



LiNbO₃ TABANLI MODÜLATÖR ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Buse BACINOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NİSAN 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Buse BACINOĞLU

18/04/2024

LiNbO₃ TABANLI MODÜLATÖR ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU
(Yüksek Lisans Tezi)

Buse BACINOĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2024

ÖZET

Bu çalışmada, alttaş malzemesi olarak LiNbO₃ (Lityum Niyobat) kullanılan bir modülatörün tasarımı, fabrikasyonu ve karakterizasyonu tamamlanmıştır. Çalışmaya tasarım adımıyla başlanıp maskeler yapılmıştır. Dalga kılavuzu ve sonrasında kopyalanan elektrot maskesi tasarımı tamamlanıp üretilmiştir. Alttaş üzerine modülatör üretimine geçilip Titanyum kaplaması tamamlanmıştır. Daha sonra fotorezist kaplamaları yapılmıştır. Fotorezist kaplama işlemi tasarımı tamamlanan maske alttaş malzemesine mor ışık (UV) ile geçirilip maskenin modeli alttaş malzemesine geçirilmiştir. Hazırlanan örneğe belirlenen sıcaklık ve zaman parametrelerinde Ti difüzyonu yapılmıştır. Bu işlemlerin devamında elektriksel adımlar için elektrot litografisi gerçekleştirilmiştir. Alttaş 3 ayrı gruba ayrılmıştır. Bu kesim işlemi elmas bıçak ve bilgisayar sistemli kontrolcü cihazı ile tamamlanmıştır. Kesimi tamamlanan parçalara yüzey düzgünlüğü için tıraşlanıp parlatma işlemi yapılmıştır. Ti difüzyon kalitesi için derinliğe bağlı kırılma indisi ölçümleri yapılmıştır. Kesilen örneklere optik karakterizasyon işlemleri için fiber birleştirme adımları gerçekleştirilmiştir. Giriş tek kol fiber ve çıkış için çift kol fibere bağlı cam malzemeler yüzeylerine UV ışık aracılığı ile yapıştırılmıştır. Üretimi devam eden örneklerin elektriksel ölçümleri için Au (Altın) bağlantısı yapılmıştır. Elektriksel ölçüm için DC (doğru akım) seviyede frekanstan bağımsız ölçümler alınmıştır. $V\pi$, $V2\pi$ gerilimleri saptanmıştır daha sonra AC (alternatif akım) durumunda frekansa bağlı olarak 1 GHz (Giga Hertz)'e kadar ölçümler tamamlanmıştır. Ardından sıcaklık testleri yapılmıştır. Çevresel koşullarda çalışma potansiyeli üzerine çalışmalar yapılmıştır. Epoksi malzemesi ile kaplaması yapılan aygıtların -40°C ve +80°C'de çalışabilirliği test edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda sıcaklık testlerinde 1°C /dk ve 2°C/dk hızlarında -40°C ve +80°C aralıklarında LiNbO₃ alttaşıyla fabrikasyonu tamamlanan örneğin en iyi performans grafiği çizdiği gözlenmiştir. Hem iklimatik kabin testlerinde hem de frekansa bağlı gerilim grafiği çizdirilerek aygıtın istenilen koşullarda çalıştığı görülmüştür.

Bilim Kodu : 91521
Anahtar Kelimeler : LiNbO₃ alt taş, çip, foto direnç, difüzyon, buharlaşma, fiber birleştirme, UV, entegrasyon, epoksi, sıcaklık doğrusu, elektriksel gerilimi, nanoteknoloji
Sayfa Adedi : 95
Danışman : Prof. Dr. Hakan ATEŞ

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF LiNbO₃ BASED INTENSITY
MODULATOR

(M. Sc. Thesis)

Buse BACINOĞLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2024

ABSTRACT

This study completed the design fabrication and characterization of a modulator using LiNbO₃ as substrate material. The work started with the design and masks were made. Subsequently replicated waveguide and electrode mask designs are completed and fabricated. Modulator production started on the substrate, and the Ti coating was completed. Then, photoresist coatings were made. The mask, whose photoresist coating process design was completed, was passed to the substrate material with Ultraviolet, and the model of the mask was passed to the substrate material. Ti diffusion was made at the temperature and time parameters were determined in the prepared sample. In the continuation of these processes, electrode lithography was performed for electrical steps. This substrate is divided into three groups. This cutting process was completed with a diamond knife and a computer system controller. The finished parts were shaved and polished for surface smoothness. For Ti diffusion quality, depth-dependent refractive index measurements were made. Fiber joining steps were performed for optical characterization processes to the cut samples. The entrance is attached to surfaces of the glass materials connected to the single arm and double arm fiber for the outlet, glued with UV light. Au connection was made for electrical measurements of the samples in progress. For electrical measurement, frequency-independent measurements were taken at the DC (direct current) level. Voltages of $V\pi$ and $V2\pi$ were determined, and then measurements were completed up to 1 GHz (Giga Hertz) depending on the frequency of AC (alternative current). Then, temperature tests were performed. Studies were carried out on the potential to work in environmental conditions. The operability of the samples coated with epoxy material was tested at -40°C and +80°C. As a result of the sticking studies, it was observed that the devices whose fabrication was completed with the LiNbO₃ substrate at the range of -40°C and +80°C at the rate of 1°C /dk and 2°C /dk in temperature tests drew the best performance graph. It was seen that the device worked under the desired conditions by drawing a frequency-dependent voltage graph in both the climatic cabinet tests.

Science Code : 91521

Key Words : LiNbO₃ wafer, chip, photorezist, diffusion, evaporation fiber pigtail, UV, integration, epoxy, temperature line, electrical characterization, nanotechnology

Page Number : 95

Supervisor : Prof. Dr. Hakan ATEŞ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla, bakış açısıyla, engin tecrübesi ve yorumlarıyla, gösterdiği büyük sabırla beni yönlendiren Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi, değerli danışman hocam Prof. Dr. Hakan ATEŞ'e saygılarımla sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Kıymetli tecrübelerinden faydalandığım, yardımını, desteğini ve emeğini hiçbir zaman esirgemeyen Bilkent Üniversitesi NANOTAM bölümünde hocam Dr. Mutlu GOKKAVAS ve ekip arkadaşlarıma saygılarımla teşekkürlerimi sunarım.

Bu mezuniyetimde desteklerini ve sevgisini en yakından hissettiğim Canım Babam Ömer BUDAK'a

Çalışmalarım boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen ve her durumda yanımda olan Eşim Cem BACINOĞLU'na, Kız Kardeşim Aydan BUDAK'a, Annem Semra BUDAK'a, Teyzem Aynur BEGDE'ye ve yakın arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
2.1. Entegre Optik Sistemlerin Gelişimi	5
2.2. Fiber Optik Jiroskopun Çalışma Prensibi	6
2.3. Sagnac Etkisi	6
2.4. Işık Kaynağı	10
2.5. Bağlaştırıcı, Kuplör (Coupler)	11
2.6. Optik Kutuplayıcı.....	13
2.7. Optik Faz Modülatörü	13
2.8. Fotodedektör	14
2.9. Polarizasyon	14
2.10. Fiber Sargı	16
2.11. Entegre Optik Aygıtlar.....	18
2.12. Pasif Aygıtlar	18
2.13. Aktif Aygıtlar.....	19
2.14. Entegre Optik Sistemlerin Avantajları.....	19
3. MALZEME VE METOT	21
3.1. Malzeme.....	21
3.2. Metot	29

	Sayfa
3.3. LiNbO ₃ Alttaşı İçin Maske Tasarımı	29
3.4. LiNbO ₃ Alttaşı Şiddet Kipleycisi Fotolitografi Tekniği ile Üretimi	32
3.5. LiNbO ₃ Alttaş Ti Kaplama İşlemi	33
3.6. Rezist Kaplama	36
3.7. Alttaş Üzerine Maske Tasarımının Geçirilmesi	37
3.8. Çözündürme İşlemi	40
3.9. Aşındırma İşlemi	41
3.10. Ti kaplamasının Dektak cihazında kalınlığı ölçümü	43
3.11. Tasarlanan Dalga Kılavuzu ve Ti Difüzyonu ile Dalga Kılavuzu Üretimi.....	44
3.12. Altın Kaplama.....	47
3.13. Elektrot Litografisi.....	47
3.14. Alttaş Kesme İşlemi.....	49
3.15. Tıraşlama ve Parlatma	50
3.16. Prizma Eşleme Cihazı ile Ölçüm	53
3.17. LiNbO ₃ Tabanlı Şiddet Kipleycisi Karakterizasyonu	54
3.18. LiNbO ₃ tabanlı şiddet kipleycisi sıcaklık testleri	57
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	59
4.1. Optik Güç Karakterizasyonu ve Birleştirme Sırasındaki Geçirgenlik Analizi ..	60
4.2. Modülatörün DC ve AC Seviyelerde Elektriksel Testleri.....	63
4.3. DC Seviyede Karakterizasyonun Girişim Eğrisi Üzerine Etkisi.....	64
4.4. Sıcaklığa Bağlı Klimatik Kabin Testlerinde Örneklerin Gösterdiği Davranışlar	66
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	83
KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ	95

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Güç değerleri	60
Çizelge 4.2. Optik güç ölçümü sonrasında geçirgenlik değerleri	60
Çizelge 4.3. İlk birleştirme sonrasında güç ölçüm değerleri.....	61
Çizelge 4.4. İlk birleştirme sonunda geçirgenlik ölçümleri.....	62
Çizelge 4.5. Çıkış birleştirme sonrası güç ölçümü	62
Çizelge 4.6. Çıkış entegrasyonu sonrası geçirgenlik	63
Çizelge 4.7. Giriş ve çıkış arasındaki birleştirme sonucunda oluşan farkı	63
Çizelge 4.8. Modülatörün V_{π} ve $V_{2\pi}$ ölçümleri.....	64

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1 FOD'un yapısı	6
Şekil 2.3 Dönü hareketinde giriş ve çıkış noktaları	8
Şekil 2.4. Dalga boylarına karşılık ışık spektrumu	10
Şekil 2.5. FOD bileşen dizilimi.....	12
Şekil 2.6. Y yapısındaki kuplör.....	13
Şekil 2.7. FOD'da polarizör ve depolarizör konumu.....	15
Şekil 2.8. Fiber sarımında FOD	15
Şekil 2.9. FOD entegrasyonu	15
Şekil 2.10. Fiber bileşenleri	16
Şekil 2.11. Kabul konisi.....	17
Şekil 2.12. Fiber mod görüntüsü.....	18
Şekil 2.13. Yönlü çiftleyici dalga kılavuzu yapısı	19
Şekil 3.1. LiNbO ₃ faz diyagramı	22
Şekil 3.2. Lityum Niyobat kristal yapısı	24
Şekil 3.3. Lityum Niyobat kristal eksenleri ve atomları yerleşimleri	25
Şekil 3.4. LiNbO ₃ kristalinin geçirgenlik grafiği.....	26
Şekil 3.5. LiNbO ₃ modellemesi için maske yapısı.....	30
Şekil 3.6. Maske detay yapısı	30
Şekil 3.7. Dalga kılavuzu yapısı maske görüntüsü	31
Şekil 3.8. Elektrotların maske üzerindeki görünüm.....	31
Şekil 3.9. Fotolitografinin aşamaları.....	33
Şekil 3.10. LiNbO ₃ alttaş	33
Şekil 3.11. LiNbO ₃ yonga birincil ve ikincil eksen gösterimi	34
Şekil 3.12. Kaplama cihazı içi gösterimi	34

Şekil	Sayfa
Şekil 3.13. Kaplama cihazı dış görüntüsü.....	35
Şekil 3.14. Titanyum kaplaması yapılmış LiNbO_3 yonga	36
Şekil 3.15. Temizleme işlemi.....	36
Şekil 3.16 Kopyalamada kullanılan modeller	38
Şekil 3.17. Hizalama işlemi için modellerin yerleştirilmesi	39
Şekil 3.18. Maske ve alttaş kopyalama cihazı	39
Şekil 3.19. a) Aşındırma öncesi b) Aşındırma sonrası.....	42
Şekil 3.20. Dalga kılavuzu genişliği	42
Şekil 3.21. Dektak Ti kalınlığı ölçüm cihazı	43
Şekil 3.22. Örnek ve iğne ucu.....	44
Şekil 3.23. Düzlem üzerinde tasarlanan optik dalga kılavuzu yapısı	44
Şekil 3.24. Difüzyon cihazı.....	45
Şekil 3.25. Ti difüzyonlu dalga kılavuzu yapısı	46
Şekil 3.26. Altın kaplaması yapılan LiNbO_3 yonga.....	47
Şekil 3.27. Elektrot litografisi işlemi	48
Şekil 3.28. Altın metalı aşındırma	49
Şekil 3.29. Kesim cihazı	49
Şekil 3.30. LiNbO_3 alttaşının x kesimli ön kesit görüntüsü.....	50
Şekil 3.31. 6 parçaya kesilmiş LiNbO_3 yonga	50
Şekil 3.32. Tıraşlama ve parlatma cihazı	51
Şekil 3.33. Örnek tutucusu.....	51
Şekil 3.34. Kesim işlemi sonunda 7 örnek.....	52
Şekil 3.35. Elektrot yapısı.....	52
Şekil 3.36. Elektrot ve dalga kılavuzu yapısının ön kesit görüntüsü	53
Şekil 3.37. Optik aygıtın prizma eşlemesi	54
Şekil 3.38 Prizma eşleme cihazı görüntüsü	54

Şekil	Sayfa
Şekil 3.39. Optik fiber yapısı	55
Şekil 3.40 Tam iç yansıma.....	55
Şekil 3.41. Fiber görüntüsü.....	56
Şekil 3.42. Karakterizasyonda kullanılan ışık gücü.....	56
Şekil 3.43 Fiber birleştirme makinesi	57
Şekil 3.44 Klimatik kabin	58
Şekil 4.1. Hazırlanan Matlab kodu	65
Şekil 4.2. Girişim grafiği	65
Şekil 4.3. Klimatik kabine yerleştirilen örnekler	67
Şekil 4.4. Epoksi işlemi uygulanmış aygıt.....	68
Şekil 4.5. Epoksi uygulaması yapılmış örneğin toplam geçirgenlik grafiği	69
Şekil 4.6. Epoksi uygulaması yapılmış örneğin ayırma oranı grafiği.....	69
Şekil 4.7. Epoksi uygulanan örneğin grafiği.....	70
Şekil 4.8. Epoksi uygulaması yapılmayan örneğin toplam geçirgenlik grafiği	71
Şekil 4.9. Epoksi uygulaması yapılmayan örneğin ayırma oranı grafiği.....	71
Şekil 4.10. Epoksi uygulaması yapılmayan örneğin 2c/dk lık toplam geçirgenlik grafiği.....	72
Şekil 4.11. Epoksi uygulaması yapılmış örneğin toplam geçirgenlik grafiği	73
Şekil 4.12 Epoksi uygulaması yapılan aygıtın toplam geçirgenlik grafiği	74
Şekil 4.13. Epoksi uygulaması yapılan örneğin ayırma oranı grafiği.....	74
Şekil 4.14. Fabrikasyon işlemleri öncesinde LiNbO ₃ yapısı atomik kuvvet mikroskobu görüntüsü	75
Şekil 4.15. 70 nm Ti kaplı aygıtın 1010°C'de 8 saat difüzyon olmuş AKM ölçümü	76
Şekil 4.16. 85 nm Ti kaplı aygıtın 1010°C'de 8 saat difüzyon olmuş AKM ölçümü	77
Şekil 4.17. 110 nm Ti kaplı aygıtın 1010°C'de 8 saat difüzyon olmuş AKM ölçümü ..	77
Şekil 4.18 70 nm Ti kaplı 1010°C'de 12 saat difüzyon yapılmış örneğin AKM ölçümü.....	78

Şekil	Sayfa
Şekil 4.19. 110 nm Ti kaplı 1010°C'de 12 saat difüzyon yapılmış örneğin AKM ölçümü.....	78
Şekil 4.20. 1010°C'de 12 saat difüzyon yapılan 4 farklı Ti kalınlığı için kırılma indisi grafiği.....	80
Şekil 4.21. 1010°C'de 8 saat difüzyon yapılan 4 farklı Ti kalınlığı için kırılma indisi grafiği.....	81



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
Al	Alimünyum
Au	Altın
b	Elektrot arası fark
c	Optiğin vakum hızı
C	Sığa Değeri
cm²	Santimetkare
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
f	Frekans
Fe	Demir
GaAs	Galyum Arsenik
GHz	Gigahertz
HCl	Hidrojen Klorür
HF	Hidrojen Florür
HNO₃	Nitrik Asit
H₂O₂	Hidrojen Peroksit
k	Dalga Vektörü
L	Kristal Uzunluğu
L	İndüktans
Li	Lityum
LiNbO₃	Lityum Niyobat

Simgeler	Açıklamalar
Li_2O	Lityum Oksit
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_o	Mikrodalga Kırılma İndisi
n_o	Optik Dalga Kırılma İndisi
n_s	Alttaş Kırılma İndisi
$n_{x'}$	x' Yönündeki Kırılma İndisi
Nb	Niyobyum
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
SnO	Antimon Oksit
Si_3N_4	Silisyum Nitrür
t	Süre
Ti	Titanyum
V	Işığın Madde Ortamındaki Hızı

Simgeler**Açıklamalar**

v_m	İletim Hattı Boyuncaki Faz Hızı
V_π	π Faz Farkı Oluşturan Gerilim
$V_{2\pi}$	2π Faz Farkı Oluşturan Gerilim
WE	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
$\text{\AA}$	Angstrom
$^{\circ}C$	Santigrat
Δ	Delta
Δn	Kırılma İndisi Farkı
$\Delta\Phi$	Faz farkı
μ_0	Aygıt içinden Geçirilen Işığın Kesri
μ	Mikrometre
Ω	Ohm
λ	Dalgaboyu
Φ	Faz

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AC	Alternatif Akım
APE	Tavlanmış Proton Değiş Tokuşu
CCW	Saat Yönü Ters
CPW	Eş Düzlemli Dalga Kılavuzu
CW	Saat Yönü
DC	Doğru Akım
FOD	Fiber Optik Dönü Ölçer
IOC	Entegre Optik Devre

Kısaltmalar**Açıklamalar****KDP**

Potasyum Dihidrojen Fosfat

MIOC

Çok Fonksiyonlu Optik Çip

PCB

Baskı Devre Kartı

PER

İnç Kare Başına Düşen Ölçüm

RF

Radyo Frekans

SNR

Sinyal Gürültü Oranı

UV

Ultra Viyole



1. GİRİŞ

Yapılan optik çalışmaların başında gelen fiber altyapılı çalışmalardır. Geçmişten bugüne kadar insanlık için gelen en önemli ve büyük ihtiyaçlardan birisi de yön bilgisi olmuştur. İnsanlar yön bulmak için bazı gelişmeler öncesinde birçok yöntem geliştirmiştir. Navigasyon aletlerinin keşfiyle ilerlemeler başlamıştır ve bununla beraber optik ile fiber bağlantıların ilerlemesiyle telekomünikasyon ve elektronik uygulamalarda kullanılmıştır. Gelişen teknolojiyle beraber daha küçük boyutlarda daha az maliyetlerde, termal dayanıklılık, ürünün hassasiyetini arttırmak gibi isterler göz önünde bulundurarak otomotiv ve robotik sektörlerinde de kullanılmaktadır.

Fiber optik sistemlerin ortaya çıkması ile beraber farklı teknolojiler üzerinde çalışılmıştır. Eş fazlı ışığın işlenip taşınması gibi uygulamalar ile birçok alanda farklı avantajlar sağlamıştır. Faz kaymasını lazer girişim aracı ile kapalı bir hat üzerinde ölçmek lazer icadının çok eski zamanlarına dayanmaktadır. Bu durum yön tayininde sapmaları en aza indirmek ve doğru sonuçlar elde etmek için ataletsel navigasyon sistemlerinde iyi bir yol olarak sunulmuştur. Girişim hesabı için 1961 başlarında 2 gaz olan He-Ne tüplerinin uygun olduğu kabul almıştır ve bundan tam 1 yıl sonra Sagnac etkisi ile dünya dönüşü ölçümünde tüpler üzerinde bulunan hesap 1 metrelik hataya neden olduğunu Macek and Davis tarafından öne sürülmüştür [1].

LiNbO_3 üzerinde önemli deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır. Ancak, bildiğimiz kadarıyla LiNbO_3 'ün elektronik, optik ve mekanik özelliklerin kapsamlı teorik çalışması literatürde hala eksiktir. Bu bileşiğin ilginç benzersiz fiziksel özellikleri nedeniyle, malzeme hakkında daha fazla ayrıntı bilmek önemlidir.

Bu çalışmada en önemli ana nokta LiNbO_3 malzemesi doğal olmadan üretimi yapılabilen sektörde daha az maliyete sahip bir alttaş malzemesidir. LiNbO_3 alttaşın özellikleri olarak piroelektrik, piezoelektrik ve nonlineer yapıdadır. Tez de kullanılmasının en büyük etkilerinden biri olan yüksek elektro-optik katsayıya sahip bir malzeme olmasıdır. Fotolitografide kullanılan ve fiber optik sistemlerde en çok kullanılan bir malzeme yapısındadır.

Tez çalışmalarının amacı, faz modülatörü ve entegre optik sistemlerin tanımlanması tarihsel gelişimi, literatür çalışmalarında yapılan işlemler ile kullanımının getireceği avantajlara değinmek, tezzin alttaş malzemesi olan LiNbO_3 kristalinin özelliklerinden bahsetmek ve bu alttaş yapısına dalga kılavuzu yapısını entegre ederek elektro optik kavramını açıklayıp kullanılan bu alttaş malzemesi ile entegre optik aygıtlara örnekler sunmaktır.

Bu aygıtlardan düz kanal yapılı dalga kılavuzu, y-kollu çiftleyici, kutuplayıcı ve faz modülatörünü titanyum difüzyonu yöntemi ve çeşitli fabrikasyon yöntemleri ile elde etmek, fabrikasyon sırasında nanometrik boyutlarda değiştirilen fabrikasyon parametrelerinin aygıtlar üzerindeki etkilerini incelemek, bu etkilerin testlerde gösterdiği davranışları incelemek diğer hedeflerden biri olmuştur.

Elektro-optik kipleyciler fiber optik eşleşme sisteminin temel sistemini oluşturur. Yapılan bu tez de açısal hızla beraber yönde oluşan farklılıkların hassas ölçümünde kullanılmak amaçlı elektro-optik kipleyci üretimi yapılmıştır. Çalışma işlemlerine fiberoptik yapısını inceleyerek başlanmıştır. Hazırlanan bu yapı ilk olarak jireskopta açık döngüden meydana gelen değişimlere analiz ederek yapılır. Daha sonra ise kapalı döngüde oluşan jireskop modeliyle sonlandırılır. Tezin içeriğinde de yapılan çalışmalar ile jireskopların önemi ve kullanılan fabrikasyon modelleri ve sonrasında entergasyon adımlarında elektro optiğin kullanımında ortaya çıkan farklılıklar görülür.

Bahsedilen elektro-optik kipleyci; kırılma değişimi verilen gerilim altında kırılımın değişmesi sonucu oluşan etkiye göre çalışan kipleycilerdir. Bu kipleyciler elektro-optik modülatörlerdir. Bu yapılar geometri olarak bilinen Mach-Zehnder yapısındadırlar. Bu Mach-Zehnder yapısı optik olarak dalga kılavuzu üretilir ve bu sistemde ışık başlangıçtaki bir koldan girer ve belirtilen doğrultudan ilerledikten sonra 2 ayrı kola ayrılır çıkışa geldiğinde ise tekrardan bir kolda birleşerek geometriyi tamamlar. Ataletsel sistemler askeri ve sivil alanda kullanılacak şekilde seri üretime başlanmıştır [3].

Yapılan bir çalışma olan Vali and Shorthill üretilen modülatörlerde yayılma ortamında fiberlerin kullanılması için bir avantaj sağlamıştır [2,3]. Araştırmada daha çok hassas bir ölçüm gerçekleştirmek için Sagnac sinyallerinin ölçülebileceği görülmüştü. Bu çalışmada görüldüğü üzere kolay üretim yanında fiberler daha uygun bir maliyeti beraberinde getirmiştir [2,3].

İlk başlarda fiber optik jiroskop (FOJ veya FOD) üretiminde öncelik hassaslıktı bu tanımdan giderek ayrılan sistemler ile basit optik entegre sistemler ve özel fiberler üretildi. Çalışmalardaki FOD üretimlerinde farklı değişimler gözlemlendi. Açık ve kapalı optik entegre tasarımlar ile yaygınlaşarak üretimin şekli değişmiştir [4,6]. Artık FOD sistemler geliştirilmiş ve üretilen yerlerde gelişimleri izlenmiştir. Önceki yıllarda üretilen lazer jiroskoplara ile karşılaştırıldığında çok küçük bununla beraber gelen hassasiyeti artan (0.001 derece/saat) olan FOD, lazer jiroskopların yerini almıştır [5].

Yapılan sistemlerde yeralan modülatörler diğer bir ifade ile dönü ölçerler (jiroskoplar) istenilen mesafede bulunan ve ulaşılması istenilen yönü ölçmekte kullanılır. Bu yapıların tercih edilmesini sağlayan en büyük şey performanslarının güçlü ve elektromanyetik olarak dayanıklı olmasıdır. Diğer FOJ tasarımıdaki en önemli zorluk ise parçaların fiziksel olarak çok küçük olmasıdır. Hassas süreçler için etkenlerden biri ölçüm yapılan mesafenin azaldıkça sinyal/gürültü ile ortaya çıkan değerlerde küçülür. Bu ölçümler için hassas elektronik ve işlem adımları gerekir böylece üretimde maliyet yükselir [1,6].

Yapılan çalışmalarda bizim üreteceğimiz FOD sisteminin temel unsuru Sagnac prensibine dayanmaktadır. Bu sistemin çoğunluğu optik fiberlerin bir araya gelip bütünleşmesiyle oluşur. Üretilen FOD çalışmasındaki durumlar ve bu sistemdeki adımlarda kullanılacak diğer etmenlerden bahsedilmiştir. Fiber optiğin temeline dayanan ve böyle adlandırılan çok fonksiyonlu entegre optik aygıt (İng: Multifunctional Integrated Optical Chip, MIOC)'ın tasarım, üretim ve karakterizasyon işlemlerinin nasıl yapıldığı anlatılmıştır.

MIOC'un tüm bileşenleri birleştğinde aygıtın amacın yüksek performans sergilemesi önemlidir. Bunun için adımları ilk olarak fırınlanmış protonların yer değişimi (İng: Annealed Proton Exchange, APE) yöntemi ile başlanmıştır. APE ile üretim düzeneğinde üretim gerçekleştirildi. Optik fiber ile eşleşme sağlanacak dalga kılavuzunun genişliği üretim için doğru boyuta getirilmiştir. Sonuç alınan değerlerde genişlik olarak $7\mu\text{m}$ olarak ölçülür ve kılavuzda en az kayıp vererek değer olarak yaklaşık %50 geçirgenlikle fiberle bağlantı kurulur.

Ayrı olarak fiber ile eşleşme sağlanması gereken indis değerlerindeki değişimler 0.025-0.030 aralığındadır. Bunun yanında MIOC üretiminde önemli olan sıcaklık değeri ve zamandır. APE yöntemi iki aşamadan oluşmuştur. Bunlarda sırasıyla ilk aşamada oluşan

olguların ikinci aşamada daha doğru ve kontrollü adımlarla yapılarak negatif varyasyonları ortadan kaldırılmaktı. İkinci aşama sonrasında yapılan çevresel testlerden iklimik kabin testlerinde parametreler belirlendi. İlk olarak negatif derecelerde $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ daha sonra pozitif derecelerde $(+85)\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık değerlerinde optik gücün değişimi gözlenmiştir. Optik güçteki değişim değeri $\%0.5$ 'den daha azdır. Böylece bu aygıtlar çevresel etmenlere karşı kararlıdır.

Yapılan MIOC'ların bazı sistemler içerisinde testler yapılmıştır. PER değerleri 30-50 dB seviyesinde ölçülüp değerlendirilmiştir. Bunun sonucunda kutuplayıcı FOD sisteminden çıkarılarak yüksek performansta MIOC üretimi yapılmıştır.

Hazırlanan örneklerin karakterizasyon adımları belirlenmiştir. İlk olarak optik karakterizasyon yapılacak örnek ile fiber kuyruğu entegrasyonu yapılacaktır. Bu entegrasyon işleminin devamında elektriksel test hazırlanacak ve burada DC seviyede elektriksel ölçümü alınacaktır. Bununla beraber elektriksel testler tamamlanacak ve pi voltajı değeri yani V_{π} gerilimi hesaplanacaktır. Sonrasında örneklerle askeri standartlara uygun olarak belirlenen sıcaklık değerlerinde ve hızlarda testlere tabii tutulacaktır. Son olarak tüm parçalarla birleştirilmiş aygıtın elektrottan elde edilen model baz alınıp 1 GHz'e kadar çalışma durumu incelenecektir. Doldurulmak istenen bilimsel boşluk ana malzeme alttaş yapısı olarak kullanılan LiNbO_3 malzemesinin fotolitografi ve farklı sıcaklıklarda difüzyon yapılarak özellikleri değiştirildi ve elde edilen malzemenin elektro optik özellikleri incelendi. Daha önce yapılan çalışmalarda görülen ürünlerde iklimik kabin testlerinde stabiliteyi korumadığı görülmüştür bu tez de ise yapılan fabrikasyon adımlarında ve sonrasında aygıta uygulanan işlemlerde daha yüksek performans çalışan ürün elde edilmiştir.

Bu çalışmayla beraber gerçekleştirilen ve ortaya çıkarılan aygıt hem tasarım hem de optimize edilmesiyle yurtdışından ithal edilecek/gelen bu ürün milli imkânlar ile üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu tezde ikinci bölümde literatür araştırmalarından derlenen bazı bilgiler sunuldu. Üçüncü bölümde aygıtın ürün haline gelmesinde kullanılan gereçler, aygıtın üretim adımları ve test adımlarından bahsedildi. Dördüncü bölümde ise elde edilen aygıtın karakterizasyon ve test sonuçları elde edilen verilerin değerlendirilmesi anlatıldı. Tezin sonuç bölümünde çalışmanın konusu ile ilgili öneriler sunuldu.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Entegre Optik Sistemlerin Gelişimi

Bu bölümde ilk bahsedilecek konu fiber optik sistemlerden fiber optik jireskopun temel bileşenleri ve çalışma prensipleridir. Bu prensipler sonrasında FOD için önemli ana temeli oluşturan Sagnac yapısı tüm işlemleriyle detaylı şekilde incelenecektir. Son kısımda ise FOD açık ve kapalı döngünün neler olacağı hakkında bilgi verilecektir [4].

Entegre optik; fotonik entegre devrelerin oluşumundaki etkili olan yapıları birleştirmede etkili bir teknolojidir. Bu sistem çok fazla optik parçanın bir araya gelmesi oluşur. Bunun yanında birbirinden farklı ve kompleks yapılara sahiptir. Bu sistemlerin ilk ortaya çıkışı devrelerden olur ve son zamanlarda bu yapılar hızlı bir gelişim göstermiştir [1,3].

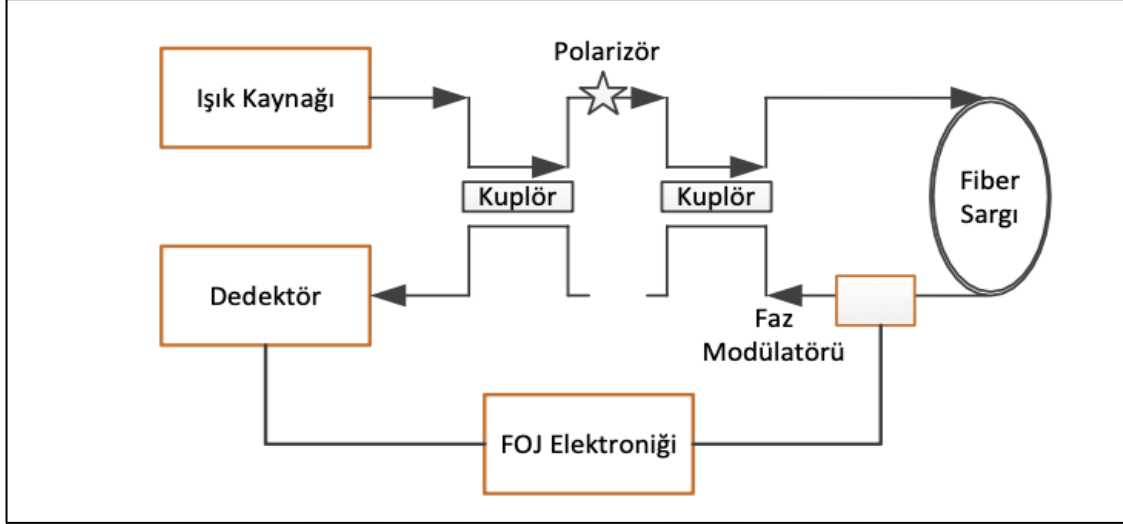
Son zamanlarda yapılan entegre optik hakkındaki çalışmalarda dalga kılavuzunun yapısı kullanılan optik aygıtların kuramında fabrikasyonu ile ilgilidir. Bu tarz yapılardaki optik dalgalar, dalga kılavuzların yapılandığı farklı modeller eldeki plakanın üzerine işlenmiştir. Bu yapıda ışık verilen bölgeye hapsolmuştur. Güzümlü dalga aygıtları benzer görülen optik sistemi gibi pasif işlemlerde kullanılır. Bu tarz teknikler ile elektro-optiğe dayanan modülatörler ve ferroelektrikler gibi aktif aygıtlarda kullanılır [3,7,8].

Entegre optiğin uygulama alanları çok geniş sektörlerde kullanımları göstermektedir. Genellikle böyle yapılar tek modülatörlü fiber optik sistemli yapılar içerir. Yapıların kullanım yerleri, sensörler fiber optik jireskoplar ve dijital ve analog iletişim gibi alanlarda kullanılmaya başlanmıştır [9,10].

Entegre sistemlerin kullanımları lazer demeti kontrolü ve sinyal işleme hesaplamalarında da çıkışı fiber olmayan yerlerde kullanılır. 1990'lerden itibaren jireskopalarda yüksek hızlı fiber optik sistemler artarak kullanılmaya başlanmıştır [11,12].

Jiroskopun temel unsurları Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Bu yapı FOD'un ana bileşenlerini belirten yapılardır. Bu bölümde FOD temel yapısı ve fiziksel işletim sistemi işlevlerinden bahsedilecektir. FOD içerisindeki ana kısım optik ve elektronik bileşenler olmak üzere 2'ye ayrılır. Optik bileşenleri açıklarsak su sekildedir, ışık kaynağı, fotodedektör, faz modülatörü,

sarım bileşenleridir. Elektronik bileşenler sayısal/analog (D/A) ve analog/sayısal (A/D) ve analog işlemcilerdir [4,13,14].



