

KOCELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FİBER OPTİK AKIM ALGILAYICISININ MODELLENMESİ VE
SAYISAL BENZETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hakan AYDOĞAN

Anabilim Dalı: Elektrik Eğitimi

Danışman: Doç. Dr. Faruk ARAS

KOCAELİ, 2008

KOCELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FİBER OPTİK AKIM ALGILAYICISININ MODELLENMESİ VE
SAYISAL BENZETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Hakan AYDOĞAN

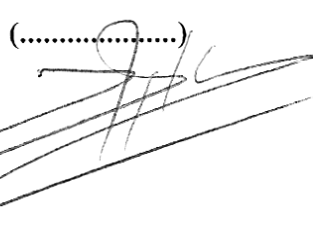
Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 5 Mayıs 2008

Tezin Savunulduğu Tarih: 29 Mayıs 2008

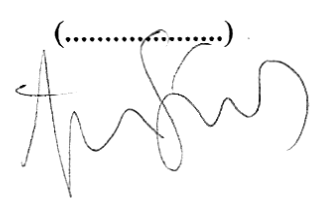
Tez Danışmanı
Doç.Dr. Faruk ARAS

(.....)


Üye
Prof.Dr. Güneş YILMAZ

(.....)


Üye
Yrd.Doç.Dr. Ayşe ERGÜN AMAÇ

(.....)


KOCAELİ, 2008

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Faraday etkili fiber optik akım algılayıcıları ile çok yüksek akımların ölçümü gerçekleştirilmektedir. Böyle bir algılayıcının çalışması için ihtiyaç duyulan ışık kaynağı, polarizör, fiber optik, analizör, ışık algılayıcısı ve sinyal işleme birimlerinin modellenmesi, sayısal benzetimi yapılması ve algılayıcının değişik şartlar altındaki cevabı incelenmesi ileriye dönük çalışmalara katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmaya katkılarından dolayı değerli tez danışmanım Doç. Dr. Faruk ARAS'a ve maddi-manevi yönden beni yalnız bırakmayan aileme çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ.....	vi
SİMGELER.....	vii
ÖZET.....	viii
İNGİLİZCE ÖZET.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. AKIM ALGILAYICILARI VE OPTİK GENEL BİLGİLERİ	4
2.1.Akım Algılayıcıları.....	4
2.1.1. Geleneksel akım ölçme elemanları.....	4
2.1.1.1 Akım transformatörü.....	4
2.1.1.2 Rogowski bobini.....	4
2.1.1.3 Şönt direnç.....	5
2.1.1.4 Hall algılayıcı	5
2.1.2. Fiber optik akım algılayıcıları	6
2.1.2.1.Manyetostriksiyon tabanlı fiber optik akım algılayıcıları.....	10
2.1.2.2.Faraday tabanlı fiber optik akım algılayıcıları	10
2.2.Optiğin Temelleri ve Modellenen Elemanların Özellikleri.....	16
2.2.1. Işık.....	16
2.2.1.1. Işığın yansıması.....	17
2.2.1.2. Işığın kırılması.....	18
2.2.2. Yarıiletken lazer diyotlar.....	18
2.2.3. Polarizör ve analizörler.....	19
2.2.4. Fotodiyotlar.....	23
2.2.5. Fiber optik.....	25
2.2.5.1. Fiber optik türleri.....	26
2.2.5.1.1. Cam fiberler.....	26
2.2.5.1.2. Plastik fiberler	26
2.2.5.1.3. Basamak indisli fiberler	26
2.2.5.1.4. Dereceli indisli fiberler.....	27
2.2.5.2. Fiber optik kabloda zayıflama.....	28
2.2.5.2.1. Soğurma kayıpları.....	28
2.2.5.2.2. Rayleigh saçılma kayıpları.....	28
2.2.5.2.3. Yayılm kayıpları.....	28
2.2.5.2.4. Bağlantı kayıpları	29
2.2.5.3. Fiber optik kabloda dağılma	31
2.2.5.3.1. Mod dağılması.....	31
2.2.5.3.2. Renk dağılması.....	31
3. FİBER OPTİK AKIM ALGILAYICISI BİLEŞENLERİNİN MODELLERİ.....	32
3.1. Yarıiletken Lazer Diyot Modeli.....	33
3.2. Polarizör Modeli.....	36
3.3. Fiber Optik Modeli.....	37

3.4. Analizör Modeli.....	41
3.5. Fotodiyot Modeli.....	42
3.6. Sinyal İşleme Biriminin Modeli.....	44
4. SİSTEM DEĞİŞKENLERİN İNCELENMESİ.....	46
4.1. Lazer Diyot Değişkenlerinin İncelenmesi.....	47
4.2. Fiber Optik Değişkenlerinin İncelenmesi.....	48
4.3. Fotodiyot Değişkenlerinin İncelenmesi.....	49
4.4. Sistem Cevabının İncelenmesi.....	51
5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	54
KAYNAKLAR.....	56
EKLER.....	59
ÖZGEÇMİŞ.....	67

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Yüksek gerilimde kullanılan geleneksel transformatör.....	4
Şekil 2.2: Rogowski bobini.....	5
Şekil 2.3: Şönt direnç.....	5
Şekil 2.4: Hall algılayıcı.....	6
Şekil 2.5: Ölçme alanlarının yayın dağılımları.....	7
Şekil 2.6: Prototipin iletken akımına göre çıkış gerilimi.....	7
Şekil 2.7: Fiber optik akım algılayıcısının doğrusallığı.....	8
Şekil 2.8: 50Hz'lik akımın ölçüm çıkışlarının karşılaştırılması.....	8
Şekil 2.9: 3000 Amper-sarım doğru akım geçici rejimlerinin karşılaştırılması.....	9
Şekil 2.10: Fiber optik akım sensörü.....	10
Şekil 2.11: Kullanılan teknolojiye göre yayın dağılımları.....	11
Şekil 2.12: Faraday etkisi.....	12
Şekil 2.13: Optik fiberde Faraday etkisi.....	12
Şekil 2.14: Basit bir fiber optik akım algılayıcısı bileşenleri.....	13
Şekil 2.15: Basit bir fiber optik akım algılayıcı sistem çıkışı.....	14
Şekil 2.16: Polarizör ve analizöre sahip bir fiber optik akım algılayıcı bileşenleri....	14
Şekil 2.17: Polarizörlü(45°) ve analizörlü bir fiber optik akım algılayıcı sistem çıkışı.....	15
Şekil 2.18: Faraday aynasına sahip fiber optik akım algılayıcı.....	16
Şekil 2.19: Elektromanyetik dalga.....	16
Şekil 2.20: Yansıma olayı.....	17
Şekil 2.21: Kırılma olayı.....	18
Şekil 2.22: Polarize edilmemiş ışık ışınının elektrik alanı ve polarizasyon düzlemi..	20
Şekil 2.23: Polarizasyonun etkisi.....	20
Şekil 2.24: Polarizasyon türleri.....	21
Şekil 2.25: Polarizasyon türlerinin vektörleri.....	22
Şekil 2.26: Analizörün etkisi.....	23
Şekil 2.27: Fotodiyot kesit alanı.....	24
Şekil 2.28: Kabul konisi ve kritik açı.....	25
Şekil 2.29: Tek modlu basamak indisli fiber.....	27
Şekil 2.30: Çok modlu basamak indisli fiber.....	27
Şekil 2.31: Çok modlu dereceli indisli fiber.....	27
Şekil 2.32: Eksenel hata.....	29
Şekil 2.33: Aralık hatası.....	30
Şekil 2.34: Açısal hata.....	30
Şekil 2.35: Kusurlu yüzey hatası.....	31
Şekil 3.1: Faraday etkili fiber optik akım sensörü ve elemanları.....	33
Şekil 3.2: Lazer diyot modeli.....	36
Şekil 3.3: x ve y yönünde polarize edilmiş ışık.....	37
Şekil 3.4: Polarizör modeli.....	37
Şekil 3.5: Fiber optik modeli.....	38
Şekil 3.6: λ - α modeli.....	38
Şekil 3.7: λ -azalma modeli.....	39

Şekil 3.8: λ -n modeli.....	40
Şekil 3.9: Fiber optik sarım sayısının uzunluk hesabı modeli.....	40
Şekil 3.10: λ -V modeli.....	40
Şekil 3.11: θ -M modeli.....	41
Şekil 3.12: Fiber optik zaman gecikme modeli.....	42
Şekil 3.13: Analizör modeli.....	42
Şekil 3.14: Fotodiyot modeli.....	43
Şekil 3.15: λ -R elde edilmiş fonksiyon grafiği.....	44
Şekil 3.16: λ -R elde edilmiş fonksiyon modeli.....	44
Şekil 3.17: RC filtre modeli.....	44
Şekil 3.18: Sinyal işleme biriminin modeli.....	46
Şekil 4.1: Sistem modeli.....	47
Şekil 4.2: Lazer çıkış gücünün, lazer giriş akımı ve λ ile değişimi.....	48
Şekil 4.3: Lazer çıkış gücü geçici rejimi zaman grafiği.....	49
Şekil 4.4: λ - α değişimi.....	49
Şekil 4.5: λ -n değişimi.....	50
Şekil 4.6: λ -V değişimi.....	50
Şekil 4.7: λ -R değişimi.....	51
Şekil 4.8: Fotodiyot geçici rejimi zaman grafiği.....	51
Şekil 4.9: Fotodiyot akımları.....	52
Şekil 4.10: İletkenin içinden geçen akım ve λ değişiminin sistem cevabına etkisi...	53
Şekil 4.11: Lazer giriş akımının sistem cevabına etkisi.....	54
Şekil 4.12: Fiber optik sarım sayısının sistem cevabına etkisi	54
Şekil A1: LP'nin ilk iki modu.....	60
Şekil B1: Lazer diyotun elektriksel eşdeğer devresi.....	62
Şekil C1: Homojen optik fiberin ince bir silindirik katmanı.....	63
Şekil C2: Dielektrik bir dalga kılavuzunun eşdeğer devresi.....	65
Şekil D1: pin fotodiyotun elektriksel eşdeğer devresi.....	65

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1: Elektromanyetik tayf bölgeleri.....	17
Tablo 2.2: Bilinen lazerler ve dalga boyları.....	19
Tablo 3.1: Modellerde kullanılan parametrelerin değerleri.....	33
Tablo 3.2: Saf silikada λ -n ilişkisi.....	39

SEMBOLLER

c	: Işık hızı, (m/s)
E	: Elektrik alanı, (V/m)
g	: Kazanç, (cm^{-3}/s)
h	: Planck sabiti, (J.s)
H	: Manyetik alan şiddeti, (A.sarım/m)
I	: Akım, (A)
$i(t)$: Lazer giriş akımı, (A)
L	: Fiber optik uzunluğu, (m)
M	: Faraday dönme matrisi
n	: Fiber optik özünün kırılma indisi
N	: Fiber optik sarım sayısı
No	: Saydamlıkta taşıyıcı yoğunluğu, (cm^{-3})
$N(t)$: Taşıyıcı yoğunluğu, (m^{-3})
$P(t)$: Optik güç, (W)
r	: İletkenin yarıçapı, (m)
R	: Fotodiyot duyarlılığı, (A/W)
RC	: Direnç- kondansatör filtresi
$S(t)$: Foton yoğunluğu, (m^{-3})
ν	: Lazer ışını frekansı, (Hz)
V	: Verdet sabiti, (rad/A)
Va	: Aktif bölgenin hacmi, (cm^3)
q	: Elektron yükü, (C)
Qc	: Kritik açı
α	: Fiber optik zayıflama katsayısı (dB/km)
αl	: Hat genişliği ek faktörü (line-width enhancement factor)
β	: Kendiliğinden yayılım faktörü
ε	: Kazanç doyum parametresi, (cm^3)
η	: Toplam kuantum verimi
Γ	: Optik hapsedme faktörü (optical confinement factor)
λ	: Işığın dalga boyu, (m)
$\phi(t)$: Lazer ışın fazı
τ	: Ömür, (s)
θ	: Polarizasyon dönme açısı

Alt indisler

<i>alfa</i>	: Zayıflama
<i>fiber</i>	: Fiber optik
<i>kaynak</i>	: Lazer kaynağı
<i>n</i>	: Taşıyıcı
<i>O</i>	: Eğim
<i>p</i>	: Foton
<i>pol</i>	: Polarizasyon

FİBER OPTİK AKIM ALGILAYICISININ MODELLENMESİ VE SAYISAL BENZETİMİ

Hakan AYDOĞAN

Anahtar Kelimeler: Fiber Optik Akım Algılayıcı, Faraday Etkisi, Modelleme, Polarizör, Analizör, Lazer, Fotodiyot

Özet: Fiber optik algılayıcılar son yıllarda endüstride ve tıp alanında kullanılmaya başlanmıştır. Elektrik-elektronik sistemlerde akım algılamak için de bu algılayıcılardan yararlanılmaktadır. Fiber optik akım algılayıcılarının geleneksel akım algılayıcılarına göre birtakım üstünlükleri vardır. Fakat böyle bir algılayıcı sistemin üretim maliyeti yüksektir. Bu sistemleri tesis etmeden önce modellemek, model üzerinde eksiklikleri ve hataları düzeltmek, maliyeti en aza indirmeye yardımcı olmaktadır.

