

Optik Tuzaklama Düzeneğine Hassas Konum Belirleme Ünitesi  
Entegrasyonu ve Düzenek Otomasyonu

Ahmet Danış

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Fizik Anabilim Dalı

Ocak 2013

Sensitive Position Detection Unit Integration to Optical Trapping Setup  
and Setup Automation

Ahmet Daniş

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Physics

January 2013

Optik Tuzaklama Düzenegine Hassas Konum Belirleme Ünitesi  
Entegrasyonu ve Düzenek Otomasyonu

Ahmet Danış

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Fizik Anabilim Dalı  
Atom ve Molekül Fiziği Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Sertaç Eroğlu

Ocak 2013

## ONAY

Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Ahmet Danış'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Optik Tuzaklama Düzenegine Hassas Konum Belirleme Ünitesi Entegrasyonu ve Düzenek Otomasyonu” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

**Danışman** : Yrd. Doç. Dr. Sertaç Eroğlu

**İkinci Danışman** : \_\_

### **Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:**

**Üye** : Prof. Dr. Osman PARLAKTUNA

**Üye** : Prof. Dr. Emel ALĞIN

**Üye** : Doç. Dr. Ahmet ÇABUK

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Derya PEKER

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Sertaç EROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

## ÖZET

Optik tuzaklama, 1986 yılında Arthur Ashkin ve meslektaşları tarafından; şiddet gradyentine sahip tek bir lazer ışınının yüksek nümerik açıklıklı mikroskop objektifi tarafından odaklandıktan sonra odak düzlemi civarındaki mikroskobik parçacıkları tuzaklaması sonucu keşfedildi.

Optik tuzaklama düzeneği kullanılarak, pikonewton hassasiyetinde kuvvet ve nanometre hassasiyetinde yer değiştirme ölçümleri yapmak mümkündür. Sahip olduğu kuvvet ve konum hassasiyeti sayesinde optik tuzaklama tekniği tek moleküllerin mekanik özelliklerinin araştırmaları için vazgeçilmez bir teknik haline gelmiştir. Optik tuzaklama ile moleküler manipülasyonu gerçekleştirmek üzere incelenmek istenen moleküller, özellikleri uygun şekilde seçilmiş olan ve çapları mikrometreler mertebesindeki mikroskobik boncuklara biyokimyasal yöntemlerle bağlanırlar. Mikroskobik boncuklar tuzaklanarak üzerlerine etkiyen tuzaklama kuvvetini (mekanik uyarı) bağlandıkları moleküle iletirler. Tuzaklanmış bir mikroskobik boncuk üzerine etkiyen tuzaklama kuvvetine ilaveten içinde bulunduğu sulu ortam molekülleri ile termal etkileşmesinden dolayı maruz kaldığı Brownian hareketi nedeniyle konumundaki çok küçük sapmalar, boncuktan saçılan ışının fotodedektör üzerine düşürülmesiyle ölçülebilir. Böylece elde edilen konum değişimi verisi aracılığıyla güç spektrumu elde edilerek kuvvet kalibrasyonu yapılır.

Bu tez çalışmasıyla, kurulumu gerçekleştirilmiş olan kararlı bir optik tuzaklama düzeneğine hassas konum belirleme ünitesinin entegrasyonu yapılmıştır. Tuzaklanmış parçacığın konum verisi, parçacıktan saçılan lazer ışınlarının kuadrant fotodiyot üzerine düşürülmesiyle elde edilir. LabVIEW ile yazılan bir otomasyon programı sayesinde kuadrant fotodiyot kontrolörü ile toplanan veriler eş zamanlı olarak bilgisayara aktarılarak istenen formatta depolanır. Böylece tuzaklanmış parçacığın anlık konum bilgisi elde edilirken bu bilgiden faydalanarak tuzak karakterizasyonunu yapmak da mümkündür.

Anahtar Kelimeler: Optik tuzak, kuadrant fotodiyot, hassas konum belirleme.

## SUMMARY

Optical trapping is the trapping of microscopic particles on the focal plane of a high numerical aperture objective by using a single laser beam with intensity gradient, and it was discovered by Arthur Ashkin and his colleagues in 1986.

It is possible to do force measurements in piconewton accuracy and position measurements in nanometer accuracy by using optical trapping setup. Because of the force and position resolution of the optical trapping technique, this technique has become an indispensable tool for the investigation of mechanical properties of single molecules. To conduct molecular manipulation by using optical trapping, the molecules under investigation are attached to suitably chosen microscopic beads, with diameter in micrometer dimension, using biochemical protocols. Microscopic beads are trapped and the trapping force (mechanical stimulus) acting on the beads is conveyed to the attached molecules. Small displacements of a trapped microscopic bead due to the trapping force and the Brownian motion, which is caused by thermal interaction of the bead with medium molecules, can be measured by detecting the scattered light on a photodiode. Thus, the force calibration is done using the power spectrum obtained by the acquired position data.

In this thesis study, the integration of a sensitive position detection unit in a stable optical trap setup is carried out. The position data of the trapped particle is obtained by means of the detection of the scattered light from the particle using a quadrant photodiode. An automation program written in LabVIEW is used to transfer and store data, collected by quadrant photodiode controller, in a computer. Hence the instant position data of the trapped particle is obtained, and by using this data it is possible to do the trap characterization.

Key words: Optical trapping, quadrant photodiode, sensitive position detection.

## TEŞEKKÜR

“Optik Tuzaklama Düzenegine Hassas Konum Belirleme Ünitesi Entegrasyonu ve Düzenek Otomasyonu” konulu yüksek lisans tez çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen değerli tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Sertaç EROĞLU’na saygı ve şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer hocam Doç. Dr. İdris AKYÜZ’e ve çok değerli arkadaşım doktora öğrencisi Elvan SAYIN’a teşekkür ederim.

Tez yazım süresince bana vermiş olduğu moral ve desteklerinden dolayı arkadaşım Sevinç GÜNDÜZ’e teşekkür ederim.

Çektiğim sıkıntılı zamanlarda desteklerini her zaman arkamda hissettiğim Canım Ailem’e çok teşekkür ederim.

Bu çalışma; Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu’nun 2008-19019 numara ve “*Kuvvet Spektroskopisi Yöntemiyle DNA Molekülünün Mikromekaniksel Özelliklerinin İncelenmesi*” başlıklı projesi ile desteklenmiştir.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

<b>ÖZET .....</b>	<b>v</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR .....</b>	<b>vii</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>viii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ .....</b>	<b>x</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ .....</b>	<b>xii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....</b>	<b>xiii</b>
<b>1 GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OPTİK TUZAKLAMA .....</b>	<b>3</b>
2.1 Optik Tuzaklamamın Tarihsel Gelişimi .....	3
2.2 Optik Tuzaklamamın Teorisi .....	4
2.3 Mevcut Optik Tuzaklama Düzenneği Tanıtımı .....	7
2.4 Optik Tuzaklama Düzeneklerinde Konum Belirleme Teknikleri .....	11
2.4.1 Video tabanlı konum belirleme .....	12
2.4.2 Lazer tabanlı konum belirleme .....	13
2.5 Optik Tuzak Kalibrasyonu .....	13
<b>3 YARI İLETKEN VE FOTODİYOTLAR.....</b>	<b>20</b>
3.1 Malzemelerin Elektriksel Özelliklerine Göre Gruplandırılması .....	20
3.1.1 Yarı iletkenlerde enerji seviyeleri ve bant yapıları.....	21
3.2 Katkılı Yarı İletkenler .....	22
3.3 Fotodiyotlar .....	24
<b>4 KUADRANT FOTODEDEKTÖR İLE HASSAS KONUM BELİRLEME .....</b>	<b>26</b>
4.1 Konum Belirlemenin Temelleri .....	26
4.2 Veri Toplama .....	31
4.3 Veri Toplamamın Ana Bileşenleri .....	31



**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<b><u>Sayfa</u></b>
4.3.1 Algılayıcılar .....	32
4.3.2 Sinyal koşullama .....	33
4.3.3 Analog dijital dönüştürücü donanımı .....	34
4.3.4 Veri toplama yazılımı .....	34
<b>5 KONUM BELİRLEME BİLEŞENİNİN DÜZENEĞE ENTEGRASYONU .....</b>	<b>35</b>
5.1 Konum Belirleme Optik Bileşenlerinin Düzeneğe Yerleştirilmesi ve Işın Yolu Ayarlamaları .....	35
5.2 Donanım.....	37
5.3 Yazılım.....	38
5.3.1 Konfigürasyon modülü .....	41
5.3.2 Ölçüm modülü .....	44
5.3.3 Raporlama modülü .....	47
<b>6 SONUÇ VE TARTIŞMA.....</b>	<b>51</b>
<b>7 KAYNAKLAR DİZİNİ .....</b>	<b>54</b>

**EKLER**

EK-A

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Kuyruklu yıldızların karakteristik özellikleri .....	3
2.2 Optik tuzaklamada lazer ışınının mikroskopik parçacık üzerinde meydana getirdiği kuvvetler.....	5
2.3 Basit bir OT kurulumunun şematik gösterimi .....	8
2.4 OT deney düzeneği kurulum şeması.....	9
2.5 Tuzaklama kuvvetinin Hooke yasası ile temsilinin gösterimi .....	15
3.1 Silikon ve germanyum atomlarının elektronlarının yörüngelere dağılışı .....	21
3.2 İletken, yarı iletken ve yalıtkanların enerji bant diyagramları (T=0 K).....	22
3.3 Fotodiyotun sembolü .....	24
3.4 p-n eklemesindeki enerji seviyeleri ve kıtlık bölge.....	25
4.1 QPD üzerine düşen lazer ışınının konumuna göre sinyal çıkışı .....	26
4.2 Parçacıktan saçılan lazer ışınının QPD üzerindeki konum değişiminin kesit görüntüsü .....	27
4.3 Koordinat sistemine benzetilerek QPD'nin 4 bölgeye ayrılması.....	28
4.4 QPD devresi.....	29
4.5 UDT 531 QPD kontrolör ünitesi.....	29
4.6 Veri toplama sisteminin ana bileşenleri.....	32
5.1 QPD yolunda optik eksen kontrolü.....	36
5.2 QPD tutucusuna yerleştirilen güç kontrol cihazı .....	36
5.3 Hassas konum belirlemeye olanak sağlayan bileşenlerin entegre edilmesiyle deney düzeneğinin son görüntüsü.....	37
5.4 Otomasyon programının arayüz görüntüleri.....	40
5.5 UDT531 cihazı komutlarının GPIB hazır araçlarına yazılmasıyla cihazın arka plan ışığının yanmasını sağlayan otomasyon programının bir parçasının görüntüsü .....	42
5.6 Konfigürasyon modülünün blok diyagramı görüntüsü.....	43
5.7 Ölçüm modülünün blok diyagramı görüntüsü .....	46
5.8 Yaratılan excel dosyasının görüntüsü .....	48
5.9 Raporlama modülünün blok diyagramı görüntüsü .....	50

**EKİLLER DİZİNİ (devam)**

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>6.1</b> Alınması planlanan QPD (QP50-6SD2) .....	52

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

<b><u>Çizelge</u></b>		<b><u>Sayfa</u></b>
<b>4.1</b>	UDT 531 kontrolör ünitesinin teknik özellikleri. ....	30
<b>5.1</b>	Otomasyon bilgisayarına takılan kartlar. ....	38
<b>5.2</b>	Konfigürasyon modülünde bulunan parametreler ve açıklamaları. ....	41
<b>5.3</b>	Ölçüm modülünde bulunan parametreler ve açıklamaları. ....	44
<b>5.4</b>	13. sinyalin durumunu belirten harfler. ....	45
<b>5.5</b>	Raporlama modülünde bulunan parametreler ve açıklamaları. ....	47
<b>6.1</b>	QP50-65D2'nin teknik özellikleri. ....	52

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$c$	Işık hızı
$f$	Hareketli parçacığın frekansı
$fN$	femtonewton
$f_c$	Köşe frekansı
$F_D$	Dış kuvvet
$F_G$	Geri çağırıcı kuvveti
$F_S$	Sürüklenme kuvvet
$F_T$	Termal kuvvet
$F_{tuzak}$	Tuzak kuvveti
$D$	Difüzyon sabiti
$k_B$	Boltzman sabiti
$kHz$	kilohertz
$mW$	miliwatt
$n_m$	Parçacığı çevreleyen ortamın kırma indisi
$P$	Tuzaklayıcı lazer ışınının gücü
$pN$	pikonewton
$Si$	Silikon
$Q$	Etkinlik katsayısı
$T$	Ortamın sıcaklığı
$v_c$	Parçacığın tuzaktan kaçmasına neden olan minimum akışkan hızı
$V_x$	QPD'nin x bölgesindeki voltaj
$V_y$	QPD'nin y bölgesindeki voltaj
$V_0$	Bariyer voltajı
$x$	Parçacığın lineer bölgedeki yer değiştirme mesafesi
$x_t$	Tuzağın aşamalı hareketi
$x_p$	Parçacığın yanıtı
$\langle x^2 \rangle$	Parçacığın konumun varyansı

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

### Simgeler

### Açıklama

$\kappa$	Tuzak sertliği
$\gamma$	Parçacığın sürüklenme katsayısı
$\mu\text{m}$	mikrometre
$\lambda$	Lazer ışınının dalga boyu

### Kısaltmalar

### Açıklama

<b>ADC</b>	Analog-Dijital dönüştürücüleri
<b>AOD</b>	Acousto-optic deflector
<b>CMOS</b>	Complementary Metal Oxide Semiconductor
<b>DAQ</b>	Veri toplama kartı
<b>DC</b>	Doğru akım
<b>DIC</b>	Diferansiyel girişim kontrast
<b>EOD</b>	Electro-optic deflector
<b>GPIB</b>	General Purpose Interface Bus
<b>InGaAs</b>	İndium-galyum-arsenit
<b>LabVIEW</b>	Laboratuary Virtual Instruments For Engineering Workbench
<b>NA</b>	Nümerik açıklık
<b>NI</b>	National instruments
<b>NIR</b>	Yakın infrared bölge
<b>OT</b>	Optik tuzak
<b>QPD</b>	Kuadrant fotodiyot
<b>PC</b>	Kişisel bilgisayar
<b>PCI</b>	Çevre birimleri bağlantısı
<b>PCMCIA</b>	Kişisel bilgisayar hafıza kartı uluslararası kuruluşu
<b>PXI</b>	Aletler için çevre birimleri bağlantısı uzantısı

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**

<b><u>Kısaltmalar</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
<b>TEM</b>	Enine elektromanyetik mod
<b>USB</b>	Universal Serial Bus
<b>VME</b>	Versa Module Europa

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Optik cımbızlar, ya da optik tuzaklar (OT), şiddetli bir şekilde odaklanmış ışık ışını tarafından yaratılan kuvvetlerin etkisiyle boyutları nanometreler/mikrometreler mertebelerinde değişen mikroskobik parçacıkların tuzaklanabildiği düzeneklere verilen bir isimdir. Literatüre kazandırıldığından bu yana optik cımbız düzenekleri sürekli bir gelişme göstererek günümüzde femtonewton, fN ( $1\text{fN}=10^{-15}\text{ N}$ ), kuvvet ve nanometre mertebesinde konum çözünürlüklerine ulaşmıştır. Bu atomik kuvvet hassasiyet karakteristiği 1 milisaniyelik zaman çözünürlüğü ile birleşerek, optik cımbız düzeneğini nanoteknolojik araştırmaların ulaşmış olduğu son nokta olan tek molekül manipülasyon çalışmaları için ve özellikle tek biyomoleküllerin dinamik ve mekanik özelliklerinin karakterizasyonu için vazgeçilmez bir araç haline getirmektedir.

OT deney düzeneği ile tek hücreler, hücre içi organeller ve DNA, RNA gibi tek makromoleküllerin mekanik özelliklerinin incelenmesi mümkündür. OT tekniğini keşfeden Ashkin ve meslektaşları ilk olarak bakterileri ve tütün mozaik virüsünü tuzaklamayı başardılar (Ashkin and Dziedzic, 1987). Sonrasında bu teknik tek hücreleri (Ashkin, et al., 1987) ve hücre organellerini (Ashkin and Dziedzic, 1989) manipüle etmek ve son olarak canlı hücrelerin içinde hücre organellerinin hareket dinamiklerini ölçmek için kullanıldı (Ashkin, et al., 1990).

OT, temelde ışık mikroskobisi prensibine göre çalışır. Teorik olarak ışık mikroskoplarının ayırma gücü, elektromanyetik spektrumun görünür bölgesine karşı gelen tipik dalga boyu olan  $\sim 500\text{ nm}$ 'nin yaklaşık yarısına eşit olan  $250\text{ nm}$  ile sınırlıdır. Bu yüzden molekül araştırmalarında moleküllerin bu deneysel yöntemle direkt manipülasyonu mümkün değildir. Ancak, OT ile moleküler manipülasyonu gerçekleştirmek için incelenmek istenen moleküller özellikleri uygun şekilde seçilmiş olan ve çapları mikrometreler mertebesindeki mikroskobik boncuklara biyokimyasal



yöntemlerle bağlanırlar ve böylece tuzaklanmış mikroskopik boncuklar üzerinde meydana gelen mekanik etki indirekt olarak mikroskopik boncuğa bağlanmış olan moleküle iletilir.

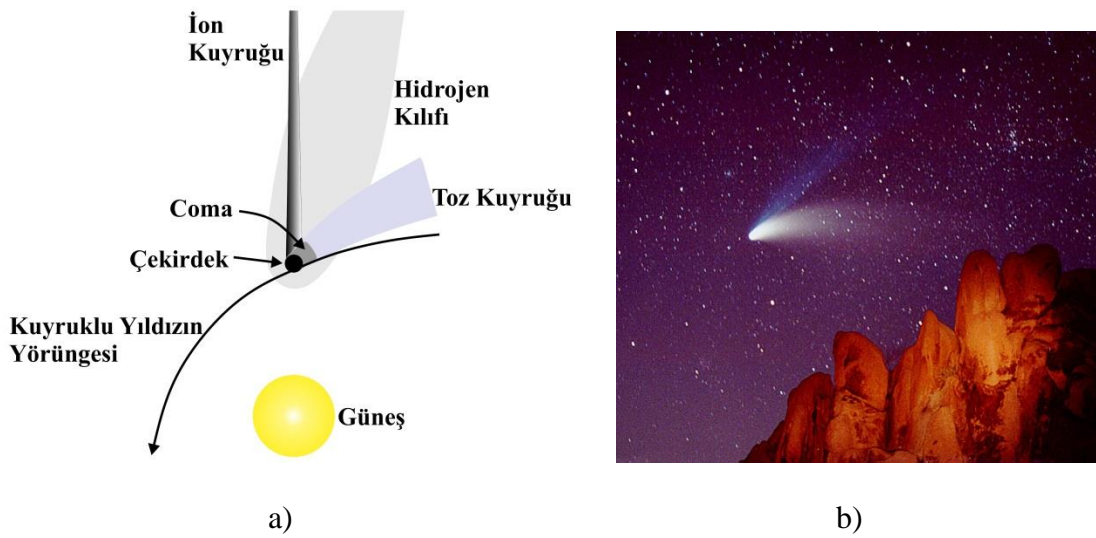
Tezin giriş bölümünü takip eden diğer bölümlerin düzenlenişi şu şekildedir: İkinci bölümde madde ve ışık etkileşmesi mekanizmasına dayanan optik tuzaklamanın tarihsel gelişimi ve mikroskopik parçacıklar üzerine düşen ışığın saçılması, soğurulması ve yayınlanması nedeniyle mikroskopik parçacıklara aktarılan momentum sonucu meydana gelen gradyent ve saçılma kuvvetleri açıklanmaktadır. Tuzaklamanın gerçekleştirileceği düzeneğin tanıtımının yapılmasını takiben, optik tuzaklama düzeneklerinde tuzaklanan parçacıkların konumlarının ve tuzak sertliğinin belirlenmesi amacıyla kullanılan teknikler incelenmektedir. Üçüncü bölümde tez çalışmasının fotodedektörleri içermesi ve fotodedektörlerin yarı iletken malzemelerden yapılması nedeniyle yarı iletkenler ile ilgili temel bilgi verilip fotodedektörlerin çalışma mekanizması açıklanmaktadır. Dördüncü bölümde parçacıktan saçılan lazer ışınının kuadrant fotodedektör (QPD) tarafından algılanması sonucu, QPD'nin fotodiyot segmentlerinde oluşan sinyal çıktısını saçıcı parçacığın konumuna bağlayan algoritma tanıtılmaktadır. Ayrıca bir veri toplama sisteminde bulunması gereken bileşenler anlatılmaktadır. Beşinci bölüm laboratuvarımızda kurulumu gerçekleştirilmiş olan optik tuzaklama düzeneğine QPD'nin yer aldığı konum belirleme bileşeninin entegrasyonu aşamalarını ve QPD'nin düzeneğe entegre edilmesinden sonra dedektör tarafından algılanan sinyalin bilgisayara aktarılması için uygun donanım altyapısının oluşturulmasını kapsamaktadır. Ayrıca veri toplama ve kontrolünde, veri analizinde, test ve ölçümde kullanılan yazılım programı olan LabVIEW ile yapılan otomasyon programı bu bölümde detaylı bir şekilde tanıtılmaktadır. Altıncı bölüm bu çalışma ile optik tuzaklama düzeneğine entegre edilen ve hassas konum belirlemeye olanak sağlayan bileşenin sistem uyumluluğu sonuçlarını ve tartışmasını içermektedir.

