

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**LiNbO₃ TABANLI ŞİDDET KİPLEYİCİSİ TASARIMI, ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

Seval DÖNERTAŞ

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2014**

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Seval DÖNERTAŞ tarafından hazırlanan “**LiNbO₃ Tabanlı Şiddet Kipleycisi Tasarımı, Üretimi ve Karakterizasyonu**” adlı tez çalışması 12/06/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Barış AKAOĞLU
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri :

Başkan : Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY
Bilkent Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Doç. Dr. Barış EMRE
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Doç. Dr. Barış AKAOĞLU
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. İbrahim DEMİR
Enstitü Müdürü

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

12.06.2014

Seval DÖNERTAŞ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

LiNbO₃ TABANLI ŞİDDET KİPLEYİCİSİ TASARIMI, ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Seval DÖNERTAŞ

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Barış AKAOĞLU

Bu tezde, LiNbO₃ (Lityum Niyobat) tabanlı şiddet kipleycisi tasarımı üretimi ve karakterizasyonu yapılmıştır. Öncelikle, dalgakılavuzu ve elektrot maske tasarımı yapılmıştır. Ardından, şiddet kipleycisi üretimi kapsamında LiNbO₃ alttaş üzerine Ti (Titanyum) malzemesi kaplanmıştır. Sonrasında, LiNbO₃ yonga fotorezist ile kaplanmıştır. Tasarlanan maske yapısı mor ötesi ışık ile yonga üzerine kopyalanmıştır. Belirli süre ve sıcaklıkta Ti difüzyonu gerçekleştirilmiştir. Bir sonraki aşamada elektrot litografisi yapılmıştır. Yonga üç parçaya kesilmiştir. Kesilen parçalar tıraşlanıp parlatılmıştır. Üç parça kesim cihazı ile yedi parçaya kesilmiştir. Ti derinliğine bağlı kırılma indisi değişim profili analiz edilmiştir. Kesim sonrası elde edilen optik aygıtların fiber kuyruğu ile optik karakterizasyonu yapılmıştır. Aygıtların Au (Altın) ile elektriksel bağlantısı yapılmıştır. Aygıtların birinci kolu ve ikinci kolu iki adet fiber kuyruğu ile bütünlenmiştir. DC (direct current) seviyede elektriksel karakterizasyon kapsamında, frekanstan bağımsız gerilim ölçümleri yapılmıştır ve V_{π} , $V_{2\pi}$ gerilimleri saptanmıştır ve son olarak, AC (alternative current) seviyede 1 GHz (Giga Hertz)'e kadar frekansa bağlı ölçümler yapılmıştır. Ayrıca, frekansa bağlı gerilim grafiği çizdirilerek aygıtın 1 GHz'a kadar çalıştığı doğrulanmıştır.

Haziran 2014, 108 sayfa

Anahtar Kelimeler: LiNbO₃ yonga, difüzyon, fotorezist, şiddet kipleycisi, fiber kuyruğu, bütünleme, elektriksel karakterizasyon, V_{π} gerilimi, girişim eğrisi

ABSTRACT

Master Thesis

DESIGN, FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF LiNbO₃ BASED INTENSITY MODULATOR

Seval DÖNERTAŞ

Ankara University
Graduate School of National and Applied Sciences
Department of Physics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Barış AKAOĞLU

In this thesis, design, fabrication and characterization of LiNbO₃ based intensity modulator were made. Firstly, mask of waveguide and electrode was made. Secondly, within the context of fabrication of intensity modulator Ti material was plated onto LiNbO₃ substrate. Then, the LiNbO₃ wafer was coated with photoresist. The mask form which had been designed was copied onto the wafer by UV (ultraviolet) light exposing. Diffusion of Ti metal was made at a specific time and temperature. At a next step, electrode lithography was carried out. The wafer was diced into three parts. The parts which were diced were lapped and polished. Three parts were diced into seven parts by dicer. Refractive index variance profile that is dependent to Ti depth was analysed. Optical characterization of optical devices which had been obtained after the dicing process was made with a fiber pigtail. Electrical connections of devices were made with Au metal. First and second branch of devices were integrated with two fiber pigtails. Within the context of electrical characterization at DC level, frequency- independent voltage measurements were carried out and V_{π} , $V_{2\pi}$ voltages were determined and finally, the measurements at AC level up to 1 GHz were carried out. Besides this, by plotting frequency vs. voltage curve it was confirmed that the intensity modulator is operated up to 1 GHz.

June 2014, 108 pages

Key Words: LiNbO₃ wafer, diffusion, photoresist, intensity modulator, fiber pigtail, integration, electrical characterization, V_{π} voltage, interferogram

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Öncelikle tez çalışmam sırasında desteğini benden esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Barış AKAOĞLU'na,(Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı) deneysel çalışmalarımın gerçekleştirilmesine olanak tanıyan, ihtiyaç duyulan her türlü teknik desteği tez çalışmam sırasında bana sunan Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (NANOTAM) kurucusu ve direktörü Sayın Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY başta olmak üzere; ekip liderimiz Sayın Dr. Mutlu GÖKKAVAS'a, çalışma arkadaşlarım Sayın M. Deniz ÇALIŞKAN'a, Sayın F. Yasemin AŞIK'a, Sayın Evren ÖZTEKİN'e, Sayın Önder AKÇAALAN'a, Sayın Doğan YILMAZ'a, Sayın Serdar ÖĞÜT'e, Sayın Aylin YERTUTANOL'a ve Sayın Ünal ÇİFTÇİER'e teşekkürü bir borç bilirim.

Beni her konuda destekleyen, bugüne kadar hep yanımda olan sevgili aileme sonsuz teşekkür ederim.

Seval DÖNERTAŞ
Ankara, Haziran 2014

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI SAYFASI	
ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	2
2.1 Entegre Optiğin Tarihsel Gelişimi.....	2
2.2 Entegre Optik Teknolojisinin Avantajları.....	3
2.3 Entegre Optik Uygulamalarında Kullanılan Malzemeler	4
2.4 Entegre Optik Aygıtlar	6
2.4.1 Pasif aygıtlar	6
2.4.2 Aktif aygıtlar	7
2.4.2.1 Pockel etkisi	7
2.5 Elektro-Optik Kipleyciler	9
2.5.1 LiNbO ₃ kipleyciler	12
2.5.1.1 Mach Zehnder geometri yapısındaki şiddet kipleycisi	15
2.5.2 LiNbO ₃ şiddet kipleycilerinde ilerleyen dalga elektrotlarının mikrodalga özellikleri.....	21
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	23
3.1 Materyal	23
3.2 Yöntem	26
3.2.1 LiNbO ₃ tabanlı şiddet kipleycisi maske tasarımı	27
3.2.2 LiNbO ₃ tabanlı şiddet kipleycisi UV fotolitografi tekniği ile üretimi	31
3.2.3 LiNbO ₃ yonga Ti kaplama işlemi	32
3.2.4 Fotorezist kaplama.....	35

3.2.5 Maske hizalama ve yonga üzerine maske yapısının kopyalanması.....	37
3.2.6 Çözündürme işlemi	41
3.2.7 Aşındırma işlemi	42
3.2.8 Ti kaplama kalınlığı ölçümü	44
3.2.9 Dalgakılavuzu yapısı ve Ti difüzyonu ile dalgakılavuzu üretim yöntemi	47
3.2.10 Altın kaplama	50
3.2.11 Elektrot litografisi	50
3.2.12 Yonga kesilmesi	52
3.2.13 Tıraşlama ve parlatma.....	54
3.2.14 Prizma eşleme ölçümü	58
3.2.15 LiNbO ₃ tabanlı şiddet kitleyicisi optik ve elektriksel karakterizasyonu.....	60
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	89
4.1 Ti Difüzyon Derinliğine Bağlı Kırılma İndisi Değişim Analizi	89
4.2 Optik Güç Karakterizasyonu ve Bütünleme Aşamasındaki Geçirgenlik Analizi.....	91
4.3 Şiddet Kitleyicisinin DC ve AC Seviyede Elektriksel Karakterizasyonları.....	95
4.3.1 DC seviyede karakterizasyonun girişim eğrisi üzerine etkisi	95
4.3.2 AC seviyede elektriksel karakterizasyonların frekans bağımlılığı analizi.....	98
5. SONUÇ.....	102
KAYNAKLAR	106
ÖZGEÇMİŞ.....	108

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	Aliminyum
Au	Altın
b	Elektrotlar Arasındaki Mesafe
BaTiO ₃	Baryum Titanat
c	Işığın Vakumdaki Hızı
C	İletim Hattının Birim Uzunluk Başına Sığa Değeri
C ₀	İletim Hattının Vakumdaki Birim Uzunluk Başına Sığa Değeri
CdO	Kadmiyum Oksit
cm/V	Santimetre/Volt
Cr	Krom
devir/sn	Saniyede Devir
dk	Dakika
E _d	Sürücü Elektrik Alan
E _{ix} (t)	x Eksen Boyunca Meydana Gelen Elektrik Alan
E _o	Optik Alan
E ₀ (t)	Kristal Çıkışındaki Elektrik Alan
ε	Elektriksel Geçirgenlik
ε _r	Bağlı Dielektrik Sabiti
ε _{re}	Etkin Dielektrik Sabiti
ε _x	Olağan Eksen İçin Bağlı Dielektrik Sabiti
ε _z	Olağandışı Eksen İçin Bağlı Dielektrik Sabiti
f	Frekans
Fe	Demir
GaAs	Galyum Arsenik
GHz	Gigahertz
G _E	Elektrotlar Arasındaki Mesafe
HCl	Hidrojen Klorür
HF	Hidrojen Florür
HNO ₃	Nitrik Asit
H ₂ O ₂	Hidrojen Peroksit
k	Dalga Vektörü
KD ₂ PO ₄ (KD*P)	Potasyum Didöteryum Fosfat
KH ₂ AsO ₄ (KDA)	Potasyum Dihidrojen Arsenik
KH ₂ PO ₄ (KDP)	Potasyum Dihidrojen Fosfat
L	LiNbO ₃ Kristal Uzunluğu
L	İndüktans
Li	Lityum
LiNbO ₃	Lityum Niyobat
Li ₂ O	Lityum Oksit
Li ₂ CO ₃	Lityum Karbonat
LiTaO ₃	Lityum Tantalat
mm	Milimetre
mbar	Milibar
MHz	Mega Hertz
Mg	Magnezyum

nm	Nanometre
n_c	Kılıf Kırılma İndisi
n_e	Olağandışı Kırılma İndisi
n_f	Film Kırılma İndisi
n_m	Mikrodalga Kırılma İndisi
n_o	Optik Dalga Kırılma İndisi
n_o	Olağan Kırılma İndisi
n_s	Alttaş Kırılma İndisi
n_x	x' Yönündeki Kırılma İndisi
Nb	Niyobyum
Nb_2O_5	Niyobyum Pentaoksit
$NH_4H_2PO_4(ADP)$	Amonyak Dihidrojen Fosfat
Ni	Nikel
N_2	Azot Gazı
O_2	Oksijen Gazı
P	Optik Güç
P_g	Işık Kaynağı Giriş Gücü
P_1	Birinci Kol Bütünlemesi Sonrası Ölçülen Güç
P_2	İkinci Kol Bütünlemesi Sonrasın Ölçülen Güç
r	Elektro-Optik Katsayısı
rpm	Dakikada Devir
R	Direnç
R_L	Yükleme Direnci
SiO_2	Silisyum Dioksit
Si_3N_4	Silisyum Nitrür
SnO	Antimon Oksit
t	Süre
Ti	Titanyum
v	Işığın Madde Ortamındaki Hızı
v_m	İletim Hattı Boyuncaki Faz Hızı
V_π	π Faz Farkı Oluşturan Gerilim
$V_{2\pi}$	2π Faz Farkı Oluşturan Gerilim
W_E	Elektrot Genişliği
ω	Açısal Hız
Zn	Çinko
ZnS	Çinko Sülfat
Z_m	Karakteristik Empedans
Z_0	İletim Hattının Vakumdaki Saf Empedansı
X	Reaktans
X	Büyütme
Å	Angstrom
$^\circ C$	Santigrat
Δ	Delta
Δn	Kırılma İndisi Farkı
$\Delta\Phi$	Faz farkı
η	Aygıt içinden Geçirilen Işığın Kesri
μ_0	Boşluğun Manyetik Geçirgenliği
μ	Madde Ortamındaki Magnetik Geçirgenlik

μm	Mikrometre
λ	Dalgaboyu
Φ	Faz
Ω	Ohm
$^{\circ}$	Derece

Kısaltmalar

APE	Tavlanmış Proton Değiş Tokuşu
CPW	Eş Düzlemlı Dalgakılavuzu
IOC	Entegre Optik Devre
KDP	Potasyum Dihidrojen Fosfat
PCB	Baskı Devre Kartı
RF	Radyo Frekans
SNR	Sinyal Gürültü Oranı
UV	Ultra Viyole

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Czochralski yöntemi kullanılarak kristal büyütme düzeneği ve LiNbO ₃ tek kristali	4
Şekil 2.2 LiNbO ₃ için geçirgenlik spektrumu	5
Şekil 2.3 Y ayırıcı ve yönlü çiftleyici	7
Şekil 2.4 Bazı malzemeleri elektro-optik katsayıları	8
Şekil 2.5 Boyuna ve enine elektro-optik kipeyici yapısı.....	10
Şekil 2.6 Y-ayırıcı yapısı.....	13
Şekil 2.7 Faz kipleycisi yapısı	14
Şekil 2.8 Mach-Zehnder kipleycisi	16
Şekil 2.9 İletim hattı bağlantısı	21
Şekil 3.1 LiNbO ₃ şiddet kipeycisi maske yapısı	27
Şekil 3.2 Şiddet kipeycisi maske detay görünümü	28
Şekil 3.3 Şiddet kipleycisi maske detay yapısı	29
Şekil 3.4 Şiddet kipleycisi dalgakılavuzu yapısı maske detay görünümü	30
Şekil 3.5 Elektrot yapısı maske detay görünümü.....	30
Şekil 3.6 UV fotolitografi basamakları	32
Şekil 3.7 LiNbO ₃ yonga	32
Şekil 3.8 LiNbO ₃ yonga birincil ve ikincil eksen gösterimi	33
Şekil 3.9 Elektron demeti buharlaştırma cihazı	34
Şekil 3.10 Ti kaplanmış LiNbO ₃ yonga	35
Şekil 3.11 Aseton-alkol banyosu.....	35
Şekil 3.12 Fotorezist	36
Şekil 3.13 Hizalama işaretlerinin kullanımı	38
Şekil 3.14 Hizalama işaretlerinin konumlandırılması	39
Şekil 3.15 Maske hizalama cihazı	40
Şekil 3.16 a) Aşındırma öncesi b) Aşındırma sonrası.....	43
Şekil 3.17 Dalgakılavuzu genişliği ölçümü	44
Şekil 3.18 Dektak cihazı	45
Şekil 3.19 Örnek ve iğne ucu	46
Şekil 3.20 Ti kaplama kalınlığı ölçüm profili	46

Şekil 3.21 Düzlem optik dalgakılavuzu	47
Şekil 3.22 Difüzyon fırını	48
Şekil 3.23 Ti difüzyonlu dalgakılavuzu yapısı.....	49
Şekil 3.24 Au kaplı LiNbO ₃ yonga	50
Şekil 3.25 Elektrot litografisindeki maske hizalama işlemi.....	51
Şekil 3.26 Au aşındırma işlemi	52
Şekil 3.27 Kesim programlama menüsü ve kesim bölmesindeki yonga.....	53
Şekil 3.28 x kesimli LiNbO ₃ yonganın ön kesit görüntüsü.....	53
Şekil 3.29 3 parçaya kesilmiş LiNbO ₃ yonga	54
Şekil 3.30 Tıraşlama ve parlatma cihazı	55
Şekil 3.31 Tıraşlama cihazı tutucusu	56
Şekil 3.32 Kesilen 7 adet optik aygıt	57
Şekil 3.33 Elektrot yapısı detay görüntüsü	57
Şekil 3.34 Elektrot ve dalgakılavuzu yapısının ön kesit görüntüsü	58
Şekil 3.35 Ti difüzyonlu LiNbO ₃ optik aygıtlarda prizma eşlemesi.....	59
Şekil 3.36 Prizma eşleme ölçüm düzeneği.....	59
Şekil 3.37 Optik fiber yapısı	60
Şekil 3.38 Tam iç yansıma	62
Şekil 3.39 Optik fiber	62
Şekil 3.40 Optik karakterizasyon için kullanılan ışık kaynağı.....	63
Şekil 3.41 Fiber ek yapma cihazı	64
Şekil 3.42 Fiber hazırlama malzemeleri	64
Şekil 3.43 Fiber kesilmesi	65
Şekil 3.44 Fiberlerin ek yapma cihazı içindeki görüntüsü.....	66
Şekil 3.45 Fiber ek işlemi	66
Şekil 3.46 Optomekanik konumlandırma mekanizması	67
Şekil 3.47 Sürücü kaynaklar	68
Şekil 3.48 Optik karakterizasyon düzeneği.....	68
Şekil 3.49 Optomekanik konumlandırma mekanizması program ara yüzü	69
Şekil 3.50 Fiber ile optik aygıtın hizalanması.....	69
Şekil 3.51 Dedektör üzerine düşen ışığın ayar kart ile görüntüsü.....	70
Şekil 3.52 Wire-bond cihazı.....	71

Şekil 3.53 Optik aygıtın elektriksel bağlantı sırasındaki görünümü	72
Şekil 3.54 Elektriksel bağlantı yapılmış optik aygıt	72
Şekil 3.55 Bütünleme düzeneği genel görünümü	73
Şekil 3.56 1.kol için kurulan bütünleme düzeneği	74
Şekil 3.57 Optik aygıt, objektif ve fiberin birbirine göre pozisyonu	75
Şekil 3.58 Optik aygıt içinde ilerleyen ışık gücü	75
Şekil 3.59 Fiber ile optik aygıtın hizalanmış üstten görünümü	76
Şekil 3.60 1.kol bütünlemesi için UV ışık uygulanması	77
Şekil 3.61 1.kolu bütünlenmiş aygıtın üstten görünümü.....	77
Şekil 3.62 1.kol bütünlemesi sonrası yandan görünüm.....	78
Şekil 3.63 2.kol bağlantısı için kurulan bütünleme düzeneği	78
Şekil 3.64 2.kol bütünlemesi için UV ışık uygulanması	79
Şekil 3.65 2.kolu entegre edilmiş aygıtın üstten görünümü.....	80
Şekil 3.66 Şiddet kipleycisi.....	80
Şekil 3.67 Kipleyci kutusu ve üst kapak	81
Şekil 3.68 Paketlenmiş şiddet kipleycisi.....	81
Şekil 3.69 DC seviyedeki ölçümler için kablo bağlantısı	82
Şekil 3.70 DC seviye ölçüm düzeneği	82
Şekil 3.71 AC seviye ölçüm düzeneği şematiği.....	84
Şekil 3.72 AC seviyede elektriksel karakterizasyon düzeneği.....	84
Şekil 3.73 Girişim eğrisinde $V_{\pi}/2$ gerilimi saptanması.....	85
Şekil 3.74 Bias-Tee eşdeğer devresi	87
Şekil 3.75 AC seviye ölçümlerde kullanılan bias-tee bağlantıları	87
Şekil 4.1 Ti derinliğine bağlı kırılma indisi değişimini saptamak amacıyla yazılan Matlab kodu	90
Şekil 4.2 Kırılma indisi değişim grafiği	90
Şekil 4.3 Girişim profili analizi için yazılan Matlab kodu.....	96
Şekil 4.4 Girişim eğrisi	97
Şekil 4.5 Frekansa bağlı gerilim grafiği analizi için yazılan Matlab kodu	99
Şekil 4.6 Frekansa bağlı gerilim eğrisi.....	99
Şekil 4.7 Toplu sığa devresi için sığa-bantgenişliği grafiği.....	100

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1	Pockel etkisi gösteren bazı malzemeler ve Pockel katsayıları (r).....	9
Çizelge 4.1	Optik güç karakterizasyonu	91
Çizelge 4.2	Optik karakterizasyon sonrası geçirgenlik değerleri.....	92
Çizelge 4.3	1.kol bütünlemesi sonrası optik güç ölçümü	93
Çizelge 4.4	1.kol bütünlemesi sonrası geçirgenlik değerleri	93
Çizelge 4.5	2.kol bütünlemesi sonrası optik güç ölçümü	94
Çizelge 4.6	2.kol bütünlemesi sonrası geçirgenlik değerleri	94
Çizelge 4.7	1. kol ve 2.kol bütünlemesi arasındaki geçirgenlik farkı	95
Çizelge 4.8	Şiddet kipleycisinin V_{π} ve $V_{2\pi}$ gerilim ölçümleri	96
Çizelge 4.10	Frekans-Gerilim çizelgesi	98

1. GİRİŞ

Optik fiber bağlantıları son yıllarda telekomünikasyon uygulamalarında sıkça tercih edilmektedir. Özellikle optik fiberlerin icat edilmesiyle eş fazlı ışığın işlenmesi ve taşınması için ortaya çıkan teknoloji geniş uygulama alanlarında birçok avantaj sağlamıştır. Temel bir fiber optik bağlantısını oluşturan sistemlerden biri elektro-optik kipleycilerdir. Elektro-optik kipleyci; uygulanan gerilim altında kırılma indisinin değişmesi sonucu oluşan etkiye göre çalışan kipleycilerdir. Şiddet kipleycileri bir çeşit elektro-optik kipleycidir. Mach-Zehnder geometrisine sahiptirler. Bu geometriye göre oluşturulan optik dalgakılavuzlarında, ışık tek bir koldan girer, belirli bir mesafe dalgakılavuzu içinde ilerledikten sonra ikiye ayrılır ve çıkışta tek bir kolda tekrar birleşir. Şiddet kipleycileri genellikle yüksek frekans uygulamalarında kullanılmaktadır. 0.3 GHz- 300 GHz arasındaki mikrodalga uygulamaları, elektro-optik osilatörler başlıca uygulama alanlarıdır.

Bu tezde ilk olarak şiddet kipleycisi maske yapısı tasarlanacaktır. Üretim aşamasında; Ti kaplama işlemi, fotorezist kaplama, maske hizalama, çözündürme, aşındırma gibi aşamaları kapsayan fotolitografi tekniği ile LiNbO_3 alttaş üzerine maske yapısı oluşturulacaktır. Ardından Ti metali difüzyonu ile LiNbO_3 yonga üzerine optik dalgakılavuzları oluşturulacaktır. Aygıtın elektrot litografisi yapılacaktır. Bu aşamada ise altın kaplama ve altın aşındırma işlemleri uygulanacaktır. Üretilen LiNbO_3 yonga kesilecek, tıraşlanıp parlatılacaktır. Üretim aşamasının son basamağında ise Ti difüzyon derinliğine bağlı kırılma indisi ölçümü yapılacaktır. Aygıtın karakterizasyon aşamasında; optik karakterizasyon yapılacak, ardında fiber kuyrukları ile optik aygıtın bütünlemesi yapılacaktır. Bütünleme işleminden sonra elde edilen şiddet kipleycisinin DC seviyede elektriksel karakterizasyonu ile girişim eğrisi çizdirilecek ve V_π gerilimi saptanacaktır. AC seviyede karakterizasyon yapılarak aygıtın 1 GHz'e kadar olan çalışma performansı analiz edilecektir. Toplu sığa elektrot yapısı esas alınarak; teorik ve deneysel olarak aygıtın 1 GHz'e kadar çalıştığı analiz edilecektir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Entegre Optiğin Tarihsel Gelişimi

Entegre optik; fotonik entegre devrelerin yapılanmasını esas alan bir teknolojidir. Bu mekanizmalar birçok optik ayardan oluşmaktadır ve farklı kompleks yapılaraya sahip olabilirler. Entegre optiğin ilk ortaya çıkışı elektronik entegre optik devrelerden kaynaklanmaktadır. Elektronik entegre optik devreler, son yıllarda hızlı bir şekilde gelişme göstermişlerdir. Çok sayıda transistör içeren güçlü ve kompleks yapıdaki mikroişlemciler, özel amaçlar için kullanılan sinyal işleyiciler veya yüksek kapasiteli veri depolama özelliğine sahip olan bilgisayar hafıza çipleri bu gelişimin göstergesi durumundadır. Ancak günümüzde entegre optik; muhtemel aygıtların kompleks yapısı sebebiyle mikroelektronik gelişim ile uyumlu olamamıştır.

Son yıllarda özellikle entegre optiğin alanı, entegre devrelere nazaran dalgakılavuzu yapılı optik aygıtların teorisi, fabrikasyonu ve uygulaması ile yakından ilgili olmaya başlamıştır. Bu yapılarda ışık dalgaları; üzerinde farklı yapılardaki dalgakılavuzlarının oluşturulduğu plakanın yüzeyinde kılavuzlanmıştır. Işık belirli bir bölgeye hapsolmuştur. Klasik optiğe benzer şekilde, pasif işlemler için kullanılan güdümlü dalga aygıtları mikro elektronik tabanlı fabrikasyon teknikleri kullanılarak da üretilebilmektedir. Aynı zamanda bu teknikler ile klasik elektro-optik etkisine dayanarak çalışan modülatörler ve ferroelektrikler gibi aktif aygıtlar da üretilebilmektedir. Üretilen bu pasif ve aktif güdümlü dalga aygıtlar tek bir bütün olarak lazerler, dedektörler ve optik yükselteçler gibi cihazlar ile kullanılabilirler ve sistemin bir parçası durumunda olmaktadır. Sistemin bir parçası durumunda olan bu şekildeki çok bileşenli bir devredeki pasif ve aktif aygıtların tümüne entegre optik devre (IOC) denir.

Entegre optiğin uygulamaları çok geniş bir dağılım göstermektedir. Bu uygulamalar genellikle tek kipli fiber optik sistemler içermektedir. İlk kullanım alanları; dijital ve analog iletişim, sensörler (özellikle fiber optik jiroskoplarda), sinyal işleme gibi

uygulama alanları olmuştur. Aynı zamanda entegre optik aygıtlarının lazer demeti kontrolü, optik sinyal işleme ve hesaplanması için fiber çıkışlı olmayan sistemlerde de kullanımı söz konusudur. IOC'ların yüksek hızlı dijital telekomünikasyonda ve jiroskoplarda kullanılmak üzere 1990'lardan bu yana hızlı bir şekilde kullanım alanı artmıştır (Bass vd. 1995a).

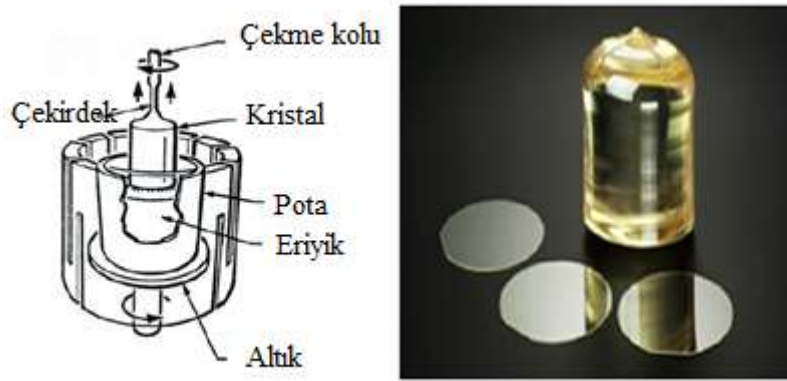
2.2 Entegre Optik Teknolojisinin Avantajları

Entegre optik alanındaki ilerlemeler; 1970 senesinde başlangıcından itibaren hızla devam etmektedir. Bu ilerlemelerin çoğunluğu; fiber optik sistemlerin kısa zaman içinde hızlı bir şekilde gelişim göstermesi ile meydana gelmiştir. Entegre optikteki bu ilerleme; diğer optik teknolojilerine göre birçok avantajı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu avantajlar; geniş elektriksel bantgenişliği, düşük güç tüketimi, düşük boyut ve ağırlık, gelişmiş güvenilirlik gibi seçenekleri kapsamaktadır. Entegre optik aygıtlar aynı zamanda optik fiber teknolojisi ile de yakından ilgilidir ve kompleks yapıdaki devrelerdeki her bir devre elemanının ayrı ayrı paketlenmesi ihtiyacını ortadan kaldırarak maliyetin azaltılmasını sağlamaktadırlar (Bass vd. 1995a). Düşük voltajla çalışma imkanı sağlanır. Özellikle kipleme yapılarında dalgakılavuzu kavramı önemlidir. Dalgakılavuzu, ışığın ilerlediği optik ortamdır. Doğru malzemelerle uygun bir dalgakılavuzu tasarlamak ve üretmek açısından değerlendirildiğinde, entegre optik teknolojisinin avantajları göz önünde bulundurulmalıdır. Dalgakılavuzu genişlikleri mikrometre mertebesinde olduğu için tek bir optik kipi ilerlemesi sağlanır. Işık tek bir kipte ilerler. Diğer kipler yapı içerisinde oluşmaz. Bu durum; aygıtın optik performansını olumlu derecede etkilemektedir. Üretilen entegre optik aygıtlar; sıcaklık ve titreşim gibi çevresel değişimlere karşı dayanıklıdır. Etkileşim uzunluğu kısadır, bu sebeple yapı üzerinde kısa elektrotlar mevcuttur. Bu özellik; hızlı işlem özelliğini de beraberinde getirmektedir. Entegre optik teknolojisi ile üretilen aygıtlar aynı zamanda kompakt bir yapıya sahiptir (Nishihara vd. 1989).

2.3 Entegre Optik Uygulamalarında Kullanılan Malzemeler

İnce film kaplanan optik aygıtlar için çok çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Anahtarlar, modülatörler gibi aktif aygıtlar elektro-optik malzeme grubuna dahil iken, filtre ve lens gibi pasif aygıtlar ise cam malzeme tabanlıdır. Aktif aygıtların geliştirilmesinde LiNbO_3 genellikle en çok tercih edilen malzeme grubundadır (Armenise 1988).

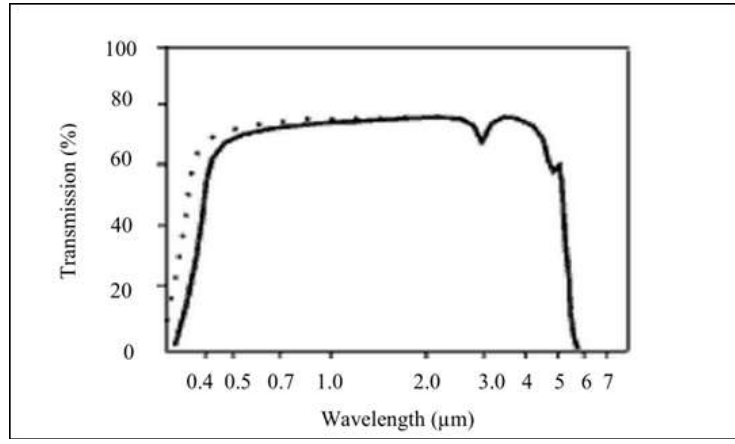
LiNbO_3 ; ferroelektrik bir malzemedir ve doğada doğal olarak bulunmaz. LiNbO_3 kristalini büyütmek için kullanılan yöntem; Czochralski yöntemidir. Czochralski yöntemi tek kristal elde etmek için kullanılan bir kristal büyütme yöntemidir. LiNbO_3 ; platin bir pota içinde eriyebilen Li_2CO_3 (Lityum Karbonat) ve Nb_2O_5 (Niyobyum Penta Oksit) tozlarından büyütülmektedir. Czochralski yöntemi için kullanılan düzenek şekil 2.1’de gösterilmektedir (Mohamedelhassan 2012).



Şekil 2.1 Czochralski yöntemi kullanılarak kristal büyütme düzenegi ve LiNbO_3 tek kristali (Mohamedelhassan 2012’den değiştirilerek alınmıştır)

Czochralski yöntemi kullanılarak yapılan büyütmede; kristalin fotokırıcı optik hasarına hassasiyetini azaltmak için demir (Fe) iyon atıklarının azaltılmasına önem verilmektedir. LiNbO_3 1 μm ’nin altındaki dalgalarda optik hasara karşı duyarlıdır. 1 μm ’nin üstündeki dalgalarda ise fotokırıcı hasar, 100 mW’ın altındaki optik güç değerleri için ihmal edilebilir düzeydedir.

LiNbO₃ ; 1110°C-1180°C arasında yüksek bir Curie sıcaklığına sahip olduğu için, metal difüzyonu ile düşük kayıplı dalgakılavuzları oluşturulabilmektedir. Aynı zamanda termal, kimyasal, mekanik olarak kararlı bir yapıdadır ve entegre optik teknolojisinde önemli bir yere sahiptir (Wooten vd. 2000). LiNbO₃; yüksek ısıelektrik, piezoelektrik ve nonlinear elektro-optik katsayılarına sahiptir ve bu özellikleri açısından karakterize edilmiş bir malzemedir. Görünür ve yakın kırmızı altı bölgede yüksek optik geçirgenliğe sahip mükemmel elektro-optik özelliği göstermektedir. Özellikle telekomünikasyonda çalışılan dalgaboyu olan 1.55 µm dalgaboyunda %80'e yakın bir geçirgenlik değerine sahiptir. Geçirgenlik spektrumu şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2 LiNbO₃ için geçirgenlik spektrumu (Mohamedelhasan 2012)

LiNbO₃; 2.15-2.2 arası kırılma indisine ve 30.8×10^{-10} cm/V elektro-optik katsayısına sahiptir. Çift kırıcı bir malzemedir. Bu şekildeki çift kırıcı malzemelerde ışık; iki tane ortogonal kutuplu dalganın çizgisel süperpozisyonu halinde ilerlemektedir. Aynı zamanda tek eksenli bir kristaldir. Kristalin tek eksenli olması; iki yöndeki kırılma indisinin aynı, üçüncü yöndeki kırılma indisinin diğer ikisinden farklı olması anlamına gelmektedir. ($n_x=n_y$, n_z). Bahsedilen ortogonal dalgalar, olağan ve olağandışı olarak adlandırılmaktadır (Mohamedelhasan 2012). LiNbO₃; tek eksenli bir kristal olduğu için; z eksenli boyunca (optik eksen) kutuplanan ışık demeti için olağandışı kutuplanma modunu korurken, x-y düzleminde kutuplanan ışık demeti için olağan kutuplanma modunu korumaktadır. Olağan kırılma indisine, ışının ilerleme yönünden bağımsız iken; olağandışı kırılma indisine ışın ilerleme yönüne bağlıdır. LiNbO₃ tabanlı aygıtlar; x, y ve z

kesimli yongalar üzerine üretilebilmektedir. Faz modölatörleri, fiber jiroskop devreleri, ve Mach-Zehnder Interferometreleri genellikle x-kesimli ve ışığın y yönünde yayıldığı yongalar üzerinde üretilmektedir. Böyle bir yongada ışık demeti olağandışı mod ile ilerler. Delta-beta gibi yönlü çiftleyiciler, it-çek mekanizması ile çalışan aygıtlar ise z kesimli, ışığın y yönünde ilerlediği yongalar üzerinde üretilmektedirler. Her iki konfigürasyonda da yüksek r_{33} elektro-optik katsayısı önemli bir yere sahiptir (Bass vd. 1995a).

