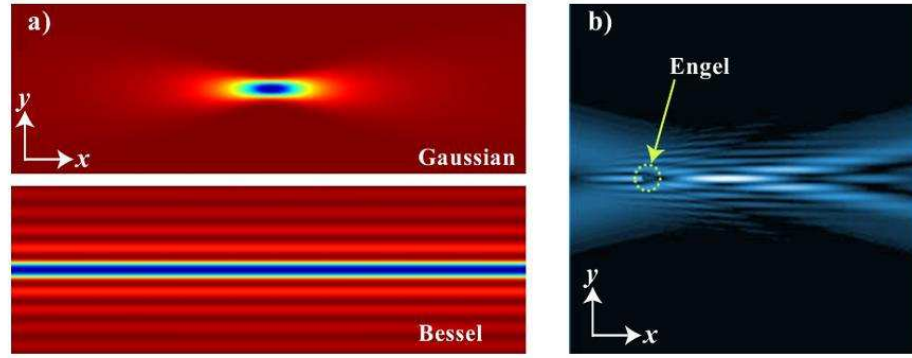


Şekil 2.10 : a) Bessel demetinin düzlem dalgalar (P) ve d çapında halka açıklık (S) ve b) Konik mercek ile eldesi.

İdeal bir Bessel demeti için Helmholtz denkleminin Denklem (2.1) ile verilen çözümü, z -doğrultusunda I şiddetinin Denklem (2.2) eşitliğini sağlaması ile geçerlidir.

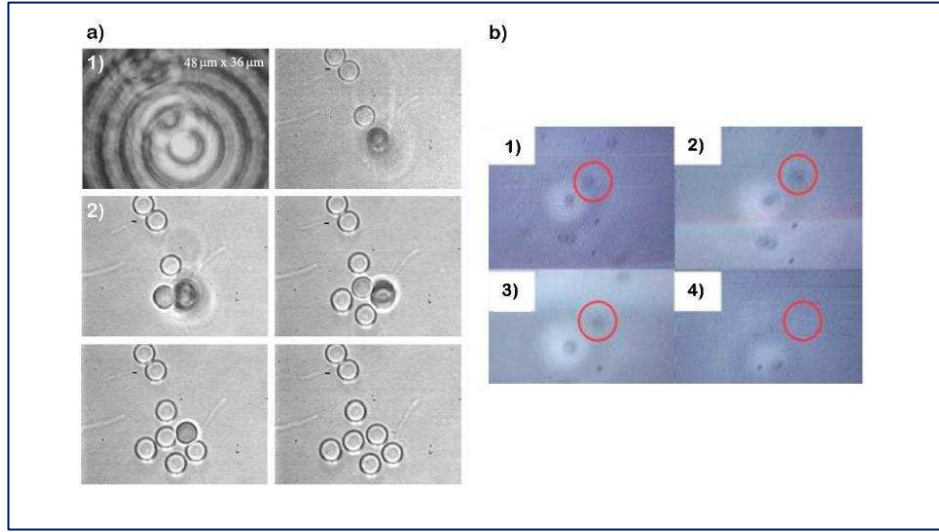
$$I(x, y, z \geq 0) = I(x, y) \quad (2.2)$$

Bu durum, demet ilerledikçe kesitin değişmeyeceği, yani demetin dağılmayacağı anlamına gelmektedir [25]. Aynı genişlikteki Gaussian demetle karşılaştırıldığında Bessel demetinin merkezi, dalga hareketlerinde gözlenen kırınımsal dağılımı göstermemekte, demet kesiti demetin ilerleyişi ile değişmeden kalabilmektedir (Şekil 2.11(a)) [108]. Daha da önemlisi, kor engelle karşılaştığında kendisini yeniden toparlayabilmektedir (Şekil 2.11(b)) [25]. Bu özellik demetin koniksel dalga cephesine sahip olması ile açıklanmaktadır.



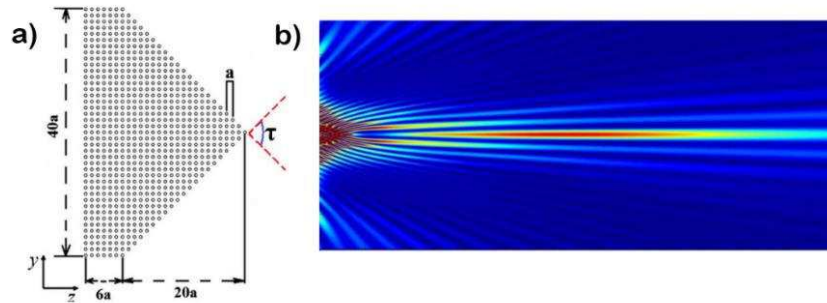
Şekil 2.11: a) x yönünde ilerleyen Gaussian ve Bessel demet kesitlerinin karşılaştırılması [108], b) Bessel demetinin kendisini yeniden oluşturması: demet, x ekseninde merkezi koru kapsayan noktalı çember ile işaretli silindirik engelden sonra kendisini yeniden oluşturmaktadır [25].

Optik yaklaşıklık-Bessel demetleri laser soğutma ve tuzaklama [109], atomik dipol tuzakları [110], elektron mikroskopisi [111], optik cımbızlar (Şekil 2.12(a)), [112–115], levitasyon (Şekil 2.12(b)) [116], mikroskopi ve görüntüleme [117,118], doğrusal olmayan optik [118], ışık litografisi [109], laser mikro üretim [119] ve mikro işleme [120] alanlarında uygulama bulmaktadır.



Şekil 2.12: a) Optik cımbız: (1) optik Bessel demeti boyunca tuzaklanan 5 μm büyüklüğündeki parçacıklar, (2) demetin merkezinde bir parçacığın tuzaklanması [115], b) Bessel demeti merkezinde 5 μm büyüklüğündeki silika küresinin: (1) tuzaklanması ve (2)-(4) havaya yükseltilmesi (levitasyonu) [121].

Akustik yaklaşık Bessel demetlerinin uygulamaları daha çok parçacık tuzaklama ve taşıma [122] konularına odaklanmıştır. Akustik Bessel demetlerinin de optik analogları gibi geniş uygulama alanlarına sahip olması beklenmektedir. Konik mercek yaklaşımı, iki boyutlu (2B) fotonik kristal kullanılarak (Şekil 2.13(a)), laser ve/veya fiber iletişim sistemlerinde kullanılabilecek şekilde adapte edilmiştir [123]. Burada, a örgü sabitinde kare düzende dizilen silindirler ile koni şeklinde oluşturulan 2B fotonik kristalden ışığın negatif kırılması ile Bessel demeti elde edilmektedir (Şekil 2.13(b)). Optik Bessel demetleri holografik yöntemler [124–126] ve Fabry-Perot kovuğu kullanılarak da [107,127] elde edilebilmektedir.



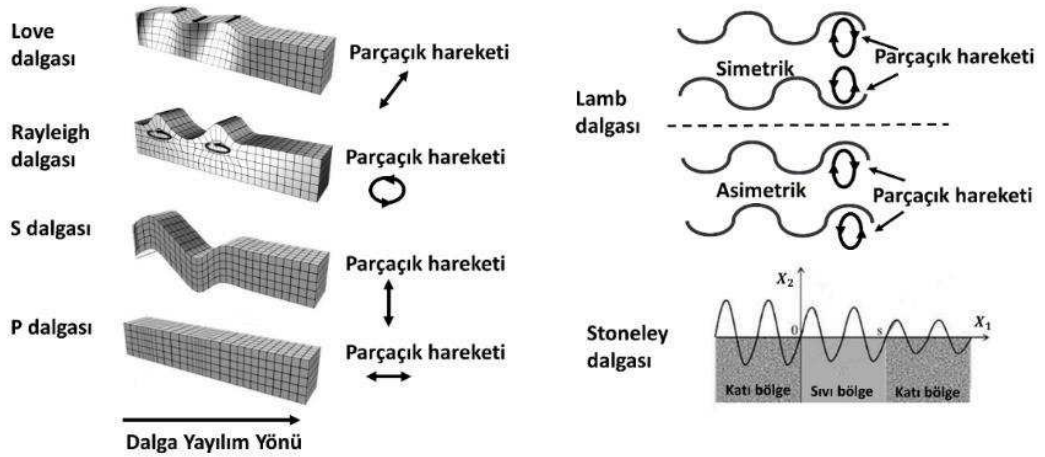
Şekil 2.13: a) Optik Bessel demeti eldesinde kullanılan fotonik kristal konik mercek ve elde edilen b) Bessel demetinin kesitsel görünümü [123].

Bessel demetlerinin bu bölümde yer verilen elektromagnetik uygulamalarına kıyasla akustik uygulamaları oldukça sınırlıdır. Fresnel merceği ve ultrasonik transdüser kullanarak su ortamında elde edilen yığinsal Bessel demeti ile sıvı yüzeyindeki nanoparçacıkların tuzaklanması ve yönlendirilmesi mümkün olabilmektedir [109].

Optikte axicon mercekler ile yaratılan etki ile oluşturulan Bessel demetleri, akustikte akustik dalgayı Bessel demeti oluşturmak için manipüle edebilecek periyodik yapıya sahip metamalzemeler kullanılarak elde edilmiştir [31,128]. Bessel demetlerinin parçacık manipülasyonu konusunda ilgi çekmesini sağlayan negatif gradyan kuvvet özelliği parçacıkların akustik Bessel demetleriyle 3 boyutlu sistemlerde kaynağa çekilebileceklerini göstermiştir [129,130]. Ancak bu tez kapsamında çalışılan piezoelektrik alttaş üzerinde YAD ile Bessel dalgalarının oluşturulması henüz gerçekleştirilmemiştir.

2.4. YÜZEY AKUSTİK DALGALARI

YAD'ların izotropik elastik katılar üzerindeki yayılması ilk olarak 1885 yılında *Lord Rayleigh* tarafından teorik olarak tanımlanmıştır [131]. 1990'ların başından beri, YAD teknolojisi, özellikle mikroakışkan sistemlerin geliştirilmesinde ilginç bir araştırma alanı haline gelmiştir [132]. YAD'lar, bir malzemenin yüzeyi boyunca hareket eden ve tipik olarak malzemenin derinliği ile üssel olarak azalan bir genliğe sahip olan akustik dalgalardır. Katılarda YAD'lar, dalganın yayılma yönüne göre parçacıkların yer değiştirmesine bağlı olarak (enine veya boyuna) ya da aygıtın yüzeyinde parçacıkların yer değiştirmesine bağlı olarak (dikey veya yatay) olarak sınıflandırılabilir. Bununla birlikte, yüzeylerde veya arayüzlerde, parçacıkların çeşitli eliptik veya karmaşık titreşimleri *Rayleigh*, *Love*, *Lamb* ve *sızıntı Rayleigh* (stoneley/leaky Rayleigh) dalgası gibi dalga türlerinin oluşumunu mümkün kılar (Şekil 2.14).



Şekil 2.14: Bir katı içinde yayılan akustik dalgaların yayılımı ve parçacık hareketleri [133,134].

Tez kapsamında Rayleigh yüzey akustik dalgalarının oluşturulması ile ilgilenildiğinden yalnızca Rayleigh YAD'larının fizikine değinilecektir.

YAD'lar, piezoelektrik bir malzemenin yüzeyinde bir veya daha fazla metal transdüserlar kullanılarak üretilir. Bu transdüserler, ultrases frekanslarında malzemede durağan bir dalga oluşturmak için karşılıklı olarak yerleştirilir. Transdüserlarda kullanılan metal genellikle kimyasal tepkimeye girmemesi veya piezoelektrik materyal ile akustik uyumuna bakılarak seçilir [135]. Piezoelektrik kristal yönelimi, piezoelektrik malzemenin kalınlığı ve metal transdüserların geometrisi, üretilen akustik dalganın türünü belirler [135,136].

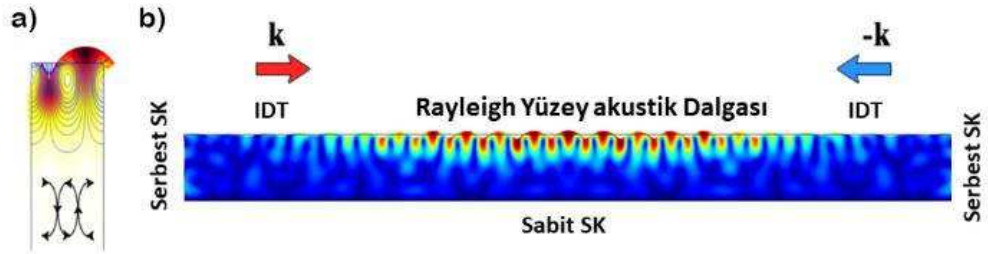
YAD aygıtların çalışma prensibi, piezoelektrik bir katının yüzeyinde akustik bir dalga yayılmasına dayanmaktadır. Bu sayede, dalga, yüzeyde yayılırken parçacıkların yüzeyde tuzaklanabilmesi (trapped) mümkündür [137]. Dalga enerjisinin büyük kısmı, malzemenin derinliklerinde sınırlandığı için yer değiştirmeler, yüzeyde üssel olarak azalmaktadır [16]. YAD aygıtları tipik olarak bir piezoelektrik alttaş üzerinde iki IDT'ye sahiptir. Bir IDT girişi dalgayı başlatır ve diğer IDT çıkışı yayılan dalgaları toplar. Şekil 2.15 tipik bir YAD aygıtını göstermektedir. Dalganın enerjisi ve yer değiştirmesi malzemenin derinliklerine doğru azalmaktadır.



Şekil 2.15: Gecikme hattı (delay line) konfigürasyonunda sabit parmak genişlikli iki IDT ile Rayleigh YAD üretimi.

2.4.1. Rayleigh yüzey akustik dalgaları

Elastik Rayleigh yüzey akustik dalgaları, dalga yayılma yönüne göre Şekil 2.16'da görüldüğü gibi parçacıkların yüzeye dik ve yüzeye paralel iki bileşene sahip olan eliptik bir yörüngede hareket edebilmesini sağlar [138]. Dalga hızı, alttaş malzemesi ve kristal yönelimine bağlı olarak belirlenir. Rayleigh Yüzey akustik dalgasının enerjisi yüzeye yakın bir bölgeyle sınırlıdır ve sadece birkaç dalga boyu derinliğine kadar nüfus edebilir [139]. Rayleigh yüzey akustik dalgalarının yayılması ve IDT'ler ile üretilmesi, aşağıdaki bölümlerde detaylandırılacaktır.



Şekil 2.16: a) $f_0 = 10.07$ MHz değerindeki öz kipte yüzey davranışı, b) karşılıklı IDT'ler ile durağan YAD eldesinin FEM simülasyonu.

2.4.2. Akustik dalga terminolojisi

YAD'lar piezoelektrik bir malzemedeki deformasyonlardır. Bu deformasyonlar malzemenin bir sonraki deformasyon durumunu etkileyen tepkisel kuvvetlere neden olur. Bu nedenle YAD'ların oluşumunu anlamak ve tanımlamak için piezoelektrik malzemedeki zor (stress) ve zorlanma (strain) arasındaki ilişkinin belirlenmesi gerekmektedir.

Zor (T), bir birim alana etkiyen kuvvet (N / m^2) olarak tanımlanabilir. Zorlanma (S) ise birim uzunluktaki deformasyondur ve dolayısıyla boyutsuz bir nicelikdir. Elastik katılarda

tüm atomlar güçlü kimyasal bağlar ile birbirine bağlıdır ve uygulanan deformasyon ile lineer olarak ilişkili bir direnç sergilerler. Zor ve zorlanma arasında sertlik (stiffness, C) olarak adlandırılan bir orantı sabiti bulunur. Deformasyona sebep olan kuvvet ortadan kalktığında malzemenin bu deformasyona gösterdiği direnç kuvveti malzemeyi orijinal şekline geri döndürmeye çalışır. Bu ilişki *Hooke yasası* olarak adlandırılır. Üç boyutta, bir malzemenin deforme olabileceği oldukça fazla sayıda yön vardır. En genel durumda zorlanma ve zor'un tüm koordinat eksenlerindeki bileşenleri düşünüldüğünde, zorlanma şu şekilde verilir.

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial j} + \frac{\partial u_j}{\partial i} \right) \quad (2.3)$$

Burada S_{ij} zorlanma bileşenleri ve $i, j = x, y, z$ koordinat eksenleridir. Ayrıca eşitliklerde kullanılan i, j, k, l indis veya alt indisleri x, y, z koordinat eksenlerini temsil eder. Denklem (2.3)'de, eğer $i = j$ ise normal zorlanma, değilse shear zorlanmadır. Bu, üç boyutlu bir koordinat sisteminde üç normal zorlanma ve altı shear zorlanmaya neden olur. Bu durumda zorlanma, diyagonal matris elemanlarını normal zorlanma bileşenlerinin ve diğer matris elemanlarını shear zorlanma bileşenlerinin oluşturduğu ikinci dereceden tensör gösterimi kullanılarak yazılabilir. Zor, zorlanma ile lineer olarak orantılı olduğundan zor da şu şekilde ifade edilebilir.

$$T_{ij} = C_{ijkl} S_{kl} \quad (2.4)$$

Burada C_{ijkl} ($ijkl = x, y, z$) sertlik sabitleridir. Her bir alt indis 3 değere (x, y, z) sahip olabilir ve bu nedenle toplam sertlik sabiti sayısı $3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$ 'e eşittir. Ferroelektrik olmayan elastik materyallerde zor matrisi simetriktir. Bu nedenle $T_{ij} = T_{ji}$ [140]. Bu simetri nedeniyle, sertlik sabitleri Denklem (2.5)'deki ilişkiye uymaktadır:

$$C_{ijkl} = C_{jikl} = C_{ijlk} = C_{jilk} = C_{klij} \quad (2.5)$$

Bu simetri bağımsız sertlik sabitlerinin sayısını 21'e düşürür [140]. İzotropik malzemelerde sadece iki bağımsız sabit vardır ve çoğu piezoelektrik malzemede bağımsız sabitlerin sayısı sadece altı veya yedidir.

Bu durumda Denklem (2.4)'de verilen tek bir zor bileşeni şu şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned}
T_{xx} = & C_{xxxx} S_{xx} + C_{xxxy} S_{xy} + C_{xxxz} S_{xz} + \\
& C_{xxyx} S_{yx} + C_{xxyy} S_{yy} + C_{xxyz} S_{yz} + \\
& C_{xxzx} S_{zx} + C_{xxzy} S_{zy} + C_{xxzz} S_{zz}
\end{aligned} \tag{2.6}$$

Alt indisleri azaltmak için Tablo 2.2’de verilen notasyon kullanılabilir [140].

Tablo 2.2: Alt indislerin azaltılması [140].

I	ij
1	xx
2	yy
3	zz
4	yz, zy
5	xz, zx
6	xy, yx

Alt indis notasyonundaki bu azaltma ile Denklem (2.6) yeniden şu şekilde yazılabilir.

$$T_1 = C_{11} S_1 + C_{12} S_2 + C_{13} S_3 + 2C_{14} S_4 + 2C_{15} S_5 + 2C_{16} S_6 \tag{2.7}$$

Diğer zor bileşenleri de benzer şekilde yazılabilir. Ayrıca sertlik matrisinde C_{11} ’den C_{66} ’ya kadar toplam 36 bileşen (6x6 matris) vardır. Ancak bu matris simetriktir ve bu nedenle bağımsız sadece 21 tane değişkene sahiptir.

Zor ve zorlanmaya ek olarak elektrik alan Denklem (2.8)’den görüldüğü gibi benzer bileşenlere sahiptir.

$$D_i = \epsilon_{ij} E_j \tag{2.8}$$

Burada $i, j = x, y, z$ koordinatları D , elektrik alan deplasmanı, ϵ elektriksel geçirgenlik matrisi ve E elektrik alanıdır. Elektriksel geçirgenlik matrisi çoğunlukla 3x3 diyagonal bir matristir. Kristal kesim yönlerine göre değişim gösterdiği için diyagonal olmayabilir ancak yine de simetriktir.

2.4.3. Akustik dalga denklemi

Piezoelektrik olmayan elastik bir ortam için basit dalga denklemi temel dinamiğin temel yasasına dayanır.

$$F = \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.9)$$

Burada X_j üç boyutta koordinat ekseninde yer değiştirme bileşenidir ($xx = x, xy = y, xz = z$). Elastik, homojen, izotropik ve anizotropik malzemelerde dalga denklemi ise Denklem (2.10)'da verildiği gibidir.

$$\rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.10)$$

Burada ρ elastik ortamın kütle yoğunluğu, U_i ilgili koordinat doğrultularındaki yer değiştirmedir.

Denklem (2.3) ve Denklem (2.4) kullanılarak Denklem (2.10) şu şekilde yazılabilir.

$$\rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = C_{ijkl} \frac{\partial^2 U_l}{\partial x_k \partial x_j} \quad (2.11)$$

Denklem (2.11) piezoelektrik olmayan ortamdaki dalga yayılımını temsil eder. Ancak piezoelektrik malzemeler için uyarlanabilir [140].

2.4.4. Piezoelektrik etkilere sahip YAD

YAD aygıtlarında kullanılan malzemeler çoğunlukla piezoelektriktir ve bu nedenle dalga denkleminin piezoelektrik etki dikkate alınarak çözülmesi gerekir. Önceki bölümlerde piezoelektrik malzemeler için, verilen mekanik hareket denklemleri ve Maxwell denklemlerinin birlikte ele alınmasıyla Denklem (2.12) ve (2.13) ile verilen piezoelektrik malzemeler için temel oluşturan denklemler elde edilir.

$$T_{ij} = C_{ijkl} S_{kl} - e_{kij} E_k \quad (2.12)$$

$$D_i = e_{ikl} S_{kl} + \epsilon_{ik} E_k \quad (2.13)$$

Burada, e_{kij} piezoelektrik tensörüdür.

Denklem (2.12) bir malzemedeki zor ve zorlanma arasındaki ilişkiyi gösteren Hooke yasasının genişletilmiş bir halidir. Piezoelektrik bir malzemede, elektrik alan denklemde ek bir ifade ile gösterilen ek bir mekanik zor üretir. Benzer şekilde ters etki Denklem (2.13)' de görüldüğü gibi elektrik alan deplasmanı üzerine ek bir terim üretir. Akustik dalgaların hızı, elektromanyetik dalgalar ile karşılaştırıldığında 5 kat daha küçük olduğundan, elektrik alan dalgalarının frekansının, yarı-statik olarak düşünülebilecek kadar küçük olduğu kabul edilebilir. Bu durumda Maxwell denklemi Denklem (2.14)' da verildiği gibidir.

$$\nabla \times E = 0 \quad (2.14)$$

Denklem verildiği gibi elektrik alan, skaler potansiyelinin negatif gradyenti olarak yazılabilir.

$$E = -\nabla\varphi \quad (2.15)$$

Manyetik alanlar YAD'lar için nadiren önemli hale gelir. Bu nedenle Maxwell'in manyetik alan ile ilgili denklemleri dikkate alınmamaktadır.