## BÖLÜM 2

### OPTİK TUZAKLAMA

#### 2.1 Optik Tuzaklamamanın Tarihsel Gelişimi

1619 yılında, Johannes Kepler kuyruklu yıldızların iki tane kuyruğa sahip olduğunu, bu kuyruklardan birinin güneşin olduğu yönün tersine doğru yöneldiğini ve bunun sebebinin radyasyon basıncından kaynaklandığını ileri sürdü (Kepler, 1619). Bir kuyruklu yıldızın şematik ve gerçek görüntüleri Şekil 2.1’de verilmektedir.



**Şekil 2.1** Kuyruklu yıldızların karakteristik özellikleri: a) kuyruklu yıldızlar kalıcı tanecikler ve donmuş gazların karışımından oluşan küçük, kırılğan, düzensiz biçimli kütlelerdir. Yüksek derecede eliptik yörüngeye sahiptirler. Kuyruklu yıldızın ultraviyole ışını emmesi sonucu gerçekleşen kimyasal süreç ile hidrojen atomları serbest hale geçer ve kuyruklu yıldızın yerçekiminden kaçan hidrojen bulutu bir hidrojen kılıfı oluşturur. Dünya atmosferine girdiğinde bu kılıf tarafından yayınlanan ışımaya atmosfer tarafından soğurulması nedeniyle dünyadan görülemez ancak bu ışımaya uzay araçları tarafından algılanır. Güneşin radyasyon basıncı, etkilediği maddenin kütlesine ve boyutuna göre parçacıklara ışınların ilerleme yönünde kuvvet uygular. Bu nedenle kuyruklu yıldızlar; nispeten daha küçük bir kuvvetin etkilediği ağır toz partiküllerinden oluşan ve yörüngeye teğet bir kuyruğa ilaveten, daha büyük bir kuvvet etkisi altında olan hidrojen atomu bulutundan oluşmuş ve güneş ışınlarının ilerleme yönünün tersine yönelmiş ikincil bir kuyruğa sahiptirler. b) Hale-Bopp kuyruklu yıldızının NASA tarafından çekilmiş görüntüsü (<http://stardust.jpl.nasa.gov/science/hb.html>).

1864 yılında Maxwell ışığın elektromanyetik bir dalga olduğunu ve aynı zamanda cisimler üzerinde boylamsal itme kuvvetine ve enerjisiyle doğru orantılı olarak da yayılma yönünde doğrusal bir momentuma sahip olduğunu gösterdi (Maxwell, 1871). 1901 yılında Lebedev ve ondan bağımsız olarak çalışan Nichols ve Hull, Maxwell'den farklı olarak ışığın bir cisim üzerine düşmesi sonucunda bir basınç yaratabileceğini gösterdiler (Lebedev, 1901; Nichols and Hull, 1901). Yaptıkları deneyler sonucunda bu basıncın çok zayıf olduğunu ve bu zayıf basınca çok küçük bir foton akısının sebep olduğu sonucuna vardılar. 1960'lı yıllarda lazerin icadı ve yaygınlaşmasıyla, teknik olarak büyük foton akısına sahip monokromatik foton demetinin elde edilmesi ve radyasyon basıncının deneysel olarak gözlenebilmesi kolaylaştı. 1971 yılında Ashkin ve arkadaşları 20  $\mu\text{m}$ 'lik dielektrik bir parçacığa etkiyen yerçekimini lazer tarafından oluşturulan radyasyon basıncı ile dengeleyerek parçacığı tuzaklamayı başardılar (Ashkin and Dziedzic, 1971). 1986'da yine aynı bilim adamları 1971'deki çalışmalarından farklı olarak tek bir lazer ışın demeti kullanarak su içinde sabit bir noktada askıda bulunan ve çapları 25 nm ile 10  $\mu\text{m}$  arasında değişen parçacıkları tuzaklamayı başardılar (Ashkin, et al., 1986). Bu çalışması sonrasında Ashkin'in tuzaklamada kullandığı deney düzeneği, optik cımbız ya da optik tuzak olarak anılmaya başlandı.

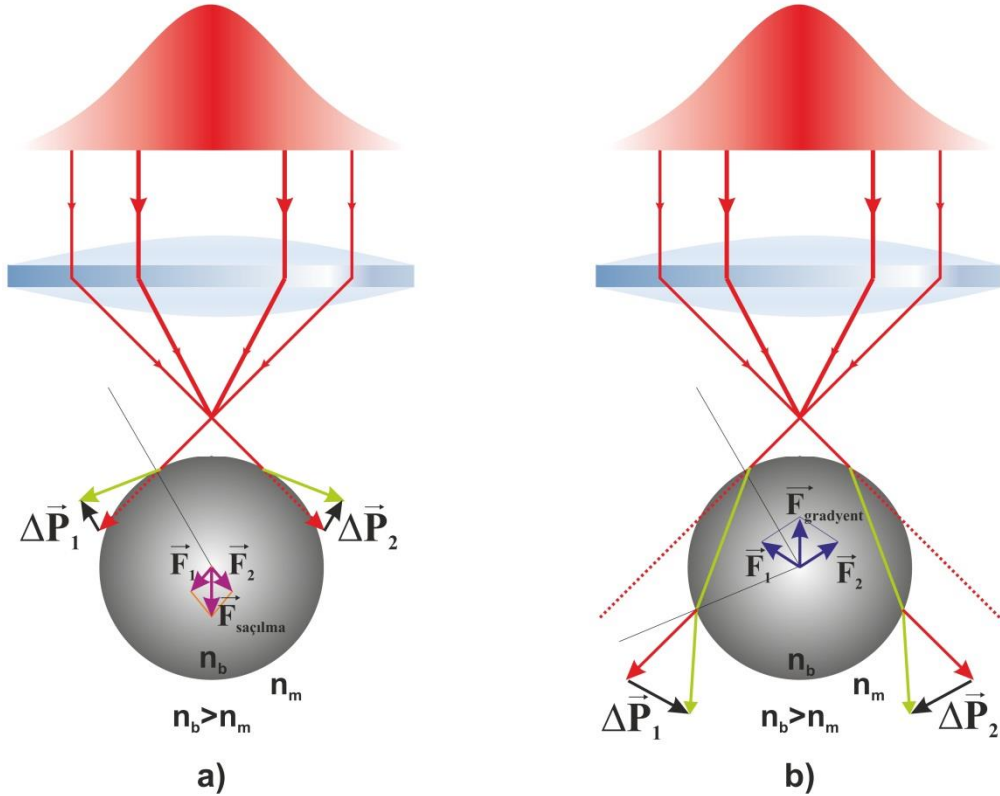
OT en çok biyolojik ve tıbbi bilimlerde tercih edilen bir çalışma yöntemi olmuştur. Bunun en önemli nedeni, diğer tek molekül manipülasyon teknikleriyle karşılaştırıldığında optik tuzaklama tekniğinin yüksek temporal çözünürlükle numune üzerinde dinamik araştırmalar yapmaya olanak sağlamasıdır. Ayrıca bu teknikte lazer gücü değiştirilerek 1 fN ve 100 pN ( $1\text{pN}=10^{-15}\text{ N}$ ) arasında değişen moleküler kuvvetlerle ilişkili geniş bir spektrumda kuvvet ölçümü yapılabildiği literatürde rapor edilmiştir (Smith, et al., 1996; Sakata-Sogawa, et al., 1998; Bennink, et al., 1999).

## 2.2 Optik Tuzaklamanın Teorisi

Optik tuzaklama; yüzeyleri üzerine düşen ışığın saçılması, soğurulması ve yayınlanması nedeniyle mikroskobik parçacıklara aktarılan momentum ve dolayısıyla

bu parçacıklara etkiyen kuvvetlerden kaynaklanır. Optik tuzaklamada parçacık üzerinde etkiyen iki önemli kuvvet vardır. Bunlar saçılma ve gradyent kuvvetleri olarak isimlendirilir.

Saçılma kuvveti, momentuma sahip ışık fotonlarının çarptığı parçacık tarafından soğurulması ve büyük bir kısmının da parçacıktan saçılmaya uğrayarak yön değiştirmesi sonucu parçacığa aktarılan net momentumdan kaynaklanır (Şekil 2.2a). Newton'un ikinci yasanınca parçacığın momentumunun zamana göre değişimi, parçacığa etkiyen kuvvete eşittir. Saçıcı cisim için (örneğin küresel bir cisim) parçacık üzerine etkiyen kuvvetler ışın ilerleme yönü haricinde tüm diğer yönlerde birbirlerini yok ederler ve saçılma kuvvetinin baskın olduğu etkin kuvvet ışın ilerleme yönünde olur.



**Şekil 2.2** Optik tuzaklamada lazer ışınının mikroskobik parçacık üzerinde meydana getirdiği kuvvetler. Kırmızı vektör gelen ışını, yeşil vektör gelen ışının parçacık ile etkileşmesinden sonraki ışını, siyah vektörler ise ışındaki momentum değişimini temsil etmektedir. a) lazer ışınının mikroskobik parçacıkta soğurulması ve yansımaları sonucu oluşan saçılma kuvveti b) şiddet gradyentine sahip lazer ışınının parçacık ile etkileşmesi sonucu ortaya çıkan gradyent kuvveti.

Gradyent kuvveti lazer ışınının şiddetinde konuma göre hızlı bir değişim olması durumunda yani ışının etkili bir şiddet gradyentine sahip olması durumunda, parçacık üzerinde meydana gelir (Ashkin, 1980; Harada and Asakura, 1996). Gradyent kuvveti, lazer ışınının saydam bir dielektrik cisimden geçerken indirgemiş olduğu elektrik dipollerin homojen olmayan elektrik alan içerisindeki titreşimi esnasında ışın şiddetinin gradyenti (odak noktası etrafında) yönünde zaman-ortalama kuvvetine maruz kalmasından kaynaklanır. Dielektrik bir küre şiddet gradyentine sahip bir ışın içerisine yerleştirildiğinde, cisim içerisinden geçerken kırılmaya uğrayan tüm ışınların etkilerinin toplamı cisme daima ışın şiddetinin en yoğun olduğu noktaya yönelmiş bir kuvvet uygulanmasına sebep olur (Şekil 2.2b).

Tuzaklanan küresel parçacığa etki eden gradyent ve saçılma kuvvetlerinin süperpozisyonunun detaylı teorik incelemeler sonucu elde edilen ifadesi şu şekildedir (Ashkin, et al., 1986):

$$F_{toplam} = \frac{Qn_m P}{c} \quad (2.1)$$

Burada  $n_m$  parçacığı çevreleyen ortamın kırma indisidir.  $P$ , tuzaklayıcı lazer ışınının gücünü ve  $c$  ışık hızını ifade eder. Boyutsuz  $Q$  niceliği etkinlik katsayısı olarak isimlendirilir ve tuzaklama kuvvetini oluşturan ışın gücünün kesrini tanımlar. Mükemmel soğurmaya sahip bir parçacık üzerine düşen düzlem dalgalar için  $Q=1$  değerine sahiptir.

Gradyent kuvveti parçacığı ışının en şiddetli olduğu noktaya çekerken saçılma kuvveti parçacığı ışının ilerleme yönünde itmektedir. Bu nedenle kararlı bir tuzak oluşturulması gradyent kuvvetinin saçılma kuvvetinden büyük olmasıyla sağlanır. Bu koşulu sağlamak üzere; TEM<sub>00</sub> modunda yani Gaussian ışın şiddeti dağılımı profiline sahip bir lazer ışını yüksek nümerik açıklığa (NA) sahip bir objektif tarafından parçacık üzerinde odaklanır.

Optik tuzaklamada tuzaklanan mikroskobik parçacıklara (~25 nm-10 µm) fN mertebesinde kontrollü kuvvet uygulanabilmesi mümkündür (Ashkin, et al., 1986). Moleküler kuvvetler mertebesindeki bu tuzaklama kuvveti oldukça küçük boyutlarından dolayı ışık mikroskopisi altında direkt gözlenemeyen biyomoleküllerin (örneğin DNA, RNA,...) tuzaklanan mikroskobik bir parçacığa biyokimyasal yöntemlerle bağlanmasını gerektirir. Biyomoleküllerin standart biyokimyasal prosedürler kullanılarak bir ucundan üzerine etkiyen tuzaklama kuvvetinin hesaplanabildiği mikroskobik boncuğa ve diğer uçtan sabitlenmiş ikinci bir mikroskobik boncuğa ya da substrata ligantlar yardımıyla tutturulmasıyla, mikroskobik boncuklara uygulanan kuvvet biyomoleküle iletilir. Böylece biyomoleküller üzerine uygulanan moleküler mertebedeki kuvvetler, biyomoleküllerin yapısal ve enerjetik incelenmesine olanak sağlar.

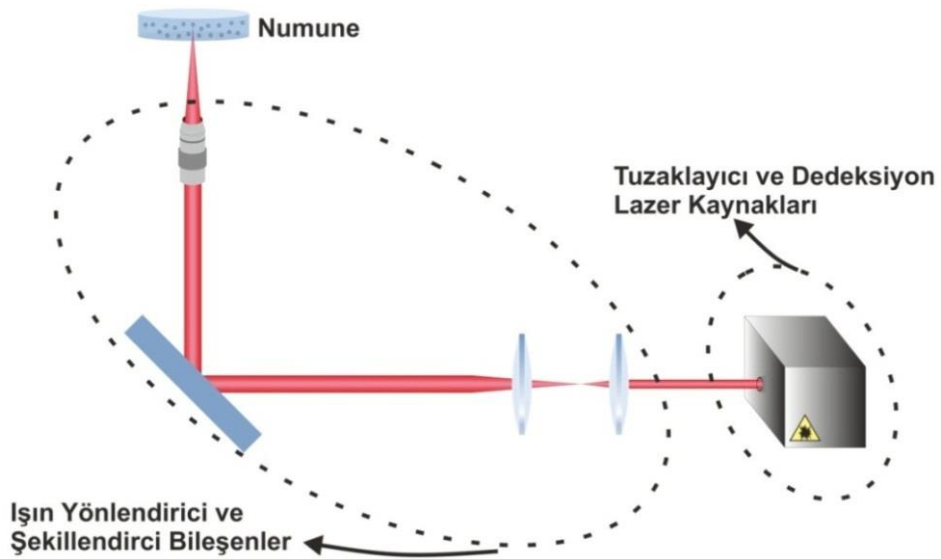
Optik tuzaklama yönteminde yüksek güçteki lazer ışınının biyolojik sistemlere zarar verebilme riski mevcuttur. Bu sebeple tuzaklama lazerinin dalga boyunun biyolojik sistemlerin nispeten geçirgen oldukları yakın kızılötesi (NIR) bölgede ve gücünün ise optimum değerde seçilmesi, aynı zamanda ışınlama süresinin minimumda tutulması yoluyla biyolojik yapıya olası hasar verme riski asgari düzeye indirilir (Neuman, et al., 1999).

### **2.3 Mevcut Optik Tuzaklama Düzeneği Tanıtımı**

En genelinde optik tuzaklamayı gerçekleştiren temel bileşenler; uygun dalga boyuna ve ışın özelliklerine sahip bir lazer kaynağı ve yüksek nümerik açıklığa sahip bir objektiftir (Şekil 2.3).

Optik tuzaklamayı oluşturabilmek için pratikte iyi bir şekilde odaklanmış güçlü bir lazer ışını, objektif ve tuzaklanacak parçacık yeterli olsa da tuzaklamının gözlemlenebilmesine, tuzaklanan parçacıktan konum, kuvvet gibi sayısal veriler elde edilmesine olanak sağlayan fonksiyonel bir düzenek aşağıda verilen yardımcı bileşenleri de içerir;

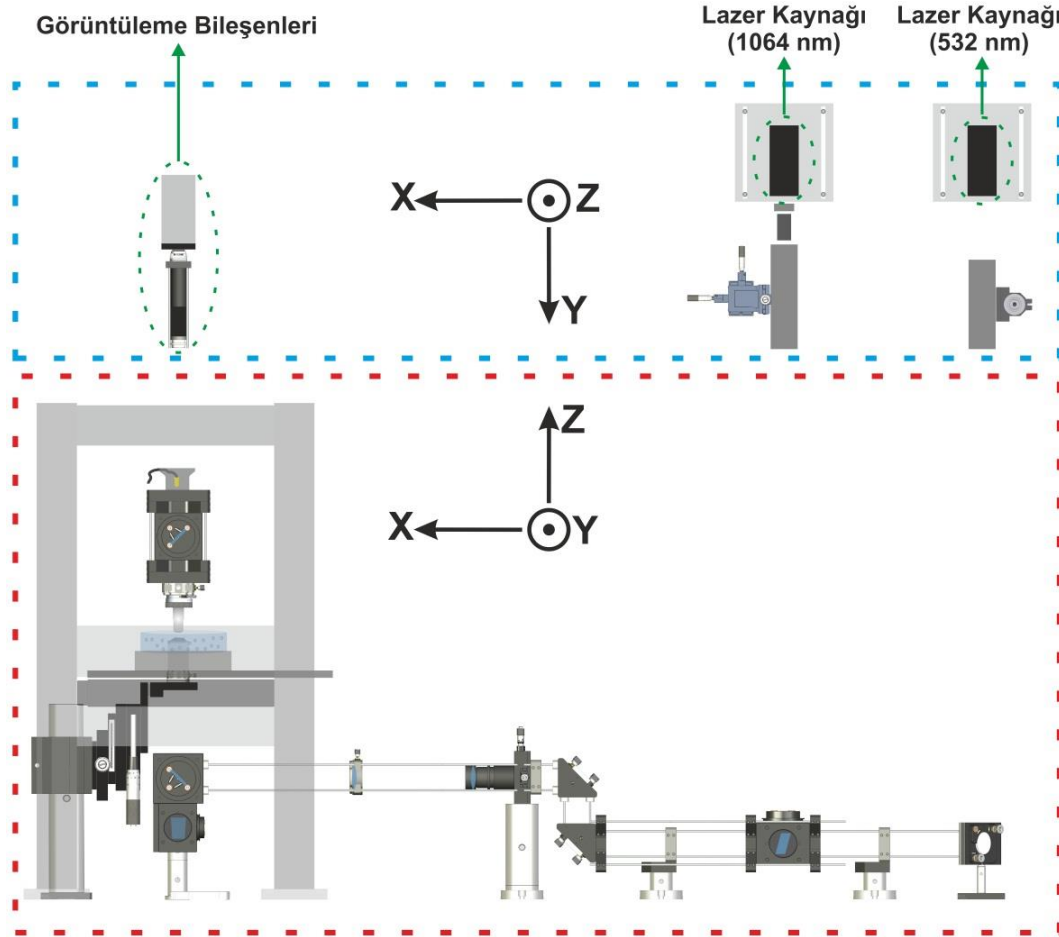
- Tuzak kalitesini arttırmak amacıyla tuzaklayıcı ışın yolu üzerine yerleştirilen optik elemanlar; ışın genişletici ve ışın yönlendiriciler.
- Tuzak konumunun dinamik ve manuel kontrolünü sağlayan bileşenler; mercekler, AOD, EOD, Gimbal aynaları,...
- Numune konumunun tuzak konumuna bağlı olarak yer değiştirmesine olanak sağlayan hassas platformlar; piezo öteleme platformu, mekanik öteleme platformu.
- Tuzaklanmış mikroskobik parçacıkların görüntülenmesini sağlayan bileşenler; kamera, filtre, görüntü yakalama kartı...
- Tuzaklama olayında sayısal veri alınmasına imkân sağlayan bileşenler; konum dedektörleri, veri toplama kartı, bilgisayarlar, yazılımlar...