Şekil 2.1. FOD'un yapısı [1]

2.2. Fiber Optik Jiroskopun Çalışma Prensibi

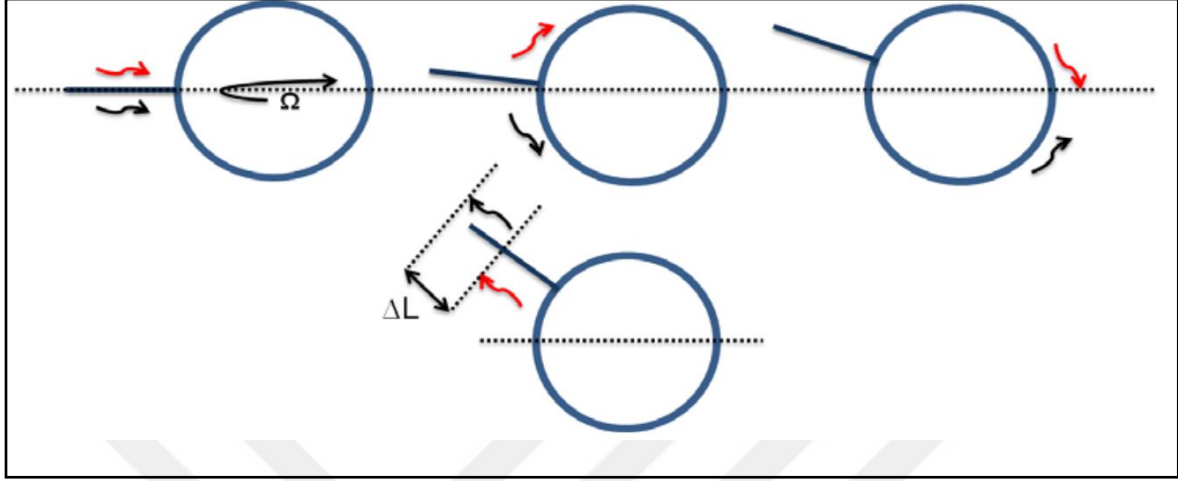
Fiber optik sistemlerin çalışma adımları bahsedilecektir. Fakat yapısını özetlemek için fiber optik jiroskop'un yapısını bilmek gerekir. FOD faz modülatörü, ışık kaynağı, kuplör, fiber sargı ve foto dedektörden oluşmaktadır. Burada iki ayrı yola bölünmüş olan ışık sarılan fiber sargının tersi yönlerde hareket eder ve bu dönü hareketi ile beraber bir faz farkı oluşur. Dönü ile orantılı bir şekilde oluşan faz farkı detektöre düşer. Işık dalgalarından oluşan girişim modeli meydana gelir [1].

2.3. Sagnac Etkisi

Sagnac Etkisi, FOD çalışma prensibinin temel yapısını oluşturan en temel etkidir. Bu alanda çalıştığı için adını mekanizması olan Geroges Sagnac tarafından almıştır. Bununla ilgili söyle bir tez öne atılmıştır. Temel olarak Sagnac tabanlı bir dönme hızına sahip interferometrik yapıdaki bir halkada işlem devam ettikçe oluşan bu halkada dönme hızı ile doğru orantılı faz kayması meydana gelir [15].

Sagnac etkisi fiber optik jiroskopların çalışmasını esas alır. Sagnac etkisi, tek bir düzlem içinde karşı yönlerde hareketi olan çift ışık arasındaki ortak bir yolda oluşan faz farkından

dolayı meydana gelir. Açısal dönem hızı Sagnac etkisi ile orantılıdır. Şekil 2.2’de gösterilen görselde Sagnac etkisi anlaşılabilir.



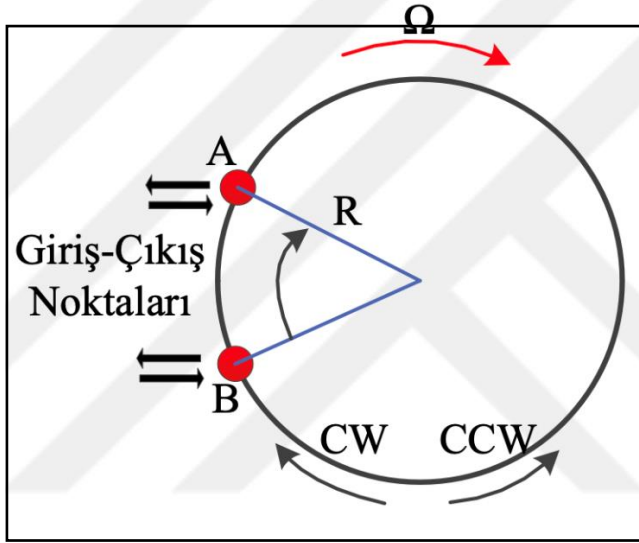
Şekil 2.2. Sagnac etkisiyle oluşan yol uzunluğu değişimi [14]

Halkanın harekete geçmesi ile birlikte ışık dalgaları birbirine ters yönde hareket ediyor. Elektriksel olarak faz farkının oluşması için ışık dalgaları karşılıklı birbirine geldikleri yol mesafesi arasında ve halkanın dönme gücü ile doğru orantılı bir fark oluşmasıdır [15,16].

Sagnac etkisinin matematiksel açıklaması fiziksel veriye göre farklıdır. Işık dalgalarının faz farkındaki hareketlilikle ile hesaplanır. Işığın hızı tüm noktalarda fiber içinde ve uygun ortam da ölçülen ışığın hızı ile aynıdır. Fiber sarımı içinden geçen ışığın güç değeri sabitlik gösterdiğinde gözlemcinin değerlendirdiği ışık dönmüyor olarak gözükecektir.

Şekil 2.3’teki A ve B noktalarındaki ışık dalgaları fiber, dönen halka ile farklı zamanlarda, eğer fiber halka durağansa aynı zamanda, fiber sarımından çıkacaklardır.

FOD, ışığın gelmesiyle oluşan dönüşü hesaplamak adına faz kayması ile ortaya çıkan değer ölçülerek netleşir. Şekildeki değerler için; R fiber yarıçapı, ışık hızı c, çemberin çevresi, sistem alanı, halkanın sargımın açısal hızı, cw saat yönü ve ccw saat yönünün tersini göstermektedir [15,16].



Şekil 2.3. Dönü hareketinde giriş ve çıkış noktaları [15]

Belirli bir noktaya kadar ışık halkaya giriş ve çıkış yapar. Giriş ve çıkış noktaları değişmesi için fiber sargının hareket etmesi gerekir. Karşılıklı olarak ters yönde hareket eden ışık dalgaları arasında gerçekleşen bir turu tamamlamak için geçen bir zaman aralığında ortaya bir fark çıkar. Eşitlik 2.1 ve 2.2’de ışık dalgalarının aldıkları yol uzunlukları gösterilmiştir.

$$L_{CCW} = 2\pi R - R\Omega t_{ccw} \quad (2.1)$$

$$L_{CW} = 2\pi R + R\Omega t_{cw} \quad (2.2)$$

Mesafeyi tamamladıkları bu zamanlar Eşitlik 2.3 ve 2.4’teki gibi olur.

$$t_{CCW} = \frac{R(2\pi - \Omega t_{ccw})}{c} \quad (2.3)$$

$$t_{CW} = \frac{R(2\pi + \Omega t_{cw})}{c} \quad (2.4)$$

Bulunan eşitlikler ayrı olarak çözüme ulaştığında fark Eşitlik 2.5’te görülür.

$$\Delta t = t_{CW} - t_{CCW} = 4\pi \frac{R}{c} \left(\frac{R\Omega}{c} \right) \quad (2.5)$$

Fiber sarımların uzunlukları uzun olursa eğer sistem yapısı değişir. Fiber sarım sayısına N olursa çıkan süre farkı Eşitlik 2.6'de olur.

$$\Delta t = t_{CW} - t_{CCW} = 4\pi \frac{R}{c} \left(\frac{R\Omega}{c} \right) \quad (2.6)$$

Sarımın uzunluğu ve halka arasında,

$$\Delta t = \frac{LD\Omega}{c^2} \quad (2.7)$$

Süredeki çıkan fark Eşitlik 2.7'de olduğu gibi ve ortaya çıkan faz kayması ile zaman farkı arasındaki Eşitlik 2.8'de verilmiştir.

$$\Delta \phi = W \cdot \Delta t = \frac{w.L.D.\Omega}{c^2} \quad (2.8)$$

Ortaya çıkan D çap ve ışık dalgası uzunluğu L olan fiber sarımın faz kaymasını Eşitlik 2.9'dir.

$$\Delta \phi = W \cdot \Delta t = \frac{w.L.D.\Omega}{\lambda.c} \quad (2.9)$$

FOD sistemlerde önemlenecek diğer bir unsur ise orantılı katsayıdır [10,25].

$$SF = K_S = \Delta \phi / \Omega = \frac{2.\pi.L.D}{\lambda.c} \quad (2.10)$$

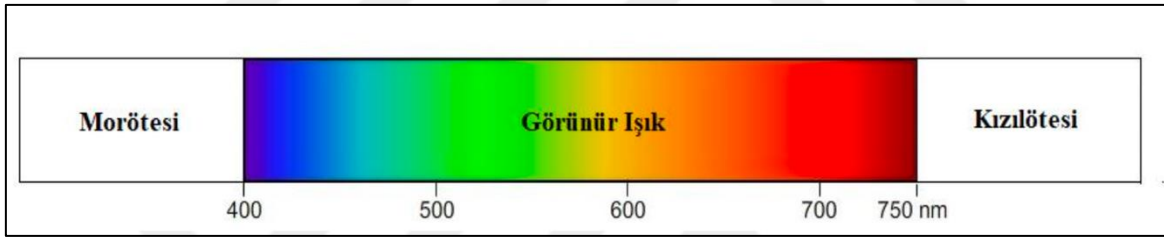
Eşitlik 2.10 faz kaymasına bağlı Sagnac etkisinin oluşumu anlatılacaktır. Fiber optik sistemlerde meydana gelen faz kaymasından dolayı oluşan güç dalgalanmaları ölçülecektir. Dalga girişimi incelenecek olursa tek renkten oluşur ve 2 dalga arasındaki faz farkı ve girişim olayını yapan dalganın gücü ile ilgilidir [17].

2.4. Işık Kaynağı

Anlattığımız gibi fiberoptik dönü ölçerlerde kullanılan ana yapıdaki bir diğer bileşen ışık kaynağıdır. 2 tip ışık kaynağı fiberoptik haberleşme sistemlerinde yer alır. Kullanılan ışık ana kaynakları diğer isimle lazer diyot olarak adlandırılır bazı durumlarda ise ışık yayan diyot olarakta bilinir. Bu ışık kaynakları hem olumlu hem de olumsuz noktaları vardır. Bu sistemde kullanılacak noktaya göre uygun bir sistem tercih edilir. Bu seçimde en önemli nokta seçilecek ışık kaynağının λ sembolüyle gösterilen dalga boyu;

$$(\text{dalgaboyu}) \lambda = c/f \quad (2.11)$$

Formülü ile ifade edilir. Bu denklemde kullanılan değerler f frekans değeri ise c ışık hızıdır. Verilen orandan da belli olduğuna göre c sabit olduğundan dalga boyu artmasıyla beraber f azalır [3,10,18]. Şekil 2.4.'de Işık spektrumunun dalga boyuna göre bazı değerler gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Dalga boylarına karşılık ışık spektrumu [7]

Verilen spektrumlar arasında kızılötesinde fiber optik sistemlerde kullanılarak iletim sağlanır. Haberleşmede en çok kullanılan aralıklar 850 nm – 1330 nm – 1550 nm band aralığıdır. Bahsedilen ve modellemeleri yapılan kapalı ve açık döğü sistemlerinde 1550nm dalga boyu kullanılır. Bu dalga boyunda zayıflama an aza indirilmiştir.

Güçlü çalışan bir FOD sistemi için temel bileşeni olarak kullanılan ışık kaynağının geniş bant aralığında çalışır [17]. Bunun sebebi fiberden geçen ışık modudur. Tek modlu ışık ortamda iletimde kullanılan gücü taşır ve aktarır. Sonuç olarak bu ölçü 100 μ W değerindedir ya da büyüktür. İncelenen diğer bir unsur ise problemleri aza indirmesi beklenen ‘Rayleigh Saçılması’ (Rayleigh backscattering) dır. Fiber optik sistem içinde saçılan optik gücü az

kısmını dedektöre ulaştırmasıdır. Hem saat yönünde hareket ederek hem de tersi yönünde hareketiyle optik dalgalar dört dalga içinde çalışan dedektörler üzerinde güç ölçümü yapılır.

Bu dalgalara bakıldığında CW ve CCW yönlerinde güç taşıırken saçılmış dalgalar sadece gürültü taşırlar. Bunun yanında ışık dalgalarının oluşumunu bozarak karmaşıklık oluştururlar. Meydana gelen saçılan optiklerin mesafeler boyunca defalarca kez değişik açılarda oluşur. Bu da hatalı ölçüm yapılabileceğinde bu tarz ortaya çıkan gürültülerin giderilmesi gerekir [18,19,20].

Diğer etken ise ışık kaynağının dalga boyunun her zaman sabit bir değerde kalmasıdır. Sistemlerde kullanılan ölçek faktörü her zaman için ışık kaynağı dalga boyuyla doğru bir orantıya sahiptir. LED (Light emitting diode) diyotlar sistemde ışık kaynağı olarak kullanılır bu sistemler geniş bant aralığında çalışır ve bunun yanında daha az gürültü seviyesine sahiptirler. Diğer etkileri ise güçleri az ve verimliliği zayıftır. Sistemlerde kullanılan Lazer optik diyotların (LD) ışık için çıkış gücü fazla olmasıyla beraber daha az genişlikte dalga boyları büyük bir olumsuzluktur [11,15,19].

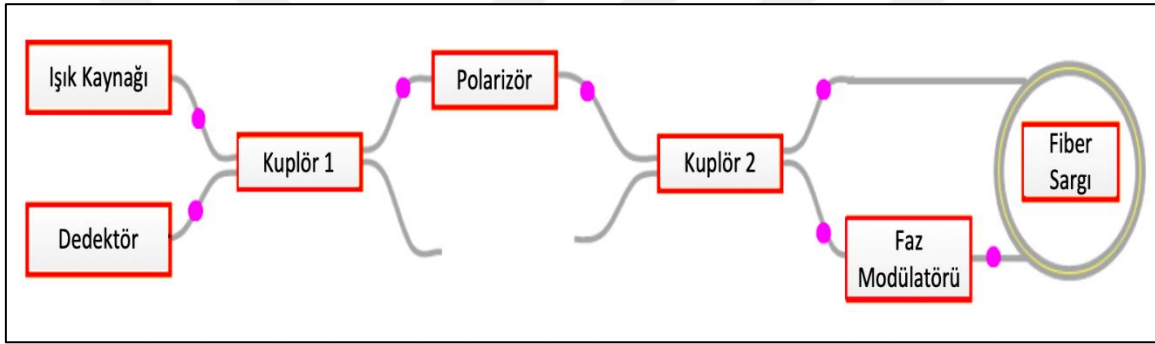
Kullanılan LED sistemleri ve diğer bir yandan LD sistemleri arasındaki en büyük değişken SLD' (Superluminescent diode)dir. Bu yapı daha yüksek çıkış tarafında optik gücündedir ve daha geniş bir optik spektrumda çalışır. Saçılarak gelen optik güçten kaynaklanan faz kaymalarına engel olur bu da fiber optik sistemlerde jiroskoplarda kullanılması tercih edilir. Ek olarak dezavantaj olarak bakmak gerekirse o da dalga boyunun sıcaklık değişimi karşısında gösterdiği farklılıktır. Bunun üzerine karmaşık fakat dalga boyu sabit farklı bir yapıda FLS (Earth-doped fiber light source) cihazları üretilmiştir bu ise fiber optik sistemlerde kullanılmaya çok uygundur bir ışık kaynağıdır. FLS sistemlerin en büyük avantajı optik güç kararlılığı ve dalga boyu sabitliğidir gücü ise 5 - 50 μ watt aralığındadır. Bant genişliği kararlılığı da böylece dalga boyunda görülen sabitlik ile istenilen bir durumdur. Fakat sıcaklık ile daha önce de bahsedildiği gibi fazlasıyla ilişkilidir [20].

2.5. Bağlaştırmacı, Kuplör (Coupler)

Kullanılan bağlaştırmacıların iki temel etkisi vardır. Bunlar ışığı bölme ve yönlendirmedir. Kullanılan kuplörlerin en önemli görevi gelen tek yönlü ışığı iki farklı devreye ayırmasıdır.

Kuplörün yapısı FOD sistemlerinde kullanılan lazer diyotlardan gelen optiği farklı iki ışık yoluna ayırarak iletmesidir.

Optik jireskoplarda 2 farklı bağlaştırmacı kullanılır. Şekil 2.5’de görüldüğü gibi fiber optik yapısında kullanılan bağlaştırmacılar verilmiştir. Bu yapıdaki kuplörler daha önceden bildiğimiz anahtarlama sistemine benzer çalışır yani verilen sinyali istenen bölgeye iletimini yapar ve sonrasında böler. Kullanılacak sistemlerde en önemli sey güç düşmesinin en az olması ve bununla beraber fazda yani sinyal frekansında hata unsuru taşıyacak bir şey taşımaması kuplörden beklenen en önemli özelliklerdir. Sinyal de farklı bir unsur olması olumsuz sonuçlara yol açacağından istenmez [10,16].



Şekil 2.5. FOD bileşen dizilimi [4]

Birinci bağlaştırmacı;

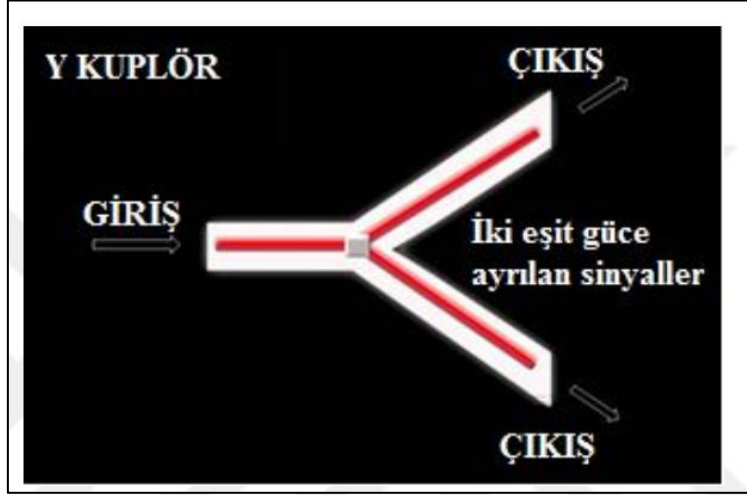
- Işık kaynaklarından bağlaştırmacıya gelen ışığı düz ve öne fiber sarımına,
- Bir diğer yönde optik dedektöre yönlendirir.

İkinci bağlaştırmacı;

- Fiber sarımının içinde ve önünde durur ve ışığı çiftleyerek eşit kollara ayırır. (CW ve CCW)
- Diğerisi ise fiber sarıma ters yönden gelen optik güçleri birleştirir.

İdeal bir Y tipindeki bağlaştırmacı olarak kullanılan fiber optik sistemindeki sinyali istenilen derecede yarı yarıya böler. Bu durumu anlatan görsel Şekil 2.6 ile gösterilmiştir. Gelen

sinyalleri eşit bir şekilde bölme işlemi yapan bağlaştırmacıya bölücü ya da ayırıcı anlamını taşıyan ‘splitter’ olarak adlandırılır [10].



Şekil 2.6. Y yapısındaki kuplör [10]

2.6. Optik Kutuplayıcı

Kullanılan optiğin daha iyi anlaşılması için kullanılan kutuplayıcılarla ilgili olarak şu bilgi ortaya çıkmaktadır. Aynı yönde kutuplanmış ışık dalgaları diğerine göre çok daha iyi soğurma işlemi yapmaktadır. Bundan dolayı haberleşme sisteminde ihtiyacı karşıladığından dolayı daha fazla kullanılır. FOD sistemlerinde optik kutuplayıcı, optik kuplör tarafından ikiye ayrılan ışık dalgalarının iletilmesi istenilen yolun dışında polarize olmasını engellemek için kullanılır. Bu işlemle ışık dalgaları sadece tek taraflı olarak iletmeye devam eder [10,11].

2.7. Optik Faz Modülatörü

Birbirine farklı yani zıt yönlerde hareket eden ışık demetlerinin arasında oluşan faz farkını belirlemek için kullanılır. Bunun yanı sıra faz modülatörü Sagnac tarafından faz kaymasının genlik dalgalarına dönüştürürken sistemde yer alır. Dedöktör çıkış işaretlerinden güç formülünü kullanarak ters taraflarda ilerleyen ışık demetleriyle faz farkı gözlemlenebilir [3,15,20].

2.8. Fotodedektör

Birbirine farklı yönlerde ilerleme yapan ışıklar fiber sarımındaki tüm mesafeyi tamamladıktan sonraki fotodedektöre kutuplayıcı tarafından düşmesi sağlanır. Fotodedektör sayesinde bu döngü sırasında oluşan faz kaymasını ve oluşan Sagnac etkisini de dedektör aracılığı ile tespit edilir [20].

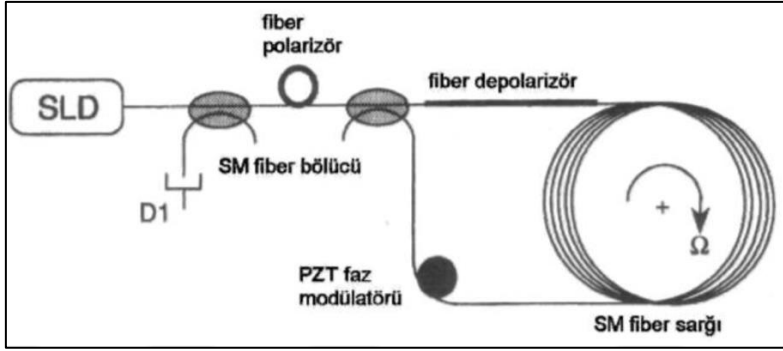
Fiber optik dönü ölçerlerdeki dedektörler optik gücün şiddetine bağlı olarak akımı üretirler. Fiber optik jiroskopta fotodedektörün önemi büyüktür. Bazı özellikleri sağlaması beklenir. Örneğin yüksek doğrusallık ve kuantum veriminin fazla olması yanısıra gürültüyü düşürmesi ve sıcaklığı düşük hassasiyette ölçüp fazlaca kuantum verimliliğini düşen optik gücün maksimum derecede çıkışı sağlanmalıdır. Böyle büyük etkiden dolayı PIN optik diyotlar dönü ölçerlerde ilk sırada kullanılır [20].

2.9. Polarizasyon

Yapılan FOD sistemlerinde kullanılan fiberler tek modlu (SM) yapıdaki fiberlerdir. Bu fiber yapısında çok fazla polarizasyon modu ve simetrik olamayan yapılar bulunur. Bu nedenle fiber yolu fiziksel olarak oluşan gerilimlere maruz kalabilir. Bu maruziyet sonunda çift olarak yaptığı kırınma yani polarizasyon değişikliğe uğrar. Polarizasyonları birbirinden farklı olan dalgaların ortam içinde yayılma sabitlerinde değişiklik çıkarır. İki Işık dalgası boyunca bu ince ayırım büyük faz farklılığını ortaya çıkarır. Bu işlem için polarizör kullanılır. Bu da ayrımı engeller ve çift kırınımdan dolayı faz farkını önler [10,21].

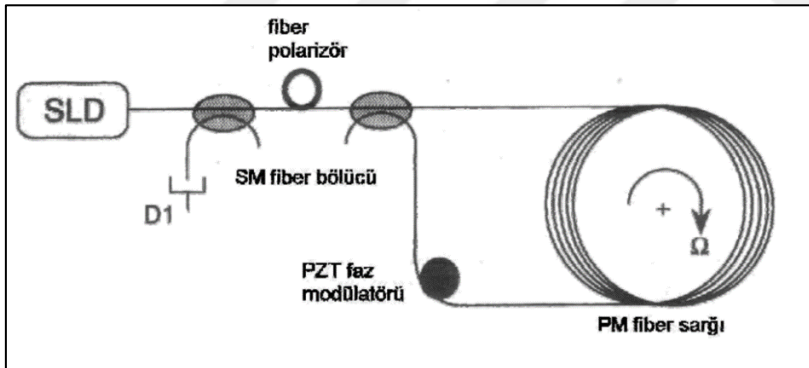
Polarizörün amacı seçici olmasıdır. Yayılan dalgalardan aynı polarizasyon üzerinde olanları seçer. Pratik olarak bakıldığında bazı problemlere yol açabilen davranışlar gösterebilir. Teorik olarak polarizasyon sorunsuz çalıştığı görülür. Polarizasyon yerinin değişmesi detektördeki ışığın gücünü azalmasına ve yok olmasına neden olur. Buna engel olmak için tersi ile çalışan depolarizör fiber sargının girişinde kullanılır. [10,11,21].

Şekil 2.7’de polarizör ve depolarizör gösterilmiştir. Depolarizör farklı yerlerden gelen ışık dalgasını aktarılmasını sağlar.

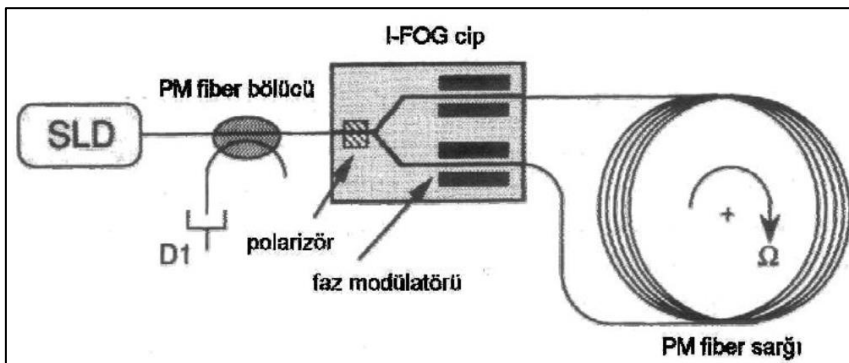


Şekil 2.7. FOD’da polarizör ve depolarizör konumu [10]

Bazı jireskoplarda ise PM fiber kullanılır. Çünkü depolarizör bir polarize modlu (PM) fiberdir. İki farklı modu olan fiber yapılarında sinyal kaybına uğramamak için gereksiz hatalı sinyaller çıkarılır. Gösterilen Şekil 2.8’de herhangi bir depolarizöre ihtiyaç duyulmaz. Hassasiyeti fazla olan jiroskoplarda Şekil 2.9’daki gibi yapı içinde bir polarizör ve çift faz modülatörü bulunur. Bu yapılarda entegre sistem olarak LiNbO_3 malzemesi kullanılır [10,11].



Şekil 2.8. Fiber sarımında FOD [10]

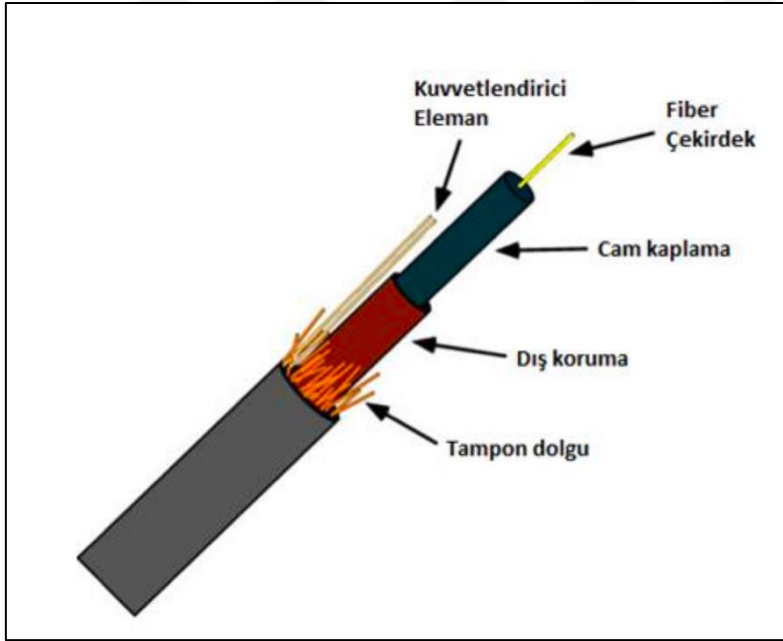


Şekil 2.9. FOD entegrasyonu [10,11,22]

2.10. Fiber Sargı

Sagnac etkisinin doğrudan etkilediği konu fiber sargılardır. Sagnac etkisinden daha sonraki konu başlıklarında daha detaylı bahsedilecektir. Işığın yansımaları ve kırılması mantığı ile fiberlerin çalışma kuralları oluşur [4,13,16].

Işık her zaman için daha az yoğun bulunduğu bir ortamdan daha fazla bulunduğu bir ortama geçerken yansımaları gerçekleşir. Bulunduğu ortamdaki ışığın gelme yönüne göre fiber içinden kırılarak devam eder. Fiber içinde ışığın tam yansıma yaparak kırılıma uğramadan ilerlemesi ideal bir olaydır. Fiber yapı görüntüsünü Şekil 2.10' daki gibi üç ayrı katmandan oluşur [16];



Şekil 2.10. Fiber bileşenleri [10]

- Çekirdek Yapı (Merkez)

Çekirdek her zaman fiber yapısının en içindeki yapıdır ve bu yoldan ışık ilerlemeye devam eder.

Alışmızsız bir cam yapıdan oluşmuş kırılkan olmayan çapı 6-100 mikrometre arasında değişebilir.

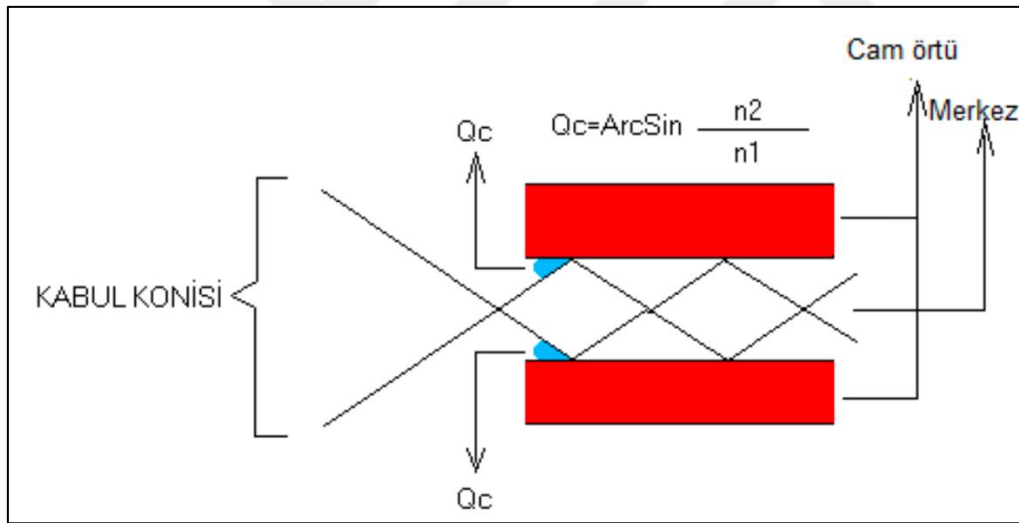
- Cam Örtü

Merkezin etrafını saran yapıdır. Çekirdek malzemesi ile aynı üretilmiştir. İkisi arasındaki fark ışığın cam örtüye çarparak tekrar içeri yansımalarıdır.

- Koruma

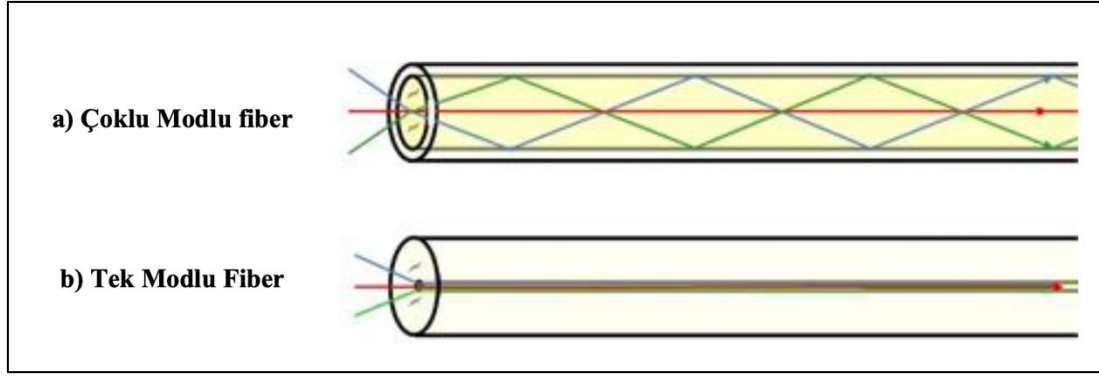
Yapının adından anlaşılacağı üzere çevresel etkenlerden koruma için en dış tarafta bulunan kısımdır. Optiğin çalışmasında etkisi yoktur.

Işığın tüm fiberde dolaşması için ilk olarak bir açı ile giriş yapılmalıdır. Bu giriş için belirlenen bölgenin adına kabul konisi denir. Şekil 2.11’de gösterilmiştir. Eşitlik ise 2.10 ile verilmiştir [10,21,22].



Şekil 2.11. Kabul konisi [10]

Tek modlu ve çok modlu olarak fiberler adlandırılır. Bunun sebebi içerisinde izleyeceği yol sayısıdır. Çapı büyük olan çok modlu fiberde ışık çok fazla yoldan ilerlerken tek modda ise bir yol vardır. Bu şekil 2.12’de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Fiber mod görüntüsü [11]

Sagnac etkisinin ölçümünde kaliteli ve uzun fiber sarımı kullanılmalıdır. Bu çalışmada 2000 metre sarım uzunluğu 1.46 kırılma indisi belirlenmiştir.

2.11. Entegre Optik Aygıtlar

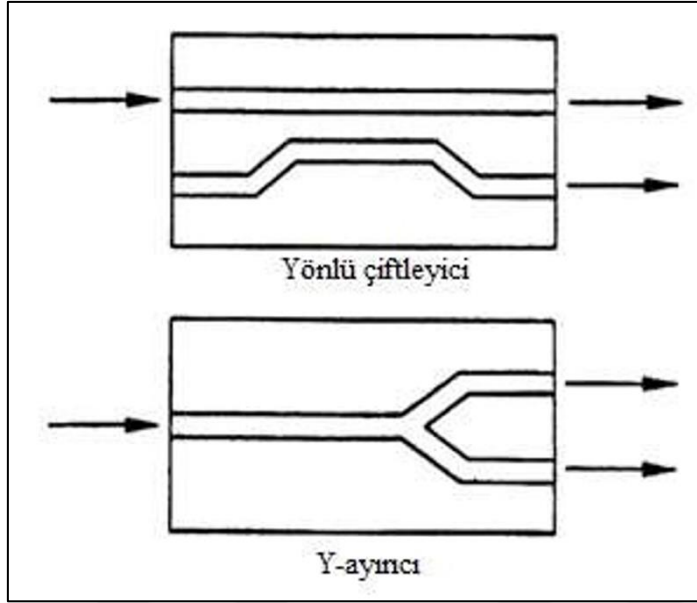
Optik entegre sistemler aktif aygıtlar ve pasif aygıtlardan oluşur. Entegre optik aygıtlar; pasif ve aktif aygıtlar olmak üzere ikiye ayrılırlar [4].

2.12. Pasif Aygıtlar

Optik sistemler için önemli bir yeri vardır pasif aygıtların. Ara yüz unsurları olarak kullanılırlar. Dalga kılavuzları, kutuplayıcılar sıklıkla kullanılan çiftleyiciler en fazla kullanılanlardır [10].

Performans ve kalite arttırmak için dalga kılavuzu kıvrımları kullanılır. S kıvrımları sistemlerde en fazla kullanılır. S yapılarında optik güç kayıpları azaldığı için tercih edilir [10].

Kutuplayıcılar dalga kılavuzların üzerine modelleme yapılır ve jiroskop gibi kipleycilerin kullanıldığı yerlerde kullanılır. Bu aygıtlar uygun ve uygun olmayan her iki modu da korurular. Bazı yapılardaki kutuplayıcılar ise tek bir modun geçirilmesine izin verir diğer mod ise kılavuzlanmada kullanılamaz. Bu şekilde kullanıldığında yüksek kutuplama elde edilir. Optiğin yönünü değiştirdiği ya da ayrılmasında kullanılan kılavuzlama aygıtları pasif elemanlarda yer alır. Şekil 2.13'te Y-ayırıcı görülmektedir [10,11].