2.4 Entegre Optik Aygıtlar

Entegre optik aygıtlar; pasif ve aktif aygıtlar olmak üzere ikiye ayrılırlar. Bu bölümde; pasif ve aktif entegre optik aygıtlar anlatılacaktır.

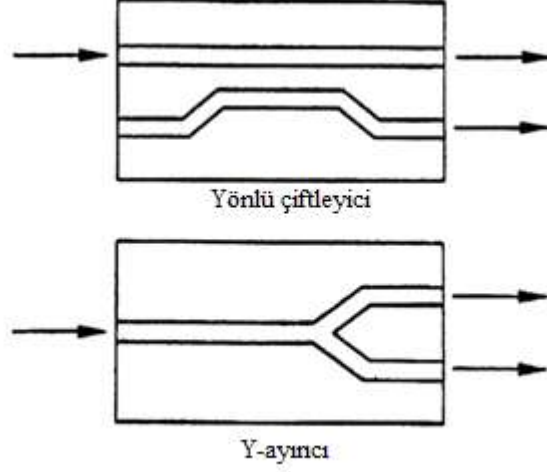
2.4.1 Pasif aygıtlar

Pasif aygıtlar, entegre optik devreler için önemli ara yüz ekipmanlarıdır. En önemli pasif yapılar; dalgakılavuzu kıvrımları, yönlü çiftleyiciler, kutuplayıcılar ve fiber-optik çip eşlemeli yapılardır.

Dalgakılavuzu kıvrımları; yapı içerisinde performansı artırmayı sağlarlar. En çok tercih edilen S-kıvrımıdır. Bu yapı; ışık dalgakılavuzu içinde ilerlerken, ışığın ilerlediği yön S-kıvrım ile değiştiği için optik kayıpların azaltılmasına yardımcı olmaktadır.

Kutuplayıcılar; elektro-optik kipleyciler gibi kutuplanmaya duyarlı aygıtlar ve fiber optik jiroskop gibi uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Kutuplayıcılar, dalgakılavuzlarının üzerine oluşturulabilirler. Bazı aygıtlar olağan ve olağandışı modlarının her ikisini de korudukları halde, bazıları sadece tek bir modun geçirilmesine izin verecek şekilde tasarlanabilir, diğer mod kılavuzlanmaz. Böylece yüksek kutuplanma elde edilebilir.

Işık demetinin ayrıldığı veya yön değiştirdiği kılavuzlama aygıtları da pasif elemanlar arasında yer almaktadır. Şekil 2.3, Y-ayırıcı ve yönlü çiftleyiciyi göstermektedir (Bass vd. 1995a).



Şekil 2.3 Y ayırıcı ve yönlü çiftleyici (Bass vd. 1995a'dan değiştirilerek alınmıştır)

2.4.2 Aktif aygıtlar

Aktif aygıtlar; fiziksel durumları, uygulanan dış bir elektrik alan veya gerilim ile değişebilen aygıtlardır. Bu tip aygıtlar; entegre optik kipleyciler, dedektörler olarak sıralanabilir. Entegre optik kipleyciler sürücü voltajı azaltmak amacıyla dalgakılavuzu teknolojisini kullanırlar. Fiber çıkışlı aygıtlardır, kompakt bir yapıda olup Pockel Etkisi'ne göre çalışmaktadırlar (Bass vd. 1995a).

2.4.2.1 Pockel etkisi

Pockel etkisi; kırılma indisinin uygulanan elektrik alan ile doğru orantılı olarak değiştiği bir etkidir. Elektro-optik etki olarak da adlandırılmaktadır. Uygulanan elektrik alanın kırılma indisi üzerindeki etkisi; kristal içinde rastgele bir yöndeki kutuplu ışık ile karakterize edilebilir. 3-ranklı bir tensör ile bu etki ifade edilebilir (Focus 2001). En genel olarak Pockel Etkisi denklem (2.1) ile ifade edilmektedir:

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_{ij} = \sum_k^3 r_{ijk} E_k \quad (2.1)$$

n ; malzemenin kırılma indisleri arasındaki farkı, E_k ; uygulanan elektrik alanı, r_{ijk} ise elektro-optik katsayısını göstermektedir. Elektro-optik sabiti en genel olarak tensörel bir niceliktir. Açık ifade olarak;

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right) = \sum_k^3 r_{ijk} E_k = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix}$$

şeklinde ifade edilebilir.

Optoelektronik teknolojisinde kullanılan bazı malzemelerin elektro-optik katsayıları tensörel olarak şekil 2.4'te gösterilmektedir (Anonim 2012d).

$\bar{4}3m$ (kübik)	$\bar{4}2m$ (tetragonal)	$3m$ (trigonal)	$6mm$ (hegzagonal)
$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{41} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{63} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & -r_{22} & r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
(GaAs, CdTe, InAs)	(KDP, ADP)	(LiNbO ₃ , LiTaO ₃)	(CdS)

Şekil 2.4 Bazı malzemeleri elektro-optik katsayıları (Anonim 2012d)

LiNbO₃; yakın kırmızıaltı bölgede yüksek optik geçirgenliğe ve elektro-optik katsayısına sahip olduğu için, elektro-optik kipleyci üretiminde sıkça tercih

edilmektedir. Pockel etkisi gösteren bazı malzemelerin elektro-optik katsayıları ve kırılma indisleri çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Pockel etkisi gösteren bazı malzemeler ve Pockel katsayıları (r) (Anonim 2012d)

Madde	Sembol	n₀	r(m/V)x10⁻¹²
Potasyum Dihidrojen Fosfat	KH ₂ PO ₄ (KDP)	1.51	10.6
Potasyum Didöteryum Fosfat	KD ₂ PO ₄ (KD*P)	1.52	26.4 (23.3)
Amonyak Dihidrojen Fosfat	NH ₄ H ₂ PO ₄ (ADP)	1.52	8.5
Potasyum Dihidrojen Arsenik	KH ₂ AsO ₄ (KDA)	1.57	13.0
Lityum Niyobat	LiNbO ₃	2.29	30.8
Galyum Arsenik	GaAs	3.6	1.6
Çinko Sülfat	ZnS	2.31	2.1

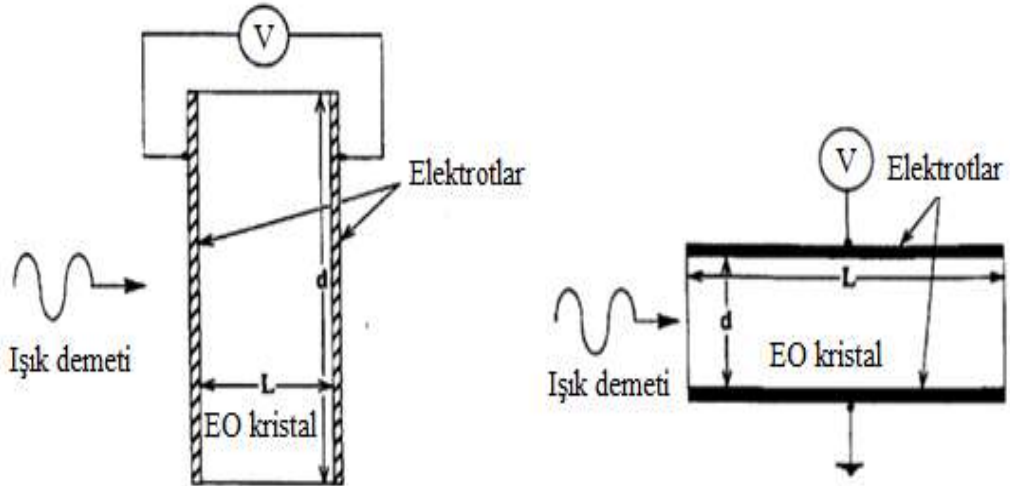
Pockel etkisi ile izotropik olan malzemeler anizotropik yapılabilir. Diğer bir ifadeyle; kristal, farklı yönlerde birbirinden farklı kırılma indislerine sahip olabilir. Ayrıca, anizotropik malzemelerin kırılma indisleri değiştirilebilir. Pockel etkisi; malzemelerin optik özelliklerinin çok hızlı bir şekilde değiştirilebilmesine olanak sağladığı için bu tür malzemeler ışığın kiplenmesinde kullanılmaktadır (Anonim 2012d). Bu özellik; elektro-optik kipleycilerin temelini oluşturmaktadır.

2.5 Elektro-Optik Kipleyciler

Elektro-optik kipleyci; uygulanan bir dış gerilim altında kırılma indisindeki değişim sonucu oluşan etkiye göre çalışan kipleycilerdir. Oluşturulan sistemin yapısına bağlı olarak; ışık dalgalarının fazı, kutupluluğu, genliği, frekansı veya ilerleme yönü kontrollü

bir şekilde değiştirilebilmektedir. Üretilen elektro-optik aygıtlar; tek bir dalgaboyunda çalışacak şekilde uygun bir performans sağlamak için tasarlanmaktadır. Elektro-optik aygıtlar; analog veya sayısal (dijital) kipleme düzeninde kullanılabilirler. En doğru seçim; sistem gereksinimleri, optik fiber ve dedektör gibi bazı mevcut bileşenlerin karakteristik yapıları ile belirlenmektedir. Analog kipleme; yüksek bir SNR gerektirir, bu durum ise aygıtın kullanımını dar bir bant genişliği aralığına ve kısa menzil uygulamalarına kısıtlamaktadır. Diğer bir tarafta; sayısal kipleme geniş bant genişliği ve uzun menzil uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahiptir (Bass vd. 1995a).

Elektro-optik kipliyicisi; boyuna ve enine olmak üzere iki kısımda incelenmektedir. Bu sınıflandırma; gerilimin aygıt içinde ışığın ilerleme yönüne göre nasıl uygulandığına bağlıdır. Temel olarak bir kipliyici; bir çift elektrot arasına oluşturulmuş elektro-optik kristal içermektedir. Bu sebeple; sığa olarak değerlendirilebilir. Genel olarak kristalin giriş ve çıkış yüzleri, elektromanyetik dalganın tüm kesit boyunca düzgün dağılımlı bir faz kayması ile ilerleyebilmesi için birbirine paralel konumda olacak şekilde yapılandırılmıştır. Boyuna ve enine elektro-optik kipliyici yapısı şekil 2.5'te gösterilmektedir (Bass vd. 1995a).



Şekil 2.5 Boyuna ve enine elektro-optik kipliyici yapısı (Bass vd. 1995a'dan değiştirilerek alınmıştır)

Şekil 2.5'e göre, sol tarafta gösterilen yapı boyuna kipleyci yapısını göstermektedir. sağda ise enine kipleyci yapısı gösterilmektedir. Boyuna yapıda; gerilim dalga yapısına paralel olarak uygulanmaktadır. Elektrotlar gelen ışık demetine karşı geçirgen olacak şekilde SnO, InO, CdO gibi uygun bir malzemeden üretilmelidir. Işık demeti geniş bir alana yayılıyorsa, boyuna kipleyciler kullanışlı durumda olmaktadır (Bass vd. 1995a).

Enine kipleyci yapısında, sağdaki resimde gösterildiği gibi gerilim ışığın ilerleme yönüne dik bir şekilde uygulanmaktadır. Işık demeti elektrotlara paralel olarak ilerlediği için elektrotlar engel oluşturmamaktadır (Bass vd. 1995a).

Elektro-optik kipleyciler ve pasif çiftkırıcı aygıtlar kullanılarak; ışığın faz, genlik, kutuplama, frekans ve konum kiplmeleri sağlanabilmektedir. Genel olarak üç varsayım önem arz etmektedir: Bunlar;

- Kiplemeyi sağlayan elektrik alan, tüm kristal uzunluğu boyunca düzgün bir dağılıma sahip olduğunda kırılma indisindeki veya çiftkırınımdaki değişimin düzgün dağılımlı olması,
- Kipleme gerilimi dc veya çok düşük frekanslarda uygulandığında, ışığın; L uzunluğundaki tüm kristal içinde yol aldığı zaman aynı Δn 'lik kırılma indisi farkını indüklemesi,
- Gerilim uygulanmadan önce ve uygulandıktan sonra ışığın ana bir eksen boyunca ilerlemesi olarak ele alınabilir.

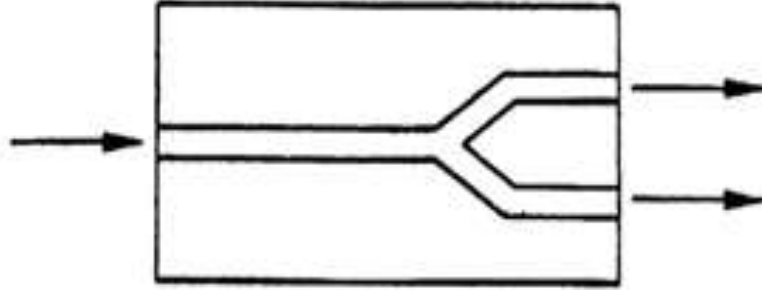
Elektro-optik kipleyciler; KDP (Potasyum Dihidrojen Fosfat), LiNbO₃, LiTaO₃ (Lityum Tantalat), GaAs (Galyum Arsenit), BaTiO₃ (Baryum Titanat) gibi malzemelerden üretilmektedir. Elektro-optik katsayısı diğer malzemelere göre daha yüksek olduğu için kipleyci üretiminde LiNbO₃; en çok tercih edilen malzemedir (Bass vd. 1995a).

2.5.1 LiNbO₃ kipleyciler

LiNbO₃ kipleycileri; yüksek hız kipleme işlemlerinde kullanılan ileri teknoloji aygıtlar arasında yer almaktadır. Özellikle doğrusal kiplemenin gerekli olduğu yerlerde kullanılmaktadırlar. Bu tip kipleyciler, elektro-optik etki ile çalışmaktadırlar. Entegre optik dalgakılavuzu kipleycileri; LiNbO₃ bir alttaş üzerine elementlerin difüzyonu yöntemi ile oluşturulmaktadır. Aygıtın ön yüzeyleri tıraşlanır ve parlatılır, tek kipli bir fibere genellikle UV ışık altında sertleşen bir yapıştırıcı ile yapıştırılıp karakterizasyonu yapılmaktadır.

LiNbO₃ kipleyci teknolojisinde yaklaşık 10-15 yıl öncesinde, laboratuvar araştırmaları yapılırken seri üretime geçilmeye başlanmıştır. 1990'lı yıllarda 100.000'den fazla LiNbO₃ kipleycisi ticari fiber optik iletişim sistemlerinde yerini almaya başlamıştır (Wooten vd. 2000). 2000'li yıllarda, eş eksenli (coaxial) kabloların yerini almak üzere yüksek performanslı RF fotonik bağlantısı geliştirilmesi konusunda çok geniş çaplı araştırmalar yapılmış olsa da, RF sinyallerin taşınması için ihtiyaç duyulan optik fiberlerin kullanımı sınırlı bir düzeyde kalmıştır. RF fotonik sinyallerin RF düzeydeki kaybı, RF fotonik bağlantılarının geniş çapta yaygınlaşmasını önleyen temel problemdir. Her ne kadar optik fiberlerin meydana getirdiği kayıp önemsiz ölçüde olsa da, bir RF fotonik bağlantısının RF kaybı yüksek derecede olmaktadır. Örnek olarak gösterilirse, harici olarak kiplenmiş bir fotonik bağlantısının 10 GHz'deki RF kaybı 35 dB - 45 dB aralığında olabilir. Bu kayıp miktarı, uzunluğu 1km'den daha kısa olan bir eş eksenli kablonun yarattığı kayıptan daha yüksektir. Bu yüksek kaybın nedeni, elektriksel-optik veya optik-elektriksel dönüşümlerden kaynaklanmaktadır. Bu sorunu çözmek amacıyla, RF fotonik bağlantıları kipleme işlemi öncesinde veya sonrasında genellikle RF yükselteçler gerektirmektedir. Ancak bu durumda da, RF yükselteçlerin kullanımı; gürültünün artması, distorsiyon, pahalılık ve karmaşık yapı gibi problemlerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle yüksek dönüşüm verimliliğine sahip LiNbO₃ kipleycilerin üretilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Böylece, bu kipleycilerin çalışma verimliliğini artırmaya yönelik önemli araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. (Nguyen 2006).

LiNbO₃ kipleycileri arasında en çok kullanılan ve uygulaması olan, Y-ayırıcı kipleyci yapısıdır. Bu yapı, şekil 2.6'da gösterilmektedir.

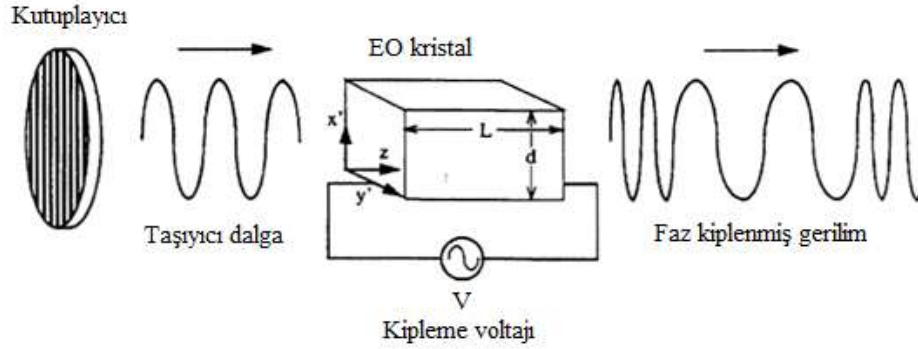


Şekil 2.6 Y-ayırıcı yapısı (Bass vd. 2001b)

Dalgakılavuzları; LiNbO₃ alttaşa Ti difüzyonu yöntemi veya iyon değiş tokuşu yöntemi ile oluşturulmaktadır. Dalgakılavuzu modeli, fotolitografi yöntemi ile alttaş üzerine çıkartılmaktadır. Standart termal difüzyon prosesi genel olarak; 900 - 1050 °C'de ve 7 - 12 saat aralığında difüzyon fırınında gerçekleşmektedir. Tüm üretim aşamaları sonrasında yüzeyde 0.009'luk artışlı olağandışı kırılma indisli bir bölge meydana gelir.

İyon değiş tokuşu yönteminde ise; LiNbO₃ örneği; benzoik asit gibi yoğun proton konsantrasyonu içeren bir ergiyiğin içine daldırılmaktadır. Alttaşın yüzeyine yakın lityum iyonları, benzoik asitin içindeki protonlar ile yer değiştirir. Bu işlem kırılma indisi parametresini artırır. İyon değiş tokuşu prosesi sadece olağandışı kutuplanmayı değiştirir, diğer bir ifadeyle; sadece z eksenine paralel olan kutuplanmış ışık demeti kılavuzlanır. Ti difüzyonlu aygıt üretiminde; kutuplanmadan bağımsız bir kipleyci oluşturmak mümkünken, iyon değiş tokuşlu üretimde bu mümkün değildir. Olağandışı kırılma indisi olağan kırılma indisine göre daha yüksek olduğu için kutuplanma olağandışı kırılma indisi parametresi için daha yüksektir. Bu sebeple iyon değiş tokuşlu üretim yöntemi polarizasyon bağımlı olmaktadır. Kipleyci üretim aşaması; ilerleyen bölümlerde ayrıntılı bir biçimde anlatılacaktır (Bass vd. 2001b).

LiNbO₃ kipleycileri arasında yer alan faz kipleycileri; Y-ayırıcı geometrisi kullanılarak fotolitografi tekniği ile üretilmektedir. Gelen ışık dalgası, LiNbO₃ tabanlı elektro-optik kristal ve doğru bir şekilde yerleştirilmiş kutuplayıcı kullanılarak; kutuplanma özelliği ve şiddeti değişmeksizin faz kiplenmiş durumda elde edilebilmektedir. Bir faz kipleycisi yapısı şekil 2.7’de gösterilmektedir.



Şekil 2.7 Faz kipleycisi yapısı (Bass vd. 1995a’ dan değiştirilerek alınmıştır)

Şekil 2.7’de, girişte yerleştirilen $E_{ix}(t)=E_i \cos \omega t$ giriş elektrik alanına sahip x' eksenine boyunca yönelmiş bir kutuplayıcı ile gelen ışık dalgası elektro-optik kipleyciden geçtikten sonra faz kiplenmiş durumda olur.

$z=L$ ’de, kristal çıkışındaki optik dalga $E_o(t)=E_i \cos(\omega t - \Phi)$ şeklindedir. Ayrıca; oluşan toplam faz kayması ve doğal faz kayması denklem (2.2) ve denklem (2.3)’te gösterilmektedir.

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} n_{x'} + \Delta n_{x'} \cdot L = \Phi_0 + \Delta \Phi_{x'} \quad (2.2)$$

$$\Phi_0 = \frac{2\pi}{\lambda} n_{x'} L \quad (2.3)$$

n_x ; x yönündeki perturbe olmamış kırılma indisi değeridir. x yönü boyunca meydana gelen bir kutuplanma için elektriksel olarak indüklenmiş faz miktarı ise denklem (2.4) ile verilmektedir.

$$\Delta\Phi_x = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_x L \quad (2.4)$$

Kırılma indisindeki değişim, denklem (2.5) ile verilmektedir.

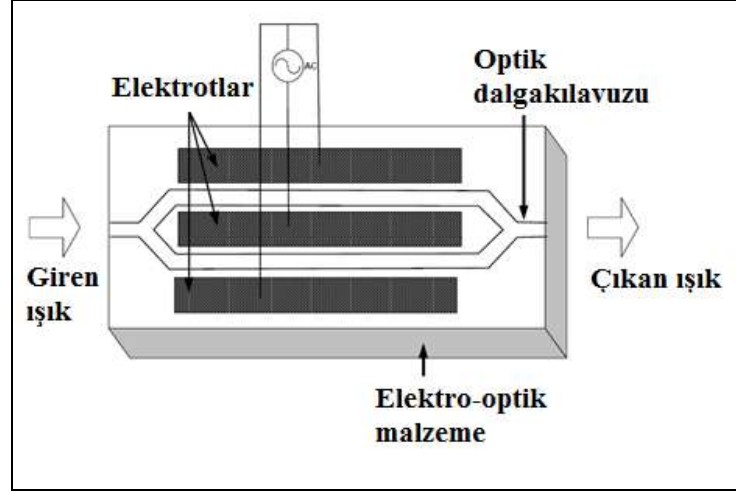
$$\Delta n_x = \frac{1}{2} n_x^3 r E_x \quad (2.5)$$

r ; elektro-optik katsayısını göstermektedir.

Bazı fotonik bağlantılarda, fotodedektörler sadece şiddet değişimine duyarlı olduğu için, faz kiplemesi uygun değildir. Işığın fazı yerine şiddet ile bilgi aktarımı daha doğru olmaktadır. Bunu sağlamak için sık tercih edilen bir yöntem; optik bir girişim oluşturarak, optik faz kiplemesini şiddet kiplemesine çevirmektir. Optik girişim; Mach-Zehnder girişim ölçeri kullanılarak yapılmaktadır. Mach-Zehnder girişim ölçerini esas alan geometri yapısı, şiddet kiplericisi tasarımında en çok tercih edilen geometri yapısıdır (Cummins 2005).

2.5.1.1 Mach Zehnder geometri yapısındaki şiddet kiplericisi

Şiddet kiplericisi; ışığın şiddetinin kiplenmesini sağlayan bir çeşit elektro-optik aygıttır. Bir Mach-Zehnder kiplericisi tipik olarak iki tane faz kiplericisi ve Y kollarından oluşmaktadır. Şekil 2.8'de Mach-Zehnder kiplericisi yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.8 Mach-Zehnder kipleycisi (Cummings 2005'den değiştirilerek alınmıştır)

Mach-Zehnder girişim ölçerinde; ışık tekli bir dalgakılavuzundan girer ve eşit olarak ikiye ayrılır. Çıkışta ise, girişte ikiye ayrılan kollar birleşir. Işık dalgaları ikiye ayrıldıktan sonra optik dalgakılavuzunda ilerler ve iki kolda güdümlenen ışık dalgaları girişim oluşturur. Girişim miktarı, kollardan birinde diğerine göre görelî faz farkı oluşturarak değiştirilebilmektedir (Bass vd. 1995a).

Mach-Zehnder girişim ölçeri yapısında üzerinde 3 parça elektrot yapısı bulunmaktadır. Üç elektrot da, optik dalgakılavuzlarının bulunduğu bölgede aynı miktarda elektrik alan açığa çıkarır. Ancak kipleme bölgesinde, iki elektrot'a (+) sinyal uygulanırken, diğer bir adet elektrota (-) sinyal uygulanmaktadır. Bu durumda zıt yönlü bir elektrik alan oluşmaktadır. Kenarlardaki elektrotlardan ortadaki elektrota doğru elektrik alan çizgileri yönelmektedir. Bu durum; her iki dalgakılavuzunda birbirine göre eşit ve zıt yönde faz kiplemesi oluşturmaktadır. Buna it-çek konfigürasyonu (push-pull configuration) denir (Cummings 2005).

Tek kipli dalgakılavuzuna giren ışık Y-eklem noktasında eşit miktarda iki kola ayrılır, ve iki kol arasındaki faz farkı başlangıçta sıfırdır. Dalgakılavuzu içerisinde ilerleme aşamasında, iki kolda ilerleyen ışık dalgaları arasında herhangi bir etkileşim yoktur. Elektrotlara eğer gerilim uygulanmazsa ve ışığın içinden geçtiği kollar aynı uzunlukta

ise güdümlenen ışık dalgaları çıkış tarafındaki Y-eklemine eş fazda ulaşmaktadır, ayrıca çıkıştaki tek modlu dalgakılavuzuna da eş fazlı olarak girerler. Küçük ışınım kayıpları haricinde, girişteki ışık şiddeti çıkıştaki ışık şiddetine eşit olur. Ancak, elektro-optik etki ile iki kolda ilerleyen ışık demetleri arasında π kadar faz farkı oluşturulursa, bu durumda aygıt; elektriksel olarak sürülen aç-kapa sistematiği ile çalışan bir optik şiddet kipleycisi olarak işlem görür.

İki kol arasındaki faz farkının $\Delta\Phi=\pi$ olduğu durumdaki uygulanan gerilime V_π gerilimi denir (Bass vd. 1995a). Analog uygulamalarda, kipleyci genel olarak $V_\pi/2$ 'de DC olarak beslenmiştir (Cummings 2005).

Şiddet kipleycisi genellikle ilerleyen dalga LiNbO_3 şiddet kipleycisi olarak tanımlanmaktadır. Dışarıdan uygulanan bir gerilim altında kırılma indisinde değişim meydana getirerek ışığın fazının değiştiği, böylece ışığın şiddetinin diğer bir ifadeyle gücünün kiplendiği aygıtlara şiddet kipleycisi denir. Yüksek frekanslarda elektrot yapısında mikrodalga sinyali ilerlemektedir, bu sebeple şiddet kipleycileri ilerleyen dalga kipleycisi olarak da adlandırılmaktadır. Mikrodalga sinyali 300 MHz – 300 GHz arasındadır. İlerleyen dalga şiddet kipleycileri analog radyo frekans uygulamaları, mikrodalga bağlantılı uygulamalarda, elektrik alan sensörlerinde, sayısal ve analog uygulamalarında tercih edilmektedir. Yüksek hızlı, yüksek bantgenişlikli entegre optik kipleyciler; LiNbO_3 bir alttaşın üzerine ilerleyen dalga CPW (Coplanar Waveguide) elektrot yapısı oluşturmakla elde edilmektedir. Elde edilen bu aygıtlar genellikle it-çek elektrot yapısı ile çalışan Mach-Zehnder şiddet kipleycileridir. İt-çek mekanizması ile zıt kutuplu alanlar her iki dalgakılavuzu kolunda da etki yaratmaktadır. Bu alanlar LiNbO_3 'ün kırılma indisini değiştirir, böylece her bir dalgakılavuzu kolunda ilerleyen ışığın fazı değişmektedir. Bu döngü, girişim ölçerin çalışma mekanizmasını oluşturur.

Şekil 2.8'de gösterildiği gibi, şiddet kipleycisi genel olarak optik dalgakılavuzları ve elektrot olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır. Yapı üzerinde oluşturulan elektrotlar CPW elektrotlarıdır. Üretilen şiddet kipleycisi genellikle RF (radyo frekans) bölgesinde kullanımı tercih edildiği için, aygıtın elektrotlarına dış bir kaynak ile

mikrodalga sinyali uygulanmaktadır. Y-eklem noktasında ayrılan iki kol üzerindeki optik dalgakılavuzu üzerinden ise optik sinyal ilerlemektedir. Kipleme işlemi; optik dalgakılavuzunda ilerleyen optik dalga ile CPW elektrot yapısında bulunan ilerleyen mikrodalga dalgası arasındaki etkileşim sonucu oluşmaktadır (Burns and VA 2001). İlerleyen dalga elektro-optik aygıtları ilk olarak 1963 senesinde uygulamadaki yerini almaya başlamıştır. Bu aygıtların geniş bantta performans sergilemeleri için hız eşlemesi ve empedans eşlemesi kriterlerinin sağlanması gerekmektedir. Hız eşlemesi; mikrodalga sinyali ile optik sinyal arasındaki faz hızı uyuşmasını ve mikrodalga sinyalindeki düşük elektriksel kayıpları tanımlamaktadır. Empedans eşlemesi ise mikrodalga dalgakılavuzu ile dış elektriksel bağlantılar arasındaki empedans uyuşmasını tanımlamaktadır. Bununla birlikte, LiNbO_3 'ün kırılma indisi ve dielektrik sabiti, elektrot geometrisinde meydana gelen bazı kısıtlamalar sebebiyle hız eşlemesinin sağlanmasını zorlaştırmıştır. Sayısal çözümleme yöntemleri ile aygıt yapısının modellenmesi yapılarak hız eşlemesi sağlanmaya başlanmıştır.

Hız eşlemesinin önemi optik dalga ve mikrodalga sinyali için kırılma indisleri karşılaştırılarak saptanabilir. n_o ; optik dalga için kırılma indisini, n_m ise mikrodalga sinyali için kırılma indisi değerini temsil ettiği varsayılırsa eğer; $n_o=n_m$ olduğu durumda dalgakılavuzu içinde ilerleyen optik dalga ile elektrot içerisinde ilerleyen mikrodalga sinyali aynı hızda hareket etmektedir. Bu sebeple optik dalga tüm elektrot uzunluğu boyunca aynı gerilim değerini görmektedir. Elektrot içerisinde ilerleyen mikrodalga sinyalinin kayıpsız bir şekilde iletilmesi için; sürücü gerilimi hiçbir frekans sınırlaması olmaksızın elektrot uzunluğunu artırarak azaltılabilmektedir. $n_o \neq n_m$ durumu için; optik dalga sinyali ile mikrodalga sinyali aynı hız değerinde ilerlemez, bu sebeple en uygun elektrot uzunluğu iki dalga sinyali arasındaki faz farkı ile sınırlandırılmıştır (Chang 2002).