Piezoelektrik malzemeler içinde Maxwell denklemi (Gauss yasası) Denklem (2.16)'da verildiği gibidir.

$$\nabla \cdot D = 0 \quad (2.16)$$

Denklem (2.12) ve Denklem (2.13)'deki zorlanma bileşenleri Denklem (2.3) ile aynıdır.

Denklem (2.12) ve Denklem (2.13)'de verilen temel eşitlikler ve elastik dalga denklemi içine S_{ij} ve E ile ilgili eşitlikler yerleştirildikten sonra, dalga denklemi ve Maxwell denklemlerinin uygun sınır şartları altında birlikte çözülmesi ile Denklem (2.17) ve Denklem (2.18) ile verilen bileşik dalga denklemleri elde edilir [140].

$$\rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} - C_{ijkl} \frac{\partial^2 U_l}{\partial X_k \partial X_j} - e_{kij} \frac{\partial^2 \phi}{\partial X_k \partial X_j} = 0 \quad (2.17)$$

$$e_{ikl} \frac{\partial^2 U_k}{\partial X_i \partial X_l} - \epsilon_{ik} \frac{\partial^2 \phi}{\partial X_i \partial X_k} = 0 \quad (2.18)$$

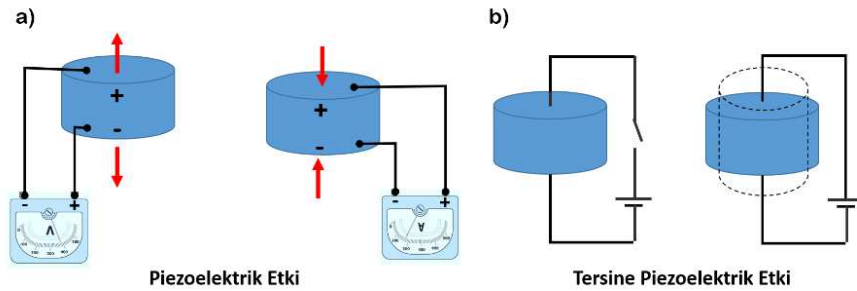
2.5. YÜZEY AKUSTİK DALGALARIN ÜRETİM GEREKSİNİMLERİ

Bu bölümde yüzey akustik dalga oluşturmak için gerekli olan bileşenlere değinilecektir.

2.5.1. Piezoelektrik etki

Yüzek akustik dalgalarının yayıldığı piezoelektrik kristallere bir elektriksel potansiyel uygulandığında mekanik olarak bir genleşme veya daralma üretilebilmektedir. Piezoelektrik etki olarak bilinen bu özellik ve tersi süreç 19.yy'ın son dönemlerinden beri bilinmektedir. Piezoelektrik etki uzun zamandır bilinmesine rağmen piezoelektrik malzemeler akustik alan oluşturmak için kullanılmaya başlanana kadar yaygın kullanıma sahip değildi.

Piezoelektrik etki, piezoelektrik bir kristalde bir sıkıştırma veya çekme kuvveti uygulanarak kolaylıklar görülebilir. Bu etki piezoelektrik malzeme üzerindeki elektrotlarda bir elektrik yükü oluşmasına sebep olur. Kuvvet kaldırıldığında kristal örgü içindeki gerilme, yük akışı oluşturarak ortadan kalkar. Böylece elektrotlar arasında sıfır potansiyel fark yeniden oluşturulur. Bu durumda, elektrik enerjisi mekanik enerjiden üretilmiş olur. Bu etki tersine de çevrilebilir [141]. Şekil 2.17; piezoelektrik ve ters piezoelektrik etki prensibini göstermektedir.



Şekil 2.17: a) Piezoelektrik ve b) tersine piezoelektrik etki prensibi.

2.5.2. Piezoelektrik alttaş seçimi

Akustik dalga oluşumu için temel prensip piezoelektrik etkiye bağlıdır ve bu etki piezoelektrik alttaşlar kullanılarak elde edilir [142]. Akustik dalga aygıtları için kullanılabilecek birkaç piezoelektrik alttaş malzemesi vardır. Şekil 2.18'de en popüler piezoelektrik alttaşlar olan kuartz (SiO_2), lityum tantalat (LiTaO_3), lityum niobat

(LiNbO_3), çinko oksit (ZnO) ve kurşun zirkonyum titanyum (PZT-5H) seramikler gösterilmiştir.



Şekil 2.18: Piezoelektrik alttaşlar.

Her malzemenin kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır ve alttaşlar uygulama alanı, maliyet, sıcaklık bağımlılığı ve akustik dalganın yayılma hızı göz önüne alınarak seçilir [136]. Kuartz, düşük maliyeti ve kristal kesiminin ve dalga yayılma yöneliminin seçilerek malzemenin ısıya karşı bağımlılığının seçilebilme özelliğinden dolayı yaygın olarak kullanılan alttaş malzemelerinden biridir [33]. Akustik dalga sıcaklık sensörleri için bu etki oldukça önemlidir. Bu durum, tüm malzeme kesimleri ve yayılım yönleri için her zaman doğrusal sıcaklık bağımlılığının mevcut olduğu LiNbO_3 veya LiTaO_3 için geçerli değildir [34]. Tablo 2.3 akustik dalga üretimi için kullanılan bazı popüler alttaşların özelliklerini göstermektedir.

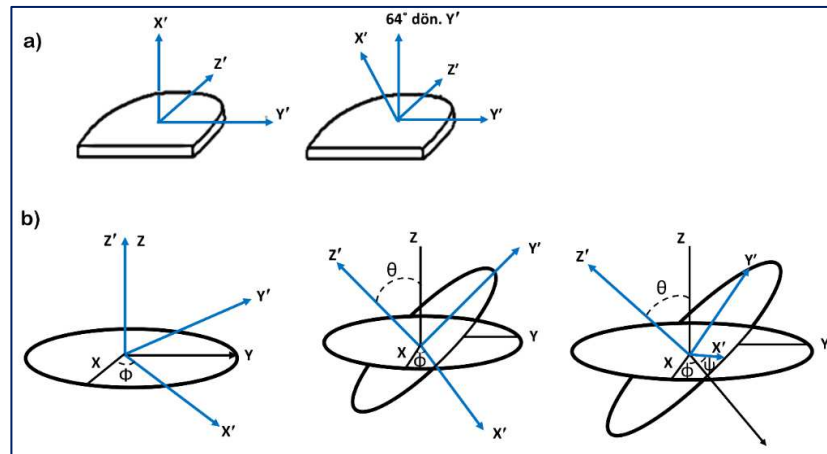
Tablo 2.3: Akustik dalga üretimi için kullanılan bazı popüler alttaşların özellikleri.

Alttaş ve yönelimi	Hız (m/s)	Elektromekanik eşleşim sabiti (k^2)
Kuars 34° Y-X	3152	0.13%
LiNbO_3 , 128° Y-X	3978	5.4%
LiTaO_3 , X-112° Y	3302	0.84%
LiTaO_3 , 42° Y-X	4214	5.0%

Bu tez kapsamında LiNbO_3 , 128° Y-X altaşın tercih edilme sebebi yüksek elektromekanik eşleşim sabiti ve yüksek YAD hızıdır.

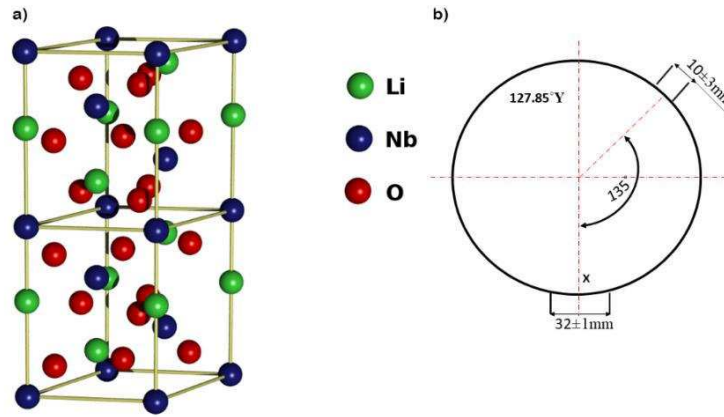
2.5.3. Kristal kesimleri ve eksen dönüşümleri

Piezoelektrik kristaller kendi kristal eksenlerine sahiptir (X', Y', Z'). Bu koordinatlar normal kartezyen koordinatlardan farklıdır. Kristal kesimlerinin yönü altaşın adında belirtilir. Şekil 2.19(a)'da görüldüğü gibi altaş X kesimli ise kristalin kesim yüzeyi piezoelektrik kristalin X' yönüne diktir. Z -ekseni etrafındaki rotasyon belirli bir isim almamaktadır. Literatürde piezoelektrik bir altaşın kristal kesimini ve özelliklerini belirtmek için yaygın olarak kullanılan diğer notasyon: rotasyon derecesi-kesim tipi-dalga yayılım yönü-altaş malzemesidir. Örneğin: “ 36° YX LiTaO_3 ”, 36 derece döndürülmüş (kristalografik X eksenine göre), Y kesimli, X yönünde yayılıma sahip lityum tantalat altaş anlamına gelir. Piezoelektrik kristaller genellikle belli açılar ile onların eksenleri etrafında döndürülür ve daha sonra kesilir. Bu açılar Euler açıları olarak adlandırılan açılar ile belirlenir (Şekil 2.19(b)). Kristal eksenlerinin döndürülmesini belirlemek için (θ, Φ, Ψ) üç açıdan oluşan bir set bulunmaktadır. Piezoelektrik kristallerin özellikleri (sertlik matrisi, piezoelektrik matrisi, dielektrik matrisi) kristal kesim yönlerine bağlı olarak değişir. Bu nedenle FEM ile piezoelektrik altaş üzerinde oluşan YAD karakteristikleri incelenirken farklı kristal kesimleri için farklılık gösteren 6×6 sertlik matrisi, 3×6 piezoelektrik matrisi, 3×3 dielektrik matrisi ve tüm kristal kesimleri için aynı kalan yoğunluk kullanılmalıdır.



Şekil 2.19: a) Farklı kristal kesimleri b) Euler açıları ve kristal kesim yönleri [143].

Tez kapsamında kullanılan LiNbO_3 kristalinin malzeme özellikleri $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ Euler açıları için Referans [24]'de bulunabilir. Koordinat dönüşümü olarak adlandırılan bir prosedür ile farklı kristal kesimleri için dönüşüm matrisleri hesaplamak mümkündür. $(0^\circ, 38^\circ, 0^\circ)$ Euler açılarına sahip 128° Y-X LiNbO_3 için dönüştürülmüş matrisler Tablo 2.4'de verilmiştir. Bu tez kapsamında kullanılan 128° Y-X LiNbO_3 alttaşın kristal yapısı trigonaldır (Şekil 2.20(a)) ve kesim düzlemi Şekil 2.20(b)'de verilmiştir.



Şekil 2.20: a) Lityum niobat (LiNbO_3) kristal yapısı b) 128° Y-X LiNbO_3 'ın kesim düzlemi.

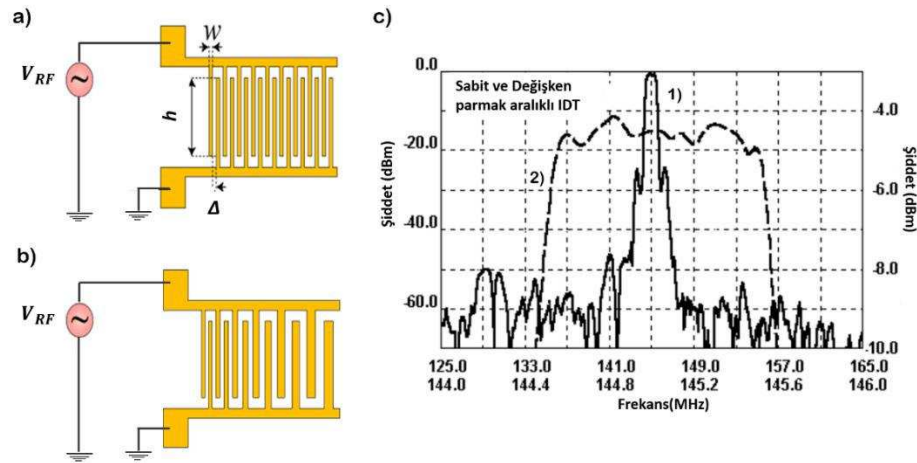
Tablo 2.4: 128° Y-X LiNbO_3 özellikleri.

Kaynama sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)	1253
Örgü parametreleri a ($\text{\AA}$)/ c ($\text{\AA}$)	5,148/ 13,863
Sertlik (Mohs)	5
Yoğunluk ($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$)	4,647
Dielektrik sabiti $\epsilon_{11}, \epsilon_{33}$	85,2, 28,7
Elastik esnemezlik katsayıları ($\times 10^{11} \text{ N/m}^2$) ($C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{33}, C_{44}, C_{66}$)	2,03, 0,573, 0,752, 0,085, 2,424, 0,595, 0,728
Piezoelektrik zorlanma katsayıları (C/m^2) ($e_{15}, e_{22}, e_{31}, e_{33}$)	3,76, 2,43, 0,23, 1,33

2.5.4. İç içe geçmiş taraklı transdüserlar

IDT'ler YAD teknolojisinin çok önemli bir parçasıdır. İlk olarak 1965 yılında *White* ve *Voltmer* tarafından IDT'lerin bir piezoelektrik alttaş üzerinde YAD üretilmesinde kullanılabileceğini gösterilmiştir [137]. IDT, en basit haliyle, parmakları periyodik olarak

değişen bir modelde bulunan iki benzer tarak benzeri metal elektrot tarafından oluşturulur. İşlevi, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek YAD oluşturmaktır. IDT'ler tipik olarak, litografi basamakları kullanılarak bir piezoelektrik alttaşın yüzeyine bir metalin ince film olarak biriktirilmesi ile oluşturulur [139]. IDT'ye, bir voltaj sinyali uygulandığında değişen voltaj piezoelektrik alttaşın deformasyonlarına neden olarak akustik dalganın oluşmasına neden olur. IDT tarafından oluşturulan dalganın dalga boyu (λ) IDT şekillerinin periyodikliğine bağlıdır [144]. IDT'nin parmak genişliği (w) ve aralığı (Δ), $\lambda/4$ 'e eşit olduğunda uyarım sinyali ile rezonansa girerek Rayleigh YAD oluşturur. IDT'nin çalışma frekansı, bant genişliği ve empedansı; parmak çifti sayısı, genişliği ve aralığına bağlı olarak değişir. Şekil 2.21'de görüldüğü gibi IDT'ler sabit genişlikte parmaklar içerebildiği gibi, geniş bir frekans aralığında Rayleigh YAD üretebilmek için parmak genişliği ve parmak aralığı doğrusal, üssel vb. şekilde değişen parmaklar da içerebilecek şekilde tasarlanabilir [145]. Tez çalışması kapsamında parmak genişliği ve parmak aralığı doğrusal olacak şekilde hem sabit hem de değişken parmak aralıklı IDT tasarımı üzerine çalışılmıştır.



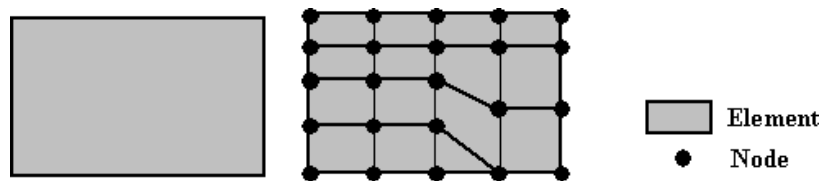
Şekil 2.21: a) Sabit ve b) değişken parmak aralıklı IDT'ler, c) rezonans frekansları: (1) sabit aralıklı, (2) değişken parmak aralıklı IDT [146].

3. MALZEME VE YÖNTEM

Tez kapsamında 128° Y-X kesimli LiNbO_3 alttaş üzerinde iç içe geçmiş sabit ve değişken parmak aralıklarına sahip taraklı transdüserler kullanarak YAD Bessel demetlerinin elde edilmesi için tansdüserlerin FEM'e dayalı olarak COMSOL 5.3a programı ile tasarımı, mikroüretim teknikleri ile IDT yapıların oluşturulması, Bessel demetlerinin deneysel eldesi ve görüntülenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu bölümde sabit ve değişken parmak aralıklı IDT'ler ile oluşturulacak olan YAD durağan dalgaların ve YAD Bessel demetinin rezonans frekanslarını belirlemek için gerçekleştirilen simülasyon adımları ile örneklerin fabrikasyon süreçlerine değinildikten sonra oluşan YAD Bessel demetlerinin görselleştirilmesi ve çalışma frekanslarının simülasyon sonuçları ile uyumunu belirlemek için kullanılan deneysel yöntemler anlatılacaktır.

3.1. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE IDT TASARIMININ MODELLENMESİ

YAD yayılma problemi için Denklem (2.17) ve (2.18)'de verilen diferansiyel denklemler aygıt geometrisindeki karmaşıklıklar, malzemelerin (elektrotlar ve alttaş) özellikleri ve sınır şartları göz önüne alınarak çözülmelidir. FEM, diferansiyel denklemlerle tanımlanan bu problemlere sayısal çözümler sunar. Sadece FEM metodunda kullanılan bazı temel prosedürler ve teknikler burada sunulacaktır ve [147]'de detaylı bir teori bulunabilir. Sonlu elemanlar yönteminde problem alanı, Şekil 3.1'de de gösterilen düğüm adı verilen belirli noktalara bağlı daha küçük elemanlardan oluşan bölgelere ayrıştırılmıştır. Oluşturulan elemanlar iki veya üç boyutlu olabilir ve boyutuna bağlı olarak üçgen, dörtgen, dört yüzlü veya tuğla şekillerine sahip olabilir. Bilinmeyenlerin çözümü (yer değiştirme, potansiyel, gerilme vb. alan değişkenleri) bu düğüm noktalarında belirlenir ve bu bilinmeyenler serbestlik dereceleri olarak bilinir.

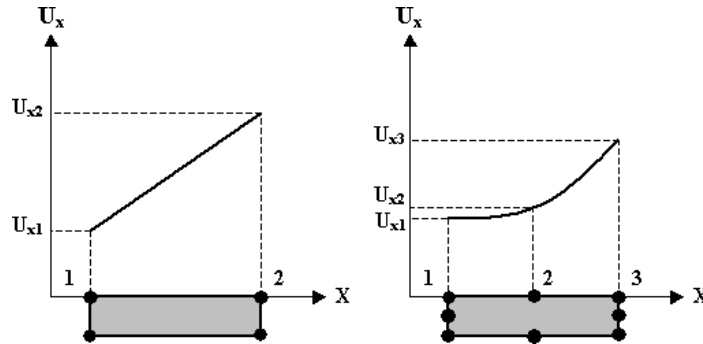


Şekil 3.1: FEM'de problem alanının ayrıştırılması [143].

Süreklilik sonsuz serbestlik derecelerine sahipken, FEM’de kullanılan ayrıklaştırılmış etki alanı sınırlı sayıda serbestlik derecesine sahiptir. Çözümler belirli noktalarda (düğümelerde) belirlendiğinden, çözümün devamlılığı şekil veya interpolasyon fonksiyonları tarafından sağlanır. Bu fonksiyonların seçimi, alanın tek bir eleman alanı boyunca nasıl değiştiğini yaklaşık olarak belirler. Bir polinom fonksiyonu, bir şekil fonksiyonu olarak seçilir ve belirli bir elemana atanan düğüm sayısı polinomun derecesini belirler. İnterpolasyon fonksiyonu ile alanın yaklaşık değeri, Denklem (3.1) ile verilir.

$$\phi(x) = \sum_i N(x)_i \phi_i \quad (3.1)$$

Burada $\phi(x)$, eleman boyunca yaklaşık alan, $N(x)$, şekil fonksiyonudur. ϕ_i , düğümdeki bilinmeyen alan değeridir. Lineer ve kuadratik bir şekil fonksiyonu kullanımı arasındaki fark, Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Şekil 3.2’de, x eksenini bir eleman ve düğümleri y eksenini ise x yönündeki yer değiştirmeyi (alan değişkeni) göstermektedir. Sunulan iki durumda yaklaşım oldukça farklıdır ve eleman tipinin doğru çözümün doğasına göre seçilmesi gerekir. Ayrıca, yoğunluk, sertlik vb. gibi malzeme özelliklerini tanımlayan verilerin analizin başında belirtilmesi önemlidir.

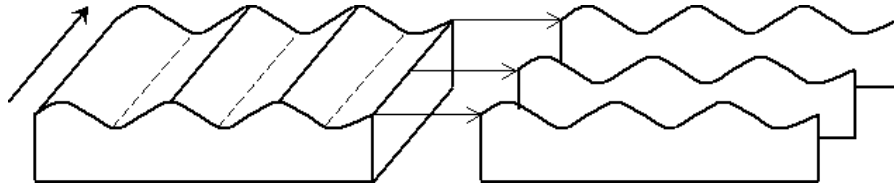


Şekil 3.2: Lineer ve kuadratik elemanlarla alan yaklaşımı [143].

Eleman tipi tanımlandıktan sonra, diferansiyel denklemin çözümü sürekli fonksiyona yaklaşır ve tek bir eleman için bilinmeyen düğüm değerleri ϕ_i cinsinden ifade edilir. Bilinmeyen düğüm değerleri cinsinden bir denklem sistemi, bu eleman için ve daha sonra tüm alan için formüle edilir. Cebirsel denklemler toplanırken, elemanlar tarafından paylaşılan düğümler için alan değişkenleri aynı değerlere sahip olmalıdır. Bu şekilde oluşan denklem sistemleri, sınır şartları uygulanmadan çözülemez. Çünkü sistem belirsiz kalır. Nihai çözümlere ulaşılması için tüm sınır koşullarının doğru bir şekilde belirlenmesi gerekir ve son olarak, ortaya çıkan denklem sistemi, uygun sayısal tekniklerle çözülür.

FEM kullanılarak YAD simülasyonlarında bazı yaklaşık varsayımlar yapılmaktadır [148,149]. Ana yaklaşımlar;

2B küçültme: YAD'ların alttaş yüzeyinde ilerlemesi Şekil 3.3' te görüldüğü gibi sadece yanal yönden gözlemlenirse, yapılan hesaplamalar sırasında yapının 2B'de ele alınması gereksiz hesaplama miktarının azaltılmasına olanak tanır.