Şekil 2.3 Basit bir OT kurulumunun şematik gösterimi.

Optik tuzaklama düzeneğini oluşturan tüm bileşenler bir titreşim yalıtım platformu üzerine yerleştirilerek istenmeyen ultrasonik ve mekanik titreşimlerden mümkün mertebe yalıtılmış olmaları sağlanır ve böylece hassas ölçümlerin dış etkenlerden etkilenmesi minimize edilir.

Bu tez çalışmasının konusunu oluşturan hassas konum belirleme bileşeninin entegre edildiği optik tuzaklama düzeneği biyomoleküllerin mekanik davranışlarının incelenmesine olanak sağlayacak şekilde tasarlanmış ve kurulumu gerçekleştirilerek kararlı bir optik tuzaklama elde edilmiştir (Gündüz, 2013). Aynı zamanda düzenek, zamanla yapılacak bazı donanımsal eklentilerle gelecekte organeller ve tek hücrelerin incelenmesine de imkân verecek potansiyele sahip olup, geniş bir yelpaze içerisindeki araştırma konularının pek çoğunun çalışılabilmesini mümkün kılacaktır. Optik tuzaklama düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 2.4’de verilmiştir.



**Şekil 2.4** OT deney düzeneği kurulum şeması. Kırmızı kesikli çizgi ile belirtilen kısım OT deney düzeneğinin önden görünümünü göstermektedir. Bu düzenekte bulunan görüntüleme bileşenleri ve lazer kaynakları önden olan görüntünün arkasında kalması nedeniyle gösterilemediğinden bu bileşenlerin üstten görünümünün çizimleri mavi kesikli çizgi ile belirtilen kısımda gösterilmiştir. Düzeneğin işleyişi metinde yer almaktadır.



Düzenegin işleyiş prensibi şu şekilde özetlenebilir: 5 mW'lık güce sahip 532 nm dalga boylu lazer elektromanyetik spektrumun görünebilir aralığında yer aldığı ve düşük şiddete sahip olduğu için sağlık riski taşımadan ışın yolu ayarlamasında kolaylık sağlaması sebebiyle kurulum aşamasında sadece ışın yolunu belirlemek için kullanıldı. 1.5 W'lık güce sahip 1064 nm dalga boylu tuzaklayıcı lazer kaynağından çıkan ışın demeti ilk önce yarım dalga tutucusuna ulaşır ve daha sonra Glan-Thomson polarizörünü geçer. Dalga plakası ve polarizör kombinasyonunun kullanılmasındaki amaç tuzaklayıcı lazer ışınının kontrollü olarak şiddetinin ayarlanabilmesine olanak sağlamasıdır. Sonrasında ışın demeti 7X büyütme oranına sahip basit bir Galilean teleskopu olan ışın genişleticiden geçer. Işın demetinin genişliği ışın genişleticiyi geçtikten sonra lazer kaynağı penceresinden çıkış boyutuna göre 7 kat daha büyüktür ve bu haliyle objektifin arka açıklığını dolduracak genişliğe sahiptir. Işın demeti bu ana kadar +Y yönünde hareket etmekteyken, ışını tuzaklamanın gerçekleşeceği ve numunenin yerleştirilmiş olduğu platforma yönlendirmek amacıyla +X yönü boyunca döndürmek için uygun bir konuma yerleştirilen dikroik ayna kullanılır. Bu dikroik ayna 532 nm dalga boyuna sahip lazer ışını için geçirgenken 1064 nm dalga boyuna sahip lazer ışını için yansıtıcı özelliğe sahiptir. Bu aşamadan sonra ışın demeti +Z yönündeki yüksekliğini 75 mm'den 150 mm'ye çıkartacak olan periskop sistemine ulaşır. Başlangıçta optik elemanların mekanik titreşimlerden minimum düzeyde etkilenmesi amacıyla optik masa yüzeyine yakın konumda ilerlemekte olan ışının yüksekliğinin artırılmasının sebebi; düzeneğe ileriki aşamalarda entegre edilecek olan terslenmiş mikroskop giriş portu ile ışın yüksekliğinin uyumlu hale getirilmesidir. Işın demeti düşey doğrultuya yönlendirilmeden hemen önce manuel tuzak konumlandırılması yapmak üzere uygun pozisyonlarda kinematik tutuculara yerleştirilmiş olan iki konveks mercek düzeneğinden geçirilir. Manuel tuzak konumlandırma bileşenini geçen ışın demeti bir dikroik ayna yardımıyla +Z boyunca yönlendirilir. Işın numune kabına ulaşmadan önce 100X büyütme gücüne, 1.30 nümerik açıklık (NA) ve 0.20 mm çalışma aralığına sahip olan bir objektif ile güçlü bir şekilde odaklanır. Işın ayarlamaları yeterince hassas yapılmış ise ışın numune kabındaki parçacıkları tuzaklama kabiliyetine sahiptir. Numune kabı olarak adlandırılan odacık, 0,01  $\mu\text{m}$  hassasiyetine sahip XY mekanik öteleme platformu ve 0.3 nm hassasiyete sahip XY piezo öteleme

platformundan oluşan öteleme platformlarının üzerinde yer almaktadır. Tuzaklamayı gerçekleştirerek tuzaklanan parçacıktan saçılmaya uğrayan ışın demeti, 40X büyütme gücü ve 0.65 NA'ya sahip kondenserden geçerek bu tez çalışmasının konusu olan hassas konum belirleme bileşenlerinin yer aldığı -X yönüne yönlendirecek dikroik aynaya ulaşır. Dikroik ayna eksen Z eksen boyunca ilerleyen aydınlatma ışını için geçirgen özelliğe sahiptir. Bu sebeple düşey doğrultuda yerleştirilen aydınlatma ışığı kaynağından çıkan ışınlar kondenserden geçtikten sonra numune üzerinde homojen bir aydınlatma sağlar.

Optik tuzaklamada, görüntünün kamerada net ve kaliteli bir şekilde oluşması numune kabının homojen aydınlatılması ile sağlanır. Bu düzenekte aydınlatma işlemini gerçekleştirmek için bir led lamba kullanılmıştır. Dikroik aynanın yerleştirildiği kafes küpünün üst portunda yer alan aydınlatma ışığı bir kondenser tarafından numune kabına düşürülerek numune bölgesinin aydınlatılması sağlanır. Numuneden geçen ışınlar yine yansıtıcı aynaların ve toplayıcı merceklerin kullanıldığı uygun bir düzenekle kameraya kadar ilerler ve numune bölgesinin kamera tarafından görüntülenmesi sağlanır.

## 2.4 Optik Tuzaklama Düzeneklerinde Konum Belirleme Teknikleri

Optik tuzaklama düzeneklerinde sayısal veriler alınmasına olanak sağlayan en önemli bileşen, hassas konum belirleme bileşenidir. Özellikle kuvvet ve yer değiştirmenin hassas ölçümleri iyi bir şekilde kalibre edilmiş bir hassas konum belirleme bileşenini gerektirir. Literatürdeki mevcut uygulamalarda düzensiz şekilli nesnelerin sadece konum takibi yapılırken küresel şekilli nesnelerin hem kesin konum kalibrasyonu hem de kuvvet kalibrasyonu yapılabilmektedir. Bu nedenden dolayı optik tuzak deneylerinde küresel simetriye sahip olan mikroskobik boncuklar kullanılır. Konum belirleme video tabanlı ve lazer tabanlı olmak üzere iki farklı şekilde yapılabilir.

### 2.4.1 Video tabanlı konum belirleme

Tuzaklanmış bir parçacığın basit bir şekilde gözlenmesi için genellikle bir video kamera yeterli olmaktadır. Kameranın çözünürlüğünü temsil eden piksel boyutunun bilinerek kameradan alınan bir kalibrasyon cetveli (retikül mikrometresi) görüntüsü ile piksel boyutunun kalibre edilmesi ve basit bir merkez bulma algoritması yardımıyla piksel altı doğruluklarla (tipik olarak ~5nm ya da daha iyi) tuzaklanan nesnenin konumu belirlenebilir (Cheezum, et al., 2001; Thompson, et al., 2002; Crocker and Grier, 1996). Böylece tuzaklanan nesnenin gerçek zamanlı olarak takibini yapmak mümkündür (Gosse and Croquette, 2002; Keller, et al., 2001). Ancak bu yöntem videonun görüntü yakalama ve görüntüyü işleyen bilgisayarın işlem yapma hızlarıyla sınırlıdır. Genelde görüntü yakalama hızı standart kameralarda ~25 Hz-120 Hz civarındadır ve video zamanlamasındaki sapmalar ya da aydınlatma değişimi bu verilerde değişikliklere sebep olabilir. Temelde, zamansal çözünürlük daha yüksek hızlı gelişmiş video kameralar kullanılarak geliştirilebilir. 40 kHz'i aşan çerçeve (frame) hızları metal oksit yarı iletken kameralar (CMOS) gibi bazı destekleyici ekipmanlar kullanılarak sağlanabilir. Bununla birlikte bir görüntüleme sisteminde yüksek hızlı kameralar kullanılsa bile görüntü yakalama hızı bilgisayarın görüntü işleme hızı ve hafıza kapasitesiyle sınırlıdır. Ancak günümüzde işlemci hızlarının oldukça artmış olmasından dolayı görüntünün işleme hızından kaynaklanabilecek problemler görüntü yakalama hızı ile karşılaştırıldığında daha az öneme sahiptir. Buna karşın pratikte yüksek çözünürlüklü çerçeveler depolama sınırlamaları nedeniyle kısa süreli parçacık takibine uygundur. Bu teknolojik engellerin üstesinden gelinse bile yüksek hızlı video takibi temelde kaydedilen foton sayısı ile sınırlı olacaktır. Dolayısıyla konumsal çözünürlük, çerçeve hızının artmasıyla beraber bir azalma gösterecektir. Genel olarak sinyal/gürültü oranı çerçeve hızının karekökü ile ters orantılıdır. Düşük video bant aralığı (~100 Hz) ile karşılaştırıldığında çok daha yüksek olan tuzaklanmış parçacığın hareketinin öz frekansının bant aralığı arasındaki uyumsuzluk frekans katlanması gibi bazı bozucu etkilere neden olur. Ayrıca video tabanlı metotlar bir nesnenin tuzak merkezine göre bağıl konumunun belirlenmesinde uygun değildir ve bu durumda kuvvet belirlenmesi

daha karmaşık hale gelmektedir. Bu nedenlerden dolayı video tabanlı konum belirleme yöntemi sıklıkla tercih edilen bir yöntem değildir.

#### **2.4.2 Lazer tabanlı konum belirleme**

Tuzaklanan nesnelerin konumlarının daha hassas bir şekilde belirlenmesi amacıyla video tabanlı olmayan birkaç alternatif metot bulunmaktadır. Bu metotlardan en basiti, tuzaklanan nesnenin görüntüsünün direkt olarak üzerine düşürüldüğü QPD'lerin kullanıldığı lazer tabanlı konum belirleme metodudur. Lazer ışını tuzaklanan parçacığı geçtikten sonra QPD üzerine düşer. Işının saçılma miktarı ve doğrultusu parçacığın konumu ile değişim göstermektedir. Oldukça hassas konum ölçümünün mümkün olduğu bu metot aslında atomik kuvvet mikroskoplarında da kullanılan konum belirleme tekniği ile büyük benzerlik gösterir. Bu tekniğin konum belirleme hassasiyeti bant genişliği ve gürültü performansı seviyesi ile sınırlıdır.

#### **2.5 Optik Tuzak Kalibrasyonu**

QPD'nin tuzaklanan parçacıkların hareketi üzerine olan tepkisinin kalibrasyon işlemi genelde mikroskopik boncuklar kullanılarak yapılır. Bu boncukların kullanılmasındaki amaç küresel simetriye sahip olmalarından dolayı teorik incelemelerinin kolaylıkla yapılabilmesidir. Kalibrasyon işlemi incelenecek numuneye benzer özelliklere sahip bir boncuk yardımıyla yapılabileceği gibi bazen de boncuğu direkt olarak biyolojik numuneye bağlayarak da yapılabilir. Optik tuzak kalibrasyonu temelde konum ve kuvvet kalibrasyonu olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Konum kalibrasyonu hakkında kısa bir bilgi verildikten sonra kuvvet kalibrasyon uygulamalarına geçilecektir.

Konum kalibrasyonu substrata sabitlenen bir boncuğun piezo öteleyici yardımıyla X ve Y doğrultularında yer değiştirmesi sonucunda QPD'den alınan  $V_x$  ve

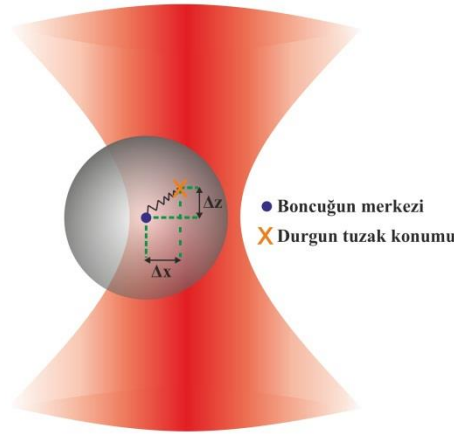
$V_y$  voltaj sinyallerinin parçacık konumuna göre kalibre edilmesini içerir. QPD den elde edilen sinyallerin ayrıntılı incelemesi kesim 4.1’de yapılmıştır. Parçacık konumunun QPD sinyali ile lineer değiştiği aralık tuzak bölgesi içerisindeki çok kısa bir mesafedir (~100-200 nm). Duyarlılık olarak da adlandırılan konum kalibrasyonu elde edilen işlenmemiş  $V_x$  ve  $V_y$  sinyal değerlerini mesafe bilgisine dönüştürmeye yarar. Duyarlılık  $\rho$ , genelde  $V/\mu\text{m}$  birimiyle verilir. Parçacıktan saçılarak QPD üzerine düşen ışının konumu parçacığın konumuyla değişiklik gösterir ve böylece QPD üzerindeki ışın konumu değişimi QPD sinyalinde değişime neden olur. Konum kalibrasyonu tamamlandıktan sonra ikinci aşama olarak kuvvet kalibrasyonu yapılmalıdır.

Optik tuzaklardaki kuvvetler genelde direkt olarak ölçülemezler. Bundan dolayı optik tuzaklamada kuvvetin parçacığın konuma göre lineer olarak uygulandığı mesafelerde, optik tuzaklama olayı bir yay sistemine benzetilebilir (Şekil 2.5). Bu lineer bölge içerisinde parçacığa etki eden ve Hooke yasasına uyan kuvvet bağıntısı şu eşitlikle verilebilir;

$$F_{\text{tuzak}} = -\kappa x \quad (2.2)$$

Burada  $F_{\text{tuzak}}$  tuzak kuvvetini,  $\kappa$  tuzak sertliğini (tuzak sabiti),  $x$  ise parçacığın lineer bölgede tuzağın denge konumundan olan uzaklığını temsil etmektedir.

Denklem 2.2’nin Denklem 2.1 ile ilişkilendirilmesi yardımıyla tuzaklanan parçacığa uygulanan tuzaklama kuvveti miktarı bulunabilir. Ancak bu kuvvetin sayısal değerinin belirlenebilmesi için  $\kappa$  tuzak sertliğinin bilinmesi gerekir. Optik tuzağın sertliği  $\kappa$ , tuzak karakterizasyonu için önemli bir niceliktir ve tuzak sertliği tuzağı oluşturan lazerin dalga boyuna, lazerin gücüne, objektifin nümerik açıklığına, tuzaklanan parçacığın boyutuna ve tuzaklanan parçacık ile bu parçacığın bulunduğu ortamın kırma indisi gibi parametrelere bağlıdır. Bu parametreler her kurulumda farklılık gösterebildiğinden tuzak sertliği her optik tuzak düzeneği için ayırt edicidir.



Şekil 2.5 Tuzaklama kuvvetinin Hooke yasası ile temsilinin gösterimi.

Tuzak sertliğini ölçmek üzere kullanılan teknikler pasif teknikler ve aktif teknikler olarak iki temel grupta incelenebilir. Pasif tekniklerde tuzak sertliği hesaplanması tuzaklanan parçacığın konumunun zamanla değişiminin kaydedilmesi yoluyla elde edilir. Aktif tekniklerde ise tuzak sertliği; tuzaklanan parçacığın konumundaki değişimin, numune kabının ya da direkt ortamın tuzak konumuna bağlı olarak hareket ettirilmesi yoluyla elde edilmesini içerir. Bu teknikler aşağıda daha detaylı şekilde açıklanmıştır.

#### 1) Pasif metotlar

- a) Eş bölüşüm metodu (Visscher, et al., 1996): Tuzaklanan bir parçacığın termal hareketinin gözlenmesine dayanan bu metot parçacığın konumunun varyansının hesaplanmasıyla bulunur. Bu metotta tuzak sertliği şu eşitlikle bulunur;

$$\frac{1}{2} \kappa \langle x^2 \rangle = \frac{1}{2} k_B T \quad (2.3)$$

Burada  $\langle x^2 \rangle$  konumun varyansını ( $\langle x \rangle = 0$ ),  $k_B T$  termal enerjiyi temsil etmektedir. Termal enerjideki,  $k_B$  Boltzman sabitini,  $T$  sıcaklığı ifade eder. Bu yöntemin avantajı parçacığın sürüklenme katsayısını bilmeyi gerektirmemesidir. Parçacığın termal hareketinin bütün frekans aralığını kaplayabilmesi için dedektörün bant genişliğinin oldukça yüksek olması gerekir. Ayrıca dedektör çok iyi bir şekilde kalibre edilmelidir. Çünkü kalibrasyonla ilgili herhangi bir hatada varyanstan dolayı hatanın karesi alınmış olacaktır.

- b) Güç spektrum metodu (Visscher, et al., 1996): Bu metot, tuzaklanan bir parçacığın hareket denkleminde elde edilen güç spektrumu bağıntısı yardımıyla tuzak sertliğinin hesaplanması ilkesine dayanır. Tuzak sertliğini hesaplamak için kullanılabilir ancak bu durumda parçacığın sürüklenme katsayısının bilinmesi gerekir. Dedektörün kalibre edilme zorunluluğu yoktur.