Üretimi yapılan şiddet kipleycisine dışarıdan gerilim uygulandığında, yapı içerisinde elektrik alan oluşmaktadır. Elektrik alan uygulandığı zaman aygıtın elektrik alana karşı gösterdiği direnç, elektriksel geçirgenlik ifadesini tanımlamaktadır. Diğer bir ifadeyle geçirgenlik; indüklenen elektrik alanın dielektrik ortamı ne kadar etkilediğinin bir

ölçüsüdür. Genel olarak ε ile gösterilmektedir. Ortamın kırılma indisine de (n) bağlıdır. n ile ε arasında $n=\varepsilon^{1/2}$ bağıntısı sağlanmalıdır. n değeri arttığı zaman, $c=n.v$ ifadesinde v ; ışığın n kırılma indisli ortamda yayılma hızını gösterdiği için azalmaktadır. Ortamda elektromanyetik dalgaya karşı gösterilen direnç artmaktadır. Buna bağlı olarak ε ifadesi de artış göstermektedir. Şiddet kipleycisinin hız uyumsuzluğunu hesaplayabilmek için elektriksel geçirgenlik önem arz etmektedir ve yarı durgun yaklaşım ifadesi kullanılmaktadır. n_m ; denklem (2.6) ile ifade edilmektedir.

$$n_m = \varepsilon_{re}^{1/2} = \left(\frac{\varepsilon_r + 1}{2}\right)^{1/2} \quad (2.6)$$

Denklem (2.6)'ya göre; ε_{re} etkin dielektrik sabitidir ve LiNbO_3 ile havanın ortalama dielektrik sabitini göstermektedir. ε_r ; LiNbO_3 'ün bağıl dielektrik sabitidir. ε_r ; denklem (2.7)'de ifade edilmektedir.

$$\varepsilon_r = (\varepsilon_x \varepsilon_z)^{1/2} \quad (2.7)$$

ε_x ve ε_z ; çiftkırıcı malzemenin olağan ve olağandışı eksenleri için bağıl dielektrik sabitlerini temsil etmektedir. LiNbO_3 için $\varepsilon_x=43$, $\varepsilon_z=28$ 'dir. Bu durumda, $\varepsilon_r=25$ olarak hesaplanmaktadır. ε_r değeri denklem (2.6) ifadesinde yerine konulduğunda $n_m=4.225$ olarak tespit edilmektedir. Optik bölgede LiNbO_3 'ün kırılma indisi n_o ; telekomünikasyonda çalışılan dalgaboyları olan $1.3 \mu\text{m}$ 'de 2.15 ve $1.55 \mu\text{m}$ 'de ise 2.14 'tür. $c=n.v$ ifadesine göre malzemenin kırılma indisi, o malzeme içerisinde ilerleyen elektromanyetik dalganın ilerleme hızı ile ters orantılıdır. Bu sebeple; mikrodalga sinyali optik sinyale göre yaklaşık 2 kat daha yavaştır (Chang 2002). Ancak bu durum, alttaş ile elektrotlar arasında ara katman olmayan yapı için geçerlidir ve elektrot parametresine bağlı değildir. n_o ve n_m arasında fark olduğu için hız eşleşmesi mümkün olmamaktadır. Genişbantta kipleme sağlanabilmesi için n_o ve n_m değerleri arasındaki fark azaltılmalıdır. Böylece optik dalga ve mikrodalga sinyali aygıt içerisinde birbirine yakın hızda ilerler. n_o ; genelde alttaş malzemenin kırılma indisi ile belirlendiği için artırılmaz. Bu sebeple mikrodalga etkin indisi n_m azaltılmalıdır. Mikrodalga etkin

indisini azaltmak için genellikle düşük dielektrik sabitli bir ara katman malzeme kullanılmaktadır. Bu malzeme, alttaş ile elektrotlar arasına yerleştirilmektedir. Böylece, elektrik dalgasının büyük bir kısmı havada ve alttaş'a göre düşük dielektrik sabitli ara katman içerisinde ilerler. Kalın bir ara katman mikrodalga etkin indisini azaltabilmektedir (Gan 1996). Ara katman oluşturulması işleminin genellikle 1 GHz'den yüksek frekanslarda gerçekleştirilmesi uygun olmaktadır.

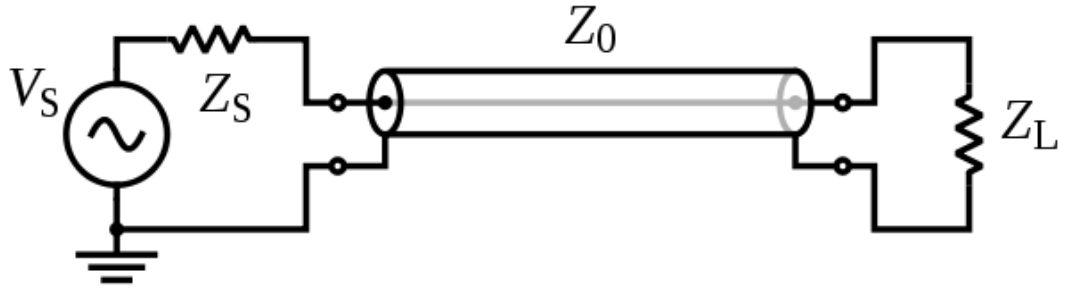
Şiddet kipleycilerinde yüksek frekanslar için, hız eşlemesi kadar empedans eşlemesi de önemli bir faktördür. Frekans tepkisi ve bantgenişliği, aygıtın performansı için önemli kriterlerdir. Şekil 2.8'de gösterilen kipleyci toplu sığa elektrot yapısını içermektedir. Toplu sığa devresinde, R_L diye adlandırılan yüklem direnci, RLC devresi oluşturmak için sığa ile paralel şekilde yerleştirilmiştir. Modern iletişim sistemleri GHz aralığında bantgenişliği gerektirdiği için, yüksek GHz mertebesinde sistem gereksinimleri için toplu sığa elektrot yapısı pratik bir çözüm değildir. Toplu sığa elektrot yapısı 1 GHz gibi düşük frekanslar için tercih edilmektedir. Elektrot yapısının dar bantgenişlikli RC tepkisine çözüm olarak ilerleyen dalga elektrot yapısını kullanmak öngörülmektedir. İlerleyen dalga konfigürasyonunda elektrotlar iletim hattı olarak kabul edilmektedir. İletim hattı giriş ucunda uyarılır, kiplemeyi sağlayan elektrik alanı elektrotlar üzerinde indüklenir ve optik dalgaya paraleldir. Hattın sonu ise empedans uyuşması sağlanacak şekilde elektrotların öteki ucunda sonlandırılır. Bu durumda elektrotlar RC devresi oluşturmaz. Dağılmış indüktans ve sığa ile iletim hattı olarak işlem görürler. Bütün bunlar dikkate alındığında empedans eşlemesi; iletim hattının üzerindeki toplam direnç ile gerilim uygulanan dış devre aygıtının yüklem direncinin uyuşması olarak tanımlanmaktadır. Dış devre aygıtının direnci genel olarak 50Ω (ohm) olarak belirlenmiştir (Cummings 2005).

Şiddet kipleycilerinin genel uygulama alanı optoelektronik osilatörlerdir. Optoelektronik osilatör; ışık sinyalinin oluşturduğu optik enerjiyi mikrodalga enerjiye çeviren yapılardır. Işık kipleyciye girdikten sonra fiber içerisinde ilerler ve aygıttan çıktıktan sonra bir fotodedektör yardımıyla algılanır ve tekrar elektriksel sinyale dönüştürülür. Fotodedektörün çıkışı yükseltip filtrelenmektedir ve kipleycinin

elektriksel ucuna tekrar verilmektedir. Bu yapı; elektriksel ve optik sinyalleri aynı anda sağlamaktadır. Bu da fotonik uygulamalarda önemli bir avantaj sağlamaktadır. Şiddet kipliyicileri optoelektronik mikrodalga osilatörlerin başlıca uygulama alanı olduğu için, bu tip osilatörler oldukça kararlı mikrodalga sinyali üretme kapasitesine sahiptir. GHz mertebesinde sinyal üretilebilmektedir (Yao ve Maleki 1996).

2.5.2 LiNbO₃ şiddet kipliyicilerinde ilerleyen dalga elektrotlarının mikrodalga özellikleri

LiNbO₃ şiddet kipliyicilerinde, elektrotun karakteristik empedansı ve elektrotlar üzerinde ilerleyen elektrik dalgasının etkin indisi aygıtın tasarımı için önemli iki parametredir (Gan 1996). Karakteristik empedans, iletim hattı olarak tanımlanan elektrot üzerinde ilerleyen tek bir elektrik dalgasının oluşturduğu gerilimin akıma oranı olarak tanımlanmaktadır. Z_0 ile gösterilmektedir. Karakteristik empedans; iletim hattının geometrisi ve elde edildiği malzemeye bağlı olarak belirlenmektedir. Düzgün geometride bir iletim hattı için uzunluğuna bağlı değildir. Birimi SI birim sisteminde Ω (ohm)'dur. İletim hattı olan elektrot; kaynak ve yükleme bağlantılarına sahip bir devrede, bu iki bağlantı arasında elektriksel iletim ve veri aktarımı sağlamaktadır. Şekil 2.9'da iletim hattı bağlantısı gösterilmektedir (Anonymous 2013c).



Şekil 2.9 İletim hattı bağlantısı (Anonymous 2013c)

1 GHz'e kadar olan frekans bölgesi için elektromanyetik dalganın dalgaboyu, aygıtın elektrot boyu veya bunu temsil eden iletim hattının boyundan büyük olursa gelen dalga hattın üzerinde ilerleyebilir. Ancak frekans arttıkça, diğer bir ifadeyle yaklaşık 100 kat

fazla GHz mertebesinde gelen sinyalin dalgaboyu $c=\lambda f$ bağıntısına göre azalmaktadır ve ayrıca bu sinyal ilerleyen dalgayı temsil etmektedir. İlerleyen dalga, AC gerilim sağlayan dış bir sürücü kaynaktan sağlanmaktadır ve mikrodalga sinyalidir. Mikrodalga sinyali diğer bir ifadeyle ilerleyen dalga, elektrot üzerinde ilerlemektedir. Elektrot uzunluğu, dalganın dalgaboyundan fazla olduğu durumda, gelen sinyal hattın diğer ucunu göremez ve hat üzerinde ilerleyemez. İşte bu noktada hattın empedansı ile mikrodalga sinyali yayan dış sürücü kaynağın empedansının eşleşmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Empedans bir dirençtir, genel olarak Z ile temsil edilmektedir ve $Z=R+iX$ gibi kompleks bir niceliktir. R ; gerçel kısımdır ve direnci temsil etmektedir. X ise sanal kısımdır ve reaktans terimidir. Sabit ve düşük frekansta veya DC gerilim uygulandığı durumda reaktans terimi ihmal edilebilir ve sadece direnç terimi önem kazanmaktadır. Bu durumda empedans terimi saf dirençten oluşmaktadır ve gerçeldir. Ancak değişen sinyallerde diğer bir ifadeyle AC gerilim uygulandığı durumda frekansa bağımlılık da söz konusudur ve reaktans terimi de önem kazanmaktadır. Yüksek GHz frekanslarında direnç ve reaktans önemli olduğu için empedans terimi dikkate alınmalıdır. Buna ek olarak; yüksek frekanslarda her ne kadar iletim hattının karakteristik empedansı söz konusu olsa da, hesaplamalarda iletim hattının empedansını saf direnç olarak ele almak ideal durumdur. Dış sürücü kaynağın empedansı da bu ideal duruma uygun olarak belirlenmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

Yürütülen tez çalışmasında; elektron demeti buharlaştırma cihazı, rezist kaplama cihazı, maske hizalama cihazı, optik mikroskop, dektak cihazı, difüzyon fırını, kesim cihazı, prizma eşleme cihazı, tıraşlama-parlatma cihazı, fiber ek yapma cihazı, kesici, soyucu, optomekanik konumlandırma mekanizması, optik mikroskop, wire-bond cihazı, optik güç ölçer ve dedektör, UV ışık kaynağı, DC güç kaynağı, sinyal üretici ve bias-tee, kullanılmıştır.

Elektron demeti buharlaştırma cihazı; hedef malzemeye elektron demeti göndererek malzemenin buharlaştırılıp erimesini sağlamaktadır. Ti kaplama işlemi sırasında bir pota içindeki Ti malzemesi cihaz içine yerleştirilmiştir. Elektron demeti gönderilerek Ti metalinin buharlaştırılıp eritilerek LiNbO₃ yonganın yüzeyinin Ti metali ile kaplanması sağlanmıştır. Aynı şekilde Au kaplanması sırasında da elektron demeti Au'yu buharlaştırarak yonga yüzeyi Au ile kaplanmıştır.

Rezist kaplama cihazı (spinner), LiNbO₃ yonga yüzeyinin rezist kimyasalı ile döndürülerek kaplanması için kullanılmıştır. 4000 devir/sn hızla cihaz döndürülerek rezist kaplama işlemi yapılmıştır.

Maske hizalama cihazı; LiNbO₃ üzerine tasarlanan maske yapısını kopyalamak amacıyla kullanılmıştır. UV ışık kaynağı ile maske yapısı yonga üzerine çıkartılmıştır.

Optik mikroskop; maske yapısı kopyalandıktan sonra yonga yüzeyini incelemek ve dalgakılavuzu genişliğini ölçmek amacıyla kullanılmıştır. Mikroskobun 20X ve 40X gibi değişik büyütme oranlarında objektifleri ile görüntüleme yapılabildiği gibi bir bilgisayar programı ile de görüntüleme, genişlik ve uzunluk gibi bazı ölçümler yapılabilmektedir.

Dektak cihazı; yüzeyin belirli noktalarındaki yükseklik veya derinlik farkını ölçmekte kullanılan bir cihazdır. Değişik büyütmelerde bir kamera ile görüntüleme yapılmaktadır. Bilgisayar desteklidir ve cihaz yazılımı programlanarak ölçüm gerçekleştirilmektedir. Tez çalışması kapsamında, Dektak cihazı ile yonga yüzeyinin belirli noktaları için Ti kaplama kalınlığı ölçümü yapılmıştır.

Difüzyon fırını; difüzyon programının yazıldığı arayüz ve örneklerin yerleştirildiği kuartz tüp olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Program kısmına ilgili difüzyon programı yazıldıktan sonra örnekler kuartz tüp içine yerleştirilir ve difüzyon başlatılır. Bu cihaz tez çalışmasında, Ti metalinin LiNbO_3 yonganın iç bölgelerine doğru difüzyon için kullanılmıştır.

Kesim cihazı; LiNbO_3 yongayı parçalara ayırmak amacıyla kullanılmıştır. Cihaz; bilgisayar menüsü ve kesim işleminin yapıldığı bölme olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Bilgisayar menüsünde kesim programı oluşturularak yonga kesimi yapılmıştır. LiNbO_3 malzemesinin sertliğine ve darbe dayanımına göre uygun bıçak kesim öncesinde seçilmiştir.

Tıraşlama ve parlatma cihazı, kesim işleminden sonra düz ve pürüzsüz bir yüzey elde etmek ve ışığı geçtiği yüzeyi parlatmak amacıyla kullanılan bir cihazdır. Temel olarak tıraşlama levhası ve örneği tutan bir tutucu olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Tıraşlanacak örneğe göre farklı döndürme hızlarında işlem yapabilmektedir.

Prizma eşleme cihazı; Ti difüzyon derinliğine bağlı olarak değişen kırılma indisi ölçümlerini yapmak amacıyla kullanılmıştır. Cihazın ölçüm bölgesinin içinde bir prizma bulunmaktadır. Prizmaya 532 nm dalgaboyunda ışık demeti gönderilir. Prizma ile örnek arasında hava boşluğu vardır. Prizmaya gönderilen ışık demeti, prizma ile ölçülecek film yüzeyi arasındaki mesafeden tünelleme yapar. Böylece fotodedektör üzerine düşen ışığın şiddetinde azalma olur, prizmadan tam yansıma olmaz. Bu şekilde

ışığın şiddetine bağlı olarak Ti difüzyon derinliği tespit edilmekte ve LiNbO_3 'ün Ti difüzyonu öncesi ve sonrasındaki kırılma indisi değişimi saptanmaktadır.

Aygıtın üretimi sonrasında kullanılan fiber ek yapma cihazı; iki fiberi birbirine bağlantı yapmak amacıyla kullanılmıştır. Cihaz içine yerleştirilen fiberler uç uca ısı ile ek yapılmaktadır. Isı kaynağı elektron arkıdır. Fiberler otomatik olarak birbirine göre hizalandıktan sonra ark yapılmaktadır. Buna ek olarak; fiberleri ek işlemine hazırlamak amacıyla soyucu ve kesici kullanılmıştır. Soyucu; ek yapılacak ucu 1 - 2 cm kadar soymak amacıyla kullanılan bir alettir. Kesici ise fiber ucunun düzgünlüğünün sağlanması için kullanılmıştır. Fiber bir tutucu içine yerleştirildikten sonra, tutucu da kesicinin içine yerleştirilip kesme işlemi yapılmıştır.

Optomekanik konumlandırma mekanizması; üzerine yerleştirilen fiberin hareket etmesini sağlayan mekanizmadır. x, y ve z ve bu eksenlerin dönme eksenleri etrafında hareket mesafesine sahiptir. Mekanizma sürücü kaynaklar sayesinde bilgisayar arayüzüyle kontrol edilmektedir.

Optik mikroskop; karakterizasyonu yapılan aygıtın görüntülenmesini sağlamaktadır. 10X, 20X gibi farklı büyütmelemlerde oküler ile istenilen bölgeler görüntülenmektedir.

Wire-Bond cihazı; aygıtın elektriksel bağlantısının yapılması için kullanılmıştır. Optik aygıt PCB (Printed Circuit Board) malzemesi üzerine yapıştırıldıktan sonra ultrasonik enerji aygıt üzerinde bir basınç uygulayarak Au telinin örneğe elektriksel olarak bağlantı yapılmasını sağlamaktadır.

Optik güç ölçer ve dedektör; optik karakterizasyon sırasında aygıt içinden geçen ışık gücünün ölçülmesi için kullanılmıştır. Kullanılan dedektör 800 nm-1650 nm arasındaki dalgalınlara karşı duyarlı olmakla birlikte, InGaAs tabanlıdır.

UV ışık kaynağı; bütünleme sırasında UV yapıştırıcının sertleşmesini sağlamak için kullanılmıştır. 1. ve 2. kol bütünlemeleri sırasında örnek ile fiber arasına uygulanan

yapıştırıcı UV ışık kaynağı ile sertleştirilmiştir. Cihaz menüsünde yer alan süre ve şiddet parametreleri değiştirilerek istenilen dozda UV uygulanabilmektedir.

DC güç kaynağı; frekansa bağımsız olarak aygıtın V_{π} gerilimini ölçmek için kullanılmıştır. ± 25 V aralığında çalışmaktadır.

Sinyal üretici; 10 MHz - 20 GHz arasında çalışma kapasitesine sahiptir. Sisteme 1 GHz'e kadar frekans sağlamak ve tetikleme yapmak amacıyla kullanılmıştır. Ön ve arka girişi vardır. Frekans öndeki girişten sağlanırken, tetikleme ise arka ve ön girişlerin her ikisinden de yapılabilir.

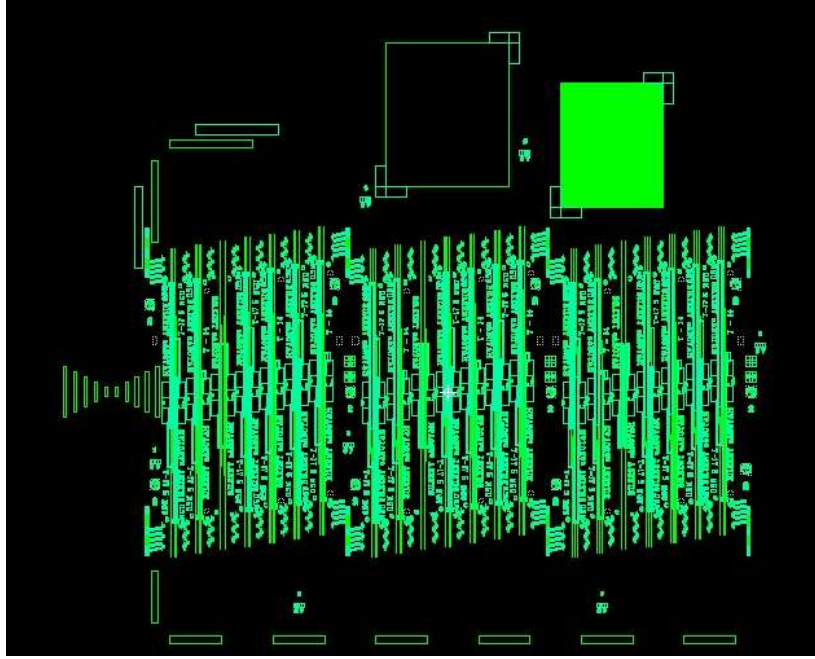
Bias-Tee; bazı elektronik bileşenlerin DC beslem noktasını ayarlamak amacıyla kullanılan üç girişli bir bağlantı elemanıdır. Bir çeşit çiftleyicidir. Düşük frekanslı DC sinyali ve yüksek frekanslı AC sinyalini birleştirerek DC ve AC sinyallerinin her ikisinin de aynı anda aygıttan geçirilmesini sağlamaktadır. Düşük frekanslı girişi beslem noktasını ayarlarken, yüksek frekanslı girişi ise radyo frekans sinyallerini geçirir, ancak beslem seviyelerini geçirmez. Üçüncü giriş ise aygıtı bağlanırken, beslem ve RF girişlerini birleştirerek AC ve DC sinyalleri aynı anda aygıt içinden geçirilmektedir. T şeklinde bir geometriye sahiptir. Kavramsal olarak bias tee; AC sinyalin geçiren ama DC biası engelleyen ideal bir sığa ve AC sinyali engelleyen ama DC'yi geçiren ideal bir indüktör olarak ele alınabilir. Genellikle iletim hattı uygulamalarında tercih edilmektedir. Karakteristik impedansı genellikle standart 50 Ω olarak tercih edilmektedir. DC gücü AC sinyalin içine yerleştirmek amacıyla kullanılmaktadır.

3.2 Yöntem

Yürütülen tez çalışmasının yöntem basamağında; LiNbO₃ tabanlı şiddet kipleycisinin maske tasarımı, UV fotolitografi tekniği ile üretimi, optik ve elektriksel karakterizasyonu anlatılmaktadır.

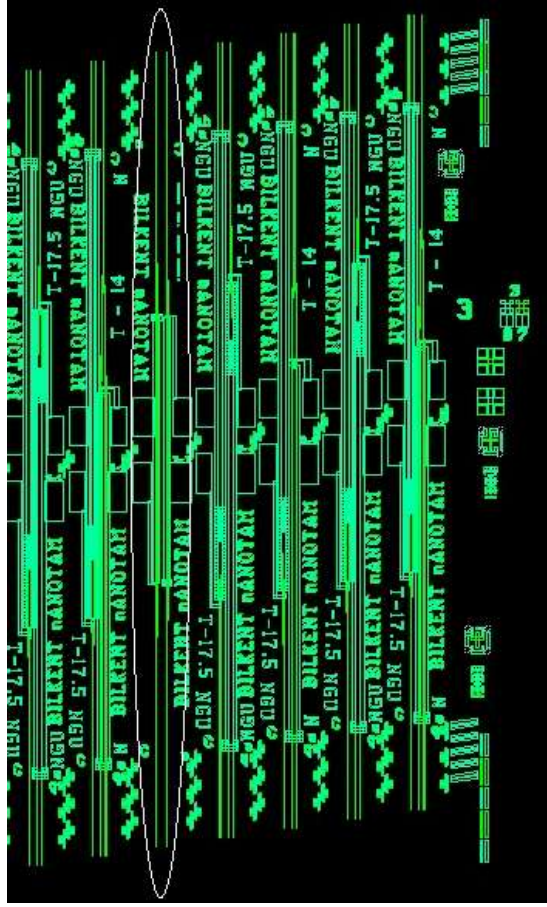
3.2.1 LiNbO₃ tabanlı şiddet kipleycisi maske tasarımı

Yürütülen tez çalışması kapsamında LiNbO₃ şiddet kipleycisinin bilgisayar ortamında maske tasarımı yapılmıştır. Hazırlanan maske yapısı genel olarak şekil 3.1’de gösterilmektedir.



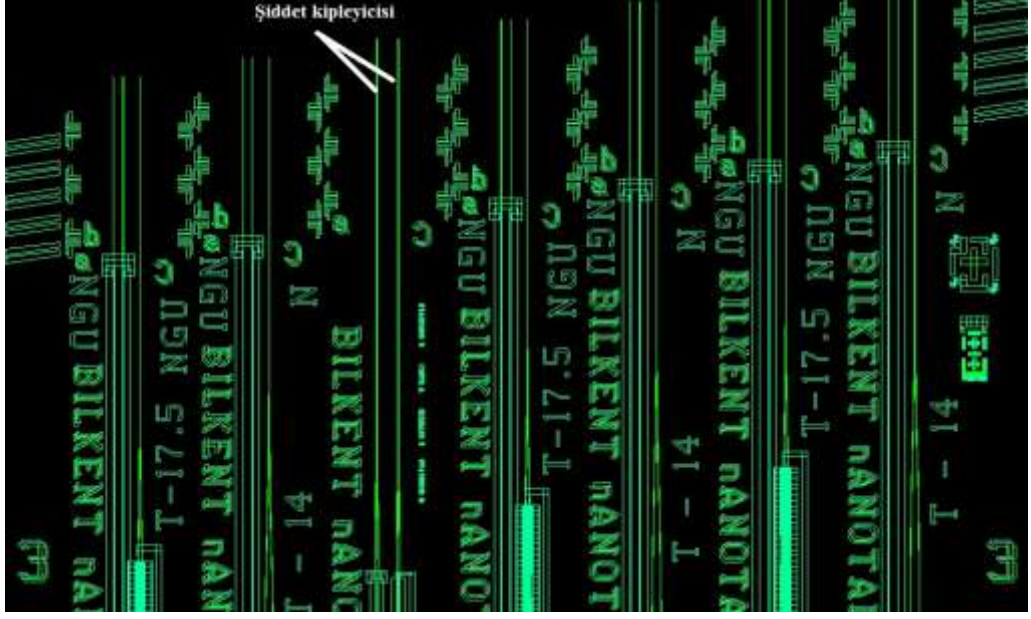
Şekil 3.1 LiNbO₃ şiddet kipleycisi maske yapısı

Maske üzerinde üçerli gruplar halinde olmak üzere toplam 21 adet aygıt bulunmaktadır. Üçerli gruplardan birinin maske detayı şekil 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Şiddet kipeyicisi maske detay görünümü

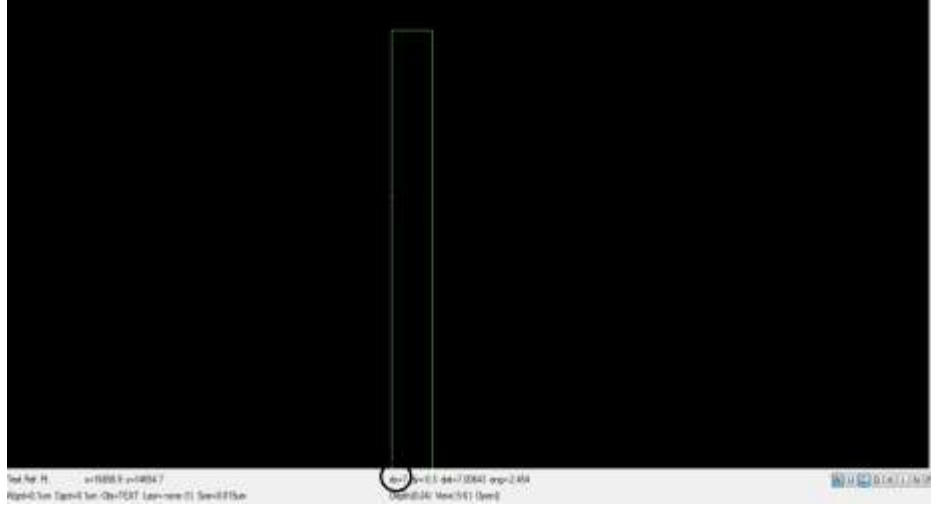
Hazırlanan maske eşlenik maskedir. Diğer bir ifadeyle aygıtın her iki uç kısmında da bir giriş kolu ve bir çıkış kolu bulunmaktadır. Üretimi yapılan her bir aygıtın üzerinde iki adet dalgakılavuzu bulunmaktadır. Böylece her bir aygıt için iki ayrı ölçüm yapılmıştır. Şekil 3.2’de daire içine alınmış bölgede şiddet kipeyicisi gösterilmektedir. Bir giriş ve bir çıkış ucu olan iki adet aygıt görülmektedir. Girişteki kol ikiye ayrılıp çıkışta tekrar birleşmektedir. Şiddet kipeyicisinin maske detay yapısı şekil 3.3’te gösterilmektedir.



Şekil 3.3 Şiddet kipleycisi maske detay yapısı

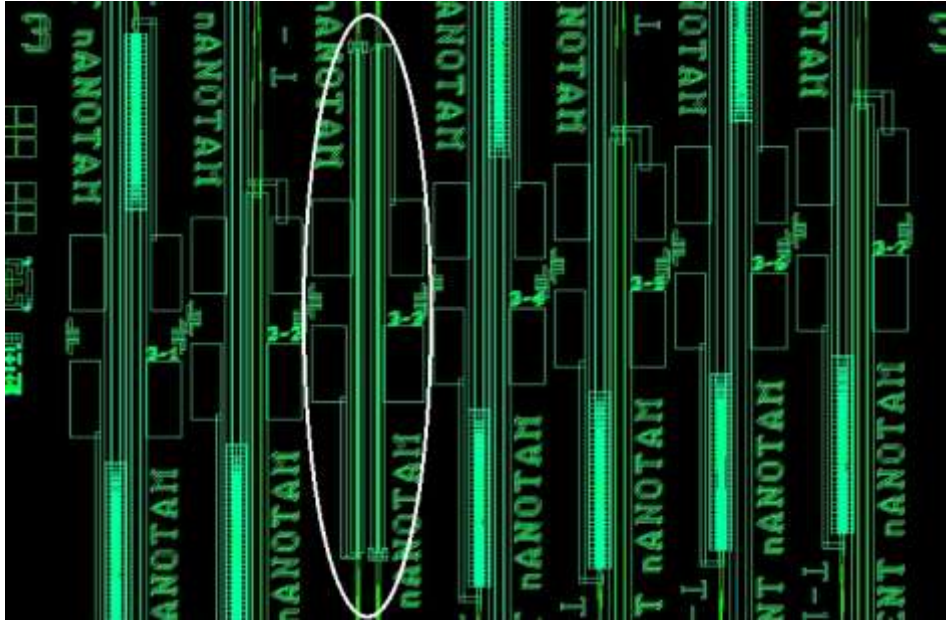
Şekil 3.3'te gösterildiği gibi maske üzerinde iki adet ayrı kipleyci yapısı mevcuttur. Şiddet kipleycisinin belirli bir mesafe sonra iki kola ayrıldığı görülmektedir. Çıkışta ise iki kol birleşmektedir.

Tasarlanan her bir şiddet kipleycisinin dalgakılavuzu genişliği $7 \mu\text{m}$ 'dir. Şekil 3.4'te dalgakılavuzunun maske detay yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.4 Şiddet kipleycisi dalgakılavuzu yapısı maske detay görünümü

Maske üzerinde dalgakılavuzunun yanısıra elektrotlar da yer almaktadır. Şekil 3.5'te elektrot maske detay yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.5 Elektrot yapısı maske detay görünümü

Şekil 3.5'te gösterilen maske detayında daire içine alınmış bölgede dört adet dikdörtgen bulunmaktadır. Bu dikdörtgen yapılar, elektriksel iletimi sağlayan altın telinin aygıt

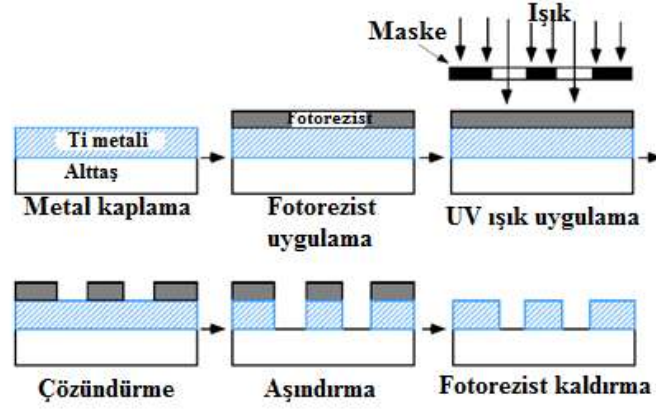
üzerine bağlantı yapılmasını sağlayan yapılardır. Altın bağlantısı yapılacağı için bu yapılar elektrot litografisi aşamasında altın ile kaplanmıştır.

3.2.2 LiNbO₃ tabanlı şiddet kipleycisi UV fotolitografi tekniği ile üretimi

Yürütülen tez çalışması kapsamında şiddet kipleycileri fotolitografik proseslerle üretilmiştir. Fotolitografi; mikrofabrikasyonda kullanılan bir prostedir. Fotolitografide en çok tercih edilen yöntem UV litografidir. Bu teknikte UV ışık bir maske üzerinden, bu dalga boyundaki ışığa duyarlı ve alttaş olarak kullanılan yonganın üzerine kaplanmış olan fotoreziste iletilmektedir. Maskenin şekli, rezistin özellikleri ve takip eden birtakım kimyasal süreçler sonunda istenilen yapı alttaş üzerine oluşturulmaktadır. Yürütülen tez çalışmasında ise; UV fotolitografi tekniği ile LiNbO₃ alttaş üzerine temiz oda proseslerini kapsayan bir dizi çalışmalar ile optik dalgakılavuzu ve elektrotlar oluşturulmuştur. UV fotolitografisi genel olarak aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır: (Anonymous 2012b).

1. Yonga hazırlama
2. Fotorezist uygulama
3. Fotomaske hizalama
4. UV ışık uygulaması
5. Develop etme (UV ışığa maruz kalan fotorezisti çözündürme)
6. UV ışığa maruz bırakılan oksit tabakasını aşındırma (*etching*)
7. Kalan fotorezisti kaldırma

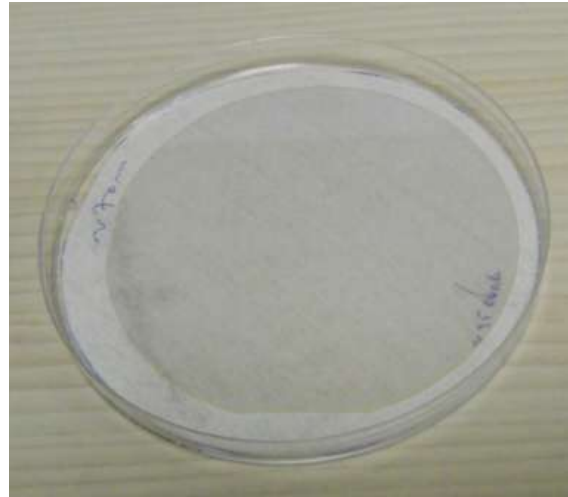
UV fotolitografi tekniğinin şematığı şekil 3.6'da gösterilmektedir.