Şekil 3.3: Modellemede yapının 2B'ye azaltılması [143].

Yapının derinliğini azaltma: YAD'lar alttaşın derinliklerine doğru sadece birkaç dalga boyu kadar ilerler. YAD'nın bu özelliği, alt tabaka derinliğinin yalnızca 5-10 dalga boyu için modellenmesine ve tam derinlikli bir model çözümünde oluşacak olan gereksiz hesaplama miktarının azaltılmasına olanak sağlar.

Yapının periyodikliği: Alttaş üzerinde yayılan dalgalar ve üstündeki yapılar periyodik ise, bir dalga boyu veya periyod, tüm yapının karakterizasyonu için yeterlidir [149]. Bu tez kapsamında FEM'e dayalı simülasyonlar Comsol 5.3a programının piezoelektrik modülü içinde katı mekaniği ve elektrostatik fiziği kullanılarak yapılmıştır.

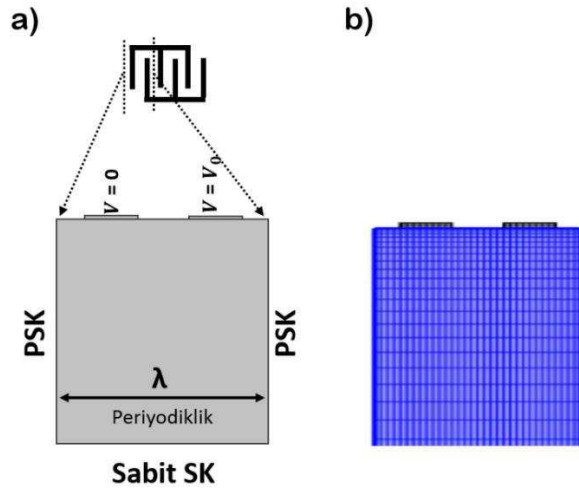
Periyodik yapının modellenmesi

YAD yayılması için FEM simülasyonlarının geliştirilmesi aşağıdaki adımları içerir:

1. **Geometrinin tasarımı:** Periyodik yapı sonsuz bir ızgara olarak modellenmiştir. IDT çiftlerinin bir periyodunu alarak YAD rezonans frekansını hesaplamak için 2B COMSOL modelinde piezoelektrik malzemenin genişliği ve yüksekliği ise λ 'dır. Piezoelektrik alttaş üzerinde tasarlanan IDT'ler 5 nm Cr ve 100 nm Au içermektedir. Genişlikleri de $\lambda/4$ 'tür.
2. **Malzeme özellikleri:** Piezoelektrik alttaşın malzeme özellikleri, kristal kesimler için gerekli dönüşümden sonra elde edilen matrisler olarak girilir, (Tablo 2.4). Elektrotlar için seçilen metal malzemeler için ayrıca yoğunluk, elastiklik modülü ve poisson oranı gibi malzeme özellikleri de belirtilmelidir.
3. **Sınır şartları:** Sınır koşullarının uygulanması, sonlu elemanlar çözümlerine ulaşmanın en kritik kısmıdır. Şekil 3.4(a)'da verildiği gibi yer değiştirmelerin 3

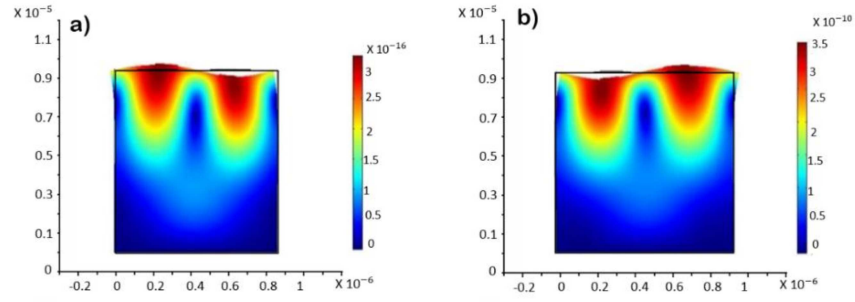
ila 4 dalga boyunda kaybolduğu alttaşın alt yüzeyinde Dirichlet sabit sınır koşulu, sol ve sağ yüzeylerde ise oluşacak olan YAD'ın dalgaboyu yapının periyodikliğine eşit olduğu için Bloch-Floquet periyodik sınır koşulları (PSK) kullanılır. Aygıt tasarımı için önemli olan rezonans anti-rezonans şekilleri bu frekanslar bandında yer almaktadır. Bu frekans bandının dışında bile, aygıtın elektriksel tepkisi akustik faaliyetten ziyade tamamen IDT'lerin elektriksel özelliklerine bağlıdır [150]. Bu nedenle, bu sınır koşulu uygulanarak akustik etkiden dolayı oluşan elektrik tepkinin belirlenmesi aygıt tasarımlarında oldukça faydalıdır.

4. **Örgü işlemi:** Modelde bütün bileşenler dikdörtgenler ya da kare prizma şeklinde olduğu için örgü işleminde kare elemanlar kullanılmıştır. Ayrıca YAD yer değiştirmelerinin alttaşın yüzeyine yakın bölgede en büyük olduğu düşünülerek mesh sıklığı sadece bu bölgede artırılarak problem boyutu aza indirilmiştir. Şekil 3.4(b) bir dalga boyuna sahip modelde örgü işlemini göstermektedir.



Şekil 3.4: a) IDT parmak çiftinin frekans öz değerlerinin FEM ile hesaplanması için model, b) modelin örgü işlemi.

Modellenmesi tamamlanan yapı üzerindeki iki elektrottan birine toprak ve diğerine sabit voltaj uygulanarak YAD'ın rezonans frekansındaki, simetrik ve anti-simetrik modda yüzey deformasyon profili Şekil 3.5'te verilmiştir.

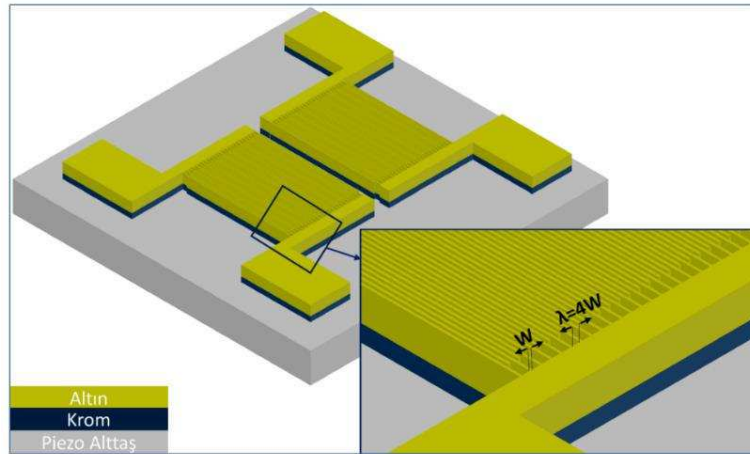


Şekil 3.5: $f_0 = 13.3$ MHz değerindeki öz kipteki yüzey davranışı a) Simetrik modda ve b) Anti simetrik modda yüzey yer değiştirmesi.

$\lambda = 300$ μm dalga boyuna sahip YAD elde etmek için simülasyonda sabit aralıklı durağan YAD IDT'ler için parmak genişliği ve aralığı $\lambda/4 = w = \Delta = 75$ μm , uzunluğu $h = 15$ mm ve parmak sayısı $N = 25$ olacak şekilde optimize edilmiş ve rezonans frekansı $f_0 = 13.3$ MHz hesaplanmıştır.

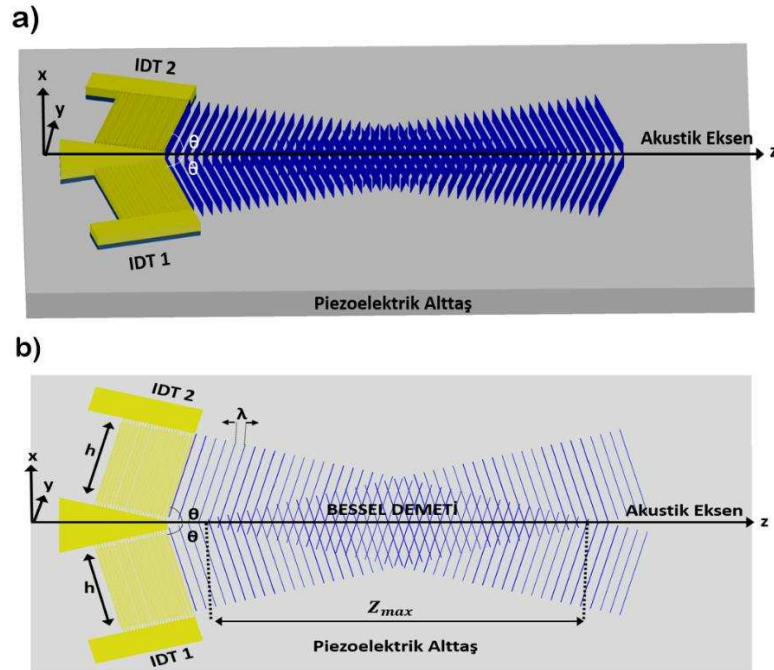
3.2.ÖRNEKLERİN YAPISI

Tez kapsamında YAD elde etmek için öncelikle ele alınan ilk örnek seti LiNbO_3 alttaş üzerinde durağan YAD oluşturan sabit parmak aralıklı karşılıklı konumlandırılmış IDT çifti bulunduran örnektir. Bu örnek üzerinde tasarlanan her bir sabit aralıklı durağan YAD IDT çifti $N = 25$ çift parmak sayısına, $w = 75$ μm parmak kalınlığına ve $h = 15$ mm IDT genişliği sahiptir. Bu örnek için tasarlanan durağan YAD IDT çiftinin geometrisi ve geometrik parametreleri Şekil 3.6' da verilmiştir.



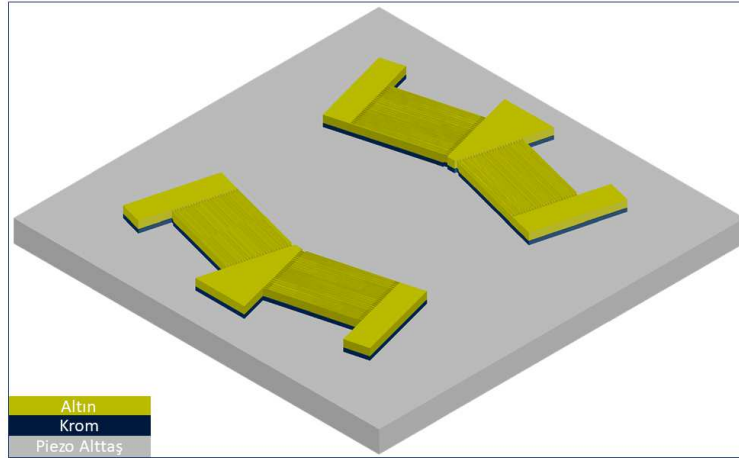
Şekil 3.6: Durağan YAD oluşumu için tasarlanan sabit aralıklı IDT çifti.

Bu örnekten elde edilen simülasyon sonuçları ve deneysel veriler ışığında tez kapsamında tasarlanan ikinci örnek seti LiNbO_3 alttaşı üzerinde sabit aralıklı IDT'ler kullanılarak YAD Bessel demeti oluşturulan ve Şekil 3.7'de görüldüğü gibi akustik eksenle belirli bir θ açısı yapacak şekilde konumlandırılmış YAD Bessel IDT çifti bulunduran örnektir.



Şekil 3.7: YAD Bessel demeti için LiNbO_3 alttaşı üzerinde oluşturulacak Bessel IDT çiftinin a) 3 boyutlu gösterimi, b) demet oluşumu.

Şekil 3.7(a)'daki gibi konumlandırılan IDT'ler tarafından üretilen λ dalga boyuna sahip YAD'lar, Şekil 3.7(b)'deki gibi akustik eksenle (x ekseni) θ açısı yaparak ilerlemekte ve taralı bölgede girişim yapmaktadır. Girişim bölgesinde 0. derece Bessel demeti (J_0) elde edilmektedir.



Şekil 3.8: YAD Bessel demeti oluşumu için tasarlanan sabit aralıklı YAD Bessel IDT çifti.

İdeal Bessel demeti eldesi için simülasyon sonuçlarına göre belirlenen Şekil 3.8’deki her bir YAD Bessel IDT çifti 25 çift parmak sayısına ve 75 μm parmak kalınlığına sahiptir ve akustik eksen ile 20° ve 15° açı yapacak şekilde simetrik olarak konumlandırılmıştır. Geniş bir frekans aralığında YAD Bessel demeti elde etmek için ise tez kapsamında ele alınan üçüncü örnek seti olan değişken parmak aralıklı IDT’ler tasarlanmıştır. Bu IDT’ler ise 12 çift parmak sayısına ve 60 μm den 90 μm ye kadar değişen parmak genişliğine sahiptir. Ayrıca Bessel demeti oluşturmak için akustik eksen ile yine 20° ve 15° açı yapacak şekilde simetrik olarak konumlandırılmıştır.

Çalışmada kullanılan IDT’lerin geometrik parametreleri ise Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1: Hazırlanan örneklerin geometrik parametreleri.

Parametre/Örnek	Sabit Aralıklı Durağan YAD IDT Çifti	YAD Bessel IDT Çiftleri	
		Sabit Aralıklı	Değişken Aralıklı
Parmak uzunluğu, h (mm)	15	15	15
Parmak genişliği, w (μm)	75	75	60-90
Parmak aralığı, Δ (μm)	75	75	60-90
Parmak çifti sayısı, N	25	25	12

3.3. ÜRETİM TEKNİKLERİ

Tez kapsamında fabrikasyonu yapılan örneklerin şekillendirilmesinde mikroüretim yöntemlerinden biri olan fotolitografi tekniği kullanılmıştır. Fotolitografi, aygıt fabrikasyonunda yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Temel olarak, ışığa duyarlı bir

malzemenin (fotodirenç) örnek yüzeyi üzerine kaplanması ve daha sonra tasarlanan desenin daha önceden basılmış olduğu bir maske üzerinden morötesi (Ultraviolet, UV) ışına maruz bırakılmasıyla maskedeki desenin örnek yüzeyi üzerinde elde edilmesi esasına dayanır. Kullanılan maskeler fabrikasyonu yapılacak aygıtların tasarımına göre özel olarak tasarlanarak krom kaplı kuartz üzerine bastırılır.

Aygıt fabrikasyonlarında oldukça gelişmiş bir teknik olarak kullanılan fotolitografi işlemi, temiz oda koşullarına gerçekleştirilir. Çünkü ortamda bulunan gözle görülemeyen mikron boyutlarındaki parçacıklar mikron veya mikron-altı boyutlarda fabrikasyonu yapılacak aygıtlar üzerinde yer alması aygıtların elektriksel ve optiksel özelliklerini olumsuz etkiler.

Örneklerin fabrikasyonu İstanbul Üniversitesi Fizik Bölümü Nano ve Optoelektronik Araştırma Laboratuvarları bünyesinde bulunan İleri Litografik Yöntemler Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

3.3.1. Litografi ve Metalizasyon Aşamaları

Bu çalışmada örneklerin fabrikasyon işlemi sırasında izlenen adımlar şu şekildedir.

1. 4 inch YX-128° LiNbO₃ alttaş sırasıyla aseton, de-iyonize su ile temizlenip azot ile kurutulur. Örnek üzerindeki nemin kaldırılması için 65 °C den 90 °C ye kadar ısıtıcıda 4 dk bekletilir.
2. Temizlenen yüzeyin tümüne homojen olarak pozitif fotodirenç (PF) (AZ5214E) kaplanır. Bu işlem spin coater'da yapılır. Pozitif fotodirenç örnek üzerine damlatılır ve 5000 rpm hızda 60 saniye döndürülür.
3. Fotodirenç çözeltisi içinde bulunan çözücünün buharlaşması ve fotodirenç örnek üzerinde daha iyi tutunması için örnek 65 °C den 90 °C ye kadar ısıtıcıda 4 dk bekletilir.
4. Örnek pozisyonu ayarlandıktan ve maske örnek üzerine iyice yaklaştırıldıktan sonra 405 nm dalga boyunda ve 23 mW/cm² gücündeki mor ötesi ışığa 35s maruz bırakılarak LiNbO₃ alttaş üzerinde IDT tasarımının negatifi elde edilir.
5. Örnek, fotodirenç yapısındaki sıvının buharlaşması, fotodirenç örnek üzerinde iyice tutunması ve dayanıklılığının artması için 65 °C'den 90 °C ye kadar ısıtıcıda 4 dk bekletilir.

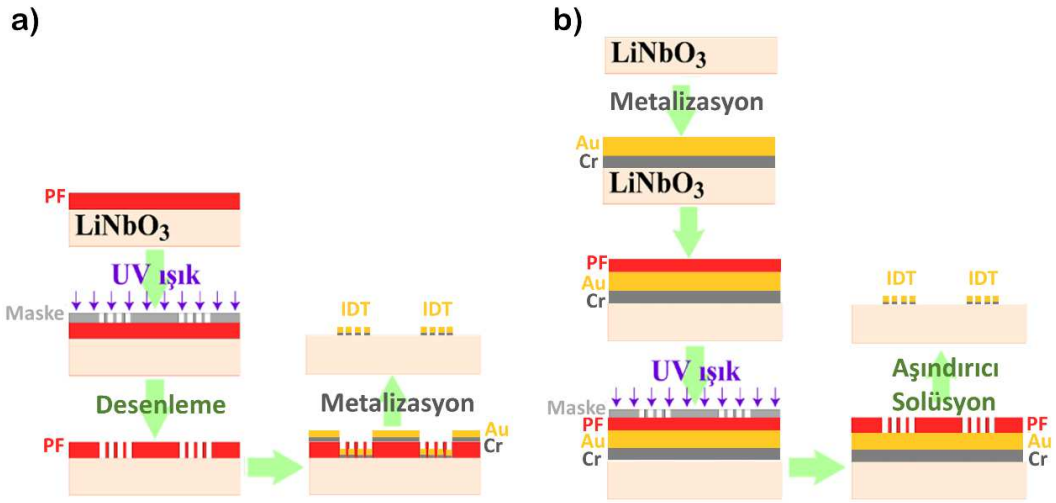
6. Örnek üzerinde yapısı bozulan fotodirenç Developer (AZ400k): De-iyonize su, 1:3 karışımında maske şekli net olarak görünmeye başlayıncaya kadar bekletilir. De-iyonize su ile durulanır ve azot gazı ile kurutulur.
7. Kaplanan fotodirenç kalınlığı profilmetre ile ölçülür.
8. LiNbO_3 alttaş üzerine termal buharlaştırma yöntemi ile önce 5-10 nm Titanyum (Ti) ve daha sonrasında 100 nm Altın (Au) kaplanır. Ancak aşağıda bahsedilecek fabrikasyon zorlukları nedeniyle yapışma katmanı (adhesion layer) olarak Krom (Cr) kullanılmıştır.
9. Kaplama işleminden sonra örnek, ultrasonik banyoda aseton ile gerçekleştirilen sıyırma işlemi ile alttaş üzerinde yalnızca UV ışınların geçmediği kısımlardaki metal kaplamaların kalması sağlanır. Daha sonrasında örnek De-iyonize su ile durulanır ve azot gazı ile kurutulur.

Tez kapsamında sabit aralıklı durağan dalga ve Bessel demeti örneklerin fabrikasyonu çift tarafı parlatılmış LiNbO_3 örnek üzerine yukarıdaki adımlar takip edilerek gerçekleştirildi. Ancak değişken parmak aralıklı Bessel demeti örneğinin fabrikasyonu tek tarafı parlatılmış örnek üzerinde aynı adımlar takip edilerek gerçekleştirilmeye çalışıldığında, Mask Aligner cihazının uyguladığı UV ışığının örneğin parlatılmamış tarafından geri saçılmaları sonucu örnek üzerinde kaplı olan fotodirenç tamamının UV ışığına maruz kalması ve desenin örnek yüzeyinde oluşturulamaması sorunu ile karşılaşıldı. UV ışığın örneğin parlatılmamış alt yüzeyinden saçılmalarını engellemek için örneğin metalizasyon işlemi yapıldıktan sonra litografi işlemi yapıldı ve daha sonrasında Tablo 3.2’de verilen kimyasallar kullanarak ıslak aşındırma işlemi ile örneğin fabrikasyonu tamamlandı.

Tablo 3.2: Au ve Cr metalleri için aşındırıcıların karışım ve aşındırma oranları [151,152].

Aşındırılan metal	Aşındırıcı karışım	Karışım oranı	Aşındırma hızı
Au	$\text{HNO}_3:\text{HCl}$	1:3	10 μm /60s
Cr	$\text{H}_8\text{N}_8\text{CeO}_{18}:\text{HClO}_4:\text{H}_2\text{O}$	%10.9 : %4.25: %84.85	60nm/60s

Örnekler üzerinde yapılan fabrikasyon süreçlerinin akış diyagramı ise Şekil 3.9’da verilmiştir.

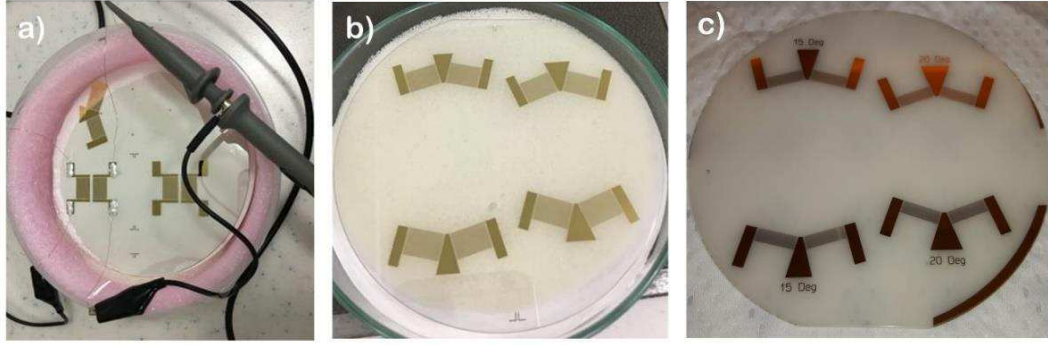


Şekil 3.9: a) Sabit aralıklı durağan YAD IDT çifti ve YAD Bessel IDT çifti örnekleri için b) Değişken aralıklı YAD Bessel IDT çifti örnekleri için kullanılan fabrikasyon akış diyagramı.