## 2) Aktif metotlar

- a) Kaçış kuvvet metodu (Ashkin, et al., 1986; Block, et al., 1989): Kaçış kuvveti,  $F_{kaçış}$ , parçacığı tuzaktan ayırmak için gerekli minimum kuvvet olarak tanımlanır. Buradaki kuvvet sıvının parçacık üzerine uyguladığı maksimum viskoz sürüklenme kuvvetidir,  $(F_{viskoz})_{maks}$ . Viskoz sürüklenme kuvvetini oluşturmanın çeşitli yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemlere sıvı içindeki tuzaklanmış parçacığın hareket ettirilmesi, numune kabındaki sıvının hareket ettirilmesi ve numune kabına dışarıdan sıvı eklenmesi gibi yöntemler örnek verilebilir. Kaçış kuvveti kaçış hızı kullanılarak aşağıdaki formülden elde edilir.

$$F_{kaçış} = (F_{viskoz})_{maks} = \gamma v_c \quad (2.4)$$

Burada  $\gamma$  parçacığın sürüklenme katsayısı ( $r$  yarıçaplı küresel bir parçacık için  $\gamma = 6\pi\eta r$  ve burada  $\eta$  ortamın viskozitesidir) ve  $v_c$  tuzaklanan parçacığın tuzaktan kaçmasına neden olan minimum akışkan hızıdır (Svoboda and Block, 1994). Kaçış kuvveti optik tuzağın uç konumlarında gerçekleşir ve hesaplanır. Bu konumlarda geri çağırıcı kuvvet, tuzak merkezine yakın konumlardan farklı olarak artık yer değiştirmenin lineer fonksiyonu değildir. Bu yüzden bu bölgelerde tuzak sertliği Hooke yasasıyla temsil edilemez (Visscher, et al., 1996). Bu metot, tuzağın kuvvet profiline ve parçacığın yarıçapına da bağlı olması nedeniyle çok basit bir yöntem değildir. Bu metotta kesin ölçümler almak zordur. Bu nedenle diğer tuzak sertlik ölçüm metotları bu metoda göre daha çok tercih edilir.

- b) Sürüklenme kuvvet metodu (Visscher, et al., 1996): Bu metotta da önceki metotta olduğu gibi parçacığa viskoz kuvveti uygulanır fakat yukarıdaki metodun aksine burada Hooke bölgesi içinde tuzak sertliği kalibre edilir. Parçacık üzerine viskoz kuvvetinin uygulanması sonrasında, parçacıktaki yer değiştirmelerin ölçülmesiyle kuvvet eğrisi elde edilir. Tuzak sertliği buradan en küçük kareler metoduyla hesaplanır. Burada piezo platform bilinen bir hızla hareket ettirilmektedir dolayısıyla bu metot piezo platform ve dedektörün çok iyi şekilde kalibre edilmesini gerektirmektedir. Deney süresince parçacık aynı zamanda bir termal harekete de maruz kalacaktır, bu nedenle ortalama almak termal kuvvetin etkisini ortadan kaldıracaktır.
- c) Adım yanıt metodu (Simmons, et al., 1996): Tuzak sertliğini elde etmek için tuzağın aşamalı hareketine göre parçacığın tepkisi kullanılır. Tuzak sertliğini belirlemek için, parçacığın viskoz sürüklenme katsayısı bilinmelidir. Tuzak sertliği aşağıdaki formülle ifade edilir;

$$x_p = x_t \left( \exp\left(-\frac{\kappa t}{\gamma}\right) \right) \quad (2.5)$$



Burada  $x_t$  tuzağın aşamalı hareketi,  $x_p$  parçacığın yanıtıdır (Visscher, et al., 1996). Parçacığın tuzağın lineer bölgesinde kalmasına dikkat edilmelidir. Güç spektrum metoduyla aynı bilgileri sağlıyor olmasına rağmen bu metotta gürültü ya da hataların dış kaynaklarını belirlemek zordur. Dedektörün bant genişliği ve örnekleme frekansı, çok hızlı hareket eden parçacığın hareketinin algılanması için, yeterince yüksek olmalıdır.

Tuzak sertliğini hesaplamak üzere her geçen gün gerek basitliği ve gerekse hassasiyeti ile mevcut yöntemlere üstünlüğü olduğu iddia edilen farklı metotlar önerilmektedir. Gerçekleştirilen kurulum çalışmasında güç spektrum metodu ile tuzak sertliği kalibrasyonu tercih edilmiştir. Güç spektrumu bağıntısını elde etmek üzere tuzaklanan parçacığın hareket denklemi (Langevin denklemi) şu şekilde yazılır:

$$F_G(x) + F_S(\dot{x}) + F_T(t) + F_D(t) = m\ddot{x}(t) \quad (2.6)$$

Burada  $F_G$  geri çağırıcı kuvveti,  $F_S$  sürüklenme kuvvetini,  $F_T$  termal kuvveti,  $F_D$  diğer dış kuvvetleri temsil eder ve tuzaklanmış bir parçacığın hareket denklemi,

$$-\kappa x(t) - \gamma \dot{x}(t) + F_T(t) + F_D(t) = m\ddot{x}(t) \quad (2.7)$$

şeklinde yazılır. Tuzaklama deneylerinde kullanılan parçacıkların kütleleri oldukça küçüktür. Bu sebeple tuzaklanmış parçacıklar üzerine etkiyen eylemsizlik kuvveti diğer kuvvetler ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilir küçüklüktedir. Böylece tuzaklanan parçacığın herhangi bir dış kuvvet etkisi altında olmadığı bir durumda hareket denklemi şu şekildedir:

$$F_T(t) = \gamma \dot{x} + \kappa x \quad (2.8)$$

Burada  $x$  parçacığının denge konumundan sapma miktarını,  $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$  parçacığının X eksenini boyunca hızını ve  $F_T(t)$  ise ortam moleküllerinin termal enerjilerinden dolayı sahip oldukları kinetik enerji nedeniyle parçacık ile sürekli olarak rastgele çarpışmaları sonucu parçacığa etkileyen kuvveti (Langevin kuvveti,  $F_T(t) = \sqrt{2k_B T \gamma} \eta(t)$ ) temsil etmektedir.

Deneysel süreçte parçacığının konumu,  $x(t)$ , her bir anda kaydedilerek konumunun zamanla değişiminin Fourier Transformu yapılarak güç spektrumu şu şekilde elde edilir:

$$|X(f)|^2 = \frac{k_B T}{2\pi^2 \gamma (f_c^2 + f^2)} = \frac{k_B T / \gamma}{2\pi^2 (f_c^2 + f^2)} = \frac{D}{2\pi^2 (f_c^2 + f^2)} \quad (2.9)$$

Bu ifadeye  $f_c, f_c = \frac{\kappa}{2\pi\gamma}$  şeklinde tanımlanan köşe frekansı,  $f$  hareketli parçacığının frekansı ve Einstein eşitliği olarak bilinen  $D = \frac{k_B T}{\gamma}$  eşitliği ile verilen  $D$  niceliği ise difüzyon sabitidir.

Güç spektrumu yönteminde parçacıktan saçılan lazer ışınının, parçacığının konumunun değiştirilmesine bağlı olarak gösterdiği değişimin kaydedilmesiyle bulunabilir. Parçacığının konum değişimi bu çalışmadaki düzenekte yer alan XY mekanik öteleme platform ve piezo platform ile sağlanırken konum bilgisi ise QPD yardımıyla sağlanacaktır. Bu tezin konusunu oluşturması sebebiyle bu bileşenlerin bilgisayara bağlanarak sürekli takipleri, kontrollü veri alış-verişleri ve deneysel verilerin toplanması işlemleri izleyen bölümlerde detaylı bir şekilde tartışılacaktır.

## BÖLÜM 3

### YARI İLETKEN VE FOTO DİYOTLAR

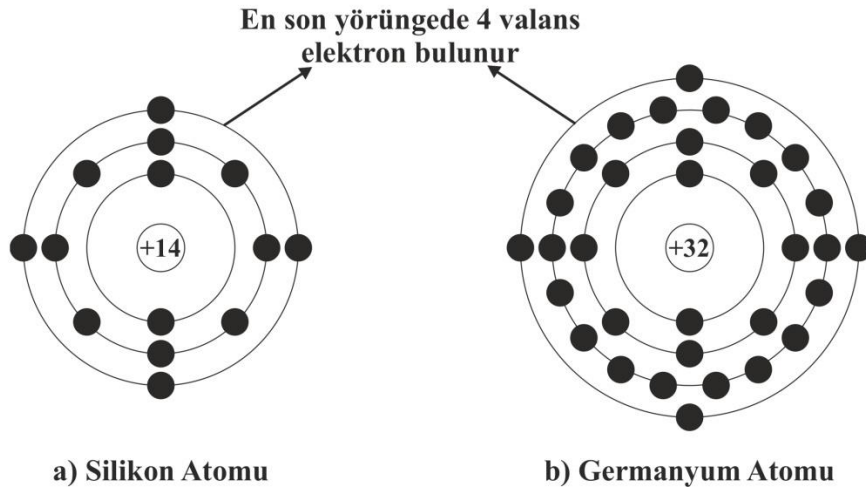
Bu bölümde, OT düzeneğimizde kullandığımız hassas konum belirleme bileşeninin çalışma prensibinin iyi bir şekilde anlaşılması amacıyla; öncelikle maddelerin elektriksel iletkenliklerine göre gruplandırılmalarından bahsedilerek yarı iletken fiziğinin temelleri üzerinde durulacaktır. Sonrasında konum belirlemenin oldukça önemli bir bileşeni olan QPD'lerin temelini oluşturan fotodiyotların ayrıntılı bir incelemesi sunulacaktır.

#### 3.1 Malzemelerin Elektriksel Özelliklerine Göre Gruplandırılması

Malzemeler elektriksel iletkenlikleri bakımından; iletken, yalıtkan, yarı iletken ve süperiletken olmak üzere dört ana gruba ayrılır. Şimdi kısaca bu gruptaki malzemelerin özelliklerini inceleyelim.

İletkenler atomik yapılarında bol miktarda serbest elektrona sahip olmaları sebebiyle akımı çok iyi ileten malzemelerdir. Akımı çok iyi ilettikleri için dirençleri göreceli olarak oldukça küçüktür. Son yörüngelerinde 1, 2 ya da 3 elektron bulunduran malzemeler az ya da çok iletkenlik özelliğine sahiptirler. Yalıtkanlar ise iletkenlere kıyasla oldukça az yük taşıyıcı serbest elektrona sahip malzemelerdir. Taşıyıcı elektronlarının sayısı az olduğu için dirençleri çok büyüktür. Son yörüngelerinde 5, 6, 7 ve 8 elektron bulunduran tüm malzemeler az ya da çok yalıtkanlardır. Süperiletken malzemelerin iki önemli özelliği vardır; sıcaklıkları belli bir kritik değerin altına kadar düşürüldüğünde elektrik akımına karşı direnç göstermezler ve uygulanan manyetik alan şiddeti arttırıldığında manyetik alan süperiletkenin içerisine giremez. Süperiletken kendi yüzeyinde uygulanan manyetik alan ile eşit ama zıt yönlü bir manyetik alan oluşturarak diamanyetik özellik kazanmış olur. İletkenliği yalıtkanlarla karşılaştırıldığında iyi ama iletkenlere kıyasla çok düşük olan malzemelere yarı iletken

malzeme denir. Bu malzemelerin iletkenliği sıcaklığa büyük ölçüde bağlıdır ve iletkenlerin aksine sıcaklık arttığında artacak biçimdedir. Bunun sebebi yarı iletken malzemede sıcaklık arttığında atomlarından ayrılan valans elektronu sayısının artmasıdır. Tipik olarak son yörüngelerinde 4 elektron bulundururlar. Germanyum, silikon ve selenyum atomları sıklıkla kullanılan yarı iletken elementlerdendir (Şekil 3.1).



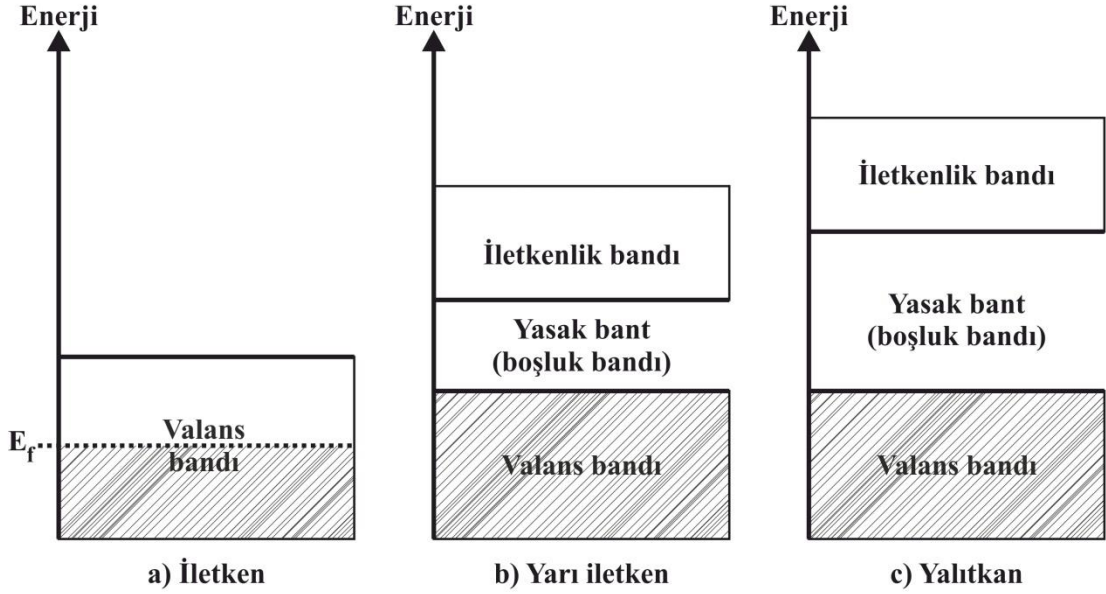
**Şekil 3.1** Silikon ve germanyum atomlarının elektronlarının yörüngelere dağılışı.

### 3.1.1 Yarı iletkenlerde enerji seviyeleri ve bant yapıları

Bir yarı iletkenin bant yapısı için üç ayrı enerji bandından söz edebiliriz. Bunlar, Şekil 3.2'de görülebileceği gibi "iletkenlik bandı", "yasak bant" ve "valans bandı"dır. Herhangi bir atomun valans bandından iletkenlik bandına geçebilmesi için bu iki bant arasında bulunan ve elektron bakımından boş olan yasak bandı geçmesi gerekir. Valans bandından kopan ve akım taşıyabilecek durumda olan elektronların bulunduğu banda iletkenlik bandı denir. Bir atomun son yörüngesinde bulunan valans elektronun serbest duruma geçmesi, o maddenin iletkenlik kazanması anlamına gelir. Malzemeyi oluşturan atomların enerji seviyeleri arasındaki farklar o malzemenin elektriksel iletkenliğini belirler. Malzemeye dışarıdan aktarılan enerji (elektromagnetik enerji,

termal enerji, foton enerjisi,...) uygun şartlarda enerji düzeyleri arasında geçişe neden olur.

İletkenlerde elektronlar çok küçük enerji ile kolaylıkla serbest hale geçebilirler (Şekil 3.2a). Yalıtkanlarda yasak bant genişliği oldukça büyüktür. Bu sebeple elektronları valans bandından iletkenlik bandına geçirebilmek için sisteme aktarılması gereken enerji miktarı nispeten çok daha fazla olmalıdır (Şekil 3.2c). Yarı iletken malzemelerde yasak bant aralığı yalıtkanlara göre daha dardır (Şekil 3.2b).



Şekil 3.2 İletken, yarı iletken ve yalıtkanların enerji bant diyagramları ( $T=0$  K).

### 3.2 Katkılı Yarı İletkenler

Bir elektron, valans bandından iletim bandına ısıl uyarılma ile çıkarken geride daima pozitif yüklü bir boşluk (hol) bıraktığı için saf bir yarı iletkende elektron ve hol konsantrasyonları birbirine eşittir. Fakat günümüzde yarı iletkenlerin kullanıldığı birçok uygulamada, sadece bir taşıyıcı tipinin etkin olacağı durumlar istenmektedir. Bir yarı iletken uygun katkı elementleri ile katkılı olduğunda çoğunluk taşıyıcıları holler ya da

elektronlar olan numuneler elde edilebilir. Bu katkılama ve örgü bozuklukları yarı iletken maddenin elektriksel özelliğini önemli ölçüde etkileyen faktörlerdir. Yarı iletkenler katkılama işleminden sonra n-tipi veya p-tipi özellik gösterir. Bileşik yarı iletkenlerde elementlerden birinin atom eksikliği de katkı maddesi gibi davranır (Omar, 1975; Kittel, 1996). Katkılama türlerine göre yarı iletken malzemeler iki sınıfta incelenebilir:

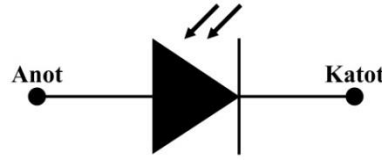
n-tipi yarı iletken: Elektron yoğunluğunun, hol yoğunluğundan fazla olduğu yarı iletkenlere n-tipi yarı iletken adı verilir. Kristale katkılanan atomlara elektron verici anlamına gelen donör denir. Donör atomu olarak değeri beş olan fosfor, arsenik veya antimon elementleri kullanılabilir. n-tipi yarı iletken materyallerde elektron yoğunluğu hol yoğunluğundan büyük olacağından, elektriksel iletkenliğe elektronlardan gelen katkı daha fazla olacaktır. Bu nedenle, n-tipi yarı iletkenlerde elektronlara çoğunluk taşıyıcıları, hollere ise azınlık taşıyıcıları denir (Smith, 1986).

p-tipi yarı iletken: Hol yoğunluğunun, elektron yoğunluğundan fazla olduğu yarı iletkenlere p-tipi yarı iletken adı verilir. Kristale katkılendiğinde elektron alan atomlar kabul edici anlamında akseptör olarak adlandırılırlar. Akseptör atomu olarak değeri üç olan bor, alüminyum, galyum ve indiyum elementleri kullanılabilir. p-tipi yarı iletken materyallerde hol yoğunluğu elektron yoğunluğundan büyük olacağından, elektriksel iletkenliğe hollerden gelen katkı daha fazla olacaktır. Bu nedenle, p-tipi yarı iletkenlerde hollere çoğunluk taşıyıcıları, elektronlara ise azınlık taşıyıcıları denir.

n-tipi yarı iletkenlerde elektronlar, p-tipi yarı iletkenlerde ise holler akım taşıyıcı olarak görev yaparlar. n-tipi bir yarı iletken bir DC gerilim kaynağına bağlandığında, bu yarı iletkendeki elektronlar (akım taşıyıcılar) gerilim kaynağının negatif kutbu tarafından itilirler ve pozitif kutbu tarafından çekilirler. Böylece gerilim kaynağının negatif kutbundan pozitif kutbuna doğru bir elektron akışı meydana gelir. p-tipi bir yarı iletken bir DC gerilim kaynağına bağlandığında ise, akım holler tarafından taşınır. Holler gerilim kaynağının pozitif kutbu tarafından itilirler ve negatif kutbu tarafından çekilirler. Böylece gerilim kaynağının pozitif kutbundan negatif kutbuna doğru bir hol hareketi meydana gelir.