Bu tezde; geleneksel ve fiber optik akım algılayıcılarının avantajları ve dezavantajları ele alınmakta; Faraday etkili fiber optik akım algılayıcısının çalışması için ihtiyaç duyduğu polarizör, analizör, lazer, fotodiyot ve fiber optik malzemeler matematiksel ifadelerinden yararlanılarak Matlab Simulink programında modellenmekte; bu modellerin dinamiklerinin model cevaplarına etkisi gözlemlenmekte; tüm modeller birleştirilerek Faraday etkili fiber optik akım algılayıcısı modeli oluşturulmakta ve sistemdeki önemli dinamiklerin sistem cevabına etkisi incelenmektedir.

MODELING AND SIMULATION OF THE FIBER OPTIC CURRENT SENSOR

Hakan AYDOĞAN

Keywords: Fiber Optic Current Sensor, Faraday Effect, Modeling, Polarizer, Analyzer, Laser, Photodiode

Abstract: Recently, the fiber optic sensors have begun to be used in industry and medical science. They have been also utilized for current sensing on the electrical-electronical systems. The fiber optic current sensors have the number of advantages over conventional current sensors. However their production costs are high. Modeling before installation and to correct defects on the model assistant to cut down the costs to minimum.

In this thesis, it has been investigated advantages and disadvantages of the conventional and fiber optic current sensors. The polarizer, analyzer, laser, photodiode and fiber optic materials which required for fiber optic current sensor have been modelled utilizing their mathematical expressions in the Matlab Simulink programme. The dynamics of these models have been observed the effects of these model responses. Faraday based fiber optic current sensor has been made up connecting all the models and the effects of important dynamics to the system response have been investigated.

1. GİRİŞ

Elektrik güç endüstrisi, endüstrinin önemli ve büyüyen bir dalıdır. Yüksek akımların ölçümü, izlenmesi ve kontrol edilmesi; elektrik güç santrallerinde, güç çeviricilerinde ve transformatör istasyonlarında çok önemli olmaktadır. Geleneksel akım transformatörleri yüksek gerilimde çalıştığından çok iyi bir şekilde yalıtılmak zorundadır. Bunun yanında algılayıcı ve sinyali elektromanyetik girişime maruz kalmaktadır. Bu girişimi engellemek için ekranlama yapılmaktadır. Ekran ve yalıtım sorunu, geleneksel akım transformatörlerinin karmaşık ve ağır oluşuna neden olmasının yanında maliyetini de arttırmaktadır. Bu sorunu ortadan kaldırmak için farklı teknolojilerin yanı sıra, optik akım algılayıcıları da son 20 yıldır gündemde olup, halen geliştirilme süreci devam etmektedir [1].

Bu tezde, fiber optik akım algılayıcısının modellenmesi ve sayısal benzetimi yapılmaktadır. Bu amaçla, fiber optik akım algılayıcısının çalışması için ihtiyaç duyduğu elemanlar tek tek analiz edilip, matematiksel ifadelerinden yararlanılarak oluşturulan modellerin cevapları ile fiber optik algılayıcısının cevabı birleşik sistem benzetimi yoluyla incelenmektedir.

Optik akım algılayıcıları çeşitli yöntemler kullanılarak oluşturulmaktadır. Bunlardan birisi de fiber optik akım algılayıcılarıdır. Bu yöntemde manyetik alan algılayıcısı fiber optik malzemedir. Faraday etkili fiber optik akım algılayıcısında ana yöntem, optik fiberdeki doğrusal polarize edilmiş ışığın, dış manyetik alandan dolayı polarizasyon düzleminin dönmesi esasına dayanmaktadır. Bu teknik, Faraday etkisine dayanan fiber optik manyetik algılayıcıların fiziksel mekanizmasıdır [2].

Faraday etkisi 1845 yılında Michael Faraday tarafından keşfedilmiştir [1]. Faraday malzemesi olarak fiber optik kullanılabilir. Fiber kablonun en büyük elektriksel olarak yalıtkan bir malzeme olmasıdır. Fiber optik akım algılayıcılarının avantajları arasında doğrusal cevabı ve yüksek frekanslarda kullanımı vardır [3].

Fiber optik malzeme kullanan akım algılayıcıları Japonya, U.S., Fransa ve İngiltere’de ticari amaçla kullanılmaktadır. İlk uygulamalar 1987 yılında yapılmıştır [4].

Fiber optik akım algılayıcıları, yüksek gerilim yalıtımı, histeresiz etkisi olmayışı ve doyum söz konusu olmadığından geleneksel akım transformatörlerine göre giderek cezbedici hale gelmektedir [5].

30 yılı aşkın bir süredir optik tabanlı birçok akım ölçüm sistemleri geliştirilmiştir. Son yıllarda fiber optik algılayıcılar üzerine birçok çalışma yapılmıştır [1].

Leung ve arkadaşları tarafından yapılan bir uygulamada toplam maliyeti 2.500\$ olan prototipin cevap süresi 4 μ s, hassasiyeti 1 mV/A ve dinamik ölçme aralığı 8-5000 A’dır [3].

Ulmer tarafından yapılan bir çalışmada 500 A’de oda sıcaklığında fiber optik algılayıcının çıkış sinyalinin %0.03 içerisinde istikrarlı olduğu bildirilmiştir [6].

Briffod ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada ± 500 kA’e kadar olan ac ve dc akımları ± 0.2 doğrulukla ve 0 – 50 °C aralığında ölçebilen fiber optik akım algılayıcısı tasarlanmıştır [7].

Yapılan bir uygulamada 275 kV’ lik şalt sahası baralarında hata yeri bulmada Faraday etkili optik akım sensörü kullanılmıştır [4].

Yapılan bu çalışmalar genellikle sabit bir dalga boyunda veya sabit bir ışık gücünde gerçekleştirilmiştir. Bu tezde, Matlab Simulink programında hazırlanmış farklı dalga boylarında, farklı ışık güçlerinde, farklı fiber optik uzunluğunda çalışabilecek bir Faraday etkili fiber optik akım algılayıcısı modeli önerilmekte, Faraday etkisi ile ışığın polarizasyon düzlemi üzerindeki açısının değişimi ve bu etkinin meydana gelmesini sağlayacak girişler dikkate alınarak incelenmektedir.

2. bölümde; ışık, polarizör ve analizörler, yarıiletken lazer diyotlar, fiber optik, fotodiyot ve fiber optik akım algılayıcıları tanıtılmakta, geleneksel akım algılayıcıları ve optiksel akım algılayıcıları hakkında temel bilgiler verilmektedir.

3. bölümde, fiber optik akım algılayıcısı bileşenleri olan yarıiletken lazer diyot, polarizör, analizör, fiber optik ve fotodiyot elemanları matematiksel ifadelerden yararlanılarak Matlab Simulink programında modellenmektedir. Bununla beraber fotodiyot akımlarından hesaplanan sistem çıkışı sinyal işleme modeli içinde yer almaktadır.

4. bölümde, lazer, fiber optik, fotodiyot ve sistem değişkenleri incelenmekte ve bunların cevapları grafiksel olarak sunulmaktadır.

5. bölümde ise çalışma sonunda elde edilen sonuçlar özetlenmekte, genel bir değerlendirme yapılarak bu tezin ileriye dönük çalışmalara sağlayacağı katkılar üzerinde durulmaktadır.

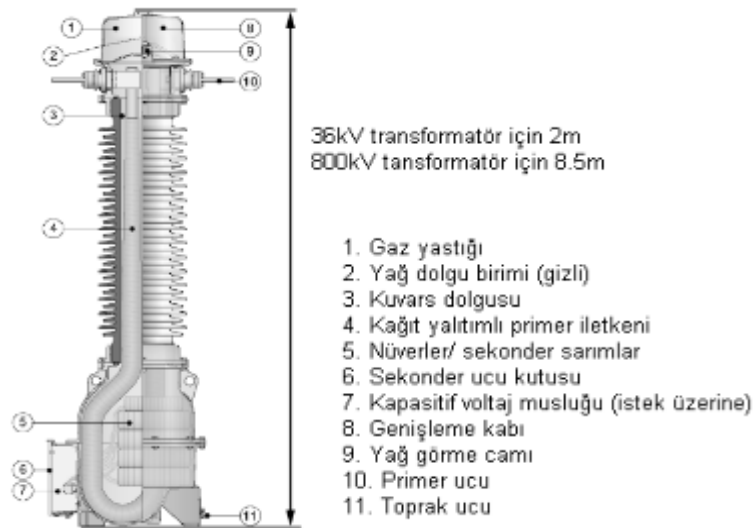
2. AKIM ALGILAYICILARI VE OPTİK GENEL BİLGİLERİ

2.1. Akım Algılayıcıları

2.1.1. Geleneksel akım ölçme elemanları

2.1.1.1 Akım transformatörü

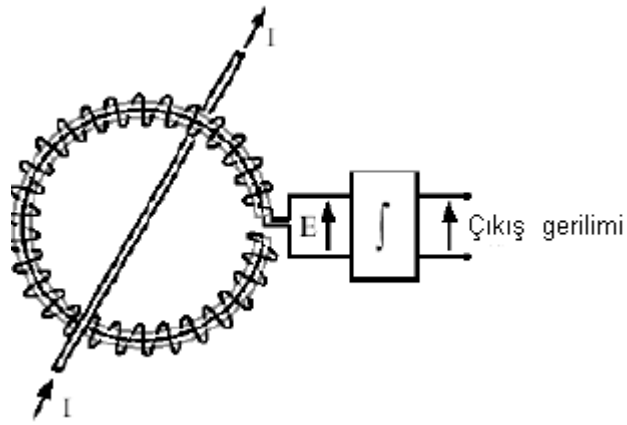
Akım transformatörleri genellikle bir nüve çevresine primer ve sekonder sargıların yerleştirilmesi ile oluşturulmaktadır. Bu sargıların dönüştürme oranı, primer sargıdan geçen akımı sekonder sargıda istenilen düzeylere indirmeyi ya da arttırmayı sağlamaktadır. Yüksek gerilimlerde soğutulmaya ihtiyaç duyduğu için genellikle su, hava ve yağ ile soğutma kullanılmaktadır. Bunun sonucunda akım transformatörünün maliyet ve ağırlığı artmaktadır. Bu transformatörün kullanılması için primer sargı ile bir elektriksel bağlantı kurulmak zorundadır. Bu da kayıplarla beraber istenmeyen elektriksel parazitler de doğurmaktadır. Demir nüve kullanımından dolayı histeresiz etki ve doyum önemli dezavantajlarındandır. Ayrıca akım transformatörü doğru akımı ölçmemektedir. Şekil 2.1’de bir akım transformatörü görülmektedir.



Şekil 2.1: Yüksek gerilimde kullanılan geleneksel transformatör [1]

2.1.1.2 Rogowski bobini

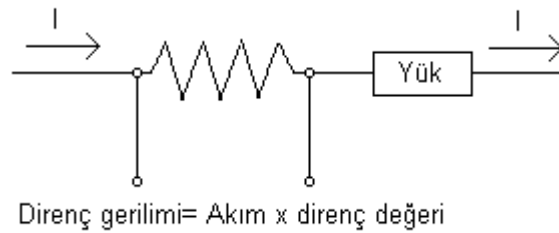
Bir Rogowski bobini nüvesiz olarak toroid biçiminde içinden akım geçen iletkenin etrafına sarılarak oluşturulmaktadır. Rogowski bobininin nüvesiz olması, doyum olmaksızın iyi bir doğrusal çıkış vermesini sağlamaktadır. Bunun yanında 100kA'e kadar olan akımları ölçebilmektedir. Diğer indükleme tabanlı algılayıcılar gibi Rogowski bobini de düşük frekanslardaki akımları algılayamamaktadır [1]. Rogowski bobini şeması Şekil 2.2'de görülmektedir.