Şekil 2.13. Yönlü çiftleyici dalga kılavuzu yapısı [10]

2.13. Aktif Aygıtlar

Sisteme uygulanan dışardan bir durum ile gerilimi ile elektrik alanı değişen aygıtlara Aktif aygıt denir. Bunlara örnek dedektör ve optik sistemler verilir. Kullanılan farklı ve karışık yapıdaki optik modülatörler voltajı azaltmak için dalga kılavuzu modellemesini kullanırlar. Çıkışı fiber takılı aygıtlarda önemli etmen olan Pockel Etkisini baz alarak çalışma prensiplerini oluştururlar [11,12].

2.14. Entegre Optik Sistemlerin Avantajları

Fiber optik alanında kullanılan entegre sistemler 1970'li yıllarından beri değişim göstererek artmaktadır. Bunun en önemli ve büyük nedeni fiber optik sistemlerin kısa sürede çok fazla gelişimi ile yeni teknolojik yapıların bulunmasıdır. Diğer optik teknolojilere göre entegre optik sistemlerin kullanım alanlarında çok genişlemeler olmuştur. Bu sistemin kullanılmasını bazı avantajları vardır. Bunlar sırasıyla, güç tüketiminin düşük olması daha hafifleşmesi ve boyutların çok daha küçülmesi, elektriksel özelliklerinden en önemlisi bant genişlikleri ve yüksek güvenilirlik gibi özellikleri vardır. Bu aygıtlar fiber optik teknolojisini ile bu özelliklerinden dolayı çok kullanıma uygun hale gelmiştir. Karmaşık yapıdaki devrelerdeki elemanları aza indirerek ürün maliyetinin düşmesine sebep olur ve voltajın düşük halinde de çalışma ortamı oluşur [19,20].

Burada dalga kılavuzu modellemesi ışığın doğrultuda ilerlediği çok önemli bir ortamdır. Entegre optik sistemler için dalga kılavuzu tasarımı büyük bir avantajdır. Hem üretimi hem de tasarımında dalga kılavuzu sistemlere uygun üretildiğinde sıkça tercih edilir. Dalga kılavuzu tasarımında kullanılan genişlik aralıkları mikrometre değerindedir ve bu da tek bir optik yolun ilerlemesini sağlar. Bir kip içinde ışık ilerlerken diğer kip içinde herhangi bir yapı bulunmaz bu durum oluşturulan aygıtın performansını arttıran bir unsurdur. Entegre optik aygıtlar için hassas bir nokta olan sıcaklık ve titreşim gibi dış etkenlere karşı dayanıklılığı fazladır. Etkileşim uzunluğunun kısa olması çok avantajlı olguları beraberinde getirir örneğin hızlı işlem özelliğidir [19].



3. MALZEME VE METOT

3.1. Malzeme

Optik aygıtların ince film kaplama çalışmalarında birçok değişik alttaş kullanılır [11]. Bu tez çalışmasında kullanılan malzemeler aşağıda verilmiştir;

Lityum Niyobat LiNbO_3 ; bu çalışmada alttaş malzemesi olarak kullanılan olan bu yapı bir ferroelektrik malzemedir. Doğal halde bulunmaz. Bu kristali büyütmek önemlidir; tek yapıda bir kristal etmek için kullanılan bir yöntem olan Czochralski yöntemidir. LiNbO_3 ; platin bir pota içinde eriyebilen Li_2CO_3 (Lityum Karbonat) ve Nb_2O_5 (Niyobyum Penta Oksit) tozlarından büyütülmektedir. LiNbO_3 ile fazla Curie sıcaklığında olduğundan bu sıcaklık aralıkları 1110°C - 1180°C 'dir bu sayede düşük güç kayıplı dalga kılavuzları tasarımı ve üretimi yapılır. Özellikle kararlı bir yapı oluşturmak için termal ve mekanik ve bunun yanında da kimyasal özellikleriyle önemli malzemedir [10,22,23].

Lityum Niyobat kristal yapısının içeriğinde Lityum, Niyobiyum ve Oksijen elementlerinin bir araya gelmesiyle oluşan yapıdır. Bu verilen elementlerin 1:1:3 oranında birleştirildiğinde ortaya çıkan yapıya stokiyometrik LiNbO_3 adı verilir. Malzeme yapısında bulunan Lityum iyonlarının yapısında bulunan dengesiz kristal kusurlarının olmasından kaynaklı stokiyometrik kristal üretimi oldukça zordur [21]. Eşitlik 3.1'de görülen reaksiyon da Czochralski tekniğinde üretimi tamamlanan platin potada fırın içerisinde eritilmiş halde Lityum Karbonat (Li_2CO_3) ve Niyobyum Pentoksit (Nb_2O_5) reaksiyonu,

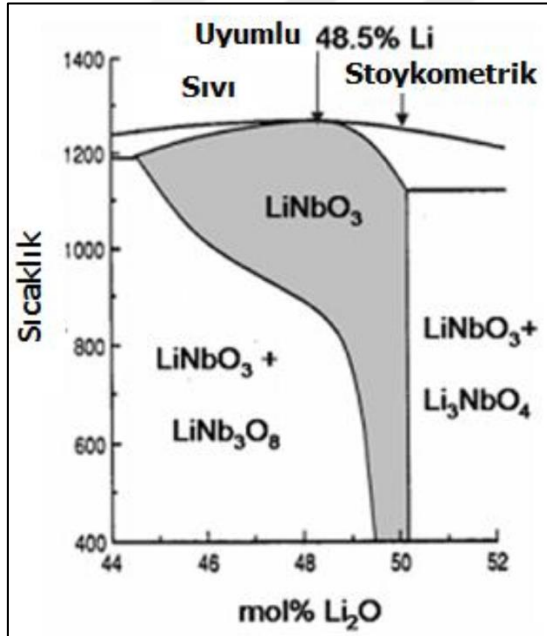


LN kristalini Lityum Niyobat olarak oluşumu gerçekleşir [21,22]. Bu verilen tepkimede potadaki bu elementler erime sıcaklığına yakın halde sıvı haldedirler. Çekme çubuğu ucuna yerleştirilen bir yem kristali üzerinde işlemlere devam edilir öncelik olarak eriyik yüzeyine yaklaştırılır. Burada çubuk LN'nin erime sıcaklığına ısıtılır. Bu işlemle beraber yüzeyde yapılan işlemlerde dokunma işlemi yapılan katı sıvı çubukta yüzeyde reaksiyon gerçekleşmesi sağlanır. Homojen bir tepkime olabilmesi için yem kristal ve erimiş malzeme sürekli olarak farklı yönlerde döndürme işlemi yaparak yukarı geçirilir [21,23]. Bu işlemde

başka bir neden ise kristal yüzey ve eriyik malzeme arasında oluşacak ısı farkına engel olmaktır [24,27,28].

Büyütme işleminde elde edilen kristallerin bazı fiziksel ve optik özellikleri, kristal büyütme işlemi sırasında parametrelerin kontrol edilmesiyle değiştirilebilir. Kristal büyütme işlemi sırasında parametreleri farklılaştırarak ortaya çıkan fiziksel ve optik özellikler değişebilir [24,25,26]. Büyütme işlemi tamamlandıktan sonra kristaller kaptan çıkarılır. Dikkatlice ve yavaş yavaş soğutma işlemi oda sıcaklığında gerçekleştirilir ve kesilme işlemine geçilir ve istenilen boyuta geçirilir. Bir kristali keserken kesme yönü kristalin birçok özelliği açısından önemlidir. Endüstride x, y ve z yönleri boyunca kesilen alt tabakalar kullanılır.

Şekil 3.1’de LiNbO_3 malzemesinin yapısı görülmektedir. Verilen grafikte görüldüğü üzere erime derecesinin en üst değerine karşılık gelen yer yani uyum noktasında katı ve sıvı fazlar bir arada bulunduğu nokta mevcuttur. Bu karıştığı noktada fazların oranları %48.45 Li_2O (Lityum kaynağı) ve %51.55 Nb_2O_5 (Niobiyum kaynağı) miktarında bulunmaktadır. Verilen bu oranlar elde edilecek son ürün yapısındaki homojenite için en uygun orandır [23].



Şekil 3.1. LiNbO_3 faz diyagramı [29]

LiNbO_3 ; alttaş malzemesi olarak kullanılacak olan bu yapı bir ferroelektrik malzemedir. Doğal halde bulunmaz. Bu kristali büyütme önemlidir tek yapıda bir kristal etmek için kullanılan bir yöntem olan Czochralski yöntemidir. LiNbO_3 ; platin bir pota içinde eriyebilen

Li_2CO_3 (Lityum Karbonat) ve Nb_2O_5 (Niyobyum Penta Oksit) tozlarından büyütülmektedir. LiNbO_3 ile fazla Curie sıcaklığında olduğundan bu sıcaklık aralıkları 1110°C - 1180°C 'dir bu sayede düşük güç kayıplı dalga kılavuzları tasarımı ve üretimi yapılır. Özellikle kararlı bir yapı oluşturmak için termal ve mekanik ve bunun yanında da kimyasal özellikleriyle önemli malzemedir [10,22,23].

LiNbO_3 kristalinin temel özelliklerinden biri, anizotropik bir kristal olmasıdır. Bu nedenle elektro-optik etkide malzeme üretilmesinde tercih edilen en kolay malzemelerden biridir. LN gibi bir kristale elektrik alanı uygulanarak kristalin kırılma indisi değiştirilebilir.

LiNbO_3 kristalinin yapısında genellikle optik faktörlerden dolayı kırılma indisinde bir değişiklik gözlemlenebiliyor bu da kristalin fotokırınım etkisine yatkın bir malzeme olduğunu gösterir. Bu etki, holografik hafızalar gibi günümüzde yaygın olarak incelenen bazı uygulamalarda kullanılmaktadır [24]. Bununla birlikte, Lityum Niyobat kristallerinin birçok dalga kılavuzu uygulamasında bu, kristalin kırılma indeksinde kontrolsüz değişikliklere yol açabileceğinden azaltılması gereken istenmeyen bir etkidir [25,26]. Işık kırınım etkisinin nedeni, bir kristalden geçen ışığın, genellikle safsızlık atomlarından kaynaklanan serbest elektronları lokal olarak toplama eğiliminde olmasıdır, bu da kırılma indisinde lokal değişikliklere neden olur.

Lityum niyobat (LiNbO_3), çeşitli uygulamalar için uygun bir ferroelektrik malzemedir. Çok yönlülüğü, iç malzemenin mükemmel elektro-optik, doğrusal olmayan ve piezoelektrik özellikleriyle mümkün hale geldi. En iyi şekilde karakterize edilmiş elektro-optik malzemelerden biridir ve kristal büyütme teknikleri sürekli olarak yüksek mükemmelliğe sahip büyük kristaller üretir [27,28].

LiNbO_3 malzemesinin kristal yapısı ve özellikleri olarak Lityum Niyobat (LiNbO_3), doğada bulunmayan, renksiz olan ve suda çözünmeyen bir kristaldir. Oda sıcaklığında ferroelektrik özellikler sergilemesine rağmen Curie sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda paraelektrik özellikler sergilemeye başlar. Bu özellik, malzemenin anlık elektrik polaritesinin uygulanan bir elektrik alanıyla değişmesine izin verdiği için entegre optiklerdeki uygulama sayısını da artırır. Optik sistemlerde çoğunlukla kullanılmasının bir diğer büyük sebebi de Pockell etkisine uygun özelliklerde medikal ve sensör yapılarda piezoelektrik etki göstermesidir. Değerlidir, fotoelastik bir malzemedir ve doğrusal olmayan bir şekilde optik olarak polarize

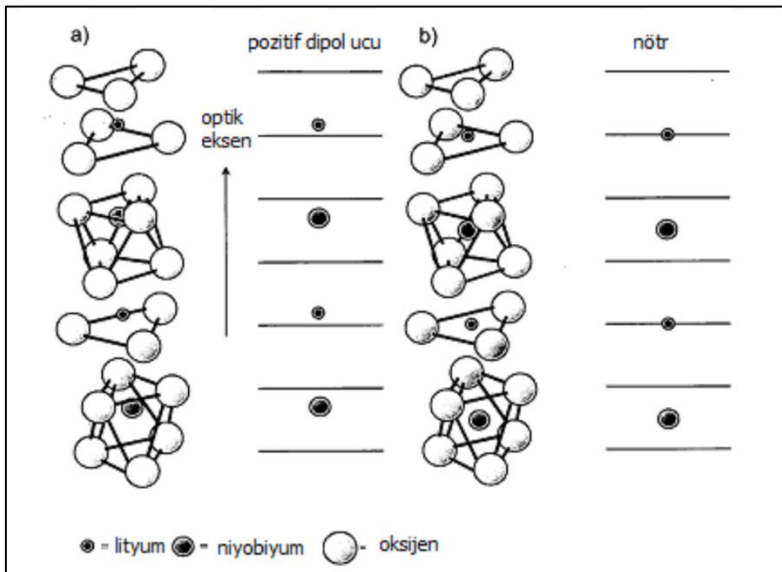
edilebilir. Ayrıca optik ve radyo frekansı dalga boylarında daha düşük kayıp oranlarına sahiptir [29,30,31]. Mikro ve nanolitografi yöntemlerinde kullanıma uygun fiziksel dayanıklılığa sahiptir bir malzemedir.

Yapı içinde bulunan Lityum ve Niyobiyum oranı kırılma katsayısı içinde önemli bir orandır. Bununla beraber kristalin yapısındaki Lityum ve Niyobiyum oranlarındaki değişim malzemenin Curie sıcaklığını da ampirik olarak eşitliğe göre değiştirmektedir. Bu eşitlikte 3.2’de , T_c Curie sıcaklığını, C ise karışımdaki Li_2O miktarını göstermektedir [32,33].

$$T_c = 9368,4 - 369,05C + 4,228C^2 \text{ (K)} \quad (3.2)$$

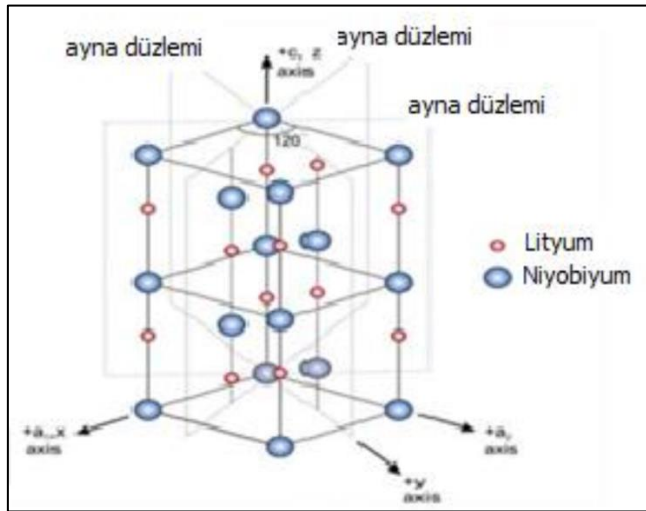
Lityum niyobat kristallerinin kırılma indeksinin malzeme yapısındaki elementlerin oranlarına bağlı olması aynı zamanda kristal kalitesini ve yapısını kontrol etmek için doğru ve performansı yüksek bir üretim için önemli bir unsurdur. Merkezi simetrisi ve ferroelektrik özellikleri olmayan negatif tek eksenli bir kristaldir. Ayrıca kristalin yüksek termoelektrik katsayısı, piezoelektrik katsayısı, doğrusal olmayan katsayısı ve elektro-optik katsayısı, uygulama alanlarını önemli ölçüde artırmaktadır [34].

Çalışmadaki $LiNbO_3$ malzemesinin ailesi perovskit kristalidir. Trigonal kristal sistemine sahip kristal yapısında, düzlemsel oksijen katmanları sıkı bir şekilde paketlenmiş altıgen bir yapıda düzenlenmiştir [35,36].



Şekil 3.2. Lityum Niyobat kristal yapısı [37]

Şekil 3.2' de gösterilen lityum niyobat kristalinin kristal yapısı, kristal eksenleri etrafında 3'lü dönüş simetrisi durumuna geçilir ve kristal yapısı üçgen yapılardır [31,33]. Ayrıca, Şekil 3.3'te görüldüğü gibi, birbirlerine 60° 'lik açı ile pozisyonlanmış 3 düzlemin oluşturduğu ayna simetrisi de sergiler. Bu kristal, ferroelektrik özelliğe sahiptir Curie sıcaklığının altında değerlerde özellikle belirgin yapıyı gösterir ve bu sıcaklığın üzerinde ise kristalin paraelektrik faza geçmesine neden olan kendiliğinden oluşan bir kutuplanma etkisiyle kristal yapısında değişiklikler meydana gelir [31,38].

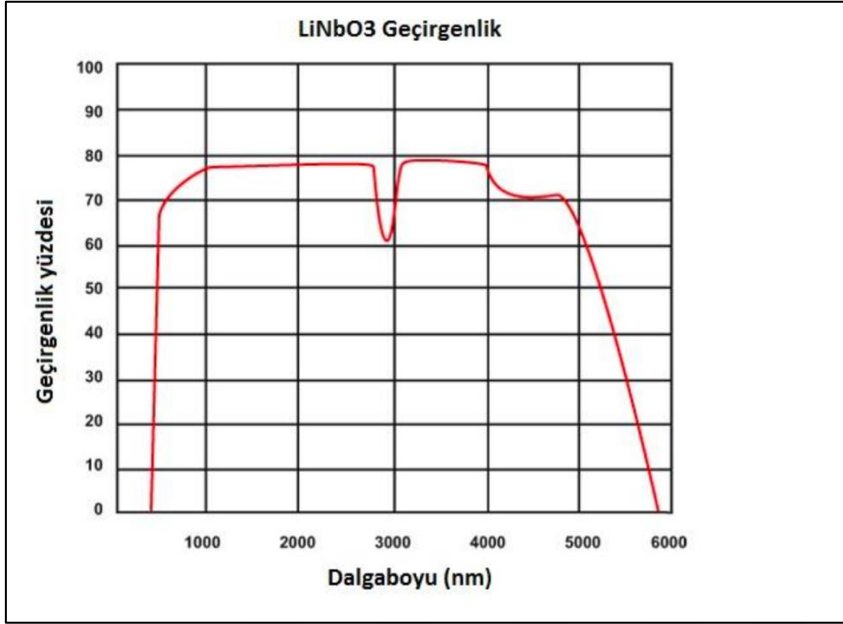


Şekil 3.3. Lityum Niyobat kristal eksenleri ve atomları yerleşimleri [31,35]

İki farklı birim hücresi bulunabilir: hekzagonal ve rombohedral. Şekil 3.3'te eğer kristal eksenini z eksenini olarak seçilirse, üç eşdeğer a eksenini, 120° açıyla birbirlerine pozisyonlanır ve kristal eksenine dik bir düzlem üzerinde yer alırlar [21,38]. Hekzagonal birim hücrelerde niyobyum elementi orijinal olarak kabul edilir ve birim hücre uzunluğu $a_H = 5.1536 \text{ \AA}$ olarak bulunur; bu uzunluk rombohedral birim hücre için $a_R = 5.4741 \text{ \AA}$ 'dir. Rombohedral birim hücrede eksenler arası açı 56.180° 'dir [21,39]. Lityum niyobat kristali çift kırıcı bir malzemedir. Işık, kristal içinde birbirine dik olarak kutuplanmış iki dalga olarak yayılır.

Görülen 2 dalgadan bir tanesi normal, bir diğeri ise olağandışı dalga adı verilir. Bu dalgalarla ilişkili kırılma indisleri sırasıyla normal (n_o) ve olağandışı (n_e) olarak adlandırılır. Bu özellik sayesinde entegre optik sistemlerde farklı sistemli yapıların üretilmesine olanak sağlar. Fiber optik navigasyon sistemleri, telekomünikasyon sektörü ve optik polarizörler bu cihazlardan bazılarıdır.

Ayrıca, Şekil 3.4'te de görebileceği gibi, verilen değerler aralığı yaklaşık olarak 350 nm ve 5 µm arasında büyük bir aralıkla optik spektruma sahiptir. Bu geniş geçirgenlik seviyesi, LiNbO₃'ün pek çok farklı uygulamada kullanılmasını mümkün kılmıştır.



Şekil 3.4. LiNbO₃ kristalinin geçirgenlik grafiği [30]

Optik bir değişim LiNbO₃ yapısında farklılıklara sebep olur ve kırılma indisinde değişimler gözlenir. Böylece kristalin fotokırınım olayının yüksek açıklıkta olduğu görünür. Ortaya çıkan bu durum günümüzde holografik hafızaya benzer durumlar üzerinde çok çalışılan bazı uygulama alanlarında kullanılmaktadır [31,35]. Ancak LiNbO₃ yapısının birçok farklı sistemlerde kontrol dışı kırılma indisleri değişimlerine neden olduğu için istenmeyen bir yöntemdir. Bu sebeple bunun azaltılması gerekmektedir [32,39]. Fotokırınım olayının ortaya çıkma sebebi kristal içinden geçen ışığın genellikle safsızlık atomlarından kaynaklanmak üzere serbest elektronları yerel olarak toplama eğiliminde olması ve bu sebepten dolayı kendisinde meydana gelen kırılma indisinde değişimler oluşmaktadır.

Bu alttaş devamında kullanılacak diğer materyaller, elektron demeti buharlaştırma makinesi, alttaş kaplama cihazı, modelleme için kullanılacak olan hizalama makinesi ve ürün haline gelmeden her aşamayı kontrol edeceğimiz optik mikroskoplar ve alttaş difüzyon kabini kullanılmıştır. Üretim yöntemine göre prizma eşleme cihazı kullanılır. Fiziksel bir boyuta geldiğinde örneklerin yüzey pürüzsüzlüğü adımları yapılır. Bu işlemler tıraşlama-parlatma cihazında yapılır. Optik ölçümlere geçtiğinde ise fiber ek yapma cihazı, fiber için kısaltma

ve temizleme ekipmanları ve optomekanik konumlandırma mekanizması, wire-bond cihazı, fotodedektörler, dondurucu UV ışık kaynağı, sıcaklık kabini, güç kaynağı, sinyal üretici ve bias-tee kullanılmıştır [16].

Elektron demeti buharlaştırıcısına uygun olan malzeme seçimi yapılır ve elektron demeti gönderilerek seçilen alttaşı erimesi sağlanarak yapılan kaplamadır. Hassas yapılan bir kaplama yöntemidir. Titanyum malzemesini kaplamada kullanılır. Kullanılan pota Titanyum yerleştirilir ve eritme adımı yapılır. Alttaş olarak kullanılacak LiNbO_3 malzemesi üzerinde Ti metali eritilerek kaplama adımı tamamlanır. Devamındaki işlem olarak altın (Au) kaplaması yapılacaktır. Burada da alttaş LiNbO_3 üzerine buharlaştırılarak kaplama yapılır.

Rezist kaplama (spinner) işleminde ise kullanılan cihazda hazırlanan temizleme adımları yapılan alttaşa ayarlanan dönme değeri ile döndürme işlemi ile kaplama yapılır. Yapılan tez çalışmasında alttaş malzemesi olarak LiNbO_3 yonga (wafer) kullanılmıştır. Cihazda dönme hızı 4000 devir/sn ayarlanarak alttaş üzerine kaplama yapılmıştır.

Maske modelleme ve hizalama (MA6) işleminde ise tasarımı yapılan yapıyı UV ışık kullanılarak sabit bir yüzey üzerinde kopyalama işlemidir.

Mikroskop, bu kısım için maskeleme işleri yapıldıktan sonra alttaş yüzeyini incelemek ve dalga kılavuzu işlemi sonucunu genişlikleri ölçmek için kullanılır. Bu çalışmada M20X ve 40X gibi farklı hem objektif büyütme hem de bilgisayar programı ile yapılan görüntülemeler ve ölçümler için kullanılmıştır.

Yüzeyde oluşan derinlik farkını ölçmek için kullanılan cihazdır. Farklı noktalardan ölçüm alınır kamera yardımıyla farklı büyütülerek netlenir. Bilgisayar üzerinden cihaz yazılımı programlanır ve ölçüm alınır. Bu tez ile alttaş yüzeyinde olan Ti bazı noktalardan kalınlığı ölçülmüştür.

Difüzyon fırını; alttaşlara kaplanan malzemeleri difüz etme işlemine yarayan fırındır. Difüzyon programının yazıldığı bilgisayar arayüzü ve örneklerin yerleştirildiği kuartz tüpten meydana gelir. Kuart malzemesinden oluşan tüp içine örnek koyulur ve difüzyon işlemi için gerekli parametreler cihaza kodlanır ve LiNbO_3 malzemesi üzerine Ti metalinin difüzyon işlemi yapılmıştır.

Kesim cihazı (dicer); İşlemleri fabrikasyon aşaması tamamlanan örneklerin kesim çalışmalarının yapıldığı cihazdır. LiNbO_3 altaşa bazı yapılan işlemler sonunda daha küçük parçalarda işlem yapabilmek için kesme yapılan cihaz kullanılır. Kesme işleminde kesilen yerler bilgisayar ekranına benzer bir kontrolcüden seçim yapılarak işlem tamamlanır. Monitör ekranından kayıtlı seçimler tamamlanarak aygıt kesim işlemi yapılmıştır. LiNbO_3 altaşının fiziksel özelliklerine göre uygun kesim yapılacak lazer bıçak tercihi yapılmıştır.

Tıraşlama ve parlatma cihazı; Örneklerin kesildikten sonra yüzeylerinde kirlilikten arındırmak ve yüzeyi daha düzgün pürüzsüz hale getirmek için yapılan işlemdir. Bu işlemin yapılmasının temel sebebi ışığın örnek içinden geçmesi için yapıştırma adımlarının yapıldığı yüzeyleri parlatmak amaçlıdır. Tıraşlama işlemini yaptığımız tutucu iki bölgede oluşur. Bir parçası tıraşlama levhası diğer parçası ise örnek tutucu kısmıdır. Örnekleri yüzey tıraşlama işlemi farklı birkaç döndürme hızında gerçekleştirilmiştir.

Prizma eşleme cihazı; Cihazda prizma bulunur ölçüm prizma ile örnek arasında hava boşluğundan alınır. Difüzyon işleminden sonra kırılma indisi ölçmek için kullanılır. Cihaza prizmaya 532 nm dalgaboyunda ışık demeti gönderilir.

Üretilen aygıtta sonrasında birleştirici aracılığıyla fiber bağlantısı yapılır. Bu cihaza fiber ek yapma denir. İki aynı ya da birbirinden farklı iki fiberi ısı ile ark oluşturarak bağlama amacıyla kullanılır. Burada kullanılan ısıнын kaynağı elektronlardan oluşan ısıdır.

Fiberleri birleştirmeye hazırlamak için kullanılan soyucu ve kesici ile temizleme yapılır. Birleştirme yapılacak uçları üst tabakası (coating) 2-3 cm kaldırma işlemi ve sonrasında ucu kesilerek pürüzsüz yüzey oluşturarak ek yapmaya hazır hale gelir.

Wire-Bond cihazı; elektriksel ölçüm öncesi yapılır. Seçilen üretiminin bir kısmı tamamlanan örnek PCB (Printed Circuit Board) malzemesi üzerine yapıştırıldı. Altın (Au) teli ile örnek üzerine belirli noktalarda bağlantı oluşturulmak üzeri altın noktaları bırakılır.

Optik güç ölçer ve dedektör; işlemler devamında örneğin içinden gelen ışık gücünü ölçmede kullanılır. Bu çalışmada kullanılan dedektör InGaAs tabanlıdır. 800 nm-1650 nm arasındaki dalgaboylarına karşı duyarlıdır.

UV ışık kaynağı; entegrasyon işlemi devamında UV karşısında donan yapıştırıcıyı kurutma amaçlı kullanılan ultraviyole ışıktır yapısıdır. Giriş ve çıkış tarafına örneğin fiber eşlemesi yapıldığı sırada araya sabitlemek için uygulanan UV ve bunu kürlemek için kullanılan UV ışık kaynağı kullanılır ve sertleşme işlemi tamamlanır. Bu çalışmada UV dozu ise cihazda yer alan ekran ile süre ve şiddet yani güç parametreleri ayarlanabilir.

Gerilim ölçmek için bir güç kaynağı kullanılmıştır. Bu sistemde DC güç kaynağı olarak adlandırılır. Çalışma aralığı ± 25 V 'dır.

1 GHz değerinde sistem içerisine alınan frekansı oluşturmak için 10 MHz - 20 GHz aralığında sinyal üretici vardır. 2 giriş olmak üzere ön ve arka kısımları vardır. Ön taraftaki girişten frekans takibi ve tetikleme sağlanırken arka girişten de tetikleme yapılabilir.

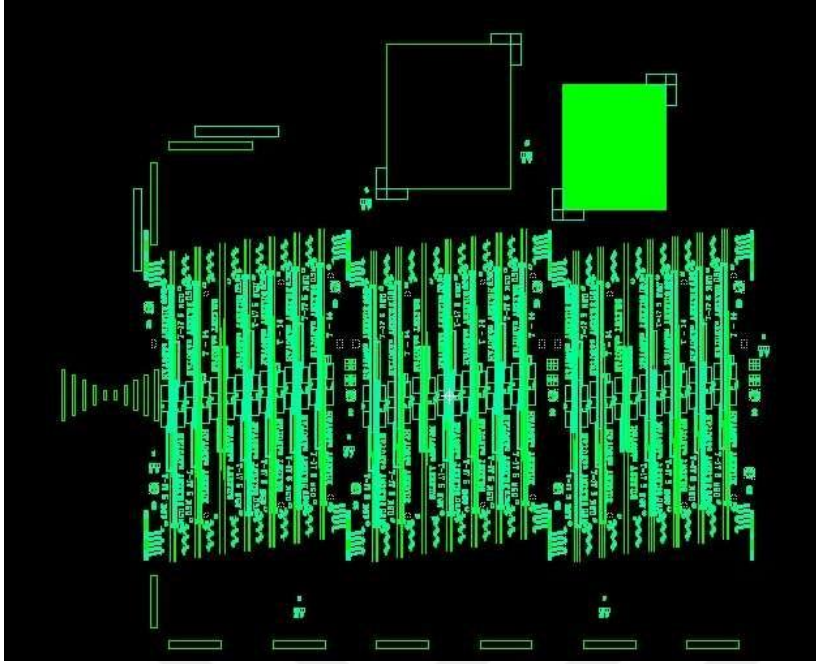
Klimatik kabin, askeri standartlar doğrultusunda belirlenen $+90^{\circ}\text{C}$ ve -40°C aralıklarında uygulanan profillerde örneklerin testlerini yaptığımız kabindir. Kabin içerisi geniş bir hacme sahiptir ve birden fazla örnek test edilebilir. Kabindeki çalışmalarda örneklerin içine doğru sırayla yerleştirilmesi önemlidir. Ardından azot açılır bunun sebebi ise ortamda oluşabilecek karlanmayı engellemek amacıyla kullanılmıştır. Klimatik kabine bağlantı bilgisayar destekli yazılım Simpati kullanılarak sağlanır. Bu yazılım üzerinden internet ile klimatik kabine bağlanır ve test profilleri yani zaman ve sıcaklık değerleri ayarlanır.

3.2. Metot

Bu çalışmada üretim adımları şu şekilde sıralanabilir; ilk olarak fotolitografi yani fabrikasyon adımları tamamlanır sonrasında aygıt ile fiber bağlantıları sağlamak amacıyla entegrasyon sürecine geçilir. Son olarak örneklerin bazı standartlarda çalışması için testlere tabii tutulur. Bu testler çevresel şartlara uygunluğunu tespit etmek için yapılır.

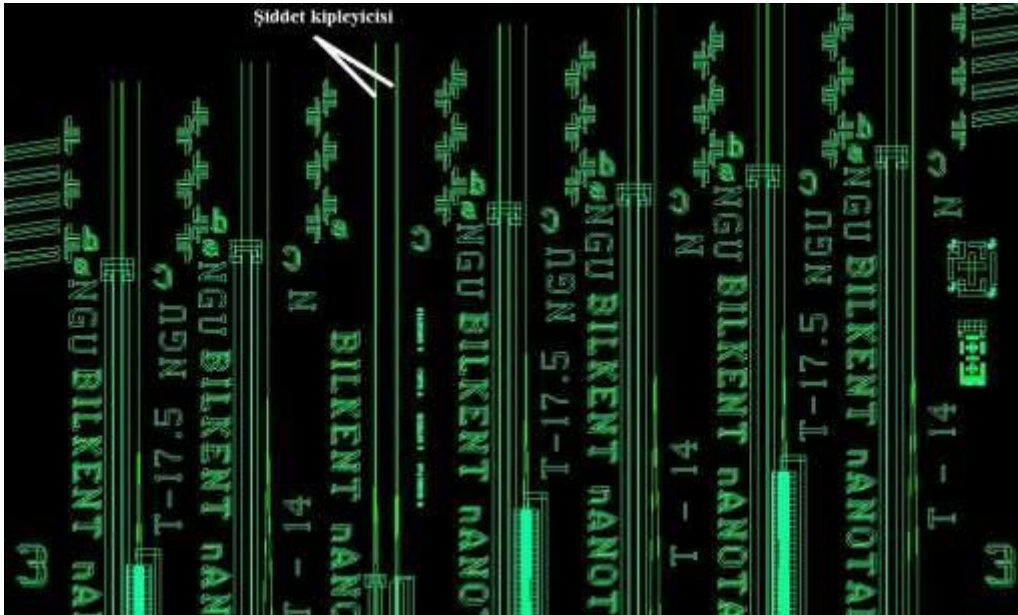
3.3. LiNbO_3 Alttaşı İçin Maske Tasarımı

Çalışmada üretilen maske yazılım üzerinden tasarlanıp üretilmiştir. LiNbO_3 alttaşı için modellemeler yapılmıştır. Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



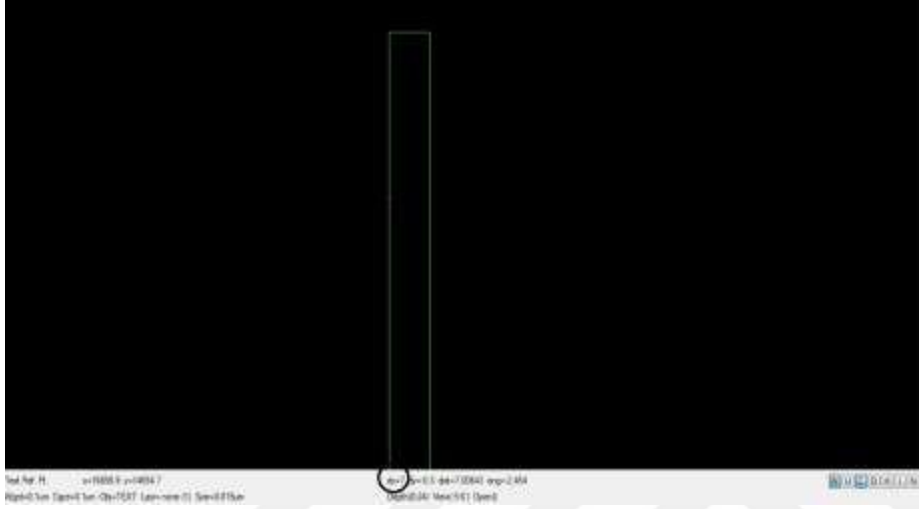
Şekil 3.5. LiNbO₃ modellemesi için maske yapısı

Tasarımı yapılan maske de üç ayrı grup örnek vardır. Her grup içinde 7 aygıt içeriyor böylece bir maske üretiminden 21 adet aygıt çıkmaktadır. 1 aygıt için bir giriş ve 2 koldan oluşan çıkış kolları vardır. Üretimi yapılan maske yapısında 1 aygıt için iki dalga kılavuzu yerleştirilmiştir. Aygıt üzerinde bir giriş ve bir çıkış ucu olan iki aygıt görüntülenmektedir.