Şekil 3.6 UV fotolitografi basamakları (Anonymous 2010'dan değiştirilerek alınmıştır)

3.2.3 LiNbO₃ yonga Ti kaplama işlemi

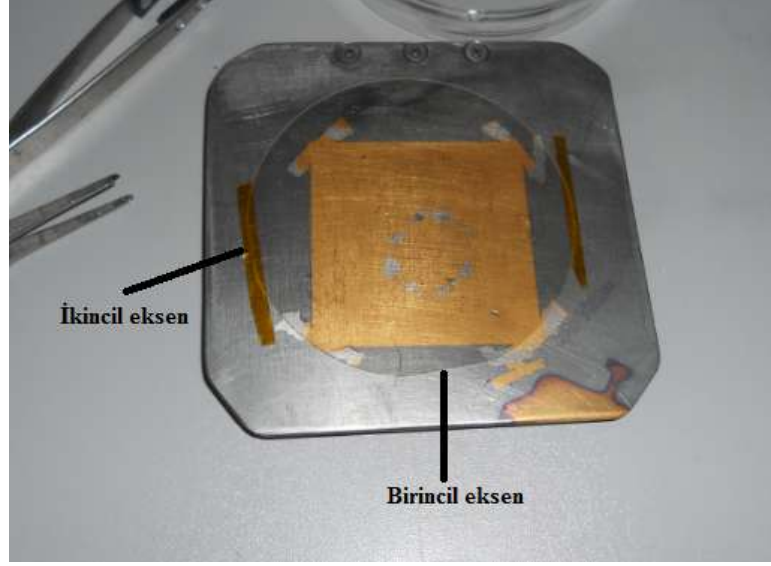
Yürütülen tez çalışmasında, LiNbO₃ tabanlı şiddet kipleycisi UV fotolitografi tekniği ile üretilmiştir. Üretimin ilk aşamasında; LiNbO₃ yonga Ti metali ile elektron demeti buharlaştırma cihazında kaplanmıştır. LiNbO₃ yonga şekil 3.7'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7 LiNbO₃ yonga

Kullanılan LiNbO₃ yongada birincil ve ikincil olmak üzere iki eksen bulunmaktadır. LiNbO₃ yonga; Ti (Titanyum) kaplama işlemi için bir tutucu üzerine yerleştirilmiştir. Üretim sürecinde etkin bir sonuç elde etmek ve seri üretim yapmak için 4 adet yonga

tutucu üzerine sabitlenmiştir. Yerleştirme işlemi birincil eksen altta, ikincil eksen ise solda olacak şekilde yapılmıştır. Şekil 3.8’de gösterilmektedir.



Şekil 3.8 LiNbO₃ yonga birincil ve ikincil eksen gösterimi

Şekil 3.8’de gösterildiği gibi yonga bir tutucunun üzerine bantla sabitlenmiştir. Ti metali boncuk halinde bir pota içerisine yerleştirmiştir. İçinde Ti metali bulunan pota elektron demeti buharlaştırma cihazı içerisine yerleştirilmiştir. Bu cihaz Ti metalinin elektron demeti ile buharlaştırılarak erimesini ve LiNbO₃ yongaların Ti metali ile kaplanmasını sağlamaktadır. Elektron demeti buharlaştırma cihazı şekil 3.9’da gösterilmektedir.



Şekil 3.9 Elektron demeti buharlaştırma cihazı

Şekil 3.9’da soldaki resimde cihazın dış görüntüsü, sağdaki resimde ise cihazın iç görüntüsü gösterilmiştir.

Yongaların sabitlendiği tutucu cihaz içinde döner tabla üzerine yerleştirilmiştir. Yongaların kaplama yapılacak olan yüzleri aşağıda kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Ti metalinin buhar haline gelip erimesi için vakuma alma işlemi yapılmıştır. Sistemin basıncı 10^{-6} mbar’a düşünceye kadar vakuma alma işlemi yapılmıştır. Ti metalinin buhar haline gelip erimesi için ortamın havası alınmıştır ve vakum ortamı sağlanmıştır. Her bir yonga aynı kalınlıkta kaplama yapılacağı için döndürerek kaplama yapılmıştır. Ti kaplanmış LiNbO₃ yonga şekil 3.10’da gösterilmektedir.



Şekil 3.10 Ti kaplanmış LiNbO₃ yonga

3.2.4 Fotorezist kaplama

Temiz oda koşullarında fotolitografisi yapılacak olan yongalara; Ti kaplama işleminden sonra sırasıyla aseton ve alkol banyosu yaptırılmıştır. Bu adım; litografiye başlamadan önce yonganın üzerinde varsa yabancı ve istenmeyen kalıntıları temizlemek amacıyla yapılmıştır. Asetona-alkol banyosu şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Aseton-alkol banyosu

Aseton-alkol banyosundan sonra belirli bir sıcaklıkta ısıtma ve rezist kaplama işlemi yapılmıştır. Fotorezist; yüzeyde kaplama tabakası oluşturmak için fotolitografide kullanılan ışığa duyarlı bir malzemedir. Fotorezist sadece sarı ışığa duyarlıdır ve sarı ışığa maruz bırakılınca yapısı bozulmaz. Bu sebeple, fotolitografik çalışmalar sarı odada yapılmıştır. Negatif ve pozitif olmak üzere 2 tür fotorezist uygulaması vardır. Pozitif fotorezist; UV ışığa maruz kalan fotorezist bölgesinin çözündürme işlemi ile giderilmesidir. Işığa maruz kalmayan kısım çözünmez. Negatif fotorezist ise UV ışığa maruz kalan bölgenin çözündürme işlemine duyarlı olması ve çözünmemesidir. Işığa maruz kalmayan kısım ise çözünür. Yürütülen tez çalışmasında pozitif fotorezist tekniği kullanılmıştır (Anonymous 2012c).

Rezist kaplama işleminde önce yongalar 110 °C'de 1dk süre ısıtıcı üzerinde ısıtılmıştır. Bu işlem; yonga üzerindeki yabancı ve kalıntı maddeleri buharlaştırmak ve kaplanacak yüzeyleri homojen rezist kaplama işlemine hazırlamak amacıyla yapılmıştır.

Rezist kaplamasında; ilk olarak sıvı ve viskos haldeki fotorezist maddesi 4 adet pipete çekilmiştir. Pipet içindeki rezist kimyasalı şekil 3.12'de gösterilmektedir.

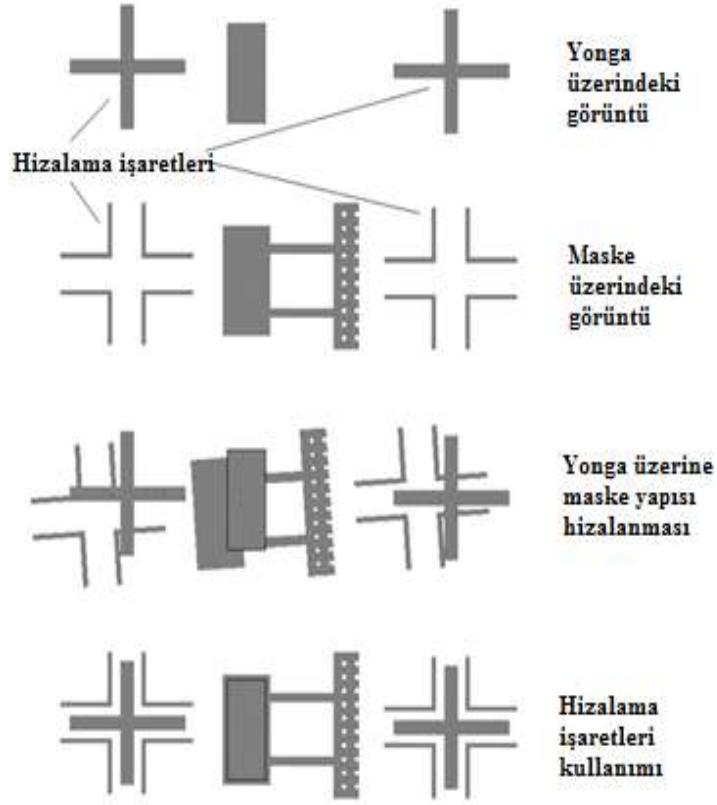


Şekil 3.12 Fotorezist

Hazırlanan rezistler yongaların üzerine homojen bir şekilde damlatılmıştır ve bu yongalar daha sonra kaplama işleminin yapılacağı spinner içine yerleştirilmiştir. 4000 devir/sn hız ile cihaz döndürülerek rezist kaplama işlemi yapılmıştır. Kaplama işlemi bittikten sonra, yonga üzerindeki rezist kalıntılarını ortadan kaldırmak için 1 dk süre ile ısıtma işlemi yapılmıştır. Döndürme işleminde yonga kenarları orta kısımlara göre fazla miktarda kaplanmıştır. Dolayısıyla, orta ve kenar kısımları arasında rezist kalınlığı farklı olur. Kalınlık farkını azaltmak amacıyla yonga kenarları aseton ile temizlenmiştir. Aseton rezist'i çözen bir kimyasaldır, bu işlemlerle yonganın tüm yüzeyi eşit bir şekilde rezist kaplanmış olur. Uygulanan bu işleme rezist kaldırılması denir.

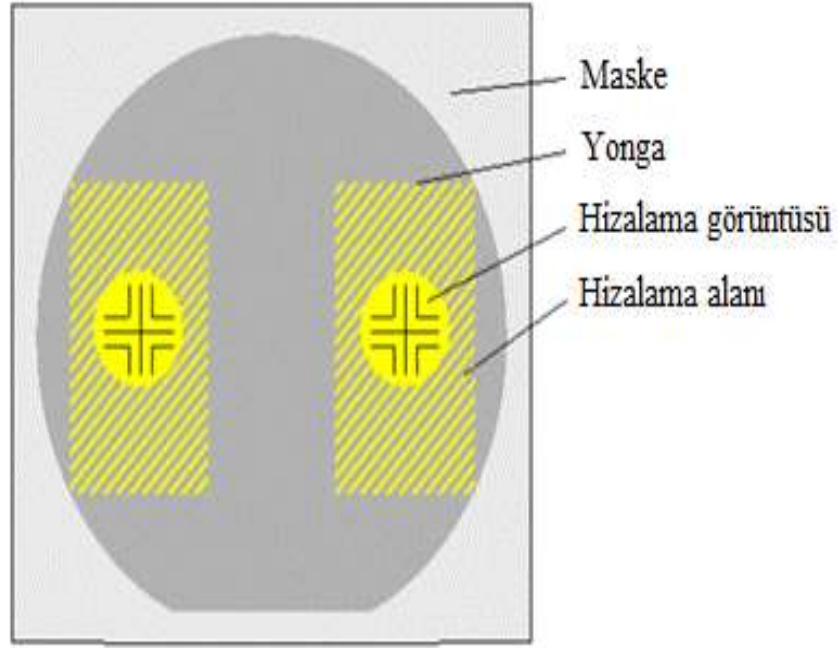
3.2.5 Maske hizalama ve yonga üzerine maske yapısının kopyalanması

Rezist kaldırma işleminden sonra maske hizalama cihazında maske hizalama işlemi yapılmıştır. Maske hizalama; istenilen yapıyı yonga üzerine hizalamak ve kopyalamak amacıyla yapılan bir işlemdir. Hizalama işleminde; maske üzerindeki şekillerin yonga üzerine çıkarılması için hizalama işaretleri kullanılmaktadır. Hizalama işaretleri çok hassas derecede hizalama işlevine yardımcı olmaktadır. Tipik bir maske yapısındaki hizalama işaretleri şekil 3.13'te gösterilmektedir.



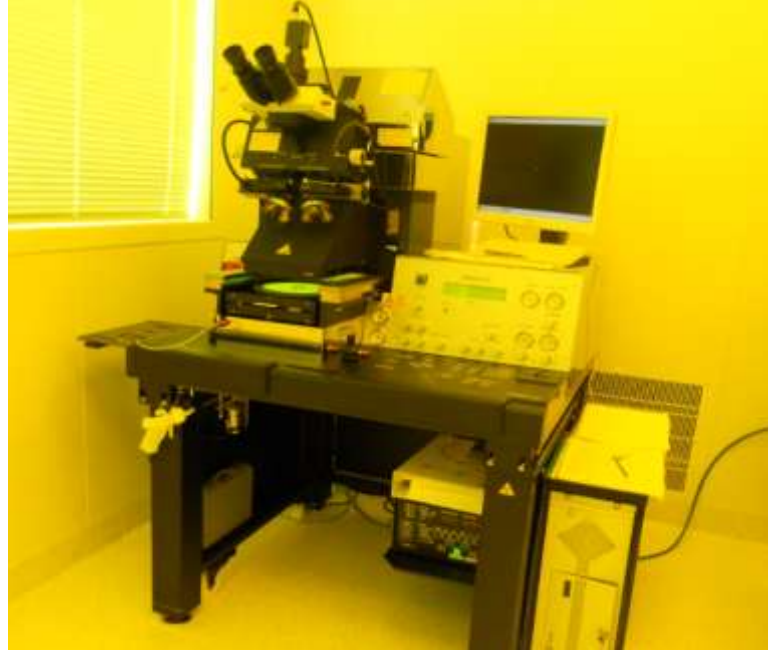
Şekil 3.13 Hizalama işaretlerinin kullanımı (Anonymous 2013e’den değiştirilerek alınmıştır)

Hizalama işaretleri maskenin üzerinde yer almaktadır. Maske hizalama işleminin ilk adımı olarak; maske bir tutucu üzerine sabitlenip cihaza yerleştirilmiştir. Yongayı cihaza sabitlerken; yonganın birincil ekseninin maskenin hizalama işaretlerine paralel olacak şekilde sabitlemesi yapılmıştır. Şekil 3.14’de hizalama işaretlerinin yonganın birincil eksenine göre konumlandırılması gösterilmektedir.



Şekil 3.14 Hizalama işaretlerinin konumlandırılması (Anonymous 2013e'den değiştirilerek alınmıştır)

Yonga cihaz içinde hareket ettirilerek kabaca maske-yonga hizalama işlemi yapılmıştır. Maske yongaya değdikten sonra belirli bir mesafe ile yongadan ayrılmıştır. Hizalama sonrasında maske üzerine 12.7 sn. süre boyunca UV ışık uygulanmıştır ve maskenin üzerindeki şeklin yonga üzerine kopyalanması sağlanmıştır. Kullanılan maske hizalama cihazı şekil 3.15'te gösterilmektedir.



Şekil 3.15 Maske hizalama cihazı

Doğru bir maske oluşturma işlemi için gereken UV uygulama parametreleri; ışın kaynağının dalgaboyuna ve fotorezistte istenilen özellik değişimlerini sağlayacak UV dozuna bağlıdır. Farklı türde fotorezistler farklı dalgaboylarına karşı farklı duyarlılık sergilemektedirler. UV ışık uygulanacak yüzeyin fiziksel özellikleri UV dozunu etkilemektedir. Örneğin; fotorezistin altında yansıtıcı tabaka varsa soğurucu bir tabakaya göre daha fazla miktarda UV uygulaması ile işlem sonuçlanabilmektedir. Çünkü yansıtıcı tabaka için; fotorezist hem gelen ışın hem de yansıyan ışımaya maruz kalmaktadır. Yonganın aşırı veya az UV'ye maruz kalması rezist tabakasının yapısını değiştirmektedir. Rezist tabakası aşırı UV'ye maruz bırakılırsa; pozitif fotorezist için rezist tabakası kenarlarda aşınabilir. Şeklin boyutlarında azalma ve köşelerde ovallik söz konusu olabilir. Rezist tabakası az UV'ye maruz bırakılırsa eğer; maske yapısı tam olarak yonga üzerine kopyalanamaz ve yine rezist tabakası şeklinde bozulmalar söz konusu olur. Bu nedenle UV dozu ve süresi; rezist yapısına, çeşidine ve kalınlığına bağlı olarak uygun şekilde tespit edilmelidir.

3.2.6 Çözündürme işlemi

Maske yapısının yonga üzerine kopyalama işleminden sonra çözündürme işlemi yapılmıştır. Rezist; sarı ışık haricinde diğer tüm dalgalıboylarına karşı duyarlıdır. Dolayısıyla UV ışığa maruz bırakıldığı durumda yapısı bozulmaktadır. Maske kopyalama işlemi için UV uygulaması sırasında UV ışığa maruz kalan rezist yapıları bozulmuştur. Yapısı bozulan bölgeleri ortadan kaldırma işlemine çözündürme denir. Çözündürme işlemi için saf su/çözündürücü rezist kimyasalı karışımı bir kaptaki hazırlanmıştır. Yonga ilk olarak hazırlanan bu karışıma daldırılmıştır.

Maske hizalamada UV ışık uygulandığı zaman, UV ışığa maruz kalan rezist bölgeleri bozulmuştur. UV ışığa maruz kalmayan yerlerde ise bozunma olmamıştır bu bölgeler korunmuştur. Maske yapısında dalgalılavuzunun bulunduğu bölgeler rezist tabakası ile korunduğu için bu bölgelerde çözünme olmaz. Ayrıca, dalgalılavuzunun bulunduğu yerlerdeki rezist tabakası maske hizalama işleminde maske ile korunmaktadır. Maskenin üzerine oluşturulduğu saydam malzeme Krom'dan yapılmıştır. Krom UV ışığı yansıtır dolayısıyla dalgalılavuzunun bulunduğu bölge ve bu bölgedeki rezist tabakası UV ışığa maruz kalmaz ve korunmuş olur. Çözündürme işleminde sonra yonga bir kap içerisindeki saf suya daldırılarak temizlenmiştir.

Çözündürme işleminin amacı; yonganın tüm yüzeyi Ti metali ile kaplı olduğu için sadece dalgalılavuzlarının olduğu yerdeki rezist tabakasının korunmasının istenmesidir. Bu sebeple çözündürme işlemi ile diğer bölgelerdeki rezist tabakası çözünmüş olur.

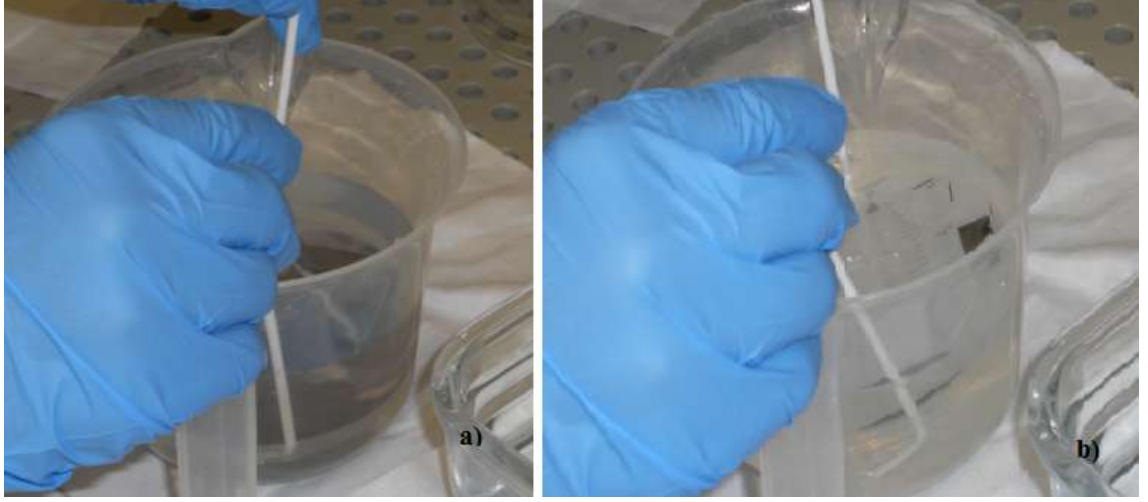
Çözündürme işlemi sonrasında mikroskopta dalgalılavuzları incelenmiştir. Son olarak çözündürme uygulanmış yonga; 110°C'de 4dk süre boyunca ısıtıcı üzerinde ısıtılmıştır. Bu ısıtma işlemi; çözündürme aşaması sonrası yapı üzerindeki kalıntı fotorezist tabakasını gidermek ve yonga yüzeyini diğer litografi adımlarına daha dayanıklı bir şekilde hazırlamak amacıyla yapılmıştır.

3.2.7 Aşındırma işlemi

Aşındırma; yapıda fotorezist tarafından korunmayan yüzeyleri ortadan kaldırma işlemidir. Kuru aşındırma ve ıslak aşındırma olmak üzere ikiye ayrılır. Kuru aşındırma; florokarbon, oksijen gibi reaktif gazların plazma ortamı oluşturduktan sonra, malzemeyi bu plazma ortamını oluşturan iyon bombardımanına maruz bırakarak bozulmuş ve korunmamış tabakaları aşındırma işlemi tanımlamaktadır. Kuru aşındırma işlemi; aşındırmanın yapıldığı yöne bağımlıdır, yani anizotropiktir. Farklı yönlerdeki aşındırma karakteristiği ve hızı birbirinden farklıdır. Kuru aşındırma, silisyum karbür ve galyum nitrat gibi kimyasal olarak dayanıklı ancak ıslak olarak aşındırma yapılamayan malzemeler ve yarıiletkenler için kullanışlı bir yöntemdir. Kuru dağlama yapabilen cihazlar temel olarak bir vakum kabini, özel gaz dağıtım sistemi, RF dalga biçimi üretici ve egzoz sistemi içermektedir (Anonymous 2013d).

Islak aşındırma; yonga üzerindeki bozulmuş veya korunmamış tabakayı sıvı kimyasal veya aşındırıcılar kullanarak gidermeyi tanımlamaktadır. Islak aşındırma genellikle izotropiktir, diğer bir ifadeyle yonga üzerinde tüm yönlerdeki aşınma hızı aynıdır. Sıvı çözücü olarak genellikle HNO_3 , HF gibi asitler kullanılmaktadır. Çözünmesi istenen malzeme sıvı çözücü içerisine daldırılır. Çözücü sıvı çözünecek maddenin kimyasal yapısını bozamaz. Temel bir ıslak aşındırma 3 adımdan oluşmaktadır: Aşındırıcı maddenin çözünme yapılacak olan yüzeye difüzyonu, çözücü madde ile çözünecek yüzey arasındaki tepkime ve tepkime sonucu oluşan ürünlerin difüzyonudur. SiO_2 , Si_3N_4 , Al , Ti gibi malzemelere ıslak aşındırma uygulanabilir. Islak aşındırma; düşük maliyet, yüksek güvenilirlik ve yüksek geçirgenlik sağladığı için avantajlıdır.

Yürütülen tez çalışmasında Ti metalini aşındırmak için ıslak aşındırma yöntemi kullanılmıştır. Saf su, H_2O_2 ve aşındırıcı sıvı HF belirli bir oranda plastik bir kaptaki karıştırılmıştır. Karışımın içine Ti kaplı yonga daldırılmıştır ve Ti aşındırma gerçekleştirilmiştir. Ti aşındırma işlemi şekil 3.16'da gösterilmektedir.



Şekil 3.16.a Aşındırma öncesi b. Aşındırma sonrası

Şekil 3.16.a'da çözücü sıvının Ti ile tepkime öncesi hali gösterilmektedir. Ti kaplı yüzey koyu bir renktedir. Şekil 3.16.b'de ise aşındırma sonrası yonganın yüzeyinin renk değiştirdiği ve saydamlaştığı görülmektedir. Bu şekilde; yonganın yüzeyindeki bozulmuş ve rezist ile korunmayan Ti kaplamasının ıslak aşındırma tekniği ile giderildiği gösterilmektedir. Sonrasında yonga saf su içine daldırılmıştır.

Ti aşındırma işlemi ile sadece dalgakılavuzu yapılarının üstündeki Ti korunmuş olur. Bu bölgeyi koruyan ise Ti kaplaması üstündeki rezist tabakasıdır. Diğer tüm bölgelerdeki bozulmuş Ti tabakası aşındırılmıştır. Aşındırma sonrasında yonga önce aseton sonra alkol banyosuna maruz bırakılmıştır. Aseton; rezist'i çözebilen bir kimyasal sıvıdır. Dolayısıyla; dalgakılavuzlarının bulunduğu yerdeki Ti üstündeki rezist tabakası da aseton ile çözülmüştür.

Mikroskop altında dalgakılavuzu genişliği ölçülmüştür. Şekil 3.17'de genişlik ölçümünün mikroskop görüntüsü gösterilmektedir.

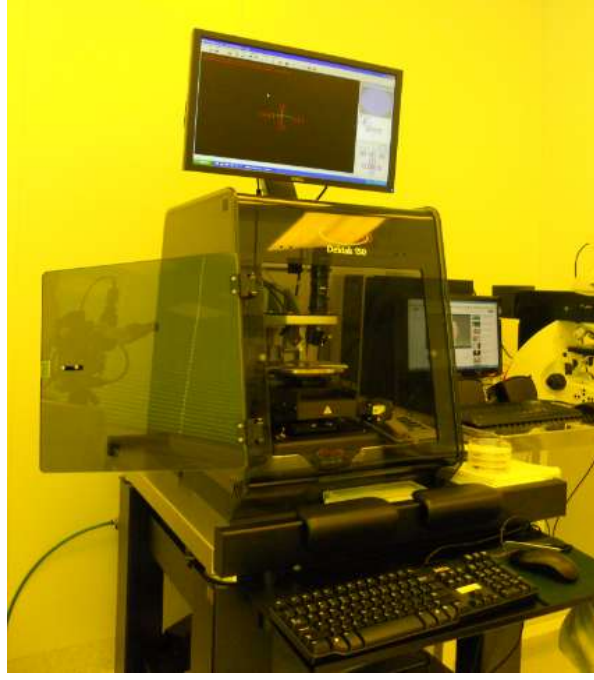


Şekil 3.17 Dalgakılavuzu genişliği ölçümü

Teorikte; maske tasarımında 7 μm genişlikte çizilen dalgakılavuzları fotolitografi sonrası deneysel olarak 6.87 μm genişlikte ölçülmüştür. Teorik ve deneysel veriler arasında %1.86 değerinde fark tespit edilmiştir. Bu fark; üretim sırasında meydana gelen deneysel hatalardan kaynaklanmaktadır.

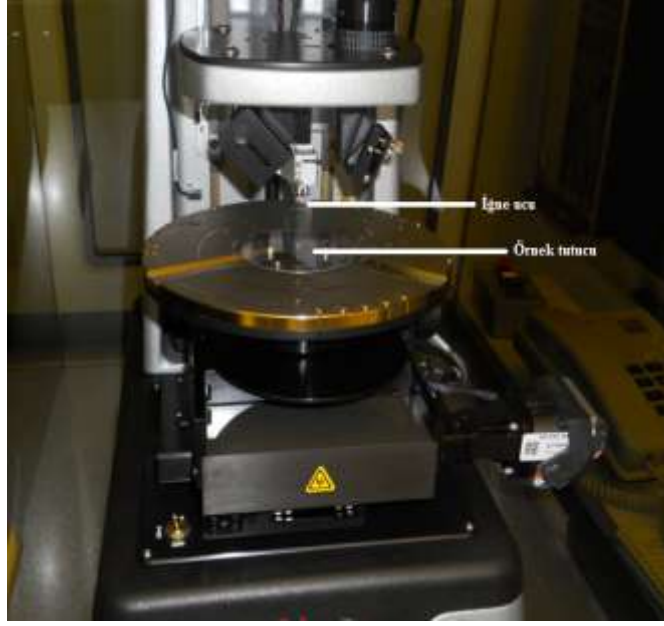
3.2.8 Ti kaplama kalınlığı ölçümü

Dalgakılavuzu genişliği ölçümünden sonra Dektak'ta Ti kaplama kalınlığı ölçülmüştür. Dektak cihazı şekil 3.18'de gösterilmektedir.



Şekil 3.18 Dektak cihazı

Dektak yüzey ölçer mekanizması, tutucu üzerine yerleştirilen örnek yüzeyi ile bir iğne ucunun fiziksel olarak teması ile çalışmaktadır. İğne sabit olmak şartıyla; örneği bir kol yardımıyla ileri geri hareket ettirerek yüzeydeki yükseklik değişimleri tespit edilip ölçülmektedir (Anonymous 2013a). Örnek ile iğne ucunun cihaz içerisindeki konumu şekil 3.19’da gösterilmektedir.



Şekil 3.19 Örnek ve iğne ucu

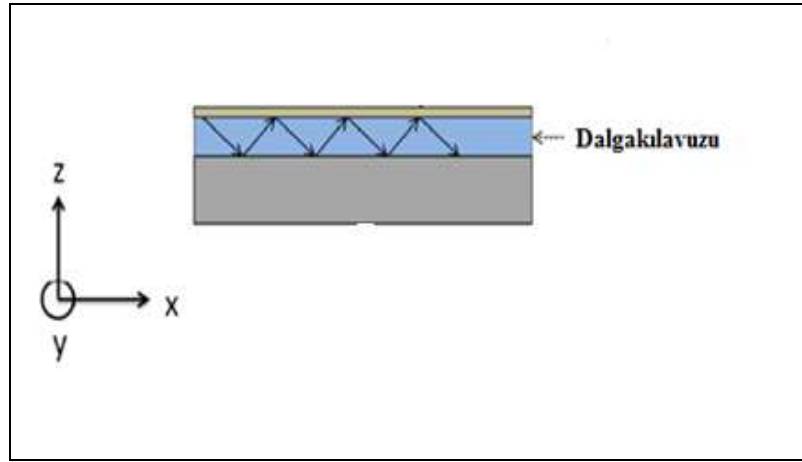
Yürütülen tez çalışmasında, örnek uygun şekilde cihaz içine yerleştirilmiştir. Ti kaplama kalınlığı ölçüleceği için dalgakılavuzu üzerindeki herhangi iki nokta iğne yardımıyla belirlenmiştir. Bu iki nokta arasındaki yükseklik değişimi cihazın arayüz bilgisayar programı ile ölçülmüştür. Bu yöntemle birkaç kez belirli alanlar taranarak Ti yüksekliklerinin ortalaması alınmıştır. Şekil 3.20’de Dektak ile saptanan kalınlık ölçüm profili gösterilmektedir.



Şekil 3.20 Ti kaplama kalınlığı ölçüm profili

3.2.9 Dalgakılavuzu yapısı ve Ti difüzyonu ile dalgakılavuzu üretim yöntemi

Dalgakılavuzu ses veya elektromanyetik dalgaları yönlendiren ve dalgaların içerisinde ilerlediği ortamdır. Optik, yarıiletken gibi farklı dalgakılavuzu çeşitleri olmakla beraber kanal, düzlem gibi farklı geometrilerde dalgakılavuzları mevcuttur. 2 boyutta düzlem dalgakılavuzu yapısı şekil 3.21’de gösterilmektedir (Mohamedelhassan 2012).



Şekil 3.21 Düzlem optik dalgakılavuzu (Mohamedelhassan 2012’den değiştirilerek alınmıştır)

Şekil 3.21’e göre ışık demeti dalgakılavuzu olarak gösterilen bölge içerisinde ilerlemektedir. Şekilde gösterilen oklar, iç bölgede toplam iç yansıma olduğunu vurgulamaktadır. Toplam iç yansımaya göre; yüksek kırılma indisli bölgede ilerleyen ışık, daha düşük kırılma indisli bölge sınırına kritik açıdan daha büyük bir açı ile gelir. Işık düşük kırılma indisli bölgeye geçemez ve geri yansıma olur. Bu durumda ışık tümüyle yüksek kırılma indisli bölgeye hapsolmuş olur. Optik dalgakılavuzunda ise şekil 3.21’de gösterildiği gibi ilerleyen ışık dalgaları toplam iç yansıma kuralına göre en yüksek kırılma indisli dalgakılavuzu bölgesine hapsolmuştur (Mohamedelhassan 2012).

LiNbO₃ bilindiği gibi yüksek elektro-optik katsayısına sahiptir. Ayrıca 1.55 μm ’de %80’in üzerinde optik geçirgenliğe sahiptir. Sahip olduğu bu tip özellikleri sayesinde entegre optoelektronik aygıtların üretiminde alttaş olarak tercih edilen bir malzemedir

ayrıca yüksek kalitede optik dalgakılavuzlarının kolay bir şekilde üretimine olanak sağlamaktadır (Armenise 1988). LiNbO_3 üzerinde dalgakılavuzu yapıları üretmek için metal difüzyonu, proton değiş tokuşu gibi birçok teknik kullanılmaktadır. Yürütülen tez çalışmasında ise metal difüzyonu kapsamında Ti difüzyonu ile LiNbO_3 üzerinde dalgakılavuzu oluşturulmuştur (Mohamedelhasan 2012). Metal difüzyonu temel olarak; metal malzemenin $1000\text{ }^\circ\text{C}$ civarında yüksek sıcaklıklarda ve yaklaşık 7 - 10 saat süre boyunca alttaş malzemesinin yüzeyinden iç bölgesine doğru difüz etmesidir (Mohamedelhasan 2012). Bu tez çalışması kapsamında difüzyon aşamasında örnekler difüzyon fırınının Kuartz tüp bölmesine yerleştirilmiş ve $950\text{ }^\circ\text{C}$ – $1100\text{ }^\circ\text{C}$ ve 7 – 12 saat aralığında difüzyon gerçekleştirilmiştir. Böylece optik dalgakılavuzları oluşturulmuştur. Difüzyon fırını şekil 3.22’de gösterilmektedir.



Şekil 3.22 Difüzyon fırını

Difüzyon sırasında LiNbO_3 yüzeyinde Li_2O gazı oluşmaktadır. Li_2O birikmesi istenmeyen yüzey dalgakılavuzlarının oluşumuna sebep olmakla beraber özellikle olağandışı kırılma indisinin azalmasına sebep olmaktadır. Böylece yapının elektro-optik özellikleri olumsuz ölçüde etkilenmektedir. Bunu engellemek için difüzyon işlemi sırasında sisteme O_2 ve N_2 gazları verilmiştir. Li iyonu mobilitesi yüksek olduğu için yüzeyde Li_2O birikmesi engellenir. Diğer bir ifadeyle difüzyonla Li_2O sistemden dışarıya atılmaktadır. Böylece yüzey tabakada istenmeyen yapılar oluşmaz (Armenise 1988).