### 3.3 Fotodiyotlar

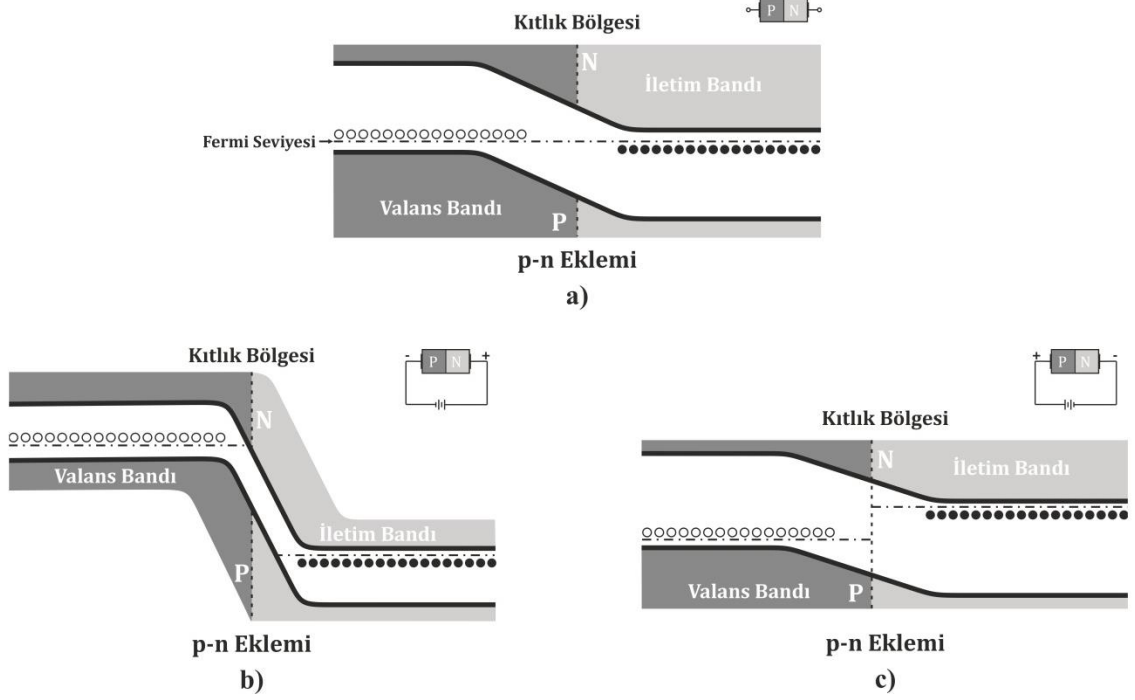
Üzerine ışık düştüğünde katottan anota doğru akım geçiren yarı iletken malzemelerden üretilmiş elemanlara fotodiyot denir. Fotodiyotlar ışık etkisi ile ters yönde çalışan diyotlardır (Şekil 3.3). Ters polarma altında kullanılırlar. Doğru polarmada normal diyotlar gibi çalışır, ters polarmada ise n ve p yarı iletkenlerinin birleşim yüzeyine ışık düşene kadar yalıtkandırlar. Birleşim yüzeyine düşen fotonların fotodiyot tarafından soğurulması ile serbest taşıyıcılar oluşur. Bu serbest taşıyıcılar sayesinde akım meydana gelir.



Şekil 3.3 Fotodiyotun sembolü.

Bir n tipi yarı iletkeninde serbest taşıyıcılar elektronlardır. Elektron sayısı fazla olduğundan ortalama enerji seviyesi p tipi yarı iletkeninden daha fazladır. p tipi ve n tipi yarı iletkenler birleştirildiğinde bir p-n eklemi oluşarak bu eklem bölgesinde her bir yarı iletkendeki enerji seviyeleri eşitlenmeye çalışılır. Şekil 3.4'de bir p-n eklemi şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 3.4a'da denge durumundaki bir p-n ekleminde, eklemin her iki tarafında fermi enerji seviyeleri eşitlenmiştir. Ayrıca serbest taşıyıcılardan arınmış bir kıtlık bölgesi de mevcuttur. Şekilde yukarı yön artan elektron enerjisini göstermektedir. Buna göre bir elektronu yukarı çıkartmak (veya bir holü aşağı indirmek) için bir enerjiye ihtiyaç vardır. Şekil 3.4b'de p-n ekleminin ters beslendiği durum gösterilmiştir. Eklemin p tarafının daha negatif olmasıyla beraber, eklemi geçmek isteyen elektronların önündeki engel artmıştır. Şekil 3.4c'de ise p-n ekleminin ileri beslendiği durum verilmiştir. p tarafı daha pozitifdir. Elektronların önündeki engel azalmıştır. Bir elektron artık eklem bölgesindeki engeli aşarak eklem yakınından (p tarafı) bir holü doldurabilir. Bir boşluktan bir diğerine hareket ederek

pozitif uca (sola) doğru ilerleyebilir. Bu durum holün sağa doğru hareketi olarak da tanımlanabilir.



**Şekil 3.4** p-n eklemesindeki enerji seviyeleri ve kıtlık bölge; a) denge durumunda, b) ters beslemeli, c) ileri beslemeli.

Fotodiyotların çalışma prensibinin temelinde yatan olay fotoelektrik etkidir. Fotoelektrik etki iletkenlik özelliğine sahip bir malzemenin yüzeyi üzerine düşen ışık fotonlarının atomik yapıdan elektron sökmesi olayıdır. Bu durumun gerçekleşebilmesi için malzeme üzerine gelen ışığın enerjisinin malzemenin iş fonksiyonundan büyük olması gerekir. İş fonksiyonu farklı malzemelerde farklı değere sahiptir. Buna göre kurgulanan çalışma ile uyumlu bir malzeme seçilir.

Böylece yarı iletken malzemelerden yapılmış ışığa duyarlı yüzeye sahip fotodiyotlar optik tuzaklama, atomik kuvvet mikroskobu, vb. hassas konum belirlemeyi gerektiren düzeneklerde sıklıkla kullanılırlar. İzleyen bölümde konum belirleme amacıyla kullanılan fotodiyot malzeme türleri ve çalışma prensibi hakkında detaylı bilgiler sunulmaktadır.



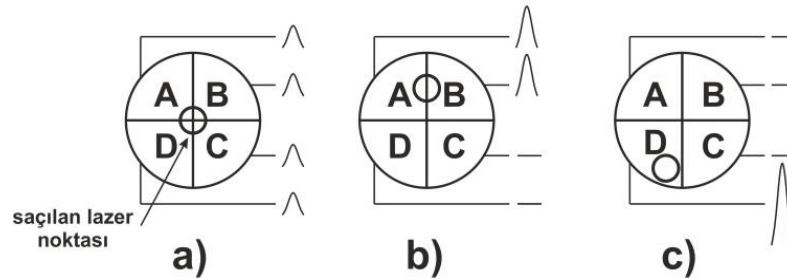
## BÖLÜM 4

### KUADRANT FOTODEDEKTÖR İLE HASSAS KONUM BELİRLEME

#### 4.1 Konum Belirlemenin Temelleri

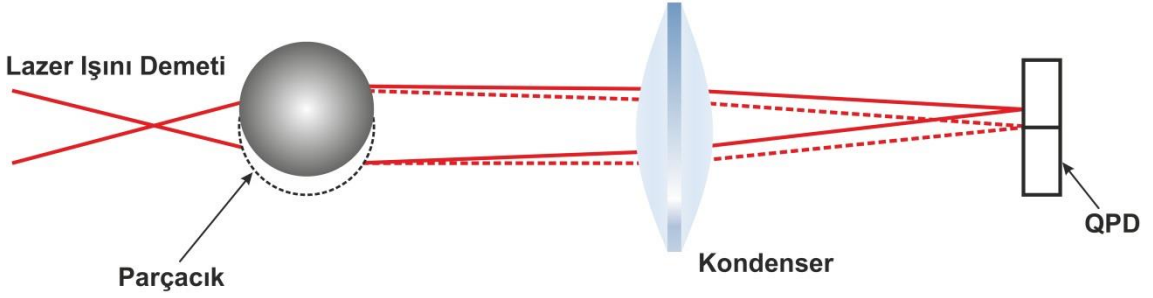
Tuzaklanan parçacığın konum bilgisi, parçacıktan saçılan lazer ışınının bir konum belirleme sistemi tarafından algılanması ile elde edilir. Dolayısıyla lazerden gelen ışınların konum değişimini ölçebilen hassasiyete sahip konum belirleme sistemi bu deneysel düzenek için oldukça önemli bileşenlerden birisidir. Konum belirleme için sıklıkla kullanılan bileşen QPD'dir. QPD bir bütünün çeyreğini oluşturan dört bağımsız fotodiyot segmentinden meydana gelir. Bu fotodiyot silikon (Si) ya da indium-galyum-arsenit (InGaAs) gibi yarı iletken malzemelerden üretilir ve QPD'ler genelde dairesel geometriye sahiptir. Fotodedektörlerin seçiminde göz önünde bulundurulması gereken en önemli faktör fotodedektör malzemenin karakteristik dalga boyu genişliği ile ifade edilen çalışma aralığıdır. Si 250-1100 nm ve InGaAs 1000-2000 nm karakteristik dalga boyu çalışma aralığına sahiptir. Tuzaklama lazerinin dalga boyu ile konum belirleme sisteminin çalışma aralığının uyumlu olması, konum hassasiyeti ve fotodiyotun hızlı değişimlere cevap verebilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Kuadrant fotodedektörde her fotodiyot segmenti sinyal çıkışı için ayrı bir konnektöre sahiptir. Fotodiyot üzerine düşen ışık, şiddeti ile orantılı mikroamper seviyede akım oluşturur (Şekil 4.1).



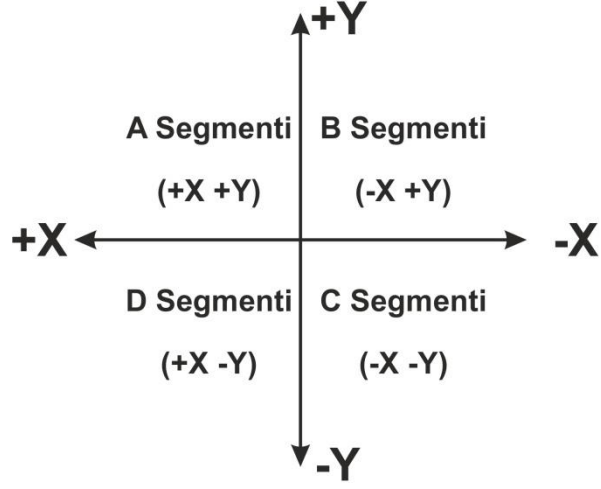
**Şekil 4.1** QPD üzerine düşen lazer ışınının konumuna göre sinyal çıkışı. Lazer ışını pozisyonu; a) merkezde, b) dikey doğrultuda yukarıda, c) bir çeyrek fotodiyot içerisinde.

Şekil 4.2’de görüldüğü üzere, optiksel tuzaklamada tuzaklanan parçacık bir saçıcı merkez gibi davranır. Parçacığın konumuna bağlı olarak üzerine düşen lazer ışınının saçılma yönü ve şiddeti farklılık göstereceğinden QPD üzerine düşen saçılmış lazer ışınının QPD’nin farklı segmentlerinde neden olduğu şiddet değişimi QPD’nin fotodiyot segmentlerinin oluşturduğu sinyal çıktısında değişime neden olur. Böylece QPD’nin her bir segmentinden elde edilen sinyal çıktısı bilgisayara aktarılarak uygun bir algoritmanın kullanılması sonucu konum bilgisi elde edilir.



**Şekil 4.2** Parçacıktan saçılan lazer ışınının QPD üzerindeki konum değişiminin kesit görüntüsü. Küresel simetriye sahip parçacık ışın merkezinde konumlu ise saçılan ışın kondenseri geçtikten sonra QPD’nin merkezine düşer. Parçacığın konumunun ışın merkezinden sapmasıyla orantılı olarak QPD üzerine düşen lazer ışını konumunda sapma gözlenir.

QPD’nin fotodiyot segmentlerinde oluşan sinyal çıktısını saçıcı parçacığın konumuna bağlayan algoritma şu şekildedir: Kuadrant fotodedyör iki boyutlu koordinat düzlemi ve fotodiyot segmentler de bu koordinat düzlemini oluşturan segmentler olarak düşünülebilir. Böylece A ve B segmentleri koordinat düzleminin +Y bölgesini, C ve D segmentleri koordinat düzleminin -Y bölgesini, A ve D segmentleri koordinat düzleminin +X bölgesini ve B ve C segmentleri koordinat düzleminin -X bölgesini tanımlar (Şekil 4.3).



**Şekil 4.3** Koordinat sistemine benzetilerek QPD'nin 4 bölgeye ayrılması.

Tuzaklanan parçacıktan saçılan lazer ışınının QPD segmentlerinde oluşturduğu voltaj sinyalleri sonucunda x ve y konumları aşağıdaki formüllerle belirlenir.

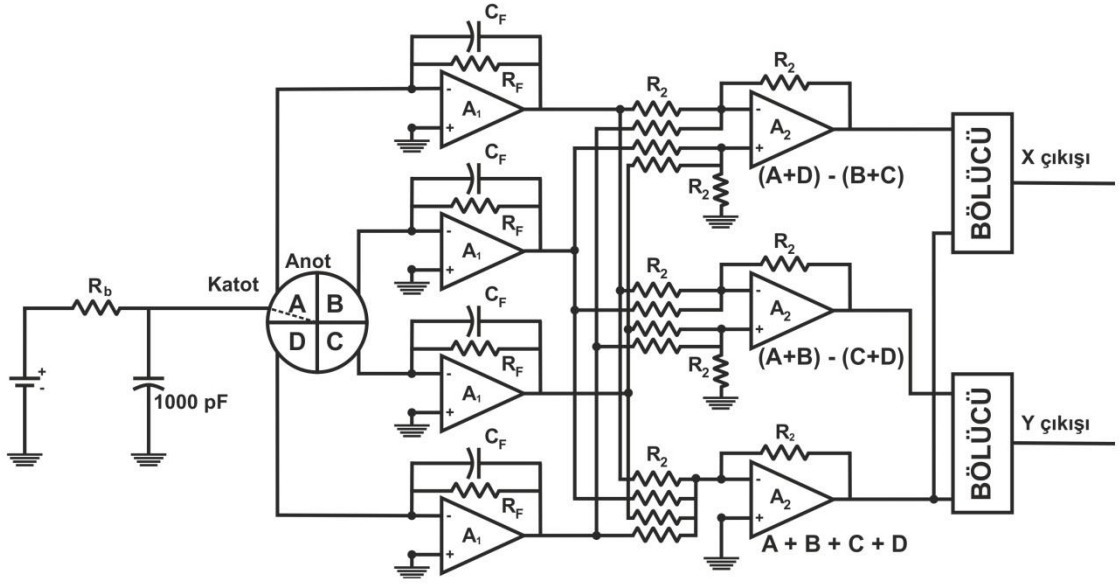
$$\text{"x konumu"} = \frac{(A + D) - (B + C)}{(A + B + C + D)} \quad (4.1)$$

$$\text{"y konumu"} = \frac{(A + B) - (D + C)}{(A + B + C + D)}$$

Denklem 4.1'den de anlaşılacağı gibi yatay ve düşey konumlar toplam ışın şiddetine göre normalize edilmiştir.

Dedektörün her bir segmenti tarafından oluşturulan akım daha sonra her bir segmente rezerv edilmiş transistörler vasıtasıyla voltaj sinyaline dönüştürülür. QPD'nin sensör kısmını oluşturan fotodiyot segmentlerden elde edilen akımlar oldukça küçük değerlere sahiptir ve bir sinyal koşullama basamağı olmaksızın bu akım sinyallerinin direkt kullanımı pratik değildir. Segmentlerden elde edilen akımları konum bilgisine

çevirmeden önce  $A_1$  ve  $A_2$  gibi yükseltme oranlarına sahip iki aşamalı yükseltici devre ile gerilim sinyaline dönüştürülmesi işlemi konuma karşı gelen sinyallerin uygun şekilde işlenmesinde oldukça önemlidir. Bu işlemi gerçekleştiren devre şeması Şekil 4.4'de verilmiştir. Böyle bir devrede çıktı sinyalinin yükseltme oranı  $A_1 \times A_2$  çarpımı ile verilir.



Şekil 4.4 QPD devresi.

QPD'ye gelen ışınlar fotodiyotun yapısı gereği elektrik sinyallerine çevrilir. Bu sinyaller bilgisayar ortamına aktarılırken mutlaka dijital sinyale çevrilmelidir. QPD'ye gelen lazer ışın demetini uygun bir formata çevirerek bilgisayara göndermek için QPD kontrolör ünitesi (UDT Instruments, UDT-531, USA) kullanılmıştır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 UDT 531 QPD kontrolör ünitesi.

QPD kontrolörü; konum algılama dedektörleri bağlandığı zaman gelen ışının merkezinin konumunu belirler ve hem sayısal hem de grafik olarak lazer ışınına saçan parçacığın iki boyuttaki (x,y) konumunu gösterir. Kontrolör ünitesine ait teknik özellikler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

**Çizelge 4.1** UDT 531 kontrolör ünitesinin teknik özellikleri.

<b>Boyutlar</b>	
<b>Yükseklik</b>	: 5.25” (133 mm)
<b>Genişlik</b>	: 17” (432 mm)
<b>Derinlik</b>	: 10”(254 mm)
<b>Mounting</b>	: Standart 19”
<b>Ağırlık</b>	: 11 pounds(5 kg)
<b>Ekran tipi</b>	Grafik LCD
<b>Görüş alanı</b>	: 101 mm(genişlik) x 82 mm (yükseklik)
<b>Pixel</b>	: 160 (genişlik) x 128(yükseklik)
<b>Arka ışık</b>	: Ayarlanabilir ışık kaynağı
<b>Giriş</b>	: BNC konnektör aracılığıyla harici 0-5V tetikleyici giriş
<b>Çıkış</b>	: IEEE-488 dijital bilgisayar arayüzü
<b>Çalışma sıcaklığı</b>	: 0-50°C
<b>Maksimum giriş akımı</b>	: 10 mA
<b>Kazanç</b>	: 1K V/A - 10 M V/A
<b>A/D dönüştürücü</b>	: 13 bit çözünürlüklü
<b>Bant genişliği</b>	: 1.6 kHz
<b>Yanıt zamanı</b>	: (%10-90) 258 ms
<b>Zaman sabiti</b>	: 100 mikrosaniye
<b>Genel ölçüm belirsizliği</b>	
<b>Pozisyon ölçümü</b>	: % 0,15 = 100 nA ±0,04 nA
<b>Güç ölçümü</b>	: % 0,5

## 4.2 Veri Toplama

Analog-Dijital sinyal dönüşümü sayesinde günümüz teknolojilerinin pek çoğu veri toplama ve işleme süreci gerektirmektedir. Tezin bu kısmında öncelikle bir veri toplama sisteminin tanımı ve bu sistemde bulunması gereken bileşenler anlatılacaktır.

Kişisel bilgisayarlar (PC) gün geçtikçe yazılım ve donanım bakımından hızlı bir gelişme içinde olduğundan veri toplama, sinyal işleme, görüntü işleme, gelişmiş gerçek zamanlı işlem ve otomasyon uygulamalarında en çok kullanılan ortam olmaktadır.

Veri toplama süreci fiziksel büyüklüklerin sensörler aracılığıyla elektrik sinyaline dönüştürülerek bir bilgisayar tarafından işlenmesi, analiz edilmesi ve saklanması için sayısal sinyallere dönüştürüldüğü süreçtir. Kontrol süreci ise PC'den giden sayısal kontrol sinyallerinin cihazlar tarafından algılanacak bir sinyal biçimine dönüştürüldüğü süreçtir.