Fabrikasyon süreçlerinde deneyimlenen bir diğer durum ise termal buharlaştırma sisteminde altının yüzeye tutunmasını sağlamak için ara katman olarak Ti metalinin kaplanması sırasında LiNbO₃ örneğinin kırılmasıdır. Örneğin sıcaklığa aşırı hassas olması ve yüksek erime sıcaklığına sahip Ti'un termal buharlaştırma sisteminde kaplanması sırasında buharlaşan ve yüksek sıcaklığa sahip Ti atomlarının örnek yüzeyine fazla ısı taşınması nedeniyle kırıldığı düşünüldü. Bu sorunu çözmek için daha düşük erime sıcaklığına sahip olan krom (Cr) ara katman metalizasyon malzemesi olarak seçildi.

Tez kapsamında fabrikasyonu yapılan sabit parmak aralıklı durağan YAD IDT çiftleri ve YAD Bessel IDT çiftlerinden oluşan örneklerin maskeleri Bilkent Üniversitesi bünyesindeki Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Enstitüsünde (UNAM) ticari olarak yaptırıldı. Değişken parmak aralıklı YAD Bessel IDT çiftinden oluşan örnek maskesi ise İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa bünyesindeki Intelligent Micro Patterning LLC maskesiz litografi cihazında basıldı. UNAM'dan ticari olarak satın alınan krom kaplı kuarz üzerine AutoCad programında çizilen maskeler maskesiz litografi cihazında 1dk 40 s UV ışığına maruz bırakıldıktan sonra Developer (AZ400k): De-iyonize su, 1: 3 karışımında çizilen maske şekli net olarak görünmeye başlayıncaya kadar bekletildi ve yine Tablo 3.2'de verilen karışım ile Cr aşındırılarak hazırlandı

Tez kapsamında durağan YAD IDT çiftleri, sabit ve değişken aralıklı YAD Bessel IDT çiftleri olmak üzere 3 farklı örnek üretilmiştir (Şekil 3.10).



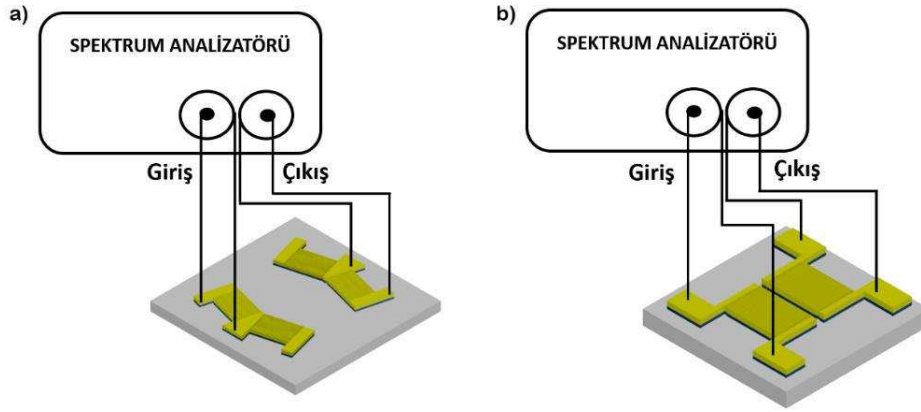
Şekil 3.10: Fabrikasyonu yapılan örnekler: a) Durağan YAD oluşturan sabit aralıklı IDT çifti örneği b) YAD Bessel demeti oluşturan sabit aralıklı YAD Bessel IDT çifti örneği c) YAD Bessel demeti oluşturan değişken aralıklı YAD Bessel IDT çifti örneği.

3.4.ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Bu çalışmada ölçüm aşamasında ilk olarak durağan YAD IDT çiftlerinden oluşan örnek üzerinde optik ölçümler yapılarak YAD'ların oluştuğu görüntülenmiştir. Sonrasında YAD Bessel demeti oluşturan sabit ve değişken aralıklı YAD Bessel IDT çiftinden oluşan örnekler üzerinde elektriksel ölçüm yöntemleri kullanılarak YAD Bessel demetlerinin elektriksel karakterizasyonu ve optik ölçüm yöntemleri kullanılarak da gözlenmesi gerçekleştirilmiştir.

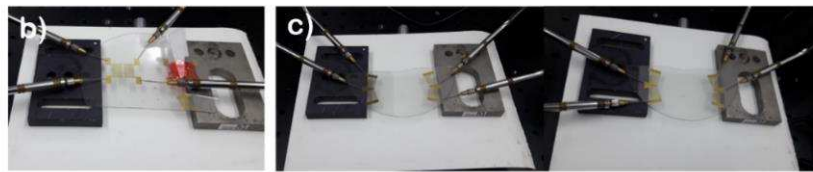
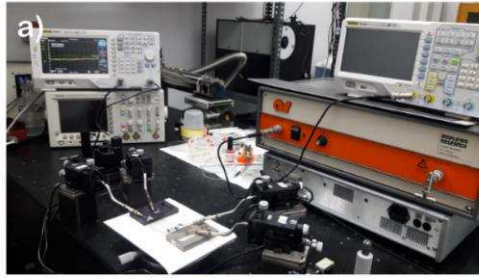
3.4.1. Elektriksel ölçüm

IDT'lerin rezonans frekanslarının belirlenmesi için yaygın olarak kullanılan elektriksel ölçüm yöntemi, karşılıklı IDT'lerin birisine voltaj uygulayarak YAD uyarıcısı olarak kullanıp karşısındaki diğer IDT'yi algılayıcı olarak kullanarak spektrum analizöründe frekans spektrumlarının elde edilmesi yöntemidir. Tez kapsamında ele alınan durağan dalga ve Bessel demeti örneklerin frekans spektrumları Akdeniz Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Laboratuvarı'nda Rigol DSA815-TG spektrum analizörü yardımı ile elde edilmiştir. Frekans spektrumlarının belirlenmesi için elektriksel bağlantılar Şekil 3.11 ve kurulan düzenek Şekil 3.12'de verilmiştir. Örnekler iğne probalar kullanılarak spektrum analizörüne bağlanmıştır. Analizör, Triggered Gate (TG) modunda, ön yükseltici devreye sokularak kullanılmıştır. Spektrumlar 10 kHz-100 MHz frekans aralığında elde edilmiştir.



Şekil 3.11: a) YAD Bessel IDT çiftinin rezonans frekansının belirlenmesi için ve b) Durağan YAD IDT çiftinin rezonans frekansının belirlenmesi için elektriksel bağlantı konfigürasyonu.

Bessel IDT çiftlerinin özdeş olup olmadıklarının kontrol edilebilmesi için Şekil 3.12(c)'de gösterildiği gibi iki farklı konfigürasyonda elektriksel olarak incelenmiştir.



Şekil 3.12: a) Kullanılan sistem b) Durağan YAD'ın rezonans frekansının belirlenmesi için ve c) YAD Bessel IDT çiftinin rezonans frekansının belirlenmesi için yapılan elektriksel bağlantılar.

3.4.2. Görüntüleme Yöntemleri

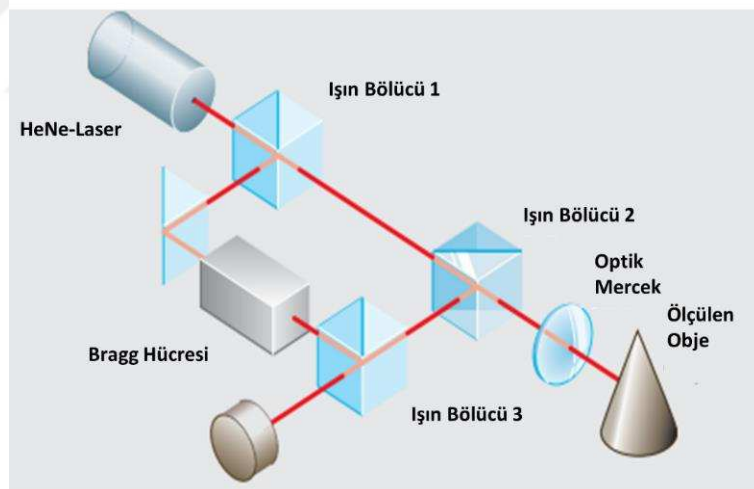
YAD'ların gözlenmesi için en yaygın kullanılan yöntem Laser Doppler Vibrometresi (Laser Doppler Vibrometer, LDV)'dir [153]. Ancak bu deney düzeneği oldukça pahalı olup, laboratuvar olanaklarımızda yer almamaktadır. Literatürde, YAD'ların görselleştirilmesine yönelik LDV'ye alternatif olabilecek, çok daha ekonomik ve hızlı

yöntemler önerilmiştir [154–158]. Tez kapsamında YAD'ları görüntülemek için aşağıdaki yöntemler uygulanmıştır.

- Duman içerisinde nanoparçacıklar yardımı ile YAD görselleştirme
- Schlieren optiği
- Girişim yöntemi
- İnce sıvı film uygulanması
- İnce sıvı filmlerin girişimi yöntemi

3.4.2.1. *Laser Doppler vibrometresi*

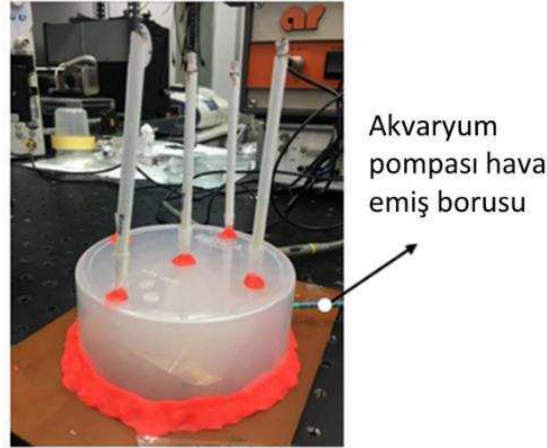
Laser Doppler vibrometresi bir nesne üzerine gönderilen bir laser ışınının yüzeyden geri saçılması sırasında frekans ve faz kaymasının algılanması esasına dayanmaktadır [159]. Laser Doppler vibrometresi bir noktada titreşim hızının ve yer değiştirmesini belirlemek için kullanılan çok hassas bir optik dönüştürücüdür (Şekil 3.13). Bu çalışma kapsamında bu yöntem kullanılmamıştır.



Şekil 3.13: Laser Doppler vibrometresinin şematik gösterimi [159].

3.4.2.2. *Duman içerisinde nanoparçacıklar yardımı ile YAD görselleştirme*

Yöntem duman içerisindeki 170-250 nm boyutlarında karbon parçacıkların piezoelektrik kristal yüzeyinde yaratılan dalgaların tepe noktalarında birikeceği düşüncesine dayanmaktadır [155]. Bu amaçla bu çalışmada yöntemin denenmesi için hazırlanan deney düzeneği Şekil 3.14'te verilmiştir, IDT'ler uyarılırken sigara dumanının yüzeye temasını sağlamak için, havası akvaryum pompası ile emilen, kapalı bir ortam, oluşturulmuştur.

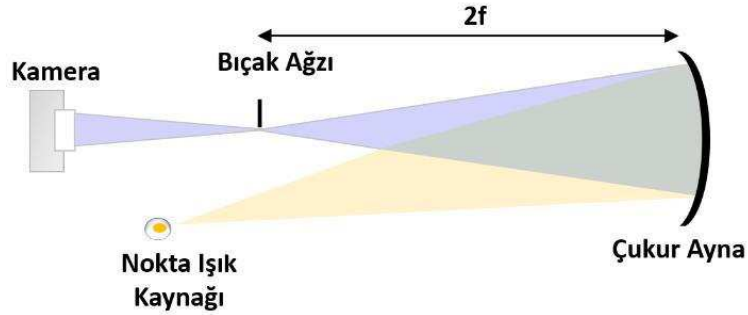


Şekil 3.14: Dumandaki karbon nanoparçacıkların piezoelektrik yüzey ile etkileşimini sağlamak amaçlı oluşturulan düzenek.

Kutunun hava geçirmezliği oyun hamuru ile sağlanmıştır. Sistem değişik duman yoğunlukları (1-5 sigara) elde edebilecek şekilde olup, kristalin dumanla etkileşim süresi akvaryum pompasının çalışması ile düzenlenebilmektedir.

3.4.2.3. Schlieren Optiği

Yöntem, çukur ayna ile odağı arasına konulan cismin oluşturduğu farklı kırılma indisine sahip bölgelerden geçen ışığın çukur ayna tarafından farklı noktalara odaklanmasından yararlanarak uygun bir aydınlatma ile görüntülenmesi esasına dayanmaktadır. Yöntem ile gözle görülemeyecek görüntülerin kaydedilmesi mümkündür [154].



Şekil 3.15: Tek bir nokta ışık kaynağı ve çukur aynaya sahip basit Schlieren optiği sistemi.

Bu çalışmada bu yöntemin daha pratik olarak uygulanabilmesi için düzenek düşey doğrultuda oluşturulmuştur. Kristal, yatay olarak yere konulan 20 cm çapında ve $f=86$ cm odağa sahip olan çukur aynadan, 5-6 cm yükseğe, aynaya paralel olarak yerleştirilerek elektriksel bağlantılar oluşturulmuştur (Şekil 3.16).

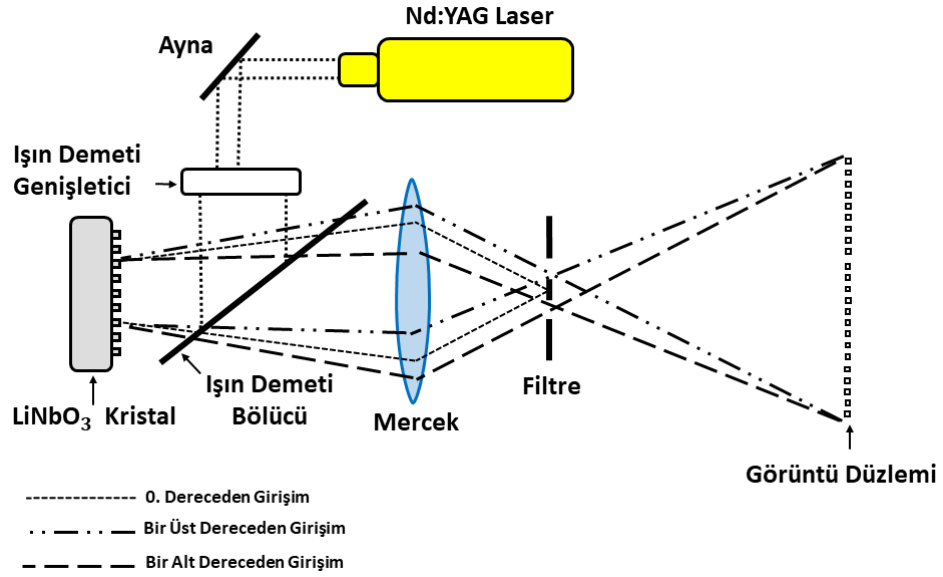
Aynadan 80-90 cm yükseklikteki dijital kamera (Sony DCR-TRV340E) tripod yardımı ile aynanın optik eksenini ile eş eksenli olarak konumlandırılmış ve ayna-kamera uzaklığı ayarlanabilir duruma getirilmiştir.



Şekil 3.16: Schlieren optiği ile yüzey akustik dalgaların görüntülenmesi için oluşturulan düzeneğin ayna ve örnek kısmı.

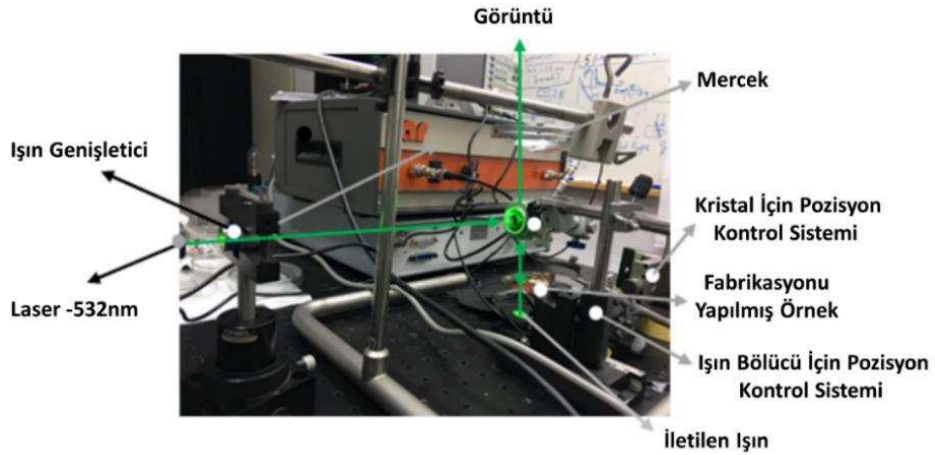
3.4.2.4. Girişim Yöntemi

Sistem, kristal yüzeyindeki akustik dalgalar tarafından oluşturulan genlik değişimlerinden yansıyan ışınların mercekle yardımıyla geniş bir yüzeye yansıtılması esasına dayanmaktadır [156]. Yöntem şematik olarak Şekil 3.17’de gösterilmiştir. Kristal yüzeyindeki genlik değişimlerinin oluşturduğu kırınım desenlerinin çok zayıf olmasına karşın 0. dereceden girişimin çok güçlü olması nedeniyle bunun engellenmesi için merceğin odak düzleminde dairesel bir filtre kullanılmaktadır [156].



Şekil 3.17: Girişim yönteminin şematik gösterimi.

Şekil 3.17’de belirtilen düzenek, görüntünün yaklaşık 2m yüksekliğindeki tavana yansıtılacak şekilde 90 derece döndürülüp, 532 nm lazer (B&W, BWT-50-E) kullanılarak kurulmuştur (Şekil 3.18). Işın bölücü ve kristale x, y, z eksenlerinde doğrusal hareketler yaptırılabilir. Deney düzeneğinde kristal, x - ve y - eksenleri etrafında dönüş yapabilme olanağına sahip olacak şekilde konumlandırılmıştır.



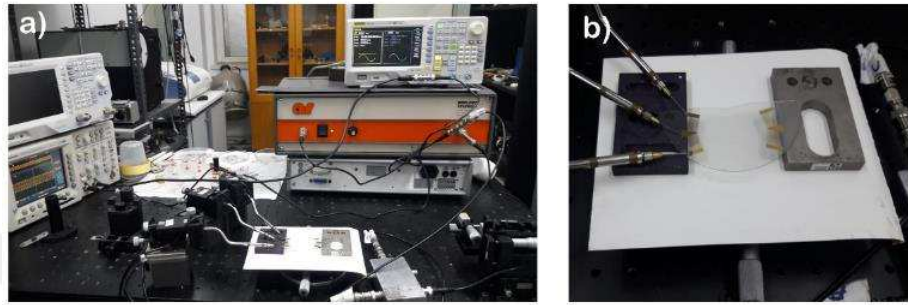
Şekil 3.18: Girişim yöntemi için kurulan düzenek.

3.4.2.5.İnce Sıvı Film Uygulanması

Yöntem, kristal yüzeyindeki akustik dalgaların yarattıkları basınç ile yüzeydeki ince sıvı film içerisinde deformasyonlara neden olduğu, akustik düğüm noktaları ile diğer bölgeler arasında ince sıvı film içerisinde böylelikle oluşturulan optik kontrastların da sıradan

optik mikroskop ile gözleneceği esasına dayalıdır [157]. Etanol, metanol ve heptan gibi birçok sıvı içerisinde metanol ve heptan'ın en iyi sonuçları verdiği rapor edilmiştir [157].

Bu çalışmada sıvı olarak heptan kullanılmıştır. Şekil 3.19'da verilen ince sıvı film ölçüm sistemi ışık kaynağı olarak floresan lamba veya fiberli aydınlatma, 10 kHz-250 MHz frekans aralığında çalışan güç kaynağı, sinüs dalgası uygulamak için dalga jeneratörü ve osiloskoptan oluşmaktadır.



Şekil 3.19: a) İnce Sıvı Filmlerin Girişim Yöntemi için kullanılan sistem ve b) bu yöntem için yapılan elektriksel bağlantı.

3.4.2.6.İnce Sıvı Filmlerin Girişim Yönteminde Kullanılması

Yöntem, girişim ve ince film yöntemlerindeki deneyimler sonucunda iki yöntemin birleştirilmesi ile ortaya çıkmıştır. Kristal üzerinde yüzey akustik dalgalarının oluşturduğu kırınım desenlerine, yine bu dalgaların ince sıvı film içerisinde oluşturduğu optik kontrastların eşlik etmesi sağlanmıştır.

4. BULGULAR

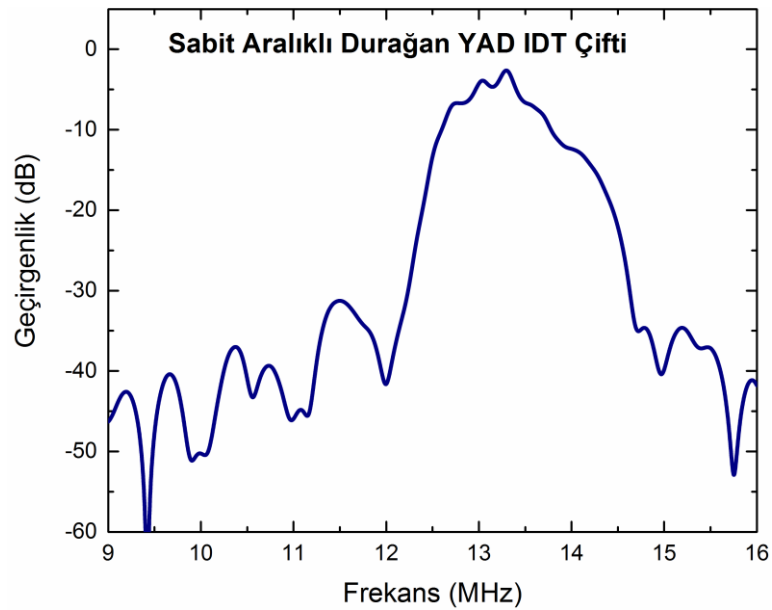
Bu bölümde tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar sunulacaktır

4.1.MODELLEME SONUÇLARI

Bu çalışmanın ilk aşamasında COMSOL MultiPhysics paketinin Piezoelektrik modülü kullanılarak FEM simülasyonları ile durağan dalgaların ve Bessel demetinin oluşması için kullanılacak sabit parmak aralıklı IDT'lerin sistem parametreleri (çalışma frekansı ve bunu belirleyen IDT geometrileri) Bölüm 3.1'de anlatıldığı gibi belirlenmiştir. Bu kısımda farklı örnek tasarımları için elde edilen simülasyon sonuçları sunulacaktır.