Difüzyon yapıldıktan sonra mikroskop altında dalgakılavuzları incelenmiştir. Difüzyon sonrası oluşan dalgakılavuzları şekil 3.23'te gösterilmektedir.

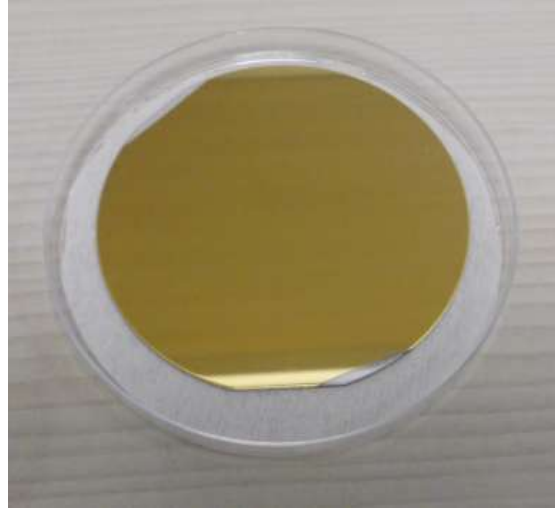


Şekil 3.23 Ti difüzyonlu dalgakılavuzu yapısı

Ti haricinde metal difüzyonu için Mg, Ni, Zn, Fe gibi pek çok metal kullanılabilir. Ni, Zn, Mg gibi iki değerlikli metalik atomların difüzyonunda n_e azalmaktadır. Mg kullanıldığında aynı zamanda n_o kırılma indisi de azalmaktadır. Fe, Cr ve Ti gibi üç veya dört değerlikli atomlar LiNbO₃ içine difüz ettiği zaman n_o ve n_e değerlerinin her ikisinde de artış gözlenmektedir. LiNbO₃ kristal örgü yapısında; iki değerlikli atomlar Li atomlarının yer alanı durumunda iken; üç veya dört değerlikli atomlar Nb atomlarının yer alanı durumundadır. Her ne kadar pek çok metal difüzyon için kullanılsa da; elektro-optik aygıtlar için LiNbO₃ içine Ti difüzyonu optoelektronik teknolojisinde sıkça tercih edilmektedir. Ti difüzyonu ile diğer metallerin aksine n_o ve n_e kırılma indislerinde $\Delta n_e < 0.04$ ve $\Delta n_o < 0.02$ olacak şekilde artış gözlenebilmektedir. Kırılma indislerinde gözlenen bu artış; Ti'nin kayıpsız olarak ışığı dalgakılavuzu içinde hapsedmesini sağlamaktadır. Tüm bu özellikler; elektro-optik aygıtların ve daha özel olarak şiddet kipleycilerin fabrikasyonunda Ti difüzyonu ile dalgakılavuzu üretilmesine olanak sağlamaktadır (Armenise 1988).

3.2.10 Altın kaplama

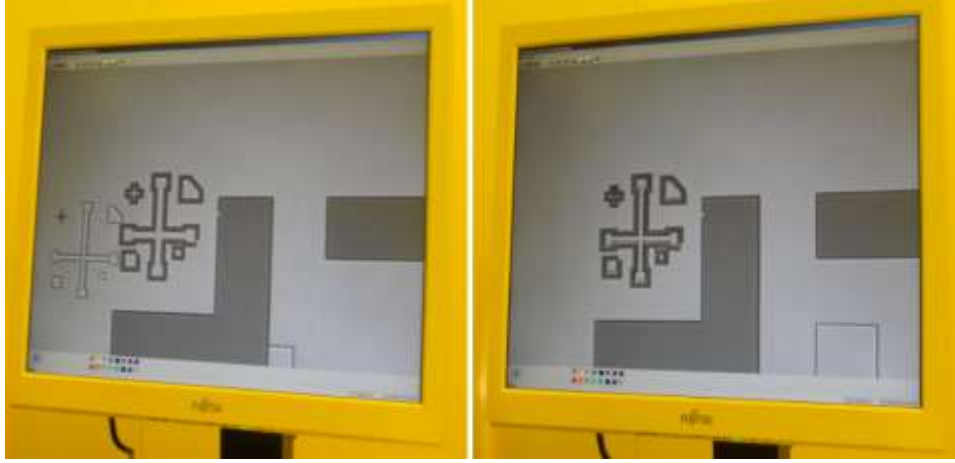
Altın kaplama, yonga üzerinde elektrotları oluşturmak amacıyla uygulanan bir işlemdir. Au kaplamada, Ti kaplamak için kullanılan elektron demeti buharlaştırma cihazı kullanılmıştır. Au, LiNbO_3 yüzeyini kolay bir şekilde tutmaz. Bu sebeple öncesinde ince bir katman Ti kaplaması yapılmıştır. Sonraki aşamada ise altın kaplaması yapılmıştır. Altın kaplanmış yonga şekil 3.24'te gösterilmektedir.



Şekil 3.24 Au kaplı LiNbO_3 yonga

3.2.11 Elektrot litografisi

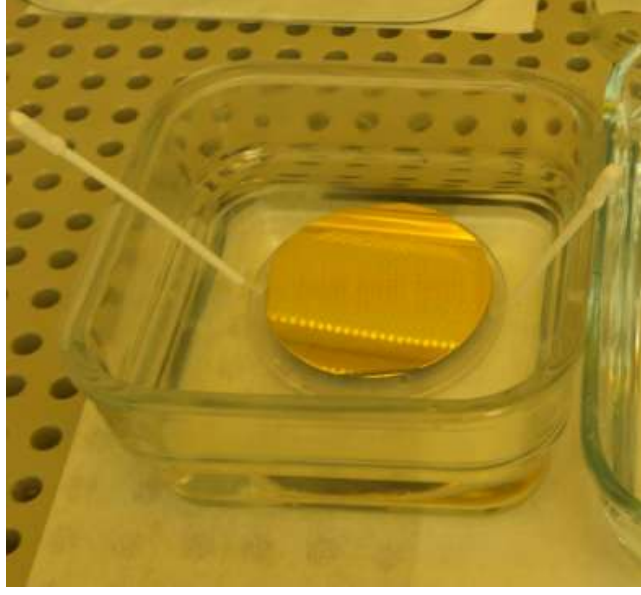
Elektrot litografisi; elektro-optik aygıtın elektriksel olarak çalışabilmesi için yonga üzerine elektrot oluşturmak amacıyla yapılmıştır. Yürütülen tez çalışmasında; Au kaplanan yonga aseton ve alkol banyosunda temizlenmiştir. 1 dk. süre ile yonga ısıtıcı üzerinde ısıtıldıktan sonra tekrar rezist ile kaplanmıştır ve sonrasında tekrar ısıtıcı üzerinde 1 dk. süre boyunca ısıtıldıktan sonra aseton ile yonga kenarlarındaki rezist tabakası kaldırılmıştır. Maske hizalama cihazı ile maske yapısı yonganın üzerine tekrar çıkartılmıştır. Maske ile örneğin birbirine göre hizalaması hizalama işaretleri ile yapılmıştır. Şekil 3.25'de maske hizalama işlemi gösterilmektedir.



Şekil 3.25 Elektrot litografisindeki maske hizalama işlemi

UV ışık altında maske yapısı yonganın üzerine kopyalanmıştır. İlk maske kopyalama işleminde olduğu gibi UV ışığa maruz kalan rezist yapıları bozulmuştur. Bozulan rezist yapılarını ortadan kaldırmak amaçlı çözündürme işlemi uygulanmıştır. Saf su ve çözündürücü kimyasal ile bir karışım hazırlanıp Au kaplanan yonga bu karışımın içine daldırılmıştır ve rezist çözündürülmüştür. Yapı üzerinde kalan rezistin aside dayanıklı olması için yonga ısıtıcı üzerinde ısıtılmıştır.

Au aşındırması için Kral Suyu hazırlanmıştır. Bunun için HCl, saf su ve HNO₃ ile bir çözelti hazırlanmıştır. Yonga karışımın içine daldırılmıştır ve Au aşındırılmıştır. Sonrasında, Au kaplama öncesinde ince bir katman halinde kaplanan Ti aşındırılmıştır. Au aşındırma işlemi şekil 3.26'da gösterilmektedir.



Şekil 3.26 Au aşındırma işlemi

3.2.12 Yonga kesilmesi

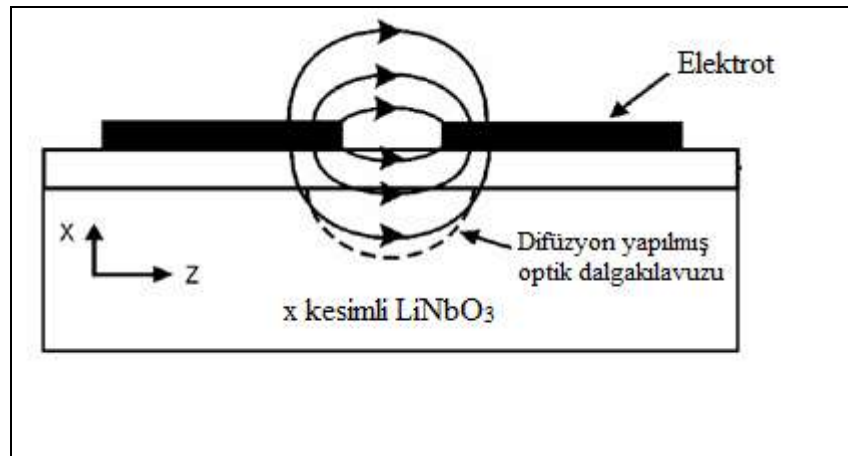
Yonga kesilmesi işleminde, bütün haldeki yonga kesici cihazında öncelikle 20 mm genişliğinde 3 temel parçaya ayrılmıştır.

Kesici cihazı; örneğin yerleştirildiği bölme ve programlama menüsü olmak üzere iki temel bölümden oluşmaktadır. Yürütülen tez çalışması kapsamında yonga bütün halde yapışkan bir bantın üzerine yapıştırılıp tutucunun üzerine yerleştirilmiştir. Hazırlanan bu tutucu cihazın kesim bölmesine sabitlenmiştir. Kesim programı da cihazın menüsünde yazılıp kesim işlemine başlanmıştır. Kesim cihazı şekil 3.27’de gösterilmektedir.



Şekil 3.27 Kesim programlama menüsü ve kesim bölgesindeki yonga

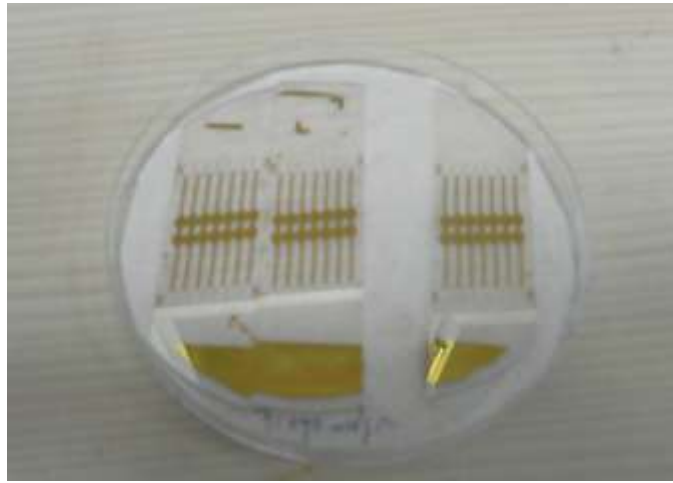
Kullanılan yongalar kesim yönlerine göre sınıflandırılmaktadır. x, y, ve z kesim yönünü göstermektedir. Çünkü LiNbO_3 kristali her bir eksen boyunca ışık demetini farklı bir şekilde yönlendirmektedir. Yürütülen tez çalışmasında x kesimli yonga kullanılmıştır. x kesimli LiNbO_3 yonga şekil 3.28’de gösterilmektedir.



Şekil 3.28 x kesimli LiNbO_3 yonganın ön kesit görüntüsü (Cummings 2005’den değiştirilerek alınmıştır)

x kesimli LiNbO_3 'te; ışık y yönünde ilerler, z kristalin normalidir ve x yönü ise ilerleme yönüne diktir. Kesim; x yönünde yapılmaktadır. Diğer bir ifadeyle; dalgakılavuzu çiftkırıcı LiNbO_3 kristalinin y yönüne paralel olmalıdır. x eksenini ise yonga yüzeyine dik olmalı ve kesim x yönünde yapılmalıdır (Özdemir 2012).

LiNbO_3 yonga kesim cihazında 3 parçaya kesilmiştir. Kesilen LiNbO_3 parçalar şekil 3.29'da gösterilmektedir.



Şekil 3.29 3 parçaya kesilmiş LiNbO_3 yonga

Kesilen parçalar yüzey düzgünlüğünü sağlamak amacıyla tıraşlanıp parlatılmıştır.

3.2.13 Tıraşlama ve parlatma

Yürütülen tez çalışması kapsamında; kesim işleminden sonra tıraşlama ve parlatma yapılmıştır. Tıraşlama ve parlatma; istenilen boyutlarda ve şekillerde yapı elde etmek için üretilen örnekten bir miktar parça aşındırma işlemidir. Tıraşlama ve parlatma işlemi metal cam gibi birçok malzemeye uygulanmaktadır. Ayrıca optik, yarıiletken ve seramik gibi pek çok alanda tercih edilmektedir. Bu teknikler kullanılarak nanometre ölçekte bitmiş yüzeyler elde edilebilmektedir (Anonymous 2013b). Tıraşlama; kesim işleminden sonra düz, pürüzsüz ve parlatılmamış yüzey elde etmek için örnekten

malzeme aşındırılması işlemidir. Tıraşlama plakasının üzerine örnek yerleştirilerek işlem gerçekleştirilmektedir. Tıraşlama; kesim işleminden sonra oluşan zarar görmüş yüzeyleri ortadan kaldırmak amacıyla uygulanmaktadır. Bu işlem sonrasında istenilen kalınlık ve düzgünlükte yapı elde edilebilmektedir (Anonymous 2013b).

Parlatma; tıraşlanan yüzeyi parlatmak bu sayede aygıtın çalışma performansını artırmak amacıyla uygulanmaktadır. Yüzeyin tamamen düzgünlüğü sağlanmaktadır (Anonymous 2013b). Yürütülen tez çalışması kapsamında; LiNbO_3 yongayı tıraşlamak ve parlatmak amacıyla kullanılan cihaz şekil 3.30'da gösterilmektedir.



Şekil 3.30 Tıraşlama ve parlatma cihazı

Tıraşlama ve parlatma aşamasından önce ilk olarak kesilen yonga parçalarının kenar kısımlarına 0.5 mm yüksekliğinde ve 20 mm uzunluğunda bir LiNbO_3 parçası UV ışık altında sertleşen bir yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Yapıştırılan bu parçaya kapak denir.

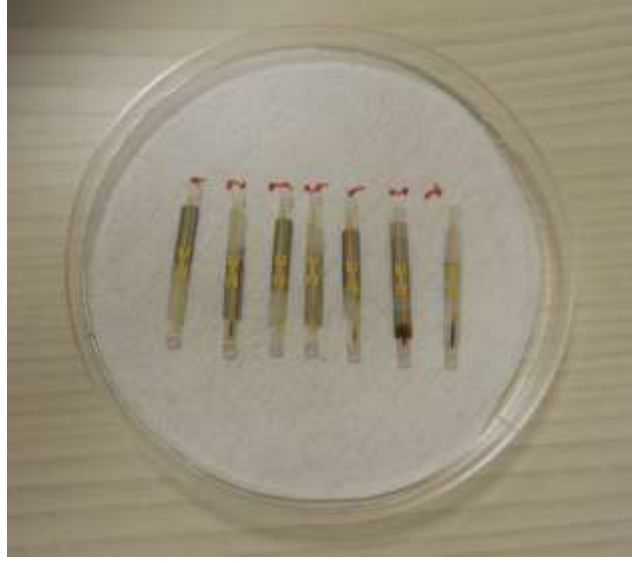
Tıraşlama ve parlatma işlemi için LiNbO_3 parçalar bit tutucuya yerleştirilmiştir. Parçalar tutucunun altına gelecek şekilde tıraşlama plakasının üzerine yerleştirilip tıraşlama ve ardından parlatma yapılmıştır. Tıraşlama 15 rpm, parlatma ise 30 rpm hızla döndürülerek yapılmıştır. Kullanılan tutucu şekil 3.31'de gösterilmektedir.



Şekil 3.31 Tıraşlama cihazı tutucusu

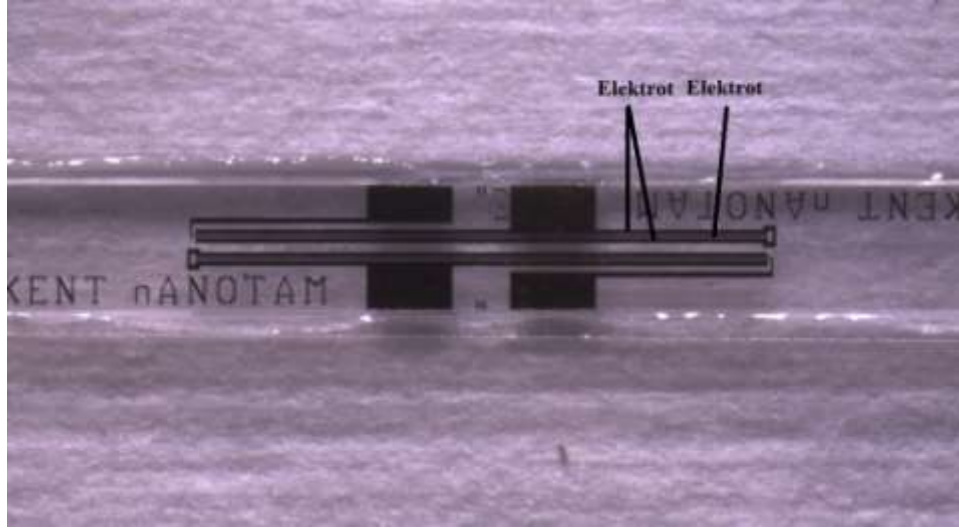
Son olarak ise parlatılan örnekler sırasıyla aseton ve alkol ile temizlenmiştir.

Tıraşlama ve parlatma işleminden sonra 3 parçaya ayrılan her bir yonga parçası ayrıca 7 parçaya kesilmiştir. 7 parçadan her biri optik aygıt olarak isimlendirilmektedir. Bu işlemde kesim cihazı kullanılmıştır. Kesilen 7 aygıt şekil 3.32’de gösterilmektedir.



Şekil 3.32 Kesilen 7 adet optik aygıt

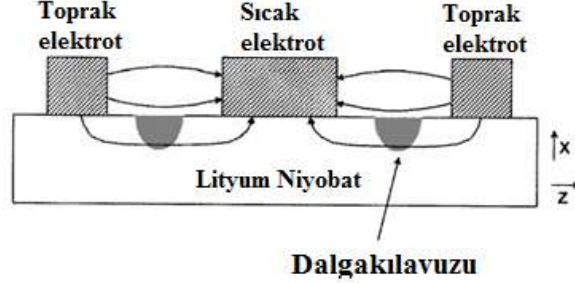
Şekil 3.32’te gösterilen optik aygıtların elektrot yapısı mikroskop altında incelenmiştir. Elektrot yapısının mikroskop altındaki detay görüntüsü şekil 3.33’te gösterilmektedir.



Şekil 3.33 Elektrot yapısı detay görüntüsü

Şekil 3.33’te gösterildiği gibi aygıt üzerinde iki grup halinde üç adet şerit elektrot bulunmaktadır. Elektrotlardan ikisi (+) uca, diğer bir tanesi ise (-) uca bağlantı yapılmıştır. Ya da kullanılan kaynağa göre tersi de olabilmektedir. Dalgakılavuzları ise

elektrotların arasında bulunmaktadır. Üretilen şiddet kipleycisindeki elektrot ve dalgakılavuzu yapısının ön kesitten görüntüsü şekil 3.34'te gösterilmektedir.



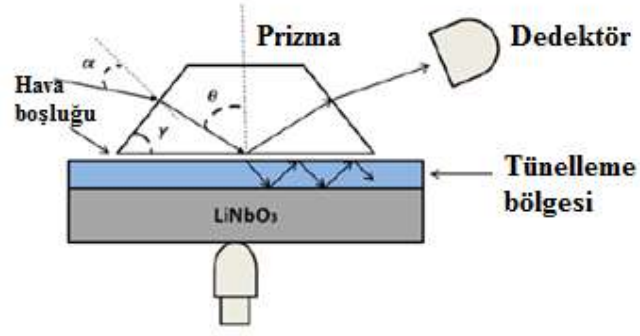
Şekil 3.34 Elektrot ve dalgakılavuzu yapısının ön kesit görüntüsü (Wooten 2000'den değiştirilerek alınmıştır)

Şekil 3.34'te gösterildiği gibi, dalgakılavuzları elektrotların arasında bulunmaktadır. İki adet elektrot aynı polariteye sahip olduğu için elektrik alan çizgileri toprak elektrotlardan sıcak elektroda doğru bir yol izlemektedir. Diğer bir ifadeyle, elektrik alan çizgileri farklı yönlerde yörünge çizdiği için bir yönde (+), diğer yönde (-) faz oluşmaktadır. Bu sebeple aygıtın elektrotlarına dışarıdan bir gerilim uygulandığı zaman aygıtın iki kolundaki kırılma indisi değişimine bağlı olarak faz farkı meydana gelmektedir. İki optik yol arasındaki göreceli faz farkı sebebiyle, aygıtı giren ışık demeti şiddet kiplemesi oluşturmak için yapıcı ve yıkıcı girişim oluşturacak şekilde çıkıştaki Y kolunda birleşmektedir.

Şekil 3.34 aynı zamanda x kesimli bir LiNbO₃ alttaşını temsil etmektedir. Dalgakılavuzlarının elektrotların arasında olması da bunu desteklemektedir.

3.2.14 Prizma eşleme ölçümü

Yürütülen tez çalışmasında üretilen optik aygıtların Ti difüzyon derinliğine bağlı kırılma indisi değişimlerini saptamak amacıyla 4 adet aygıt için prizma eşleme ölçümleri yapılmıştır. Ölçümde 532 nm dalga boyuna sahip ışık demeti kullanılmıştır. Ti difüzyonlu LiNbO₃ tabanlı optik aygıttaki prizma eşlemesi şekil 3.35'de gösterilmektedir.



Şekil 3.35 Ti difüzyonlu LiNbO_3 optik aygıtlarda prizma eşlemesi (Mohamedelhasan 2012'den değiştirilerek alınmıştır)

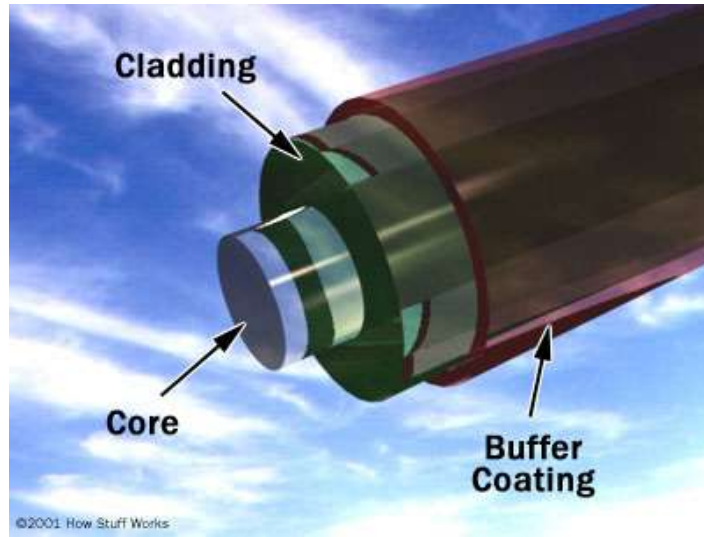
Prizma ve dalgakılavuzu arasında tünellenmenin olmayacağı bir mesafe olduğu sürece gelen ışık demeti prizma tabanından tam yansıma yapmaktadır. Ancak şekil 3.35'de gösterildiği gibi dalgakılavuzu ve prizma arasında belirli bir mesafe olduğunda ışık demeti prizmadan geçtikten sonra tünelleme yaparak dalgakılavuzu içine doğru girmektedir. Prizma eşleme ölçüm düzeneği şekil 3.36'da gösterilmektedir.



Şekil 3.36 Prizma eşleme ölçüm düzeneği

3.2.15 LiNbO₃ tabanlı şiddet kipleycisi optik ve elektriksel karakterizasyonu

Ti difüzyonlu LiNbO₃ optik aygıt üretimi tamamlandıktan sonra optik karakterizasyonu yapılmıştır. Karakterizasyon; optik fiberler ile yapılmıştır. Fiber, içinde ışığın yönlendirilebildiği, genellikle camdan yapılmış iletim ortamıdır. Optik fiberler diğer iletişim malzemelerine oranla (elektriksel iletim vs.) uzun mesafelerdeki veri iletiminin daha hızlı ve daha yüksek değerlerde yapılabilmesine olanak verdikleri için fiber optik haberleşme sistemlerinde sıkça kullanılmaktadırlar. Metal kablolar yerine fiber kabloların kullanılmasının nedeni; daha az kayıba neden olmaları ve elektromanyetik etkileşimden etkilenmemeleridir. Genel bir optik fiber yapısı şekil 3.37'de gösterilmektedir.



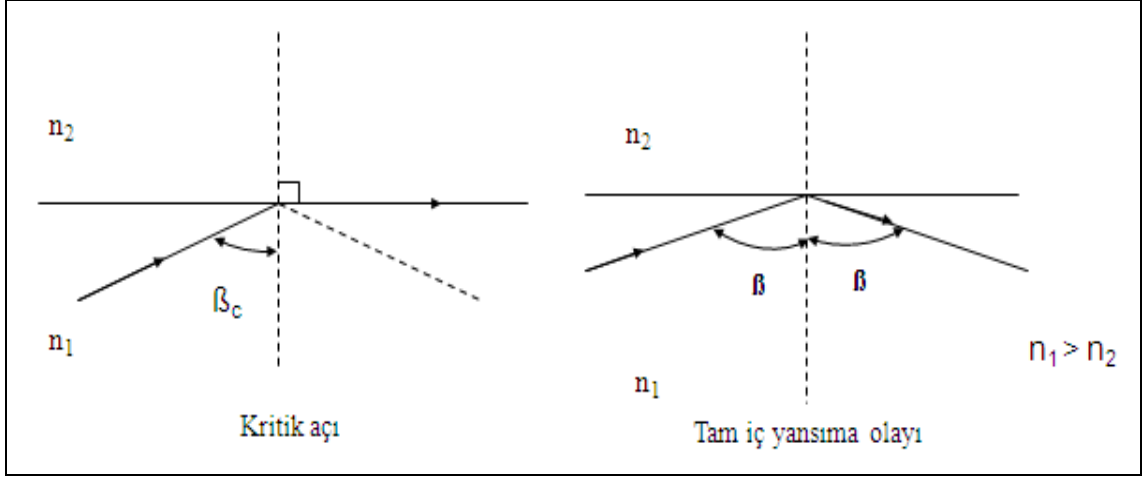
Şekil 3.37 Optik fiber yapısı (Anonymous 1998)

Şekil 3.37'de gösterildiği gibi, optik fiber genel olarak nüve, kılıf ve dış kaplama olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır.

Nüve; içinde ışığın hapsediği ve iletiildiği camdan yapılmış bölümdür. Belirli sınırlar dahilinde eğilebilir. Cinsine göre tek kipli veya çok kipli olabilir. Çapı genellikle 8 µm - 10 µm arasında değişmektedir. Gücün büyük bir bölümü bu bölgede iletilmektedir.

Kılıf; nüveyi dıştan saran ve ışığı nüveye geri yansıtan kısımdır. Tipik olarak 125 µm çapındadır. Fiberin nüvesinde hapsolan ışığın dışarı çıkmasını engellemektedir. Nüve ile kılıf eş eksenli olacak şekilde fiber üretimi yapılmaktadır. Camdan yapılmıştır ancak indis farkı nüveye göre %1 oranında daha azdır. Bu indis farkından dolayı ışık ışını nüveye hapsoldükten sonra kılıfa geçemez. Işık demeti nüve-kılıf sınırından tekrar nüveye yansır ve bu şekilde yansımalar dizisi halinde nüve içerisinde ilerlemektedir. Dış kaplama; fiberin kılıfını hasardan ve nemden koruyan plastik kaplamadır. Kaplama; polimer veya plastik olabilir, bir veya birden fazla katmanı olabilir. Optik bir özelliği yoktur sadece fiberi darbe ve şoklardan korumaktadır. Camın viskozitesi geniş bir sıcaklık aralığında değişkenlik gösterir ve kontrol edilebilir düzeydedir. Ayrıca silika yüksek miktarda geçirgendir, 1 km optik fiber sonunda ışığın yaklaşık %96'sı geçirilebilmektedir. Tüm bu özellikler fiberin camdan üretilmesine olanak sağlamaktadır. Her ne kadar cam malzemesi gevrek bir yapıda ve kırılma katsayısı yüksek olsa da; cam fiberler oldukça sağlamdır. Optik fiberler belli bir bölgede çekilirler ve çekilme esnasında polimerler ile kaplanırlar. Cam fiberi polimer ile kaplama atmosfer ile temas etmesini engeller ve kılıf yapısını korur.

Optik fiber içinde ışığın ilerlemesini açıklayan fiziksel prensip toplam iç yansımadır. Toplam iç yansıma; kırılma indisi yüksek olan bir ortamdan kırılma indisi düşük ortama geçen dalganın kritik açıdan daha büyük bir açıda yansımalar yapmasıdır. Tam iç yansıma şekil 3.38'de gösterilmektedir.



Şekil 3.38 Tam iç yansımaya

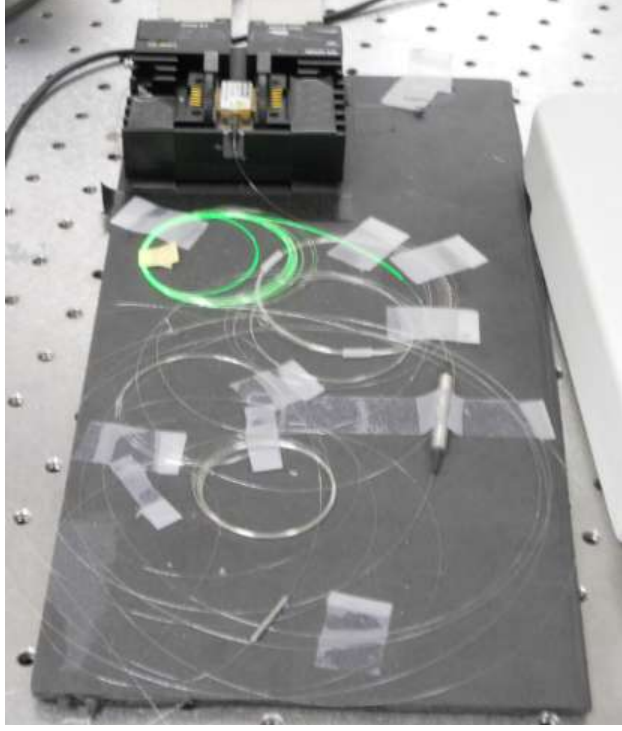
Şekil 3.38’de gösterildiği gibi, fiber için nüvenin kırılma indisi n_1 , kılıfın kırılma indisi ise n_2 olarak tanımlanırsa; $n_1 > n_2$ olduğu durumda gelen ışık demeti nüve içinde ilerler, kılıf bölgesine geçemez. Işığın nüve içinde hapsolmesi tam iç yansımaya gereği olmaktadır.

Karakterizasyonda kullanılan fiber 80 μm kılıf çapına sahip bir fiberdir ve cam bir tutucunun V şeklindeki kanalı içinde bulunmaktadır. Optik karakterizasyonda fiberin içinde bulunduğu camın ön yüzeyi ile optik aygıtın ışık geçen ön yüzeyi arasında hassas hizalama yapılmıştır. Karakterizasyonda kullanılan fiber şekil 3.39’da gösterilmektedir.



Şekil 3.39 Optik fiber

Optik karakterizasyon kapsamında, aygıtın geçirgenlik ölçümü yapılmıştır. Ölçümde kullanılan ışık kaynağı fiber çıkışıdır. Kullanılan ışık kaynağı şekil 3.40'da gösterilmiştir.



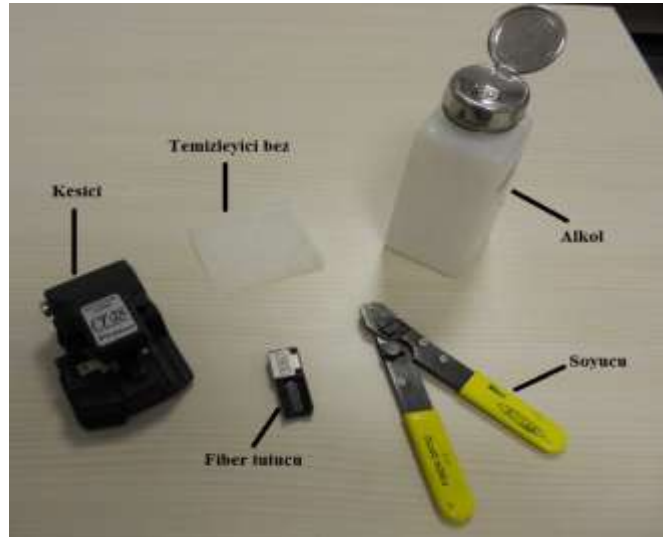
Şekil 3.40 Optik karakterizasyon için kullanılan ışık kaynağı

Ölçüm işlemine başlamadan önce, ışık kaynağından gelen fiber ucu ile ölçümde kullanılacak 80 μm çapındaki fiber ucu ek yapmıştır. Ek yaparak; iki fiber arasında bağlantı sağlanmaktadır. Genel olarak herhangi bir fiberin fiber çıkışlı başka bir dış kaynağa bağlantısının olması için bahsedilen bu iki fiber arasında ek yapılmaktadır. Ek yapma cihazı şekil 3.41'de gösterilmektedir.