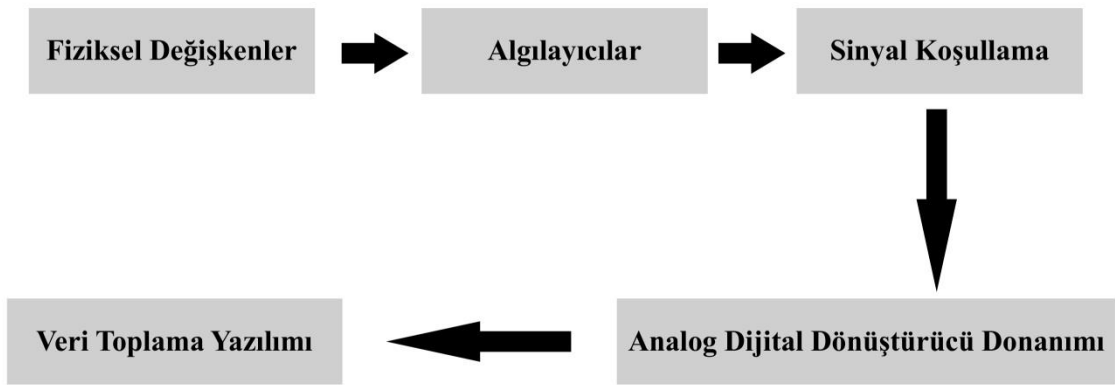
Bir sistemle ilgili veri toplamak için ilk olarak verinin uygun şekillerde toplanması, daha sonra ise istenilen bilginin türüne göre analizinin yapılması gerekir. İlk başta istenen veri fiziksel ortamdan sensörler aracılığıyla algılanır. ADC (analog sinyali dijital sinyale çevirici) yardımıyla veri dijital formata çevrilir ve bilgisayara aktarılır. Uygun yazılımlar kullanılarak istenilen analizler yapılır. Veri toplama sistemleri gelişmiş bilgisayar teknolojilerindeki çeşitlilikten dolayı çok geniş bir seçme imkânı tanır. Veri toplama sistemlerinde bilgisayarla iletişimi sağlamak için sıklıkla kullanılan bağlantı türleri; PXI, VME, GPIB, Compact PCI, USB, PCMCIA, Firewire, seri ve paralel port şeklindedir.

## 4.3 Veri Toplamının Ana Bileşenleri

Veri toplama amacıyla çeşitli firmalar tarafından üretilen ve oldukça farklı performans ya da özelliklere sahip pek çok cihaz ya da bilgisayar kartı vardır. Kontrol ve otomasyon aşamasında önemli olan pek çok ayrı bileşeni bilgisayar ile tam uyumlu

komple bir sistem haline getirmektir. Şekil 4.6’da gösterildiği gibi, bir veri toplama sisteminin temel süreçleri aşağıdaki gibidir:

- Algılayıcılar (sensörler)
- Sinyal koşullama
- Analog dijital dönüştürücü donanımı
- Veri toplama yazılımı



Şekil 4.6 Veri toplama sisteminin ana bileşenleri.

#### 4.3.1 Algılayıcılar

Veri toplama süreci, ölçülecek fiziksel niceliğin ortamdan toplanmasıyla başlar. Bu işlemi gerçekleştiren cihazlar sensörler ve transdüserlerdir. Bu iki kelime genellikle birbirleriyle karıştırılmaktadır. Sensörler fiziksel veriyi ölçülebilir bir sinyale dönüştüren, ölçü aletlerine doğrudan bağlanan ve üzerlerinde sinyal işleyici/yükseltici bulundurmeyen algılayıcılardır. Transdüser ise bir otomasyon sistemine bilgi sağlayan ve sensör ile bütünleşik yerel sinyal işlemeyi de kapsayan cihazlardır.

Elektrik ölçme sistemlerinde kullanılan sensörler belirli bir fiziksel olaya karşılık olarak elektriksel bir çıkış sinyali üretir. Sensör tarafından üretilen elektriksel sinyaller,

veri toplama cihazının giriş skalası için uygun hale getirilmelidir. Bu işlem için sinyal koşullama elemanları kullanılır.

#### 4.3.2 Sinyal koşullama

Sinyal koşullama, bir sinyal toplama işlemi esnasında sensörlerden elde edilen elektrik sinyallerinin işlenmeye uygun hale getirildiği süreçtir. Sensörlerden veri toplanırken bazen sensörlere gelen verinin doğrudan ölçülmesi zor veya tehlikeli olabilir. Sinyal koşullama elemanları düşük seviyede bulunan sinyalleri yükseltir ve bu sinyalleri izole edip filtreleyerek daha verimli hassas ölçüm yapılmasını sağlar.

Sinyal koşullama işlemi sırasında sıklıkla kullanılan sinyal koşullama işlemleri şunlardır:

- Yükseltme/Alçaltma; sinyal koşullama düzenekleri tarafından gerçekleştirilen birincil görevlerden biridir. İki önemli fonksiyonu gerçekleştirir. Bunlar, sinyal ölçümünün çözünürlüğünü arttırmak ve sinyal/gürültü oranını yükseltmektir.
- İzolasyon; kelime olarak ayırmak anlamına gelir. Sensör sinyalini direkt bilgisayardan ayırmak için yapılan işlemidir.
- Filtreleme; sinyal genelde yüksek frekanslı bozucu sinyallerden etkilenir. Bu etkilenmeyi önlemek için filtreler kullanılır.

Sinyal koşullama süreci sonucunda sinyal, veri toplama ekipmanlarına zarar vermeyecek ve aynı zamanda bu ekipmanlardan maksimum performans ve çözünürlük elde edecek düzeye getirilir.



### 4.3.3 Analog dijital dönüştürücü donanımı

Analog Dijital Dönüştürücü (ADC) donanımı ortamdan ölçülen sinyalleri sayısal biçime (veri) dönüştürmek, bu verilerin işlenmesi ve depolanıp analiz edilmesini sağlamak üzere bilgisayarlara aktarılması amacıyla kullanılır. Aynı zamanda bu sürecin tersi olarak veri toplama donanımları, bilgisayardan iletilen dijital/analog sinyaller ile bir sistemin kontrolü ya da otomasyonu amacıyla da kullanılırlar.

İlerleyen teknoloji sayesinde veri toplama süreci giderek kolaylaşmaktadır. Bir çok firma ADC donanımlarını sınırlı da olsa sinyal koşullama yapma özelliklerine sahip olacak şekilde üretmektedirler. ADC donanım ekipmanları genelde bilgisayarın ana kartına takılır, ancak günümüzde bilgisayardan bağımsız ADC cihazları da vardır.

### 4.3.4 Veri toplama yazılımı

Bir sistemden toplanan verileri bilgisayara aktarmamızı sağlayan veri toplama kartları bilgisayara yüklü bir yazılım olmadan çalıştırılmazlar. Uygun yazılımların kullanılması sayesinde PC üzerinde veri toplama, veri işleme ve veri izleme işlemleri yapılabilir. Herhangi bir sistem donanımını programlamak (sinyal toplamak, koşullandırmak, veri haline getirmek, veri işlemek, veri depolamak,...) farklı yazılım şekilleri kullanılarak yapılabilir. Bunlar

- Genelde alınan donanım ile birlikte verilen yazılımlar,
- Veri toplama kartının komutlarını doğrudan programlamak,
- Uygulama yazılımlarından faydalanmak (LabVIEW),

şeklindedir. Tercih edilen programlama seçeneği kullanılarak uygun yazılımın oluşturulması ile veri toplama süreci tamamlanır.

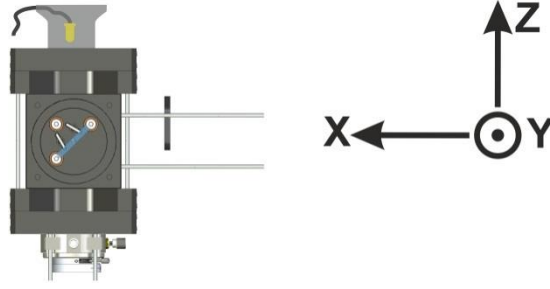
## BÖLÜM 5

### KONUM BELİRLEME BİLEŞENİNİN DÜZENEĞE ENTEGRASYONU

Konum belirleme bileşeninin optik tuzaklama düzeneğine entegrasyonu üç aşamalı bir süreci içermektedir. İlk aşama, tuzaklanmış olan mikroskobik parçacıklardan saçılmış olan lazer ışınlarının uygun bir şekilde toplanarak dedektör üzerine düşürülmesine olanak sağlayan optik bileşenlerin yerleşimi ve ışın yolu ayarlamalarının yapılmasından oluşur. İkinci aşama ise dedektör tarafından algılanan sinyalin dedektör kontrolörüne ulaştıktan sonra otomasyon bilgisayarına aktarılması için uygun donanım altyapısının oluşturulmasını içerir. Son aşamada ise elde edilen sinyallerden faydalanarak hassas konum belirleme amacıyla gerek duyulan yazılımların oluşturulması sağlanır. Bu bölümde bahsedilen aşamalar detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

#### 5.1 Konum Belirleme Optik Bileşenlerinin Düzeneğe Yerleştirilmesi ve Işın Yolu Ayarlamaları

Parçacığın konumunda meydana gelen değişiklik sistemin tuzak sertliği değerini bulmada büyük öneme sahip olması nedeniyle konum belirleme bileşenleri kusursuz bir şekilde ayarlanmalıdır. Konum belirleme için oluşturulan QPD konfigürasyonu ayarlamaları şu şekildedir: Numuneden saçılan lazer ışınları dikroik ayna aracılığıyla  $-X$  yönüne yönlendirildiğinden dolayı konum belirleme için kullanılan QPD'de numuneden saçılarak  $-X$  yönüne gelen bu ışınları karşılayacak şekilde yerleştirilmesi gerekir. QPD'yi yerleştirmeden önce, kafes küpünün  $-X$  yönüne bakan yüzündeki çubuk yuvalarına optik eksen kontrolü yapmak için kafes çubukları takıldı ve ayar plakası çubuk üzerinde gezdirilerek optik ekseninde var olan sapmalar dikroik aynanın (Thorlabs Inc., FES0750, USA) kinematik ayarları ile oynanarak düzeltildi (Şekil 5.1).



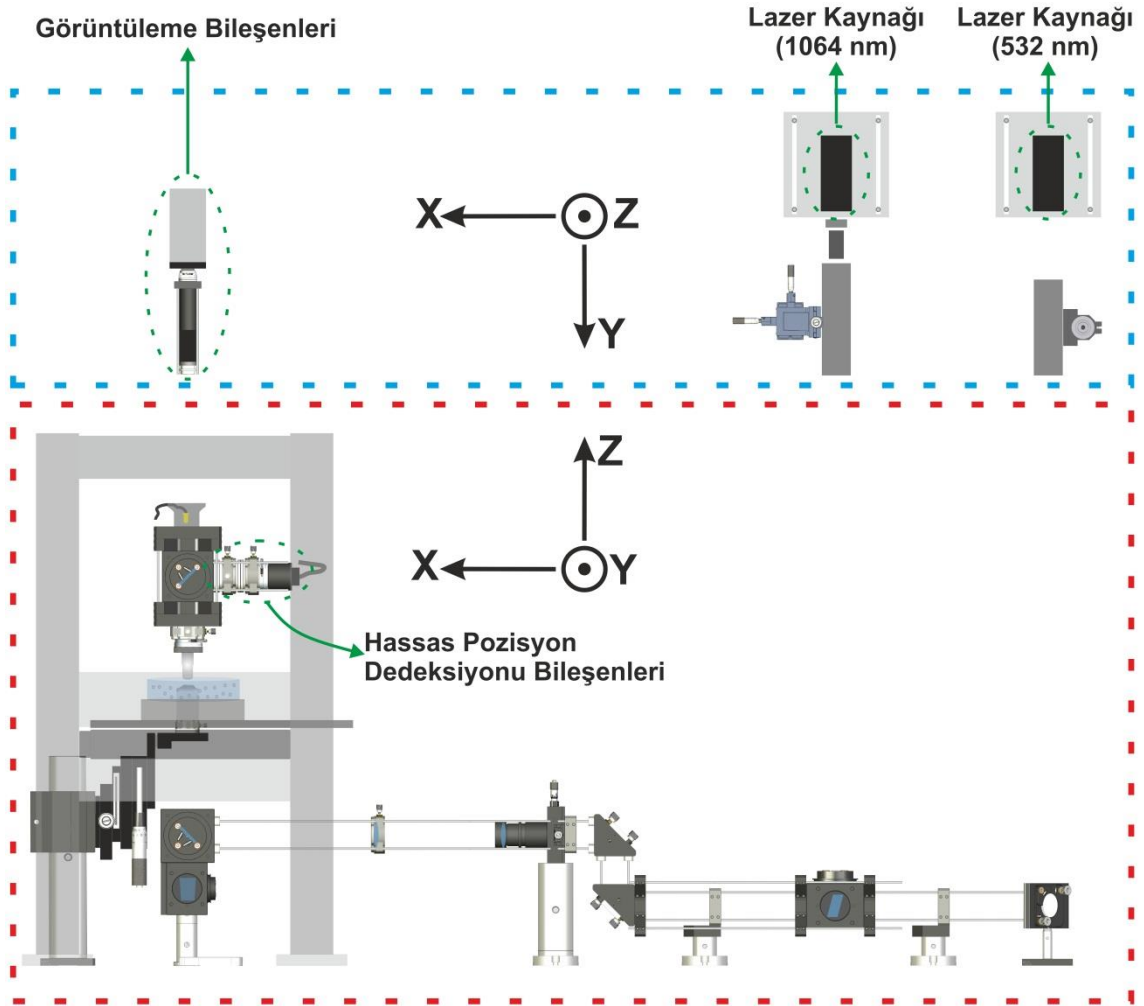
**Şekil 5.1** QPD yolunda optik eksen kontrolü.

Bu çubuklara YZ düzleminde hareket imkânı ( $\pm 1$  mm) veren iki boyutlu optik eleman öteleyici tutucusu (Thorlabs Inc., HPT1, USA) takıldı ve öteleyiciye odak uzaklığı 40 mm olan bir bi-konveks mercek (Thorlabs Inc., LB1027-C, USA) yerleştirildi. Burada mercek kullanılmasının amacı kondenserden saçılarak gelen lazer ışınlarının tekrar toplanarak QPD üzerine uygun büyüklükte düşürülmesini sağlamaktır. QPD üzerine düşen ışınların QPD'ye zarar vermesini ve aynı zamanda QPD'nin doyuma ulaşarak hassasiyetinin değişimini önlemek üzere kullanılacak olan filtre yine iki boyutlu bir optik eleman öteleyici tutucusuna takıldı. Lazerden gelen ışınların çevreye ve çalışan kişilere zarar vermesini önlemek ve QPD'ye gürültü kaynağı olabilecek ışık kaynaklarından gelebilecek ışığı engellemek amacıyla ışın yolu lens tüpleri (Thorlabs Inc., SM1T2, USA) ile kapatıldı. Gelen lazer ışınının istenen büyüklüğe indirgenmesine imkân veren bir iris (Thorlabs Inc., SM1D12, USA), filtrenin yerleştirildiği optik eleman öteleyici tutucusuna yerleştirildi. İrisin  $-X$  yönüne bakan ucuna QPD tutucu adaptörü takıldı. Şekil 5.2'de gösterildiği gibi, bu adaptöre QPD yerleştirilmeden önce güç kontrol cihazı yerleştirilerek bu cihazda en büyük güç ölçüm değerinin okunduğu konum belirlendi.



**Şekil 5.2** QPD tutucusuna yerleştirilen güç kontrol cihazı.

Sonra lazer güç kontrol cihazı çıkartılarak yerine QPD yerleştirildi. QPD ile mercek arası yaklaşık olarak merceğin odak uzaklığına eşit olan 40 mm'ye sahiptir. Düzenek hassas konum belirlemeyi sağlayacak bileşenin yerleştirilmesi ile Şekil 5.3'deki hali almıştır.



**Şekil 5.3** Hassas konum belirlemeye olanak sağlayan bileşenlerin entegre edilmesiyle deney düzeneğinin son görüntüsü.

## 5.2 Donanım

Deney sistemimizde iki adet bilgisayar mevcuttur. Bunlardan birisi, yüksek hızlı bir işlemciye sahip (2,61 GHz AMD Phenom (tm) II X3710) ve 7 tane kart girişine

olarak tanıyan anakart (GA-MA790XT-UD4P (5 PCIE+2PCI)) bileşenlerinden oluşan otomasyon bilgisayarıdır. Offline veri analizinde kullanılacak olan diğer bilgisayar ise yüksek performansa sahip bir workstation'dır (HP, XW9400, USA). Düzenek otomasyonu amacıyla otomasyon bilgisayarına takılması gereken ve Çizelge 5.1'de yer alan dört adet kart bilgisayara yerleştirildi.

**Çizelge 5.1** Otomasyon bilgisayarına takılan kartlar.

<b>Bilgisayar Kartı (Slot Tanımı)</b>	<b>Üretici ve Model</b>	<b>Kullanım Amacı</b>
Görüntü yakalama kartı (PCIE)	NI, PCI 1410, USA	CCD kamera tarafından toplanan görüntünün gerçek zamanlı olarak takip edilmesini sağlar
DAQ kartı (PCIE)	NI, PCIE-6259, USA	Bilgisayar ile veri toplamak ve bilgisayardan bileşenlere veri göndermek için kullanılmaktadır
8 tane RS232 seri port kartı (PCIE)	NI, NIPCIE-8430/8, USA	R2S32 bağlantı şeklini kullanan cihazların bilgisayar tarafından kontrolünü sağlar (8 tane giriş portu mevcuttur)
Yüksek performanslı GPIB kartı (PCIE)	NI, NIPCIE-GPIB+, USA	QPD kontrolörü ile iletişimi sağlamak için kullanılmıştır

Otomasyon bilgisayarına yerleştirilen kartların birbirleriyle uyumlu olarak sorunsuz çalıştığı test edildi.

### 5.3 Yazılım

Konum belirleme yazılımını nesne tabanlı LabVIEW® (NI,USA) programı kullanılarak yapıldı. Geleneksel metin tabanlı programlama dillerinden farklı olarak görsel programlama dili (G) tabanlı bir grafiksel program geliştirme ortamı olan LabVIEW; veri toplama ve kontrolünde, bilimsel araştırmada, işlem takibinde,

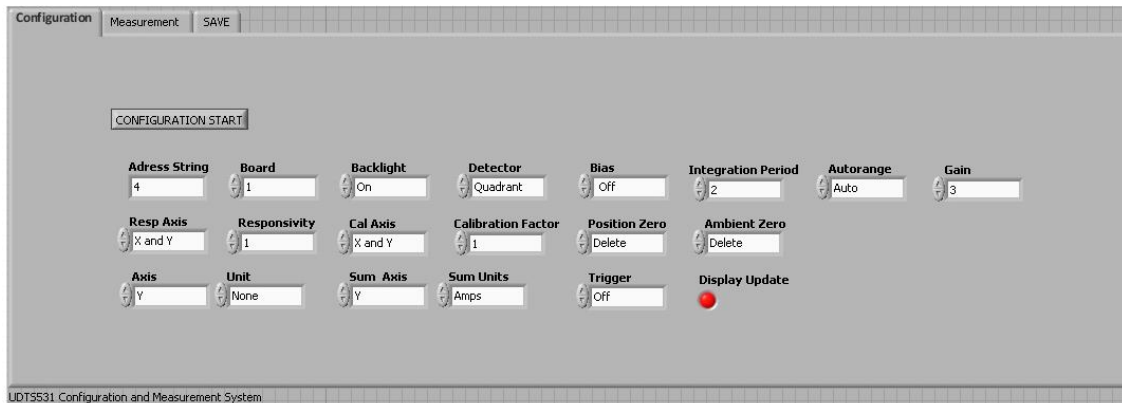
otomasyonda, test ve ölçümde, veri analizi ve veri sunumunda kullanılır. LabVIEW ilk olarak 1980'lerin başında çıkmıştır ve bu tarihten günümüze çok sayıda mühendis, bilim adamı ve teknisyen tarafından kullanılmaktadır. LabVIEW karmaşık ve zor olan kod tabanlı diğer program dillerine (C, C++) karşı güçlü bir programlama dilinin kolay kullanımını sağlar. LabVIEW programı GPIB, VXI, PXI, PCI, seri, ethernet ve USB veri yollarını kullanan 4000 den fazla ölçüm aygıtı için sürücü desteği sağlamaktadır. Ayrıca LabVIEW; Windows, Macintosh ve Linux işletim sistemlerinde kullanılabilir.