Şekil 2.2: Rogowski bobini [1]

2.1.1.3 Şönt direnç

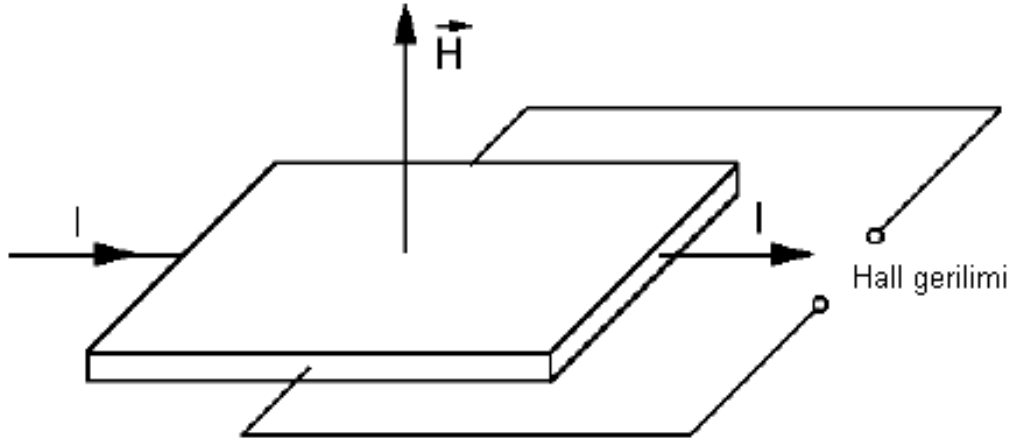
Direnç değerleri çok küçük olan bu dirençler ana akım yoluna seri olarak bağlanmakta ve geçen akımla orantılı bir şekilde üzerinde gerilim düşümü meydana gelmektedir. Doğru akımı ve Mhz'ler seviyesinde alternatif akımları algılayabilmektedir. Fakat düşük gerilim ve yüksek akımlarda sistem verimini azaltmaktadır [1]. Şekil 2.3'de şönt direnç şeması görülmektedir.



Şekil 2.3: Şönt direnç

2.1.1.4 Hall algılayıcı

Hall algılayıcılar günümüzde düşük maliyetli bir şekilde üretilmektedir. İyi bir sıcaklık karakteristiğine sahip olan bu algılayıcının bant genişliği sabit alanlardan 100MHz'e kadardır. Dinamik aralığı 50 μ Tesla'dan 30 Tesla'ya kadardır [1]. Şekil 2.4'de Hall algılayıcı şeması görülmektedir.

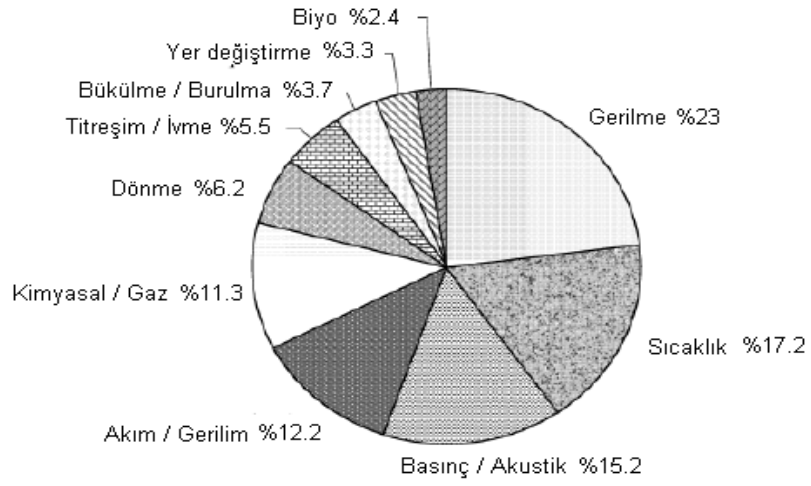


Şekil 2.4: Hall algılayıcı [1]

2.1.2. Fiber optik akım algılayıcıları

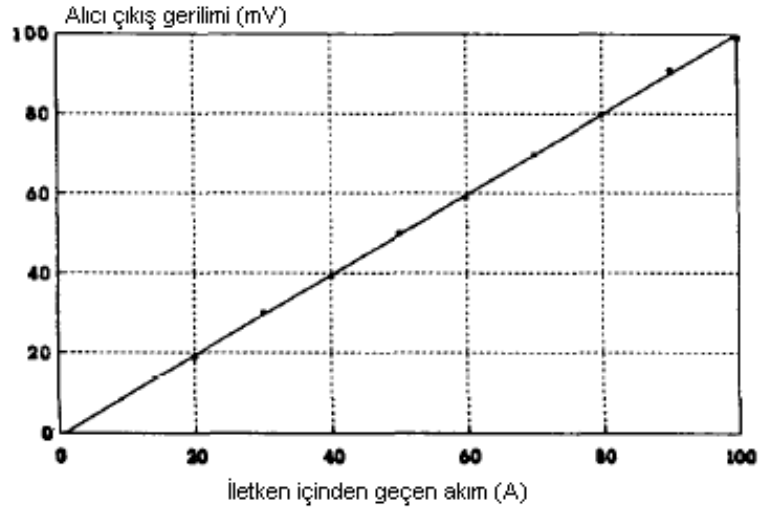
Fiber optik malzeme normalde elektromanyetik alanlardan etkilenmemektedir. Fakat yapılan tasarımlarla fiber optik kablo içinden geçen ışığın, dış çevredeki manyetik ortamdan etkilenmesi ile polarizasyonu ve faz gecikmesi değişebilmektedir [1]. Fiber optik malzeme kullanan akım algılayıcıları Japonya, U.S., Fransa ve İngiltere'de ticari amaçla kullanılmaktadır [4].

2002 yılında 15. si yapılan fiber optik akım algılayıcıları konferansında fiber optik tabanlı yayınların, ölçme alanlarına göre dağılımları Şekil 2.5'de gösterilmektedir.



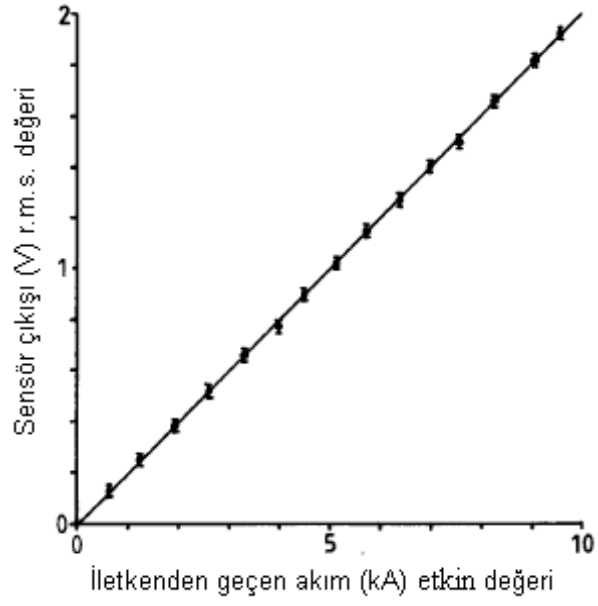
Şekil 2.5: Ölçme alanlarının yayın dağılımları [1]

Yapılan bir uygulamada toplam maliyeti 2.500 \$ olan prototipin cevap hızı 4 μ s, hassasiyeti 1 mV/A ve dinamik ölçme aralığı 8-5000 A'dir [3]. Şekil 2.6'da bu prototipin alıcı çıkış geriliminin iletken içinden geçen akımla ilişkisi görülmektedir.



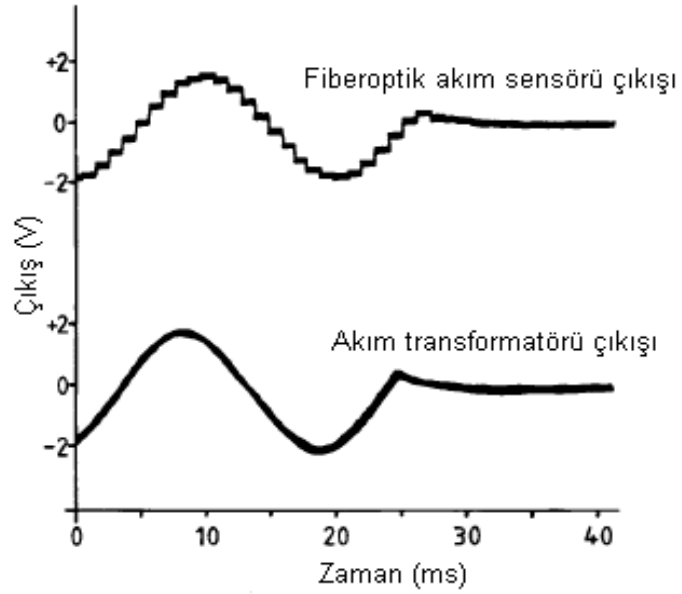
Şekil 2.6: Prototipin iletken akımına göre çıkış gerilimi [3]

Diğer bir çalışmada fiber optik akım algılayıcısının doğrusallığı Şekil 2.7'de gösterilmektedir.

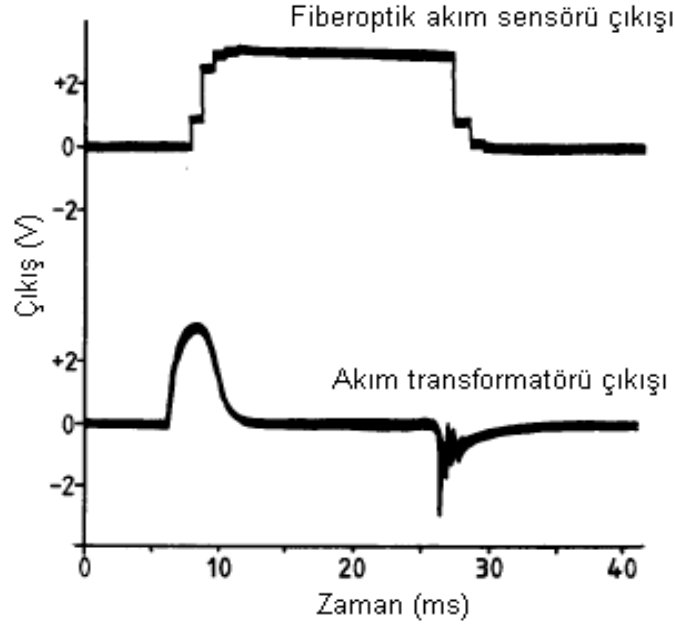


Şekil 2.7: Fiber optik akım algılayıcısının doğrusallığı [8]

Aynı çalışmada doğru akım ve alternatif akım hem akım transformatörü ile hem de fiber optik akım algılayıcısı ile ölçülmektedir. Bu ölçümler Şekil 2.8’de ve Şekil 2.9’da gösterilmektedir.



Şekil 2.8: 50Hz’lik akımın ölçüm çıktıların karşılaştırılması [8]



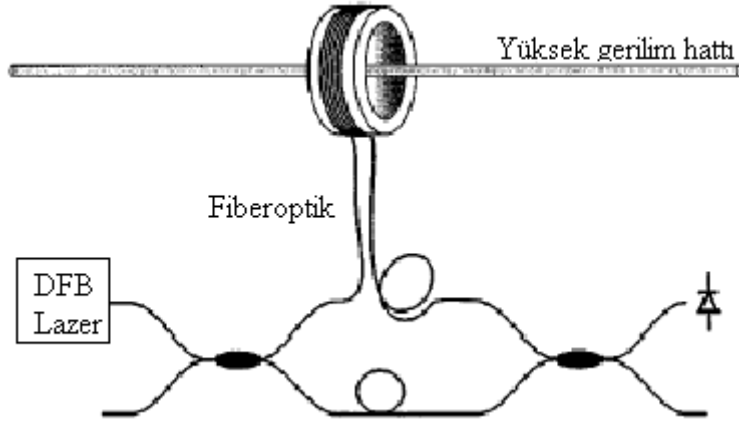
Şekil 2.9: 3000 Amper-sarım doğru akım geçici rejimlerinin karşılaştırılması [8]

Fiber optik akım algılayıcısı doğru akım ölçümünde akım değerini izlemektedir. Fakat akım transformatörü sadece akım değişimini algılayabilmektedir. Bu da fiber optik akım algılayıcısının koruma amaçlı uygulamalara uygun olduğunu göstermektedir [8].