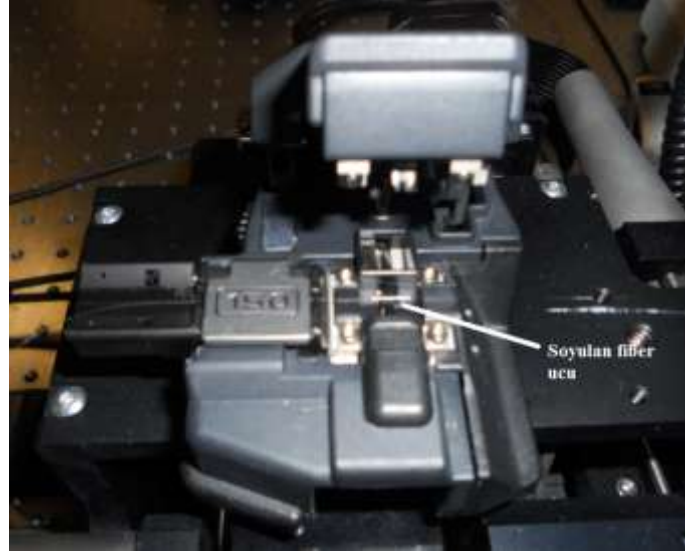
Şekil 3.41 Fiber ek yapma cihazı

Ek yapma işleminden önce fiber uçları ek işlemi için hazırlanmıştır. Hazırlama işlemi; soyma, kesme ve temizleme olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır. Hazırlama işleminde kullanılan malzemeler şekil 3.42’de gösterilmektedir.



Şekil 3.42 Fiber hazırlama malzemeleri

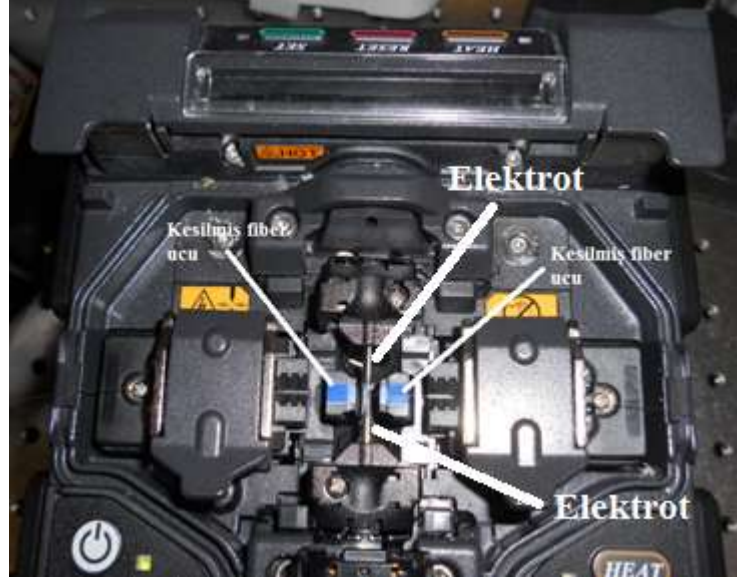
Hazırlama işlemleri kapsamında; fiberin dış kaplaması yaklaşık 2 cm kadar soyulmuştur. Soyulan kısım alkol ile temizlenmiştir. Temizleme işlemi soyduktan sonra kalıntı fiber parçacıklarını gidermek ve kaliteli bir ek yapmak için önem taşımaktadır. Soyulan fiber; şekil 3.34'te gösterilen fiber tutucu içerisine yerleştirilip uç kısmından yaklaşık 1 cm kadar kesici ile kesilmiştir. Kesme işlemi şekil 3.43'de gösterilmektedir.



Şekil 3.43 Fiber kesilmesi

Kesme; fiber ucunu pürüzsüz ve düzgün hale getirmek amacıyla yapılmaktadır. Bu sayede, ek yaparken bağlantı kayıpları en aza indirgenmekte ve kaliteli bir birleşim sağlanmaktadır.

Işık kaynağı fiberi ve karakterizasyon için kullanılan fiberlerin her ikisi de şekil 3.42'de gösterilen malzemeler ile soyularak ve kesilerek ek işlemine hazırlanmıştır. Sonrasında ek işlemi yapılmıştır. Fiberlerin ek yapma cihazı içindeki pozisyonu şekil 3.44'de gösterilmektedir.



Şekil 3.44 Fiberlerin ek yapma cihazı içindeki görüntüsü

Fiberler cihaz içerisine yerleştirildikten sonra cihazın içerisinde farklı konumlarda bulunan kameralar sayesinde bağlantı işlemi görüntülenmiştir. Şekil 3.45’de ek işlemi adım adım gösterilmektedir.



Şekil 3.45 Fiber ek işlemi

Ek işlemi genel olarak dört adımda tamamlanmaktadır. Şekil 3.45’de de gösterildiği gibi, iki fiber arasındaki boşluk ayarı yapıldıktan sonra fiberlerin nüvelerine göre otomatik hizalama yapılmıştır. Nüvelerin birbirine göre konumlandırılması söz konusudur. Hizalama işlemi tamamlandıktan sonra şekil 3.44’de gösterilen elektrotlar tarafından ark oluşturularak ek işlemi tamamlanmıştır. Şekil 3.45’de bağlantının bitmiş

hali gösterilmektedir. Bağlantı sonrasında iki fiber tek bir fiber gibi görünmektedir. Işık kaynağından gelen ışık, ek yapılan fiber içinden ilerlemektedir.

Fiberler arasında bağlantı yapıldıktan sonra optik karakterizasyon aşamasına geçilmiştir. Karakterizasyon; optik masa üzerinde yapılmıştır. Karakterizasyon fiberi ve aygıt arasındaki hizalama; optomekanik konumlandırma mekanizması ile yapılmıştır. Optomekanik konumlandırma mekanizması şekil 3.46’da gösterilmektedir.



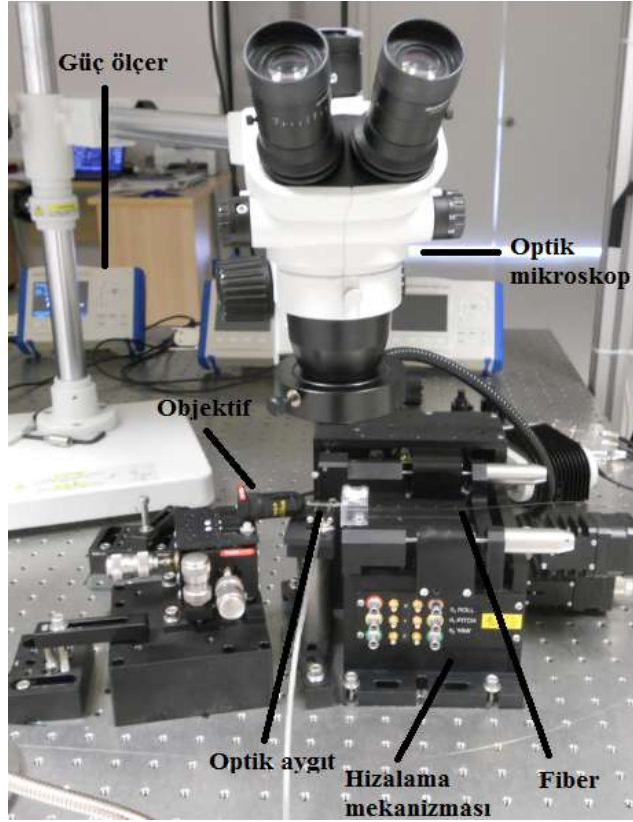
Şekil 3.46 Optomekanik konumlandırma mekanizması

Mekanizma; sürücü kaynaklar ile kontrol edilmektedir. Şekil 3.47’de sürücü kaynak gösterilmektedir.



Şekil 3.47 Sürücü kaynaklar

Karakterizasyon düzeneği şekil 3.48’de gösterilmektedir.



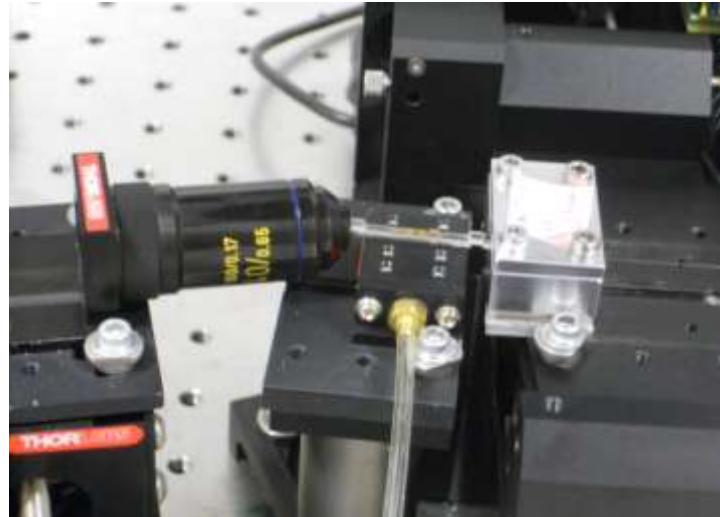
Şekil 3.48 Optik karakterizasyon düzeneği

Optik karakterizasyonu yapılan aygıt şekil 3.48’de gösterildiği gibi fiber ile objektif arasına yerleştirilmiştir. Optomekanik konumlandırma mekanizması bilgisayar ile kontrol edilmektedir. İlgili program arayüzü şekil 3.49’da gösterilmektedir.



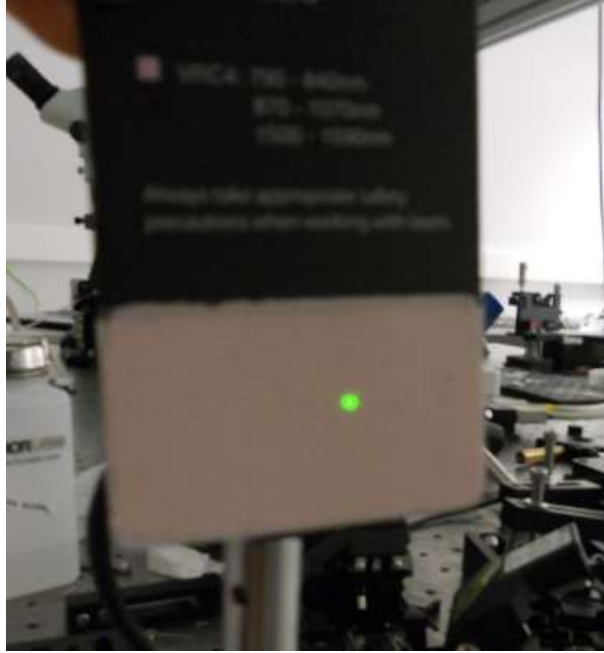
Şekil 3.49 Optomekanik konumlandırma mekanizması program ara yüzü

Arayüz programı ile mekanizma hareket ettirilerek fiber ve optik aygıt arasında optik hizalama sağlanmıştır. Fiber, optik aygıt ve objektifin birbirine göre konumu şekil 3.50’de gösterilmektedir.



Şekil 3.50 Fiber ile optik aygıtın hizalanması

Hizalama; aygıtın çıkış kollarında en yüksek güç değeri elde edilinceye kadar yapılmıştır. Dalgakılavuzunda ilerleyen ve objektif ile odaklama yapılan ışığın güç miktarı bir dedektör yardımıyla ölçülmüştür. Aygıt içinden çıkan ışığın detektör üzerindeki görüntüsü şekil 3.51’de gösterilmektedir. Geçen ışık 1550 nm dalgaboyuna sahip olduğu için çıplak gözle görünmez. Bu sebeple dedektör önüne bir ayar kart tutularak görüntüleme sağlanmıştır.



Şekil 3.51 Dedektör üzerine düşen ışığın ayar kart ile görüntüsü

Bu şekilde üç ayrı optik aygıt için optik karakterizasyon kapsamında geçirgenlik ölçümleri yapılmıştır.

Karakterize edilen optik aygıtlar, şiddet kipleycisi olarak üretilmek için hazırlanmıştır. İlk olarak bu örnekler PCB olarak adlandırılan bir malzemenin üzerine yapıştırılmıştır. PCB; aygıtın elektriksel bağlantılarını yapabilmek için kullanılmıştır. PCB aşamasından sonra ise, optik aygıt ile PCB arasındaki elektriksel bağlantı gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, aygıttan PCB üzerine Au bağlantısı yapılmıştır. Elektriksel bağlantı wire-bond cihaz ile yapılmıştır. Bu cihaz şekil 3.52’de gösterilmektedir.



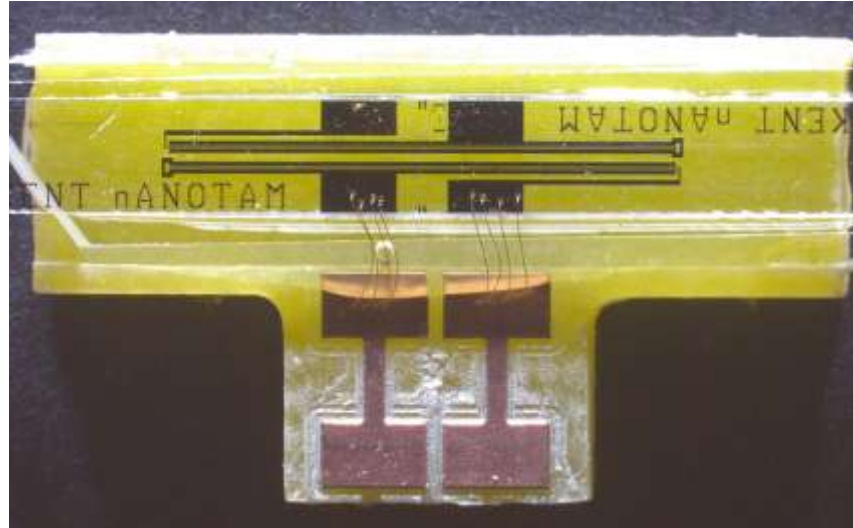
Şekil 3.52 Wire-bond cihazı

Bağlantı işleminde $50\mu\text{m}$ kalınlığında Au teli kullanılmıştır. Ultrasonik enerjiyle optik aygıt ile PCB'nin elektriksel iletim noktaları arasında Au teli bağlantısı yapılmıştır. PCB ile optik aygıt arasındaki elektriksel bağlantıyı oluşturan Au telinin uzunluğu 1.5 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Aygıtın elektriksel bağlantı sırasındaki görünümü şekil 3.53'te gösterilmektedir.



Şekil 3.53 Optik aygıtın elektriksel bağlantı sırasındaki görünümü

Optik aygıtın PCB üzerine yapıştırılmış ve elektriksel bağlantısı yapılmış hali şekil 3.54'de gösterilmektedir.



Şekil 3.54 Elektriksel bağlantı yapılmış optik aygıt

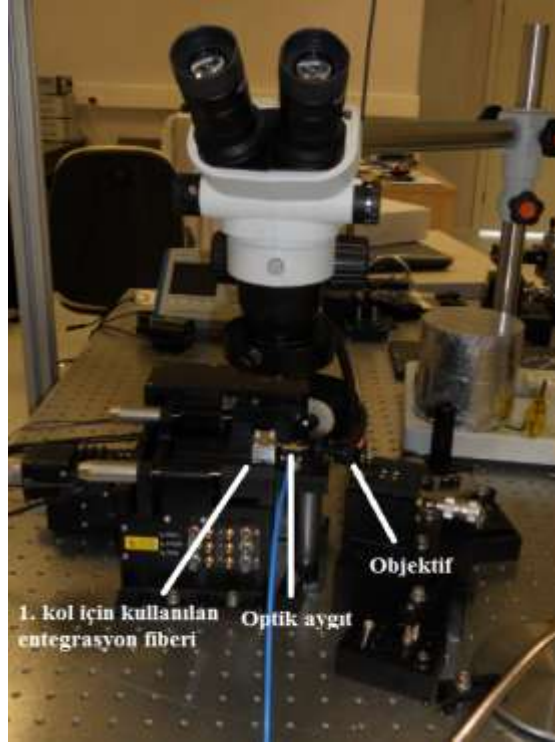
Elektriksel bağlantı sonrasında optik aygıtın fiber ile bütünlemesi aşamasına geçilmiştir. Fiber bütünlemesi; karakterizasyonu yapılan optik aygıtın 1. ve 2. kolunun optik fiberler ile yapıştırılmasıdır. Optik karakterizasyonda kullanılan ekipmanlar bütünleme aşamasında da kullanılmıştır. İlk olarak; karakterizasyonda olduğu gibi 80 µm çapındaki fiberin açık olan uç kısmı ile ışık kaynağının fiber ucu ek işlemi için hazırlanmıştır. Fiber uçları soyulduktan kesilmiştir. Kesme işlemi fiber uçlarını pürüzsüz ve düzgün hale getirmek amacıyla yapılmaktadır. Bu sayede ek yaparken bağlantı kayıpları en aza indirgenmekte ve kaliteli bir birleşim sağlanmaktadır. Kesme işleminden sonra, karakterizasyon aşamasında olduğu gibi fiber uçları ek yapılmıştır. Bütünleme optik masa üzerinde yapılmıştır. Bütünleme düzeneğinin genel görünümü şekil 3.55’de gösterilmektedir.



Şekil 3.55 Bütünleme düzeneği genel görünümü

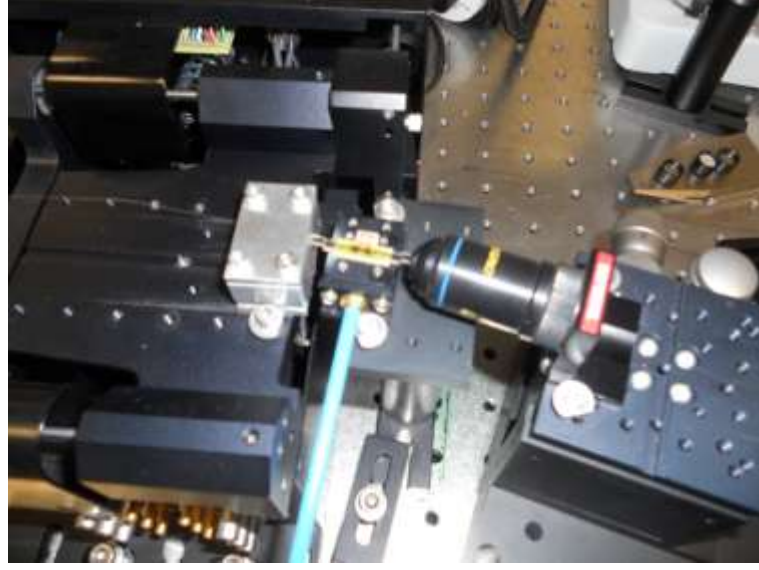
Bütünlemede kullanılan fiber ve optik aygıt arasındaki hizalama, karakterizasyon aşamasında kullanılan optomekanik konumlandırma mekanizması ile yapılmıştır. Fiber bir tutucu içerisine yerleştirildikten sonra bu tutucu konumlandırma mekanizmasının üzerine sabitlenmiştir. Mekanizma sürücüler ile kontrol edilmiştir.

Şiddet kipleycisinin üretim aşamasında ilk olarak optik aygıtın iki kolundan birisi ile optik fiber arasında hizalama ve bütünleme yapılmıştır. 1.kol için bütünleme düzeneği şekil 3.56'da gösterilmektedir.



Şekil 3.56 1.kol için kurulan bütünleme düzeneği

1.kol için kurulan bütünleme düzeneğinde 40X objektif kullanılmıştır. Aygıt içinde ilerleyen ışık objektif yardımıyla odaklanmıştır. Bütünleme için kullanılan fiber bir tutucu içerisinde yer almaktadır. Optomekanik konumlandırma mekanizması üzerinde fiberi sabit bir konumda tutabilmek için tutucu kullanılmıştır. Optik aygıt ise sabit bir desteğin üzerinde vakuma alınmıştır. Optik aygıtın, objektifin ve fiberin birbirine göre pozisyonu daha ayrıntılı olarak şekil 3.57'de gösterilmektedir.



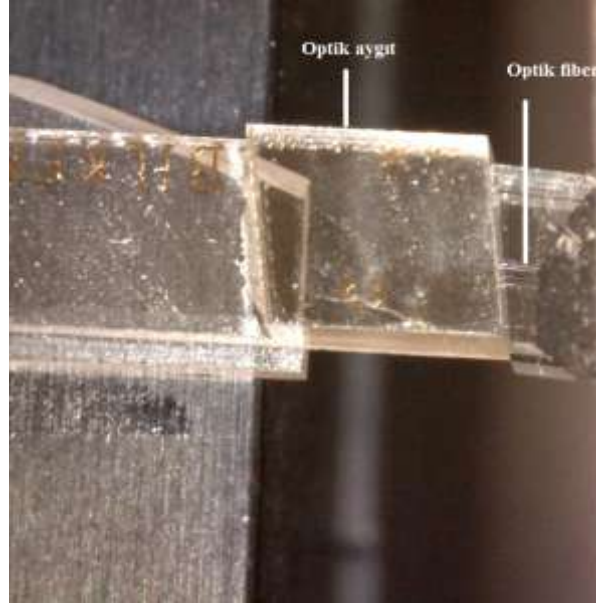
Şekil 3.57 Optik aygıt, objektif ve fiberin birbirine göre pozisyonu

Bütünleme aşamasından önce, karakterizasyonda olduğu gibi aygıt ile fiber arasında hizalama yapılmıştır. Konumlandırma mekanizması, karakterizasyonda olduğu gibi bir program arayüzü ile kontrol edilmiştir. Konumlandırma mekanizması üzerindeki fiber tutucu, bilgisayar programı ile hareket ettirilerek fiber ile aygıtın hizalanması ve aygıt içinden belirli bir güç seviyesinde ışık geçirilmesi sağlanmıştır. Mekanizma motorları x, y ve z gibi belirli eksenlerde hareket ettirilerek ve bir objektif kullanılarak aygıt içinden ilerleyen ışığın en yüksek güç değerinde detektöre düşürülmesi sağlanmıştır. Dedektöre düşen ışık gücü güç ölçerden okunmuştur. Şekil 3.58’de gösterilmektedir.



Şekil 3.58 Optik aygıt içinde ilerleyen ışık gücü

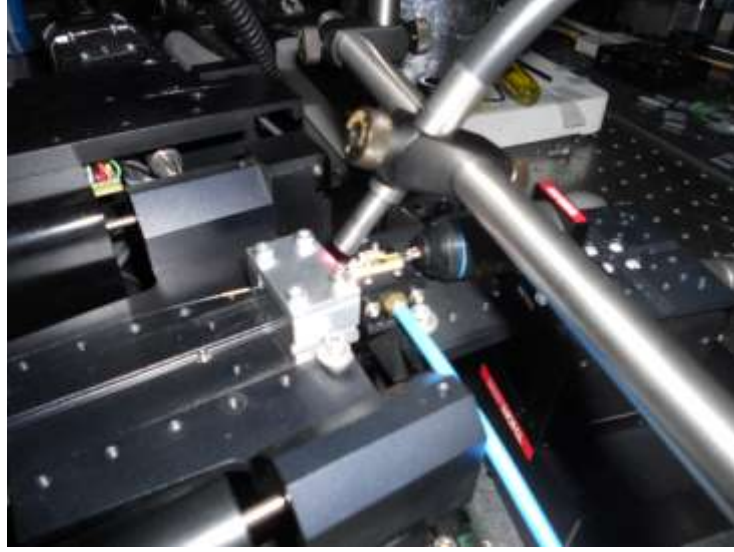
Aygıt ile fiberin hizalanmış üstten görünümü şekil 3.59’da gösterilmektedir.



Şekil 3.59 Fiber ile optik aygıtın hizalanmış üstten görünümü

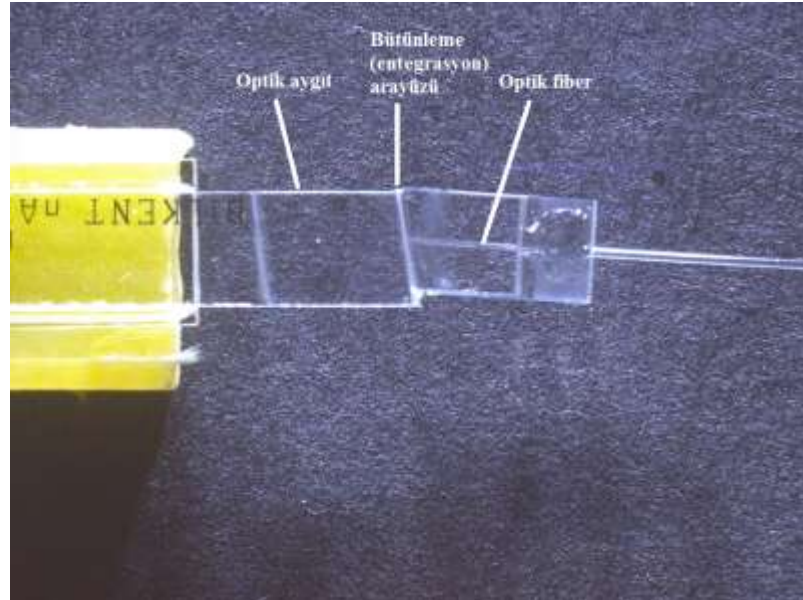
1.kol bütünlemesi için anlatılan ölçüm yöntemi; aygıtın üretim sonrasındaki karakterizasyonu aşamasında uygulanan ölçüm yöntemi ile çok benzerdir. Karakterizasyon aşamasında aygıt PCB üzerinde değildir ve elektriksel bağlantı yoktur. Karakterizasyonun amacı; aygıtın litografik yöntemler ile üretimi sonrası optik olarak çalışıp çalışmadığını veya üretim parametrelerine göre çalışma performansını analiz etmek diğer bir ifadeyle içinden geçen ışık gücünü yüzdesel olarak tespit etmektir. Bütünleme öncesinde PCB’li halde yapılan karakterizasyonda ise amaç; bütünlemeye hazırlık olması açısından aygıtın içinden geçen en yüksek ışık gücünü tespit etmektir. Bütünleme yapılabilmesi için daima zorunlu bir adım olarak nitelendirilebilir.

Hizalama yapıldıktan sonra, fiberi içinde tutan cam parçanın ön yüzeyine UV ışık altında sertleşebilen bir yapıştırıcı uygulanmıştır. Yapıştırıcı uygulandıktan sonra şekil 3.59’da gösterilen optik aygıt ile fiberin birleşim bölgesine denk gelecek şekilde UV ışık uygulanmıştır. UV ışık uygulanması şekil 3.60’da gösterilmektedir.



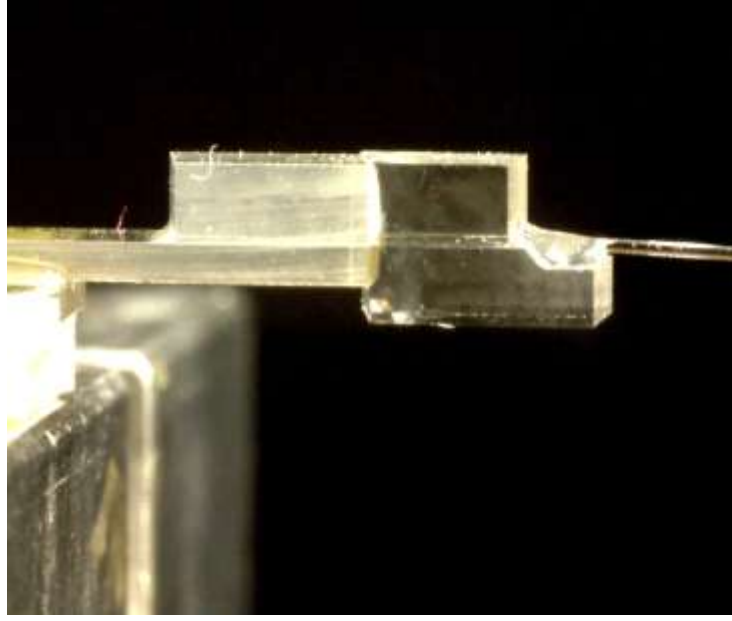
Şekil 3.60 1.kol bütünlemesi için UV ışık uygulanması

Aygıtın 1.kol fiber bütünlemesi tamamlandıktan sonra mikroskop altında incelenmiştir. Bağlantı yapılan bölgenin üstten görünümü şekil 3.61’de gösterilmektedir.



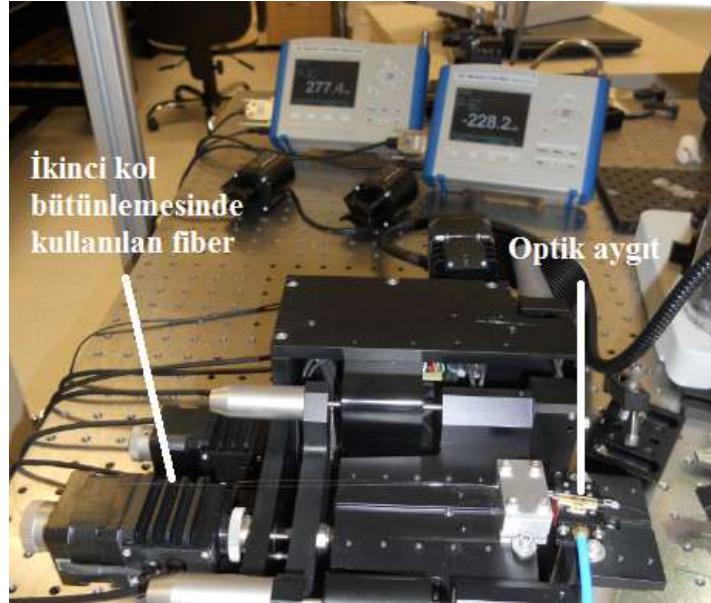
Şekil 3.61 1.kolu bütünlenmiş aygıtın üstten görünümü

Bütünleme sonrası yandan görünüm ise şekil 3.62’de gösterilmektedir.



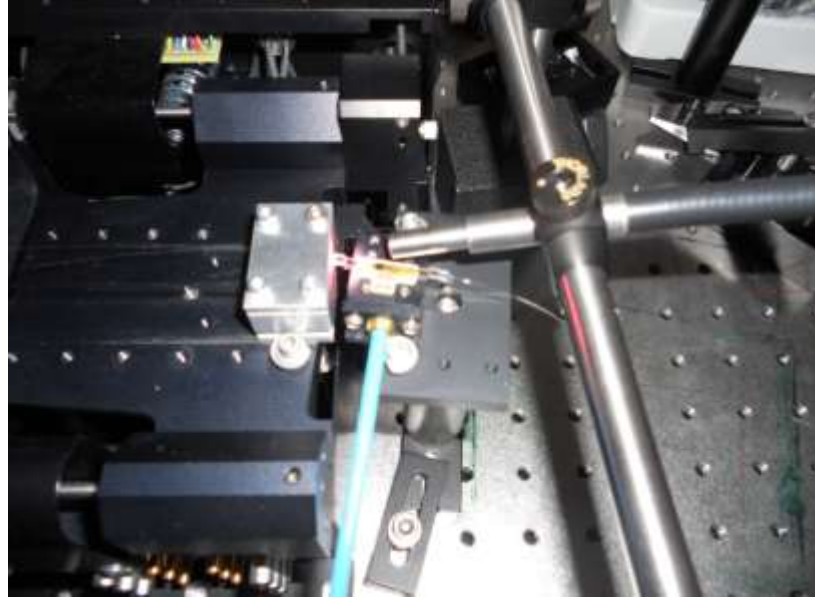
Şekil 3.62 1.kol bütünlemesi sonrası yandan görünüm

1. kol bütünlemesi bittikten sonra aygıtın 2.kolunun bütünlenmesi için optik düzenek kurulmuştur. Kurulan düzenek şekil 3.63'te gösterilmektedir.



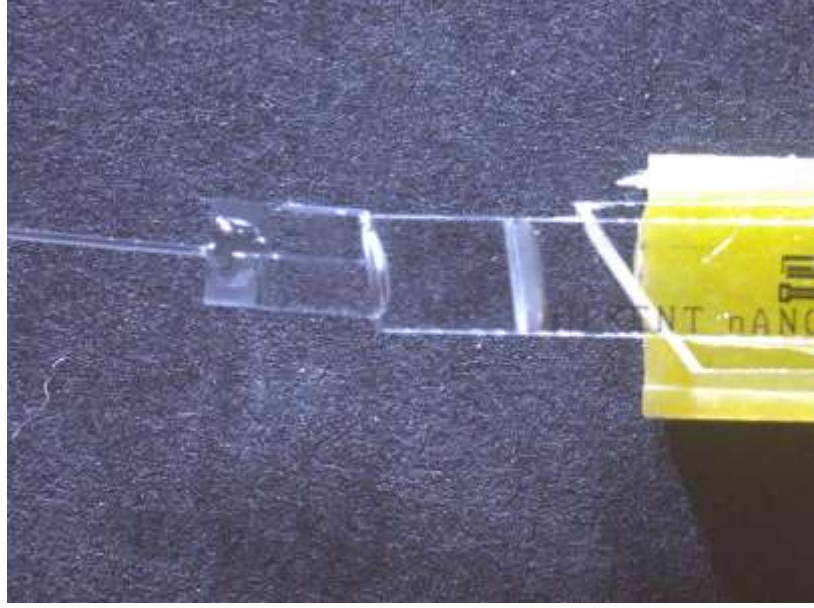
Şekil 3.63 2.kol bağlantısı için kurulan bütünleme düzeneği

2.kol bütünlemede, 1.kol bağlantısında kullanılan ekipmanlar kullanılmıştır. Bu aşamada; 1.kol bütünlemede kullanılan fiber ile aynı özellikte bir fiber kullanılmıştır. Fiber şekil 3.63'te gösterilen metal tutucu içerisine yerleştirilmiştir. Fiberin açıkta kalan ucu ise optik bir dedektöre bağlanmıştır. Güç karakterizasyonu bu dedektör ile yapılmıştır. Konumlandırma mekanizması üstünde bulunan tutucu içindeki fiber ile optik aygıt arasında hizalama sağlanmıştır. Fiber tutucu bilgisayar programı ile hareket ettirilerek ve 1.kolu bütünlenmiş optik aygıt sabit tutularak, hareket halindeki fiber içinden ışığın geçirilmesi sağlanmıştır. Fiber içinden en yüksek seviyede güç geçirildikten sonra aygıtın ikinci kol tarafındaki ön yüzeyine UV geçirgen bir yapıştırıcı uygulanmıştır. Yapıştırıcı uygulandıktan sonra, tıpkı 1.kol bütünlemede olduğu gibi optik aygıt ile fiberin birleşim bölgesine denk gelecek şekilde UV ışık uygulanmıştır. 2.kol için UV ışık uygulaması şekil 3.64'de gösterilmektedir.