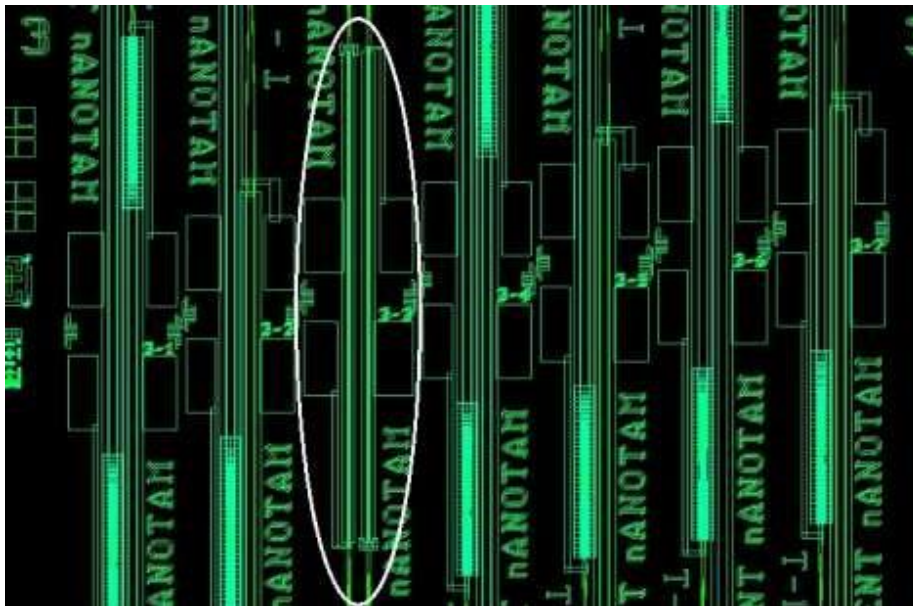
Şekil 3.6. Maske detay yapısı

Tasarlanan şiddet modülatöründe 2 dalga kılavuzu yapısı vardır. Bu şiddet kipleycilerinden 1 tanesi Şekil 3.6'daki gibi tasarlanan maske yapısında alttaş üzerine kopyalanacak iki ayrı dalga kılavuzu yapısı vardır. Belirlenen mesafelerde düz yolda ilerlediği daha sonra ise iki ayrı kola ayrıldığı görülür. Daha sonra çıkış tarafının birleştiği Şekil 3.3'te görülmektedir. Kullanılan tasarımda dalga kılavuzlarının genişlik aralıkları $7\ \mu\text{m}$ 'dir.



Şekil 3.7. Dalga kılavuzu yapısı maske görüntüsü

Tasarımlanan maske yapısının üzerinde yalnızca dalga kılavuzu yapısı değil elektrotların pozisyonu da yer alır. Bunu Şekil 3.7'de elektrot fabrikasyonunda kullanılan maskenin yapısı görülmektedir.



Şekil 3.8. Elektrotların maske üzerindeki görünüm

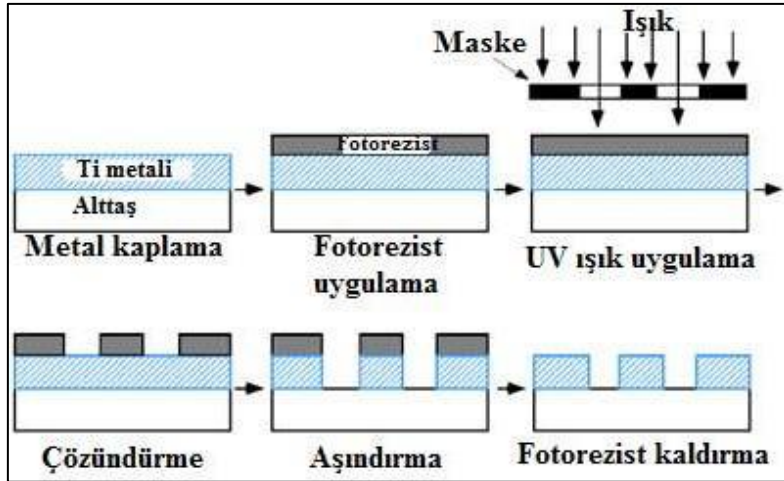
Şekil 3.8’de gösterilen çizilmiş maske üzerinde daire ile belirtilmiş bölgede 4 ayrı dikdörtgen yapı vardır. Bu maskedeki dikdörtgenler, altın telinin elektriksel yöntemi aygıt üzerinde iletimi yapmak için yapılmış yapılardır. Bağlantı işlemleri yapılması için bu sırada elektrot litografisi yapmak için altın kaplanmıştır. Tasarımını tamamladığımız ve titanyum ile üretimi gerçekleştirdiğimiz maske yapısını litografi işleminde kullanılmıştır. Belirlenen metotlar doğrultusunda fotolitografi tekniği ile üretimi yapılmak üzere yöntemler belirlenmiştir.

3.4. LiNbO_3 Altaşlı Şiddet Kipleyicisi Fotolitografi Tekniği ile Üretimi

Daha önce de belirtildiği gibi çalışmalarda ilk olarak fotolitografik adımlarla üretim gerçekleşmiştir. Tez çalışmasında kullandığımız ve en çok kullanılan teknik UV-litografidir. Dalga boyundaki ışığa duyarlı bir rezist malzemesi ve UV ışık aracılığıyla maske modeli altaşa geçirilir. Tasarımın şekli kimyasal birkaç adım sonrasında kontrollü olarak istenilen boyutlarda yarıiletken malzeme üzerine kopyalanmış olur. Model genellikle mikro ve nano ölçülerindedir. Hassasiyeti kimyasal süreçlerdeki işlemler ile belirlenir. Bu çalışmada temiz odada titiz bir çalışma ortamında LiNbO_3 altaş üzerine yapılan adımlar belirtilmiştir:

1. Altaş temizliği
2. Optik mikroskopta inceleme
2. Rezist kaplama
3. Fotomaske kopyalama
4. UV ile dondurma
5. Çözündürme işlemi (fotorezisti çözündürme)
6. UV ışıktaki oluşan oksit yapıyı aşındırma (etching)
7. Son kalan rezisti tabakadan ayırma

Bu tez çalışmasında yapılan litografi Şekil 3.9’da görülmektedir.



Şekil 3.9. Fotolitografinin aşamaları

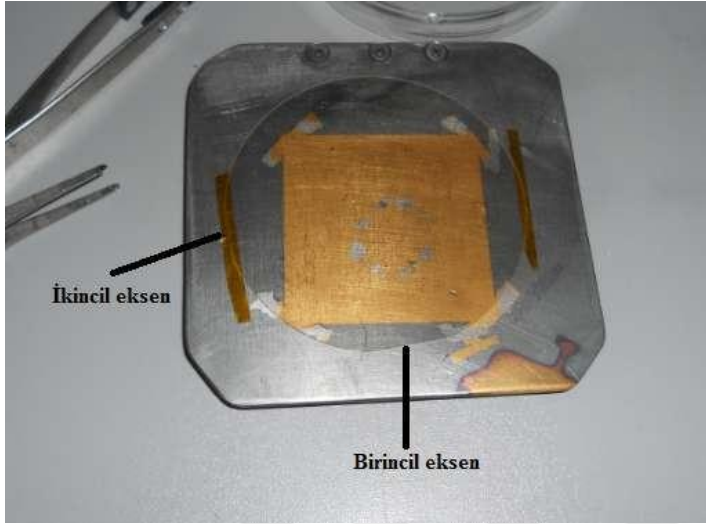
3.5. LiNbO_3 Alttaş Ti Kaplama İşlemi

Bu tezde, LiNbO_3 alttaşlı modülatör fotolitografi ile UV tekniği ile geliştirilip tamamlanmıştır. Sırasıyla ilk olarak yüzey üzerine Ti metali eritilerek elektron buharlaştırma cihazında yüzey kaplaması tamamlanmıştır. LiNbO_3 yonga Şekil 3.10'de verilmiştir.



Şekil 3.10. LiNbO_3 alttaş

Bu yapıda olan LiNbO_3 alttaş içinde birincil ve ikincil eksen bulunur. LiNbO_3 yonga; Ti (Titanyum) kaplamada tutucuya yerleştirilir. Hızlı üretimi tamamlamak için kaplama işleminde 4 tane alttaş cihaza yerleştirilir.



Şekil 3.11. LiNbO_3 yonga birincil ve ikincil eksen gösterimi

Alttaş cihaz içerisinde sabitlenmiştir. Şekil 3.11’de görüldüğü gibi cihaz işlem için hazırlanır. İlk olarak Ti malzemesi bir potaya koyulur. Ti malzemesi eritilerek pota içerisinde elektronlar buharlaştırır ve alttaş üzerine kaplaması gerçekleşir. Şekil 3.12’de görülmektedir.



Şekil 3.12. Kaplama cihazı içi gösterimi

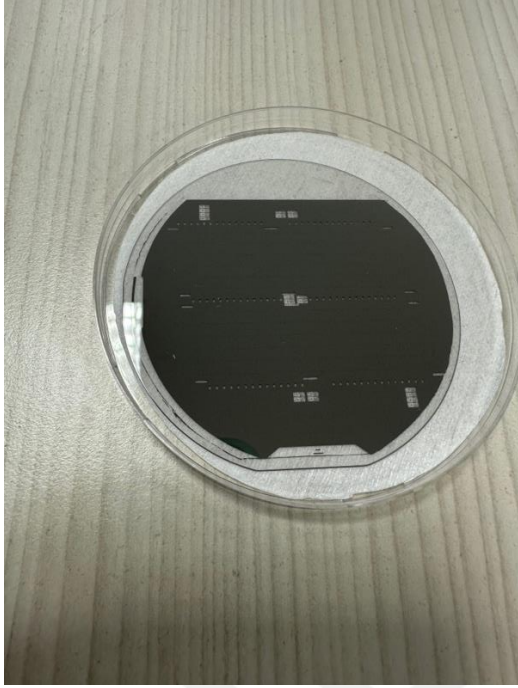


Şekil 3.13. Kaplama cihazı dış görüntüsü

Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te elektron demeti buharlaştırma cihazının dış ve iç görüntüsü gösterilmiştir.

Elektron Demeti Buharlaştırıcısı bir fiziksel kaplama yöntemidir. Bu kaplama yöntemi ile Altın, Platin, Molibden, Alüminyum, Titanyum vb. metaller vakum ortamında buharlaştırılarak hassas kalınlık kontrolü yapılarak kaplanabilir. Bu nedenle mikro ve nanoteknolojik uygulamalarda önemli bir yere sahiptir. Bu cihaz ile kaplama işlemi, belirli bir hızlandırma gerilimi altında oluşturulan elektron demetinin, bir manyetik alan etkisiyle buharlaştırılmak istenen metalin bulunduğu potaya yönlendirilmesiyle gerçekleştirilir. Metal üzerine düşürülen elektronlar enerjilerini aktararak metali kopartıp buharlaştırırlar. Buharlaşan bu metal soğutulan bir hedef bölgede bulunan örnek yüzeyine yapışarak kaplanır [10].

Ti metalinin erimesi için yapılır. İlk olarak buhar haline gelip ve erir bu işlemlerden önce kontrollü olarak 10-6mbar arasında vakuma alma işlemi yapılır. Cihaz içine yani ortamın hava alınıp erime işlemi gerçekleşir. Her bir ağıza aynı homojenlikte kaplama yapılacağı için döndürme işlemi kaplama yapılır. LiNbO₃ alttaş üzerine Ti kaplaması Şekil 3.14' da gösterilir.



Şekil 3.14. Titanyum kaplaması yapılmış LiNbO₃ yonga

3.6. Rezist Kaplama

Tüm fabrikasyon adımları temiz oda da gerçekleşmeye devam ederken kaplama sonrasında örnek yüzeyine temizleme adımı yapılır. Bu işlemler sırasında aseton ve alkol kullanılır. Bunun yapılma amacı ise kaplama sonrasında örnek yüzeyini bir sonraki adımlar için düzgün pürüzsüz bir yüzey hazırlamak ve pis kalıntıları temizlemektir. Asetona-alkol yıkama işlemi Şekil 3.15’te görülmektedir.



Şekil 3.15. Temizleme işlemi

Temizlemeden sonra kaplama adımlarına hazırlanmıştır. Fotorezist malzemesinin yapısı fotolitografideki uygulanan ışığa duyarlıdır ve böylece kaplama tabakası oluşturulur. Bir yüzey üzerinde desenli kaplama oluşturulacağı için fotolitografi öncesi yapıma hazırlanmıştır. Fotorezist litografide bir alttaş üzerine film kaplamada kullanılan polimer bazlı ışığa veya X ışığına duyarlı malzemedir. Bir elektronik maskenin yansıttığı elementlerle projeksiyon maskesi boyunca ışığa maruz bırakılır ve maske görüntüsü alttaşa aktarıncaya kadar pozlama devam eder [40,41].

Işınlanmayla yapı ve özelliklerindeki değişikliklere göre fotorezistler negatif ve pozitif olarak ayrılır. Polimer bir film ışınlandığında çözünürlüğü kaybederse daha sonraki çözündürme işleme sadece ışınlanmamış alanları kaldırır ve alttaş üzerinde negatif maske kalır. Bu negatif fotorezist uygulamasıdır. Işınlanmadan sonra fotorezist çözünür hale gelirse daha sonra ışınlanmamış alanlar (ışınlanma ve maskelenme işlemlerinden sonra) çıkarılır ve sonuç olarak alttaş üzerinde pozitif maske kalır. Bu fotorezistlere pozitif rezist denir.

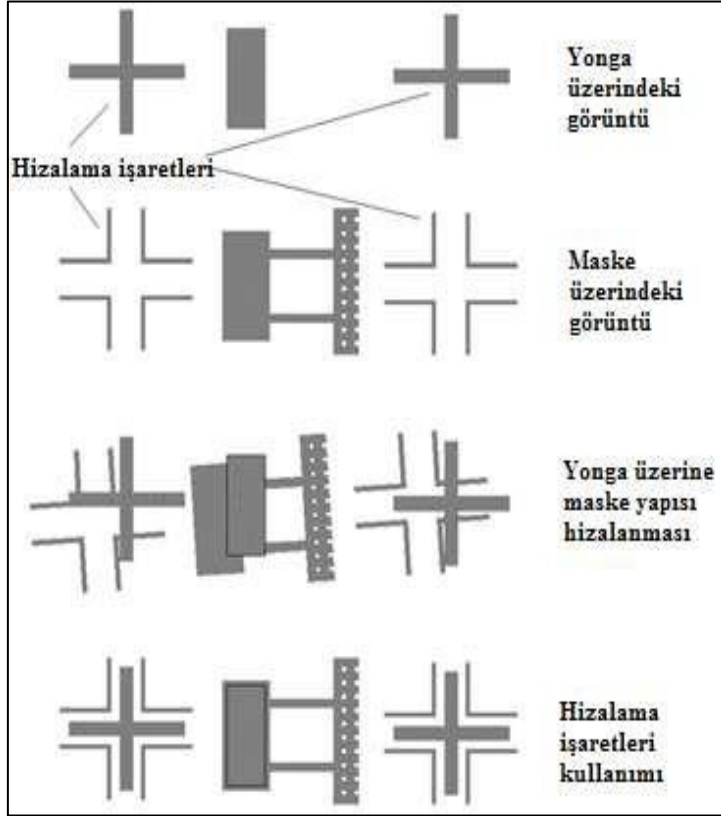
Kaplama adımından daha önce LiNbO_3 yapılar belirlenen sıcaklıkta ve sürede 110°C 'de sıcaklıkta 1dk sürede sıcak tabaka (hot plate) hazır hale getirildi. Bu ısıtma işlemiyle beraber işlemlerin yapılacağı yüzey temizliği gerçekleştirildi ve homojen yüzey tabakası oluşturulmuştur. Üretimin devam edeceği yüzeyden yabancı maddeler buharlaştırılıp bundan sonraki süreç için temiz hale getirilmiştir.

Spinner içinde kaplama işlemi yapılmıştır. Spinner içine yerleştirilen örnek ayarlanan 4000 devir/sn hızında döndürme işlemi yapılarak kaplama yapılmıştır. Kaplama işlemi bittikten sonra, alttaş yüzeyinde fotorezist artıklarını çıkarma amacıyla 2 dakika ısıtılarak gerçekleştirildi. Homojen rezist tabakası oluşturmak için ve oluşan kalınlığı gidermek için fazlalık rezistler temizlenmiştir. Bu işleme fotorezist kalıntısı kaldırılması denir

3.7. Alttaş Üzerine Maske Tasarımının Geçirilmesi

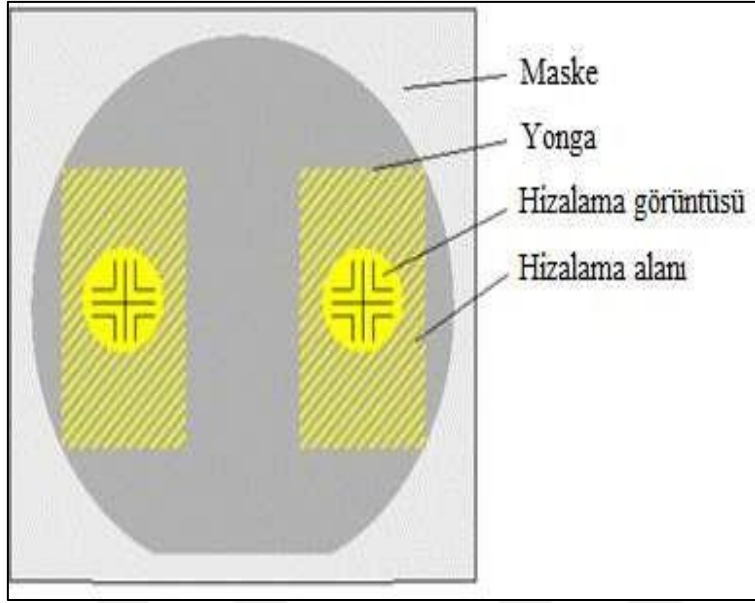
Bir sonraki adım olan maske tasarımının alttaş üzerine geçirilmesidir. Bu işlem için ilk olarak hizalama adımları yapılır. Maske cihaza yerleştirilir ve uygun bağlantıları yapılır ve kopyalama işlemi için hazırlanır. Tıpa tıp aynı modeli geçirmek için; şekillerin maskeden alttaş yüzeyine belli modern yapılarla yani işaretlemelerin modellerin alttaş

yapıya geçirilmesidir. Basit bir maske tasarımında oluşan şekiller Şekil 3.16’da görülmektedir.



Şekil 3.16. Kopyalamada kullanılan modeller [37]

Tasarımda kullanılan modeller hazırlanan maske yüzeyinde bulunur. İlk iş maske tutucuya sabitlenir cihaza yerleştirilir ve altta hizalama alanına paralel yerleştirilerek sabitlenir. Bu şekilde maskeleme adımı sonlandırılmış olur. Şekil 3.17’de hizalama işaretlerinin maske üzerinde birincil eksenindeki konumunu göstermektedir.



Şekil 3.17. Hizalama işlemi için modellerin yerleştirilmesi [45]

LiNbO₃ malzemesi üzerine cihazı uygun konumlandırmalar mekanik hareketlendirmeler yapılarak maske altına aynı hizaya getirilerek işlem tamamlanmıştır. Maske ile yüzey arası yaklaştırılır ve temas olduktan sonra örnek ayrılır. Sonrasında UV adımına geçilir ve belirtilen süre 13 saniye olmak üzere UV uygulaması yapılır. Böylece maske örnek üzerine kopyalanmıştır. Bu işlemlerin yapıldığı cihaz Şekil 3.18’de verilmiştir.



Şekil 3.18. Maske ve alttaş kopyalama cihazı

Bu üretimin hatasız olması için önemli parametreler vardır. Bunlar ışık kaynağının dalga boyu, UV ışığının gücü gibi özellikler doğru üretim için önemlidir. UV ışık gücü örneğin yüzeyindeki fiziksel özelliklerini etkiler. Her fotorezist için ayrı dalga boyları vardır bu sebeple her ışığa duyarlı bir rezist yapısı mevcuttur. Eğer ki alttaş üzerinde yani rezist katmanının altında yansıtıcı bir kat var ise UV uygulama miktarını arttırarak işleme devam etmek gerekir. Tabaka hem gelen ışıklara maruz kalır hem de UV miktarı malzeme yapısını değiştirmektedir. Aşırı UV miktarı ile pozitif fotorezist için rezist tabakası kenarlarda aşınabilir. Rezist tabakası az UV olursa; kopyalanma adımı tam anlamıyla gerçekleşmez, bozulmalar meydana gelir.

3.8. Çözündürme İşlemi

Maskenin üzerine alttaş üzerine geçirme işlemi yapılır. Bundan sonra da çözündürme işlemi yapılır. Rezist sarı ışık harici ışıklara duyarlıdır. Böylelikle UV ışığa maruz bırakıldığı durumda yapısı bozulmaktadır. Bu işlem sırasında rezist malzemesinden UV ışığına karşı duyarsız olanlar yüzeyde kalmaya devam ederken duyarlı olan bölgelerin rezisti bozulur. Böylece yüzeyde yapısı değişmiş rezist bölgesinin çıkmasına çözündürme işlemi olarak adlandırılır. Bu işlem için iki malzemeye ihtiyacımız vardır bir tanesi saf su diğeri ise çözündürme kimyasalıdır. Bu iki karışım bir kapta hazırlanır ve alttaş malzemesi bu karışıma daldırılır [43,44].

Sonuca bakıldığında UV ışığa karşı duyarlı yerler bozulmuştur. Fakat ışığa maruziyetin olmadığı noktalarda değişim olmamıştır. Maske tasarımında dalga kılavuzunun bulunduğu yerler koruyucu rezist ile kaplıdır ve bu sebeple herhangi bir bozulma meydana gelmemiştir. Maske tasarımının yanında fiziksel olarak bakıldığında malzeme yapısı Krom'dur. Kromun avantajlarına bakıldığında gelen ışığı yansıtır. Böylece dalga kılavuzunun olduğu noktalarda kaplanan rezist UV ışığa maruz kalmaz. Çözündürme işlemi karışıma daldırılarak çözünme sağlanır. Çözündürme işlemi yapılacak LiNbO_3 malzemesi ısıtıcı yüzey üzerinde belirlenen sıcaklık ve sürede tutulur. Bu yapılan işlemin amacı ise litografiye daha dayanıklı bir yapıda olmasıdır.

Alttaşın tüm yüzeyi Ti metali ile kaplı olan yer dalga kılavuzu üzerinde rezist bölgesi korunur. Bu işlem sonucunda dalga kılavuzları mikroskopta detaylı bir şekilde kontrol edilmiştir.

3.9. Aşındırma İşlemi

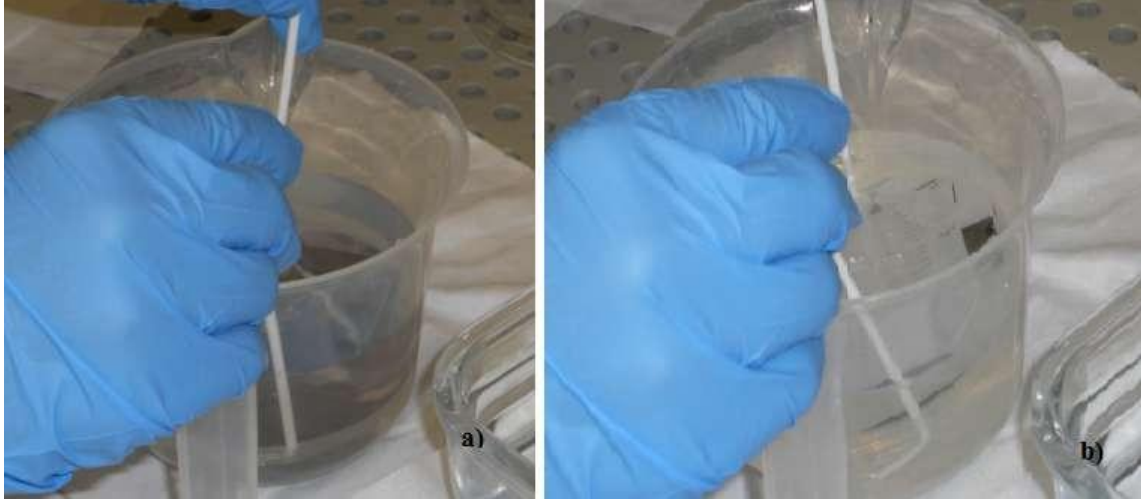
Bu işlem fabrikasyon da önemli bir etkisi vardır. Alttaş üzerinde rezist kaplı olmayan yerleri yok etme işlemidir. İki şekilde incelenir. Bunlardan biri ıslak diğeri kuru aşındırmadır.

Kuru aşındırma yöntemi kimyasal aşındırma olarak da adlandırılır. Aşındırmanın farklı geri dönüşümleri olur. Yöntem anizotropik bir dağlamadır fakat düzgünlük ıslak dağlamadan daha fazla negatif sonuçları olur. Üç farklı şekildedir, fiziksel dağlama, püskürtme yoluyla dağlamadı, kimyasal dağlama ve fizokimyasal kompozit dağlama yani reaktif iyon aşındırmadır. Farklı olmasının sebepleri şunlardır; plazmadaki iyonların fiziksel atomları, aktif serbest radikallerin kimyasal reaksiyonu ve alttaş malzemesinin yüzey atomlarıdır.

Plazma yönteminde kullanılan gaz kısmen moleküllere ayrılmış gazdır. Ayrışma ise elektronlara iyonlara ve daha fazla kimyasal aktif yapıların bulunduğu maddelere ayrışma olur. Kuru dağlama yönteminde en önemli ve pozitif sonuç vermesinin sonucu Kuru dağlamanın en büyük avantajı “anizotropik dağlama” dır. Ancak kuru dağlamanın seçiciliği ıslak dağlamaya göre daha düşüktür. Bunun nedeni, kuru dağlamanın dağlama mekanizmasının fiziksel etkileşim olmasıdır; Bu nedenle, iyonların etkisi sadece aşındırma filmini değil, aynı zamanda fotorezist maskeyi de kaldırabilir.

Islak aşındırma; alttaşı uygun bir kimyasal çözeltiye daldırmak veya söndürme için kimyasal çözeltiyi alttaş üzerine püskürtmek ve elde etmek için çözelti ile aşınmış nesne arasındaki kimyasal reaksiyon yoluyla filmin yüzeyindeki atomları çıkarmaktır. İzotropik bir durumdur her bölgede aşınma şekli aynıdır. Sıvı çözücü olarak genellikle HNO_3 , HF gibi asitler kullanılmaktadır. Çözücü sıvı çözünecek maddenin kimyasal yapısını bozmaz.

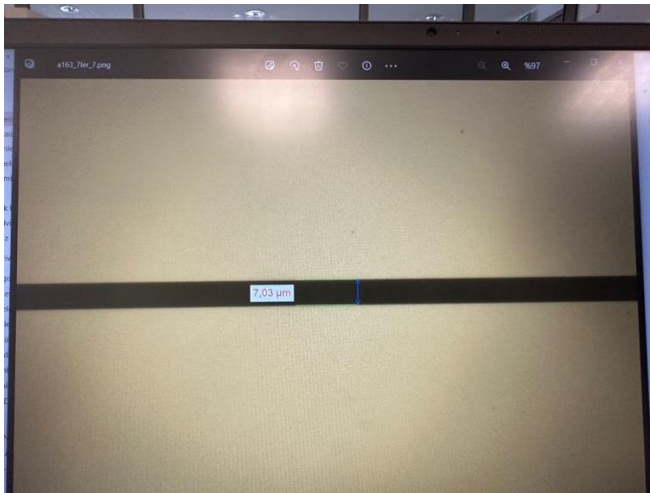
Hazırlanan bu tez de yöntem olarak ıslak aşındırma yöntemi kullanılmıştır. Ti metalini aşındırmak için su, H_2O_2 ve HF malzemesi aşındırıcı sıvı olarak kullanılmış ve bir kapta karıştırılmıştır. Bu malzeme içerisine Ti kaplı alttaş Şekil 3.19’da gösterildiği gibi kaba daldırıldı.



Şekil 3.19. a) Aşındırma öncesi b) Aşındırma sonrası

İlk Şekil a’da Ti malzemesine daldırılmadan önce bu şekilde görülür, şekil b’de ise aşındırma sonrası alttaş malzemesinin renginin değiştiği gözlemlendi. Alttaş üzerinde bulunan bozuk halde bulunan rezist ile korunmayan Titanyum malzemesini ıslak aşındırma tekniği ile giderilmiştir. Daha sonra saf suya daldırılmıştır.

Böylece amacı yerine gelmiştir yani dalga kılavuzu yapılarının üzeri aşınmamıştır. Aşınmamış bölgenin sebebi rezist tabakasının koruyucu olması kaplı bölgeyi ise Ti ile aşındırılmıştır. Alttaş malzemesi öncelikle alkol ile yıkanmıştır. Daha sonra rezisti çözmek için aseton kullanılmıştır. Bu sayede rezist tabakası da kaldırılarak dalga kılavuzu ortaya çıkmıştır. Dalga kılavuzu genişlikleri aşınma sonrası ölçülmüştür mikroskop altında Şekil 3.20’de ölçümü görülür.

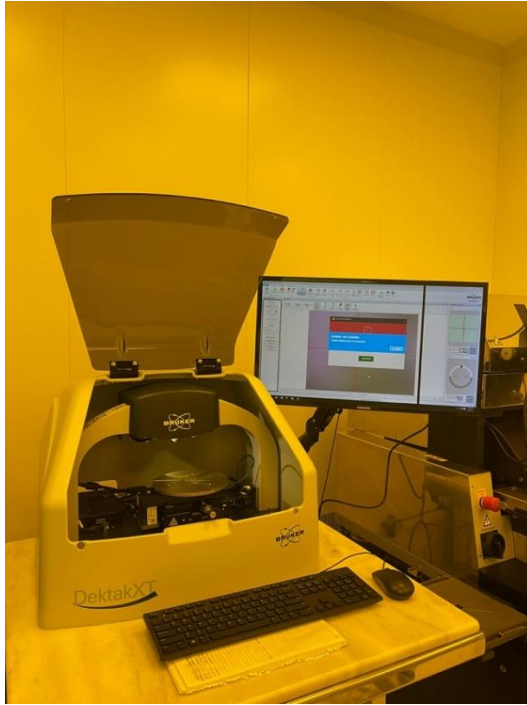


Şekil 3.20. Dalga kılavuzu genişliği

Tasarlanan yapıda genişlikler 7 μm 'dır. Fakat üretim sonrasında fotolitografide genişlik ölçümü değişmektedir. Bu ölçüm sonucunda değerler 7 ve 8 μm olarak ölçülür. Bazı araştırmalar sonunda %1.86 değerinde bir fark ortaya çıkmıştır. Bu çıkan fark deneysel çalışmalar sırasında meydana gelmiştir.

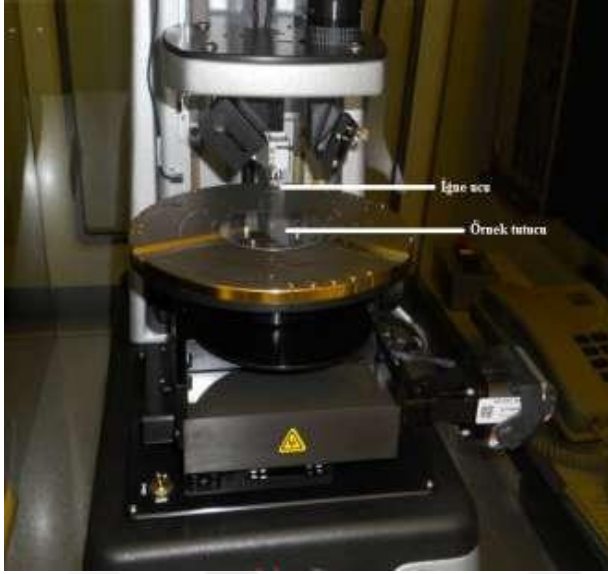
3.10. Ti kaplamasının Dektak Cihazında Kalınlığı Ölçümü

Mikroskop altında dalga kılavuzu yapılarının genişlikleri ölçüldü ve sonrasında dektak ile Titanyum kaplama kalınlığı ölçülmüştür. Kullanılan dektak cihazı Şekil 3.21'de verilmiştir.



Şekil 3.21. Dektak Ti kalınlığı ölçüm cihazı

Dektak genel olarak katı haldeki malzemelerin yüzey pürüzlülüğünü, yüzeye temas eden (mekanik profilometre) farklı çaplardaki elmas ucun, numune yüzeyinde hareket etmesi vasıtasıyla ölçen cihazdır. Tutucunun üzerine yerleştirilen örnek iğne ucu örneğe fiziksel olarak temas ettiğinde ölçüm yapar. Mekanik olarak sabit sistemde iğne tutulur ve kol sağa sola aşağı yukarı hareketi sağlanarak farklı noktalarda yükseklik ölçümü yapılarak birkaç değer elde edilir [44,46]. Şekil 3.22'de iğne ucu ve örneğin yerlerinin görüntüsü verilmiştir.

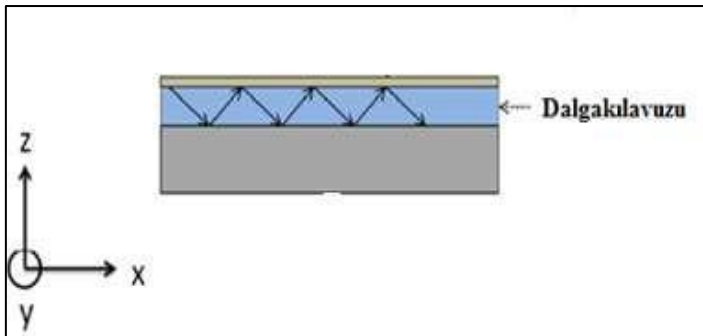


Şekil 3.22. Örnek ve iğne ucu

Çalışmamızda örnek sistemde ölçüm için hazırlanır ve Ti kalınlığı ölçmek için dalga kılavuzu üzerinde iki farklı nokta belirlenip ölçüm tamamlanır. Noktalar arası değişim bilgisayar üzerinden ölçülmüştür. Birkaç noktadan ölçülerek ortalaması alınır ve kalınlık ölçüsü belirlenir.

3.11. Tasarlanan Dalga Kılavuzu ve Ti Difüzyonu ile Dalga Kılavuzu Üretimi

Dalga kılavuzu optiğin ve sesin ve aynı zamanda elektromanyetik dalgaların içinde ilerlediği ortama denir. Yarıiletken dalga kılavuzu gibi farklı optiğin çeşitleri vardır. Bunun yanında farklı geometrilerde örneğin kanal, düzlem gibi dalga kılavuzları mevcuttur. Kullanılan iki boyutta görülen düzlem üzerindeki dalga kılavuzu Şekil 3.23'te görülmektedir [41].



Şekil 3.23. Düzlem üzerinde tasarlanan optik dalga kılavuzu yapısı [29]

Şekil 3.19’da görüldüğü gibi dalga kılavuzu içinde ışık belirtilen doğrultuda ilerler. Verilen görseldeki oklar şunu anlatır iç bölgede oluşan iç yansımayı göstermektedir. Yüksek kırılma indisi olan bölgeye doğru ışık her zaman ilerler daha düşük kırılma indisli bölgeye göre daha büyük açı ile ilerler. Işık ise bunların sonucunda düşük indise sahip bölgede bulunamaz ve ışık geri yansır. Işık yüksek kırılma indisi olan bölgede tamamıyla bulunur ve burada hapsolür [41,47].