Fiber optik manyetik algılayıcılar manyetostriksiyon tabanlı ve Faraday tabanlı olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Manyetostriksiyon algılayıcılarda; bir dış manyetik alandan dolayı malzemede meydana gelen uzunluk değişimini ölçen bir interferometre kullanılmaktadır. Uzunluk değişimi fiber içindeki ışığın fazında bir kaymaya neden olmaktadır. Faraday etkili algılayıcılarda ise dış manyetik alan, doğrusal polarize edilmiş ışığın düzleminin dönmesine neden olmaktadır. Manyetostriksiyon algılayıcıların duyarlılığı Faraday tabanlı algılayıcılara göre daha yüksek olmasına rağmen; karmaşık ve pahalı tasarımının yanında elektriksel olarak aktif bir algılayıcı olması dezavantajlarındanır. Dış manyetik alan ile Faraday tabanlı algılayıcıların çıkışları arasında doğrusal bir ilişki olması manyetostriksiyon tabanlı algılayıcılara göre üstünlüğünü göstermektedir [3]. Manyetostriksiyon algılayıcılar doğru akımdan 100 kHz'e kadar olan alanları algılayabilirken, Faraday etkili fiber optik akım algılayıcıları doğru akımdan MHz'lere varan yüksek bir bant genişliğine sahiptir. Bunun yanında yüksek doğrusallık göstermektedirler [3,9].

2.1.2.1. Manyetostriksiyon tabanlı fiber optik akım algılayıcıları

Bu prensip 1980 yılında önerilmiştir. Bir manyetostriktif malzeme mekaniksel olarak bir fibere bağlanmaktadır. Bu malzeme bir manyetik alana maruz kaldığında fiberde gerilmeye neden olmaktadır. Bu gerilim ile fiberin uzunluğu değişmektedir. Bu değişim fiberin bir koluna bağlanan Mach-Zehnder interferometresi ile algılanmaktadır [1]. Şekil 2.10'da manyetostriksiyon tabanlı fiber optik akım sensörü görülmektedir.



Şekil 2.10: Fiber optik akım sensörü [1]

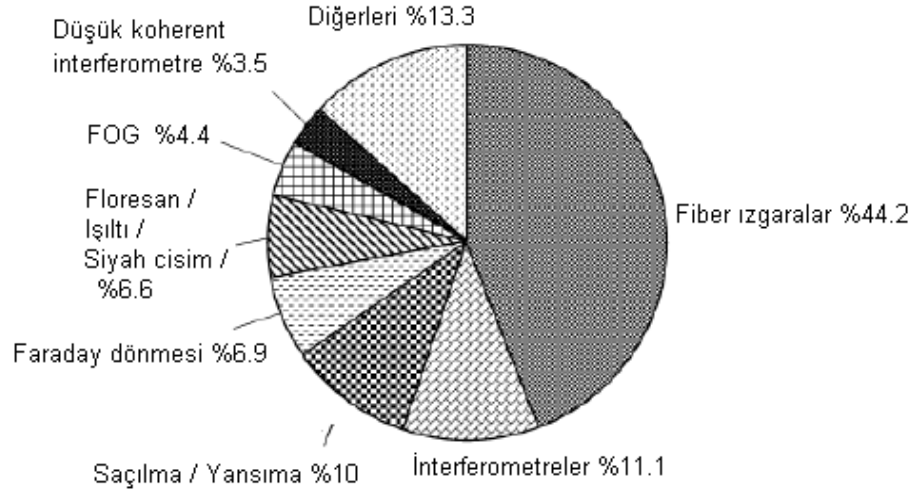
İspatlanmış en iyi yöntem fiberin manyetostriktif malzeme ile kaplanmasıdır. Bununla beraber sıcaklık bile fiber uzunluğunda değişime neden olabileceği düşünüldüğünde bu tip algılayıcının dezavantajı ortaya çıkmaktadır.

2.1.2.2. Faraday tabanlı fiber optik akım algılayıcıları

Fiber optik algılayıcı düzenlerinin düşük ağırlığı ve küçük boyutları, uzay çalışmaları gibi alanlardaki önemini arttırmaktadır [2]. Elektromanyetik alan içine yerleştirilen ve magneto-optik özelliği gösteren bir malzemede doğrusal polarize edilmiş ışığın polarizasyon düzlemi, yayılım yönüne paralel ve manyetik alan bileşeni ile orantılı olarak bir dönmeye maruz kalmaktadır. Lazerin keşfi ile birlikte bu etkiden elektrik akımı ölçmek için yararlanılmaktadır. Düşük kayıplı optik fiberlerin ve özellikle tek modlu optik fiberlerin üretilmesi ile fiber optik akım algılayıcı maliyeti düşürülmüştür. Fiber optik kullanımının en büyük özelliği elektriksel olarak yalıtkan bir malzeme olmasıdır.

Fiber optik akım algılayıcılarının avantajları arasında doyum ve histeresiz etki olmaksızın doğrusal cevabı ve yüksek frekanslarda kullanımı vardır [3].

2002 yılında 15. si yapılan fiber optik akım algılayıcıları konferansında fiber optik tabanlı yayınların, kullanılan teknolojiye göre dağılımları Şekil 2.11'de gösterilmektedir.



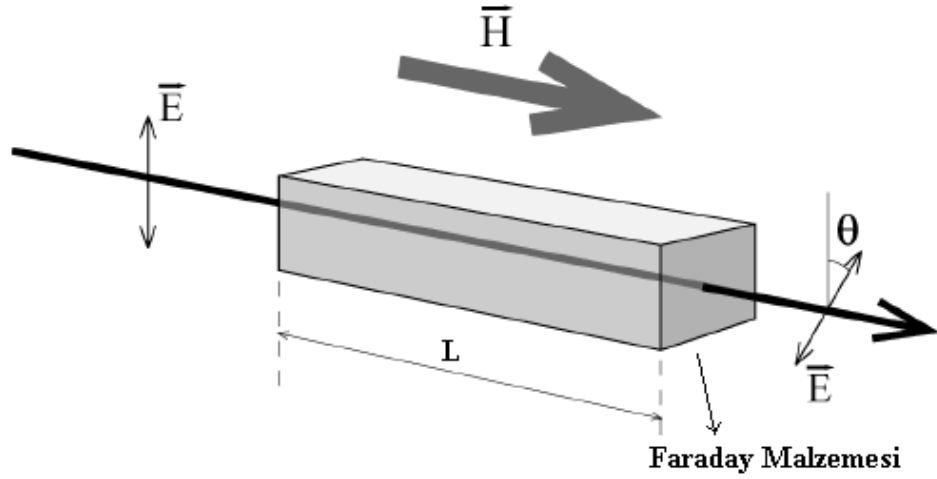
Şekil 2.11: Kullanılan teknolojiye göre yayın dağılımları [1]

TOSHIBA firması Faraday etkisiyle çalışan ve silika fiber optik kullanan optik akım transformatörü geliştirmiştir [10].

Şekil 2.12'de Faraday malzemesinden geçen doğrusal polarize edilmiş ışık (\vec{E}) manyetik alandan dolayı, polarizasyon düzleminde görüldüğü gibi θ açısı kadar dönmektedir. Bu açı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [9].

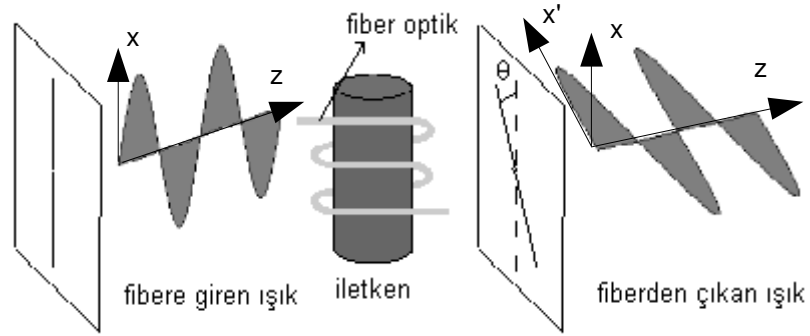
$$\theta = V \oint \vec{H} \cdot d\vec{L} \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'de V , Verdet sabiti; \vec{H} , ışığın yayılım yönü boyunca manyetik alan şiddeti; L , manyetik alan yönündeki Faraday malzemesinin uzunluğunu göstermektedir.



Şekil 2.12: Faraday etkisi [1]

Şekil 2.13'de içinden doğrusal polarize edilmiş ışık geçen fiber optik, akım geçen iletkenin etrafına sarılmaktadır.



Şekil 2.13: Optik fiberde Faraday etkisi

Amper kanununa göre denklem (2.1), aşağıdaki gibi olmaktadır [9].

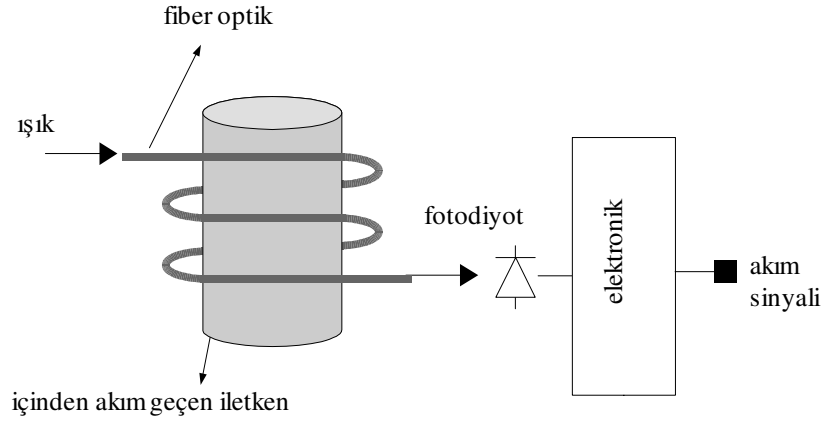
$$\theta = V N I \quad (2.2)$$

Denklem (2.2)'de V , Verdet sabitini; N , fiber optik sarım sayısını; I , iletken içinden geçen akım miktarını göstermektedir.

Verdet sabiti, malzemenin manyetik özellikleri tarafından belirlenmektedir. Işığın dalga boyu ve sıcaklığa bağlı olan bu sabit, silika gibi malzemelerde, oldukça düşüktür ve hemen hemen sıcaklıktan bağımsızdır [9].

Çok modlu optik fiberler ışığın polarizasyonunu bozduğu için fiber optik akım algılayıcılarında genellikle tek modlu fiber kullanılmaktadır. Bükülen fiberde doğrusal çift kırınım meydana gelmektedir. Bu durum algılayıcı duyarlılığını azaltmakta ve algılayıcı çıkışının sıcaklıkla değişimini arttırmaktadır. Bükülmeden dolayı oluşan doğrusal çift kırınımın azaltılması için fiber, soğutmadan sonra tavlmalıdır [4].

Şekil 2.14’de basit bir fiber optik akım algılayıcısı bileşenleri görülmektedir. Burada akım geçen iletkenin etrafına sarılan optik fiberden ışık geçtiği zaman akımın oluşturduğu manyetik alan ile değişen bir akım fotodiyot tarafından üretilmektedir. Elektronik birimi bu akım sinyalinden yararlanarak iletkenin içinden geçen akımı hesaplamaktadır. Bu yöntemde fiber optik üzerinde meydana gelen kayıplar çıkış sinyalini etkilemektedir.

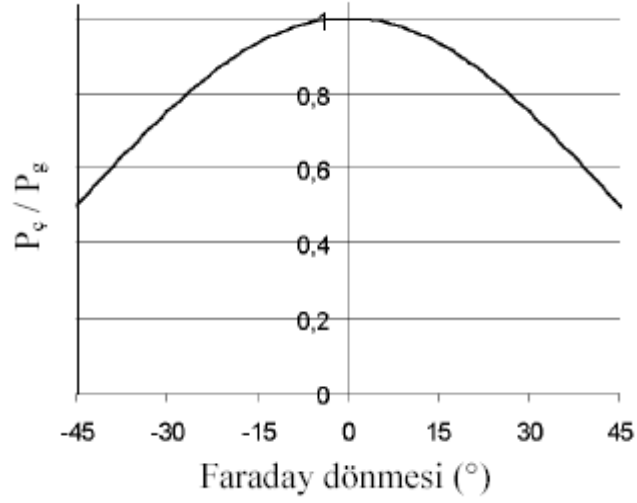


Şekil 2.14: Basit bir fiber optik akım algılayıcısı bileşenleri

Işığın giriş gücü sabit ve kayıplar ihmal edildiğinde, giriş gücü ile çıkış gücü arasındaki ilişki aşağıdaki gibi olmaktadır [1].