Şekil 3.64 2.kol bütünlemesi için UV ışık uygulanması

2.kolu bütünlenmiş aygıt, şekil 3.65'de gösterilmektedir.



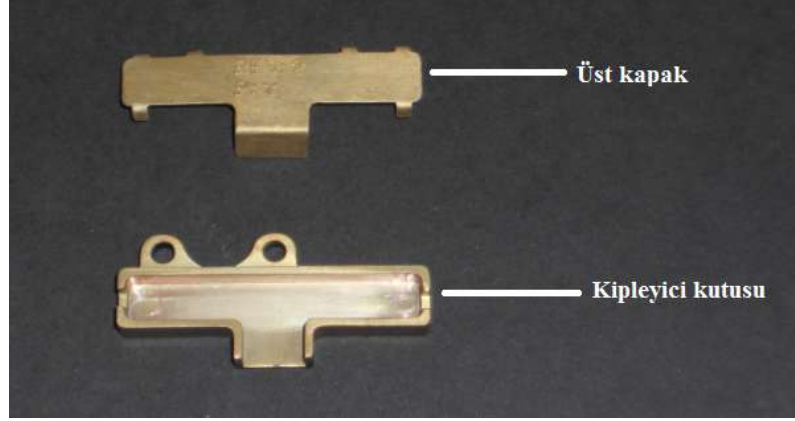
Şekil 3.65 2.kolu entegre edilmiş aygıtın üstten görünümü

Optik aygıtın 1. ve 2.kolu sırasıyla bütünlendikten sonra elde edilen şiddet kipleycisi şekil 3.66’da gösterilmektedir.



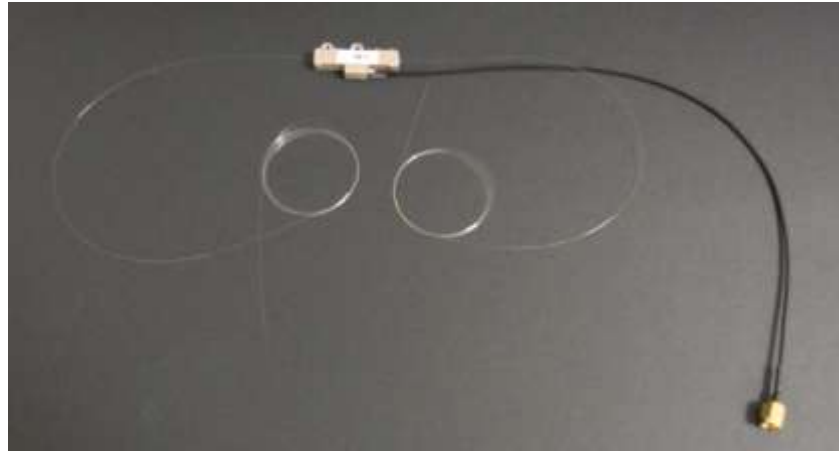
Şekil 3.66 Şiddet kipleycisi

Bütünleme sonrası elde edilen şiddet kipleycisinin elektriksel olarak test edilebilmesi için paketlenmesi yapılmıştır. Paketleme kapsamında ilk olarak aygıt kutulaması yapılmıştır. Kullanılan kutu ve üst kapağı şekil 3.67’de gösterilmiştir.



Şekil 3.67 Kipleyci kutusu ve üst kapak

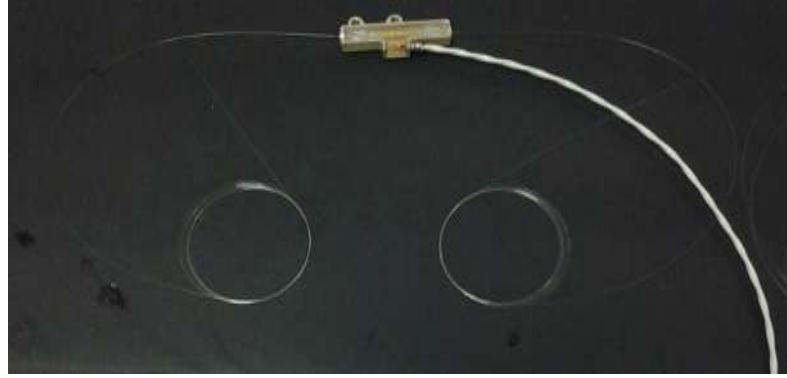
Kipleyci kutu içerisine yapıştırıldıktan sonra elektriksel ölçümlerin yapılabilmesi için kablo ile lehimlenmiştir. Kutulama ve lehimleme ile elde edilen paketlenmiş şiddet kipleycisi şekil 3.68’de gösterilmektedir.



Şekil 3.68 Paketlenmiş şiddet kipleycisi

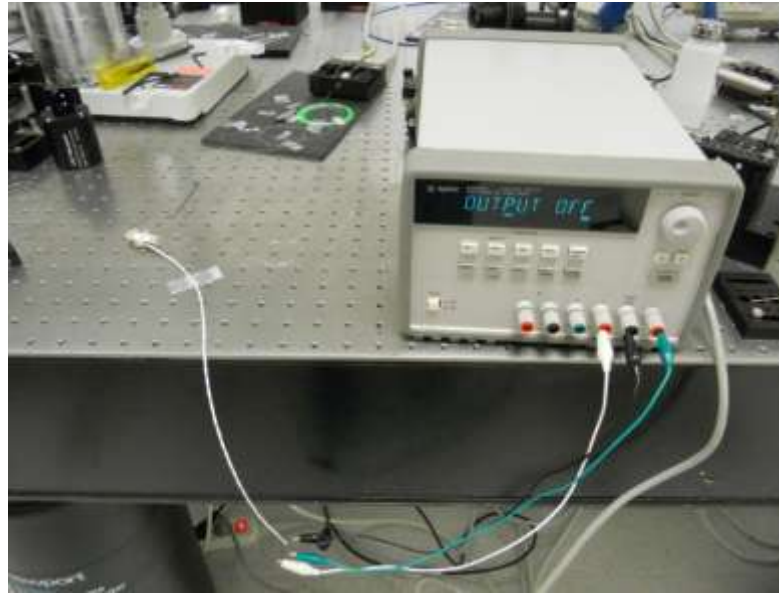
Paketleme işlemi sonrasında kipleycinin elektriksel karakterizasyonları yapılmıştır. Elektriksel ölçüm kapsamında ilk olarak DC seviyede ölçümler yapılmıştır. Diğer bir ifadeyle; frekanstan bağımsız olarak V_{π} ölçümleri yapılmıştır. V_{π} ; aygıtın çıkış kolundan ölçülen gücün ilk minimum seviyeye düştüğü yerdeki gerilimdir. Üretilen şiddet kipleycisi Mach-Zehnder geometrisine sahip bir yapıdır. Tek koldan giren ışık,

ikiye ayrılan kolda ilerleyip çıkışta tekrar tek bir kolda birleşmektedir. Çıkışta kollar tekrar birleştiği için iki kolda ilerleyen ışık sinyali girişim oluşturmaktadır. Tez çalışması kapsamında DC seviyede frekanstan bağımsız olarak π , 2π ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde DC seviyede çalışan bir güç kaynağı kullanılmıştır. DC seviyede ölçümler yapabilmek için şiddet kipleycisi şekil 3.69'daki gibi bir kablo ile bağlantı yapılmıştır.



Şekil 3.69 DC seviyedeki ölçümler için kablo bağlantısı

DC seviye ölçümler için kurulan düzenek şekil 3.70'de gösterilmektedir.

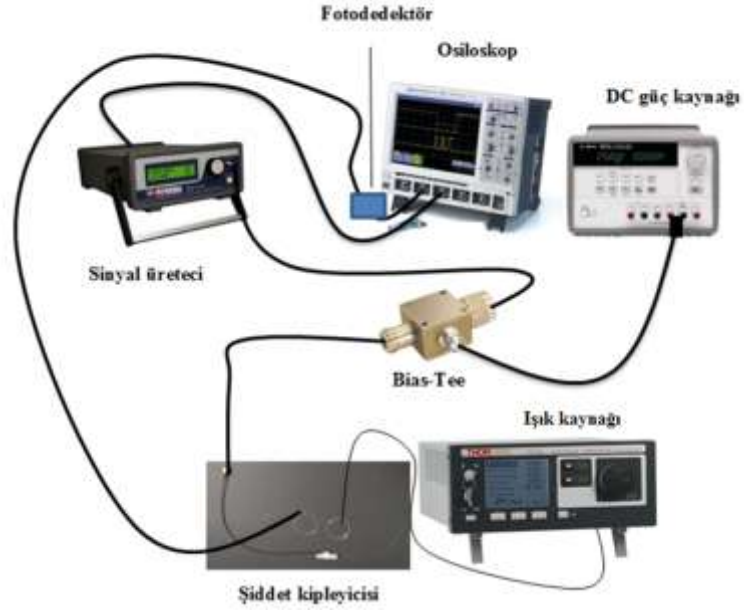


Şekil 3.70 DC seviye ölçüm düzeni

Şekil 3.70’de de gösterildiği gibi kipleyci kablosunun üç farklı ucu güç kaynağının (+, -) ve sıfır uçlarına kablolar ile bağlanmıştır. Kipleycinin giriş fiberi karakterizasyon aşamasında olduğu gibi ışık kaynağı fiberi ile ek yapılmıştır. Çıkış kolu ise bir detektöre bağlanmıştır. Tanımlandığı gibi; V_{π} gerilimi; aygıtın çıkış gücünün ilk minimum seviyeye düştüğü yerdeki gerilimdir. π fazı ise çıkış gücünün ilk minimuma düştüğü yerdeki faz miktarıdır. π , 3π gibi π ’nin tek katlarında minimum çıkış gücü elde edilmektedir. Çünkü faz; aygıtın kollarına + ve - olarak zıt miktarda uygulandığı için, tek katlarda dalgakılavuzu kollarına eşit olarak dağılmaz. Bu sebeple minimum güç seviyesi elde edilmektedir. 0, 2π , 4π gibi çift katlarda ise dalgakılavuzu kollarında + ve - olmak üzere eşit miktarda faz oluşur. Bu durumda ise maksimum güç seviyesi elde edilmektedir. Şiddet kipleycisinin dalgakılavuzu kolları arasında faz farkı varsa, diğer bir ifadeyle iki kolda eşit miktarda faz oluşmazsa güçte azalma olur ve minimum güç elde edilmektedir. İki kolda eşit ve zıt miktarda faz oluşursa en yüksek güç seviyesi elde edilmektedir. Bu şekilde maksimum ve minimum güç seviyeleri ile V_{π} , $V_{2\pi}$ gibi gerilimlere bağlı olarak meydana gelen girişim; kipleycinin temel çalışma prensibini açıklamaktadır.

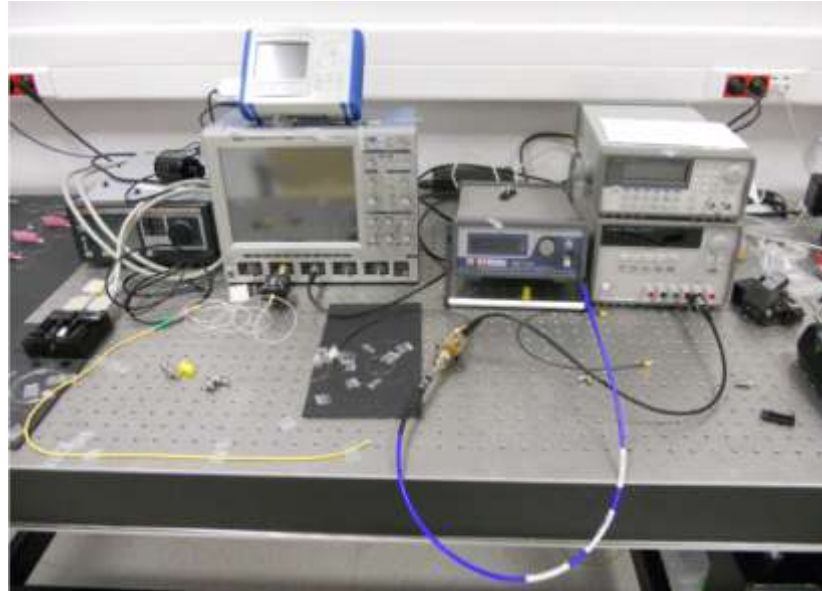
Cihaz açıldıktan sonra ilk olarak 0 V için kipleyciden geçen en yüksek ışık gücü güç ölçerden okunmuştur. Daha sonra 0 V- 23.5 V arasında 0.25 V aralıklarla gerilim artırılarak ölçüm yapılmıştır. V_{π} ’de minimum, $V_{2\pi}$ ’de maksimum güç değerleri elde edilmiş ve gerilimin güce bağlı grafiği çizdirilerek şiddet kipleycisinin girişim eğrisi elde edilmiştir. Bu şekilde üretilen iki farklı aygıt için DC seviyede ölçümler yapılmıştır.

DC karakterizasyon ile girişim eğrisi oluşturulup V_{π} gerilimi saptandıktan sonra 1 GHz’e kadar olan frekansa bağlı AC seviyede ölçümler yapılmıştır. Ölçümler bir aygıt için yapılmıştır. Ölçüm düzeneği şematik olarak şekil 3.71’de gösterilmektedir.



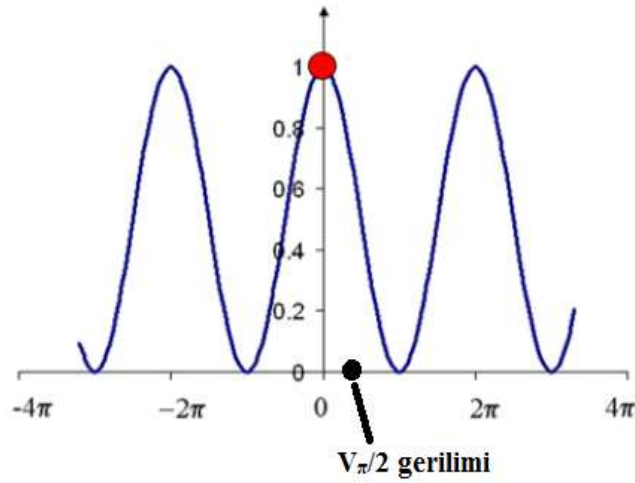
Şekil 3.71 AC seviye ölçüm düzeneği şematığı

Şekil 3.71’de gösterildiği gibi, ölçümlerde osiloskop, sinyal üretici, bias-tee, DC güç kaynağı ve fotodetektör kullanılmıştır. Kurulan ölçüm düzeneği ise şekil 3.72’de gösterilmektedir.



Şekil 3.72 AC seviyede elektriksel karakterizasyon düzeneği

Şekil 3.72’de gösterilen ölçüm düzeneğinin ilk aşamasında şiddet kipleycisinin 1.kol fiberi ışık kaynağı fiberi ile ek yapılmıştır. 2.kol çıkış fiberi ise osiloskop girişlerinden birine takılan fotodetektörün fiberi ile ek yapılmıştır. DC güç kaynağı ile $V_{\pi}/2$ gerilimi ölçülmüştür. $V_{\pi}/2$ gerilimi sistemin çalışma gerilimi olarak tanımlanabilir. Kipleyciye V_{π} gerilimi uygulandığı zaman aygıtın çıkışından en düşük güç elde edilmektedir. Elektro-optik kipleycilerde çalışma gerilimi daima doğrusal bölgede olmalıdır. Girişen dalgaların girişim eğrisi dikkate alındığında doğrusal olmayan bölgede çalışılırsa eğer, istenmeyen salınımlar oluşur ve AC sinyali DC sinyali ile çakıştığında doğru ölçüm yapılamaz. Bu sebeple detektöre ulaşan ışık şiddeti, kipleyciye uygulanan gerilim ile doğru orantılıdır. $V_{\pi}/2$ geriliminin olduğu bölge, uygulanan gerilimin detektöre düşen ışık şiddeti ile doğru orantılı olarak değiştiği bölgedir. Linear bölgenin tam ortası $V_{\pi}/2$ gerilimidir. Şekil 3.73’te $V_{\pi}/2$ gerilimi siyah nokta ile gösterilmektedir.



Şekil 3.73 Girişim eğrisinde $V_{\pi}/2$ gerilimi saptanması (Özdemir 2012’den değiştirilerek alınmıştır)

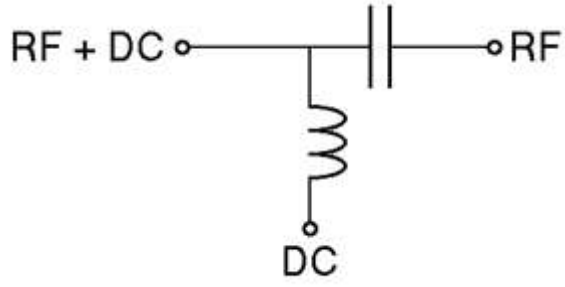
Şekil 3.73’deki örneklendirmeye göre, $V=0$ olduğu durumda hiç gerilim uygulanmadığı zaman elde edilen ışık gücü kırmızı nokta ile gösterilmiştir. Işık gücünün gerilime bağlı olarak nispeten doğru orantılı olarak değiştiği bölgede $V_{\pi}/2$ diye adlandırılan çalışma gerilimi saptanmıştır. AC karakterizasyonlar sırasındaki ölçümlerde DC güç kaynağı kullanılarak hiç gerilim uygulanmazken ve en yüksek gerilim uygulandığı durumlardaki

sinyal seviyesi saptanmıştır. Böylece V_{π} gerilim bulunduktan sonra çalışma gerilimi saptanmıştır. DC kaynaktan gelen çalışma gerilimi 2.1 V olarak kaydedilmiştir.

DC çalışma gerilimi saptandıktan sonra sinyal üretici çalıştırılmıştır. Sinyal üretici; yüksek frekanslarda sinyal üretir ve tetikleme (triggering) sağlar. Tetikleme, üreteçten sağlanan sinyali sıfır noktasına sabitlemek için yapılan bir işlemdir. AC seviye ölçümlerinde GHz mertebesinde yüksek frekanslarda çalışıldığı için ölçüm esnasında osiloskoptan izlenen sinyalin sabit bir seviyede tutulabilmesi için tetikleme yapılmaktadır.

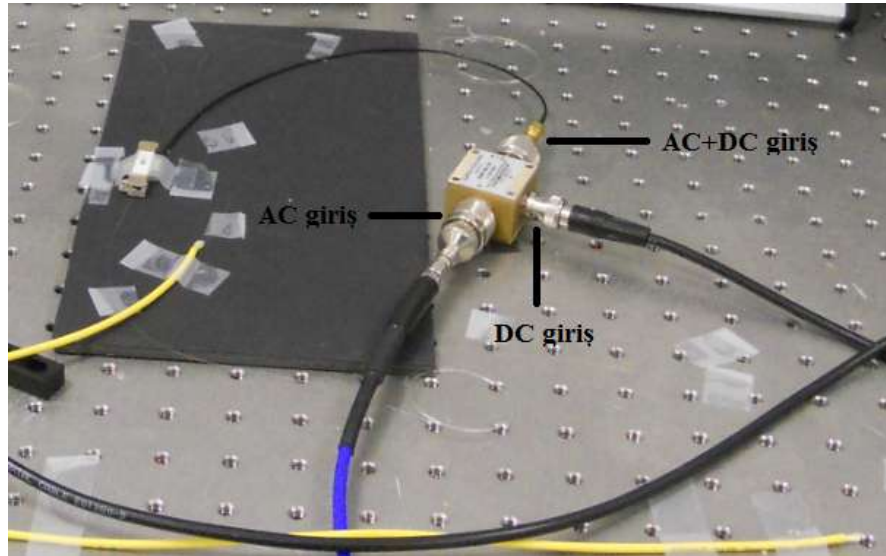
Deneylerde kullanılan sinyal üretici 10 MHz - 20 GHz frekansı aralığında çalışma kapasitesine sahiptir. Tetikleme; cihazın arka girişinden yapılmıştır. Sinyal üreticinin arka girişine bağlanan kablo osiloskobun ön girişlerinden birine bağlantı yapılmıştır. Sinyal üreticinin ön girişinden de tetikleme yapılabilir. Ancak bu durumda üreteçten sağlanan gücün yarısı tetiklemeye, yarısı da şiddet kipleycisine verileceği için bölünmüş olacaktır. Dolayısıyla aygıtta yarı seviyede güç gideceğinden ölçümü olumsuz yönde etkileyebilir. Bu sebeple ölçümlerde ön girişten tetikleme tercih edilmemiştir. Arka girişteki tetikleme 10 MHz'de yapılmıştır. Sinyal üreticinin ön taraftaki girişi ise aygıtta RF sinyal vermek için kullanılmıştır.

Sinyal üreticinden sağlanan RF sinyalini ve güç kaynağından sağlanan DC sinyalini şiddet kipleycisine uygulamak için bir bias-tee kullanılmıştır. Bias-tee bir çeşit çiftleyicidir. Düşük frekanslı DC sinyali ve yüksek frekanslı AC sinyalini birleştirerek DC ve AC sinyallerinin her ikisinin de aynı anda aygıttan geçirilmesini sağlamaktadır. Tipik bir bias-tee'nin eşdeğer devresi şekil 3.74'de gösterilmektedir.



Şekil 3.74 Bias-Tee eşdeğer devresi

Şekil 3.74’de görüldüğü gibi; bias-tee’nin bir ucundan DC diğer ucundan RF seviyede AC sinyal verilerek üçüncü uçta DC ve AC sinyaller birleşmektedir. Yapılan deneyde bias-tee ile sinyal üreticiden gelen AC sinyal ve güç kaynağından gelen DC sinyal birleştirilerek üçüncü uçtan aygıta verilmektedir. Şekil 3.75’te deneyde kullanılan bias-tee’nin bağlantıları gösterilmektedir.



Şekil 3.75 AC seviye ölçümlerde kullanılan bias-tee bağlantıları

Frekansa bağımlı ölçümlerde, sinyal üreticiden sağlanan AC sinyal bias-tee içinden geçirilerek kipleyciye uygulanmıştır. Kipleycinin 1.kolu ışık kaynağı ile bağlantı yapılmıştır. Üreteçten gelen AC sinyal kipleyciden geçen ışık üzerine bindirilerek

kiplleme yapılmaktadır. Kipleycinin 2.kolu fotodedektör ile bağlantı yapılarak, fotodedektör çıkışı osiloskop girişine takılmıştır. Böylelikle üreteçten gelen elektriksel sinyal optik sinyale dönüştürölüp tekrar fotodedektör ile elektriksel sinyale dönüştürölerek kiplleme işleml yapılmış olur.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

LiNbO₃ şiddet kipleycileri, günümüzde yüksek frekans uygulamalarında tercih edilmektedir. Genel olarak dalgakılavuzu üretiminde APE veya Ti difüzyonu gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır (Wooten vd. 2000). Ti difüzyon prosesinde; film kalınlığı, difüzyon süresi ve sıcaklığı önemli parametrelerdir. Çünkü bu parametreler, performansı yüksek bir fiber bütünlemesi elde etmek ve karakterizasyon sırasındaki kayıpların en aza indirgenmesi için önem taşımaktadır (Wooten vd. 2000). Aygıtın üretimi ile ilgili yapılan ve literatürde sıkça karşılaşılan analizlerden biri de prizma eşleme ölçümüdür. (Mohaamedelhassan 2012). UV litografi tekniği ile üretilen optik aygıt, birtakım geniş uygulama alanlarında kullanılmaktadır (Wooten vd. 2000). Elektriksel ve optik ölçümlerin yapılabilmesi için UV ışık altında sertleşebilen yapıştırıcı kullanılarak fiber ile bütünleme ve bazı paketleme işlemleri yapılmaktadır (Wooten vd. 2000). Kipleycinin elektriksel ölçümleri kapsamında V_{π} ölçümleri yapılmaktadır (Gopalakrishnan vd. 1994). Gerçekleştirilen bir çalışmada 1500 nm'de V_{π} gerilimi 5 V civarında tespit edilmiştir (Gopalakrishnan vd. 1994).

4.1 Ti Difüzyon Derinliğine Bağlı Kırılma İndisi Değişim Analizi

Bu tezde üretimi yapılan optik aygıtların prizma eşleme ölçümleri yapılmış ve Ti difüzyon derinliğine bağlı kırılma indisi değişimleri saptanmıştır. Ölçüm sonuçlarını analiz etmek için yazılan Matlab kodu şekil 4.1'de gösterilmektedir.

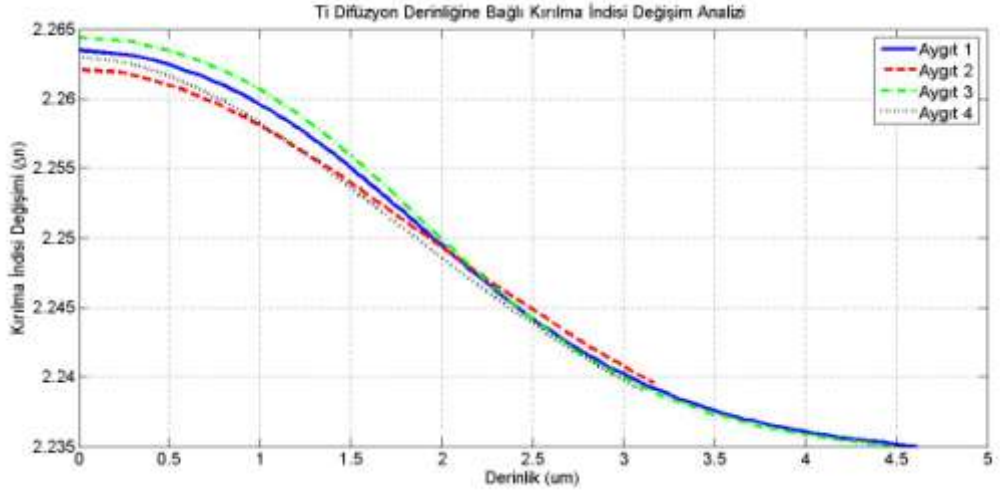

```

2 - load -ascii aygit1.txt;
3 - load -ascii aygit2.txt;
4 - load -ascii aygit3.txt;
5 - load -ascii aygit4.txt;
6
7
8 - data1 = aygit1;
9 - data2 = aygit2;
10 - data3 = aygit3;
11 - data4 = aygit4;
12
13 - d_1 = data1(:,1);
14 - d_2 = data2(:,1);
15 - d_3 = data3(:,1);
16 - d_4 = data4(:,1);
17
18 - n_1 = data1(:,2);
19 - n_2 = data2(:,2);
20 - n_3 = data3(:,2);
21 - n_4 = data4(:,2);
22
23 - plot(d_1,n_1,'b-',d_2,n_2,'r--',d_3,n_3,'g-',d_4,n_4,'k:','LineWidth',3);
24 - set(gca,'FontSize',15);
25 - xlabel('Derinlik (um)');
26 - ylabel('Kırılma İndisi Değişimi');
27 - title('Ti Difüzyon Derinliğine Bağlı Kırılma İndisi Değişim Analizi ');
28 - grid;
29 - legend('aygit1','aygit2','aygit3','aygit4');
30
31

```

Şekil 4.1 Ti derinliğine bağlı kırılma indisi değişimini saptamak amacıyla yazılan Matlab kodu

Çizdirilen kırılma indisi değişim grafiği ise şekil 4.2’de gösterilmektedir.



Şekil 4.2 Kırılma indisi değişim grafiği

Δn değeri; LiNbO_3 'ün Ti difüzyonu öncesinde ve sonrasındaki kırılma indisi arasındaki farkı temsil etmektedir. Şekil 4.2’de gösterildiği gibi Ti difüzyon derinliğine bağlı

olarak farklı bölgelerde kırılma indisi değişimi farklılaşmaktadır. Derinlik arttıkça Δn 'nin azaldığı ve sıfırlandığı görülmektedir. $\Delta n=0$ olması demek; Ti metalinin yapı içinde her yere dağıldığı anlamına gelmektedir. Yüzeyden derinlere doğru inildikçe Ti metali her yere dağılmıştır. Bu durum; kırılma indisi değişiminin ölçülemeyeceği anlamına gelmektedir. Şekil 4.2'de, derinlik arttıkça Δn 'in sıfıra gitmesi bu açıklamayı doğrulamaktadır.

4.2 Optik Güç Karakterizasyonu ve Bütünleme Aşamasındaki Geçirgenlik Analizi

Yürütülen tez çalışması kapsamında üretilen şiddet kipleycisinin fotolitografi tekniği ile üretimi yapıldıktan sonra ilk olarak optik karakterizasyonu yapılmıştır. Optik karakterizasyonda üç farklı optik aygıt için fiber ve aygıtın birbirine göre hizalaması yapılmıştır. Optimum hizalama sağlandıktan sonra objektiften geçip detektöre düşen ışığın güç ölçümü yapılmıştır. Karakterizasyonu yapılan optik aygıtlar ve güç ölçümleri çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Optik güç karakterizasyonu

Aygıt numarası (#)	P_g (mW)	P_1 (mW)
1	44.0	7.46
2	44.0	6.98
3	44.0	8.96

Çizelge 4.1'deki P_1 ; aygıtın objektif aracılığı ile ölçülen çıkış gücünü simgelemektedir. P_g ise ışık kaynağı giriş gücünü göstermektedir. Aygıtların fiber ucundan güç ölçümü yapıldıktan sonra geçirgenlik değerleri hesaplanmıştır. Geçirgenlik hesabı denklem (4.1) ile gösterilmektedir.

$$\text{Geçirgenlik(\%)} = \left(\frac{P_1}{44}\right) \times 2 \times 100 \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)'de ışık kaynağı giriş gücü 44 mW olarak hesaplamalarda kullanılmıştır. Optik karakterizasyon kutuplanmamış ışık kaynağı ile yapılmıştır. Denklem (4.1)'e göre hesaplanan geçirgenlik değerleri çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Optik karakterizasyon sonrası geçirgenlik değerleri

Aygıt numarası (#)	Geçirgenlik (%)
1	33.9
2	31.7
3	40.7

Çizelge 4.2'de gösterilen aygıtların üçüne de aynı fotolitografi ve difüzyon prosesi uygulanmasına rağmen geçirgenlik değerlerinde fark olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi; çizelge 4.2'de belirtilen aygıtların üretildiği LiNbO₃ yongalar elektron demeti buharlaştırma cihazında sayısal değer olarak belirli bir değerde Ti kaplanmasına rağmen pratikte yonganın tüm yüzeyinin eşit derecede kaplanamamış olmasıdır. Nanometrik boyutlardaki kaplama kalınlığı farkı, difüzyon aşamasında da Ti metalinin LiNbO₃ yonganın her bir bölgesine eşit derecede difüz edememesine sebep olmuştur. Optik dalgakılavuzları Ti difüzyon işlemi ile oluşturulduğu için difüz eden Ti miktarına bağlı olarak dalgakılavuzlarının ışığı geçirme miktarları değişkenlik göstermektedir. Böylece çizelge 4.2'de belirtildiği gibi farklı geçirgenlik değerleri elde edilmiştir. Ancak bu durumun, aygıtın performansını olumsuz ölçüde etkilemediği saptanmıştır.

Aygıtın optik güç karakterizasyonu yapıldıktan sonra bütünleme aşamasına geçilmiştir. İlk olarak aygıtın 1.kolu bütünlendikten sonra aygıtın içinden geçen ve objektif aracılığı ile detektöre düşen ışığın gücü ölçülmüştür. Güç ölçümleri çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 1.kol bütünlemesi sonrası optik güç ölçümü

Aygıt numarası (#)	P_g (mW)	P_1 (mW)
1	41.8	7.67
2	56.7	7.45
3	26.2	4.88

Çizelge 4.3'te gösterilen P_1 ; optik aygıtın 1.kol bütünlemesi sonrası objektif aracılığı ile ölçülen çıkış gücünü simgelemektedir. P_g ise ışık kaynağının giriş gücünü simgelemektedir.

1.kol bütünlemesi sonrası çıkış gücü ölçüldükten sonra geçirgenlik hesabı yapılmıştır. Geçirgenlik hesaplamasında denklem (4.2) kullanılmıştır.

$$\text{Geçirgenlik(\%)} = \left(\frac{P_1}{P_g}\right) \times 2 \times 100 \quad (4.2)$$

Denklem (4.2) kullanılarak hesaplanan geçirgenlik değerleri çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4 1.kol bütünlemesi sonrası geçirgenlik değerleri

Aygıt numarası (#)	Geçirgenlik (%)
1	36.7
2	26.3
3	37.3

Çizelge 4.2 ile çizelge 4.4'teki geçirgenlik değerleri karşılaştırıldığında üç aygıtın geçirgenlik değerlerinde tutarlılık olduğu gözlenmektedir. Çizelge 4.2'ye göre optik karakterizasyon sonrasında geçirgenliği en yüksek olan aygıtın, çizelge 4.4'teki 1.kol bütünlemesi sonrasında da geçirgenliğinin en yüksek olduğu gözlenmektedir. Aygıtlar kendi içerisinde optik karakterizasyon sonrası ve bütünleme sonrası güç değerlerine

göre kıyaslandığında aygıt 2 ve aygıt 3'ün geçirgenlik değerlerinde azalma olduğu gözlemlenmiştir. Bu azalma, fiberleri ek yaparken meydana gelen kayıp veya fiber ile aygıtın hizalamasından kaynaklı deneysel hata payı olarak değerlendirilebilir. Ancak genel olarak aygıtın performansını etkilemediği saptanmıştır.