Kullanılan alttaş malzemesi olan LiNbO_3 çok yüksek bir elektroptik katsayısı vardır. Diğer özellik olan $1.55 \mu\text{m}$ dalgaboyunda optik geçirgenliği yaklaşık %80’dir. Çok sık tercih edilen ve daha çok optoelektronik modülasyon teknolojisinde kullanılan malzeme olmuştur. Kaliteli ve yüksek verimlilik sağladığından bu teknoloji için çok uygun bir alttaş malzemesi olarak kullanılır hale gelmiştir. Optik entegre cihazlarda tercih edilir olmuştur [41].

LiNbO_3 üzerinde birkaç teknik ile dalga kılavuzu oluşturulmuştur. Sık kullanılan Ti difüzyonu diğer yöntem ise proton değişimidir. Bu tez çalışmasında Ti metal kaplama yöntemiyle LiNbO_3 alttaş üzerinde dalga kılavuzu oluşturulmuştur [19].

Difüzyon yönteminde Kuartz tüp bölgesine örnekler yerleştirilmiştir. Bu çalışmada Ti malzemesi yaklaşık 900°C – 1200°C ve 10-14 saat aralığında gerçekleşmiştir. Metal difüzyonu genel olarak 1000°C sıcaklıklarda ve yaklaşık 7-10 saat zaman ile iç bölgesine alttaşın difüz etmesi işlemidir. Böylece dalga kılavuzu yapısı oluşturulmuştur. Şekil 3.24’de difüzyon cihazı gösterilmektedir.



Şekil 3.24. Difüzyon cihazı

Örneklerin difüzyonu ile ortaya Li_2O gazı çıkmaktadır. Altaş malzemesi LiNbO_3 olduğundan ortaya LiO_2 gazı birikir bu da istenmeyen kirliliği ortaya çıkarır. Aynı zamanda istenen kırılma indisini azaltır. Bu da elektro-optik özellikler negatif yönde etkiler. Bu oluşuma engel olmak adına tüp içerisine O_2 ve N_2 gazları eklenir. Li iyonu mobilitesi yüksek olduğundan yüzey üzerinde Li_2O gazı birikmesini engeller. Diğer bir ifadeyle difüzyonla Li_2O sistemden dışarıya atılır ve istenmeyen kirlilik oluşmaz [9,14,19].



Şekil 3.25. Ti difüzyonlu dalga kılavuzu yapısı

Difüzyon işleminden sonra dalga kılavuzu yapısı Şekil 3.25'te görülmektedir. Bu görüntü mikroskop altındadır.

Mg, Ni, Zn, Fe gibi metaller difüzyonda kullanılır. Çinko, Nikel ve Magnezyum gibi iki değerlikli metalik atomların difüzyonunda n_e azalmaktadır. Kullanılan malzeme Magnezyum olduğunda n_o kırılma indisi de azalmaktadır. Krom, Demir ve Titanyum malzemelerin üç veya dört değerlikli atomlar LiNbO_3 içinde malzeme n_o ve n_e her iki değerinde de azalma vardır. LiNbO_3 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 sistemlerde LiNbO_3 malzemesi içerisine Titanyum bazı teknolojilerde kullanılmaktadır.

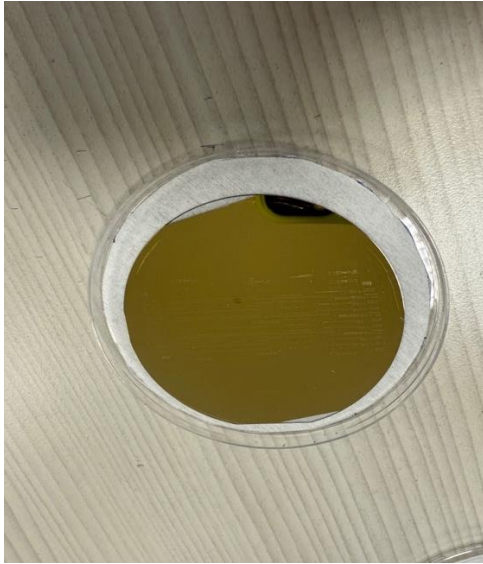
Mg, Ni, Zn, Fe gibi metaller genellikle difüzyonda kullanılır. Ni, Zn, Mg gibi ikili değerlikli metalik atomlar, difüzyon sırasında n_e azaltılır. Mg kullanıldığı zamanlarda kırılma indisinde azaldığı görülmüştür. Öte yandan, Fe, Cr ve Ti gibi üç ya da dört değerlikliğe

sahip atomlarda ise LiNbO_3 içine difüze olduğunda, hem n_o hem de n_e değerlerinde artış gözlenir. LiNbO_3 kristal yapısında bulunan iki değerliğine sahip atomlarda genellikle Li atomları yer alanındayken Nb atomlarında ise üç veya dört değerlikli atomlar yer alır. Pek çok metal difüzyon için kullanılsada, elektro-optik cihazlar için LiNbO_3 içine Ti difüzyonu optoelektronik teknolojide sıkça tercih edilir.

Diğer metallere göre Ti difüzyonunda n_o ve n_e kırılma indislerinde $\Delta n_e < 0.04$ ve $\Delta n_o < 0.02$ olacak şekilde artış gözlenmiştir. Bu görülen kırılma indisindeki artışın sebebi Titanyum metalinin kayıp vermeden dalga kılavuzunun içine nüfuz etmesini sağlamaktır. Modülatör üretiminde Ti difüzyonu ile üretim yapılmıştır [19].

3.12. Altın Kaplama

Altın kaplama ile alttaş üzerinde altın kaplama işlemi yapılır. Au kaplamada, elektron demeti buharlaştırma yapılarak Ti kaplama işlemi yapılan cihaz ile kaplama tamamlanmıştır. Altın malzemesi alttaş olan LiNbO_3 yüzeyini tutmaz ve bu sebeple öncesinde Ti kaplaması yapılır. Daha sonra Altın kaplanmıştır. Şekil 3.26'da gösterilmiştir.

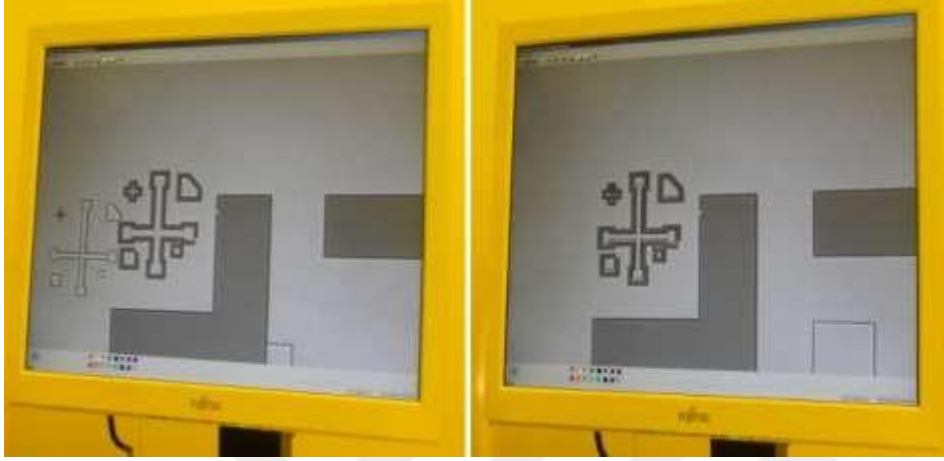


Şekil 3.26. Altın kaplaması yapılan LiNbO_3 yonga

3.13. Elektrot Litografisi

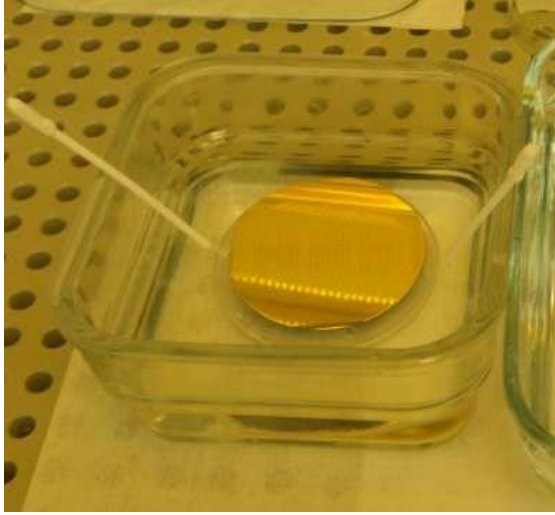
Elektrot litografisi örnek üzerine elektiriksel bağlantıların ve çalışmaların yapılması için yapılan işlemdir. Bu çalışmada altın kaplanan LiNbO_3 malzemesi aseton ve alkol ile iyice

temizlenmiştir ve yüzey pürüzsüzlüğü oluşturulup rezist malzemesi kaplanmıştır. Daha önce de kullanılan maske modelleme cihazı ile örnek ve altın kaplanan yüzeye yeni kopyalama işaretkerinin olduğu model kopyalanmıştır. Maske hizalama yapılan maske yapısı Şekil 3.27’de verilmiştir.



Şekil 3.27. Elektrot litografisi işlemi

Maske yapısı diğer işlemde olduğu gibi UV ile alttaş üzerine geçirildi. UV ışığa maruz kalan rezist tabakası bozulmuştur ve saf su ve çözündürme malzemesi karıştırılır altın kaplaması yapılan alttaş örneği daldırılır ve rezist yapılarını kaldırarak çözündürme işlemi tamamlanır. Maske yapısı ayarlanan UV ışık altında belirli süre ve ışık gücünde kopyalanmıştır. Bu aşındırma işlemi için Kral Suyu adını verdiğimiz karışım hazırlanmıştır. Altın suyunda HCl, saf su ve HNO_3 malzemeleri vardır. Alttaş buna karıştırılıp altın aşındırması sağlanmıştır. Daha sonrasında alt tabakada bulunan Ti metalı de aşındırılmıştır. Bu işlem Şekil 3.28’de görülür.



Şekil 3.28. Altın metalı aşındırma

3.14. Alttaş Kesme İşlemi

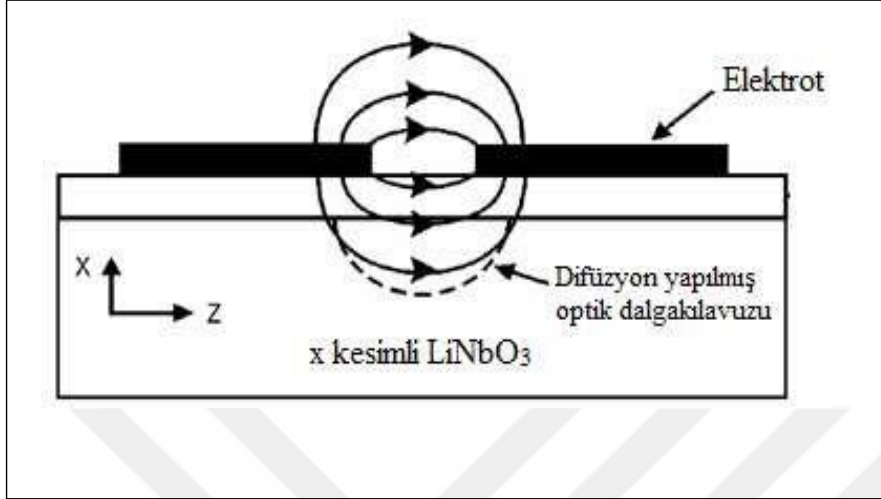
Alttaş kesme işleminde genel olarak 3 temel parçaya ayırma adımı tamamlanır. Kesme cihazı; 2 bölgede oluşur. Bu tez çalışmada alttaş halde yapışkan bant ile tutucuya yerleştirilir ve kesime hazırlanır. Şekil 3.29’da görülür.



Şekil 3.29. Kesim cihazı

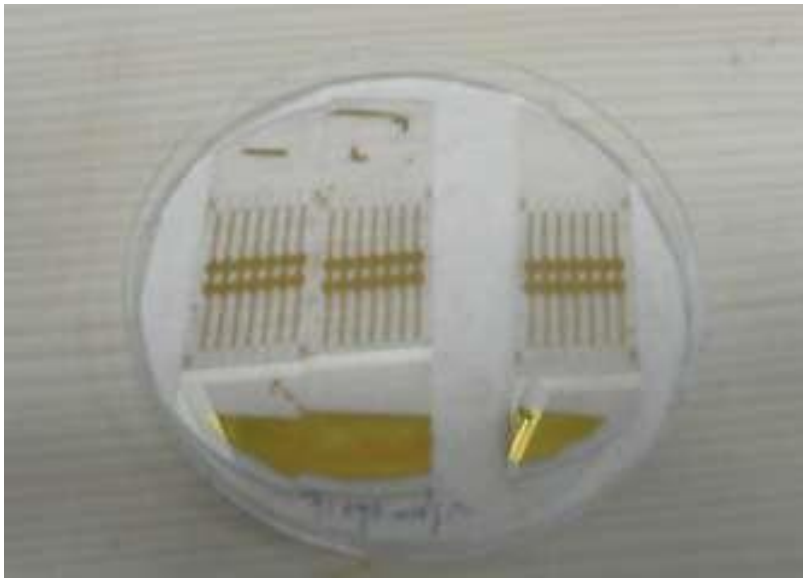
x kesimli LiNbO_3 ’te; ışık y yönünde ilerler, z kristalin normalidir ve x yönü ise ilerleme yönüne diktir. Bu sebeple kesim x yönünde olur. Dalga kılavuzu LiNbO_3 kristalinin y

yönüne paralel olursa kesim yapılır. Fakat x ekseni için alttaş yüzeyine dik olmalıdır [18]. Şekil 3.30'da gösterilmiştir.



Şekil 3.30. LiNbO₃ alttaşının x kesimli ön kesit görüntüsü [27]

LiNbO₃ alttaş malzemesi 3 eşit parçaya kesilir ve kesim Şekil 3.31'de görülür. Tüm bu parçaların düzgün prosese devamlılığı için yüzeyleri parlatılmıştır.



Şekil 3.31. 6 parçaya kesilmiş LiNbO₃ yonga

3.15. Tıraşlama ve Parlatma

Bu çalışmada kesilen örneklerin homojen olarak optik işlemlerinden geçmeleri için yüzey düzgünlüğü sağlanır bu işlemi yapmak için tıraşlama ve sonrasında yüzeyleri parlatma işlemi

yapılır. Bu işlemle birçok malzemeye uygulanır. Örneğin metal cam vb. Bu işlemlerde optik, yarıiletken ve seramik alanları kullanılır. Bu yöntem ile mikron ve nano boyutta yüzeylerin elde edilmesine imkân vardır [45]. Tıraşlama yapılır kesim sonrasında oluşmuş kirlilikleri yok etmek için ve sonrasında daha parlak ve pürüzsüz bir yüzey için parlatma aşındırma yapılır. Parlatma işlemi tıraşlama işlemi sonrasında aygıtın çalışma potansiyelini attırır. Yüzeyin tamamen düzgünlüğüne sağlanır.

Bu çalışmada kullanılan LiNbO_3 alttaşı tıraşlamak ve parlatma işlemlerini yapan cihaz Şekil 3.32’de verilmiştir.



Şekil 3.32. Tıraşlama ve parlatma cihazı



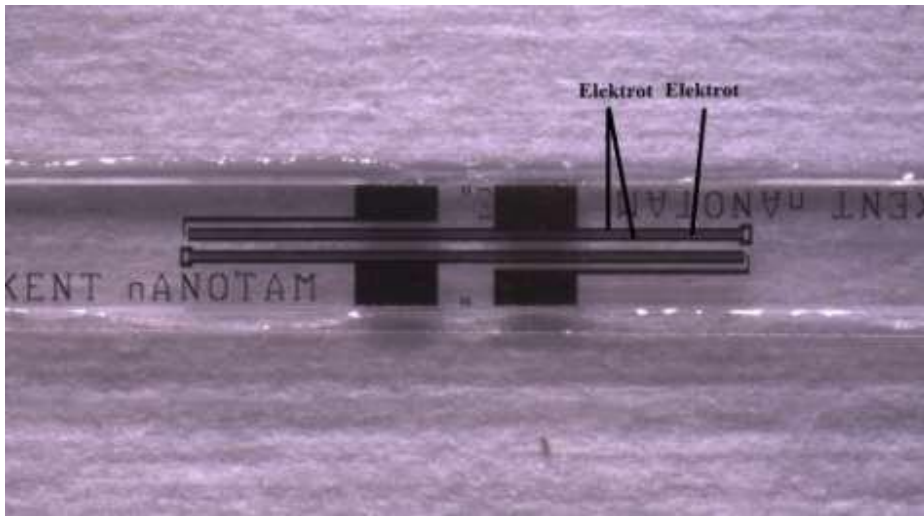
Şekil 3.33. Örnek tutucusu

Örnekler tutucuya uygun bağlantılar yapılarak yerleştirilir ve sağlam bir şekilde sıkıştırma yapılarak fakat bu sıkıştırma da örnekleri deforme etmeyecek şekilde ayarlamalar yapılır ve plakaların üzerlerine yerleştirilir. Tıraşlama 15 rpm, parlatma ise 30 rpm hızında döndürme işlemi yapılarak devam ettirilir. Kullanılan tutucu Şekil 3.33'te gösterilmektedir. İşlem sonrasında temizleme yapılmıştır. Bu örnekler daha sonra 6 parçaya bölünmüştür. Daha sonra her biri optik aygıt olarak isimlendirilir. Kesilen 6 örnek Şekil 3.34'te gösterilmektedir.



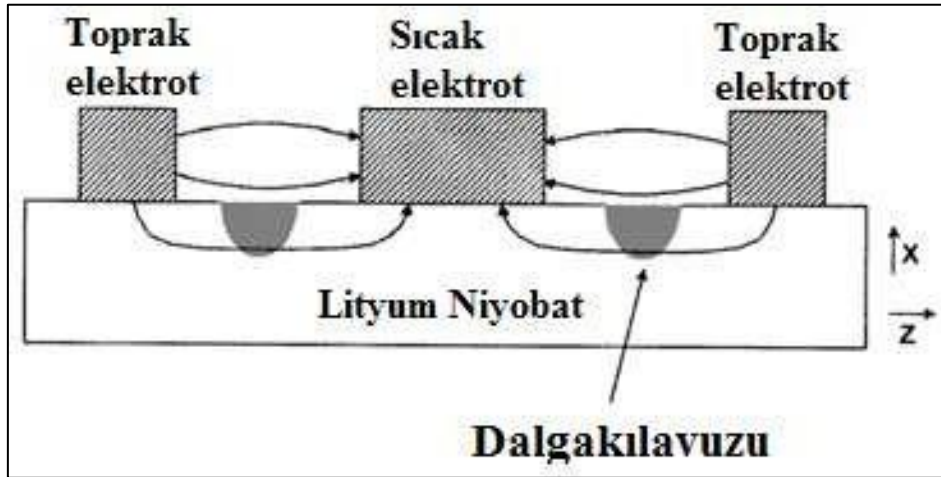
Şekil 3.34. Kesim işlemi sonunda 7 örnek

Şekil 3.34'te gösterilen örnekler mikroskop ile incelenip fotoğrafları çekilmiştir. Elektrotların detaylı olarak Şekil 3.35'te verilmiştir.



Şekil 3.35. Elektrot yapısı

Maske yapısında elektrotlar ikisi (+) uca, bir tanesi ise (-) uca bağlantı yapılmıştır. Kullanılan ana malzeme elektrotların arasında bulunur. Üretimi tamamlanan modülatörün görüntüsü ön kesit hali Şekil 3.36’da gösterilmektedir [49].

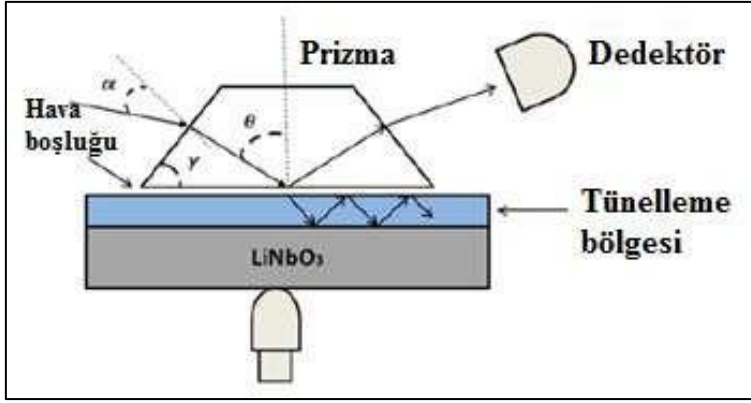


Şekil 3.36. Elektrot ve dalga kılavuzu yapısının ön kesit görüntüsü [29]

Şekil 3.32 x eksenli alttaş bulunmaktadır. Dalga kılavuz yapısı elektrotların arasındadır. Aynı polariteye sahip çift elektrot bulunur elektrik alana geldiğimizde çizgiler topraklanan elektrotlardan sıcak elektrotlara doğru ilerleme gösterir. Yani açıklarsak elektrik alan çizgileri her zaman birbirinden karşı yönlerle doğru eğilim gösterir artı yönden diğer bir yöne faz eğilimi oluşturur.. Buna göre örneğin dışardan elektronlarına müdahale geldiğinden iki kolundaki oluşan fark ile faz farkı ortaya çıkar. Bu kollarla ilgili şunu söyleyebiliriz optik iki farklı yol arasında ışık girer ve yapıcı ve yıkıcı girişimler sonucunda çıkış tarafında tek kolda birleşme sağlanır [50].

3.16. Prizma Eşleme Cihazı ile Ölçüm

Bu tez çalışmasında üretilen aygıtların Ti difüzyonu sonunda oluşan kırılma indis değişimi ölçülmüştür. Bu ölçüm için 4 adet örnek kullanılıp ayrı ayrı ölçümler alınmıştır. Bu cihazda dalgaboyu olarak 532 nm ışık vardır. Titanyum difüzyonlu LiNbO₃ tabanlı optik aygıttaki prizma eşlemesi Şekil 3.37’de gösterilmektedir.



Şekil 3.37. Optik aygıtın prizma eşlemesi [20]

Prizma ve dalga kılavuzu arasındaki bu işlemlerde ışık geçirelemeyeceği alan olmadığında ışık demeti prizma tabanından tam yansıma oluşmuştur. Şekil 3.37’de olduğu gibi belli mesafe olan prizma ve örnek arasından ışık gönderilir ve tünelleme yaparak örnek içindeki dalgakılavuzuna girer. Ölçüm Şekil 3.38’de gösterilmektedir.

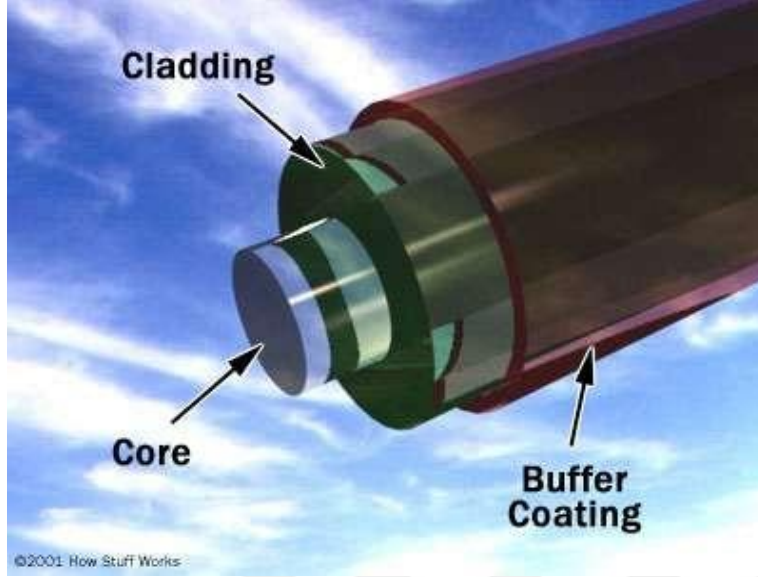


Şekil 3.38. Prizma eşleme cihazı görüntüsü

3.17. LiNbO₃ Tabanlı Şiddet Kipleycisi Karakterizasyonu

LiNbO₃ alttaşının üretimi tamamlandı ve karakterizasyon çalışmalarına devam edildi. Karakterizasyon işlemleri her biri için öncelik fiber ile bağlantı işlemleridir. Fiber malzemesi ışığın homojen olarak yönlendiriminin sağlandığı iletim ortamıdır ve bu malzeme cam yapıdadır. Optik fiberler ile diğer optik iletişim malzemeleri karşılaştırıldığında daha uzak ortamlarda veri aktarımını yapabildikleri en büyük özellikleridir. Bunun yanında veri iletimini daha hızlı gerçekleştirirler ve bu sebeple teknoloji sektöründe çok fazla kullanım

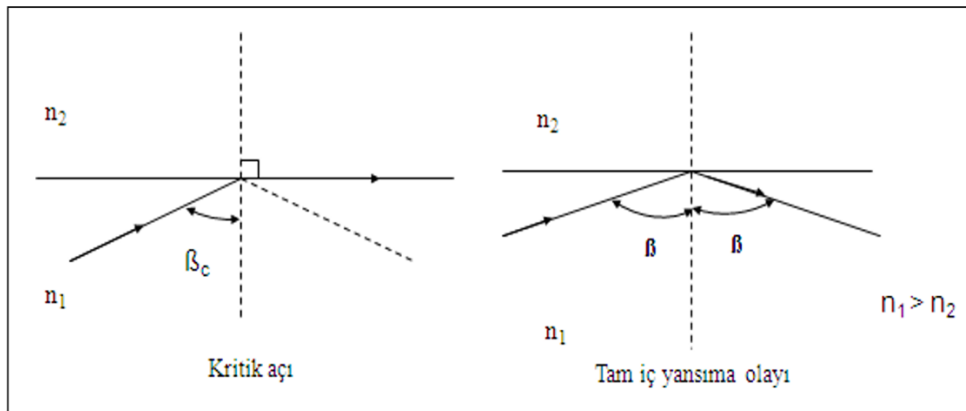
alanları mevcuttur. Özellikle son zamanlarda metal kablolar yerini fiber kablolar almaktadır bunun sebebi daha az kayba ve elektromanyetik alandan etkilenmemiş olmalarıdır [4,21,19].



Şekil 3.39. Optik fiber yapısı [48]

Şekil 3.39’da verilen fiber 3 bölgeden oluşur, nüve, kılıf ve dış kaplamadan meydana gelir.

Fiberin içinde ışığın ilerlemesi işlemi ise iç yansıma ile olur. İç yansıma genellikle kırılma indis değeri yüksek bir yerden kırılma indisinin daha düşük olduğu bir ortama geçmesi ve geçişinde bu dalganın kritik bir açıdan daha geniş bir açıda yansıma yapmasına denir. Şekil 3.40’ta tam iç yansıma gösterilmektedir.



Şekil 3.40. Tam iç yansıma [3]

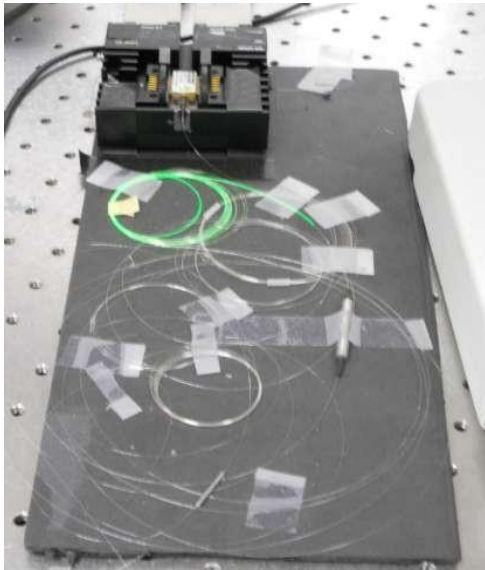
Şekil 3.36’da gösterilmiş olduğu gibi kılıfın kırılma indisi ise n_2 , fiber için nüvenin kırılma indisi n_1 olarak tanımlama yapılırsa; $n_1 > n_2$ olduğu durumda nüve içinde gelen ışık demetleri kılıf bölgesine geçemez. Nüve içinde ışık hapsedildiğinde tam iç yansıma oluşur [3].

Karakterizasyon işlemlerinde kullanılan cam fiber çapı $80\ \mu\text{m}$ ’dır ve V şeklindedir. Optik ölçüm sırasında fiberin içinde sabit bulunduğu cam malzemenin yüzeyi ile örneğin ışık geçen ön yüzeyi arasında detaylı olarak bir yakınlaştıma uzaklaştırma işlemi yapıp doğru hizalama sağlanmıştır. Şekil 3.41’de görülür.



Şekil 3.41. Fiber görüntüsü

Optik işlemlerden biri olan güç ölçümleri yapılarak örneklerin geçirgenlik değerleri ile optik ayırma oranları hesaplanmıştır. Bunun için kullanılan ışık kaynağı Şekil 3.42’de verilmiştir.



Şekil 3.42. Karakterizasyonda kullanılan ışık gücü

Ölçümler için örnekler hazırlanır. Işığın geldiği fiber ucu ölçüm fiber birleştirilir. İki tane 80 µm çapındaki fiberler birbirine eklenmiştir. Ek yapma işlemi ile optik güç iki fiberden geçerek örneğe ulaşır. Bakıldığında bir fiber girişi ile diğer fiber çıkış arasında ek yapma adımı yapılır. Bunu yapan cihazı Şekil 3.43'te görülmektedir.



Şekil 3.43. Fiber birleştirme makinesi

3.18. LiNbO₃ Tabanlı Şiddet Kipleycisi Sıcaklık Testleri

Örnekler belirlenen standartlarda iklimatik kabin testlerine hazırlandı. Bu işlemlerde ilk olarak kabinde örnek tutucak aparat tasarımı tamamlandı. Daha sonra kabin bilgisayarında yazılımları tamamlandı ve yapılacak profiller belirlendi. Yapılacak profiller askeri standartlar göz önünde bulundurularak testlerin en düşük sıcaklık değeri ve en yüksek sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Belirlenen değerler ve testlerin yapılacağı hız oranı göz önünde bulunarak profil çizimleri kabin bilgisayarında yapıldı. Bu değerler denenerek güncel test profilleri sıcaklık aralıkları ve hızları belirlendi.

Klimatik kabin testlerinde askeri standartlar göz önünde bulunarak testler yapıldı. Bu testlerde öncelik çevresel koşullara karşı üretilen aygıtların gösterdiği optik karakterizasyonları görmektir. Aygıtların her sıcaklık profilinden sonra gösterdikleri davranış eğrileri incelenip sonuçlara varılmıştır. Bu sonuçlar ile yeni geliştirme çalışmalarına adımlar atılarak aygıt fabrikasyon işlemlerinde ve sonrasında yapılan entegrasyon işlemlerinde değişim çalışmaları yapılarak iyileştirmeler yapılmıştır. Kabin fotoğrafı Şekil 3.44'te görülmektedir.



Şekil 3.44. Klimatik kabin

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

LiNbO₃ tabanlı şiddet kipleycileri bu zamanlarda yüksek frekanslı aygıtların kullanıldığı yerlerde tercih edilmektedir. Bu yöntemlerde genel olarak 2 farklı dalga kılavuzu üretimi kullanılmaktadır. Bu yapılan çalışmada Titanyum difüzyon işlemine geçildiğinde kaplanan film kalınlığı, sıcaklık ve difüzyon zamanı önemli noktalardır. Bu değerler yüksek performanslı aygıt ve karakterizasyon yapımında kayıpların en aza inmesi önemlidir. Bu üretimde daha çok karşımıza çıkan durum prizma eşleme ölçümlerinde ortaya çıkan kayıptır [19]. Fotolitografi tekniği ile üretilen bu optik aygıt, bazı geniş uygulama alanlarında kullanılmaktadır [49,54]. Elektriksel ve optik ölçümlerin yapılabilmesi için UV ışık ile yapıştırılıp paketlemeye hazırlanır. Modülatörün elektriksel testlerde $V\pi$ ölçümleri alınmıştır [19].

Bunların devamında örneklerin belirlenen sıcaklık değerlerinde testleri yapılmak üzere kabin içinde profiller belirlendi.

Kabinde 3 farklı test profili hazırlandı. İlk olarak hız 1°C /dk, 2°C /dk ve 02°C /dk lık testler çizdirildi. Bu test profillerinin her biri +80°C ve -40°C aralığındadır. Bu testler askeri standartlara göre belirlenmiştir. Klimatik testler ilk olarak kabin yazılımı üzerinden girildi ve bilgisayara bağlanarak Simpati programı üzerinden tüm test profilleri sisteme işlendi. Bunun devamında hazırlanan aygıtları kabine yerleştirmek için bir tabla geliştirildi ve aygıtlar yalıtkan bir tabaka PCB içerisinde test edilmek üzere hazırlandı. Kabin için işlemler tamamlandı örnekler ise 2 işlem üzerinde teste yerleştirildi. Bu işlemler olarak gümüş epoksi uygulaması yapılmak üzere hazırlandı. Bu yapı ise su temelli ve solventsiz reçine gümüş maddesinden elde edilmiştir. Bu madde aygıtlara uygulanıyor ve sonrasında yapıştırıcı kürlleme işlemi yapıldı. Kürlleme işlemi oda sıcaklığında 4 saat sürede kabinde tutularak tamamlandı. Bu işlem sıcaklık direncini arttırdı.

İşlemlerden sonra standart testler yapılmak üzere kabine örnekler sırasıyla yerleştirildi. Kabin içinde hem epoksi uygulaması yapılan örnek ve epoksi uygulaması yapılmayan aynı alttaş üzerinde aynı fabrikasyon üretim yöntemleri ve aynı sandviç uygulaması ile üretilen örnekler kabine yerleştirildi ve sonuç grafikleri aşağıda verilmiştir. Hem 1°C /dk lık hem de 02°C /dk ve 2°C /dk testlerinin yapıldığı testlerin grafikleri incelenmiştir.

4.1. Optik Güç Karakterizasyonu ve Birleştirme Sırasındaki Geçirgenlik Analizi

Bu çalışmada fotolitografi ile üretim sonrasında optik güç ölçümlerine geçilmiştir. Optik karakterizasyon güç ölçümünde birbirinden farklı 3 aygıt için sabit fiber bağlantılı cam yapı ve aygıtın birbirine göre hizalaması yapılmıştır. Maksimum en iyi değer görülüp dorğulama sağlanır ve gelen ışık gücü dedektöre düşürülür. Ölçümleri alınan örneklerin değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Güç değerleri

Örnek adı (#)	P_g (mW)	P_1 (mW)
A	44.0	7.46
B	44.0	6.98
C	44.0	8.96

Çizelge 4.1’deki P_1 ; değeri objektife düşen çıkış güç ölçümüne gösterir. P_g değeri fibere giren giriş gücüne gösterir. Ölçümleri alınan bu aygıtların fiber ucundan güç değerleri alındıktan sonra toplam geçirgenlikleri verilmiştir. Toplam geçirgenlik hesabı için denklem (4.1) verilmiştir.

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

Hesaplanan denklem (4.1)’e göre gelen ışık kaynağından ana güç 44 mW’dır. Optik karakterizasyon işlemi kutuplanmamış ışık kaynağı ile yapıp buna bağlı olarak da Denklem (4.1)’e göre hesaplanan geçirgenlik değerleri Çizelge 4.2’de görülmektedir.