4.1.1. Sabit aralıklı durağan YAD IDT çifti örneği

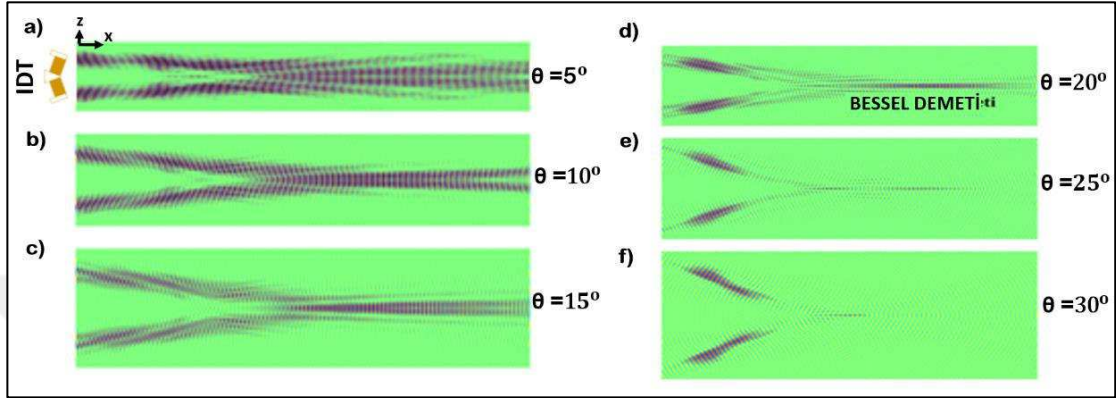
Tasarlanan sabit aralıklı YAD IDT çifti örneğinin sayısal modelleme sonucunda elde edilen geçirgenlik spektrumu Şekil 4.1'de verilmiştir. Bu parametreler altında IDT'lerin rezonans frekansı 13.52 MHz, rezonans pikinin yarı yükseklikteki genişliği (Full width at Half Maximum, FWHM) ise yaklaşık 2 MHz'tir.



Şekil 4.1: Sabit parmak aralıklı durağan YAD IDT'lerin FEM simülasyonları ile elde edilen 9-16 MHz arası frekans spektrumu.

4.1.2. Sabit aralıklı YAD Bessel IDT çifti örneği

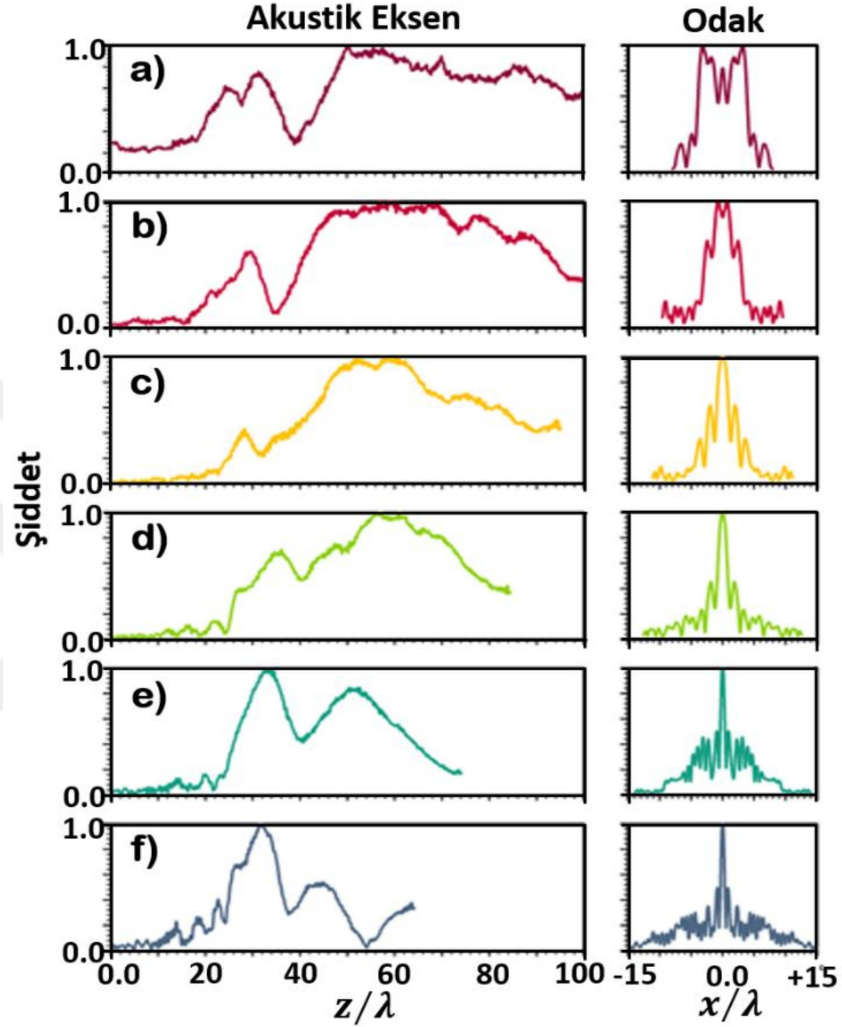
Sabit aralıklı YAD Bessel IDT çiftleri için yapılan simülasyonlarda sabit aralıklı durağan YAD IDT'ler ile elde edilen sonuçlara göre IDT çiftlerinin yatayla (x -ekseni ile) 5° - 30° aralığında 5° aralıklar ile açı yaptıkları durumlar göz önüne alınarak FEM simülasyonları gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2: IDT'lerin yatayla yaptığı açıya bağlı olarak YAD Bessel demeti oluşumunun FEM simülasyon sonuçları. a) 5° , b) 10° , c) 15° , d) 20° , e) 25° , f) 30° .

Düşük açılarda şiddetli girişimler gözlemlense de Bessel demeti oluşmamaktadır (Şekil 4.2(a) ve (b)). Şiddetli ve λ mertebesinde genişliğe sahip Bessel demeti 15° ve 20° açılarda oluşmaktadır (Şekil 4.2(c) ve (d)). Örneğin, $\theta = 20^\circ$ için Bessel demetinin ilerleme uzunluğu yaklaşık 35λ olarak ölçülmüştür. Daha büyük açılarda ($\geq 25^\circ$, Şekil 4.2(e) ve (f)) demet zayıflamakta ve uzunluğu küçülerek 10λ 'ya düşmektedir. Bu yüzden, ideal YAD Bessel demeti eldesi için en uygun aralığın $15^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$ olduğu sonucuna varılmıştır. Akustik eksen boyunca (z -ekseni, $x=0$) piezoelektrik yüzeyindeki yer değiştirmenin $|u|$ IDT'lerin çıkışından 30λ - 60λ uzaklıklarda pikler oluşturarak dalgalandığı görülmektedir (Şekil 4.3(a)-(f) (sol)). Odak noktalarında akustik eksene dik kesitlerdeki yer değiştirme miktarları (Şekil 4.3(a)-(f) (sağ)), keskin ve şiddetli YAD Bessel demetlerinin $\theta \geq 15^\circ$ için oluştuğunu göstermektedir. Şekil 4.3(c) ve (d)'deki YAD Bessel demetleri için Şekil 4.3(c)-(d)'nin sağ kısmında görülen demet genişlikleri sırasıyla 2.0λ ve 1.7λ olarak ölçülmüştür. En keskin demetler 25° ve 30° 'lerde oluşsa da (Şekil 4.3(e) ve (f) (sağ)), maksimum şiddetin düşük oluşu ve akustik eksen üzerindeki dalgalanmalar YAD Bessel demeti oluşumunun en uygun $15^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$ aralığında oluştuğu tezini güçlendirmektedir. Ayrıca, akustik eksenin $\pm 3^\circ$ komşuluğunda beliren uydu piklerin göreceli şiddet dağılımı

(Şekil 4.3(a)-(f) (sağ)), $\theta=20^\circ$ IDT yönelmesinin YAD Bessel demeti eldesi için en uygun tasarım olduğunu göstermektedir.

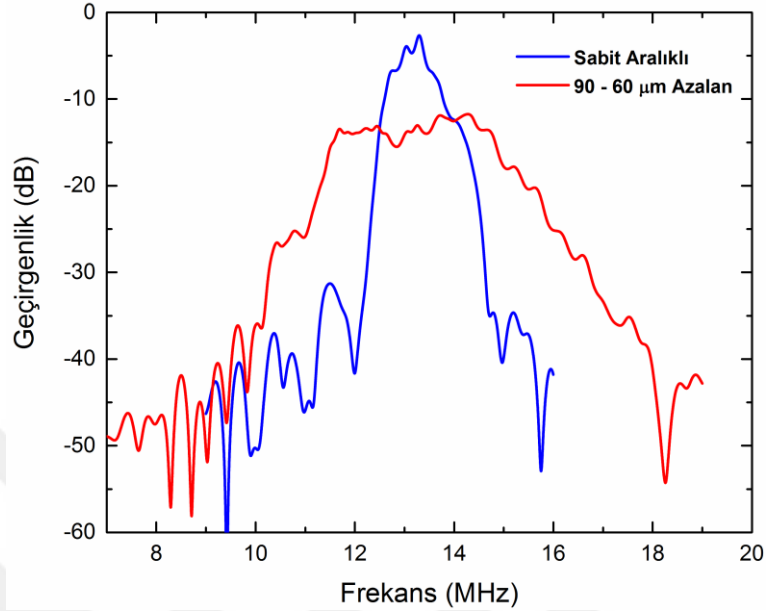


Şekil 4.3: YX-128° LiNbO₃ yüzeyinde oluşturulan YAD Bessel demeti için yüzeydeki normalize edilmiş yer değiştirme miktarının $\theta =$ a) 5°, b) 10°, c) 15°, d) 20°, e) 25° ve f) 30° açılarında akustik eksen ($x=0$) boyunca (sol) ve odak noktasındaki dik kesitte (sağ) değişimi.

4.1.3. Değişken aralıklı YAD Bessel IDT çifti örneği

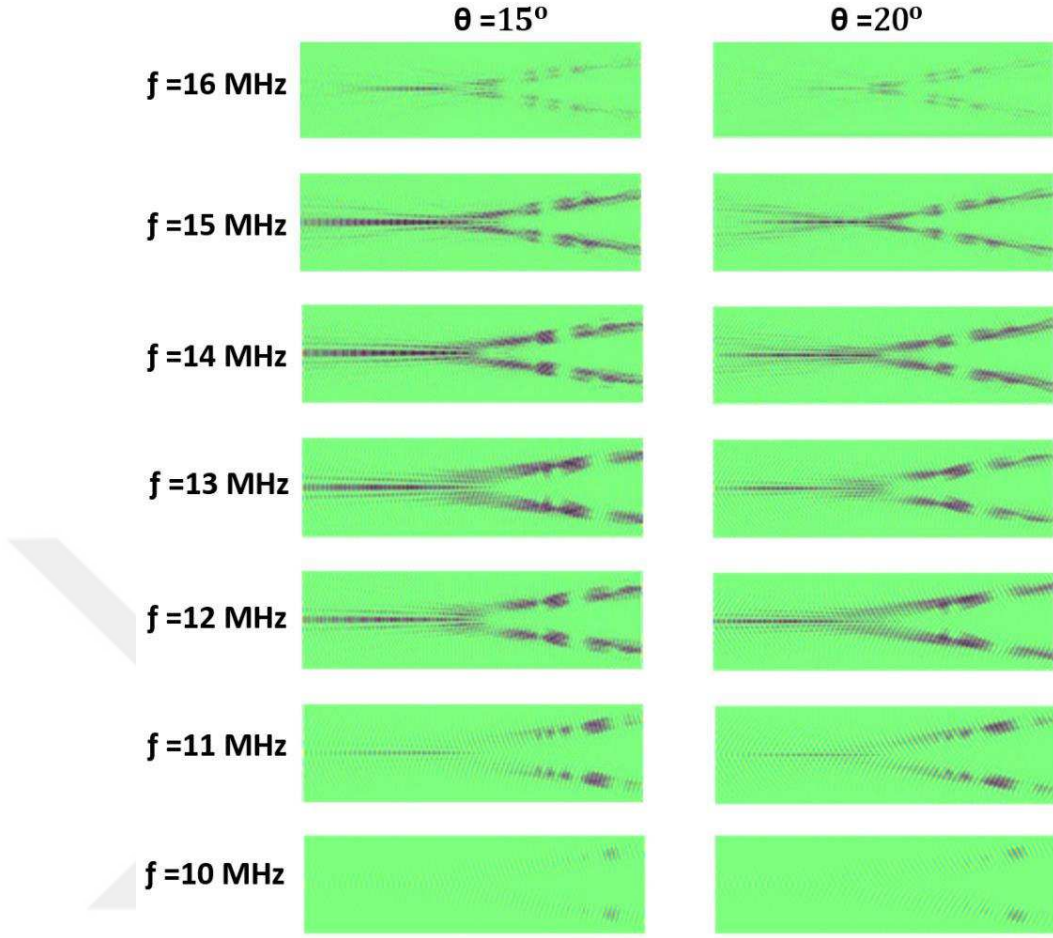
Bu çalışmada geniş bant genişliğine sahip IDT'lerin elde edilmesi için değişken parmak aralıklı IDT tasarımları üzerinde de çalışılmıştır. Bu amaçla parmak ve parmaklar arası genişliklerin etkileri incelenmiş ve en geniş bant aralığı parmaklar arası açıklığının 90 μm 'den 60 μm 'ye doğrusal azaldığı tasarımda elde edilmiştir. Değişken parmak aralıklı

IDT'nin rezonans pikinin yarı yükseklikteki maksimum genişliği 5 MHz'dir. Sonuç, sabit parmak aralıklı IDT'nin bant genişliği ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4: Sabit ve değişken parmaklı IDT'lerin FEM simülasyonları ile elde edilen 7-19 MHz arası iletim özellikleri.

Tasarlanan bu IDT'leri kullanarak oluşturulan Bessel IDT çiftlerinin FEM simülasyonları yaklaşık 4 MHz bant genişliğinde Bessel demetlerinin, IDT'lerin yatayla $\theta = 15^\circ$ ve 20° derecelerde açılı konumlandırıldığı durumlarda elde edildiğini göstermektedir (Şekil 4.5).

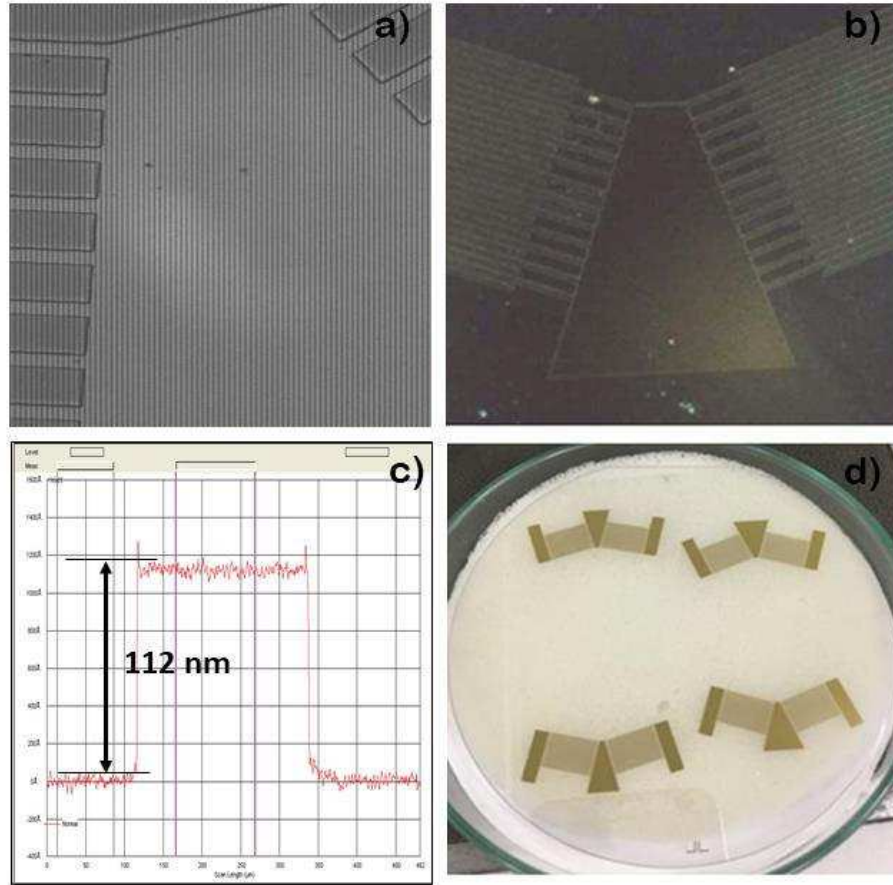


Şekil 4.5: Parmaklar arası mesafe 90-60 μm arasında düzgün değişen değişken taraklı IDT'ler ile 15° ve 20° açılarda oluşturulan Bessel çiftlerinin 10 MHz-16 MHz arasındaki FEM simülasyon sonuçları.

Bu sonuçlar ışığında durağan YAD IDT çiftleri ve yatayla 15° ve 20° derece açı yapan Bessel IDT çiftleri oluşturmak için litografi maske çizimleri Autocad ve Raith programlarında çizilmiş ve örneklerin fabrikasyonu yapılmıştır.

4.2. FABRİKASYON SONUÇLARI

Tez kapsamının ikinci aşaması olarak tasarlanan IDT'ler YX-128° LiNbO₃ üzerinde standart litografi yöntemleri ile oluşturulmuş ve termal buharlaştırma yöntemi ile 5 nm Cr ve 100 nm Au kaplanarak fabrikasyonları tamamlanmıştır (Şekil 4.6(d)).

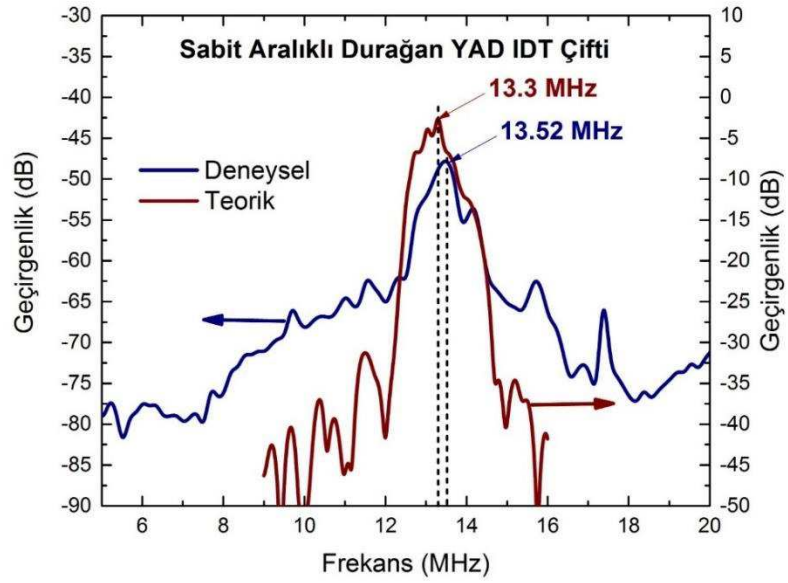


Şekil 4.6: LiNbO₃ alttaş üzerine kaplanan Cr/ Au IDT'lerin a) Parmaklarının yakın görüntüsü, b) IDT bağlantısının mikroskop görüntüsü, c) Parmakların kalınlık profili, d) Sıyırma (Lift-off) işlemi sonrası genel görünüm.

4.3. ELEKTRİKSEL ÖLÇÜM SONUÇLARI

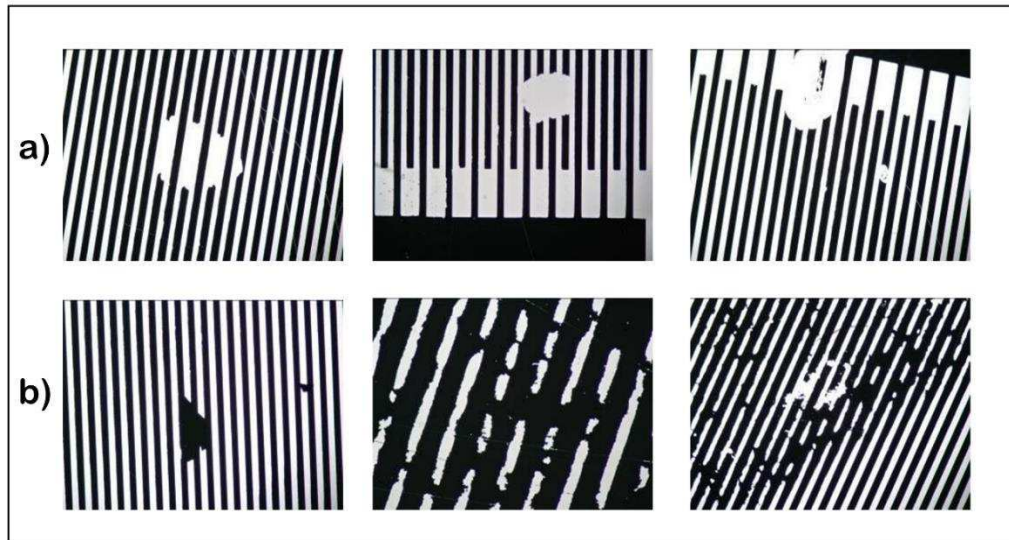
4.3.1. Sabit aralıklı durağan YAD IDT çifti örneği

Yapılan elektriksel ölçümler sonucunda sabit aralıklı durağan YAD IDT çiftinin 5-20 MHz frekans aralığındaki deneysel ve teorik frekans spektrumları karşılaştırmalı olarak Şekil 4.7' de verilmiştir.



Şekil 4.7: Sabit parmak aralıklı karşılıklı durağan YAD IDT çiftinin 5-20 MHz frekans aralığındaki teorik ve deneysel frekans spektrumu.

Şekil 4.7’de görüldüğü gibi deneysel ve teorik sonuç oldukça uyumludur. Deneysel ve teorik rezonans frekansları arasındaki 0.2 MHz’lik farkın Şekil 4.8’da verilen örnek deformasyonlarından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.8: IDT’lerde üretim ve ölçüm sırasında yaygın karşılaşılan örnek deformasyonları: a) bağlantı kopuklukları, b) kısa devreler.