Sanal cihaz (visual instrument (VI)) mantığıyla işlem yapan LabVIEW programının ekranı “Front Panel” ve “Block Diagram” olmak üzere sırasıyla ön panel ve blok diyagram diye adlandırılan iki ana kısımdan oluşur. Ön panel kullanıcı arayüzünü oluşturmaya yarayan formlardan oluşurken, blok diyagram ise bu arayüzün mantıksal kısmını içeren metin tabanlı programlama dillerindeki kodlara karşılık gelen görsel hazır fonksiyonlardan ve aynı zamanda sanal cihazlardan oluşur.

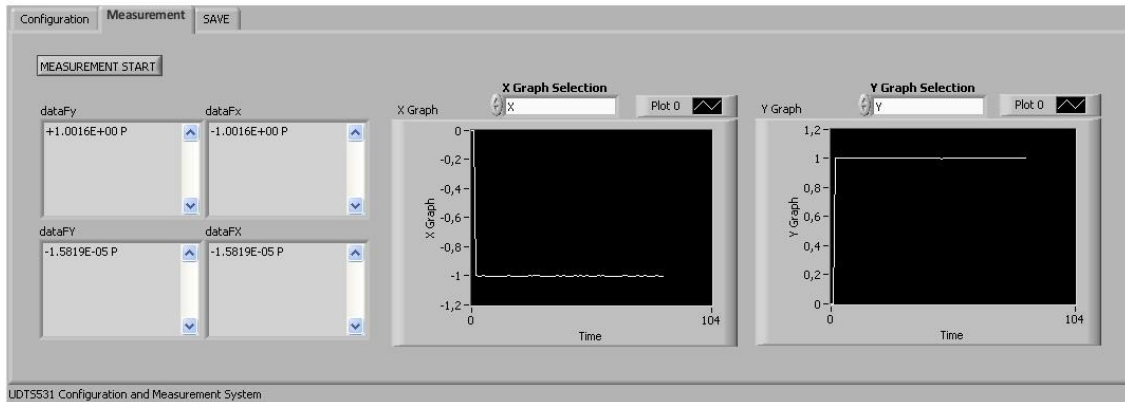
QPD'den gelen ışınları dijital sinyale çevirmek için kullanılan QPD kontrolörünün kendi kontrol programı olmasına rağmen ileride OT sisteminin bütün bileşenlerinin tek bir programda birleştirilmesi düşünüldüğü için ve toplanan bu verilerin düzenli bir rapor dosyasında saklanabilmesi için LabVIEW programı kullanıldı. Otomasyonda kullandığımız yazılım, LabVIEW programında yazılmış ve birbirine entegre edilmiş şu üç modülden oluşmaktadır;

- Konfigürasyon modülü,
- Ölçüm modülü,
- Raporlama modülü.

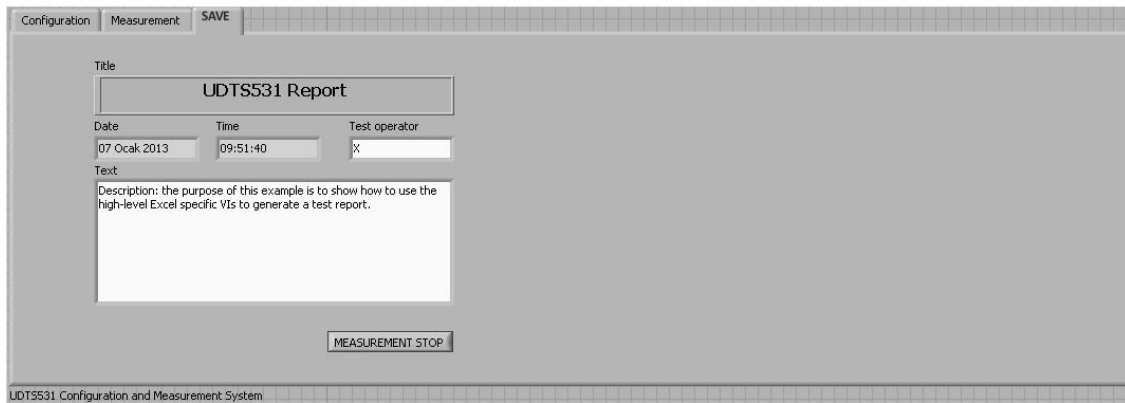
Bu üç modül de aynı ekran üzerinde olacağından ve birbiri ile karıştırılmaması istendiğinden LabVIEW programının bir özelliği olan “tab control” ile üç modülün de aynı bir program altında çalışması sağlanmıştır. Modül isimlerinin yazılı olduğu tablara tıklanıldığında istenilen modülün arayüzü ekrana gelmektedir (Şekil 5.4). Bu modüllerin işlevleri ayrıntılı olarak izleyen kısımlarda sunulmaktadır.



a)



b)



c)

**Şekil 5.4** Otomasyon programının arayüz görüntüleri: a) konfigürasyon modülünün arayüz görüntüsü, b) ölçüm modülünün arayüz görüntüsü, c) raporlama modülünü arayüz görüntüsü.

### 5.3.1 Konfigürasyon modülü

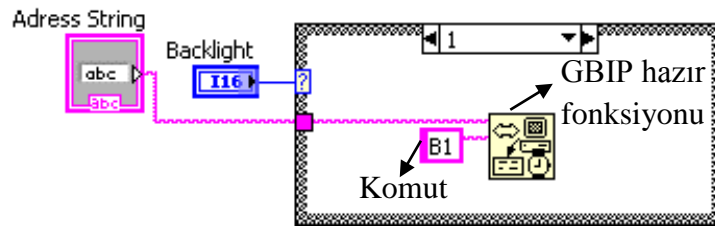
Konfigürasyon modülü, deneysel verilerin toplanması öncesinde QPD kontrolörü parametrelerinin uygun başlangıç değerleri girişi ile yapılandırılmasını sağlar. Modülün kullanıcı arayüzü kullanım kolaylığı sağlaması açısından test amaçlı kullandığımız kontrol ünitesi ile birlikte verilen yazılımın kullanıcı arayüzüne benzer olarak dizayn edildi (Şekil 5.4a). Çizelge 5.2’de bu modül üzerinde bulunan parametrelerin adları ve kullanım amaçları yer almaktadır. Bu parametre girişlerini sağlamak için QPD kontrol cihazının kullanım kılavuzunda verilen komutlar kullanılmıştır.

**Çizelge 5.2** Konfigürasyon modülünde bulunan parametreler ve açıklamaları.

Parametrenin Adı	Açıklama
Configuration Start	Yapılan ayarların cihaza gönderilmesini başlatır
Adress String	Cihazın, bilgisayarla iletişim kurması için giriş adresini bildirir
Board	Cihaz içinde bulunan iki karttan birini seçmeye yarar
Backlight	Arka plan ışığını açıp kapatmaya yarar
Detector	Dedektör tipini seçmeye yarar
Bias	Detektör denetim gerilimini seçmeye yarar
Integration Period	Periyot cihazdan elde edilen ölçüm bilgisinin zamanıdır
Autorange	Hesaplanacak olan gainin (kazanç) modunu belirlemeye yarar
Gain	3 ile 7 arasında gain seçmeye yarar
Resp Axis	Duyarlılık eksenini seçer
Responsivity	Duyarlılık değerini girmeyi sağlar
Cal Axis	Kalibrasyon faktörünün girileceği eksenini seçmeye yarar
Calibration Factor	Görüntülenen konum skalası için kalibrasyon faktörünü ayarlar
Position Zero	Konumu sıfırlamaya ve ayarlamaya yarar
Ambient Zero	Arka plan ışık şiddetinin eliminasyonu amacıyla kullanılır
Unit	Konum birimini seçer (inç, metre, arc saniye, derece, radyan)
Axis	Konum biriminin hangi eksenlere uygulanacağını belirler
Sum Units	Güç birimini seçer (Amper, Watt)
Sum Axis	Güç biriminin hangi eksenlere uygulanacağını belirler
Trigger	Tetikleyici açma ve kapatmaya yarar



Modülün programlama aşamasının gerçekleştiği kısım blok diyagramıdır. Bu diyagram LabVIEW'deki gerekli karar yapıları ve döngüler kullanılarak oluşturulmuştur. Bu aşamada QPD kontrolör cihazının komutları bilgisayar aracılığı ile doğrudan bu cihaza gönderilir. Bunun için LabVIEW programının “Functions” paletindeki “Instrument I/O” içinde bulunan GPIB hazır fonksiyonları kullanılmıştır. Bu işlemlerin sonunda cihazın bilgisayar ile iletişimi sağlanmıştır. Bu duruma örnek olarak otomasyon programının bir parçasının görüntüsü Şekil 5.5’de gösterilmiştir.



**Şekil 5.5** UDT531 cihazı komutlarının GPIB hazır araçlarına yazılmasıyla cihazın arka plan ışığının yanmasını sağlayan otomasyon programının bir parçasının görüntüsü.

Konfigürasyon modülünün blok diyagramı Şekil 5.6’da gösterilmiştir. Kontrolör ünitesi, otomasyon bilgisayarına GPIB kartı ile bağlanmaktadır ve cihazın GPIB adresi “4” olduğu için blok diyagramın ilk aşamasında bu rakam cihaza gönderilmiştir. Bu aşamada ilk zamanlarda program her açıldığında GPIB adresi “adress string” parametresine girilmekteydi. Daha sonra zaman kazanmak açısından bu değer sabitlenmek istendi. Bunun için parametre sağ tıklanığında “Data Operations \ Make Current Value Default” yolu izlenerek bu değer sabit hale getirildi. Bilgisayar ile cihaz arasında gerekli etkileşim sağlandıktan sonra Şekil 5.4a’da görülen her bir parametre için ayrı ayrı karar yapıları açılarak gerekli komutlar, konfigürasyon modülünün arayüzünde bulunan “Configuration Start” butonuna basılmasıyla cihaza gönderilmiştir. Bu sayede kullanıcı tarafından belirlenen cihaz konfigürasyonu ile QPD kontrolörü ölçüm almaya hazır hale getirilir. Konfigürasyon modülünün çalışmaları tamamlandıktan sonra ölçüm modülü çalışmalarına geçilmiştir.



### 5.3.2 Ölçüm modülü

Ölçüm modülü, deneysel ölçüm işleminin başlatıldığı ve QPD'den toplanan verilerin sürekli olarak okunarak ekranda takip edilmesini sağlayan modüldür. Bu modülün arayüz görüntüsü Şekil 5.4b'de gösterilmektedir. Bu modülde yer alan parametreler ve açıklamaları Çizelge 5.3'de verilmektedir.

**Çizelge 5.3** Ölçüm modülünde bulunan parametreler ve açıklamaları.

Parametrenin Adı	Açıklama
Measurement Start	Ölçüm sürecinin başlamasını sağlar
dataFy	Konumun Y eksenini bileşeni bilgisini gösterir
dataFY	Y eksenini için güç bilgisini gösterir
dataFx	Konumun X eksenini bileşeni bilgisini gösterir
dataFX	X eksenini için güç bilgisini gösterir
X Graph Selection	X eksenini için konum ya da güç grafiğini seçer
Y Graph Selection	Y eksenini için konum ya da güç grafiğini seçer

Modül üzerinde yer alan “Measurement Start” butonuna basıldığı anda sistem zamanı okunarak QPD'deki veriler bilgisayara aktarılır ve aynı zamanda konum/güç verilerinin zamanla değişim grafikleri de çizilmeye başlar.

Şekil 5.4b'de görüldüğü gibi alınan verilerin görüntülediği ekranlara QPD'den gelen konum bilgisi dizi (string) şeklindedir ve her bir konum bilgisi 13 karakterden oluşmaktadır. Buradaki ilk karakter olan “+/-” yönelimi temsil etmektedir. Bundan sonra gelen 6 karakter konumun sayısal değerini, 8. karakter olan “E” verinin eksponansiyel mertebesini gösterirken, 9. karakter üssün “+/-” işaretini, 10. ve 11. karakterler ise üssün sayısal değerini ifade etmektedir. 12. karakter olan boşluktan sonra gelen 13. karakter ise sinyalin durumunu belirtir. Bu karakter O, P ve N değerlerini alır (Çizelge 5.4).

**Çizelge 5.4** 13. sinyalin durumunu belirten harfler.

<b>Karakterler</b>	<b>Açıklama</b>
O	A/D dönüştürücüden gelen sinyalin skala dışında olduğunu belirtir
P	Verinin bir önceki veri ile aynı olduğunu belirtir
N	Yeni bir veri değeri geldiğini belirtir

Ölçüm modülünün blok diyagramı Şekil 5.7’de gösterilmektedir. Kontrol ünitesinin ölçüm almaya başlaması üniteye “G” komutunun gönderilmesini gerektirir (Ek-A). Cihazdan okunan verilerin Şekil 5.4b’de görülen dört adet konum göstergesine yazdırılması için yine kontrol ünitesinin komutları gerekli karar yapılarına girilerek cihaza gönderilmiştir. Cihaza gönderilen bir adet komut karşılığında cihazdan bir adet veri okunmaktadır. Sürekli veri okunması için aynı komutun “dur” komutu gönderilene kadar sürekli gönderilmesi gerekir. Bu işlemin kontrolör hafızasının dolmasına ve sonrasında cihazın donmasına neden olduğu gözlemlendi. Kontrol ünitesine ölçüm verisini okumak için gönderilen her komut cihazın hafızasında kaldığı için otomasyon programının konfigürasyon modülünün blok diyagramında “adres string” işleminden sonra LabVIEW programının “GPIB Clear Function” özelliğinden yararlanarak bir silme komutu gönderilmiştir (Şekil 5.6). Bu sayede cihaz okuduğu her veriyi bilgisayara aktardıktan sonra hafızasından siler ve bunun sonucunda kontrolör ünitesinin donma problemi çözülmüştür. QPD’den okunan bilgiler eksponansiyel veri formatındadır. Bu değerleri nümerik sayı formatına çevirmek için “Fract/Exp String To Number” özelliği kullanılmıştır. Bu dört göstergeden toplanan veriler nümerik sayıya çevrildikten sonra, ölçüm arayüzünde görünmemesi için gizlenmiş olan bir tabloda toplanmıştır. Buradaki veriler, LabVIEW programının grafik çizdirme araçlarına gönderilerek grafik haline çevrilmiştir. Şekil 5.4b’de dört tane konum göstergesi olmasına rağmen iki tane grafik alanı gözükmemektedir. Grafik alanlarından biri X eksenini için, diğeri de Y eksenini içindir. Oluşturulan grafik seçme özelliği sayesinde aynı alan üstünde iki tane grafik (biri o eksen için konum bilgisini verirken diğeri güç (toplam veri) bilgisini verir) görüntülenebilmektedir.



### 5.3.3 Raporlama modülü

Ölçme işlemi de tamamlandıktan sonra toplanan verilerin işlenmek üzere düzenli bir şekilde bilgisayarda saklanması gerekir. Bunun için LabVIEW'in Microsoft Office programları ile uyumlu bir şekilde rapor alınmasına olanak sağlayan eklentisi (NI LabVIEW Report Generation Toolkit for Microsoft Office) kullanılmıştır. Şekil 5.4c'de görüldüğü gibi yazılım üstünde deneyi yapan kullanıcı ismi ve deneyle ilgili kullanıcı notlarının yazılmasına imkân sağlayan tekst bilgi girişi vardır. Raporlama modülü üzerinde bulunan her bir parametrenin işlevleri Çizelge 5.5'de verilmiştir.

**Çizelge 5.5** Raporlama modülünde bulunan parametreler ve açıklamaları.

Parametrenin Adı	Açıklama
Date	Raporun alındığı deneysel verinin toplandığı tarihi belirtir
Time	Raporun alındığı deneysel verinin toplandığı zamanını belirtir
Text Operator	Deneyi yapan kişinin ad ve soyad bilgilerini belirtir
Text	Deney hakkında not girilmesini sağlar
Measurement Stop	Veri toplama sürecinin sonlandırılmasını sağlar

QPD kontrolör ünitesinden toplanan verilerin tablo formunda olmasından ve sonrasında bu veriler aracılığıyla analiz yapılacağından dolayı excel dosyası yaratmak uygun görülmüştür. Yaratılan excel dosyasının da otomasyon bilgisayarında belli bir klasör içinde düzenli olarak arşivlenmesi istendiğinden verilecek dosya adının “gün.ay.yıl\_saat-dakika-saniye” şeklinde olmasında fayda görülmüştür. Şekil 5.4c'deki “Measurement Stop” butonuna basılmasıyla beraber sistem saati okunarak bahsedilen excel dosyası yaratılır (Şekil 5.8). Yaratılan dosyanın içinde deney başlangıç saati ve bitiş saati bulunmaktadır, böylece deneyin ne kadar sürdüğü anlaşıldığı gibi ne kadar zamanda kaç tane veri okunduğu hakkında da yorum yapılabilir. Ayrıca bu dosyada konfigürasyon modülü kısmında girilen bilgiler de yer almaktadır. Bu durum, raporu okuyan bir kişinin deney esnasında hangi parametreleri kullanarak veri toplandığını

anlaması açısından önemlidir. Ayrıca elde edilen sonuçların excel dosyası şeklinde kaydedilmesi grafik çizdirme aşamasında kolaylık sağlayacaktır.