Çizelge 4.2. Optik güç ölçümü sonrasında geçirgenlik değerleri

Örnek adı (#)	Geçirgenlik (%)
A	33.9
B	31.7
C	40.7

A, B, C örneklerinin her birine yapılan fabrikasyon ve difüzyon prosesleri aynıdır. Fakat bu işlemlere rağmen geçirgenlik değerlerinde farklılıklara rastlanmıştır. Bu farklılığın sebebi

kaplama işleminde cihaza aynı değerlere girmeye rağmen Ti kaplamasının LiNbO_3 alttaşında eşit homojen olarak kaplama yapılmamış olmasıdır. Küçük parçalarda nanometrik yapılan kaplama işleminde fark difüzyon sırasında her yere eşit dağılmamasından dolayı bu değerlerin eşit olmadığı gözlenir. Böylelikle dalga kılavuzu yapılarının alttaş içersine difüz eden Ti miktarına bağlı olarak ışığı geçirme oranları farklılık gösterir.

Verilen Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi farklı toplam geçirgenlikler görülmüştür. Fakat bu durum bakıldığında örneklerin çalışmalarını negatif olarak etkilememiştir.

Aygıtın güç ölçümleri tamamlandığında entegrasyon adı verilen giriş örneğin çıkış tarafında fiber birleştirme adımlarına gelinmiştir. Örneğin ilk olarak bir kolu birleştirme yapılır ve daha sonra geçen ışık gücü ölçülerek diğer kollarına fiber yapıştırma adımına geçilir. Güç değerleri ölçümleri dedektör üzerinden yapılır. Güç ölçümleri Çizelge 4.3’te görülmektedir.

Çizelge 4.3. İlk birleştirme sonrasında güç ölçüm değerleri

Örnek adı (#)	P_g (mW)	P_1 (mW)
A	41.8	7.67
B	56.7	7.45
C	26.2	4.88

Çizelge 4.3’te verilen değerler P_1 ; optik aygıtın ilk kol birleştirilmesi sonrasında dedektöre düşen çıkış değerlerini görülmektedir. P_g ise ışık kaynağının giriş gücünü gösterir.

1.kol birleştirilmesinden sonra aygıtın geçirgenlik değeri hesaplanmıştır. Bu işlem için denklem (4.2) kullanılmıştır.

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

Hesaplamaları yapılan toplam geçirgenlik ölçüm sonuçları Çizelge 4.4’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. İlk birleştirme sonunda geçirgenlik ölçümleri

Örnek adı (#)	Geçirgenlik (%)
A	36.7
B	26.3
C	37.3

Çizelge 4.2 ve 4.4 karşılaştırıldığında 3 örnek içinde geçirgenlik değerlerinde benzerlik olduğu görülmektedir. Açıkçası bakıldığında optik ölçümü karakterize edildiğinde elde edilen sonuç ile ilk kol birleştirmesinden sonrada o örneğin geçirgenliğinin en yüksek olduğu görülmüştür. Ölçümleri tamamlanan örnekler kendi aralarında karşılaştırıldıklarında B ve aygıt C'nin geçirgenliklerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Oluşan kaybın sebebi fiberleri birleştirme sırasında oluşan ark ile beraber yani kaynak işlemindeki hatanın sonucudur. Fakat sonuca bakıldığında örneklerin işlevselliğini negatif anlamda etkilemediği görülmüştür. İlk birleştirme işlemi yapıldıktan sonra ikinci taraf birleştirme işlemi yapılmıştır. Fiber çıkış tarafından güç ölçümleri alınmıştır. Ölçüm sonuçları Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Çıkış birleştirme sonrası güç ölçümü

Örnek adı (#)	P _g (mW)	P ₂ (mW)
A	41.8	5.92
B	56.7	6.14
C	26.2	3.66

2.kol birleştime işleminde çıkış tarafından güç ölçümleri alınır. Bu değer sonuçları denklem (4.3)'e verilmiştir.

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

Örneklerin sonucunda geçirgenlik ölçümleri çizelge 4.6'da olduğu gibidir.

Çizelge 4.6. Çıkış entegrasyonu sonrası geçirgenlik

Örnek adı (#)	Geçirgenlik (%)
A	28.3
B	21.7
C	28.0

Çizelge 4.6'daki geçirgenlik sonucu ile ilk birleştirme sonucunda ölçümleri 2.kol birleştirme sonucu geçirgenlik değerleri aralarında güç farkı olduğu gözlenmiştir. Bu fark Çizelge 4.7 de görülmektedir. Gücünde azalma olduğu sonucuna varılır sebebi de daha önce belirtildiği gibi birleştirme sırasında oluşan kaynak sebeplidir.

Çizelge 4.7. Giriş ve çıkış arasındaki birleştirme sonucunda oluşan farkı

Örnek numarası (#)	Δ (%)
A	8.4
B	4.6
C	9.3

Δ ; belirtilen giriş ve çıkış arasında oluşan geçirgenlik farkını ifade eder. Çizelge 4.7 bakıldığında her örnek için ayrı ayrı geçirgenlik kaybı ortaya çıkmaktadır. Oluşan bu farkın sebebi entegrasyonda hassas bir şekile ve birleştirip yapıştırma diğeri de ön kesit yüzeylerinin düzgün ve temiz olmasıdır.

4.2. Modülatörün DC ve AC Seviyelerde Elektriksel Testleri

Yapılan şiddet kipleycisinin güç ölçümünün ve fiber bütünleme işlemlerinin ardından DC ve AC seviyede elektriksel testleri yapılmak üzere hazırlıklara başlanmıştır. DC karakterizasyonu; gerilim değerleri ile buna eş gelen modülatör gücünü ölçmek amaçlı frekanstan bağımsızlık olarak ölçerek girişim profilini saptamak ve V_{π} , $V_{2\pi}$ gerilimlerini bulmak için testler yapılmıştır. AC ölçümü yapılma sebebi ise modülatörün verilen frekansa bağlı olarak değişen ölçümlerini yapmaktır.

Üretilen faz modülatöründe toplu olarak elektrot yapısında sığa devresi kullanılmıştır. Burada elektrot yapıları sığa gibi davranış gösterirler. C sığa; R ise yükleme direnci olarak

isimlendirilir. Bantgenişliğinde ortaya çıkan R ile C'nin çarpımı ile sınırlandırılmıştır. Aynı zamanda bu işlem ile ışığın aygıt içindeki geçiş zamanını da belirlenmektedir. Statik elektrik direncinin aygıtın bant genişliğini belirlemede kritik faktör olmaması için elektrot genişliğinin yeterince geniş olması önemli bir faktördür. Buradan yola çıkıldığında elektrotlar arasındaki mesafe azaltıldığında bantgenişliği ve sürücü gerilimi azalmakta, sığa ise artmaktadır [51].

4.3. DC Seviyede Karakterizasyonun Girişim Eğrisi Üzerine Etkisi

Çalışmanın bu kısmında üretilen faz modülatörünün elektriksel karakterizasyonları tamamlanmıştır. Ölçüm için iki farklı aygıt modülatör frekanstan bağımsız olarak DC seviyede ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sonunda örneklerin V_{π} , $V_{2\pi}$ değerleri Çizelge 4.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.8. Modülatörün V_{π} ve $V_{2\pi}$ ölçümleri

Örnek adı (#)	V_{π} (V)	$V_{2\pi}$ (V)
A	5.77	10.75
b	5.12	10.51

V_{π} ve $V_{2\pi}$ değerleri için iki aygıtında girişim profili detaylı incelenmiştir. Çalışmada uygulanan 0.25 V aralıklarındaki optik dedektöre düşen güçlerin grafik haline getirilerek analiz edilmeye başlanmıştır. İncelenen grafikleri ilk olarak belirlenen Matlab kodu yazılır ve buna uygun bir analiz yöntemi geliştirilir. Şekil 4.1'de görülmektedir.