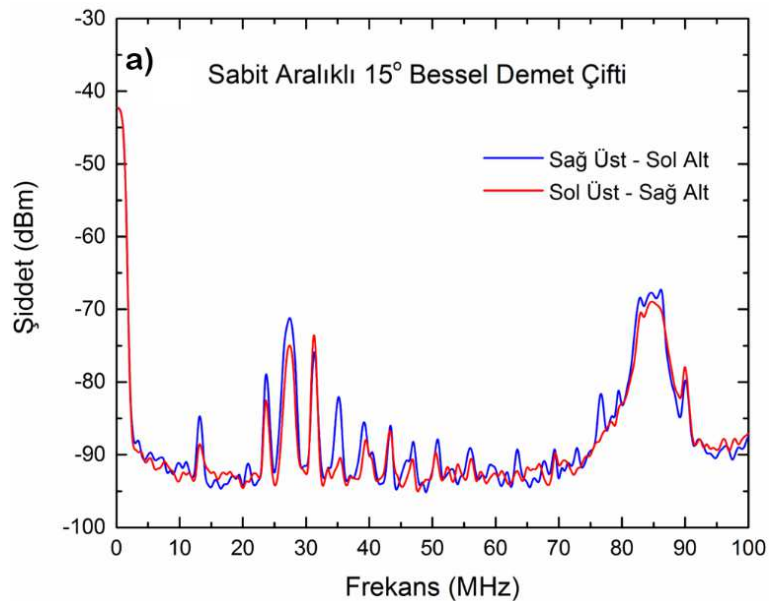
IDT’lerin mikroskop görüntüleri, fabrikasyon ve ölçüm sırasında oluşmuş olan düzensizliklerin parmaklarda kopukluklar (Şekil 4.8(a)), parmak geometrisinde düzensizlikler (Şekil 4.8(a) ve (b)) ve parmaklar arasında kısa devre oluşturacak

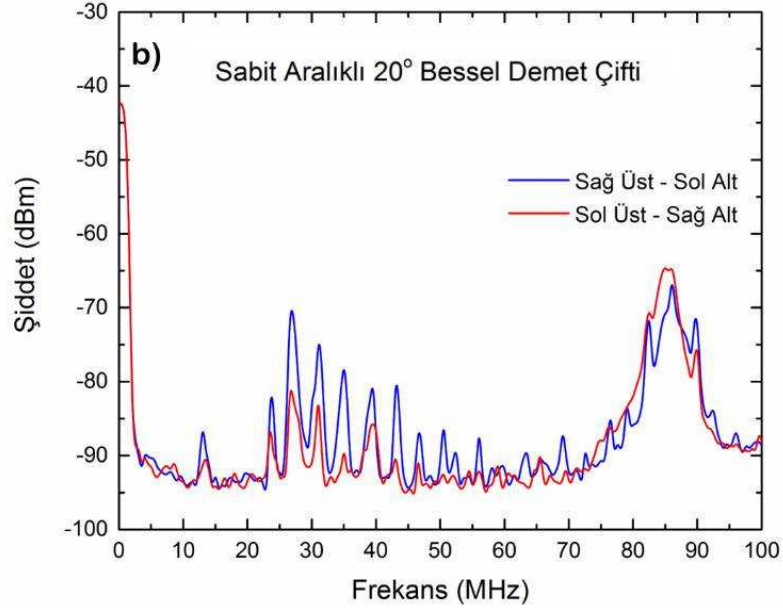
bağlantılar (Şekil 4.8(b)) olduğunu göstermektedir. Özellikle ölçüm sırasında parmaklarda oluşan kopuklukların etkin parmak sayısını ve daha da önemlisi, karşılıklı IDT'ler arasındaki simetriyi etkilediği düşünülebilir.

IDT'lerin etkin parmak sayısındaki değişim rezonans frekansını değil genlik ve pik genişliğini etkiler [92–94]. Parmakların belirli yerlerdeki geometrilerindeki değişimlerin, parmaklar arası mesafeyi etkileyerek rezonans frekansını etkilemesi, parmak-alttaş etkileşimine olumsuz yansması ve parmaklar üzerinde sıcak noktalar (hot spots) oluşturarak sistemin yük altında iken özelliklerinde değişimlere neden olması beklenebilir. Bu son etkenin, etkin parmak sayısı ve IDT simetrisini etkileyebilecek parmaklar arasındaki kısa devre oluşumlarıyla (Şekil 4.8(b)) birlikte pik genişliği, şiddeti ve değişken harmonik frekansları üzerinde etkili olabileceği düşünülmektedir.

4.3.2. Sabit aralıklı YAD Bessel IDT çifti örneği

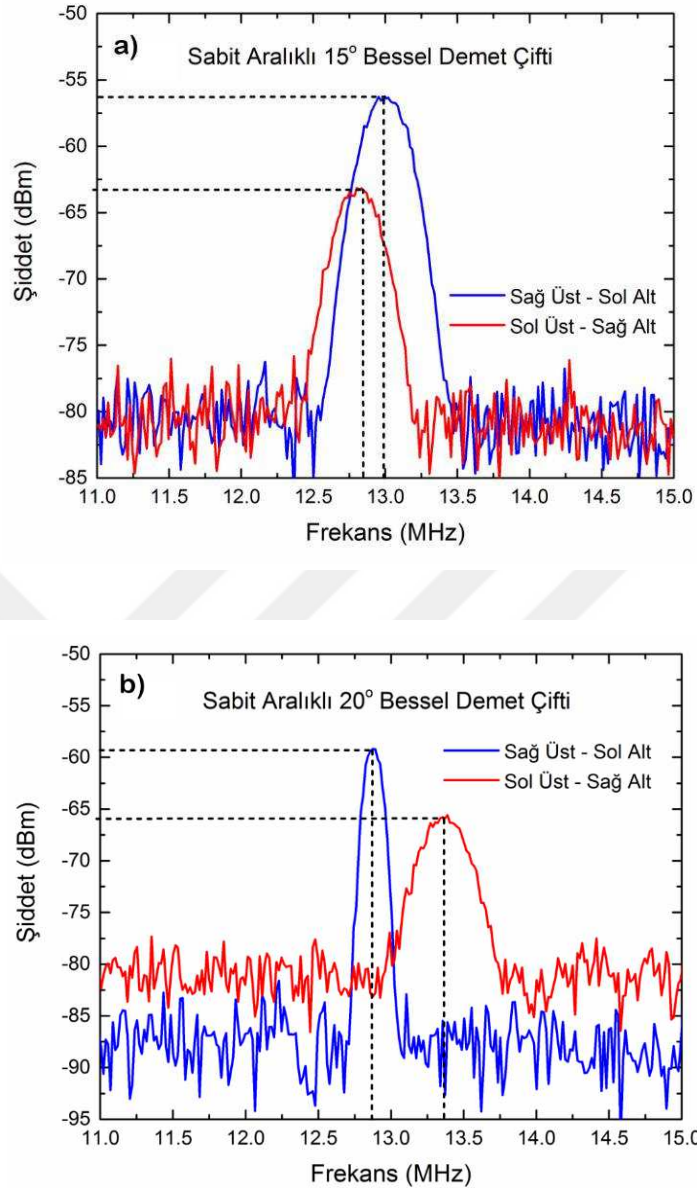
Yapılan elektriksel ölçümler sonucunda Yatayla 15° ve 20° açı yapan YAD Bessel çiftleri temel olarak Şekil 4.7'de verilen durağan YAD IDT çifti ile benzer spektral özellikler sergilemektedirler. YAD Bessel çiftlerinin 0-100 MHz frekans aralığındaki elektriksel iletim spektrumları Şekil 4.9'daki gibi yüksek frekanslarda daha büyük genlikte harmonikler gözlemlense de tasarımı olduğu gibi 13 MHz'te bir rezonans piki oluşmaktadır.





Şekil 4.9: a) $\theta=15^\circ$ ve b) $\theta=20^\circ$ için karşılıklı Bessel IDT çiftlerinin 0-100 MHz frekans aralığındaki frekans spektrumları.

YAD uyarım amaçlı kullanılacak yaklaşık 13 MHz'teki piklerin detaylı incelenmesi sonucunda Şekil 4.10'da görüldüğü gibi, Bessel çiftlerini oluşturan IDT'lerin özdeş olmadıklarını görülmektedir. IDT'lerin özdeş olmamasının nedeni olarak üretim veya elektriksel ve optik ölçüm işlemleri sırasında örneklerin hasar görmesi düşünülmektedir. 13 MHz'teki pik için IDT çiftleri arasında belirlenen sapma $\theta = 15^\circ$ olan Bessel IDT çifti için frekansta % 0.8-1.4, genlikte ise % 1.0-7.4 boyutundadır. Bu, her iki IDT'nin de aynı frekansta uyarılabileceğini ancak iki IDT tarafından oluşturulan YAD'ların farklı şiddette olacağını ifade etmektedir. $\theta = 20^\circ$ olan Bessel IDT çifti için ise bu değerler % 0.8-2.4 ve %10.0-18.4 olarak belirlenmiştir. IDT'lerin özdeş yapılamamasında Şekil 4.8'de özetlenen üretim ve ölçüm işlemleri sırasında oluşan yapısal bozuklukların sorumlu olduğu düşünülmektedir. Ancak IDT'ler arasında oluşan bu asimetri Bessel demeti çifti oluşumunu engelleyemeyecek niteliktedir.



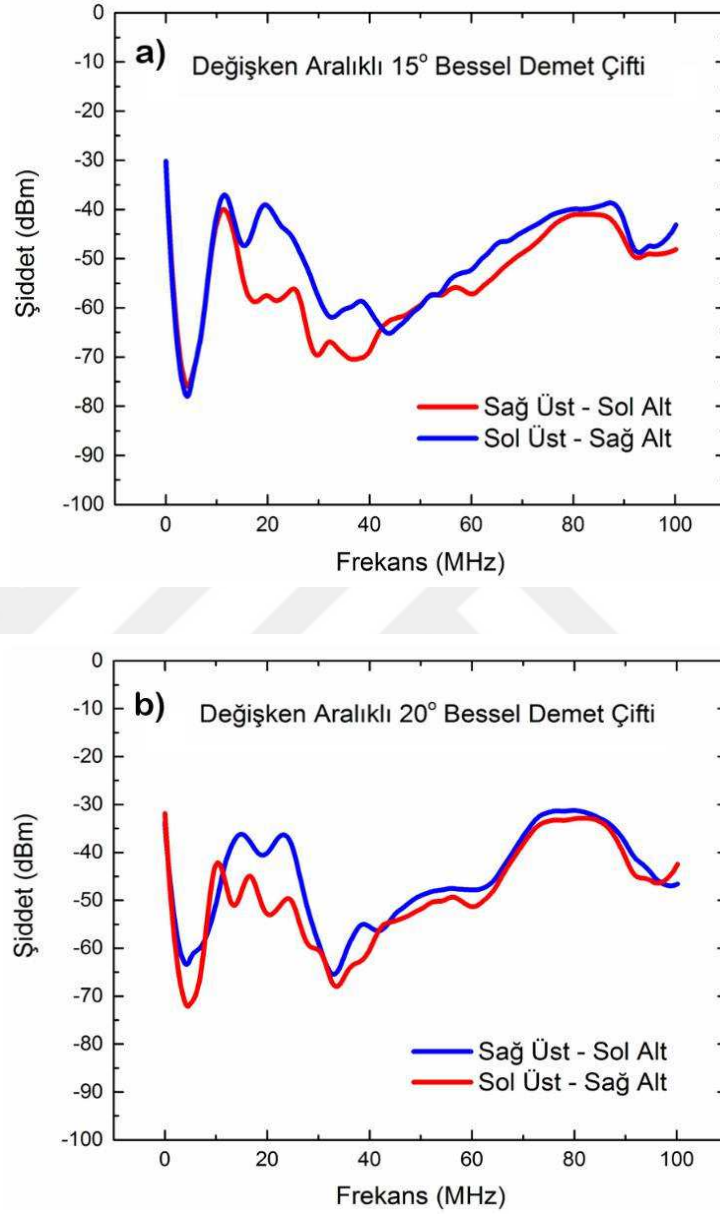
Şekil 4.10: a) $\theta = 15^\circ$ ve b) $\theta = 20^\circ$ için karşılıklı Bessel IDT çiftlerinin 13 MHz bölgesindeki spektral özellikleri.

Bu veriler ışığında Bessel çiftlerinde her iki IDT'nin de aynı frekans ve aynı uyarım genliğinde $\theta = 15^\circ$ için, 13.30 MHz, $\theta = 20^\circ$ için ise, 13.51 MHz'de çalıştırılması ile mümkün olabileceği anlaşılmaktadır

4.3.3. Değişken aralıklı YAD Bessel IDT çifti örneği

Tez kapsamında ele alınan değişken parmak aralıklı YAD Bessel IDT çifti bulunduran örnekler üzerinde yapılan elektriksel ölçümler sonucunda tasarlandığı gibi 13 MHz

frekans değeri civarında daha geniş bir rezonans frekansına sahip olduğu Şekil 4.11’ de görülmektedir.



Şekil 4.11: a) $\theta = 15^\circ$ ve b) $\theta = 20^\circ$ için karşılıklı değişken aralıklı Bessel IDT çiftlerinin 0-100 MHz frekans aralığındaki elektriksel iletim spektrumları.

Şekil 4.4’de verilen simülasyon sonuçları ile uyumlu olarak 10 MHz-20 MHz aralığındaki band genişlemesi gözlemlenmiştir. Şekil 4.9’da verilen sabit aralıklı YAD Bessel demeti frekans spektrumu ile karşılaştırıldığında özellikle 10-30 MHz aralığında keskin piklerin yerine yayvan iki pik gözlenmektedir. 30 MHz’ten büyük frekanslarda hemen hemen eşit aralıklarla dizilmiş harmonikler gözlemlense de belirgin pikler yok olmuştur.

Sabit aralıklı YAD Bessel IDT çiftlerinde olduğu gibi değişken aralıklı YAD Bessel IDT çiftleride özdeş değildir. Ancak belirli frekanslarda aynı genliklerde uyarılmaları mümkün görülmektedir. $\theta = 15^\circ$ ve b) $\theta = 20^\circ$ YAD Bessel IDT çiftlerinin Bessel demeti oluşturmak için sırasıyla eşit genlikte uyarılabileceği frekanslar 10.50 MHz ve 10.85 MHz'tir.

4.4.GÖRÜNTÜLEME SONUÇLARI

4.4.1. Duman içerisindeki nano parçacıklar yardımı ile YAD görselleştirme

Sistem değişik duman yoğunlukları elde edebilecek şekilde olup, kristalin dumanla etkileşim süresi akvaryum pompasının çalışması ile düzenlenebilmektedir. Sistem, YAD Bessel IDT çifti üzerinde, 13 MHz'te yaklaşık 100 Volt'luk sinyal uygulanarak denenmiştir. Farklı duman yoğunlukları ile örneğin 15-30 saniye teması sağlanarak yapılan deneyler sonucunda kristal üzerinde belirgin bir şekillenmenin olmadığı çok yoğun bir kaplama oluşmuştur. Sürenin kısaltılması ya da duman yoğunluklarının azaltılması ile de sorun giderilememiş ve yüzeyde bir Bessel demeti oluşumu görüntülenememiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12: Piezoelektrik kristal yüzeyindeki Bessel çiftinin $\theta = 15^\circ$ 13 MHz'te 100 V'luk sinyal altında 15-30 saniye duman kaplandıktan sonraki görünümü.

4.4.2. Schlieren optiği

LiNbO_3 kristali yüzeyindeki yüzey akustik dalgalarının maksimum ve minimumlarındaki atomik sıkışma ve gevşemelerin kırılma indisinde yerel değişimler oluşturacağı düşünüldüğünden, akustik dalgaların görüntülenmesinde yöntem kullanılmıştır. Kullanılan alevin ısı etkisi altında oluşan dumanın yüzeyde çok kalın bir tabaka

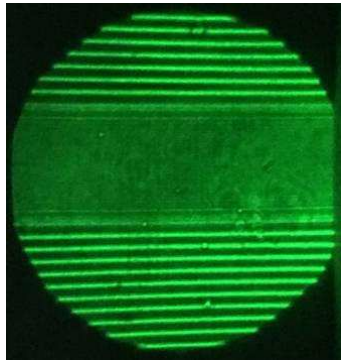
oluşturması nedeniyle yüzey akustik dalgaların görüntülenmesi başılamamıştır (Şekil 4.13).



Şekil 4.13: Schlieren optiği ile ateşin ısı etkisi altında havadaki oluşan kırılma indisi değişiminin görüntülenmesi.

4.4.3. Girişim Yöntemi

Girişim yöntemi kullanımı sırasında Bölüm 3.4.2’de anlatılan deney düzeneğinde merceğin odak noktasında kullanılan filtreye gerek olmadığı gözlenmiştir. Bu sistemle Şekil 4.14’de de görüldüğü gibi 13 MHz’te yaklaşık 100 Voltluk uyarımla elde edilen durağan YAD’ların görüntülenmesi mümkün olmamıştır. Bunda yeteri kadar hassas ayarlamaların yapılamamış olmasının etkili olduğu düşünülmektedir.



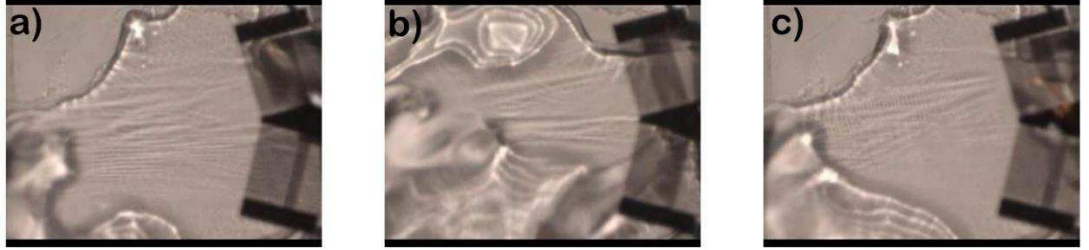
Şekil 4.14: Sabit aralıklı durağan YAD IDT’lerin Şekil 3.18’deki düzenek ile tavana yansıtılmış görüntüsü.

4.4.4. İnce Sıvı Film Uygulanması

4.4.4.1. Sabit aralıklı durağan YAD IDT çifti

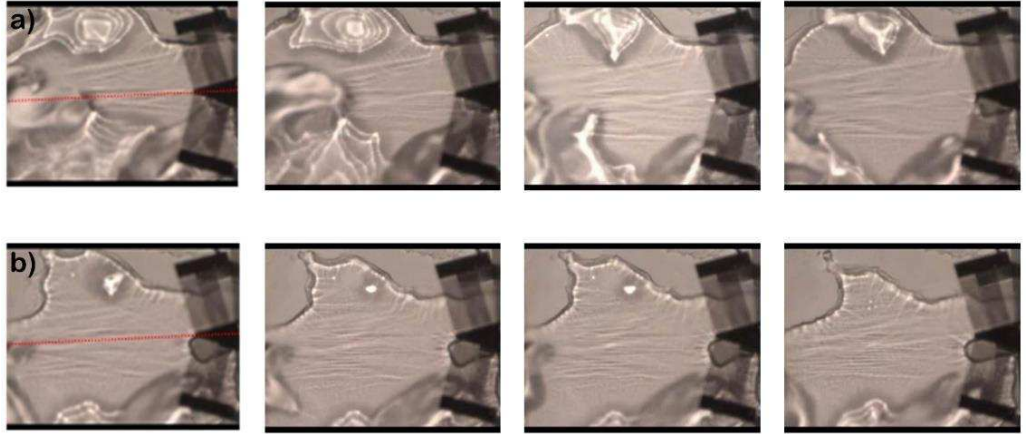
Sabit aralıklı durağan YAD IDT çifti örneklerinden etanol, metanol ve heptan kullanarak yapılan denemelerde sıvı akustik basınç altında hareket etmekte, yüzey gerilim nedeniyle de ince film yaratılamadan sıvı toparlanması oluşmaktadır. Bu nedenle karşılıklı IDT çiftleri arasındaki durağan YAD’ların görüntülenmesinde yöntem kullanılamamıştır.

Ancak yöntem, daha geniş bir yüzeyi kapsayan Bessel demetlerinin görüntülenmesinde beyaz bir üst aydınlatma (tavan floresan ışığı veya fiberli aydınlatma) uygulanarak başarı ile kullanılmıştır.



Şekil 4.15: Şekil 3.10(b)'de $\theta = 15^\circ$ spektral özelliği verilen Bessel çiftinin farklı uyarım frekanslarındaki tepkileri: Uyarım frekansları, a) 13.27 MHz b) 13.30 MHz c) 13.40 MHz.

Şekil 4.15'da görüldüğü gibi $\theta = 15^\circ$ için, Şekil 4.9 ile uyumlu biçimde, IDT'ler 13.27 MHz'de birbirine yakın, ancak şekle göre alttaki IDT biraz daha etkin uyarılmaktadır (Şekil 4.15). 13.30 MHz'de ise her iki IDT'nin de eşit uyarıldığı gözlenmektedir (Şekil 4.15(b)). Ancak frekans 13.40 MHz'e yükseldiğinde bu kez üst IDT daha etkin uyarılmaktadır (Şekil 4.15(c)).

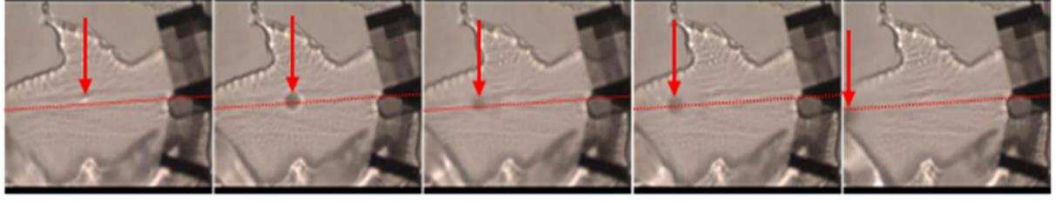


Şekil 4.16: a) $\theta = 15^\circ$ ve b) $\theta = 20^\circ$ Bessel çiftlerinin, sırası ile, 13.70 MHz ve 13.50 MHz'de uyarılmaları ile heptan ince film katmanındaki oluşumlar.

Görüntüler fiber kablo ile üstten uygun açılarda aydınlatma yapılarak elde edilmiştir. Her iki Bessel çifti için akustik eksen kesikli çizgi ile belirtilmiştir.