1.kol bütünlemesi yapıldıktan sonra 2.kol bütünleme aşamasına geçilmiştir. 2.kol bütünlemesi sonrası 2.kolun fiber çıkışından güç ölçümü yapılmıştır. Ölçülen güç değerleri çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5 2.kol bütünlemesi sonrası optik güç ölçümü

Aygıt numarası (#)	P_g (mW)	P_2 (mW)
1	41.8	5.92
2	56.7	6.14
3	26.2	3.66

2.kol fiber çıkışından güç ölçümleri yapıldıktan sonra geçirgenlik hesabı yapılmıştır. Geçirgenlik değerleri denklem (4.3)'e göre hesaplanmıştır.

$$\text{Geçirgenlik}(\%) = \left(\frac{P_2}{P_g}\right) \times 2 \times 100 \quad (4.3)$$

Aygıtların hesaplanan geçirgenlik değerleri çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6 2.kol bütünlemesi sonrası geçirgenlik değerleri

Aygıt numarası (#)	Geçirgenlik (%)
1	28.3
2	21.7
3	28.0

Çizelge 4.6'daki 2.kol geçirgenlik değerleri çizelge 4.4'teki 1.kol sonrası geçirgenlik değerleri ile karşılaştırıldığında, 2.kol bütünlemesi sonrası geçirgenlik değerlerinde azalma olduğu saptanmıştır. 1. ve 2. kol bütünlemesi sonrası hesaplanan geçirgenlik değerleri arasındaki farklar çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7 1. kol ve 2.kol bütünlemesi arasındaki geçirgenlik farkı

Aygıt numarası (#)	Δ (%)
1	8.4
2	4.6
3	9.3

Δ ; geçirgenlik değerleri arasındaki farkı simgelemektedir. Çizelge 4.7 incelendiğinde her bir aygıt için geçirgenlik kaybı değişim göstermektedir. Bu farklılığın sebepleri arasında; aygıt ile fiber arasındaki hassas hizalama, aygıtın ön kesit alanının düzgünlüğü gibi sebepler yer almaktadır.

4.3 Şiddet Kipleycisinin DC ve AC Seviyede Elektriksel Karakterizasyonları

Üretilen şiddet kipleycisinin optik karakterizasyonu ve bütünlemesi gerçekleştirildikten sonra DC ve AC seviyede elektriksel karakterizasyonları yapılmıştır. DC karakterizasyonu; frekanstan bağımsız olarak belirli aralıklardaki gerilim değerleri ile buna karşılık gelen şiddet kipleycisi gücünü ölçerek girişim profilini saptamak ve V_{π} , $V_{2\pi}$ gerilimlerini belirlemek amacıyla yapılmıştır. AC karakterizasyonu ise şiddet kipleycisinin frekansa bağlı ölçümlerini gerçekleştirmek amacıyla yapılmıştır.

4.3.1 DC seviyede karakterizasyonun girişim eğrisi üzerine etkisi

Yürütülen tez çalışması kapsamında, üretilen şiddet kipleycisinin elektriksel karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. İki adet şiddet kipleycisi için frekanstan

bağımsız olarak DC seviyede ölçüm yapılmıştır. Elde edilen verilere göre her iki aygıt için ölçülen V_{π} , $V_{2\pi}$ değerleri çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8 Şiddet kipleycisinin V_{π} ve $V_{2\pi}$ gerilim ölçümleri

Aygıt Numarası (#)	V_{π} (V)	$V_{2\pi}$ (V)
1	5.77	10.75
2	5.12	10.51

V_{π} ve $V_{2\pi}$ belirlendikten sonra her iki aygıtın da girişim profili analiz edilmiştir. Bu çalışma kapsamında 0.25 V aralıklarla uygulanan gerilim değerlerine karşılık detektöre düşen optik güç değerleri grafik halinde analiz edilmiştir. Girişim profili analizi için yazılan Matlab kodu şekil 4.3’de gösterilmektedir.

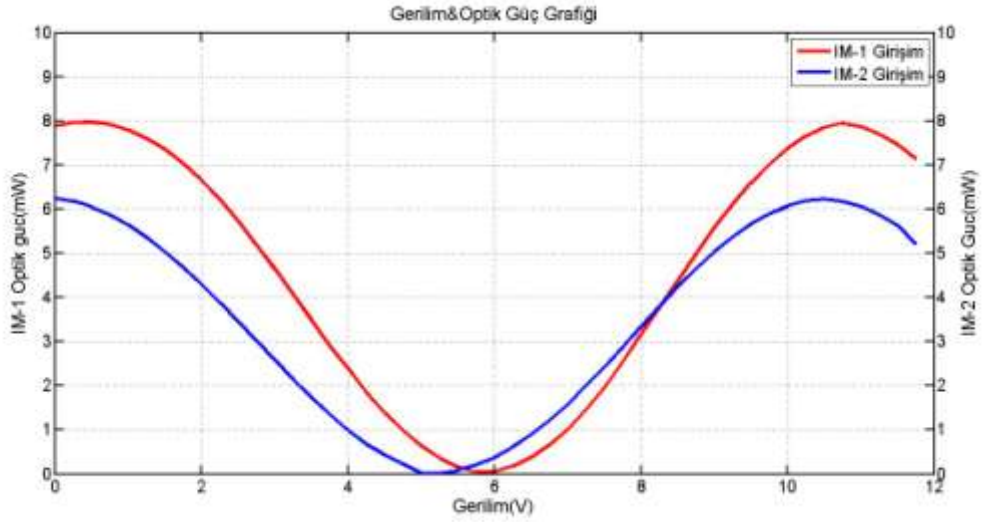
```

1 - clear;
2 - load -ascii olcum1.txt;
3 - voltage1=olum1(:,1);
4 - optic_power1=olum1(:,2);
5
6
7
8
9
10 - load -ascii olcum2.txt;
11 - voltage2=olum2(:,1);
12 - optic_power2=olum2(:,2);
13
14
15
16 - [haxes,hline1,hline2] = plotyy(voltage1,optic_power1,voltage2,optic_power2);
17 - set(haxes(1),'XLim',[0 12],'LineWidth',1.5);
18 - set(haxes(2),'XLim',[0 12]);
19 - set(haxes(1),'YLim',[0 10], 'FontSize', 16);
20 - set(haxes(1),'YTick',[0:1:10], 'Ycolor', 'k');
21 - set(haxes(2),'YLim',[0 10], 'FontSize', 16);
22 - set(haxes(2),'YTick',[0:1:10], 'Ycolor', 'k');
23 - set(hline1,'Color','r','LineWidth',3);
24 - set(hline2,'Color','b','LineWidth',3);
25 - ylabel('IM-1 Optik Güc(mW)'); ylabel(haxes(2), 'IM-2 Optik Güc(mW)'); title('GerilimOptik Güç Grafiği'); xlabel('Gerilim(V)');
26 - set(haxes, 'FontSize',15,'LineWidth',2);
27 - legend('IM-1 Girişim', 'IM-2 Girişim');
28 - grid;
29

```

Şekil 4.3 Girişim profili analizi için yazılan Matlab kodu

Her iki aygıt için elde edilen veriler üst üste çizdirilmiştir. Girişim eğrisi şekil 4.4’te gösterilmektedir.



Şekil 4.4 Girişim eğrisi

Şekil 4.4’de gösterilen girişim eğrisi, uygulanan gerilime karşılık ölçülen optik güç grafiğini tanımlamaktadır. IM-1 ve IM-2; karakterize edilen aygıtları temsil etmektedir. Şekil 4.4, girişen dalga grafiğini tanımlamaktadır. Kipleyiciye uygulanan gerilim sıfır olduğu durumda IM-1 ve IM-2 için dedektöre düşen gücün maksimum olduğu görülmektedir. Dedektöre düşen güç maksimum olduğunda yapıcı girişim olmaktadır. Diğer bir ifadeyle, şiddet kipleyicisinin her iki kolundan ilerleyen ışık dalgaları eş fazda olurlar. Zamanla gerilim arttığında ise dedektöre düşen ışık gücü azalmaktadır. Bu azalma, kipleyicinin her iki kolundan ilerleyen ışık dalgalarının bir miktar faz farkı ile girişiminden kaynaklanmaktadır. Belli bir noktada dedektöre düşen güç en düşük seviyede olmaktadır. Dedektöre düşen gücün en düşük olduğu yerde π kadar faz farkı ile yıkıcı girişim olmaktadır. Gücün en düşük olduğu yerdeki π kadarlık faz farkını oluşturan gerilim V_{π} gerilimidir. V_{π} gerilimi; kipleyicinin çalışma geriliminin belirlemesi açısından önem taşımaktadır. Uygulanan gerilim artmaya devam ettiğinde detektöre düşen güç zamanla artmaktadır ve 2π ’lik bir faz farkında detektöre düşen güç yine maksimum seviyesine ulaşmaktadır. Faz farkının 2π olduğu yerde uygulanan gerilim ise $V_{2\pi}$ gerilimidir. $0, 2\pi, 4\pi$ gibi çift katlarda yapıcı girişim; $\pi, 3\pi$ gibi π ’nin tek katlarında ise yıkıcı girişim meydana gelmektedir. Örneğin; 2π ’lik faz farkında, kipleyicinin iki kolunda ilerleyen dalgalar $\pm\pi$ olmak üzere eş fazda ilerler, bu sebeple yapıcı girişim meydana gelir. Ancak 3π ’lik faz farkında her iki kolda ilerleyen dalga eş

fazlı olmaz, bu sebeple yıkıcı girişim meydana gelmektedir. Uygulanan gerilimin sıfır ve $V_{2\pi}$ olduğu yerlerde tepe noktalarında en yüksek güç elde edildiği görülmektedir. Bu sonuç; girişen dalgalar arasında 2π kadar faz farkı olduğunda yapıcı girişim olduğunu göstermektedir.

4.3.2 AC seviyede elektriksel karakterizasyonların frekans bağımlılığı analizi

Optik aygıtların DC seviyede elektriksel karakterizasyonları ile girişim eğrisi çizdirilip V_{π} gerilimi saptandıktan sonra AC seviyede ölçümler gerçekleştirilmiştir. AC seviyede ölçümler frekansa bağımlı olarak yapılmıştır. 1 GHz'e kadar olan frekansa bağlı gerilim ölçümleri yapılmıştır. Deneyde kullanılan kablolar ve sinyal üreticinin impedansı 50Ω olduğu için, uyumluluk olması açısından şiddet kipleycisine 50Ω 'luk bir direnç takılmıştır. Bu şekilde ölçümde kararlılık sağlanmıştır. Sinyal üreticinden her 50 MHz aralıklarla 50 MHz'den başlayarak 1000 MHz'e kadar frekans değiştirilerek şiddet kipleycisinin çıkışından elde edilen sinyal osiloskopta izlenmiştir. Frekansa karşılık gelen gerilim değerleri kaydedilmiştir. Frekansa karşılık gelen gerilim değerleri çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.9 Frekans-Gerilim çizelgesi

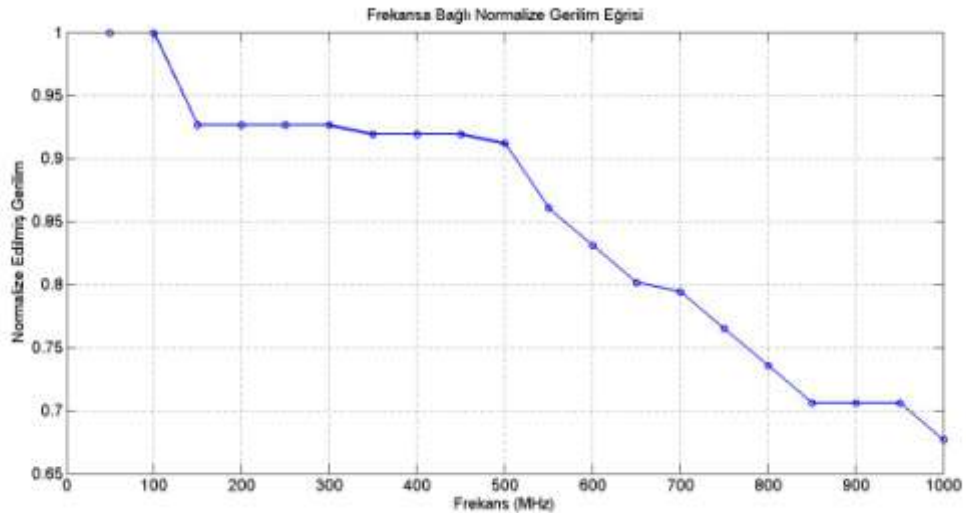
f (MHz)	V (V)	f (MHz)	V (V)
50	1.36	550	1.17
100	1.36	600	1.13
150	1.26	650	1.09
200	1.26	700	1.08
250	1.26	750	1.04
300	1.26	800	1.00
350	1.25	850	0.96
400	1.25	900	0.96
450	1.25	950	0.96
500	1.24	1000	0.92
		1050	0.83

Frekansın gerilime bağılı grafiğini çizdirebilmek için Matlab programında kod yazılmıştır. Yazılan Matlab kodu şekil 4.5'te gösterilmektedir.

```
1 - clear;
2 - load RF_AC.txt;
3 - a = RF_AC;
4
5 - f = a(:,1);
6 - V = a(:,2);
7
8 - V = V/V(1);
9
10 - plot(f,V,'o-','LineWidth', 2);
11
12 - set(gca,'FontSize', 14);
13 - xlabel('Frekans (MHz)');
14 - ylabel('Normalize Edilmiş Gerilim');
15 - title('Frekansa Bağlı Normalize Gerilim Grafiği');
16 - grid;
17
18
```

Şekil 4.5 Frekansa bağılı gerilim grafiği analizi için yazılan Matlab kodu

Matlab kodu kullanılarak çizdirilen frekansa bağılı gerilim eğrisi şekil 4.6'da gösterilmektedir.

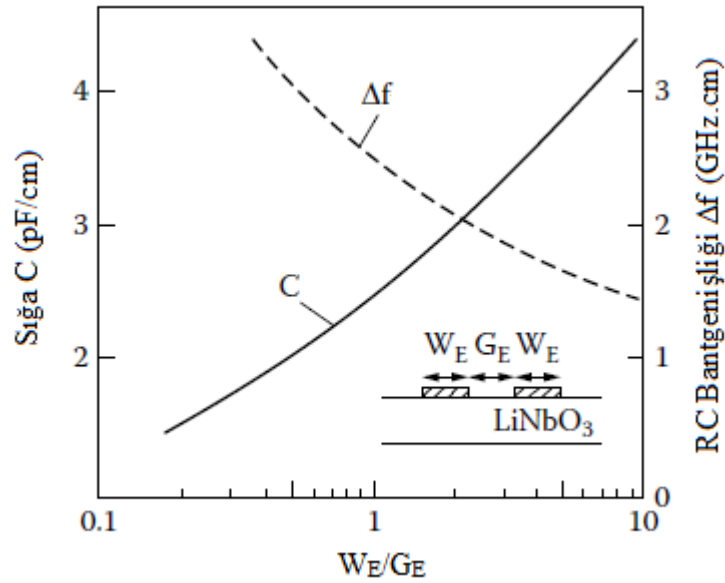


Şekil 4.6 Frekansa bağılı gerilim eğrisi

Şekil 4.6 incelendiğinde, frekans arttıkça gerilim değerlerinin azaldığı saptanmıştır. Üretilen şiddet kipleycisi elektrot yapısında toplu sığa devresi kullanılmıştır. Toplu sığa devresinde elektrotlar sığa gibi davranır. R yükleme direnci; C ise sığa olarak gösterildiğinde aygıtın bantgenişliği R ile C'nin çarpımı ile limitlendirilmiştir. Bu, aynı zamanda ışığın aygıt içindeki geçiş zamanını da göstermektedir. Toplu sığa devresi için bantgenişliği denklem (4.4) ile hesaplanmaktadır (Dagli 2007).

$$\Delta f(\text{Hz}) = \frac{1}{\pi \cdot R \cdot C} \quad (4.4)$$

Yükleme direnci standart olarak 50 Ω kabul edilmektedir. C ise, elektrot genişliği W_E 'nin elektrotlar arasındaki mesafe olan G_E 'ye oranı ile tespit edilmektedir. Şekil 4.7'de toplu sığa devresi için; W_E/G_E oranına bağlı olarak birim uzunluktaki sığa ve RC bantgenişliği grafiği verilmektedir (Dagli 2007).



Şekil 4.7 Toplu sığa devresi için sığa-bantgenişliği grafiği (Dagli 2007'den değiştirilerek alınmıştır)

Statik elektrik direncinin aygıtın bantgenişliğini belirlemede kritik faktör olmaması için elektrot genişliğinin yeterince geniş olması önemli bir faktördür. En uygun G_E değeri ise sürücü gerilimine göre belirlenmektedir. Elektrotlar arasındaki mesafe azaldığında bantgenişliği ve sürücü gerilimi azalmakta, sığa ise artmaktadır. Mesafe arttığında ise

sürücü gerilimi artma eğiliminde olur. Sığa ise bu durumda azalmaktadır. Ancak elektrotlar arasındaki mesafe belirli bir değerden az olduğunda optik dalga metalik bağlantılar ile etkileşime girebilir böylece kayıplar meydana gelmektedir (Dagli 2007). Bunu önlemek için $G_E=20 \mu\text{m}$ ve $W_E=50 \mu\text{m}$ olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu durumda $W_E/G_E=50/20=2.5$ elde edilmiştir. Şekil 4.7'deki grafik incelendiğinde, alt eksen 2.5 olarak belirlendiğinde sığa yaklaşık olarak 3.1 pF/cm olarak hesaplamalarda kullanılmıştır. Şiddet kipleycisinde ışık iki kola ayrıldığı için ve paralel bağlı iki sığanın eş değer sığa hesabı dikkate alındığında, sığa değeri iki ile çarpılmıştır. $R=50 \Omega$ olarak kabul edildiğinde denklem (4.4) kullanılarak $\Delta f.L \approx 1.04 \text{ GHz.cm}$ olarak tespit edilmiştir. $\Delta f.L$ 'deki L ifadesi elektrot uzunluğudur. Yürütülen tez çalışmasında üretilen kipleycinin elektrot uzunluğu 14 mm 'dir. Böylece; $\Delta f \approx 1.04 \text{ GHz.cm}/14 \times 10^{-1} \text{ cm} \approx 0.74 \times 10^9 \text{ Hz} \approx 0.74 \text{ GHz}$ olarak elde edilmiştir. Yapılan hesap bir yaklaşım olarak değerlendirildiğinde, deneysel olarak da 0.74 GHz 'de aygıtın çalışabildiği gözlemlenmiştir.

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında öncelikle, bir elektro-optik kipleyci olan şiddet kipleycisinin Mach-Zehnder geometrisine dayanan tasarımı yapılmıştır. Dalgakılavuzu genişliği 7 μm olacak şekilde tasarlanmıştır. Şiddet kipleycisi fotolitografi tekniği kullanılarak üretilmiştir. Alttaş olarak LiNbO_3 yonga kullanılmıştır. Üretimin ilk aşamasında; LiNbO_3 yonga elektron demeti buharlaştırma cihazında Ti kaplanmıştır. Kaplama işleminden sonra LiNbO_3 yongaya aseton ve alkol banyosu yaptırılmıştır. LiNbO_3 yonga fotorezist olarak adlandırılan bir malzeme ile kaplanmıştır. Rezist kaplanan yonganın uç kenar kısımları aseton ile temizlenerek rezist kaldırılması işlemi gerçekleştirilmiştir. LiNbO_3 yonga maske hizalama cihazına yerleştirilip şiddet kipleyci maskesi ile yonga arasında kaba hizalama yapılmıştır. Sonrasında ise UV ışık kullanılarak maske yapısı LiNbO_3 yonga üzerine kopyalanmıştır. Maske kopyalama sırasında UV ışığa maruz kalıp bozulan rezist yapıları çözündürme işlemi ile ortadan kaldırılmıştır. Çözündürme aşaması sonrasında yapı üzerindeki kalıntı fotorezist tabakası gidermek için yonga ısıtılmıştır. Fotorezist ile korunamayan Ti kaplı bölgeler ıslak aşındırma ile giderilmiştir. Dalgakılavuzlarının bulunduğu yerdeki Ti üstündeki rezist tabakası ise aseton ile çözdürülmüştür. Maske yapısı ile oluşturulan dalgakılavuzu genişliği mikroskop altında ölçülmüştür. LiNbO_3 yonga yüzeyindeki belirli alanlar taranarak Ti kaplama kalınlığı ölçülmüştür. Ölçülen değer ile maskede tasarlanan dalgakılavuzu genişliği arasında fark olduğu tespit edilmiştir. Bu farkın deneysel hatalardan meydana geldiği sonucuna varılmıştır. Sonrasında Ti metali difüzyonu gerçekleştirilmiş böylece optik dalgakılavuzları oluşturulmuştur. Yonga üzerinde elektrot oluşturmak amacıyla elektrot litografisi yapılmıştır ve Au kaplanmıştır. Au kaplamasından sonra yonga yüzeyi tekrar rezist ile kaplanmış ve ısıtıcıda 1 dk. süre boyunca ısıtılmıştır. Yonga kenarlarındaki rezist tabakası aseton ile kaldırılmıştır. Maske hizalama cihazında, maske ile LiNbO_3 yonganın hizalama işaretleri ile ikinci kez birbirine göre hizalaması gerçekleştirilmiştir. Dalgakılavuzu yapısı kopyalanırken kaba hizalama yapılmıştır. Diğer bir ifadeyle, yonga ile maskenin geometrik olarak kenar kısımlarından kaba hizalaması yapılmıştır. Elektrot litografisi aşamasındaki hizalamada ise maskenin üzerinde bulunan hizalama işaretleri ile hizalama gerçekleştirmiştir. İkinci hizalama, ilk duruma göre daha hassas bir şekilde yapılmıştır. Ardından maske yapısı

yonganın üzerine kopyalanmıştır. Bozulan rezist yapıları çözüldürülmüştür. Au aşındırması ile rezist tarafından korunamayan Au kaplı bölgeler giderilmiştir. Bütün halindeki yonga kesim cihazında üç parçaya ayrılmıştır. Kesilen parçaların kenar kısımlarına kapak yapıştırıldıktan sonra, yüzey düzgünlüğünün sağlanabilmesi ve ışık geçirgenliğini artırabilmek amacıyla tıraşlama ve parlatma yapılmıştır. Optik karakterizasyon ve bütünlemenin yapılabilmesi için kesilen üç ayrı parçanın her biri yedi ayrı parçaya kesilmiştir. Üretimin aşamasının son basamağı olarak prizma eşleme ölçümleri yapılmıştır. Ti metali yapı içerisine doğru difüz ettikçe LiNbO_3 malzemesinin kırılma indisinin değiştiği gözlenmiştir.

Şiddet kipleycisinin karakterizasyon aşamasında, ilk olarak üretilen aygıtların optik karakterizasyonu yapılmıştır. Optomekanik konumlandırma mekanizması üzerine bir adet fiber kuyruğu yerleştirilmiştir. Bilgisayar aracılığı ile kontrol edilen optomekanik konumlandırma mekanizması belirli eksenlerde hareket ettirilerek, optik aygıt ile fiber kuyruğu detektörden en yüksek güç elde edilinceye kadar birbirine göre uygun şekilde hizalanmıştır. Yüksek güçteki uygun optik aygıtlar tespit edilip PCB üzerine yapıştırılmıştır ve Au ile elektriksel bağlantı yapılmıştır. Sonraki aşamada aygıtın fiber ile bütünlemesi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak bir fiber kuyruğu ile aygıtın 1.kol bütünlemesi kapsamında, aygıtın 1.kolu ile optomekanik konumlandırma mekanizması üzerindeki fiber kuyruğu arasında hizalama yapılmıştır. Fiber kuyruğu ile optik aygıt arasına UV ışık ile sertleşen bir yapıştırıcı uygulanmıştır ve yapıştırıcı sertleştirilmiştir. Sonrasında optik aygıtın 2.kolu ile başka bir fiber kuyruğu arasında optik hizalama yapılmıştır. 1.kol bütünlemesinde olduğu gibi, fiber ile 2.kol arasına UV ışık ile sertleşen bir yapıştırıcı uygulanmıştır ve fiber çiftlenimli bir aygıt elde edilmiştir. Fiber çiftlenimli bu aygıtı şiddet kipleycisi denir. 1.kol ve 2.kol bütünlemesi sonrasında geçirgenlik değerleri arasında yüzdesel kayıp olduğu saptanmıştır. Bu kaybın; aygıt ile fiber arasındaki hizalama, aygıtın ön kesit alanının düzgünlüğü gibi sebeplerden kaynaklandığı saptanmıştır. Ancak genel olarak çalışma performansını olumsuz ölçüde etkilemediği gözlenmiştir. Fiber ile bütünleme sonrasında ise şiddet kipleycisi kutu içerisine konulup kablo bağlantısı yapılmıştır.

Elektriksel karakterizasyonlar kapsamında şiddet kipleycisi DC seviyede karakterize edilmiştir. 0.25 V aralıklarla gerilim artırılarak karşılık gelen güç değerleri kaydedilmiştir ve girişim eğrisi karakterize edilmiştir. Girişim eğrisinden yararlanılarak V_{π} ve $V_{2\pi}$ gerilimleri tespit edilmiştir. Böylece çalışma gerilimi olan $V_{\pi}/2$ saptanmıştır. IM-1 aygıtı için girişim eğrisi incelendiğinde, ilk anda gerilim uygulanmazken ($V=0$) ışık gücünün en yüksek seviyede olması gerekirken; aslında $V=0$ ile V_{π} değerleri arasında en yüksek seviyede olduğu gözlenmiştir. Bu farklılık; şiddet kipleycisinin iki kolunun tam olarak eşit bir şekilde ayırmadığından kaynaklanmaktadır. Her ne kadar tasarımda iki kolun ışığı eşit olarak ayırdığı varsayılsa bile, deneysel olarak fark olduğu saptanmıştır. Son aşamada ise AC seviyede frekansa bağlı ölçümler yapılmıştır. Sinyal üreticiden 50 MHz - 1000 MHz aralığında 50 MHz aralıklarla frekans değiştirilerek bu değerlere karşılık gelen şiddet kipleycisi çıkış sinyali osiloskoptan izlenmiştir. AC seviyede radyo frekanslarına karşılık gelen gerilim değerleri kaydedilmiştir ve normalize edilmiş gerilimin frekansa bağlı grafiği analiz edilmiştir.

Yürütülen tez çalışması kapsamında genel bir değerlendirme yapılırsa eğer; şiddet kipleycisinin tasarımı ile elektrot ve dalgakılavuzu yapıları oluşturulmuştur. Üretim aşamasında Ti difüzyonu yöntemi ile dalgakılavuzları üretilmiş ve optik karakterizasyon ile geçirgenlik değerleri saptanmıştır. Geçirgenlik ölçümü aygıtın optik performansını analiz etmek için yapılmıştır. Geçirgenliği %30'un üzerinde olan aygıtlar tespit edilip fiber ile bütünlemesi yapılmıştır. Böylece fiber çiftlenimli bir aygıt elde edilmiştir. Sonrasında DC ve AC seviyede ölçümler gerçekleştirilmiştir. DC seviyede yapılan ölçümlerde amaç; V_{π} ve $V_{2\pi}$ gerilimlerini saptamak ve iki kol arasındaki faz farkına bağlı olarak girişim eğrisini grafiksel olarak elde etmektir. AC seviyede frekans değiştirilerek yapılan ölçümlerde ise amaç; kipleycinin çıkışından elde edilen gerilimin frekansa göre nasıl değiştiğini saptamaktır. Frekans-gerilim grafiği incelendiğinde 1 GHz'e doğru yaklaştıkça gerilim değerlerinde azalma olduğu saptanmıştır. Ölçümlerin daha kararlı hale getirilmesinde; yüksek performansta çalışan ekipmanların kullanılması önem taşımaktadır. Aygıt 1 GHz civarında çalıştığı için toplu sığa elektrot yapısı esas alınmıştır. Bu yapıda elektrotlar arasındaki mesafe ve elektrot genişliği önem kazanmaktadır. Bant genişliğini artırmak; elektrotlar arasındaki mesafeyi artırmak,

elektrot genişliğini ise azaltmakla mümkün olmaktadır. Bu durumda yüksek hızla çalışan kipleyciler elde edilebilmektedir.

KAYNAKLAR

- Anonim. 2012b. Web Sitesi: <http://www.bnmfabrika.com/maskaligner1-fotolitografi-nedir.html>, Erişim Tarihi: 24.01.2013.
- Anonim. 2012d. 9. Bölüm:Elektro-Optik, Ankara Üniversitesi. Erişim Tarihi: 08.10.2013.
- Anonymous 1998. Web Sitesi. <http://computer.howstuffworks.com/fiber-optic.htm>, Erişim Tarihi: 23.08.2013.
- Anonymous. 2010. EEE549 Nanoscale Fabrication Techniques for Semiconductors. Bilkent University, 44, Ankara.
- Anonymous. 2012a. Web Sitesi: http://en.wikipedia.org/wiki/Bias_tee, Erişim Tarihi: 23.10.2013.
- Anonymous. 2012c. Web Sitesi: <http://en.wikipedia.org/wiki/Photoresist>, Erişim Tarihi:15.08.2013.
- Anonymous. 2013a. Web Sitesi: <https://cpeahnool.iengatech.edu> Dektak 150 Profilometer Instructions.
- Anonymous. 2013b. Lapping and Polishing Basics Applications Laboratory Report 54. South Bay Technology Inc., 7, USA.
- Anonymous. 2013c. Web Sitesi: http://en.wikipedia.org/wiki/Characteristic_impedance, Erişim Tarihi: 15.12.2013.
- Anonymous. 2013d. Web Sitesi: http://en.wikipedia.org/wiki/Dry_etching, Erişim Tarihi: 13.02.2014.
- Anonymous. 2013e. Web Sitesi: <http://www.memsnet.org>, Erişim Tarihi: 07.12.2013.
- Anonymous. 2013f. Web Sitesi: physics.comu.edu.tr, Erişim Tarihi: 13.02.2014.
- Armenise, M.N. 1988. Fabrication techniques of Lithium Niobate waveguides. IEE PROCEEDINGS, 135(2), 85-91.
- Bass, M., Van Stryland, E.W., Williams, D.R. and Wolfe, W.L. 1995a. Handbook of Optics:Device, Measurements and Properties. McGraw-Hill Inc., 1525, USA.
- Bass, M., Enoch, J.M., Van. Stryland, E.W. and Wolfe, W.L. 2001b. Handbooks of Optics: Fiber Optics & Nonlinear Optics. McGraw-Hill Inc., 943, USA.
- Burns, W.K. and VA, A. 2001. US 6,304,685 B1.

- Chang, W.S. 2002. RF Photonic Technology in Optical Fiber Links. Cambridge University Press, 133-134, United Kingdom.
- Cummings, U. 2005. Linearized and high frequency electrooptic modulators. Doctoral thesis, California Institute of Technology, 175, California.
- Dagli, N. 2007. High-Speed Photonic Devices. Taylor & Francis Group., 252, USA.
- Focus, N. 2001. Application Note 2: Practical Uses and Applications of Electro-Optic Modulators. New Focus Inc., 12, USA.
- Gan, F.Y. 1996. Traveling wave electrode design for high speed LiNbO₃ intensity modulators. Master thesis, McGill University, Department of Electrical Engineering, 143, Montreal.
- Gopalakrishnan, G.K., Burns, W.K., McElhanon, R.W., Bulmer, C.H. and Greenblatt, A.S. 1994. Performance and modeling of broadband LiNbO₃ traveling wave optical intensity modulators. Journal of Lightwave Technology, 12(10), 1807-1819.
- Mohamedelhassan, A. 2012. Fabrication of ridge waveguides in Lithium Niobate. Master of Science Thesis, AlbaNova University Center, Royal Institute of Technology KTH, Applied Physics Department, Laser Physics, 67, Stockholm.
- Nguyen, T.G. 2006. Efficient resonantly enhanced Mach-Zehnder optical modulators on Lithium Niobate. Doctor of Philosophy, RMIT University, School of Electrical and Computer Engineering, 185, Australia.
- Nishihara, H., Haruna, M. and Suhara, T. 1989. Optical Integrated Circuits. R.R Donelley & Sons Company, 26.1, USA.
- Özdemir, M. 2012. Design and analysis of an open loop fiber-optic gyroscope. Master of Science Thesis, Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Physics, 90, Ankara.
- Yao, X.S. and Maleki, L. 1996. Optoelectronic microwave oscillator. Optical Society of America, 13(8), 1725-1735.
- Wooten, Ed L., Kissa, K. M., Yi-Yan, A., Murphy, E.J., Lafaw, D.A., Hallemeier, P. F., Maack, D., Attanasio, D.V., Fritz, D.J., McBrien, G.J. and Bossi, D.E. 2000. A review of Lithium Niobate modulators for fiber-optic communication systems. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 6(1), 69-82.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Seval DÖNERTAŞ

Doğum Yeri : Üsküdar / İSTANBUL

Doğum Tarihi : 03.08.1987

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce, Almanca

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Halit Armay Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi, İstanbul (2005)

Lisans : Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü (2009)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı (Eylül 2012- Haziran 2014)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (NANOTAM) : Proje Mühendisi (Temmuz 2010- Devam ediyor)