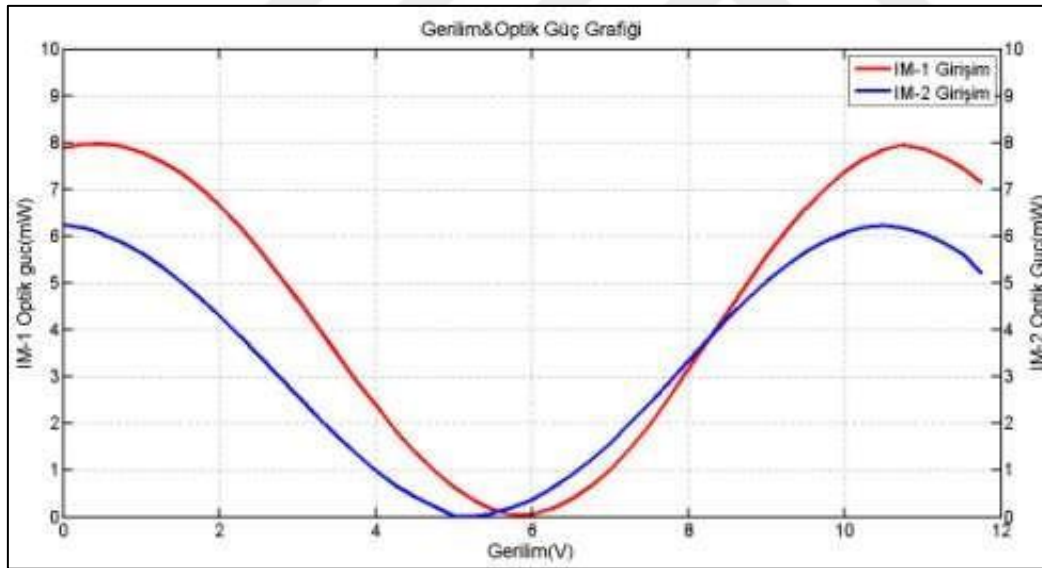
```

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],'YLabel','V');
21 - set(haxes(2),'YLim',[0 10],'FontSize',16);
22 - set(haxes(2),'YTick',[0:1:10],'YLabel','mW');
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 4.1. Hazırlanan Matlab kodu

Bu aygıtlar için veriler incelenmiştir. Girişim eğrisi Şekil 4.2’de görülmektedir.



Şekil 4.2. Girişim grafiği

Şekil 4.2’de eğri tanımlamak istediği yorum gerilime karşılık ortaya çıkan optik güç grafiğidir. IM-1 ve IM-2 sonuçlarında ise karakterizasyonu yapıp hazır hale getirilen aygıtları göstermektedir. Şekil 4.4, girişimi gerçekleştiren dalgayı göstermektedir. Uygulama esnasında kipleyci gerilim sıfır olduğunda IM-1 ve IM-2 gücü maksimumdur. Böyle durumlarda oluşan güç detektöre düştüğünde maksimum güç bulunur. Başka bir deyişle modülatörün her iki kolundan giden ışık aynı fazda olmalıdır. Gerilimi arttırdığımızda

zamanın geçmesiyle beraber örnekten dedektöre düşen ışığın gücü azalır. Bu azalan güç kollardan giden ışık dalgalarında oluşan faz farkından kaynaklanır.

Detektöre düşen güç bazı noktalarda çok fazla düşük seviyelerdedir. Bu düşük seviyelerde π kadar faz farkı ile yıkıcı girişim oluşur. Düşük gücün olduğu noktada π kadar oluşan gerilime V_π denir. Bu gerilimi modülatörün kendini modüle etmesinde önemlidir. Bununla ilgili sonuç şu şekildedir, dedektöre düşen gücün artması gerilimin artmasıyla doğru orantılıdır. 2π 'lik bir faz farkında dedektöre düşen güç yine maksimum seviyesine ulaşmaktadır. Faz farkının 2π olduğu noktalarda ise $V_{2\pi}$ gerilimidir. 0, 2π , 4π gibi çift katlarda yapıcı girişim; π , 3π gibi π 'nin tek katlarında ise yıkıcı girişim meydana gelmektedir. Böylece 2π 'lik faz farkında, kipleycinin iki kolunda ilerleyen dalgalar $\pm\pi$ olmak üzere eş fazda ilerler, bu şekilde bir yapıcı girişim meydana gelir. Fakat 3π 'lik faz farkında bu çıkış kollarında devam eden dalga eş fazlı olmaz, bu yüzden yıkıcı girişim meydana gelmektedir.

Bu uygulamada elde edilen gerilim değeri sıfır veya $V_{2\pi}$ olan noktalarda tepe noktası en yüksek güç değeri elde edilir. Bu sonuç; girişen dalgalar arasında 2π kadar faz farkı olduğunda yapıcı girişim olduğunu göstermektedir.

4.4. Sıcaklığa Bağlı Klimatik Kabin Testlerinde Örneklerin Gösterdiği Davranışlar

Hazırlanan örneklerin fiber birleştirme adımlarından sonra yapılan elektriksel testleri sonuçlarına bağlı olarak sıcaklık test analizleri yapılmaktadır.

Bu testlerin amacı askeri standartlarda kullanılacak bu aygıtların şartlara uygun olarak tam çalışma performansı ile testleri tamamlamasına yönelik çalışmalar gereği birtakım testlere tabii tutulmuştur.

İlk olarak kabin içerisinde örnek yerleştirme alanı oluşturuldu ve bununla beraber örnekler sırasıyla kabine yerleştirildi. Kabine yerleştirilen örnekleri Şekil 4.3'te görülmektedir.



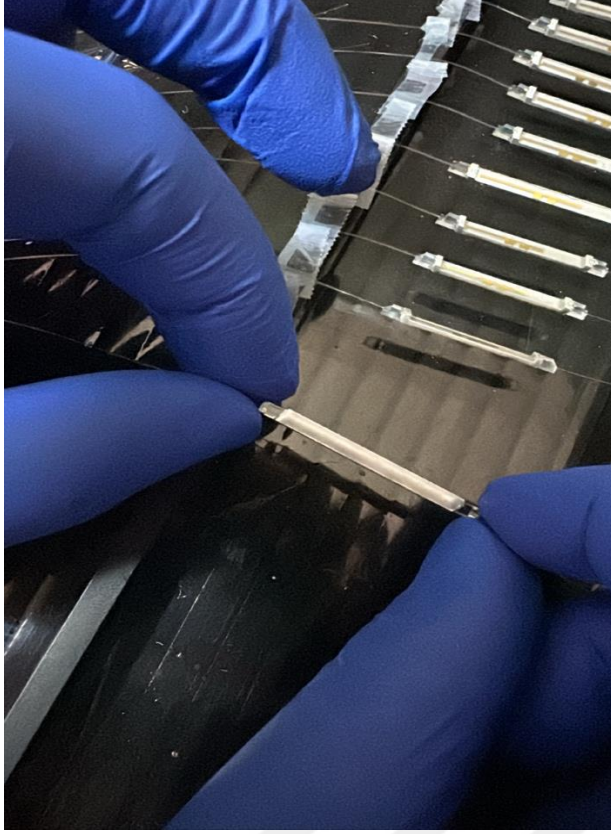
Şekil 4.3. Klimatik kabine yerleştirilen örnekler

Sıcaklık testlerinden önce örneklere H20E epoksi adı verilen gümüş epoksi uygulaması yapıldı. Bu uygulama sonrası her örnek epoksi kurutma işlemi için sıcaklık kabinine yerleştirilip oda sıcaklığında 6 saatlik kürlenme işlemlerine tabii tutuldu. Bazı bölgelere kapak parça ve alt parçalara uygulanan bu malzeme örneklerin sıcaklık dirençlerini korumalarını ve belirlenen çalışma aralıklarında güç kayıpları yaşanmadan çalışmalarını sağlamaktadır.

Sıcaklık testleri belli hızlarda ve sıcaklık aralıklarında gerçekleştirilmiştir. Örneklerin çalışma potansiyelleri kontrol edilerek testler yapıldı.

Bu test düzeneklerinde kabin dışında bir ışık kaynağı ve fiberlerin çıkışında güç kontrollerini yapacak kontrolcü voltaj çevirici portlar bulunmaktadır. Bu düzene etrafında aygıtların giriş ve çıkı tarafları fiberlerden bağlanarak güçler kontrol edildi ve buna bağlı olarak belli sıcaklık değerlerinde gösterdikleri davranışlar incelenip analizler edildi.

Epoksi uygulaması yapılmadan ve epoksi uygulaması sonrası düşük ve yüksek sıcaklıklara karşı gösterdikleri eğilimleri grafiklerden analizler edilecektir. Şekil 4.4'te epoksi uygulanmış örnek gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Epoksi işlemi uygulanmış aygıt

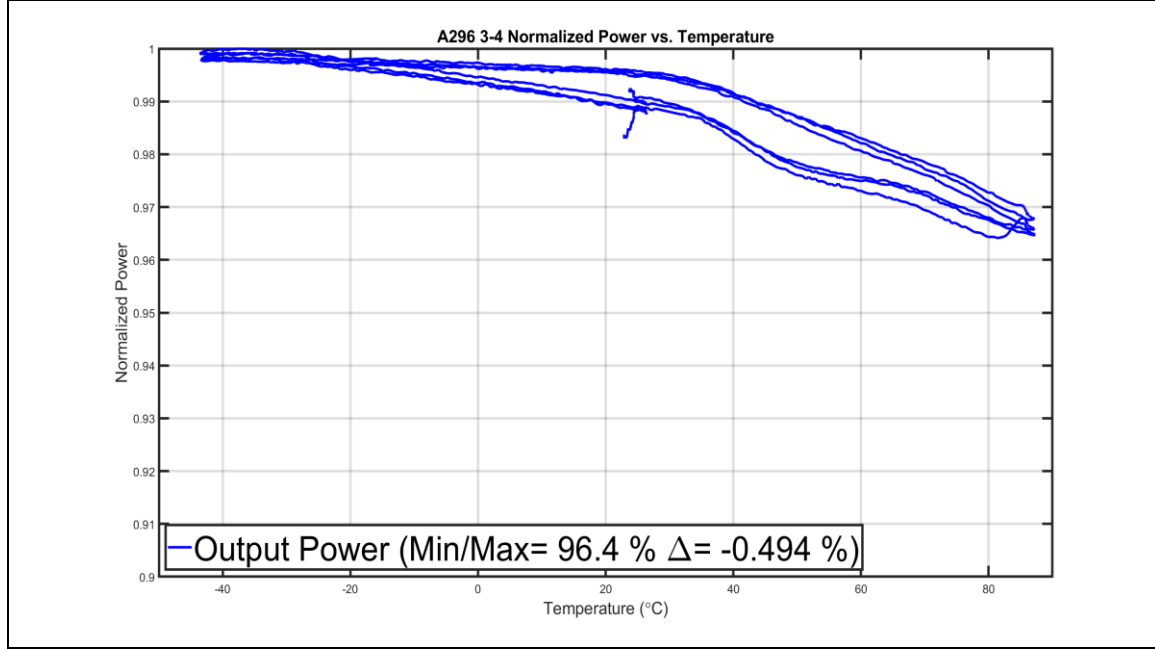
Yapılan test profilleri incelendiğinde rate $1^{\circ}\text{C} / \text{dk}$ ve $2^{\circ}\text{C} / \text{dk}$ olmak üzere 2 farklı profile ve döngülerde testler tamamlanmıştır. Bu test profillerinin sıcaklık değerleri pozitif sıcaklıklarda en yüksek 85°C ve sonrasında 90°C 'ye çıkarılmıştır. Minimum sıcaklık ise her test profilinde -40°C 'ye düşmüştür. Bu test sıcaklıkları aralıklarında ve hızlarında aygıtların göstermiş oldukları davranışlar grafiklenmiştir.

Örneklere epoksi işlemi uygulanması homojenlik açısından önemlidir. Uygulamanın nasıl olacağı ve her MIOC üzerine eşit dağılım yapmak için şırınga yardımıyla 10 gr malzemeyi üst kısımlara damlatma yoluyla kaplama adımı tamamlandı. Bu işlem ile kaplanan yüzey derinliğinin eşit miktarda olup olmaması için kürleme adımından sonra ölçümler alındı.

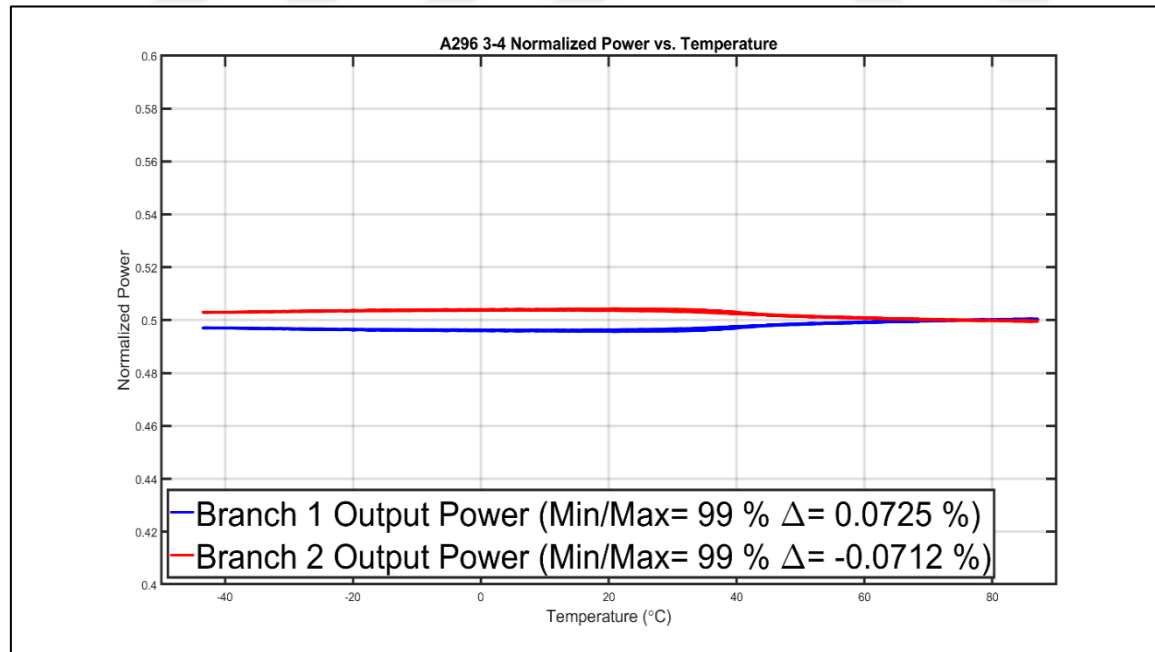
Ölçümler için mikrometre ve dektak cihazı kullanıldı. Fabrikasyon adımlarında kullanılan dektak cihazı Mikrometre 3 noktadan ölçüm alındı ve yaklaşık 0.5mm ve 0.7mm kalınlıkta kaplama yapılmıştır.

Epoksi uygulaması yapılan ve yapılmayan örneklere aynı test profilleri uygulanmıştır. Sıcaklık aralıklarında uygulanmayan örneklerin toplam geçirgenliklerinde düşmeler

görülmüştür. Ayırma oranları yani entegrasyon sırasında kürlenme işleminden önce son olarak güçlerde yakınlığın bozulup bozulmadığı da grafiklerde analiz edilmiştir.



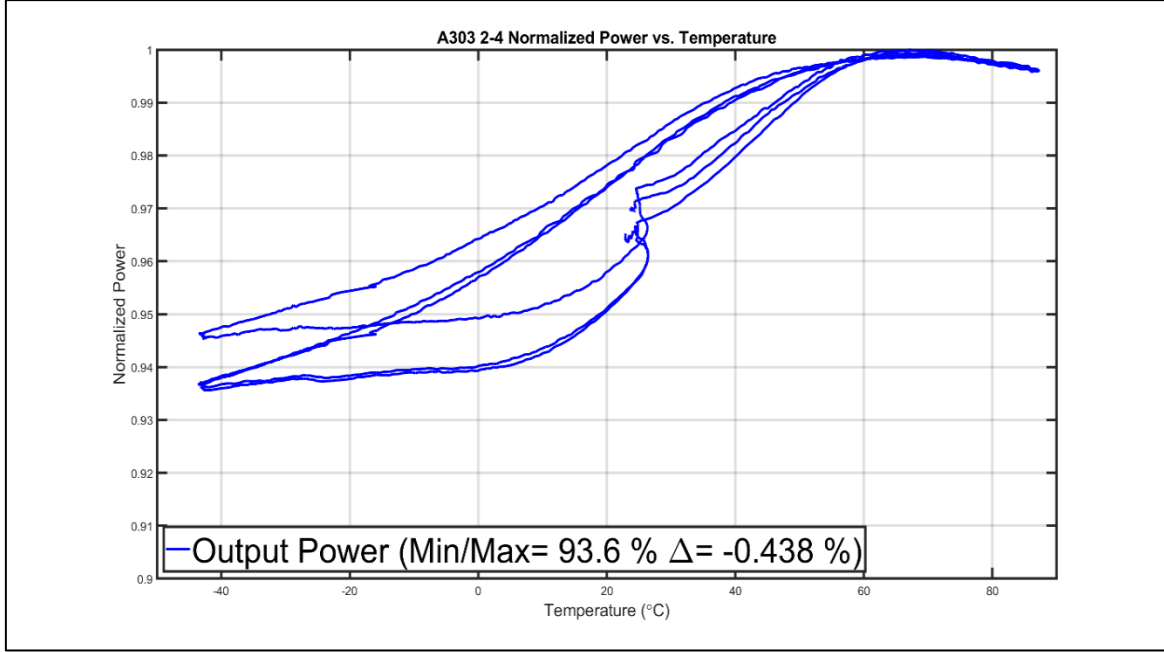
Şekil 4.5. Epoksi uygulaması yapılmış örneğin toplam geçirgenlik grafiği



Şekil 4.6. Epoksi uygulaması yapılmış örneğin ayırma oranı grafiği

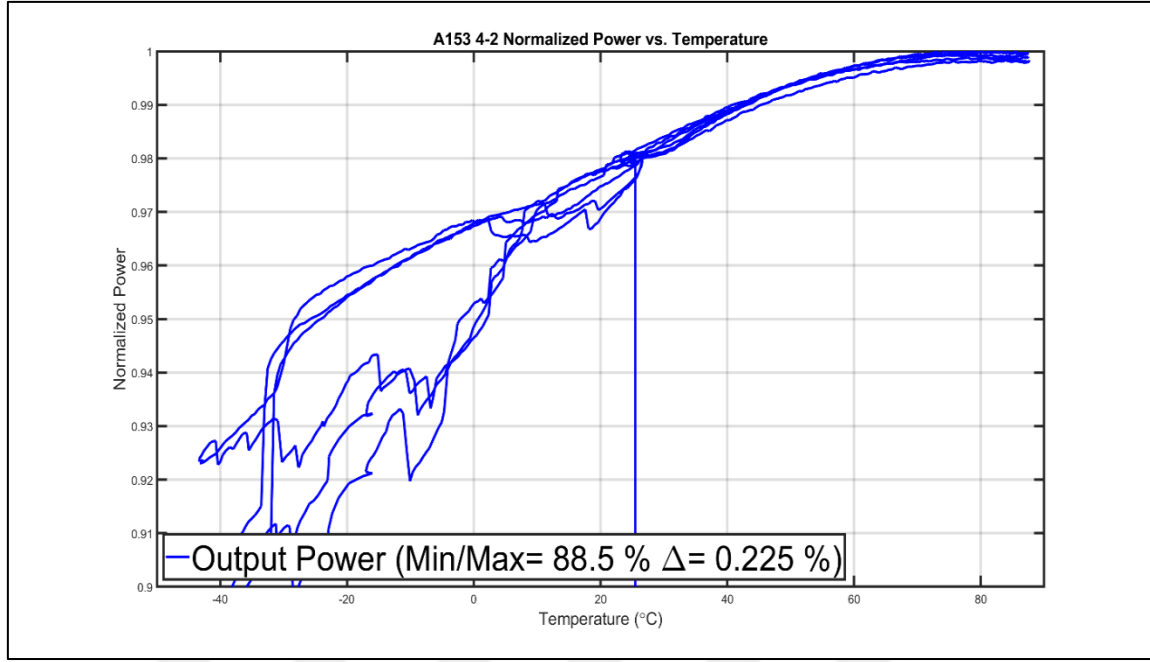
Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’ da verilen grafiklerde gücün bozulmadığı ve istenilen aralıklarda testi tamamladığı görülmüştür ve bu da üretilen aygıtların kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

Ayrırma oranının %55 ve %45 arasında kalması gerekmektedir. Toplam geçirgenlik değerlerinde bulunan R (test sırasında düştüğü minimum güç değerinin yüzdesi) %95 üzerinde olması ve delta (test başlangıcındaki güç değerinden test sonunda ölçülen güç arasındaki fark) değerinin %1'i geçmemesi sonucunda testlerin başarılı geçtiğini göstermektedir.

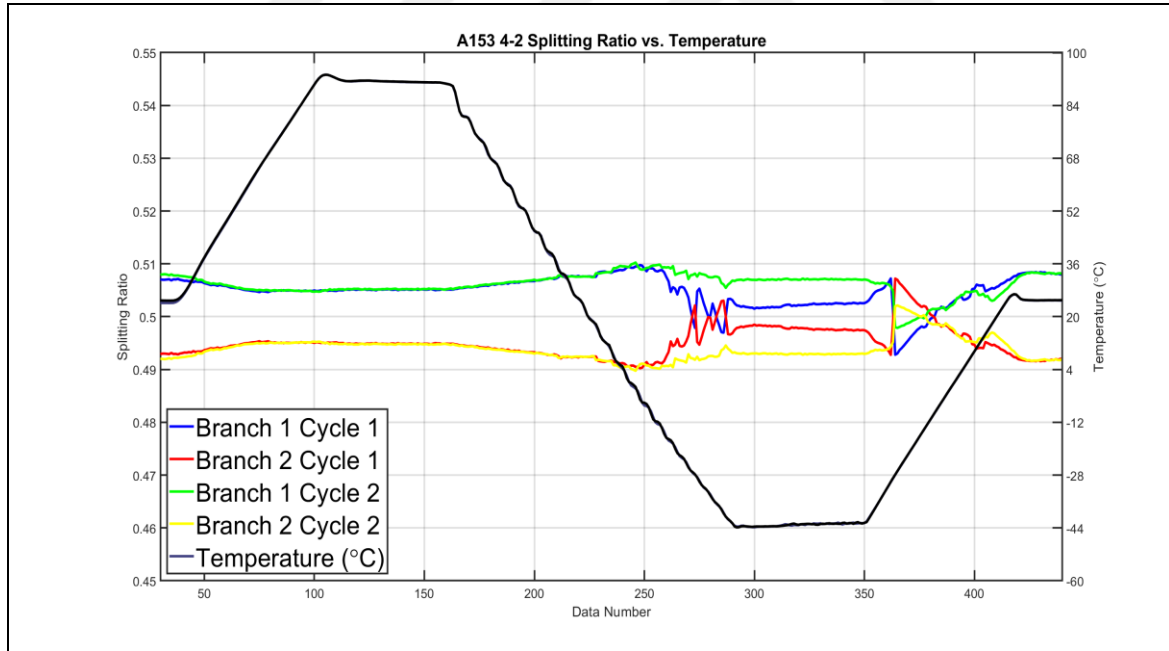


Şekil 4.7. Epoksi uygulanan örneğin grafiği

Şekil 4.7 de gösterilen grafikte örneğin davranışında bir problemin olmadığı fakat toplam geçirgenliğin düştüğü böylelikle R değerinin %90'a düştüğü görülmüştür. Örnek analiz edildiğinde yüksek sıcaklıklarda örneğin gücünün düştüğü görülmüştür.



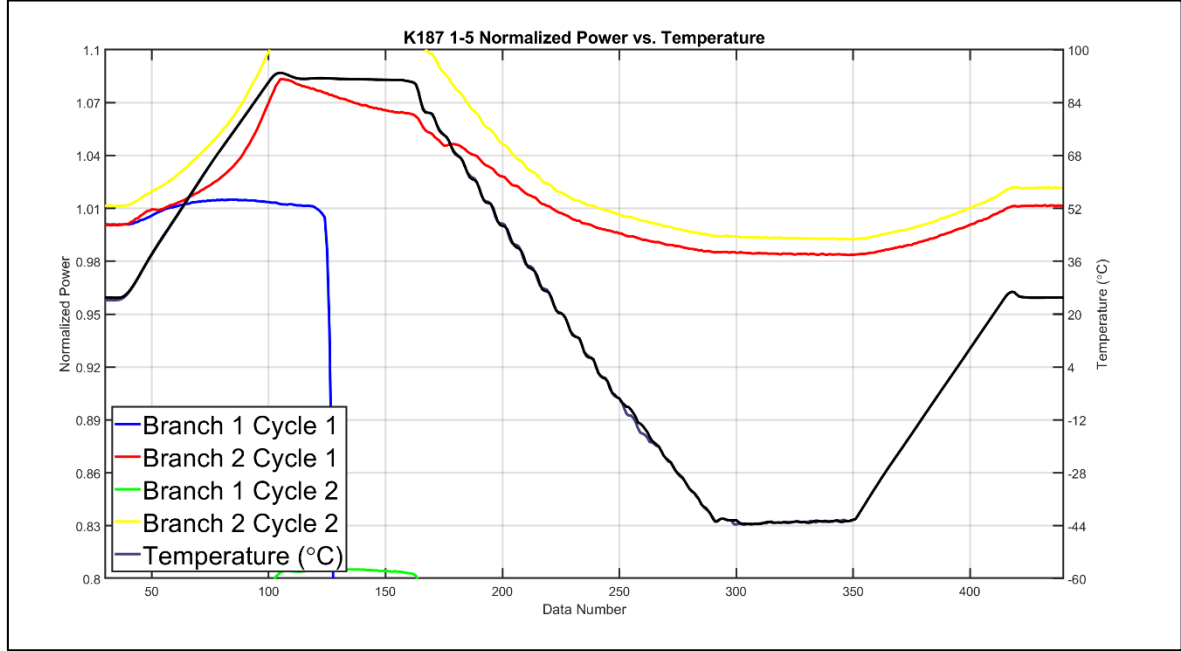
Şekil 4.8. Epoksi uygulaması yapılmayan örneğin toplam geçirgenlik grafiği



Şekil 4.9. Epoksi uygulaması yapılmayan örneğin ayırma oranı grafiği

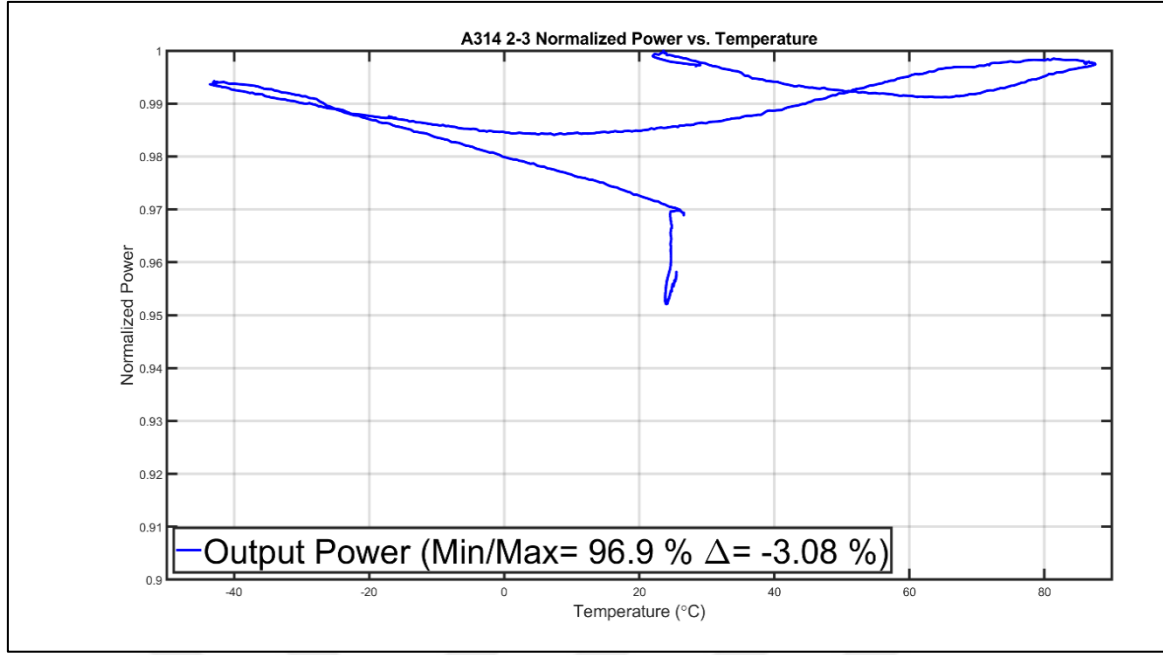
Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da verilen grafiklerde iklimik kabine yerleştirilmeden uygulanan gümüş epoksi işleminin yapılmadığında gösterdiği davranışlar gösterilmektedir. Bu grafikler incelediğinde oda sıcaklığının altında düştüğünde -40°C’ye doğru örneğin gücünde yüksek genlikte piklerin oluşmasıyla bozulmaların meydana geldiği gözlenmiştir. Ayırma oranı

grafiğine bakıldığında geçirgenlik grafiği gibi oda sıcaklığının altına düştüğünde aygıtın gücü polarizasyonu sağlayamayarak gücün bozulduğu görüldü.



Şekil 4.10. Epoksi uygulaması yapılmayan örneğin 2c/dk lık toplam geçirgenlik grafiği

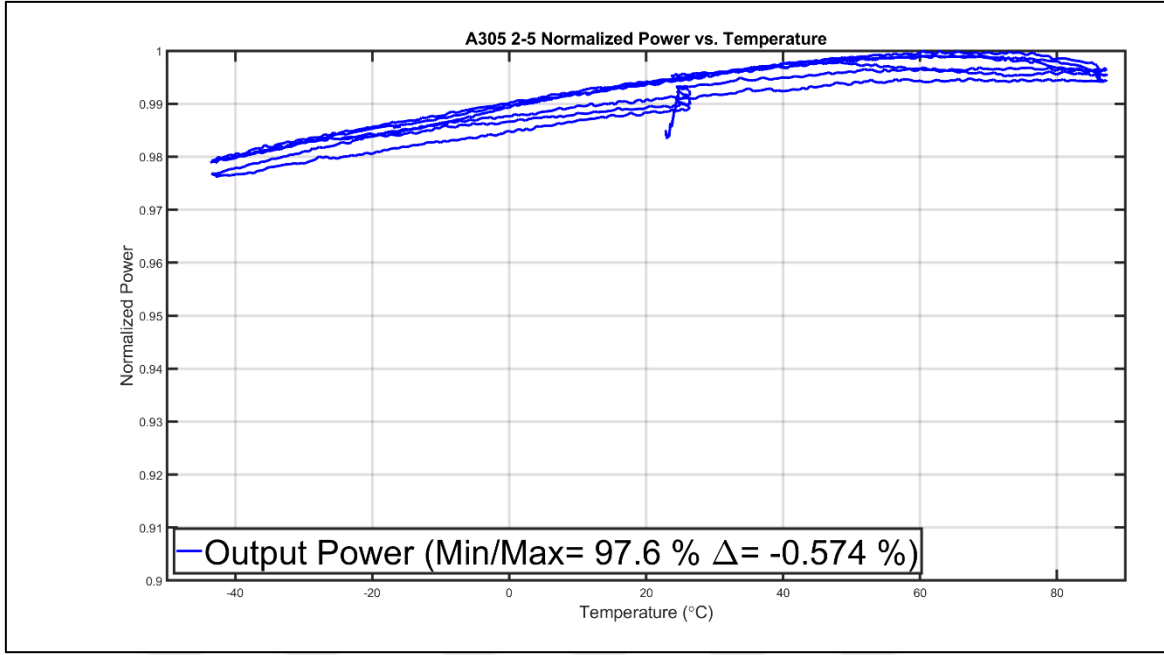
2c/dk lık testlerde şekil 4.10'da görüldüğü gibi gücün ani bir negatif pik yaparak bozulduğu gözlenir. Bunun en büyük sebebi yüksek sıcaklıklara geldiğinde ve bekleme süresinin artmasıyla yorulmaya maruz kalmasıdır. Örnekler hem askeri standartlara uygun sıcaklık testleri yapılırken mekanik olarak stabiliteyi sağlamak için yorulma testleri de yapılabilir.



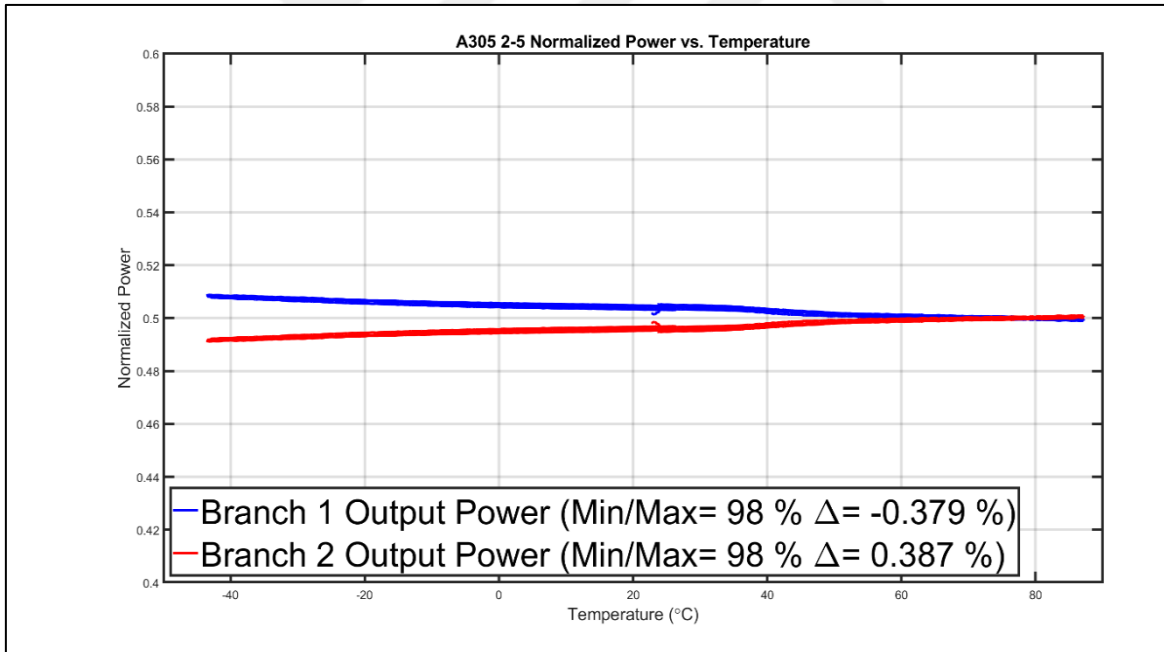
Şekil 4.11. Epoksi uygulaması yapılmış örneğin toplam geçirgenlik grafiği

Bazı durumlarda örneklerin fabrikasyon yapısında meydana gelen değişimlerden dolayı farklı karakteristik sonuçlar gösterdiği olmuştur. Şekil 4.11’ de görülen grafikte örneğin delta değerinde bozulma görülmüştür. Oda sıcaklığına geldiğinde gücün test başlangıcındaki değerine ulaşmadığı görülmüştür. Oda sıcaklığında bekletildiğinde gücün düşerek başlangıç değerine gelmeye başladığı grafikte görülüyor. Fakat bekleme süresi 15 dk olarak profil hazırlanmıştır görüldüğü gibi daha fazla beklendiğinde gücün ilk ölçülen değere ulaşır.

Bu grafikler incelediğinde örneklerin fabrikasyon adımlarında parametrelerin difüzyon süresi ve sıcaklığında belirlediğimiz değerlerin aynı olması halinde 1050°C de 8 saatlik difüzyon ile LiNbO₃ içerisine difüz olan Titanyum metalinin örneğin performansı etkilediğini bilmekteyiz. Aynı değerlerde elde edilen aygıtların sıcaklık performansları incelediğinde Şekil 4.8 ve Şekil 4.11’e baktığımızda epoksi uygulamasının iyileştirdiğini görmekteyiz. Epoksi uygulaması yapılmış Şekil 4.8 örneğinde gücün %12 düştüğü görülürken Şekil 4.11’de ise %4’lük bir düşme olduğu görülüyor. Bunun aygıt üzerinde ısı direnç sağladığını ve malzemenin sıcaklık karşısında gücünün daha zor kayıba uğradığı sonucuna varılmaktadır.



Şekil 4.12. Epoksi uygulaması yapılan aygıtın toplam geçirgenlik grafiği



Şekil 4.13. Epoksi uygulaması yapılan örneğin ayırma oranı grafiği

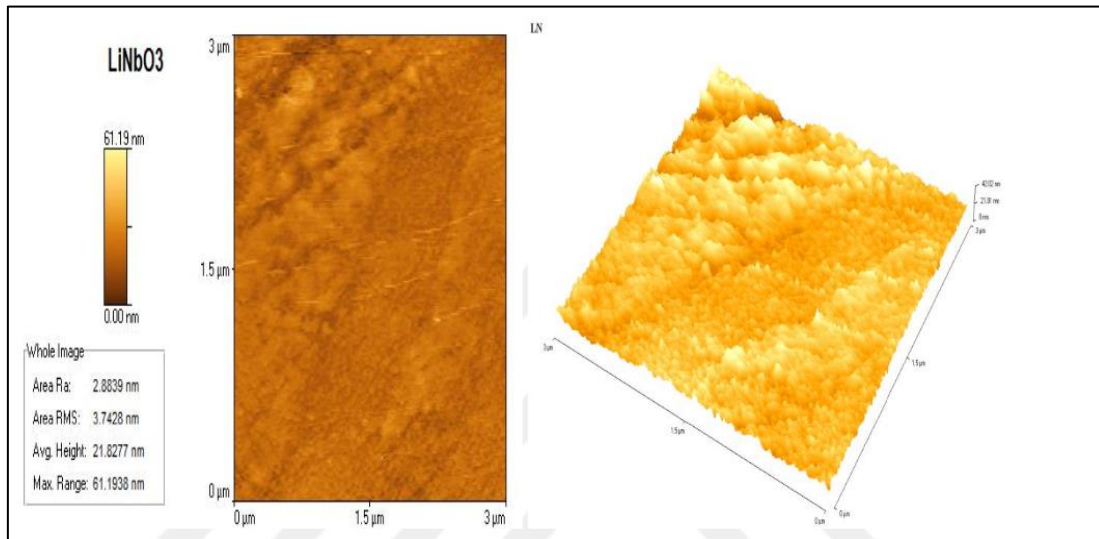
Tüm testlerde başarılı sonuç alınan aygıtın grafikleri Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Bu grafiklerden anlaşılacağı üzere hem güçlerinde hem de ayırma oranı değerinde bozulma olmamıştır.

Bu grafiklerin sonucunda üretilen modölatörlerin belirlenen askeri standartlarda testleri gerçekleştirilmiştir. Görüldüğü üzere fiziksel olarak ağıta uygulanan işlemlerden olan epoksi adının bir olumsuzluğu pozitifte çevirdiği gözlenmiştir. Bunlar kullanılacak alanlarda önemli avantajlarda biridir. Eposki işlemi örneğin ısı iletimini ve elektriksel bağlantılarında olumlu etkilemiştir.

Savunma alanında kendi üretimimizden ürünler kullanmak milli parçalar üretmek büyük bir önem taşımaktadır. Bu üretilen ağıt kontrollü bir şekilde savunma araçlarında yer yön tayinini bize hem taktik seviye hem navigasyon seviye hem e stratejik seviyelerle bütünleme yapılan sistemlerde kullanılmasını sağlar.

Bu çalışmanın sonucunda ürün haline getirdiğimiz ve paketlemesini tamamladığımız ağıt sistemlerin içerisinde yerleştiriliyor ve sinyal saçmadan istenilen noktalara atışlarda kullanılabilir duruma getirilir. Belirlenmiş sapma aralıklarında atışlarda olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Bu çalışmanın önemli noktalarından biri alttaş üzerine kaplanan titanyum metalinin kaplama miktarıyla oluşan kalınlıkta meydana gelen nanometrik değişimlerdir. Örnek yüzeyinde oluşan farklılıklar ile ağıt performansında değişimler meydana gelmektedir. Bu sebeple hazırlanan bütün parametrelerle örnekler farklı difüzyon programındaki örneklerden parçalar atomik kuvvet mikroskobu ile incelenmiştir.

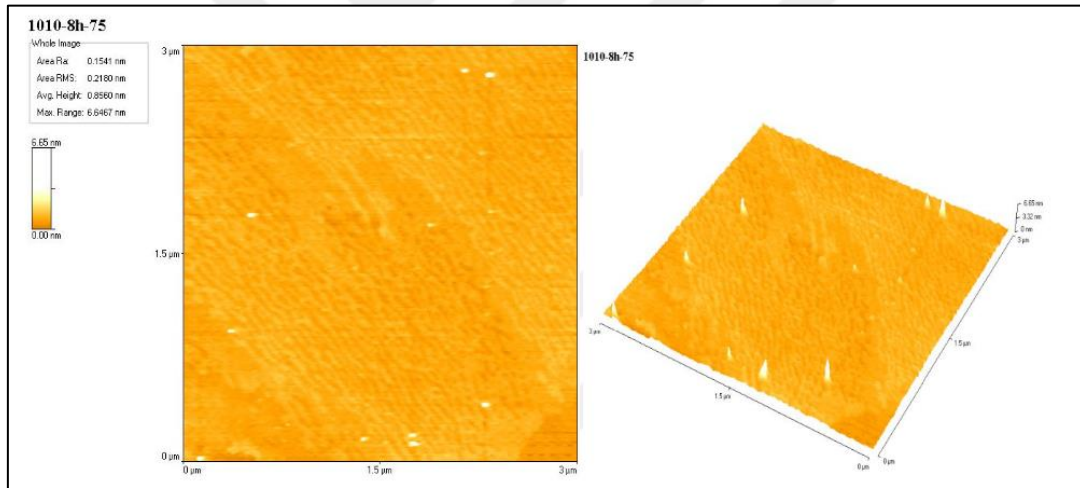


Şekil 4.14. Fabrikasyon işlemleri öncesinde LiNbO₃ yapısı atomik kuvvet mikroskobu görüntüsü

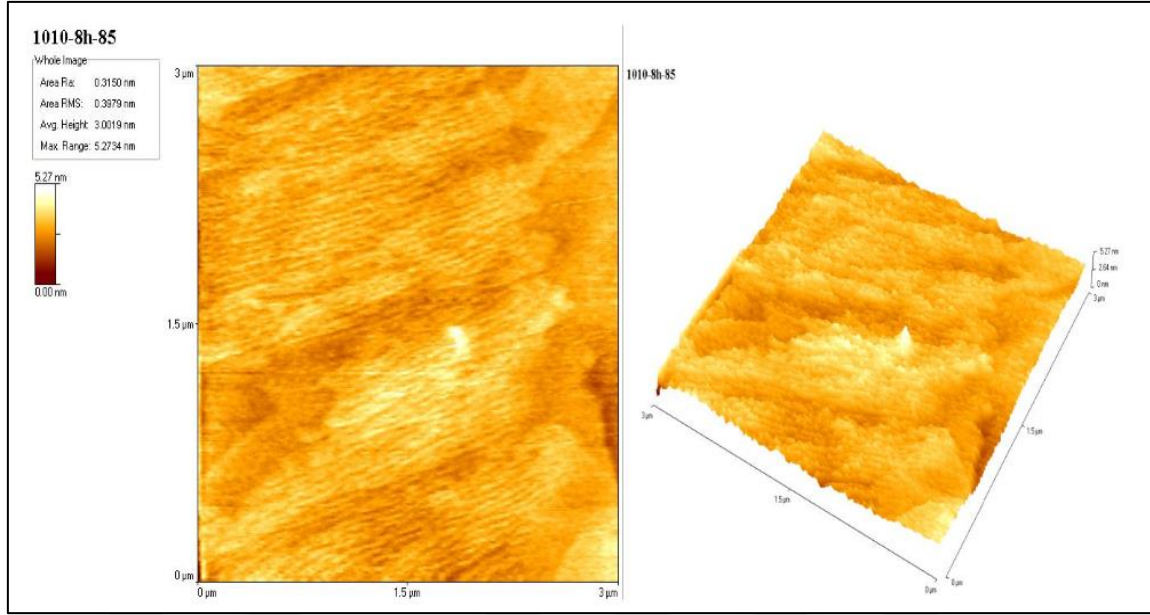
Şekil 4.14’de işlem yapılmamış fabrikasyon için hazır alttaş malzemesinin AFM görüntüsü görülmektedir. İşlem yapılmamış LiNbO_3 yüzey pürüzlülüğü değeri yaklaşık 3 nm olarak ölçülmüştür.

Teoride yapılan çalışmalara bakıldığında deneyle uyumlu olması açısından 900°C 'de difüzyonu tamamlanan örneklerin kalınlıkları nanometrik değerlerde arttırıldığında difüzyon işleminin aynı sürede yapıldığında daha az tamamlanabildiği izlenmiştir.

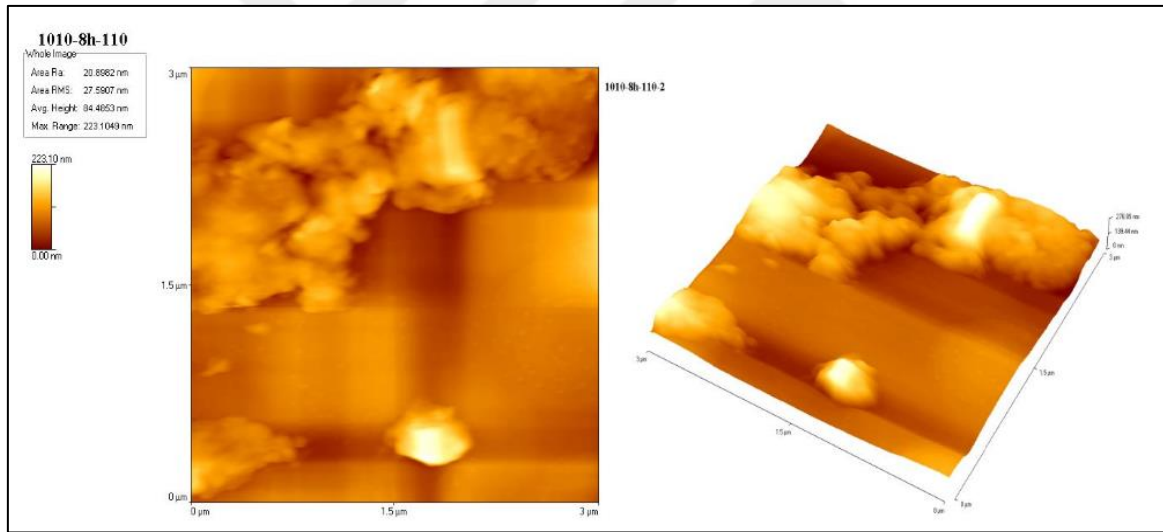
Çalışmanın bu kısmında farklı difüzyon sürelerinde ancak aynı sıcaklık değeri olan 1010°C işlem yapılmıştır. Yapılan 8 saatlik difüzyon işleminde 4 tane birbirinden farklı kalınlıkta örneğin mikroskop görüntüsünde sadece yüksek kalınlıkta değeri 110 nm olan örnekte mikroskop ile görülen fazlaca belirsiz fark edilen bir katman oluştuğu gözlenmiştir.



Şekil 4.15. 70 nm Ti kaplı aygıtın 1010°C 'de 8 saat difüzyon olmuş AFM ölçümü

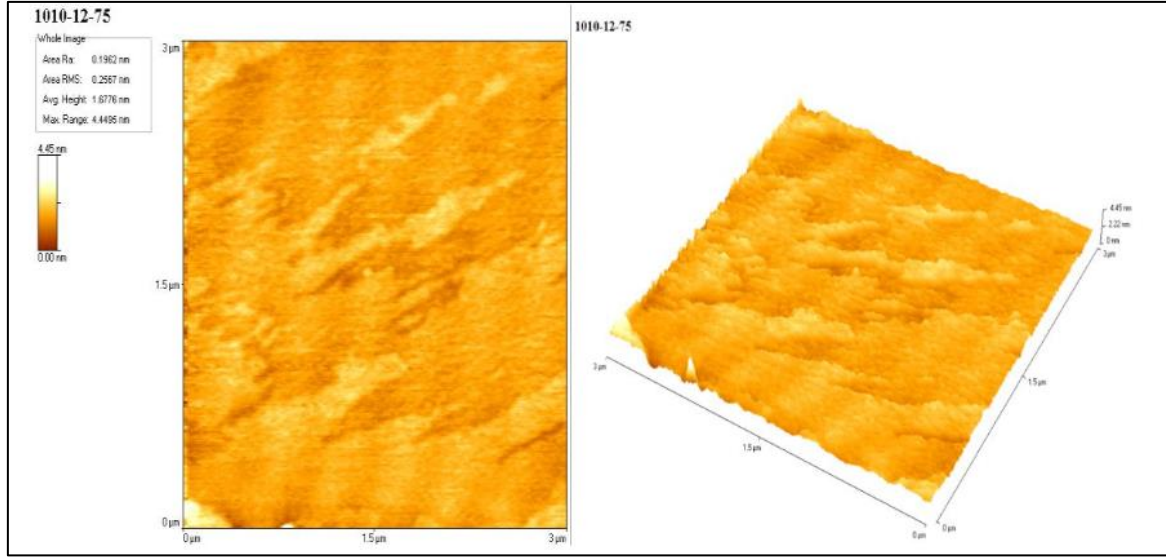


Şekil 4.16. 85 nm Ti kaplı aygıtın 1010°C'de 8 saat difüzyon olmuş AKM ölçümü



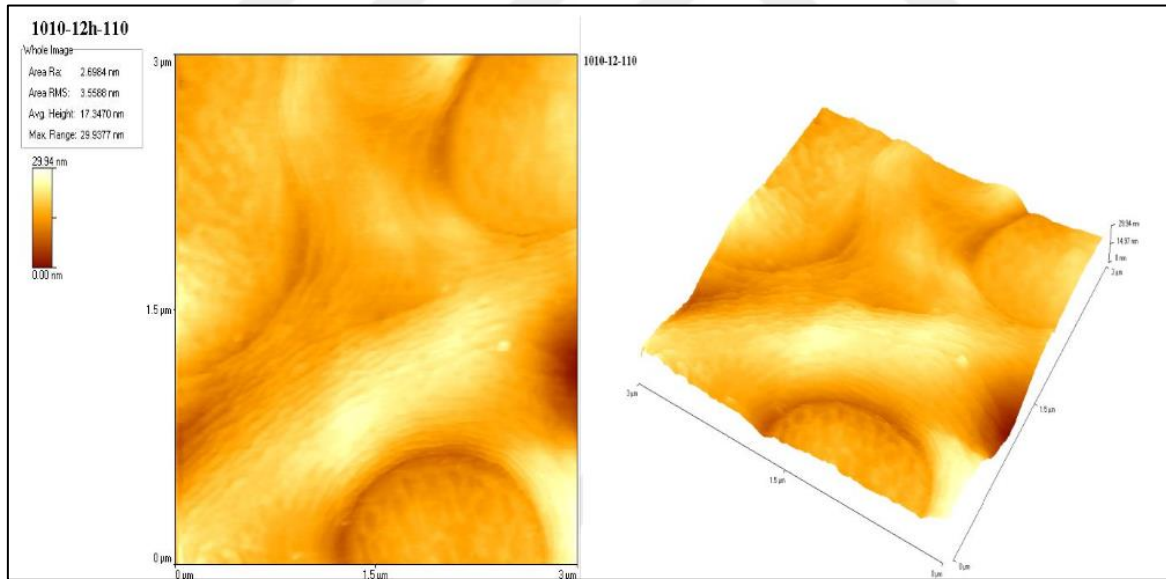
Şekil 4.17. 110 nm Ti kaplı aygıtın 1010°C'de 8 saat difüzyon olmuş AKM ölçümü

1010°C'de 8 saat yapılan difüzyon sonrası Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17' de 3 farklı kalınlık değeri için AKM ölçümleri görülmektedir. 70 ve 85 nm kalınlık değerleri için yüzeyde bulunan pürüzlülük değeri düşüktür. 110 nm ise difüzyon tamamlanmıştır ancak bu örnek üzerinde yer yer bazı bölgelerde daha kalın bir Titanyum metalinin kalıntısı olarak yorumlanan bölgeler olmuştur. Bir diğer parametre de bu 3 farklı kalınlıkta örnekler 70, 85 ve 110 nm, 12 saat süreyle 1010°C de difüzyon olmuşlardır. 12 saat yapılan difüzyon işlemi ve 8 saat yapılan difüzyon işlemi 1010°C de Titanyumun alttaş içinde tamamen nüfuz ettiğini göstermiştir. AKM ile alınan bu ölçümlerde bu durumu destekler.



Şekil 4.18. 70 nm Ti kaplı 1010°C'de 12 saat difüzyon yapılmış örneğin AKM ölçümü

Şekil 4.18'de verilene göre 70 nm kalınlıktaki Ti metali kaplı örneğin difüzyonu 12 saat 1010°C de yeterli olumlu sonuç verdiği görülmektedir.



Şekil 4.19. 110 nm Ti kaplı 1010°C'de 12 saat difüzyon yapılmış örneğin AKM ölçümü

Şekil 4.9'da görüldüğü gibi, 1010°C ve 12 saatlik difüzyonda 110 nm Ti metali kaplı örneğin yüzeyinde derinliği 20 nm olarak ölçülen yuvarlak şekilli oyukların oluştuğu görülmektedir. Bu oyukların oluşma sebebi olarakta difüzyonda oluşan farklılıktan ve o sırada Li ve Ti atomları arasında yer değişimi sırasında yüzeyde ve altta oluşan değişik fazlardaki yapılardan oluşabileceği öngörülmüştür.

Elektriksel sonuçlara paralel olarak şiddet kipleycilerin sırasıyla iklimatik kabin testlerinden veri toplanmıştır. Sonuçlar doğrultusunda uygulanan işlemlerin süreçlerinde iyileştirmeler yapılarak sonuçların pozitif olarak değerlendirilmiştir. Kabin içerisinde isterler kapsamında $1^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ ve $2^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ lık testler tamamlanıp sonuçlar alınmıştır. Epoksi işlemi uygulanmayan örneklerin yüksek sıcaklıklarda ve negatif sıcaklıklarda dayanması çok mümkün olmamıştır. Böyle bir durum karşısında malzemenin optik ve önemli fiziksel özelliklerini değiştirmektedir. Uygulanan kimyasal epoksi ile sıcaklık dayanımı arttırılarak daha stabil sonuçlar hem negatif hem de pozitif derecelerde doğrusal bir grafik elde edilmiştir. Ayırma oranlarına bakıldığında da her çıkış kollarından ikisinde eşit miktarda aynı sıcaklıklarda büyük genlikte piklerin oluşmadığı görülmüştür.

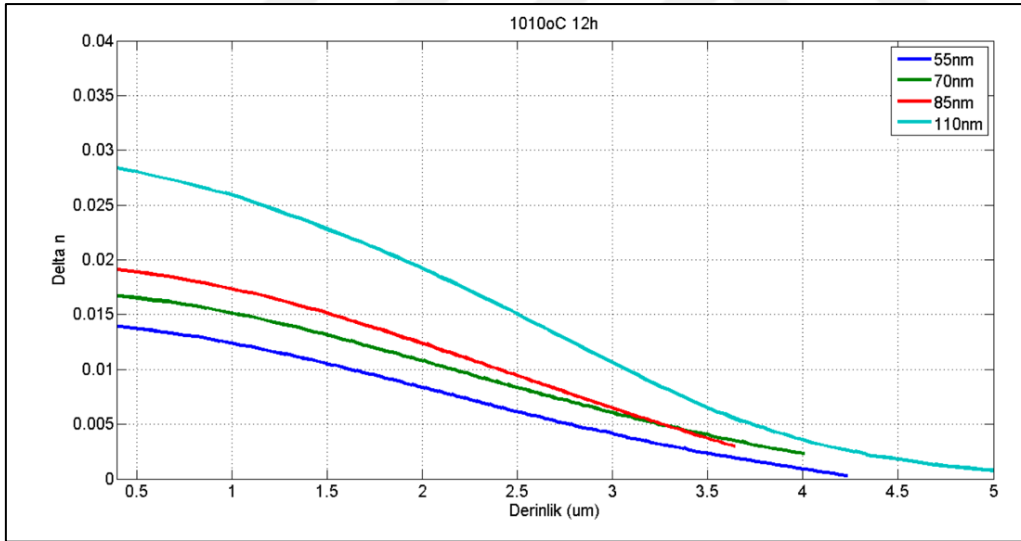
Üretimde aktif aygıtlar olarak bahsedilen sistemlerde kırılma indisi uygulanan elektrik alan üzerindeki durumunu incelemek için herhangi bir yönden gelen kristal içindeki kutuplu ışık ile incelenebilir. 3 farklı bir sensör ile bu etki ifade edilebilir [32,57,58]. Sistemler 3 eksenli yapıların her birinin içine yerleştirilen şiddet kipleycilerin sistemdeki atışını belirleye etkenler vardır. Elektriksel testlerde bahsedilen karakteristik empedans ve elektrotlar üzerindeki elektrik dalgasının indis değeri aygıtın tasarımında göz önünde bulundurmanız gereken önemli iki noktadır. Elektrot üzerinde ilerlemesine devam eden elektrik dalgası sonucunda oluşan gerilim değerinin akım ile orantısı karakteristik empedans tanımlanmaktadır [59]. Sistemlere koyulmadan önce yaptığımız açık döngü ve kapalı döngü de elektriksel bağlantıları ve sarım ile bütünlemesi yapıldı ardından π voltajı ölçümü tamamlandı. Çıkan pikler doğrultusunda $V\pi$ ölçümleri yapılmıştır [60,61,62]. Şiddet kipleycisinin tez kapsamında yapılan testlerinde sonuç olarak 1500 nm 'de $V\pi$ gerilimi 5 V civarında ölçümü tamamlanmıştır.

Üretilen standartlarda elde edilen sonuçlar kontrol edildiğinde üretimi gerçekleştirilen şiddet kipleycisi LiNbO_3 tabanlı malzemeler daha çok yüksek frekans uygulamalarında kullanılmaktadır. Fabrikasyona bakıldığında 2 farklı yöntem kullanılmaktadır bunlar Ti difüzyonu ya da APE yöntemi olarak farklı üretim yolu kullanılmaktadır [63,64]. Titanyum difüzyon yönteminde önemli parametreler difüzyon zamanı, film kalınlığı, difüzyon sıcaklığı ile üretim önemli değerlerdir. Değerler ile yüksek performans fiber entegrasyonu kayıpların daha aza indirilmesi gerekir. Belirlenenden daha yüksek sıcaklıkta ve çok daha uzun süreli bir difüzyon işlemi gibi farklı parametrelerinde doğru şekilde optimizasyonu ile

başarılı bir sonuç verebilecektir. Yapılan çalışmalarda bu verilen zamanın 30 saatin üzerinde olduğunu anlatan deneyler vardır.

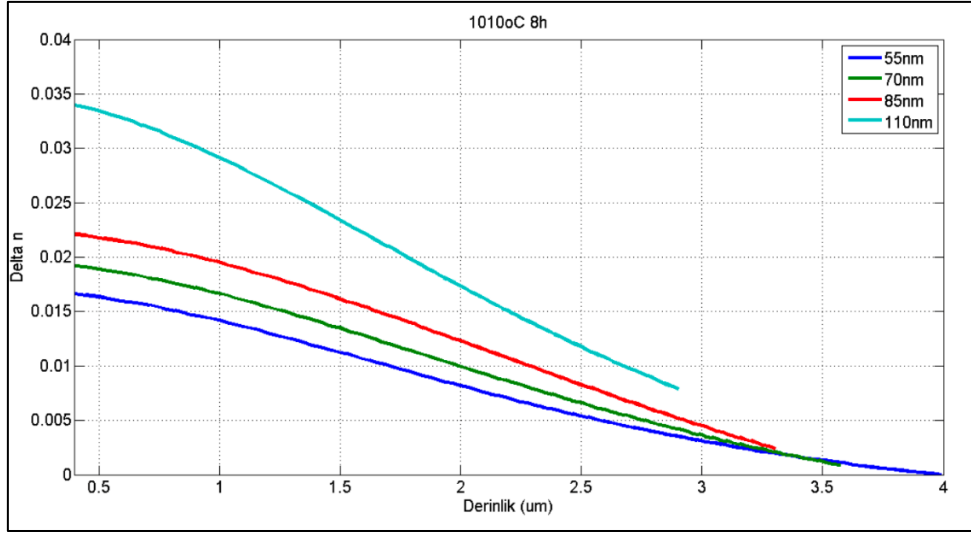
Difüzyon edilen LiNbO_3 kristalinin toz halinin difüzyon fırını içinde tutulması lityum malzemesinin dış difüzyonunu engellediğini gösteren çalışmalar olmuştur [65,66]. Aygıtın difüzyon kalitesini ve Titanyumun ne kadar alttaş içerisine difüz olduğunu gösteren analiz etme yöntemlerinden biri de prizma eşlemesidir.

Çalışmada 55 nm kaplaması tamamlanmış aygıtın 12 saat boyunca 1010°C 'de tamamlanan difüzyon sonuçlarında kılavuz aygıtlarının ölçümleri tamamlanmıştır. Prizma eşleme cihazı ile 532 nm dalgaboyunda lazer ışığı ile ölçümler yapılırken difüzyondan çıkan aygıtların deneysel sonuçlarında geçirgenlik ölçümleri 1550 nm dalgaboyunda ışık kaynağı ile ölçümleri tamamlanmıştır. Böyle üretimi yapılan aygıtların çoğu tek kipleyci özellik gösterir.



Şekil 4.20. 1010°C 'de 12 saat difüzyon yapılan 4 farklı Ti kalınlığı için kırılma indisi grafiği

Difüzyon işlemi öncesinde örnek üzerine belirli miktarlarda Titanyum kaplama işlemi tamamlanmıştır. Kaplanan miktarlar 55 nm, 70 nm, 85 nm ve 110 nm'dir. Kaplaması yapılan miktarları gösteren C , değeridir.



Şekil 4.21. 1010°C'de 8 saat difüzyon yapılan 4 farklı Ti kalınlığı için kırılma indisi grafiği

Aygıt üzerinde kaplaması yapılan Titanyum yoğunluğu kaplanan kalınlığın artması ile artar. Şekil 4.20 ve 4.21'te iki ayrı difüzyon şartlarında işlemleri tamamlanan 4 farklı kalınlıktaki 8 aygıtın malzeme içindeki kristal yapısı içinde difüzyonun ne kadar derine indiğini alttaş içerisine ne kadar difüz ettiğini gösteren grafikler verilmiştir. Bu durum nasıl kırılma indisinin değiştiği göstermektedir.

Grafikler analiz edildiğinde kırılma indisi değişiminin artmasında çalışmada Titanyum kalınlığının etkili olduğu görüldü. Kırılma indisi değişimine sebep olan en büyük etki kaplanan metal miktarının artmasıdır. Grafiklere göre 85nm kalınlığındaki malzemenin 2 farklı difüzyon sıcaklık aralıklarında 0.004' lük bir fark olduğu görülür. Bu farkın 12 saatlik difüzyonda sürenin uzatılmasıyla ilgili ve bununla beraber yüzeydeki Titanyum metal miktarı azalma sağlayarak LiNbO₃ kristalinin derin noktalarına ilerler. Bu azalma yüzeyde metal kalmayana kadar devam eder. Tüm kalınlık miktarları orantılı olarak her iki grafikte de değiştiğini görmekteyiz. Bu değer 110 nm de ise beklenenden daha fazla artış görülmüştür sebebi bakıldığında ise 110 nm kaplı örnekte gerçek hesaplanan kalınlıktan biraz daha fazla kaplama olabileceğidir. Bu çalışmada en çok karşılaşılan değerlendirmelerden biri olan prizma eşleme ölçümüdür [67,68,69].

Prizma eşleme ile ölçüm yapıldıktan sonra fabrikasyonun kalitesi belirlenir ve entegre optik sistemlerin en önemli özelliği sinyalin iletildiği ortamda elektrik akımı ile olmaması ışık dalgası ile iletimin gerçekleşmesidir [70,71]. Işık ile optik yoldan iletim yapıldığı için devrelerde oluşan frekansın tepkisini kısıtlayan etkiden kurtulunmuş olunur [72,73]. Bu tarz

aygıtlarda kayıp her zaman elektriksel devrelere göre daha düşüktür. Entegre optik Optik devrelerin en büyük avantajlarından biri de çevresel koşullara karşı daha güçlü, güvenilir sonuçlar gördüğümüz verimli çalışan aygıtlardır. Elektriksel devrelerde bu kayıpların performans düşmelerinin engel olmak için dış kaplama yapılmaktadır bu da maliyeti artırır ve göstereceği etkili verimi düşürmektedir [74,75]. Bu sayede optik devrelerde kullanılan fiberler bu tarz etkileri yok etmektedir ve böylece verimli kullanımı arttırmaktadır [76]. Fotolitografi ile üretilen bu aygıtın optik performansının yüksek olması ve hassas ölçümler alması sebebiyle geniş kullanım alanları vardır. Yapılan çalışmalarda aygıtın elektriksel ölçümleri kapsamında $V\pi$ ölçümleri yapılmaktadır. Yapılan bir araştırmada 1500 nm'de $V\pi$ gerilimi 5V civarında tespit edilmiştir [77,78,79].

Bu çalışma ile ortaya çıkan faz modülatörü tezin içeriklerinde anlatılmış elektro optik temelli çalışan bir dalga kılavuzu yapısında entegre optik aygıttır. Sistemlerde ışık kaynağından gelen 1550 nm dalgaboylu ışık alttaş malzemesi olan LiNbO_3 kristali içine litografi yöntemiyle geçirilen y kutuplayıcı içinden çıkış tarafından fiberoptik bağlantı bölgesine geçer ve kullanılan entegre optik aygıtın diğer sistemine aktarılır [80,81]. Bu üretimdeki maksimum verimi elde etmek adına farklı kaplamalarda aygıt üzerinde çalışmalar yapılarak testler edildi. Çalışma potansiyelini malzemenin arttırmak için Gümüş epoksi yapısı ile kaplama yapıldı. Üretilen aygıtların alt yüzey yanal yüzey ve kapaklarına belirlenen kalınlıkta epoksi uygulaması yapıldı. Bu da malzemenin çalışmasında belirli bir stabiliteyi sağladığı görüldü.

Test sonuçlarında gözlenen grafiklerdeki güç düşmelerini ortadan kaldırarak malzeme içindeki farklı sıcaklıklar karşısındaki bozulmalar minimuma indirildi. Fiberoptik dönü ölçer sistemlerinde de entegre optik aygıtlar olan faz modülatörleri kullanılmaktadır. Bazı sistemlerde en önemli alt yapı aygıtları olarak kullanılmaktadırlar. Örneği seyrüsefer ve güdüm sistemlerine yerleştirilen bu cihazlar sistemlerin hareketinden kaynaklanan çok hassas seviyelerde çok küçük dönü hareketlerini algılayabilmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Son zamanlarda gelişen elektronik ve optoelektronik devreler ile cihazların temel unsuru olan yarı iletken teknolojisi büyük teknolojik gelişmeler ortaya çıkarmaktadır. Bu teknolojiyi yaygınlaştırıp yarıiletkenlerin özelliklerinin geliştirilmesi teknolojiye katkı sağlar [77,81]. Bununla beraber gelen ince film teknolojileri ise birçok elektronik devre ve cihazlarda (cep telefonu bilgisayar, tablet, otomobil teknolojisi, v.b.) kullanımı gittikçe yayılmakta ve maliyeti düşüren yaklaşımlar ile ortaya konan teknolojik araçların geliştirilmesi de sağlamaktadır.

Tez çalışmasında malzememiz LiNbO_3 yapılan fabrikasyon süreçlerinde yapılan değişkenler ve sonrasında yapılan fiziksel etkiler ile yapının değiştiği gözlemlendi. Tez çalışmasında en çok kullanılan yöntem Titanyum difüzyon yöntemidir. Titanyum metali kristal boyunca difüz ederek yapısında değişimlere sebebiyet verir bu durum da normal kırılma indisi ve olağandışı kırılma indisinde artış oluşur. Burada meydana gelen durum ile dalga kılavuzu yapısı oluşumu meydana gelir. Oluşan dalga kılavuzunun yapısında fabrikasyon adımlarında parametrelerin değişimi optik kayıp oranının farklılaşması, kutup sönümleme oranı gibi değerlerin doğru parametrelerde üretimi ile, tek ya da çok kipli oluşu fabrikasyon adımlarında değişimlerin birçoğu etkilediği görülmektedir. Bu çalışmalar ve sonucunda elde edilen çalışmalar deneysel çalışmalar bölümünde anlatılmaktadır. Teorik çalışmalarda difüzyon kaynağı olarak geçiş metalleri kullanılır [82].

Çalışmamızda kullanılan Titanyum metali dalga kılavuzu boyunca ışığı en iyi şekilde ilerlemesine ve hapsedilmesini sağlayan metaldir [83]. Bu çalışmada LiNbO_3 'ün yapısal, elektronik, optik ve mekanik özellikleri entegre optik sistemlerde kullanılmak üzere değiştirildi. Malzemenin deneysel sonuçlar bölümünde anlatıldığı gibi yapısal, elektronik, optik ve mekanik özellikleri incelendi.

Hazırlanan aygıtların deneysel ve teorik sonuçları karşılaştırıldı ve elde edilen malzeme de sıcaklık dayanımını arttırdığı ve kullanılan sıcaklık test değerlerinin arttığı test edilerek sonuçlandırıldı. Entegre sistem -20 derecelerde ve +60 derecelerde çalışırken yapılan difüzyon parametreleri ve diğer litografi değişkenlerinde ve son olarak gümüş epoksi kaplamasıyla daha güçlü malzeme elde edildi.