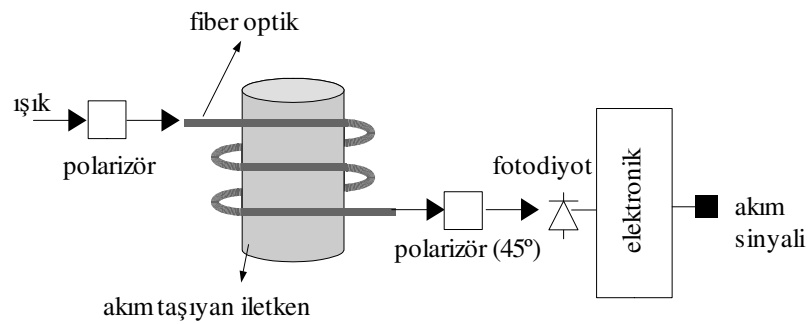
$$P_{\phi} = P_g \cos^2 \theta \quad (2.3)$$

Bu durumda Faraday dönmesi ile çıkış gücü arasındaki ilişki Şekil 2.15’de gösterildiği gibi olmaktadır.



Şekil 2.15: Basit bir fiber optik akım algılayıcı sistem çıkışı [1]

Şekil 2.16'da 2 adet polarizör görülmektedir. X ekseninde polarize olan ışığın polarizasyon açısı, akım taşıyan iletken etrafına sarılan fiber optik içinde değişmektedir. Polarizasyon açısı 45° olan başka bir polarizöre giren ışığın toplam dönme miktarı 45° ve akımın etkisiyle oluşan dönme değişimidir. Bu ışık, fotodiyot sayesinde akım sinyallerine çevrilmektedir. Elektronik birimi bu sinyalden yararlanarak iletkenden geçen akımı hesaplamaktadır. Bu sistem ile iletkenden geçen akımın işareti bilinmektedir. Diğer bir üstünlüğü ise polarizör ayarı ile daha doğrusal bölgelerde ölçüm yapma imkanı vermesidir [1].

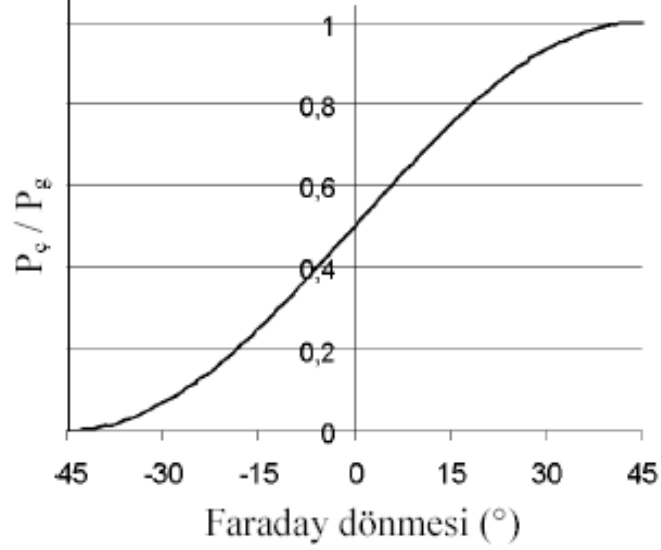


Şekil 2.16: Polarizör ve analizöre sahip bir fiber optik akım algılayıcı bileşenleri

Teorik olarak giriş gücü ve çıkış gücü arasındaki ilişki aşağıdaki gibi olmaktadır [1].

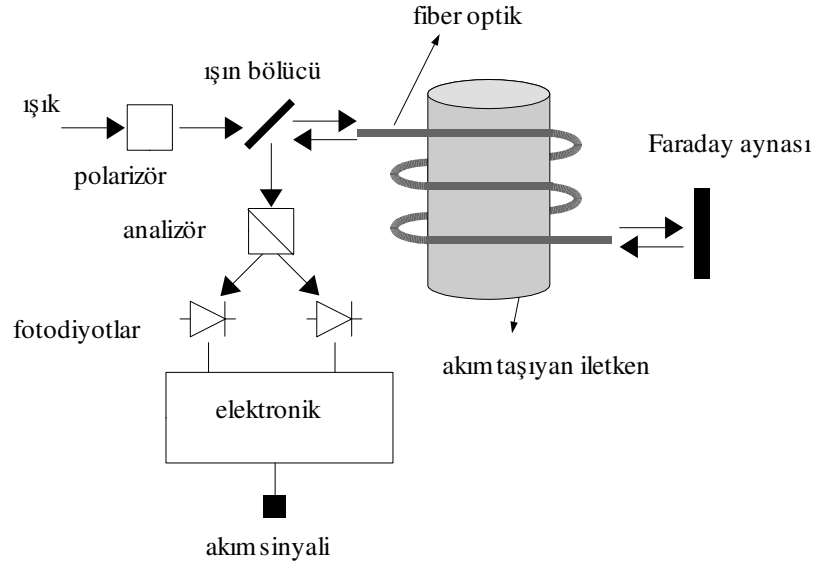
$$P_c = P_g \cos^2(\theta - \pi/4) \quad (2.4)$$

Bu durumda Faraday dönmesi ile çıkış gücü arasındaki ilişki Şekil 2.17'de gösterildiği gibi olmaktadır.



Şekil 2.17: Polarizörlü(45°) ve analizörlü bir fiber optik akım algılayıcı sistem çıkışı [1]

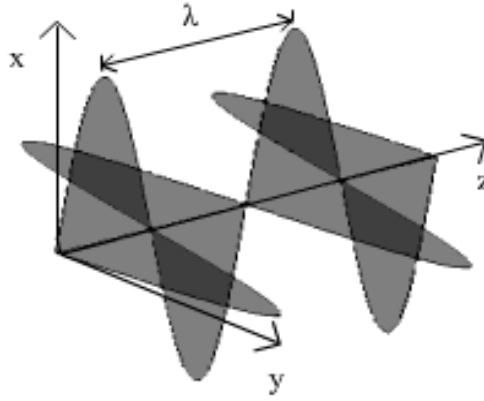
Şekil 2.18'de Faraday aynasına sahip bir fiber optik akım algılayıcısı bileşenleri görülmektedir. Burada polarize edilmiş ışık akım geçen iletkenin etrafına sarılan optik fibere girmekte ve Faraday dönmesine maruz kalmaktadır. Optik fiberin çıkışına yerleştirilen Faraday aynası ile ışık tekrar optik fibere girmekte ve tekrar bir Faraday dönmesine maruz kalmaktadır. Optik fiberden çıkan ışık, ışın bölücü sayesinde analizöre girmekte ve x ve y bileşenlerine ayrılmaktadır. Elektronik birimi, bu bileşenleri akıma çeviren fotodiyotlar yardımı ile iletken içinden geçen akımı hesaplamaktadır. Bu yöntemde ışık iki kere Faraday dönmesine maruz kaldığı için çıkış sinyali daha da kuvvetlenmiş olmaktadır. Ayrıca bu yapıda bir fiber optik akım algılayıcısı da fiber optik kabloda meydana gelen kayıplardan etkilenmemektedir.



Şekil 2.18: Faraday aynasına sahip fiber optik akım algılayıcı

2.2. Optiğin Temelleri ve Modellenen Elemanların Özellikleri

2.2.1. Işık



Şekil 2.19: Elektromanyetik dalga

Işık enine bir elektromanyetik dalgadır [11]. Şekil 2.19'da, x eksenini manyetik alanı, y eksenini elektrik alanı ve z eksenini de dalganın yayılım yönünü göstermektedir. Işığın dalga boyu ise elektrik alan veya manyetik alanın dalgasında, yayılım yönü boyunca iki tepe arasındaki uzaklıktır ve λ ile gösterilmektedir. Işık tayfı, insan gözünün göremeyeceği kadar uzun dalga boylarına sahip kızılötesi ışık, insan gözü tarafından görülebilir ışık ve insan gözünün göremeyeceği kadar kısa dalga boyuna sahip morötesi ışık olarak üç kısımda incelenebilmektedir.

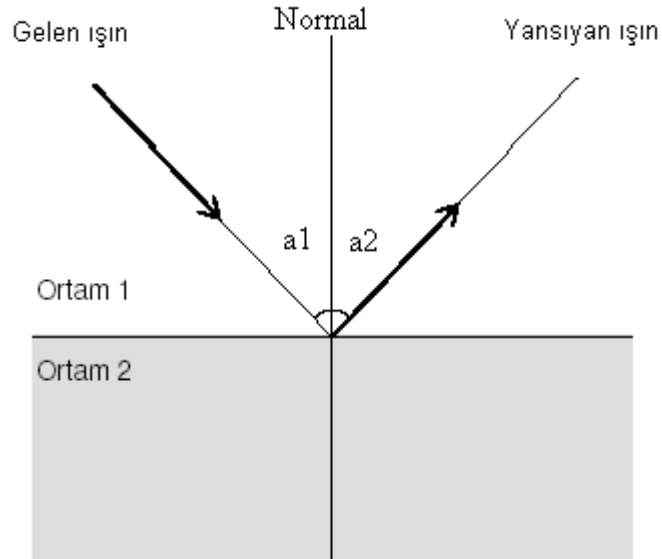
Görülebilir ışık 380-780 nm dalga boyu aralığına sahip ışıktır [12]. Elektromanyetik tayfın seçilen bazı bölgeleri için yaklaşık dalga boyları, frekansları ve enerjileri Tablo 2.1’de görülmektedir.

Tablo 2.1: Elektromanyetik tayf bölgeleri [13]

Bölge	Dalga Boyu (cm)	Frekans (Hz)	Enerji (eV)
Radyo	>10	$<3 \times 10^9$	$<10^{-5}$
Mikrodalga	10 - 0.01	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{12}$	$10^{-5} - 0.01$
Kızılötesi	$0.01 - 7 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{12} - 4.3 \times 10^{14}$	0.01 - 2
Görünür	$7 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	2-3
Mor ötesi	$4 \times 10^{-5} - 10^{-7}$	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{17}$	$3 - 10^3$
X-ışınları	$10^{-7} - 10^{-9}$	$3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19}$	$10^3 - 10^5$
Gama ışınları	$<10^{-9}$	$>3 \times 10^{19}$	$>10^5$

2.2.1.1. Işığın yansıması

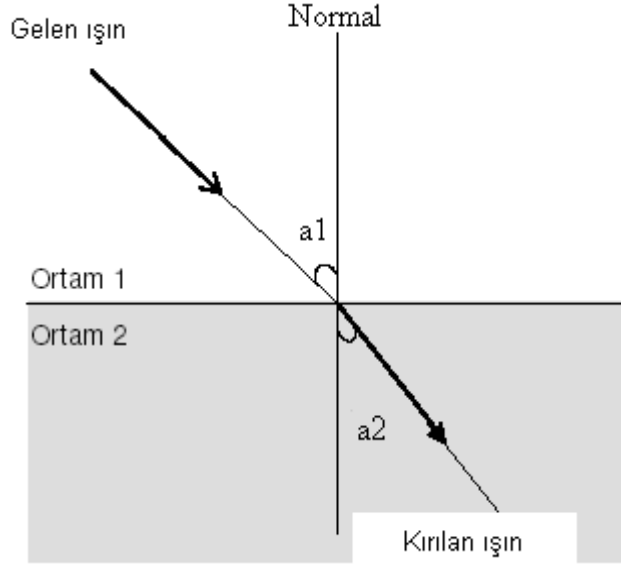
Işık bir ortamdan diğerine geçerken yansımaya uğramaktadır. Gelen ışık ile yansıyan ışığın yüzey normali arasında kalan açılar birbirine eşittir ($a_1=a_2$). Şekil 2.20’de yansıma olayı görülmektedir.



Şekil 2.20: Yansıma olayı [12]

2.2.1.2. Işığın kırılması

Işık, kırılma indisi az olan ortamdan kırılma indisi çok olan bir ortama geçtiğinde kırılmaya uğramaktadır. a_1 ve a_2 açılarının sinüslerinin oranı, ortam 1 ve ortam 2 den geçen ışığın hızları oranına eşittir [12]. Şekil 2.21’de kırılma olayı görülmektedir.



Şekil 2.21: Kırılma olayı [12]

2.2.2. Yarıiletken lazer diyotlar

Lazer geçmişi 1958 yılında Schalow ve Townes tarafından yayınlanan bir yayın ile başlamaktadır. 1960’da yakut lazer ve 1962’de helyum-neon gaz lazer çalışmalarıyla devam etmiştir. 1962’de yarıiletkenlerde lazer hareketi raporlanmıştır. İlk yarıiletken lazer p-n eklemli GaAs lazeridir. Bu tarihlerde yarıiletken lazerler eşik akımı çok değerdedir. Devam eden yıllarda yeni yapılar oluşturulmuş ve eşik akımı düşürülmüştür. 1976 yılında tanıtılmış kuantum kuyulu (quantum-well) lazerler son yıllarda büyük önem kazanmaktadır [13]. Bu yarıiletken lazer teknolojisi ile lazer aktif tabaka kalınlığı azaltılmış ve eşik akımı oldukça düşürülmüştür [14].