Şekil 4.17'de akustik eksen üzerindeki bir oluşumun ilerleyişi gösterilmektedir. Oluşum akustik eksen üzerinde kendiliğinden oluştuğundan sonra gene eksen boyunca, sapmadan

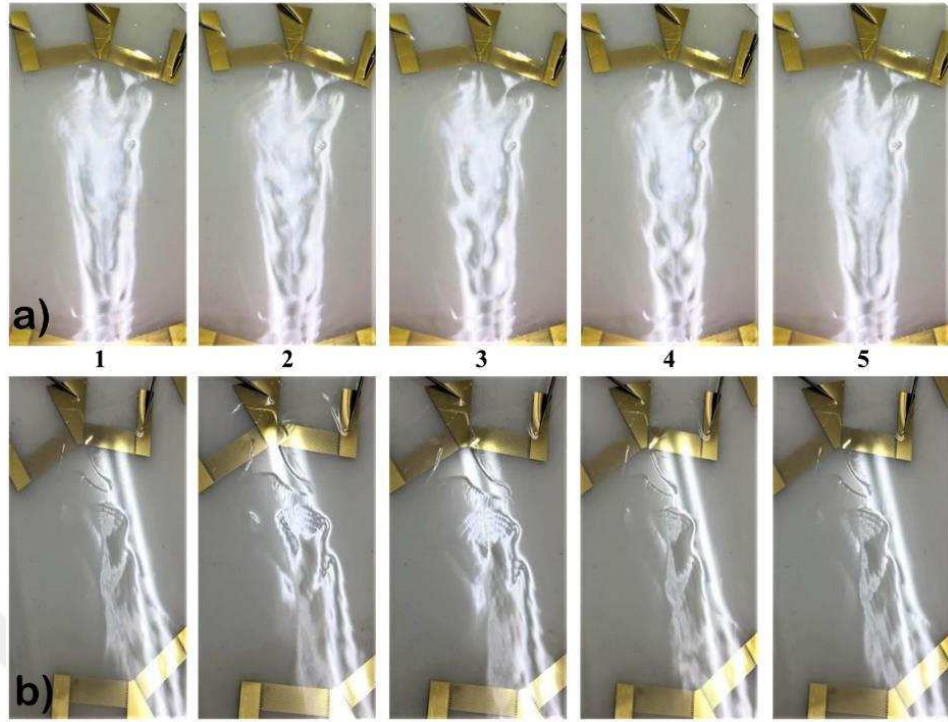
hızla hareket etmektedir. Akustik eksen üzerindeki oluşumların Bessel demetinden beklenildiği gibi öncesi ve sonrasında bozulmadığı dikkat çekmektedir.



Şekil 4.17: Bessel çiftlerinin ($\theta = 20^\circ$) heptan ortamında 13.5 MHz’de uyarılması sırasında elde edilen ardışık kareler. Ok ile işaretlenen oluşum akustik eksen (kesikli çizgi) üzerinde kendiliğinden oluşmuştur.

4.4.4.2. Değişken aralıklı YAD Bessel IDT çifti

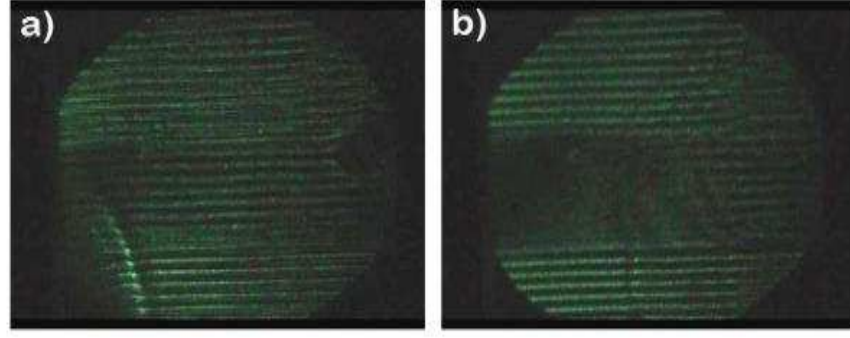
Sabit parmak aralıklı örneklerin tersine değişken parmak aralıklı örnekler tek yüzü parlatılmış YX-128° LiNbO₃ alttaş üzerinde oluşturulmak zorunda kalındığından gerek yapım aşamasında gerekse de Bessel demetinin görüntülenmesi aşamalarında alt yüzeyden ışık yansımaları nedeniyle sorunlar yaşanmıştır. Görüntülenme aşamasında bu sorunun giderilmesi için ışık kaynağı olarak fiber aydınlatmada yerine tavan floresan ışığı kullanılarak alttaş yüzeyinde YAD’ların heptan katmanında yarattığı oluşumlar görüntülenmiştir (Şekil 4.18). Şekil 4.18’deki görüntülerde Bessel demetinin akustik eksen boyunca olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 4.18’de akustik eksen boyunca heptan hareketi fark edilse de Şekil 4.18(a)’da sağ tarafta gözlenen küçük vortekslerin ve Şekil 4.18(b)’de eksen üzerinde, yaklaşık 7.5-13.5 mm arasında oluşan büyük şekillenimin konumlarının değişmediği görülmektedir.



Şekil 4.18: Parmaklar arası mesafe $90\ \mu\text{m}$ - $60\ \mu\text{m}$ arasında doğrusal değişen IDT'lerin yatayla a) 15° , b) 20° açı yapacak şekilde oluşturulan Bessel çiftlerinin uyarılması sonucunda alttaş üzerindeki heptan katmanının tavan aydınlatması altında elde edilen görüntüleri. 1-5 arası görüntüler ilgili videolarda ardışık her 3 kareden birisi alınarak elde edilmiştir.

4.4.5. İnce Sıvı Filmlerin Girişim Yönteminde Kullanılması

Girişim yöntemi ve ince sıvı film uygulamaları yönteminin birlikte kullanılması ile denemeler sırasında bulunun bu yöntem sayesinde durağan YAD IDT çiftleri arasında 13 MHz'te 60 Voltluk uyarım altında elde edilen durağan dalgaların görüntüleri Şekil 4.19'da verilmiştir. IDT'lere sinyal 180° faz farkına sahip olacak şekilde uygulanmıştır. Görüntüler durağan olmayıp, sıvı katmanının durumuna göre kısa bir süre belirginleşip kaybolmaktadır. Yine de durağan dalganın tepe ve düğüm noktaları Şekil 4.19(a)'da olduğu gibi net olarak görüntülenebilmektedir. Sıvı üzerinde yüzey gerilimden kaynaklı kalınlık farkları, toz ve kirlerden oluşan noktalar çevresindeki kırınım desenleri görüntüyü karmaşıktırabilmektedir.



Şekil 4.19: Durağan YAD IDT çiftleri üzerinde etanol katmanının Şekil 3.18'deki düzenek ile 13 MHz'te yaklaşık 60 Voltluk uyarıcı sinyal altında elde edilen tavana yansıtılmış görüntüleri. a) IDT'ler arasındaki boş alanda gözlenen çizgiler, b) Etanol filmin hareketi ile görüntünün sağ tarafında küçük bir bölgede gözlenebilmektedir.

Yöntem karşılıklı IDT'ler arasında durağan dalgaların görüntülenmesi başarıyla uygulanmış olmasına karşılık Bessel demetinin görüntülenmesinde yararlı olmamıştır. Bu, laser demetinin eldeki olanaklarla ancak 1.0-2.0 cm çapında genişletilebilmiş olmasından kaynaklanmaktadır. Bu laser genişliği karşılıklı IDT çiftleri arasındaki küçük bir açıklıkta (1.5 mm) oluşan görüntüyü tam olarak kapsamakta ise de uzun Bessel demetinin, fikir oluşturulamayacak kadar küçük bir kısmını içermektedir. Bu nedenle demetin sıvı filmde sıkıştırma ve gevşemeler nedeniyle oluşturduğu çizgiler genel resmin anlaşılmasına olanak vermemektedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Sabit ve değişken parmak aralıklı IDT'ler tasarlanarak, YX-128° yönelimli LiNbO₃ alttaş üzerinde termal buharlaştırma yöntemi ve fotolitografi yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. IDT'ler üzerinde gerçekleştirilen mikroskop incelemelerinde fabrikasyon ve ölçüm aşamalarında sistemin spektral özelliklerini etkileyebilecek bazı yapısal düzensizlikler, kopukluklar ve kısa devreler olduğu gözlenmiştir. Bu olumsuzluklar nedeniyle spektral özellikleri tam olarak özdeş iki IDT oluşturmak mümkün olamasa da IDT'lerin özdeş davrandıkları frekanslar belirlenebilmiştir.

Tüm örnekler, oluşturulan yüzey akustik dalgalarının algılanabilmesi ve sistem özdeşliğinin kontrol edilebilmesi için karşılıklı çiftler şeklinde hazırlanmıştır. Bu sayede sistemin birisi kristal yüzeyinde akustik dalgalarının oluşumunda kullanılırken diğeri bu dalgaları algılanmasında kullanılmıştır.

Aralarında 5λ mesafe bulunan IDT çifti 180° faz farkı olacak şekilde uyarılarak ara bölgede yüzey akustik dalga oluşturulmuş, bu dalgalar etanol ince film ve laser girişim yöntemi kullanılarak başarıyla görüntülenmiştir. Karşılıklı IDT çifti arasındaki durağan yüzey akustik dalganın görüntülenmesin kullanılan yöntem genişletilen laser demetinin çapı kadar küçük bir bölgenin görüntülenmesine olanak verdiği ve eldeki olanaklar laser demetinin daha genişletilmesine olanak vermediğinden yüzey akustik Bessel demetlerinin görüntülenmesi için değişik yöntemler incelenmiştir. Heptan ince film katmanında belirginleşen yüzey akustik dalgalarının üstten aydınlatmalı beyaz ışık yardımıyla görüntülenmesi mümkün olabilmıştır. Yüzey akustik durağan dalgaların ve Bessel dalgalarının görüntülenmesi, yüzeydeki ince sıvı filmde yüzey dalgalarının oluşturduğu kırılma indisi farklılıklarında ışığın farklı kırılması ile görüntülenmiştir. Heptan, iletken olmayışı, düşük uçuculuğa ve uygun viskoziteye sahip olması nedenlerinden tercih edilmiştir.

Sabit ve değişken parmak aralıklı özdeş iki IDT'nin yatayla belirli açılar yaptığı sistemlerin simülasyonları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar ışığında yatayla 15° ve 20° açılar yapan IDT çiftleri ile yüzey akustik dalgası Bessel demetlerinin elde edilebileceği sonucuna varılarak bu sistemler YX-128° yönelimli LiNbO₃ alttaş üzerinde oluşturulmuştur. Uygun uyarım frekansında simülasyon

sonuçları ile uyumlu Bessel demetlerinin elde edildiği, özellikle, iki tarafı parlatılmış şeffaf LiNbO_3 alttaş üzerinde 15° eğimli IDT'ler ile oluşturulan Bessel çiftinde net görüntüler elde edilerek gösterilmiştir.

YAD Bessel demeti ilk kez bu çalışmada üretilmiştir. Yalnızca iki IDT kullanan sade bir sistem ile elde edilen YAD Bessel demetinin karmaşık odaklama ve hizalama düzenekleri gerektirmeden tıp ve biyoteknoloji alanlarında kullanılmakta olan YAD mikroakışkan sistemlerde farklı parçacık manipülasyon yaklaşımların geliştirilmesine katkı sağlaması amaçlanmıştır. YAD Bessel demetleri algılayıcı uygulamalarında hassas, güvenilir, küçük boyutlu ve düşük maliyetli YAD sıvı ve gaz sensörleri üretimi için kullanılabilmesi öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1]. Terry, S. C., Herman, J. H., and Angell, J. B., 1979, A gas chromatographic air analyzer fabricated on a silicon wafer, *IEEE Trans. Electron Devices*. 26 (12), 1880–1886.
- [2]. Terry, S. C., 1975, A gas chromatography system fabricated on a silicon wafer using integrated circuit technology, PhD Thesis, Stanford University.
- [3]. Van Lintel, H. T. G., Van De Pol, F. C. M., and Bouwstra, S., 1988, A piezoelectric micropump based on micromachining of silicon, *Sensors and Actuators*. 15 (2), 153–167.
- [4]. Esashi, M., Shoji, S., and Nakano, A., 1989, Normally closed microvalve and micropump fabricated on a silicon wafer, *Sensors and Actuators*. IEEE. 20 (1–2), 163–169.
- [5]. Van de Pol, F. C. M., Wonnink, D. G. J., Elwenspoek, M., and Fluitman, J. H. J., 1989, A thermo-pneumatic actuation principle for a microminiature pump and other micromechanical devices, *Sensors and Actuators*. 17 (1–2), 139–143.
- [6]. Smits, J. G., 1990, Piezoelectric micropump with three valves working peristaltically, *Sensors Actuators A Phys*. Elsevier. 21 (1–3), 203–206.
- [7]. Van de Pol, F. C. M., Van Lintel, H. T. G., Elwenspoek, M., and Fluitman, J. H. J., 1990, A thermopneumatic micropump based on micro-engineering techniques, *Sensors Actuators A Phys*. Elsevier. 21 (1–3), 198–202.
- [8]. Shoji, S., Esashi, M., and Matsuo, T., 1988, Prototype miniature blood gas analyser fabricated on a silicon wafer, *Sensors and Actuators*. 14 (2), 101–107.
- [9]. Esashi, M., 1990, Integrated micro flow control systems, *Sensors Actuators A. Phys*. Elsevier. 21 (1–3), 161–167.
- [10]. Ihantola, H. K. J., and Moll, J. L., 1964, Design theory of a surface field-effect transistor, *Solid. State. Electron*. 7 (6), 423–430.
- [11]. Waggener, H. A., 1970, Electrochemically Controlled Thinning of Silicon, *Bell Syst. Tech. J*. 49 (3), 473–475.
- [12]. Petersen, K. E., 2009, Section 1: Early Papers in Micromechanics, *Micromechanics MEMS*. IEEE. 58–95.
- [13]. Rai-Choudhury, P., 1997, *Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication. Volume 1*, Spie Press, ISBN: 9781510607965.
- [14]. Manz, A., Miyahara, Y., Miura, J., Watanabe, Y., Miyagi, H., and Sato, K., 1990, Design of an open-tubular column liquid chromatograph using silicon chip

technology, *Sensors Actuators B Chem.* 1 (1–6), 249–255.

- [15]. Manz, A., Graber, N., and Widmer, H. M., 1990, Miniaturized total chemical analysis systems: A novel concept for chemical sensing, *Sensors Actuators B Chem.* 1 (1–6), 244–248.
- [16]. MacDonald, M. P., Spalding, G. C., and Dholakia, K., 2003, Microfluidic sorting in an optical lattice, *Nature.* 426 (6965), 421–424.
- [17]. Jo, M. C., and Guldiken, R., 2014, Particle manipulation by phase-shifting of surface acoustic waves, *Sensors Actuators A Phys.* Elsevier B.V. 207 , 39–42.
- [18]. Ashkin, A., Dziedzic, J. M., Bjorkholm, J. E., and Chu, S., 1986, Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles, *Opt. Lett.* 11 (5), 288.
- [19]. Dienerowitz, M., 2008, Optical manipulation of nanoparticles: A review, *J. Nanophotonics.* 2 (1), 21875.
- [20]. Yang, Z., 2014, Optical and acoustic beam shaping for imaging and manipulation, PhD Thesis, University of Dundee.
- [21]. Shi, J., Ahmed, D., Mao, X., Lin, S. C. S., Lawit, A., and Huang, T. J., 2009, Acoustic tweezers: patterning cells and microparticles using standing surface acoustic waves (SSAW), *Lab Chip.* 9 (20), 2890.
- [22]. Peterman, E. J. G., Gittes, F., and Schmidt, C. F., 2003, Laser-Induced Heating in Optical Traps, *Biophys. J.* 84 (2), 1308–1316.
- [23]. Ding, X., Li, P., Lin, S. C. S., Stratton, Z. S., Nama, N., Guo, F., Slotcavage, D., Mao, X., Shi, J., Costanzo, F., and Huang, T. J., 2013, Surface acoustic wave microfluidics, *Lab Chip.* 13 (18), 3626.
- [24]. Hsu, D. K., Margetan, F. J., and Thompson, D. O., 1989, Bessel beam ultrasonic transducer: Fabrication method and experimental results, *Appl. Phys. Lett.* 55 (20), 2066–2068.
- [25]. McGloin, D., and Dholakia, K., 2005, Bessel beams: Diffraction in a new light, *Contemp. Phys.* 46 (1), 15–28.
- [26]. Jiménez, N., Romero-García, V., Picó, R., Cebrecos, A., Sánchez-Morcillo, V. J., Garcia-Raffi, L. M., Sánchez-Pérez, J. V., and Staliunas, K., 2014, Acoustic Bessel-like beam formation by an axisymmetric grating, *Europhys. Lett.* 106 (2), 24005.
- [27]. Xu, Z., Xu, W., Qian, M., Cheng, Q., and Liu, X., 2017, A flat acoustic lens to generate a Bessel-like beam, *Ultrasonics.* Elsevier B.V. 80 , 66–71.
- [28]. Burckhardt, C. B., Hoffmann, H., and Grandchamp, P. A., 1973, Ultrasound Axicon: a device for focusing over a large depth, *J. Acoust. Soc. Am.* 54 (6), 1628–1630.

- [29]. Yamada, K., and Shimizu, H., 1982, Conical and Toroidal Piezoelectric Polymer Transducers for Long Range Focusing, *1982 Ultrason. Symp.* IEEE. 837–840.
- [30]. Patterson, M. S., and Foster, F. S., 1982, Acoustic Fields of Conical Radiators, *IEEE Trans. Sonics Ultrason.* 29 (2), 83–91.
- [31]. Lan, J., Li, Y., Xu, Y., and Liu, X., 2017, Manipulation of acoustic wavefront by gradient metasurface based on Helmholtz Resonators, *Sci. Rep.* Springer US. 7 (1), 10587.
- [32]. Collins, D. J., 2014, Manipulation in microfluidic systems using surface acoustic waves, Phd Thesis, Monash University.
- [33]. Sudarsan, A. P., and Ugaz, V. M., 2006, Multivortex micromixing, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 103 (19), 7228–7233.
- [34]. Dean, W. R., 1927, XVI. Note on the motion of fluid in a curved pipe, *London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci.* 4 (20), 208–223.
- [35]. Berger, S. A., Talbot, L., and Yao, L. S., 1983, Flow in Curved Pipes, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 15 (1), 461–512.
- [36]. Collins, D. J., Alan, T., Helmersen, K., and Neild, A., 2013, Surface acoustic waves for on-demand production of picoliter droplets and particle encapsulation, *Lab Chip.* 13 (16), 3225.
- [37]. Dittrich, P. S., and Manz, A., 2006, Lab-on-a-chip: microfluidics in drug discovery, *Nat. Rev. Drug Discov.* 5 (3), 210–218.
- [38]. Gardeniers, J. G. E., and VandenBerg, A., 2004, Lab-on-a-chip systems for biomedical and environmental monitoring, *Anal. Bioanal. Chem.* 378 (7), 1700–1703.
- [39]. Wiest, J., Stadthagen, T., Schmidhuber, M., Brischwein, M., Ressler, J., Raeder, U., Grothe, H., Melzer, A., and Wolf, B., 2006, Intelligent Mobile Lab for Metabolites in Environmental Monitoring, *Anal. Lett.* 39 (8), 1759–1771.
- [40]. Primiceri, E., Chiriaco, M. S., Rinaldi, R., and Maruccio, G., 2013, Cell chips as new tools for cell biology – results, perspectives and opportunities, *Lab Chip.* 13 (19), 3789.
- [41]. Mernier, G., Piacentini, N., Braschler, T., Demierre, N., and Renaud, P., 2010, Continuous-flow electrical lysis device with integrated control by dielectrophoretic cell sorting, *Lab Chip.* 10 (16), 2077.
- [42]. Ashkin, A., 1997, Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 94 (10), 4853–4860.
- [43]. Hultgren, A., Tanase, M., Chen, C. S., Meyer, G. J., and Reich, D. H., 2003, Cell

manipulation using magnetic nanowires, *J. Appl. Phys.* 93 (10), 7554–7556.

- [44]. Chmela, E., Tijssen, R., Blom, M. T., Gardeniers, H. J. G. E., and van den Berg, A., 2002, A Chip System for Size Separation of Macromolecules and Particles by Hydrodynamic Chromatography, *Anal. Chem.* 74 (14), 3470–3475.
- [45]. Petersson, F., Nilsson, A., Holm, C., Jönsson, H., and Laurell, T., 2005, Continuous separation of lipid particles from erythrocytes by means of laminar flow and acoustic standing wave forces, *Lab Chip.* 5 (1), 20–22.
- [46]. Laurell, T., Petersson, F., and Nilsson, A., 2007, Chip integrated strategies for acoustic separation and manipulation of cells and particles, *Chem. Soc. Rev.* 36 (3), 492–506.
- [47]. Guldiken, R., Jo, M. C., Gallant, N. D., Demirci, U., and Zhe, J., 2012, Sheathless size-based acoustic particle separation, *Sensors.* 12 (1), 905–922.
- [48]. Song, H., Tice, J. D., and Ismagilov, R. F., 2003, A Microfluidic System for Controlling Reaction Networks in Time, *Angew. Chemie Int. Ed.* 42 (7), 768–772.
- [49]. Garstecki, P., Fuerstman, M. J., Stone, H. A., and Whitesides, G. M., 2006, Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction—scaling and mechanism of break-up, *Lab Chip.* 6 (3), 437.
- [50]. Dendukuri, D., Tsoi, K., Hatton, T. A., and Doyle, P. S., 2005, Controlled Synthesis of Nonspherical Microparticles Using Microfluidics, *Langmuir.* 21 (6), 2113–2116.
- [51]. Van Dijke, K. C., Veldhuis, G., Schroën, K., and Boom, R. M., 2009, Simultaneous formation of many droplets in a single microfluidic droplet formation unit, *AIChE J.* 56 (3), 833–836.
- [52]. Zhu, P., and Wang, L., 2017, Passive and active droplet generation with microfluidics: a review, *Lab Chip.* 17 (1), 34–75.
- [53]. Hong, J., DeMello, A. J., and Jayasinghe, S. N., 2010, Bio-electrospraying and droplet-based microfluidics: control of cell numbers within living residues, *Biomed. Mater.* 5 (2), 21001.
- [54]. Garstecki, P., Gitlin, I., DiLuzio, W., Whitesides, G. M., Kumacheva, E., and Stone, H. A., 2004, Formation of monodisperse bubbles in a microfluidic flow-focusing device, *Appl. Phys. Lett.* 85 (13), 2649–2651.
- [55]. De Menech, M., Garstecki, P., Jousse, F., and Stone, H. A., 2008, Transition from squeezing to dripping in a microfluidic T-shaped junction, *J. Fluid Mech.* 595, 141–161.
- [56]. Teh, S. Y., Lin, R., Hung, L. H., and Lee, A. P., 2008, Droplet microfluidics, *Lab Chip.* 8 (2), 198.