Bu entegre optik cihazlar için çok önemli bir değişkendir. Yarım-dalga voltajı ya da kısa ifadeyle π voltaj değeridir. Elde edilen parametre aygıtta gönderdiğimiz ve içinden geçen ışığa uygulayabileceğimiz faz farkı oluşturabilmek için gönderilen voltaj değeridir. Burada çıkan sonuç ise dalga kılavuzu boyunun artması elektrik alan uygulanan bölgenin artmasına sebep olur bu da $V\pi$ değerini azalmasına sebep olduğunu görmekteyiz. Üretimde dalga kılavuz boyu arttıkça π değerinin arttığı gözlenmektedir. Elektrotlar arasındaki mesafenin artmasıyla ise bu etki tam tersi olur ve π değeri azaldığı görülür. 12 saat süreyle 1010°C 'de yapılan difüzyon örnekleri sonuçlarında 55 nm metal kaplı örneklerde optik geçirgenlik ölçümü yapıldığında ışığın geçmedi görülmüştür. Fakat 85 nm ve 110 nm Ti kaplaması yapılan örneklerde ölçümünde çıkış tarafında güç ölçümü yapılsa da çok kipli yapılar olduğundan sağlıklı bir ölçüm değeri alınamamıştır.

Üretilen bu dalga kılavuz yapılarının tek kipli olmaması entegre optik devrelerde önemli sorunlara sebep olur. Difüzyon süresinin uzaması Ti metalinin kristal malzeme içine nüfuz etmesini arttırmaktadır fakat yeni kiplerin oluşumuna olanak sağlamaktadır.

8 saat sürede 1010°C de yapılan difüzyon değerleri incelendiğinde de 55 nm Ti kaplı aygıt yine sağlıklı sonuç vermemektedir ışık örnek içerisinden geçirilememiştir. Fakat bu durum kaplanan metal kalınlığının az olmasından kaynaklıdır.

Kaplaması yapılmış Ti metali dalga kılavuzu içinde tamamen geçmiş olmasına rağmen kılavuz içinde bir kip oluşumunu sağlayabilecek kırılma indis değişimini meydana getirememiştir. 110 nm kalınlığındaki örneklerin çok kipli yapıda olduğu tespit edilmiştir. Diğer iki kalınlıkta aygıtlar ise verilen difüzyon parametrelerinde 1010°C ve 8 saatlik sürede olumlu sonuçlar vermiştir. Tek kipli yapıda dalga kılavuzları 7 μm ve düz olanlarda 85 nm için kayıp yaklaşık olarak $1.7 - 2.0 \pm 0.1$ dB'nin (%30-35) seviyelerde ölçülürken diğer Ti kaplama kalınlığı 70 nm olan aygıtta ise kayıp değeri yaklaşık 2.2 ± 0.1 dB civarındadır.

Fabrikasyonu tamamlanmış s-kıvrımlı dalga kılavuzlarında ortaya çıkan güç ile aynı proseslerde üretilen düz dalga kılavuz üzeriminde çok az farklar gösterilmiştir. Fabrikasyonda üretimi gerçekleştirilen s-kıvrımlı dalga kılavuzları maske tasarımında seçimi yapılan yarıçapın doğru bir seçim olduğu ve doğru üretim yapıldığını gösterir. Y biçiminde kolları ayrılan dalga kılavuzlarında çıkışlarından elde edilen güç miktarı yaklaşık

olarak 1dB seviyesinde düşme göstermiştir. Bu düşüşün önemli bir kısmı dalga kılavuzu deseninde y kollarının ayrıldığı noktada yaşanmaktadır. Kayıpların azaltılması için fabrikasyon ve fotolitografide kaliteli üretimin arttırılması gerekmektedir.

Üretilen dalga kılavuzlarının tek modlu üretilmemesi halinde entegre optik aygıtların önemli problemler çıkarabilmektedir. Difüzyon zamanının uzaması alttaş üzerindeki Ti malzemesinin kristal içinde nüfuz oranı artması ile oluşan dalga kılavuzlarının oluşmasını sağlar. Fabrikasyon sonuçları testlerle doğrulanmıştır. Doğru litografi adımından sonra yapıla klimatik testlerde başarılı sonuçlar elde etmek üzere entegre optik ağıta farklı işlemler uygulanmıştır.

Bu yöntem ile üretimi tamamlanan aygıtların önemli noktası da difüzyon sırasında iki kırılma indisinde de artış olması bu kullanılan yöntemin kutuplayıcı olması beklediğimiz malzeme üretimi için uygun olmadığını gösterir. Fakat bu yöntemde üretimi tamamlanan dalga kılavuzlarında yüksek sönümlenme oranları ile dalga kılavuzu yapıları ve aygıtlar oluşturulmuştur. Daha sonra aygıtın dalga kılavuzu içinden geçen optik güç giriş ve çıkışa fiber entegrasyonu tamamlanır. Bu işlemler ardından aygıttan elde edilen en yüksek sönümlenme oranı 37.5 ± 0.1 dB'ye gelmiştir. Bu elde edilen değer sistemde örneğin başarılı çalışmasına sağlamıştır.

Elektriksel testler yapılırken modülatörün DC seviyede karakterize edilmiştir. Gerilim seviyesi arttırılarak 0.25V aralıklarında karşılık eş gelen güç değerleri kaydedilip girişim grafiği oluşturulup analiz edilmiştir. Bu eğriden yararlanılarak girişim analizi yapıp $V\pi$ ve $V2\pi$ gerilimleri değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler sonucunda çalışma gerilimine ulaşılmıştır, $V\pi/2$ olarak belirlenmiştir. IM-1 örneğinde çizilen girişim eğrileri analiz edildiğinde ($V=0$) başta herhangi bir gerilim yokken gelen ölçümü alınan ışık gücünün en yüksek seviyede olması beklenir. Fakat bu işlemlerde $V=0$ ile $V\pi$ değerlerinin arasında olduğunda ışık gücünün çok yüksek seviyelerde olduğu görülmüştür.

Oluşan bu farklılığın sebebi üretilen modülatörde çıkış tarafında ayrılan iki kolun güçlerinin homojen ayrılmaması ve aynı değerlere sahip olmamasıdır. Örneler üretilmeden önce yapılan tasarımlarda örneklerin ayırma oranlarının aynı olduğu %50-%50 olarak ayrıldığı düşünülse de deneysel üretim sürecinde böyle olmadığı görülmüştür. Bu işlemlerin sonunda alternatif akım ile farklı frekanslarda ölçümler alınmıştır. Gelen sinyal kaynağından şiddeti

50 MHz - 1000 MHz aralığında olacak şekilde 50 MHz aralıklarla frekans değerini farklı değerlere çekerek takibi sağlanmıştır. Bu takip osiloskop ile izlenip takip edilmiştir. Ölçümü yapılan AC seviyede görülen gerilim değerleri radyo dalgaları ile karşılaştırılıp kayıt altına alınmıştır. Grafik oluşturmak için normalize güç grafiği çizdirilip analizi yapılmıştır.

Bunun devamında örnekler sıcaklık testleri uygulandığında ve yapılan 2 farklı işlem kapsamında da değişimlerin gerçekleştiği görülmüştür. -40°C'lerde epoksi uygulanmış örnek başarıyla diğer uygulanmamış örneğin testlerde kaldığı görülmüştür. Bunun gibi bir sonuca bakıldığında gümüş epoksi yapısının örnekler üzerinde etkisinin yüksek olduğu kanıtlanmıştır. Malzemenin etkisi hem yüzeyde direnç tabakası oluşturmak ve elektrot genişliğini bozmadan örnek üzerinde farklı sıcaklıklara karşı stabilizeyi sağlamaktır. Performansı arttırmakta kullandığımız gümüş epoksi malzemesinin LiNbO₃ malzemesinin ısı direncinde artışa sebep olduğu görülmüştür.

Son zamanlarda bilgi ve teknolojinin önemini anlamaktayız. İnsanoğlu için bilgiye hızlı ve ucuza ulaşmak en büyük gelecekte başarılması gereken hedefelerden biridir. Bu amaçla hayatımızda her noktada elektriksel yöntemlerle üretilen ürünlerden daha hızlı cevap veren ve geleceğe umut olan ışığın temelinde üretimi tamamlanan entegre optik ve fiber optik aygıtlar nanoteknolojide kazandığı önem ile akıl almaz bir hızla ileri noktalara optik aygıtları taşımıştır. Bu motivasyonda seçtiğim tezimde elektro optik sistemlerde kullanılan LiNbO₃ dalga kılavuzlarının fabrikasyonları tamamlanmış üretimi tamamlanan aygıtlar hazırlanan hassas ölçüm alanlarında elektriksel sıcaklık testleri yapılmıştır. Bu tarz yapılarda önemli noktalardan biri de elektrotların arasındaki mesafenin ölçüsü ve buna bağlı bir değer olan elektrot genişlikleridir. Bant genişliğini artırmak; elektrot genişliğini azaltmak ve elektrotlar arasındaki mesafeyi artırmak ile sağlanacaktır. Bunun devamında iklimatik kabin testleri uygulanır burada kullanılacak çevre şartlarını sağlamaları için sıcaklık testleri yapılır. Test öncesinde aygıtlara epoksi uygulaması yapılarak dirençleri artırılır ve daha stabilize sonuçlar elde edilir. Hazırlanan örnekler ile askeri standartlarda geliştirilmiş modülatör üretilmiş olunur.

Farklı çalışmalarda fabrikasyon adımlarında fotolitografi de yapılan UV ışık basma süresi ile difüzyon süresinin paralel olarak değiştirilmesi ile ortaya çıkan dalga kılavuzu yapısında bozulmalar ve optik gücün düşük yaklaşık 0.125-0.250 mw civarlarında ölçüldüğü gözlenmiştir. Y. Hua çalışmalarına bakıldığında aygıtın üretiminde kullanılan yöntemin

515°C’de 8 saat süreyle yapılan difüzyonda meydana gelen tek kipli dalga kılavuzu yapısında optik geçirgenliğin %25-35 arasında olduğu ve çalışmamda difüzyon sıcaklığı ve süresiyle ilgili deneysel çalışmamda doğru parametrelere ulaşıp hem optik geçirgenliğin hem de PER değerlerinin sonucu ile karşılaştırıldığında yüksek performansta çalışan aygıt elde edilmiş oldu. Hua’nın çalışmasında görülen iklimatik kabin teslerinde çalışma sıcaklık aralığının -25°C ve +50°C’lere kadar çalıştığı ve buralarda yüksek genişlikte piklerin olduğu yorumlanmıştı. Yapılan çalışmada bu durumun litografide doğru UV basma süresi ve difüzyon sıcaklığı ayarlandığında genliği daha düşük piklerin olduğu testlerde verilmiştir. Çalışmalarda optik geçirgenlik değerleri ölçüldüğünde ortaya çıkan kaybın birçok sebebi vardır. Aygıt üretildikten sonra optik entegrasyon kısmında kaynaktan fiber ortamında çıkan ışıktaki bir kayıp ortaya çıkmaktadır. Kayıp değerleri 0.1-0.2 dB arasında ölçülmüştür. Dalga kılavuzu kol çıkışından çıkan ışığın dedektör üzerinde toplamasında ölçümü 0.2 dB değerindedir. Tez çalışmasında bu kayıpları minimum seviyelere indirerek maksimum performans ile çalışan aygıt üretimleri yapılmıştır. LiNbO₃ kristalinin, ölçümün yapıldığı dalgaboylarında çok düşük bir soğuruma sahip olması kristalin bu tip uygulamalarda tercih edilmesinin önemli nedenlerinden biridir.

Fabrikasyon tarafında yapılan değişimlerden biri olan metal kaplama kalınlığı gibi bazı parametreler küçük nano boyutlarda oluşan farklılıklar ile aygıt performansı üzerinde etkiler değişmektedir. Ortaya çıkan değerler ticari olarak üretilen diğer muadilleri ile aynı seviyede ve bazı testlerden daha başarılı sonuçlar elde edilerek tamamlanmıştır. Bununla beraber, titanyum metali difüzyonu ile üretilen dalga kılavuzu tipi kutuplayıcı aygıttan elde edilen kutup sönümleme oranı değerleri çalışmalar sırasında yapılan literatür araştırmasına göre şimdiye dek bu yöntem kullanılarak üretilen kutuplayıcılardan alınmış en yüksek değerlerdir.

Yeni çalışma önerileri olarak farklı bahsedilen fiberoptik dönüölçer sistemlerde kullanılan bir alt bileşen olan faz modülatörünün farklı fabrikasyon değerleri kullanarak difüzyon ve fotolitografi parametreleri belirlenerek fiziksel özellikleri değiştiren malzeme performansında aygıt üretimi yapılabilir. Üretilen elektro optik aygıtlara elektrik alan uygulanması için PCB taşıyıcı ile elektriksel bağlantı ile bağlanır. Elektriksel kablonun uçları aygıta uygun olacak şekilde uçları istenen boyutlarda kesilir üreteçlerinden gelen gücü değiştirerek fabrikasyon parametreleri ve elde edilen güç değerleri analiz edilebilir ve yeni çalışmalarda karşılaştırılabilir.

Farklı üretim yöntemleri ve bunun yanı sıra testlerden önce uygulanan yöntemlerde kullanılan epoksi uygulamasında homojen LiNbO_3 malzemesinde sıcaklık testlerinde olumlu sonuçlar verdiği görüldü. Aygıtların üretiminde bazı değerlerin farklılaşması ile ortaya çıkan nano boyutlarda meydana gelen değişimler aygıt performansı üzerinde etkileri göstermiştir. Sonuca bakıldığında difüzyon parametreleri denenerek 1010°C de 8 saat süren doğru difüzyon parametreleri elde edilirken üretilip LiNbO_3 dalga kılavuzları yapısından yüksek 40-45 mw seviyelerinde ışık geçirildi. Giriş çıkış entegrasyonu gücü maksimize ederek fiberlere bağlantıları tamamlanıp örneklerin sıcaklık testlerine karşı performansı arttırmak adına gümüş epoksi işlemi uygulanıp testlere tabii tutuldu. Bu çalışmada üretilen aygıtlarda ortaya çıkan sonuç ticari muadilleri ile aynı değerde başarı göstermiştir. Bununla beraber, titanyum metali difüzyonu ile üretilen dalga kılavuzu tipi kutuplayıcı aygıttan elde edilen kutup sönümleme oranı değerleri çalışmalar sırasında yapılan literatür araştırmasına göre şimdiye dek bu yöntem kullanılarak üretilen kutuplayıcılardan alınmış en yüksek kalitedir. Bu sonuçlar ışığında modülatör üretiminde yapılan işlemlerden fotolitografide belirlenen işlemlerden, alttaş içerisine dalga kılavuzunun geçirilmesi ve Ti kaplama kalınlığının doğru değerlerde kaplanması ile difüzyon işlemindeki parametrelerden sıcaklık ve sürenin deneysel çalışmalarla elde edilip en doğru yüksek performansta çalışan aygıt üretimi tamamlanmıştır. Daha sonra UV altında belirlenen süre ve UV ışık gücünde yüksek güç değerinde maksimize edilip fiber entegrasyon adımı tamamlanmıştır. Aygıtlar çevresel testlerde yapılan epoksi işlemlerinin malzeme üzerinde yarattığı ısı direnç ile yüksek performansta çalıştığı görülmüştür.

Çalışmaların devamında ülkemiz içinde araştırıp geliştirme konusu olarak ele alınması gereken LiNbO_3 malzemesi bu çalışma gibi daha fazla çalışmada kullanılmalıdır. Bu malzeme birçok alanda önemli bir yere sahiptir. Yaptığım çalışma ile ülkemizde bu malzemeyi temel alan çalışmalara yardımcı olmasını ve sayılarını artmasını umut ederim.

KAYNAKLAR

1. Iizuka, K. (2002). *Elements of Photonics, For Fiber and Integrated Optics*. (2. Baskı). Toronto: Wiley-Interscience Imprint.
2. Pollock, C. R. ve Lipson, M. (2003). *Integrated Photonics*. (5.Baskı). Berlin: Kluwer Academic.
3. Lifante, G. (2003). *Integrated Photonics: Fundamentals*. (8. Baskı). New Jersey: John Wiley & Sons.
4. Lefèvre, H. C. (2014). *The Fiber-Optic Gyroscope*. (2. Baskı). Norwood: Artech House.
5. Iizuka, K. (2002). *Elements of Photonics, in Free Space and Special Media*. (1. Baskı). Toronto: Wiley Interscience Imprint.
6. Sapra, N. V., Vercruysse, D., Su, L., Yang, K. Y., Skarda, J., Piggott, A. Y. ve Vuckovic, J. (2019). Inverse design and demonstration of broadband grating couplers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 25(3), 1–7.
7. Sapra, N. V., Yang, K. Y., Vercruysse, D. J. F., Su, L. ve Vučković, J. (2019). *Waveguide-integrated dielectric laser particle accelerators through the inverse design of photonics*. Conference on Lasers and Electro Optics, California.
8. Pathak, S. (2019). Photonics integrated circuits. *Nanoelectronics*, 7, 219–270.
9. Lal, S., Link, S. ve Halas, N. J. (2007). Nano-optics from sensing to waveguiding. *Nature Photonics*, 1(11), 641–648. doi:10.1038/nphoton.2007.223
10. Hua, Y., Shu, P., Zhu, X. ve Tian, Z. (2014). LiNbO₃ multifunction integrated optics chip with high polarization extinction ratio. *Semiconductor Optoelectronics*, 35(2), 181–183.
11. Suchoski, P. G., Findakly, T. K. ve Leonberger, F. J. (1988). Low-loss high-extinction polarizers fabricated in LiNbO₃ by proton exchange. *Optics Letters*, 13(2), 172-174.
12. Gampp, L. L., Zimmerman, G., Martinez, A. R. ve Flaherty, T. M. (2002). Integrated optics chip having reduced surface wave propagation. U.S. Patent No. 6,438,280. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
13. Sanders, G. A., Sanders, S. J., Strandjord, L. K., Qiu, T., Wu, J., Smiciklas, M. ve Salit, M. (2016). *Fiber optic gyro development at Honeywell*. SPIE, California.
14. Kintner, E. C. (1981). Polarization control in optical-fiber gyroscopes. *Optic Letters*, 6(3), 154–156.
15. Chamoun J. N. ve Digonnet, M. J. F. (2015). Noise and bias error due to polarization coupling in a fiber optic gyroscope. *Journal Lightwave Technology*, 33(13), 2839–2847.
16. Lefevre, H. C., Bettini, J. P., Vatoux, S. ve Papuchon, M. (1986). Progress in optical fiber gyroscopes using integrated optics. *Proceedings SPIE*, 2510, 37-50.

17. Findakly, T. ve Bramson, M. (1990). High-performance integrated-optical chip for a broad range of fiber-optic gyro applications. *Optic Letters*, 15(12), 673–675.
18. Bass, M., Van Stryland, E. W., Williams, D. R. ve Wolfe, W. L. (1995). *Handbook of Optics: Device, Measurements and Properties*. USA: McGraw-Hill.
19. Bass, M., Enoch, J. M., Van. Stryland, E. W. ve Wolfe, W. L. (2001). *Handbooks of Optics: Fiber Optics & Nonlinear Optics*. (2. Baskı). USA: McGraw-Hill.
20. Seeds, A. J. ve Williams, K. J. (2006). Microwave photonics. *Journal of Lightwave Technology*. <https://www.osapublishing.org/jlt/abstract.cfm?URI=jlt-24-12-4628>, Son Erişim Tarihi: 15.02.2024.
21. Capmany, J. ve Novak, D. (2007). Microwave photonics combines two worlds. *Nature Photonics*, 1(6), 319–330.
22. Saleh, B. E. A. ve Teich, M. C. (2009). *Fundamentals of Photonics*. (3.Baskı). New Jersey: Wiley Interscience.
23. Hui, R. ve O’Sullivan, M. (2022). *Fiber-Optic Measurement Techniques: Fiber-Based Optical Metrology and Spectroscopy Techniques*. (2. Baskı). Cambridge: Academic Press.
24. Shuai G., Min L, Zhiguang J. ve Haiyan C. (2020). A tunable dual- wavelength fiber ring cavity laser based on a FBG and DFB laser injection. *Optik*, 203, 1-24.
25. Adams, C. S. ve Mlynek, J. (1994). *Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics*. (72. Baskı). Ohio: AP, 352.
26. Özdemir, M. (2012). *Design and analysis of an open loop fiber-optic gyroscope*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
27. Mohamedelhassan, A. (2012). *Fabrication of ridge waveguides in Lithium Niobate*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, AlbaNova University Center, Royal Institute of Technology KTH, Stockholm.
28. Nishihara, H., Haruna, M. ve Suhara, T. (1989). *Optical Integrated Circuits*. (85. Baskı). USA: R.R Donelley & Sons Company.
29. Jundt, D. H. ve Foulon, G. (2002). *Properties of Lithium Niobate*. (28. Baskı). London: INSPEC, 25-27.
30. Prokhorov A. M. ve Kuzminov Y. S. (1990). *Physics and Chemistry of Crystalline Lithium Niobate*. Bristol: Adam Hilger.
31. Bermudez, V., Serrano, M. D. ve Diequez, E. J. (1999). Bulk periodic poled lithium niobate crystals doped with ER and YB. *Journal of Crystal Growth*, 200, 185-190.
32. Feisst, A. ve Koidl, P. (1985). Current induced periodic ferroelectric domain structures in LiNbO₃ applied for efficient nonlinear optical frequency mixing. *Applied Physics Letters*, 47, 1125-1127.

33. İnternet: MPI-FKF Stuttgart Crystal Growth Group (2015). Web: www2.fkf.mpg.de/crystal/D4_CZ_growth.pdf, Son Erişim Tarihi: 10.01.2024.
34. Basov, N. G. ve Prokhorov, A. M. (1954). Application of molecular beams for the radiospectroscopic study of rotational molecular spectra. *Mathematical and Physical Sciences*, 27(10), 431-438.
35. Gordon, J. P., Zieger H. J. ve Townes C. H. (1955). The maser- new type of microwave amplifier, frequency standard and spectrometer. *Physics Review*, 99, 1264-1274.
36. Schawlow, A. L. ve Townes, C. H. (1958). Infrared and optical masers. *Physics. Review*, 112(6), 121-124.
37. Findakly, T. ve Chen, B. (1984). Electron. *Optics Letters*. 20, 128-130.
38. Suchoski, P., Findakly, T. ve Leonberger, F. (1988). *Optic Letters*. 13, 172-175.
39. Kintner, E. C., S. Ezekiel ve H. J. Arditty (1982). *Springer Series in Optical Sciences*. (32. Baskı). Berlin: Springer-Verlag, 72.
40. Goss, W. C. (1986). Proceedings of the Society of Photo Optical. *Instrumentation Engineering*, 719, 113-118.
41. Ulrich, R. (1982). *Springer Series in Optical Sciences*. (32. Baskı). Berlin: Springer-Verlag, 52.
42. Miller, S. E. (1969). Integrated optics. *The Bell System Technical Journal*, 48(7), 2059-2069.
43. Sohler, W., Hui, H., Ricken, R., Quiring, V., Vannahme, C., Hermann, H. ve Yoohong, M. (2008). Integrated optical devices in lithium niobate. *OPN Journal*, 19(1), 24- 31.
44. Lefevre, H. C. (2014). *The Fiber Optic Gyroscope*. (2. Baskı). London: Artech House.
45. Arizmendi, L. (2004). Photonic applications of lithium niobate crystals. *Physica Status Solidi*, 201(2), 253-283.
46. K. K. Wong (2002). *Properties of Lithium Niobate*. (28. Baskı). London: INSPEC, 25-27.
47. Abernethy, J. A. (2002). *Novel devices in periodically poled lithium niobate*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Faculty of Engineering and Applied Science, University of Southampton.
48. Peithmann, K., Zamani-Meymian, M. R., Haaks, M., Maier, K., Andreas, B., Buse, K. ve Modrow, H. (2006). Fabrication of embedded waveguides in lithium-niobate crystals by radiation damage. *Applied Physics Lasers and Optics*, 82, 419- 422.
49. Aillerie, M., Bourson, P., Mostefa, M., Abdi, F. ve Fontana, M. D. (2013). Photorefractive damage in congruent LiNbO₃ part II magnesium doped lithium niobate crystals. *Journal of Physics: Conference Series*, 47, 416-423.

50. Schmidt R.V. ve Kaminov I. P. (1974). Metal-diffused optical waveguides in LiNbO₃. *Applied Physics Letters*, 25(8), 458-460.
51. Herreros B., Lifante G. (1995). LiNbO₃ Optical Waveguides by Zn Diffusion from Vapor Phase. *Applied Physics Letters*, 66(12), 1449-1451.
52. Weis, R. S. ve Gaylord T. K. (1985). Lithium Niobate: Summary of physical properties and crystal structure. *Applied Physics A*, 37, 191-203.
53. Cohen, D. A. (2001). *Lithium niobate microphotonic modulators*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Faculty of the Graduate School of Electrical Engineering, University of Southern California, USA.
54. Matthias, B.T. ve Remeika, J. P. (1949). Ferroelectricity in the limenite structure. *Physics Review*, 76, 1886-1887.
55. Prudenzeno, F., D'Orazio, A., Petruzelli, V. ve De Sario M. (1997). Comparison between the performance of Ti: LiNbO₃ and H: LiNbO₃ rotated optical axis waveguides, progress in electromagnetics research. *PIER Journals*, 16, 227-267.
56. O'Bryan H. M., Gallagher P. K. ve Brandle C. D. (1985). Congruent composition and li-rich phase boundary of LiNbO₃. *Journal of the American Ceramic Society*, 68(9), 493-496.
57. IRE Standards on Piezoelectric Crystals (1949). *IEEE Standard Progress*. 1378-1395.
58. Korkhishko, Y. N. ve Federov V.A. (1999). *Ion Exchange in Single Crystal for Integrated Optics and Optoelectronics*. London: Cambridge Imprint Science Publishing.
59. İnternet: Anonymous (2016). Web: <https://impex-hightech.com/de/kristalle/nlo-kristalle/linbo3/spektrale-eigenschafden.html>, Son Erişim Tarihi: 10.02.2025.
60. Anonymous (2010). *EEE549 Nanoscale Fabrication Techniques for Semiconductors*. Ankara: Bilkent University.
61. Eric, A. ve Dougherty, D. (t.y.). *Modern Physical Organic Chemistry*. University Science.
62. Ishii, H., Usui, S., Douki, K., Kajita, T., Chawanya, H., Shimokawa, T. (2000). Design and lithographic performances of 193-specific photoacid generators. F. M. Houlihan (Ed.), *Advances in Resist Technology and Processing XVII*, 1120–1127.
63. İnternet: Anonymous (2013). Web: <https://cpeahnool.iengatech.edu>, Son Erişim Tarihi: 10.05.2023.
64. Anonymous (2013). *Lapping and Polishing Basics Applications Laboratory Report 54*. USA: South Bay Technology.
65. Madou, M. (2002). *Fundamentals of Microfabrication*. (54. Baskı). Florida: CRC Press.

66. Cummings, U. (2005). *Linearized and high frequency electrooptic modulators*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, California Institute of Technology, California.
67. İnternet: Anonymous (1998). Web: <http://computer.howstuffworks.com/fiber-optic.html>, Son Erişim Tarihi: 23.08.2013.
68. Hecht, E. (2002). *Optics* (4. Baskı). San Francisco: Addison&Wesley.
69. Wooten, L., Kissa, K. M., Yi-Yan, A., Murphy, E. J., Lafaw, D.A., Hallemeier, P. F. ve 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), 56-68.
70. İnternet: Anonymous (2015). Web: <http://icmn.csis.es/fis/english/evaporacion-electrones.html>, Son Erişim Tarihi: 10.05.2023.
71. Cummings, U. (2005). *Linearized and high frequency electrooptic modulators*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, California Institute of Technology, California.
72. Dagli, N. (2007). *High-Speed Photonic Devices*. (25. Baskı). USA: Taylor & Francis Group.
73. Focus, N. (2001). *Application Note 2: Practical Uses and Applications of Electro-Optics Modulators*. USA: New Focus.
74. Gan, F. Y. (1996). *Traveling wave electrode design for high speed LiNbO₃ intensity modulators*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, McGill University, Department of Electrical Engineering, Montreal.
75. Gopalakrishnan, G. K., Burns, W. K., McElhanon, R. W., Bulmer, C. H. ve Greenblatt, A. S. (1994). Performance and modeling of broadband LiNbO₃ traveling wave optical intensity modulators. *Journal of Lightwave Technology*, 12(10), 1807-1819.
76. Yao, X. S. ve Maleki, L. (1996). Optoelectronic microwave oscillator. *Optical Society of America*, 13(8), 1725-1735.
77. Burns, W. K. ve Va, A. (2001). Optical moderator with coupled coplanar strip electrode. *Photonic System Application*, 8, 42.
78. Griffiths, G. J. ve Esdaille, R. J. (1984). Analysis of titanium diffused planar optical waveguides in lithium niobate. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 20, 2.
79. Shewmon, P. G. (1963). *Diffusion in Solids*. (155. Baskı). New York: Mc-Graw Hill.
80. Armenise, M. N. (1988). Fabrication techniques of lithium niobate waveguides. *IEE Proceedings*, 135(2), 85-91.
81. Bor-Vei, C. ve Pastor, A. C. (1977). Elimination of Li₂O out-diffusion waveguide in LiNbO₃ and LiTaO₃. *Physics Letters*, 30, 570.

82. Hunsperger, R. G. (1985). *Integrated Optics: Theory and Technology*. (2. Baskı). Berlin: Springer-Verlag.
83. Özbay, E. (2010). Photonic metamaterials: Science meets magic. *IEEE Photonics Journal*, 2(2), 249-252.





Gazili olmak ayrıcalıktır