Lazer diyot çalışma prensibi, zorlamalı yayılım ile daha düşük bir enerji seviyesine geçen atomun düzgün bir ışımaya meydana getirmesi esasına dayanır [14].

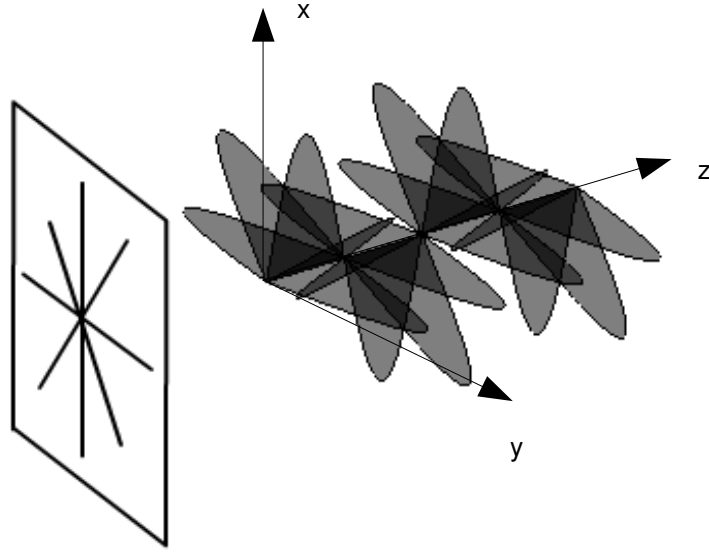
Tablo 2.2’de bilinen lazerler ve dalga boyları görülmektedir.

Tablo 2.2: Bilinen lazerler ve dalga boyları [13]

KAYNAK	(nm)
ArF	193
KrF	248
Nd:YAG(4)	266
XeCl	308
HeCd	325, 441.6
N ₂	337.1, 427
XeF	351
Nd:YAG(3)	354.7
Ar	488, 514.5, 351.1, 363.8
Cu	510.6, 578.2
Nd:YAG(2)	532
HeNe	632.8, 543.5, 594.1, 611.9, 1153, 1523
Kr	647.1, 676.4
Ruby	694.3
Nd:Glass	1060
Nd:YAG	1064, 1319
Ho:YAG	2100
Er:YAG	2940

2.2.3. Polarizör ve analizörler

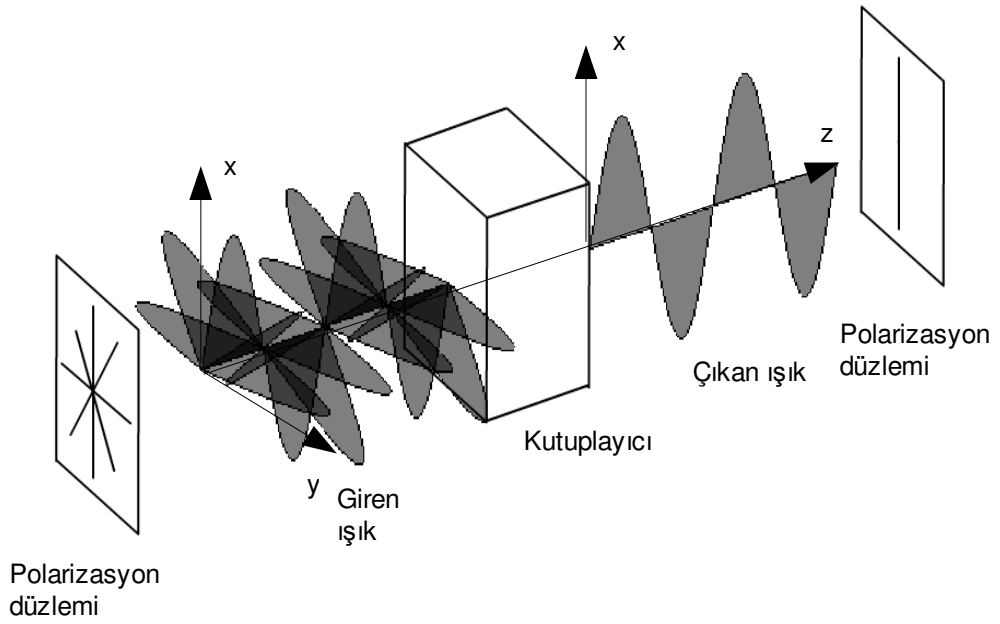
Bir ışık ışını kendi elektrik alan bileşenine sahip birçok dalgadan oluşur. Bu elektrik alanları normalde rasgele yönlerde dağılmaktadır ki buna polarize edilmemiş ışık denir [15]. Şekil 2.22’de polarizasyon düzlemi ve polarize edilmemiş ışık ışınının elektrik alan bileşenleri görülmektedir.



Polarizasyon düzlemi

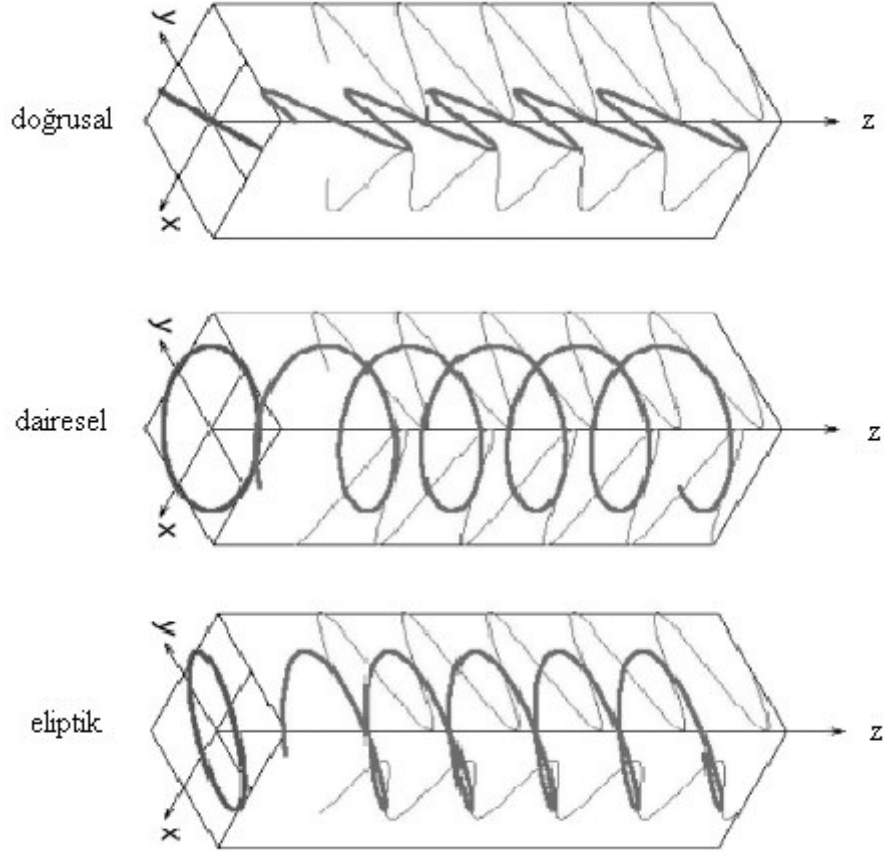
Şekil 2.22: Polarize edilmemiş ışık ışınının elektrik alanı ve polarizasyon düzlemi

Bir polarizör, polarize edilmemiş ışık ışınına istenilen ekseninde veya eksenlerde polarize edebilmektedir. Şekil 2.23'de polarize edilmemiş ışık ışını polarizör sayesinde sadece x ekseninde polarize edilmektedir.



Şekil 2.23: Polarizasyonun etkisi

Işık polarizörler sayesinde Şekil 2.24’de görüldüğü gibi doğrusal, dairesel ve eliptik polarize edilebilmektedir.




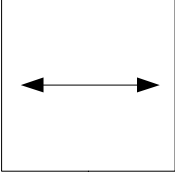

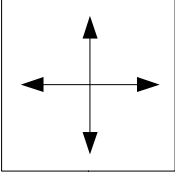

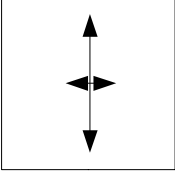
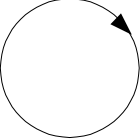
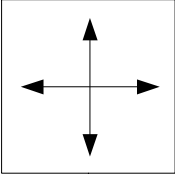

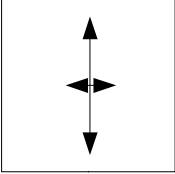
Şekil 2.24: Polarizasyon türleri [1]

Doğrusal polarize edilmiş ışığın x ve y yönlerindeki bileşenleri aynı büyüklükte ve aynı fazda olmaktadır.

Dairesel polarize edilmiş ışığın x ve y yönlerindeki bileşenleri aynı büyüklükte olmasına rağmen aralarında 90° faz farkı vardır.

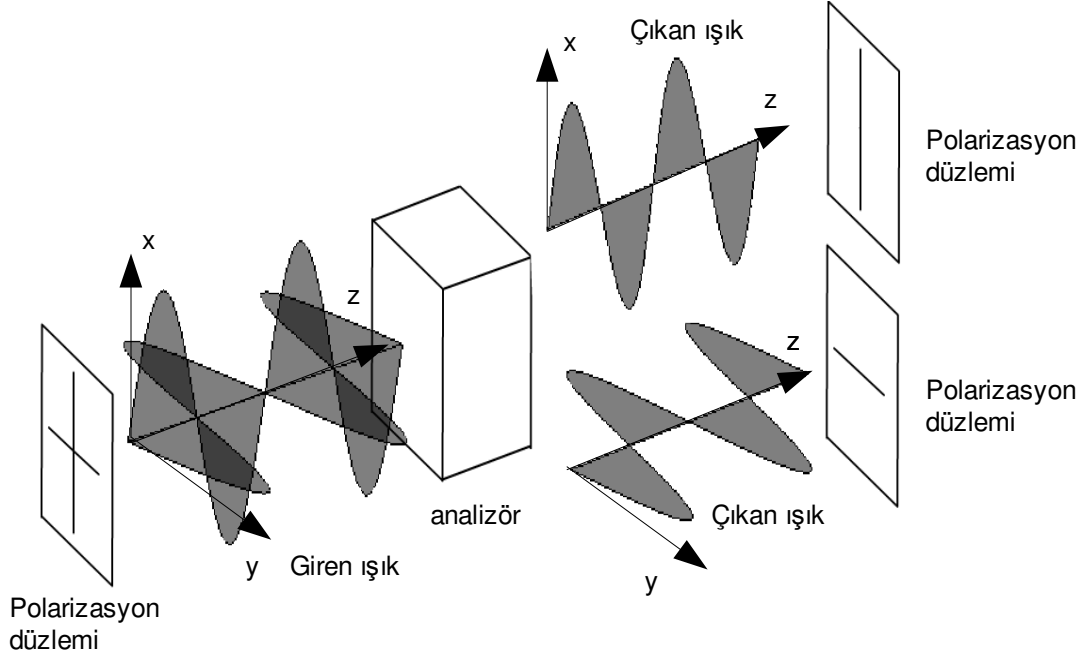
Eliptik polarize edilmiş ışığın x ve y yönlerindeki bileşenlerinin hem büyüklükleri hem de faz farkları değişik olmaktadır [1].

Şekil 2.25’de polarizasyon türlerinin vektörleri gösterilmektedir.

Kutuplanmış ışık vektör toplamı	Kutuplanmış ışık vektör bileşenleri	Kutuplama açısı (°)	Bileşenler arasındaki faz farkı (°)	Kutuplanma türü
		0	0	doğrusal
		45	0	doğrusal
		70	0	doğrusal
		-	90	sağa dairesel
		90	90	sola eliptik

Şekil 2.25: Polarizasyon türlerinin vektörleri [15]

Analizörler, ışık ışınını yayılım yönüne dik ve paralel iki ışına ayırabilmektedirler. Bu durum Şekil 2.26'da görülmektedir.