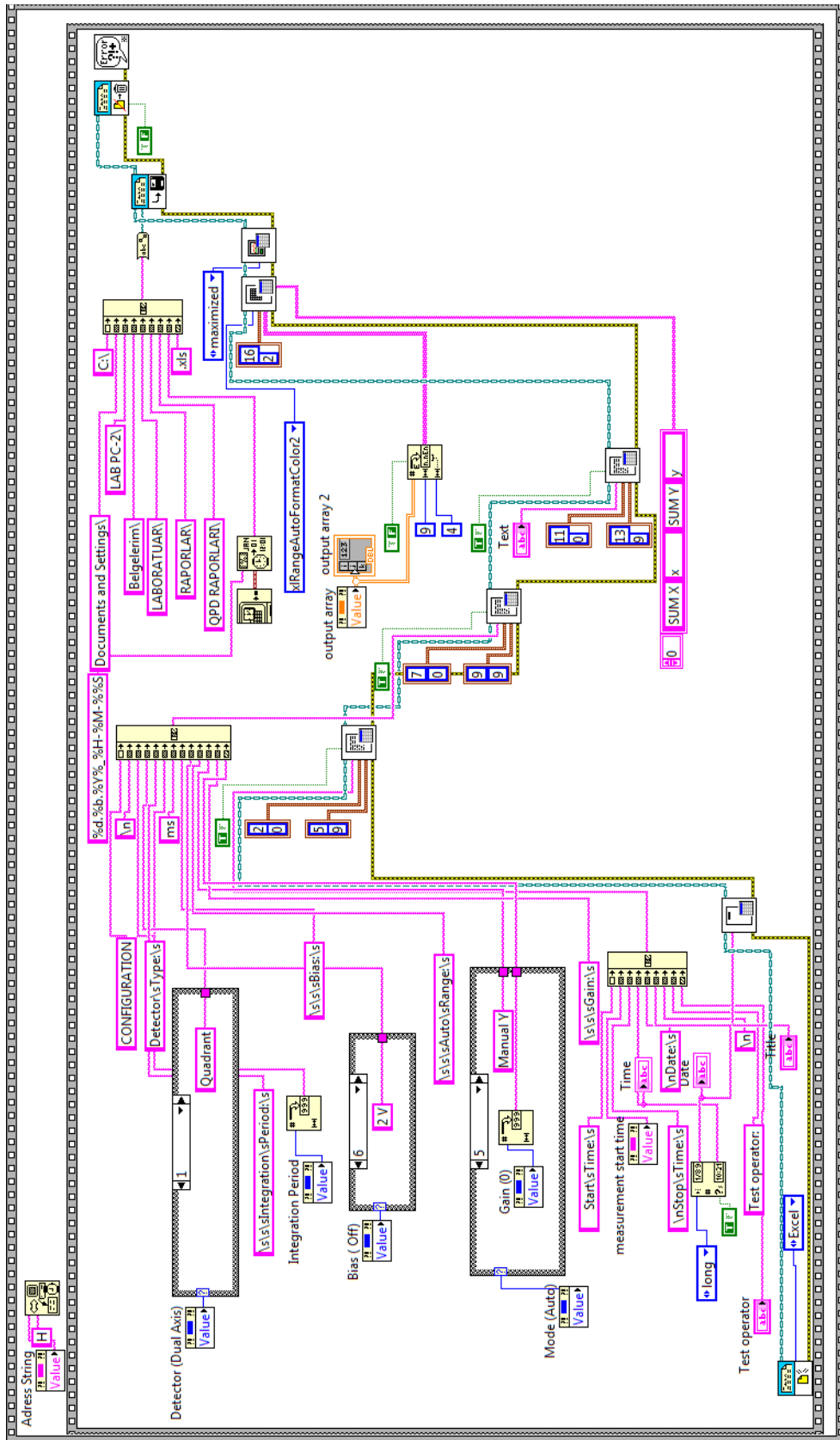
SUM X	x	SUM Y	y
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
-5,14E-07	-1,00E+00	-5,14E-07	1,01E+00
-5,14E-07	-1,00E+00	-1,01E-06	1,00E+00
-1,01E-06	-1,00E+00	-1,11E-05	1,00E+00
-1,11E-05	-1,00E+00	-1,11E-05	1,00E+00
-1,52E-05	-1,00E+00	-1,52E-05	1,00E+00
-1,46E-05	-1,00E+00	-1,46E-05	1,00E+00
-1,46E-05	-1,01E+00	-1,43E-05	1,00E+00
-1,43E-05	-1,01E+00	-1,46E-05	1,00E+00
-1,46E-05	-1,00E+00	-1,46E-05	1,00E+00
-1,52E-05	-1,00E+00	-1,52E-05	1,00E+00
-1,53E-05	-1,00E+00	-1,53E-05	1,00E+00
-1,53E-05	-1,00E+00	-1,48E-05	1,00E+00

Şekil 5.8 Yaratılan excel dosyasının görüntüsü.

Raporlama modülünün blok diyagramında Microsoft Office belgelerini almak için kullandığımız eklentinin VI'ları kullanılmıştır (Şekil 5.9). Bu aşamada örnek bir VI bulunarak bu VI planlanan raporlama işlemini gerçekleştirecek şekilde modifiye edilmiştir. Oluşturulan raporlama modülünün blok diyagramı şu şekildedir: İlk başta

konfigürasyon kısmında girilen bazı parametre değerleri aynen okunarak bir tablo oluşturulur ikinci aşamada, deney başlangıç saatini, bitiş saatini, sistem tarihini ve deneyi yapan kişiyi gösteren diğer bir tablo oluşturulduktan sonra cihazdan okunan verilerin bulunduğu son tablo oluşturulur. Dosya adı ve kayıt yeri bilgilerinin girişi de yapıldıktan sonra excel dosyası yaratılır.





Şekil 5.9 Raporlama modülünün blok diyagramı görüntüsü.

## BÖLÜM 6

### SONUÇ VE TARTIŞMA

Optik tuzaklama düzeneği biyomoleküllerde mekanik (statik ve dinamik) incelemeye olanak tanıyan bir düzenektir. Çift sarmal DNA (dsDNA)'nın karakteristik olarak uygulanan kuvvete verdiği tepkinin incelenmesi çalışması (Smith, et al., 1996) bu araştırmalara örnek olarak verilebilir. Bu araştırmalardan anlaşılacağı üzere incelenen numunenin mekanik özelliklerini elde etmek için sistemden sayısal veriler elde etme olanağı sunan QPD, optik tuzaklama düzeneğinin önemli bir bileşenidir. Bu tez çalışmasında; Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu'nun 2008-19019 numara ve “*Kuvvet Spektroskopisi Yöntemiyle DNA Molekülünün Mikromekaniksel Özelliklerinin İncelenmesi*” başlıklı projesi ile kurulumu gerçekleştirilmekte olan optik tuzaklama düzeneğine bir hassas konum belirleme ünitesinin entegrasyonu çalışması gerçekleştirilerek bu bileşenin uygulanabilirlik karakterizasyonu yapılmıştır. Entegre edilen bu bileşeni bilgisayar aracılığıyla kontrol etmek ve toplanan verilerin analizini yapmak için LabVIEW programı kullanılarak düzenek otomasyonu sağlanmıştır. Tuzaklanan mikrokürenin yer değiştirmesinin ve üzerine etkileyen tuzaklama kuvvetinin hassas ölçümü için başlangıç kalibrasyon çalışmaları yapılmıştır. Kuvvet ve yer değiştirmenin nanoskaladaki hassas ölçümleri konum ölçümündeki kalibrasyonun kalitesine bağlıdır. Araştırmanın ilerleyen aşamalarında konum ve kuvvet kalibrasyonunun hassas bir şekilde gerçekleştirilmesi için çalışmalar sürdürülmektedir.

Ölçüm sonucunda elde edilen sinyal verileri ile doğru bir analiz yapılabilmesi çok önemlidir. Bu durum, gelen analog sinyalleri dijital sinyallere çevirirken kullanılan donanımın veri toplama hızının numunede gerçekleşen fiziksel olayların hızı ile uyumlu olması ile sağlanabilir. Her ne kadar entegrasyonu sağlanan hassas konum belirleme bileşeni düşük frekanslı sinyallerin analizi ile uyumlu olsa da kullanılan donanımın sahip olması gereken hızı “Nyquist Örnekleme Teoremi” ile belirlenmelidir. Bu teoreme göre çevrilmek istenilen sinyal içindeki en yüksek frekanslı bileşenin en az iki

katına eşit ya da daha büyük frekansta örnekleme yapılmalıdır. Ancak bu çalışmada kullanılan QPD kontrolörünün dinamik aralık frekansının (1.6 kHz) incelenmesi sonucunda planlanan numunelerin dinamik aralık frekansı ile uyum sağlamadığı gözlenmiştir. Bu durum, numuneye özgü dinamik parametrelere ait önemli verilerin elde edilememesine neden olmaktadır. Dolayısıyla incelenmesi planlanan numunelerin detaylı karakterizasyonlarının yapılması mümkün olmayacaktır. Bu nedenle bir sonraki aşamada daha geniş bant aralığına sahip bir QPD konfigürasyonuna geçilmesine karar verilmiştir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1 Alınması planlanan QPD (QP50-6SD2).

Deneyimizde kullandığımız QPD dedektöründen elde edilen analog sinyal QPD kontrolörüne entegre ADC tarafından dijital sinyale dönüştürülür. Bu ADC'ye özgü örnekleme frekansı 1.6 kHz olup herhangi bir müdahale ile değiştirilememektedir. Öte yandan sisteme eklenmesi planlanan QPD modülü, sinyal koşullama işlemi modüle entegre devre ile yaparken analog/dijital dönüşümü işlemi ise bilgisayara takılı DAQ (veri toplama kartı) kartı sayesinde yapılacaktır. Belirlenen yeni QPD'ye ait özellikler Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1 QP50-65D2'nin teknik özellikleri.

<b>Çıkış akımı</b>	: 25 mA
<b>Maksimum yetiştirme hızı</b>	: 10 V/ $\mu$ S
<b>Teorik gürültü</b>	: 15nV/ $\sqrt{Hz}$
<b>Bant genişliği</b>	: 250 kHz

Böylece örnekleme frekansı DAQ'ın okuma hızına nazaran daha küçük olan QPD dedektörün bant genişliği olan 250 kHz'e yükseltilecektir. Bu örnekleme frekansı ise incelenmesi planlanan numunelerdeki dinamik değişimleri incelemek açısından oldukça yeterlidir. Halen Şekil 6.1'deki ünitenin mevcut düzenekteki QPD ile değiştirilmesi ve DAQ kartının entegrasyonu çalışmaları devam etmektedir.

**KAYNAKLAR DİZİNİ**

- Ashkin, A., 1980, Forces of a Single-Beam Gradient Laser Trap on a Dielectric Sphere in The Ray Optics Regime, *Biophysics Journal*, vol. 61, 569-582 p.
- Ashkin, A., Dziedzic J.M, Yamane, T, 1987, Optical Trapping and Manipulation of Single Cells Using Infrared Laser Beams, *Nature*,330, 769-771 p.
- Ashkin, A., Dziedzic J.M, 1971, Optical Levitation by Radiation Pressure, *Appl. Phys. Lett.*, vol.19, 283-285 p.
- Ashkin, A., Dziedzic, J., Bjorkholm J., Chu, S., 1986, Observation of A Single-Beam Gradient Force Optical Trap For Dielectric Particles, *Opt Lett*,11, 288–290 p.
- Ashkin, A., Dziedzic, J., 1987, Optical Trapping and Manipulation of Viruses and Bacteria, *Science New Series*, Vol. 235, No.4795., 1517–1520 p.
- Ashkin, A., Dziedzic, J., 1989, Optical Trapping and Manipulation of Single Living Cells Using Infra-red laser Beams, *Ber. Bunsenges. Phys. Chem. Chem. Phys.* 93, 254 p.
- Ashkin, A., Dziedzic J., Bjorkholm J., Chu S., 1986, Observation of A Single-Beam Gradient Force Optical Trap For Dielectric Particles, *Opt Lett* 11, 288–290 p.
- Ashkin, A., Schütze, K., Dziedzic, J.M., Euteneuer, U., Schliwa, M., 1990, Force Generation of Organelle Transport Measured In Vivo by An Infrared Trap, *Nature* 348, 346-348 p.
- Bennink, M. L., Schärer, O.D., Kanaar, R., Sakata-Sogawa, K., Schins, J.M., Kanger, J.S., De Grooth, B.G., Greve J., 1999, Single-molecule Manipulation of Double-stranded DNA Using Optical Tweezers: Interaction Studies of DNA with RecA and YOYO-1. *Cytometry* 36, 200-208 p.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Block, S.M., Blair, D.F. and Berg, H.C., 1989, Compliance of Bacterial Flagella Measured with Optical Tweezers, *Nature*, vol. 338, 514–518 p.
- Cheezum, M.K., Walker, W. F., Guilford W.H., 2001, Quantitative Comparison of Algorithms for Tracking Single Fluorescent Particles, *Biophys.J.* 81,2378-2388 p.
- Crocker, J.C. and Grier, D.G., 1996 , Methods of Digital Video Microscopy for Colloidal Studies, *J. Colloid Interface Sci.*, 179, 298-310 p.
- Gosse, C. and Croquette, V., 2002, Magnetic Tweezers: Micromanipulation and Force Measurement at the Molecular, Level *Biophys. J.*, 82, 3314-3329 p.
- Gündüz, S., 2013, Kararlı Bir Optik Tuzaklama Düzenineğin Tasarımı ve Kurulumu, Yüksek Lisans Tezi, ESOGÜ, 84 s. (yayımlanmamış)
- Harada, Y., Asakura T., 1996, Radiation forces on a dielectric sphere in the Rayleigh scattering regime, *Optics Communications*, vol. 124, 529-541 p.
- Kepler, J., 1619, *De Cometis Libelli Tres*, AugustæVindelicorum, 150 p.
- Keller, M., Schilling, J. and Sackmann, E., 2001, Oscillatory Magnetic Bead Rheometer for Complex Fluid Microrheometry, *Rev. Sci. Instrum.*, 72, 3626 -3634 p.
- Kittel, C., 1996, *Katıhal Fiziğine Giriş*, (Çev. B. Karaoğlu), Bilgi Tek Yayınları, İstanbul, 434 s.
- Lebedev, P.N., 1901, Experimental Examination of Light Pressure, *Ann. Phys.* (Leipzig) 6, 433, 1-26 p.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

Maxwell, J. C., 1871, Theory of Heat, Dover Publications, 1-248 p.

Neuman, K.C., Chadd EH., Liou GF., Bergman K., Block SM., 1999, Characterization of Photodamage to Escherichia coli in Optical Traps, Biophysics Journal, vol. 77 2856-2863 p.

Nichols, E.F., Hull, G.F., 1901, A Preliminary Communication on the Pressure of Heat and Light Radiation, *Phys. Rev.* 13, 307-320 p.

Omar, M.A., 1975, Elementary Solid State Physics: Principles and applications, Addison-Wesley Publishing Company, USA, 669 p.

Sakata-Sogawa, K., Kurachi, M., Sogawa, K., Kuriyama, Y. F., Tashiro H., 1998, Direct Measurement of DNA Molecular Length in Solution Using Optical Tweezers: Detection of Looping Due to Binding Protein Interactions, European Biophysics Journal, volume 27 Number 1, 55-61 p.

Simmons, R.M., Finer, J.T., Chu S. and Spudich, J.A., 1996, Quantitative Measurements of Force and Displacement Using An Optical Trap, *Biophys. J.*, vol. 70, 1813–1822 p.

Smith, S.B., Cui Y, Bustamante C., 1996, Overstretching B-DNA: The Elastic Response of Individual Double-Stranded and Single-Stranded DNA Molecules. *Science*, vol.271 no.5250, 795-799 p.

Smith, W.T., 1986, Principles of Materials Science and Engineering, McGraw-Hill Inc., 777 p.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

Svoboda, K., Block, S.M., 1994, Biological Applications of Optical Forces, Annual Reviews, vol.23, 247-285 p.

Thompson, R.E., Larson, D.R. and Webb, W.W., 2002, Precise Nanometer Localization Analysis for Individual Fluorescent Probes, Biophys. J. 82, 2775-2783 p.

Visscher, K., Gross, S.P. and Block S., 1996, Construction of Multiple-Beam Optical Traps with Nanometer-Resolution Position Sensing, IEEE journal of selected topics in quantum electronics, Vol. 2, no. 4, 1066-1076 p.

Wood, D., 1994, Optoelectronics Semiconductor Devices. Prentice Hall, 564 p.

<http://stardust.jpl.nasa.gov/science/hb.html>

[http://www.gamma-sci.com/wp-content/uploads/2012/08/m531\\_Manual.pdf](http://www.gamma-sci.com/wp-content/uploads/2012/08/m531_Manual.pdf)



## EKLER

### EK-A

Bu kısımda QPD kontrol ünitesinin IEEE-488 (GPIB) kontrol komutları yer almaktadır (Çizelge A.1).

**Çizelge A.1** IEEE-488 (GPIB) kontrol komutları  
([http://www.gamma-sci.com/wp-content/uploads/2012/08/m531\\_Manual.pdf](http://www.gamma-sci.com/wp-content/uploads/2012/08/m531_Manual.pdf))

<b>Komutlar</b>	<b>İşlevleri</b>
<b>A</b>	Autorange işlemini ayarlar
<b>AX</b>	Autorange işlemini X eksenini için ayarlar
<b>AY</b>	Autorange işlemini Y eksenini için ayarlar
<b>B1</b>	LCD ekran arka plan ışığını açar
<b>B0</b>	LCD ekran arka plan ışığını kapatır
<b>C</b>	Sistem konfigürasyonunu gönderir
<b>D1</b>	Dedektör tipini “Dual Axis” olarak ayarlar
<b>D2</b>	Dedektör tipini “Quadrant” olarak ayarlar
<b>D3</b>	Dedektör tipini “Single Axis” olarak ayarlar
<b>D4</b>	Dedektör tipini “Duo-Lateral” olarak ayarlar
<b>E</b>	X ve Y eksenlerinin kalibrasyonunu ayarlar
<b>EX</b>	X ekseninin kalibrasyonunu ayarlar
<b>EY</b>	Y ekseninin kalibrasyonunu ayarlar
<b>Fx</b>	X eksenini için konum bilgisini gönderir

<b>Fy</b>	Y eksenini için konum bilgisini gönderir
<b>FX</b>	X eksenini için toplam bilgiyi gönderir
<b>FY</b>	Y eksenini için toplam bilgiyi gönderir
<b>G</b>	Ölçüm aşamasını başlatır
<b>H</b>	Ölçüm aşamasını durdurur
<b>I[%]</b>	Entegrasyon zamanını ayarlar (1 ms – 32000 ms)
<b>J0</b>	Ekran güncellemeyi devre dışı bırakır
<b>J1</b>	Ekran güncellemeyi aktif hale getirir
<b>M [%]</b>	Manüel değişim işlemini ayarlar
<b>MX [%]</b>	Manüel değişim işlemi için X eksenini ayarlar
<b>MY [%]</b>	Manüel değişim işlemi için Y eksenini ayarlar
<b>N1</b>	Board 1'i seçer
<b>N2</b>	Board 2'yi seçer
<b>Q1</b>	Ambient Zero ayarlar
<b>Q0</b>	Ambient Zero siler
<b>QX1</b>	X eksenini için Ambient Zero ayarlar
<b>QX0</b>	X eksenini için Ambient Zero siler
<b>QY1</b>	Y eksenini için Ambient Zero ayarlar
<b>QY0</b>	Y eksenini için Ambient Zero siler
<b>R</b>	X ve Y eksenleri için duyarlılığı ayarlar
<b>RX</b>	X eksenini için duyarlılığı ayarlar
<b>RY</b>	Y eksenini için duyarlılığı ayarlar
<b>S</b>	Durumu gönderir

<b>T0</b>	Trigger'i kapalı ayarlar
<b>T1</b>	Dahili Trigger'i ayarlar
<b>T2</b>	Harici Trigger'i ayarlar
<b>USX1</b>	Toplam X birimini amper olarak ayarlar
<b>USX2</b>	Toplam X birimini watt olarak ayarlar
<b>UX1</b>	X eksenini birimini yok olarak ayarlar
<b>UX2</b>	X eksenini birimini inç olarak ayarlar
<b>UX3</b>	X eksenini birimini metre olarak ayarlar
<b>UX4</b>	X eksenini birimini arc saniye olarak ayarlar
<b>UX5</b>	X eksenini birimini derece olarak ayarlar
<b>UX6</b>	X eksenini birimini radyan olarak ayarlar
<b>V0</b>	Voltaj yok
<b>V1</b>	Voltajı "-5 v" olarak ayarlar
<b>V2</b>	Voltajı "-2 v" olarak ayarlar
<b>V3</b>	Voltajı "-1 v" olarak ayarlar
<b>V4</b>	Voltajı "0 v" olarak ayarlar
<b>V5</b>	Voltajı "1 v" olarak ayarlar
<b>V6</b>	Voltajı "2 v" olarak ayarlar
<b>V7</b>	Voltajı "5 v" olarak ayarlar
<b>ZX1</b>	X eksenini için Position Zero ayarlar
<b>ZX0</b>	Ölçüm verisinden Position Zero siler