- [57]. Hays, R. M., and Hartmann, C. S., 1976, Surface-acoustic-wave devices for communications, *Proc. IEEE*. 64 (5), 652–671.
- [58]. Shi, J., Mao, X., Ahmed, D., Colletti, A., and Huang, T. J., 2008, Focusing microparticles in a microfluidic channel with standing surface acoustic waves (SSAW), *Lab Chip*. 8 (2), 221–223.
- [59]. Friend, J., and Yeo, L. Y., 2011, Microscale acoustofluidics: Microfluidics driven via acoustics and ultrasonics, *Rev. Mod. Phys.* 83 (2), 647–704.
- [60]. Tan, M. K., Yeo, L. Y., and Friend, J. R., 2010, Unique flow transitions and particle collection switching phenomena in a microchannel induced by surface acoustic waves, *Appl. Phys. Lett.* 97 (23), 234106.
- [61]. Cecchini, M., Girardo, S., Pisignano, D., Cingolani, R., and Beltram, F., 2008, Acoustic-counterflow microfluidics by surface acoustic waves, *Appl. Phys. Lett.* 92 (10), 2006–2009.
- [62]. Wixforth, A., 2006, Acoustically Driven Programmable Microfluidics for Biological and Chemical Applications, *J. Assoc. Lab. Autom.* 11 (6), 399–405.
- [63]. Segre, G., and Silberberg, A., 1961, Radial Particle Displacements in Poiseuille Flow of Suspensions, *Nature*. 189 (4760), 209–210.
- [64]. Hur, S. C., Tse, H. T. K., and Di Carlo, D., 2010, Sheathless inertial cell ordering for extreme throughput flow cytometry, *Lab Chip*. 10 (3), 274–280.
- [65]. Yang, S. H., Lee, D. J., Youn, J. R., and Song, Y. S., 2017, Multiple-Line Particle Focusing under Viscoelastic Flow in a Microfluidic Device, *Anal. Chem.* 89 (6), 3639–3647.
- [66]. Segre, G. Silberberg, A., 1962, Behaviour of macroscopic rigid spheres in Poiseuille flow Part 1. Determination of local concentration by statistical analysis of particle passages through crossed light beams, *J. Fluid Mech.* 14 (1), 115–135.
- [67]. Bhagat, A. A. S., Kuntaegowdanahalli, S. S., and Papautsky, I., 2009, Inertial microfluidics for continuous particle filtration and extraction, *Microfluid. Nanofluidics*. 7 (2), 217–226.
- [68]. Amini, H., Lee, W., and Di Carlo, D., 2014, Inertial microfluidic physics, *Lab Chip*. 14 (15), 2739.
- [69]. Tian, F., Zhang, W., Cai, L., Li, S., Hu, G., Cong, Y., Liu, C., Li, T., and Sun, J., 2017, Microfluidic co-flow of Newtonian and viscoelastic fluids for high-resolution separation of microparticles, *Lab Chip*. 17 (18), 3078–3085.
- [70]. Mach, A. J., and Di Carlo, D., 2010, Continuous scalable blood filtration device using inertial microfluidics, *Biotechnol. Bioeng.* 107 (2), 302–311.

- [71]. Li, M., Muñoz, H. E., Goda, K., and Di Carlo, D., 2017, Shape-based separation of microalga *Euglena gracilis* using inertial microfluidics, *Sci. Rep.* 7 (1), 10802.
- [72]. Hassan, M. M., Ranzoni, A., and Cooper, M. A., 2018, A nanoparticle-based method for culture-free bacterial DNA enrichment from whole blood, *Biosens. Bioelectron.* 99 , 150–155.
- [73]. Fu, E., Liang, T., Spicar-Mihalic, P., Houghtaling, J., Ramachandran, S., and Yager, P., 2012, Two-Dimensional Paper Network Format That Enables Simple Multistep Assays for Use in Low-Resource Settings in the Context of Malaria Antigen Detection, *Anal. Chem.* 84 (10), 4574–4579.
- [74]. Yetisen, A. K., Akram, M. S., and Lowe, C. R., 2013, Paper-based microfluidic point-of-care diagnostic devices, *Lab Chip*. 13 (12), 2210.
- [75]. Jagadeesan, K. K., Kumar, S., and Sumana, G., 2012, Application of conducting paper for selective detection of troponin, *Electrochem. commun.* 20 , 71–74.
- [76]. Wang, S., Ge, L., Song, X., Yan, M., Ge, S., Yu, J., and Zeng, F., 2012, Simple and covalent fabrication of a paper device and its application in sensitive chemiluminescence immunoassay, *Analyst*. 137 (16), 3821.
- [77]. Dou, M., Sanjay, S. T., Benhabib, M., Xu, F., and Li, X., 2015, Low-cost bioanalysis on paper-based and its hybrid microfluidic platforms, *Talanta*. 145 , 43–54.
- [78]. Meredith, N. A., Quinn, C., Cate, D. M., Reilly, T. H., Volckens, J., and Henry, C. S., 2016, Paper-based analytical devices for environmental analysis, *Analyst*. 141 (6), 1874–1887.
- [79]. Busa, L., Mohammadi, S., Maeki, M., Ishida, A., Tani, H., and Tokeshi, M., 2016, Advances in Microfluidic Paper-Based Analytical Devices for Food and Water Analysis, *Micromachines*. 7 (5), 86.
- [80]. Levy, S. L., and Craighead, H. G., 2010, DNA manipulation, sorting, and mapping in nanofluidic systems, *Chem. Soc. Rev.* 39 (3), 1133.
- [81]. Shilton, R., Tan, M. K., Yeo, L. Y., and Friend, J. R., 2008, Particle concentration and mixing in microdrops driven by focused surface acoustic waves, *J. Appl. Phys.* 104 (1), 14910.
- [82]. Rodamporn, S., Harris, N. R., Beeby, S. P., Boltryk, R. J., and Sanchez-Eisner, T., 2011, HeLa Cell Transfection Using a Novel Sonoporation System, *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 58 (4), 927–934.
- [83]. Li, P., Mao, Z., Peng, Z., Zhou, L., Chen, Y., Huang, P. H., Truica, C. I., Drabick, J. J., El-Deiry, W. S., Dao, M., Suresh, S., and Huang, T. J., 2015, Acoustic separation of circulating tumor cells, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 112 (16), 4970–4975.
- [84]. Egatz-Gómez, A., Melle, S., García, A. A., Lindsay, S. A., Márquez, M.,

- Domínguez-García, P., Rubio, M. A., Picraux, S. T., Taraci, J. L., Clement, T., Yang, D., Hayes, M. A., and Gust, D., 2006, Discrete magnetic microfluidics, *Appl. Phys. Lett.* 89 (3), 34106.
- [85]. Pamme, N., and Wilhelm, C., 2006, Continuous sorting of magnetic cells via on-chip free-flow magnetophoresis, *Lab Chip*. 6 (8), 974.
- [86]. Tondra, M., Granger, M., Fuerst, R., Porter, M., Nordman, C., Taylor, J., and Akou, S., 2001, Design of integrated microfluidic device for sorting magnetic beads in biological assays, *IEEE Trans. Magn.* 37 (4), 2621–2623.
- [87]. Liu, C., Stakenborg, T., Peeters, S., and Lagae, L., 2009, Cell manipulation with magnetic particles toward microfluidic cytometry, *J. Appl. Phys.* 105 (10), 102014.
- [88]. Jiang, Z., Llandro, J., Mitrelias, T., and Bland, J. A. C., 2006, An integrated microfluidic cell for detection, manipulation, and sorting of single micron-sized magnetic beads, *J. Appl. Phys.* 99 (8), 08S105.
- [89]. Baroud, C. N., Robert de Saint Vincent, M., and Delville, J. P., 2007, An optical toolbox for total control of droplet microfluidics, *Lab Chip*. 7 (8), 1029.
- [90]. Yang, A. H. J., Moore, S. D., Schmidt, B. S., Klug, M., Lipson, M., and Erickson, D., 2009, Optical manipulation of nanoparticles and biomolecules in sub-wavelength slot waveguides, *Nature*. 457 (7225), 71–75.
- [91]. Wang, X., Chen, S., Kong, M., Wang, Z., Costa, K. D., Li, R. A., and Sun, D., 2011, Enhanced cell sorting and manipulation with combined optical tweezer and microfluidic chip technologies, *Lab Chip*. 11 (21), 3656.
- [92]. Zahn, M., Fumin Yang, Mamishev, A. V., Sundara-Rajan, K., and Yanqing Du, 2004, Interdigital sensors and transducers, *Proc. IEEE*. 92 (5), 808–845.
- [93]. Malocha, D. C., 1996, Surface Acoustic Wave Design Fundamentals, *Arch. Acoust.* 21 (4), 387–398.
- [94]. Stone, D. C., and Thompson, M., 1993, Interdigital capacitance and surface acoustic wave sensors, *Anal. Chem.* 65 (4), 352–362.
- [95]. Patel, M. V., Tovar, A. R., and Lee, A. P., 2012, Lateral cavity acoustic transducer as an on-chip cell/particle microfluidic switch, *Lab Chip*. 12 (1), 139–145.
- [96]. Franke, T., Braunmüller, S., Schmid, L., Wixforth, A., and Weitz, D. A., 2010, Surface acoustic wave actuated cell sorting (SAWACS), *Lab Chip*. 10 (6), 789.
- [97]. Shafiee, H., Caldwell, J. L., Sano, M. B., and Davalos, R. V., 2009, Contactless dielectrophoresis: a new technique for cell manipulation, *Biomed. Microdevices*. 11 (5), 997–1006.
- [98]. Ahn, K., Kerbage, C., Hunt, T. P., Westervelt, R. M., Link, D. R., and Weitz, D. A.,

- 2006, Dielectrophoretic manipulation of drops for high-speed microfluidic sorting devices, *Appl. Phys. Lett.* 88 (2), 24104.
- [99]. Çetin, B., and Li, D., 2011, Dielectrophoresis in microfluidics technology, *Electrophoresis*. 32 (18), 2410–2427.
- [100]. Gagnon, Z. R., 2011, Cellular dielectrophoresis: Applications to the characterization, manipulation, separation and patterning of cells, *Electrophoresis*. 32 (18), 2466–2487.
- [101]. Wang, Z., and Zhe, J., 2011, Recent advances in particle and droplet manipulation for lab-on-a-chip devices based on surface acoustic waves, *Lab Chip*. 11 (7), 1280.
- [102]. Durnin, J., 1987, Exact solutions for nondiffracting beams I The scalar theory, *J. Opt. Soc. Am. A*. 4 (4), 651.
- [103]. Durnin, J., Miceli, J. J., and Eberly, J. H., 1987, Diffraction-free beams, *Phys. Rev. Lett.* 58 (15), 1499–1501.
- [104]. Brzobohatý, O., Čižmár, T., and Zemánek, P., 2008, High quality quasi-Bessel beam generated by round-tip axicon, *Opt. Express*. 16 (17), 12688.
- [105]. Arlt, J., and Dholakia, K., 2000, Generation of high-order Bessel beams by use of an axicon, *Opt. Commun.* 177 (1), 297–301.
- [106]. McLeod, J. H., 1954, The Axicon: A New Type of Optical Element, *J. Opt. Soc. Am.* 44 (8), 592.
- [107]. Indebetouw, G., 1989, Nondiffracting optical fields: some remarks on their analysis and synthesis, *J. Opt. Soc. Am. A*. 6 (1), 150.
- [108]. H. Barath, 2013, INSA Young Scientist Awards, <https://indiabioscience.org/columns/indian-scenario/insa-young-scientist-award>, [Ziyaret Tarihi: 04/21/2019].
- [109]. Okamoto, K., Inouye, Y., and Kawata, S., 2001, Use of Bessel J1 laser beam to focus an atomic beam into a nano-scale dot, *Japanese J. Appl. Physics, Part 1 Regul. Pap. Short Notes Rev. Pap.* 40 (7), 4544–4548.
- [110]. Arlt, J., Dholakia, K., Soneson, J., and Wright, E. M., 2001, Optical dipole traps and atomic waveguides based on Bessel light beams, *Phys. Rev. A - At. Mol. Opt. Phys.* 63 (6), 8.
- [111]. Grillo, V., Karimi, E., Gazzadi, G. C., Frabboni, S., Dennis, M. R., and Boyd, R. W., 2014, Generation of nondiffracting electron Bessel beams, *Phys. Rev. X*. 4 (1), 1–7.
- [112]. Tatarkova, S. A., Sibbett, W., and Dholakia, K., 2003, Brownian Particle in an Optical Potential of the Washboard Type, *Phys. Rev. Lett.* 91 (3), 1–4.

- [113]. Tatarkova, S. A., Carruthers, A. E., and Dholakia, K., 2002, One-Dimensional Optically Bound Arrays of Microscopic Particles, *Phys. Rev. Lett.* 89 (28), 1–4.
- [114]. G. Milne, L. Paterson, D. McGloin, A. R. and K. D., Light induced separation and flow of microscopic and biological particles, *SPIE-The Int. Soc. Opt. Eng.* 46–53.
- [115]. Arlt, J., Garcés-Chavez, V., Sibbett, W., and Dholakia, K., 2001, Optical micromanipulation using a Bessel light beam, *Opt. Commun.* 197 (4–6), 239–245.
- [116]. Garcés-Chávez, V., Roskey, D., Summers, M. D., Melville, H., McGloin, D., Wright, E. M., and Dholakia, K., 2004, Optical levitation in a Bessel light beam, *Appl. Phys. Lett.* 85 (18), 4001–4003.
- [117]. Ding, Z., Ren, H., Zhao, Y., Nelson, J. S., and Chen, Z., 2002, High-resolution optical coherence tomography over a large depth range with an axicon lens, *Opt. Lett.* 27 (4), 243–245.
- [118]. Polesana, P., Faccio, D., Di Trapani, P., Dubietis, A., Piskarskas, A., Couairon, A., and Porras, M. A., 2005, High localization, focal depth and contrast by means of nonlinear Bessel beams, *Opt. Express.* 13 (16), 6160.
- [119]. Marcinkevicius, A., Juodkazis, S., Matsuo, S., Mizeikis, V., and Misawa, H., 2001, Application of bessel beams for microfabrication of dielectrics by femtosecond laser, *Japanese J. Appl. Physics, Part 2 Lett.* 40 (11 A), 3–6.
- [120]. Matsuoka, Y., Kizuka, Y., and Inoue, T., 2006, The characteristics of laser micro drilling using a Bessel beam, *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* 84 (4), 423–430.
- [121]. Cheong, W. C., Ahluwalia, B. P. S., Yuan, X. C., Zhang, L. S., Wang, H., Niu, H. B., and Peng, X., 2005, Fabrication of efficient microaxicon by direct electron-beam lithography for long nondiffracting distance of Bessel beams for optical manipulation, *Appl. Phys. Lett.* 87 (2), 85–88.
- [122]. Choe, Y., Kim, J. W., Shung, K. K., and Kim, E. S., 2011, Microparticle trapping in an ultrasonic Bessel beam, *Appl. Phys. Lett.* 99 (23).
- [123]. Kurt, H., and Turdnev, M., 2011, Two-dimensional quasi-bessel beam creation, *16th Int. Conf. Opt. MEMS Nanophotonics.* IEEE. 219–220.
- [124]. Vasara, A., Turunen, J., and Friberg, A. T., 1989, Realization of general nondiffracting beams with computer-generated holograms, *J. Opt. Soc. Am. A.* 6 (11), 1748.
- [125]. Davis, J. A., Carcole, E., and Cottrell, D. M., 1996, Nondiffracting interference patterns generated with programmable spatial light modulators, *Appl. Opt.* 35 (4), 599.
- [126]. Davis, J. A., Carcole, E., and Cottrell, D. M., 1996, Intensity and phase measurements of nondiffracting beams generated with a magneto-optic spatial light

modulator, *Appl. Opt.* 35 (4), 593.

- [127]. Cox, A. J., and Dibble, D. C., 1992, Nondiffracting beam from a spatially filtered Fabry–Perot resonator, *J. Opt. Soc. Am. A* 9 (2), 282.
- [128]. Han, L. X., Yao, Y. W., Zhang, X., Wu, F. G., Dong, H. F., Mu, Z. F., and Li, J. bo, 2018, Acoustic metasurface for refracted wave manipulation, *Phys. Lett. Sect. A Gen. At. Solid State Phys.* 382 (5), 357–361.
- [129]. Marston, P. L., 2006, Axial radiation force of a Bessel beam on a sphere and direction reversal of the force, *J. Acoust. Soc. Am.* 120 (6), 3518–3524.
- [130]. Zhang, L., and Marston, P. L., 2013, Optical theorem for acoustic non-diffracting beams and application to radiation force and torque, *Biomed. Opt. Express.* 4 (9), 1610.
- [131]. Rayleigh, Lord, 1885, On Waves Propagated along the Plane Surface of an Elastic Solid, *Proc. London Math. Soc.* s1-17 (1), 4–11.
- [132]. Showko, S., Yoshikazu, M. and Toshihiko, U., 1990, Study on SAW Streaming and its Application to Fluid Devices, *Jpn. J. Appl. Phys.* 29 (1), 137–139.
- [133]. Mishra, S., 2018, Which seismic wave is the most dangerous? Why?, <https://www.quora.com/Which-seismic-wave-is-the-most-dangerous-Why>, [Ziyaret Tarihi: 04/10/2019].
- [134]. Chung, G. S., and Phan, D. T., 2010, Finite Element Modeling of Surface Acoustic Waves in Piezoelectric Thin Films, *J. Korean Phys. Soc.* 57 (3), 446–450.
- [135]. Vives, A. A., 2008, *Piezoelectric Transducers and Applications*, Vives AA, editor. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, ISBN: 978-3-540-77507-2.
- [136]. Drafts, B., 2001, Acoustic Wave Technology Sensors, *Trans IEE.* 49 (4), 795–802.
- [137]. White, R. M., and Voltmer, F. W., 1965, Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves, *Appl. Phys. Lett.* 7 (12), 314–316.
- [138]. Thompson, M., and Stone, D. C., 1997, Surface-Launched Acoustic Wave Sensors: Chemical Sensing and Thin-Film Characterization. Chemical Analysis, Winefordner, J. D, editor. New York John Wiley Sons.
- [139]. Julian W. Gardner, Vijay K. Varadan, O. O. A., 2001, *Microsensors, MEMS, and Smart Devices*, Wiley J, editor. John Wiley & Sons, ISBN: 047186109X.
- [140]. Auld, B. A., 1990, *Acoustic fields and waves in solids*, Krieger R.E., editor. New York, John Wiley and Sons, ISBN: 9780471037019.
- [141]. Antonio Arnau, 2010, *Piezoelectric Transducers and Applications*, A.A.Vives., editor. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- [142]. John Vetelino and Aravind Reghu, 2011, Introduction to Sensors, U.S.A., CRC Press, ISBN: 9781439808528.
- [143]. Kannan, T., 2006, 5 Finite Element Analysis of Surface Acoustic Wave Resonators, MSc Thesis, Saskatchewan University.
- [144]. Friend, J., and Yeo, L. Y., 2011, Microscale acoustofluidics: Microfluidics driven via acoustics and ultrasonics, *Rev. Mod. Phys.* 83 (2), 647–704.
- [145]. Ballantine, S., Robert White, Jr., 1996, *Acoustic Wave Sensors 1st Edition Theory, Design and Physico-Chemical Applications*, Moises L. R. S, editor. San Diego : Academic Press, ISBN: 9780120774609.
- [146]. Danilov, A. L., Ivanov, P. G., Makarov, V. M., and Dai, J. D., Rspudt filters based on different width split fingers, *IEEE Symp. Ultrason. 2003*. IEEE. 2081–2084.
- [147]. Bathe, K. J., 2006, *Finite element procedures*. Second edition, K.J. Bathe, editor. USA, Prentice Hall, Pearson Education, ISBN: 978-0-9790049-5-7.
- [148]. Buchner, M., Ruile, W., Dietz, A. , Dill, R., 1991, FEM Analysis of the Reflection Coefficient of SAWs in an Infinite Periodic Array, *IEEE Ultrason. Symp.* 371–375.
- [149]. Yook Kong Y., 2001, Analysis of periodic structures for BAW and SAW resonators, *2001 IEEE Ultrason. Symp. Proceedings. An Int. Symp.* IEEE. 781–790.
- [150]. Plessky, V., and Koskela, J., 2000, Coupling of Modes Analysis of SAW Devices, *Int. J. High Speed Electron. Syst.* 10 (4), 867–947.
- [151]. MicroChemicals, 2009, chromium_etching, www.microchemicals.com/downloads/applications_notes.html, [Ziyaret Tarihi: 05/20/2018].
- [152]. MicroChemicals, 2009, Gold Etching, 1–2. www.microchemicals.com/downloads/application_notes.html, [Ziyaret Tarihi: 05/20/2018].
- [153]. Lin, S. C. S., Mao, X., and Huang, T. J., 2012, Surface acoustic wave (SAW) acoustophoresis: now and beyond, *Lab Chip*. 12 (16), 2766.
- [154]. Weinstein, L. M., 2010, Review and update of lens and grid schlieren and motion camera schlieren, *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 182 (1), 65–95.
- [155]. Tan, M. K., Friend, J. R., and Yeo, L. Y., 2007, Direct visualization of surface acoustic waves along substrates using smoke particles, *Appl. Phys. Lett.* 91 (22), 1–4.
- [156]. Soffer, B. H., Close, D. H., and Pedinoff, M. E., 1969, An optical imaging method for direct observation and study of acoustic surface waves, *Appl. Phys. Lett.* 15 (10),

339–342.

- [157]. Rambach, R. W., Taiber, J., Scheck, C. M. L., Meyer, C., Reboud, J., Cooper, J. M., and Franke, T., 2016, Visualization of Surface Acoustic Waves in Thin Liquid Films, *Sci. Rep.* Nature Publishing Group. 6 (1), 21980.
- [158]. Duncan, B. D., 2000, Visualization of surface acoustic waves by means of synchronous amplitude-modulated illumination, *Appl. Opt.* 39 (17), 2888.
- [159]. Polytec, 2006, Nature & Technology : Vibrations Everywhere !, <https://www.polytec.com/fileadmin/d/Vibrometrie>, [Ziyaret Tarihi: 06/12/2019].



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Yeşim YALÇIN
Doğum Yeri	Kastamonu/Tosya
Doğum Tarihi	30.10.1989
Uyruğu	☒ T.C. ☐ Diğer:
Telefon	+905316333968
E-Posta Adresi	yesimyalcinn@gmail.com
Web Adresi	http://nano-optoelectronics.org



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Fen Fakültesi
Bölümü	Fizik Bölümü
Mezuniyet Yılı	17.06.2013

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Fizik Anabilim Dalı
Programı	Katıhal Fiziği Programı
Mezuniyet Tarihi	25.06.2019

Makale ve Bildiriler	
Yalcin Y., Ulug B. , Erol A., Kaya O. A., Cicek A., “Visualization of surface acoustic waves”, Science & Research Congress 04-06 September 2018, Kıbrıs, Oral presentation.	
Muhammetgulyyev A., Kinacı B., Aho A., Yalcin Y., Cetinkaya C., Kuruoglu F., Guina M., Erol A., 2019, “ V-groove etched 1-eV-GaInNAs nipi solar cell”, A. et al. Appl. Phys. A 125:27.	