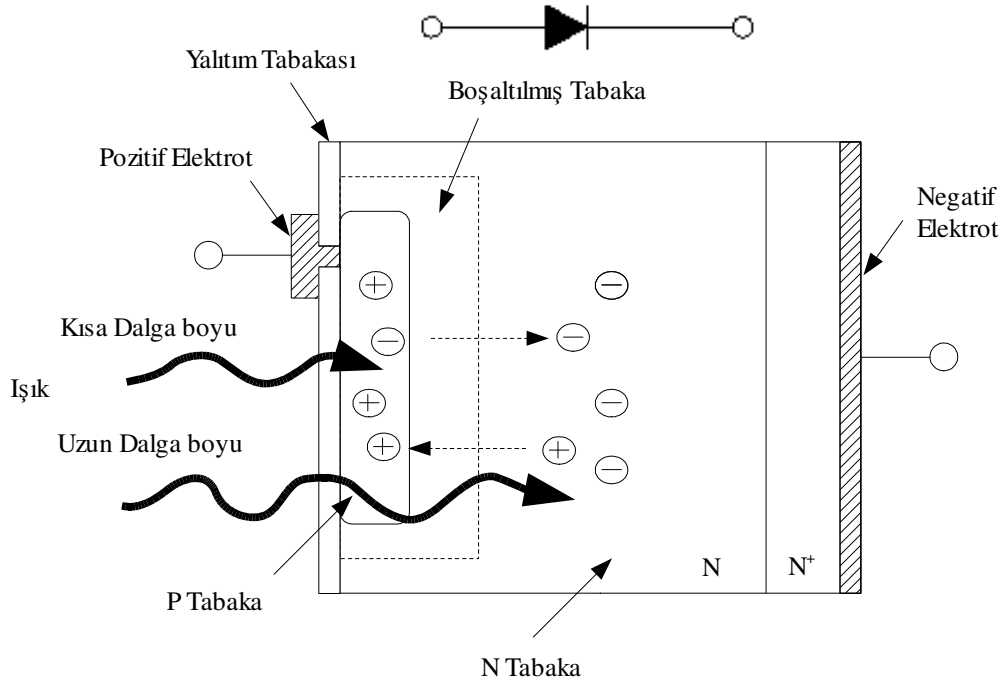
Şekil 2.26: Analizörün etkisi

2.2.4. Fotodiyotlar

Fotodiyotlar, yarıiletken P-N eklemine ışık düştüğünde gerilim veya akım üreten algılayıcılardır. Yarıiletken fotodiyotlar, P-N eklemine yakın bir bölgede ışığı emmektedir. P-N eklemi arasına bir boşaltılmış tabaka eklenen P-I-N fotodiyotlar ise geniş bir ışık tayfında ve yüksek frekanslarda çalışılmasını kolaylaştırmaktadır [16]. Bir başka fotodiyot çeşidi olan çığ fotodiyotların, iç kazançlarından dolayı duyarlılıkları yüksek olmaktadır [17].

Işıklı değişen mükemmel doğrusallığı, düşük gürültüsü, geniş tayfsal cevabı, küçük ve uzun ömürlü olması fotodiyotların özelliklerindedir [18].

Silikon, oda sıcaklığında 1.12 eV bant aralığı enerjisine sahiptir. Eğer foton enerjisi, bant aralığı enerjisinden büyükse elektronların değerlik bandından iletim bandına geçmesini sağlayabilmektedir. Bu da fotonun 1100 nm'den daha küçük dalga boylarında mümkün olabilmektedir. Kısa dalga boyuna sahip fotonlar en üst yüzeydeki ince bir tabaka tarafından emilmektedir [19].



Şekil 2.27: Fotodiyot kesit alanı [18]

Şekil 2.27’de bir fotodiyot kesit alanı görülmektedir. Silikon fotodiyotlar için P tabaka genellikle seçici boron yayılımı ile oluşturulmaktadır. P, N ve N⁺ kalınlıkları değiştirilerek fotodiyotun tayfsal ve frekans cevabı kontrol edilebilmektedir. Işık fotodiyot üzerine düştüğünde kristal yapı içerisindeki elektronlar uyarılmaktadır. Eğer ışığın enerjisi silikonun boşluk bandındaki enerjisinden yüksek ise elektron N tabakasına delikler ise P tabakasına geçmektedir. Boşaltılmış tabakadaki elektrik alanı bu değişimi ivmelendirmektedir. Böylece P katmanında pozitif yük ve N katmanında negatif yük toplanmaktadır. Eğer P ve N tabaka dış bir elektrik devresine bağlanırsa N tabakasındaki elektronlar dış devreden Pozitif elektrotta akmakta ve bir fotodiyot akımı oluşturmaktadır [18].

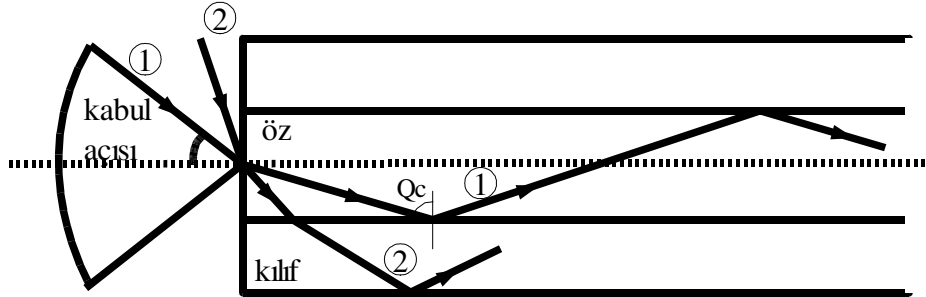
Fotodiyot kısaca optik gücü fotodiyot akımına çevirir. Bu çevirme oranı responsivite yani duyarlılık olarak bilinir.

2.2.5. Fiber optik

Optik fiberler; düşük iletim kaybı, yüksek iletişim hızı, elektriksel olarak pasif bir eleman olması, hafifliği ve daha birçok avantajından dolayı 1970'li yıllardan itibaren koaksiyel bakır kabloların yerini almaya başlamış, 1980'li yıllarda ise algılayıcı uygulamalarında da kullanılmaya başlanmıştır [2].

Fiberler genelde cam veya plastikten üretilir. Öz ve kılıf katmanından oluşur. Çapı 8 µm ile 100 µm arasında değişen öz kısmı ışığa kılavuzluk eder. Çapı tipik olarak 125 µm olan kılıf ise öz kısmını saran ve fibere giren ışının özden çıkmasını engelleyen kısımdır. Kılıfın kırılma indisi özün kırılma indisinden daha küçüktür. Bu indis farkından dolayı; eğer fiberde aşırı katlanma ya da bükülme yoksa ışık tam yansımalarla fiber içinde ilerlemeye devam etmektedir [14].

Gönderilecek ışın fiberin özüne sokulur. Işın, kılıf katmanına geçip sinyal kaybına neden olmaması için fibere belli bir açı dahilinde sokulmak zorundadır. Bu açıya kabul açısı denir. Şekil 2.28'de kabul açısı ve kritik açı (Q_c) görülmektedir.



Şekil 2.28: Kabul konisi ve kritik açı [2]

Bu kritik açı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Q_c = \arcsin \frac{\text{kılıf kırılma indisi}}{\text{öz kırılma indisi}} \quad (2.5)$$

Şekil 2.28'deki kritik açı özün ve kılıfın kırılma indislerine bağlı olmaktadır. Bu açıdan daha büyük gelen her ışın demeti fiberde tam yansımaya uğrayarak ilerlemektedir [14].

Optik fiberlerde mod kavramı tek bir ışının fiber içinde izlediği yol olarak tanımlanmaktadır [12]. Çok modlu fiber optik kablolardan daha küçük bir öz çapına sahip tek modlu fiber optik kablolar, tek bir ışına; çok modlu fiber optik kablolar, farklı şiddetlerdeki bir çok ışına kılavuzluk edebilmektedir. Her kılavuzlanmış mod, fiber boyunca dalga boyuna eşit aralıklarda tekrarlanan elektrik ve manyetik alan hatlarının bir şablonudur [20]. Mod kavramı ile ilgili daha fazla bilgi Ek-A'da verilmektedir.

2.2.5.1. Fiber optik türleri

Optik fiberler imalat aşamasında kullanılan malzemelere göre cam ve plastik fiberler; mod sayısına göre yukarıda açıklanan tek ve çok modlu; indis profiline göre basamak indisli ve dereceli indisli fiberler olarak gruplandırılabilir [2,12].

2.2.5.1.1. Cam fiberler

Fiber imalatında önemli olan kırılma indisi değiştirme imkanındır. Saf silikanın kırılma indisi 1µm dalga boyunda 1.45'dir. Cam fiberlerin kayıpları düşük olduğundan uzak mesafe haberleşmelerinde ve diğer uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [2].

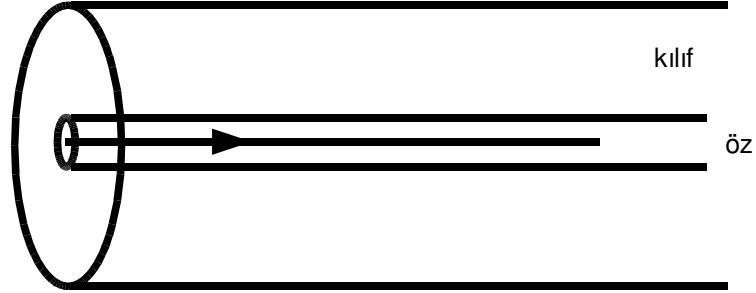
2.2.5.1.2. Plastik fiberler

Plastik fiberler silika özlü plastik kılıflı veya plastik özlü plastik kılıflı olarak imal edilmektedirler [2]. Plastik fiberler daha ucuz daha dayanıklı ve cam fibere oranla %60 daha hafiftirler. Plastik fiberlerin kullanımı yüksek kayıpları nedeniyle kısa mesafelerle (bina içi vb.) sınırlı kalmaktadır [12].

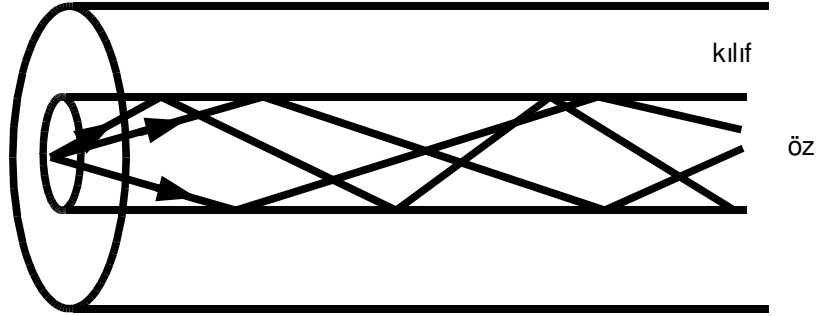
2.2.5.1.3. Basamak indisli fiberler

Basamak indisli fiberler tek modlu ve çok modlu olmak üzere iki çeşittir. Şekil 2.29'da görüldüğü gibi tek modlu basamak indisli optik fiberin öz çapı sadece tek bir ışını içine alabilecek büyüklüktedir [2].

Çok modlu basamak indisli optik fiberlerde ise Şekil 2.30’da görüldüğü gibi öz çapı çok sayıda ışını taşıyabilecek büyüklüktedir [2].



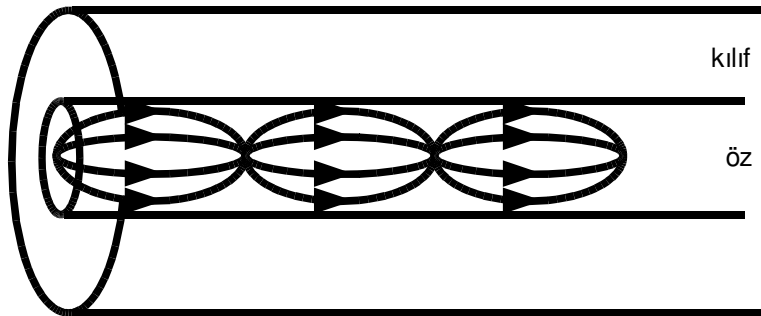
Şekil 2.29: Tek modlu basamak indisli fiber [2]



Şekil 2.30: Çok modlu basamak indisli fiber [2]

2.2.5.1.4. Dereceli indisli fiberler

Dereceli indisli fiberlerin özü, değişken bir kırılma indisine sahiptir. Kırılma indisi merkezde en yüksek seviyelerde olup dış kenarlara doğru gittikçe azalmaktadır. Işık, dereceli indisli fiberlerde kırılma yoluyla yayılmaktadır. Bu tür fiberleri ışık kaynağı ve ışık alıcılarına bağlamak, tek modlu basamak indisli fiberlerden daha kolay olmasına rağmen çok modlu basamak indisli fiberden daha zor olmaktadır [12]. Şekil 2.31’de çok modlu dereceli indisli fiberde ışık ışınlarının ilerleyişi görülmektedir.



Şekil 2.31: Çok modlu dereceli indisli fiber [2]

2.2.5.2. Fiber optik kabloda zayıflama

Fiber optik kabloda zayıflama aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\alpha \cdot L = 10 \cdot \log \frac{P_g}{P_\phi} \quad (2.6)$$

α , birim uzunluk başına işaret zayıflaması; L, kilometre olarak fiber uzunluğu; P_g fiber girişindeki optik güç; P_ϕ ise fiber çıkışındaki optik güçtür [2].

Fiber optik kabloda meydana gelen zayıflamanın başlıca nedenleri; soğurma kayıpları, Rayleigh saçılma kayıpları, yayılım kayıpları, bağlantı kayıplarıdır [12].

2.2.5.2.1. Soğurma kayıpları

Her ne kadar fiber optik imalatında kullanılan cam saf olsa da (%99.9999) fiberde bulunan maddeler, ışığı soğurmakta ve ısıya dönüştürmektedir. Bu dönüşüm soğurma kaybı olarak bilinmektedir [12]. Fiber cam içinde çözülen su ile soğurma kaybı meydana gelebilmektedir [2].

2.2.5.2.2. Rayleigh saçılma kayıpları

Camdan çekilen çok küçük çaplı fiber optik üzerinde bir germe kuvveti oluşmaktadır. Bu kuvvet fiberde gözle görülemeyecek kadar küçük düzensizliklerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu düzensizlikler mikro düzeyde yoğunluk farklarına neden olmaktadır. Fiberde yayılan ışık, bu bölgelerden geçtiğinde kırılmaya uğramakta ve çok küçük bir miktarda saçılmaktadır. Rayleigh saçılımı olarak bilinen bu saçılım mekanizması ile ışık, fiberde ilerlerken bir miktar zayıflamaktadır [12].

2.2.5.2.3. Yayılım kayıpları

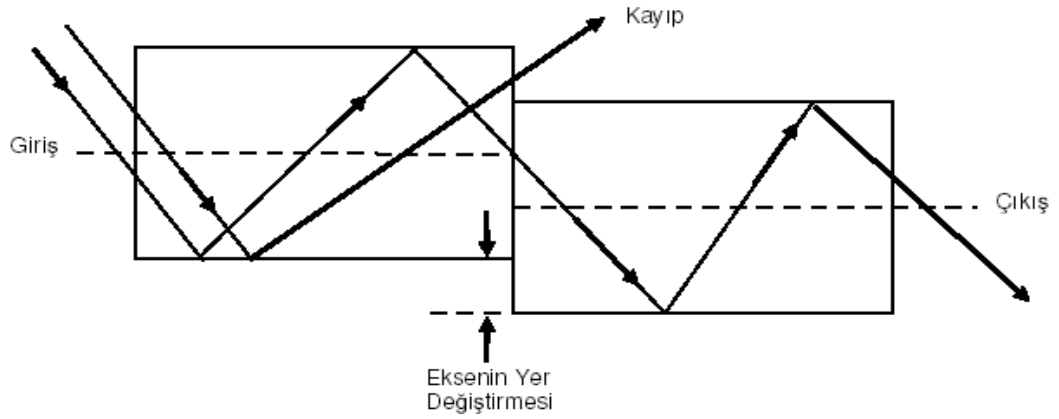
Işığın fiber optik içinde ilerlemesi esnasına fiberde bükülmeler ve eğriliklerden dolayı bir zayıflama meydana gelmektedir [2].

Bükülme temelde, mikro bükülme ve makro bükülme olarak bilinir. Mikro bükülme, fiber özü ve kılıfının farklı ısıl büzülme oranlarından kaynaklanmaktadır. Makro bükülme de ise fiber optik belli bir yarıçap etrafında bükülmektedir [12].

2.2.5.2.4. Bağlantı kayıpları

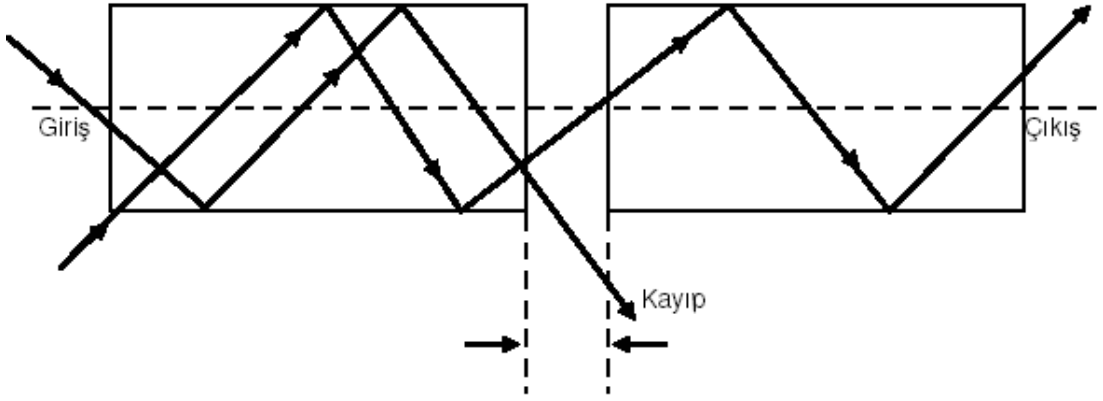
Bağlantı kayıpları, fiber optik kablonun gerekli elemanlara bağlantısından dolayı meydana gelir. Işık kaynağının fibere bağlantısı, fiberin fibere bağlantısı, fiberin ışık algılayıcısına bağlantısı ve çeşitli aparatlara bağlantısı nedeniyle meydana gelen bu kayıplardan dolayı fiberde ilerleyen ışığın optik gücünde zayıflama görülmektedir. Fiber-fiber bağlantı kayıpları genellikle aksel hata, aralık hatası, açısal hata ve kusurlu yüzey hatalarından kaynaklanır [12].

Eksenel hata iki fiberin birleştirilmesi sırasında oluşan eksen kaymasıdır. Şekil 2.32’de iki fiber bağlantısındaki aksel hata görülmektedir.



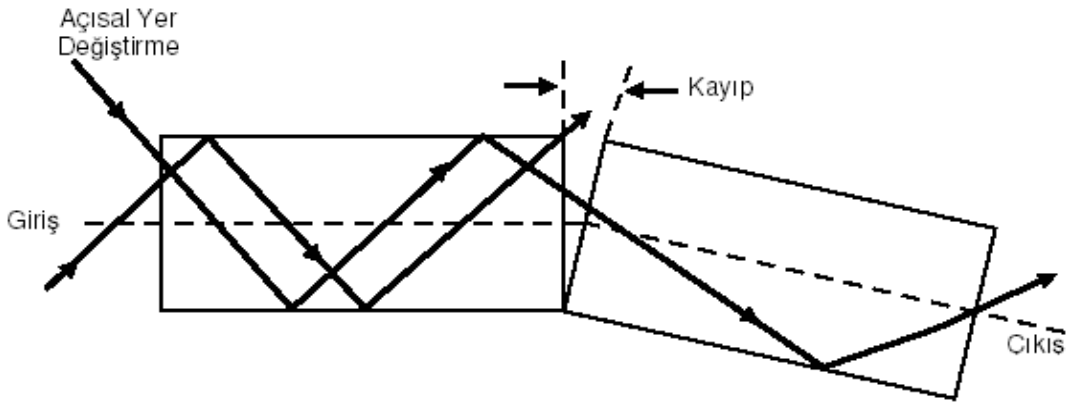
Şekil 2.32: Eksenel hata [12]

Aralık hatası iki fiber bağlantısında meydana gelen bağlantı uçları arasındaki mesafenin sıfır olmamasından kaynaklanmaktadır. Şekil 2.33’de aralık hatası görülmektedir.



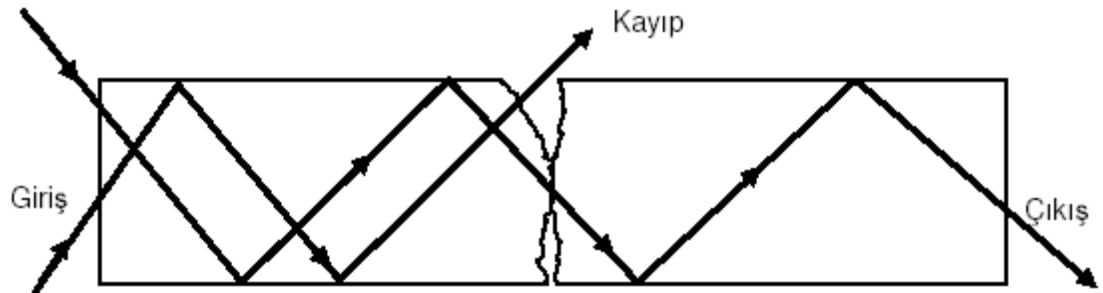
Şekil 2.33: Aralık hatası [12]

Açısal hata, iki fiberin birleşme uçlarının farklı açılarla birleştirilmesinden dolayı kaynaklanmaktadır. Şekil 2.34’de iki fiber bağlantısında açısal hata görülmektedir.



Şekil 2.34: Açısal hata [9]

Kusurlu yüzey hatası, iki fiber bağlantı uçlarının pürüzlü olmasından dolayı oluşan hatadır. Şekil 2.35’de kusurlu yüzey hatası görülmektedir.



Şekil 2.35: Kusurlu yüzey hatası [12]

2.2.5.3. Fiber optik kabloda dağılma

Fiber optik kabloda dağılma mod ve renk dağılması olmak üzere ikiye ayrılabilir.

2.2.5.3.1. Mod dağılması

Modlar arası faz farkından dolayı fibere giren ışık demetleri farklı zamanlarda fiber çıkışına ulaşmaktadır. Bu girişim ile fibere giren ışık sinyalleri zaman içinde genişlemekte ve bant genişliğinin azalmasına neden olmaktadır. Bu dağılma mod dağılması olarak isimlendirilmektedir. Mod dağılımının gerçekleşebilmesi için fiber optik kablo çok modlu olmalıdır [12].

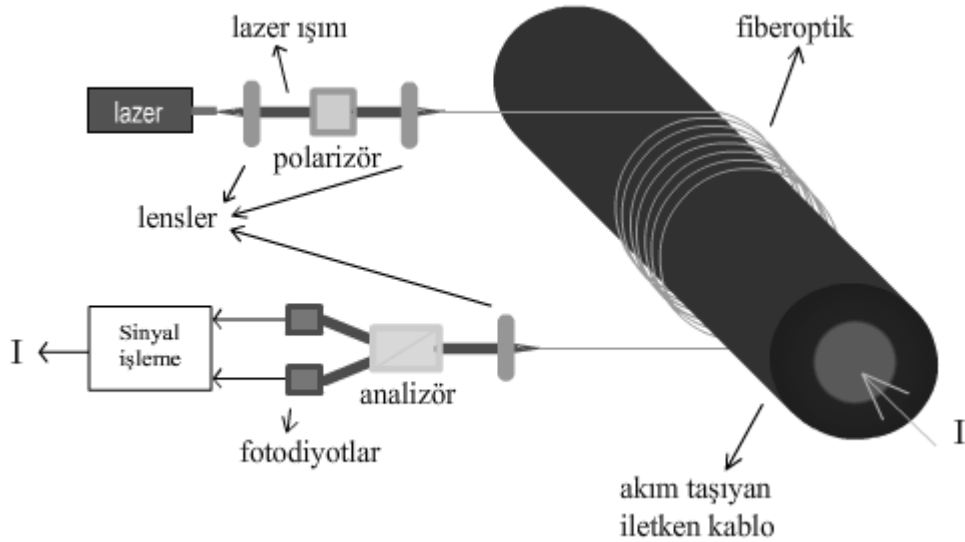
2.2.5.3.2. Renk dağılması

Işık kaynakları tarafından üretilen ışık, tek bir dalga boyu yerine bir dalga boyu aralığında dalga grubu olarak yayılmaktadır. Grubu oluşturan dalga tanecikleri fiber çıkışına farklı zamanlarda ulaşmaktadır. Bu zaman farkları fibere giren ışık sinyalinin genişlemesine neden olmaktadır. Bu dağılma renk dağılması olarak adlandırılmaktadır [12].

3. FİBER OPTİK AKIM ALGILAYICISI BİLEŞENLERİNİN MODELLERİ

Bu bölümde, Faraday etkili fiber optik akım algılayıcısı için gerekli olan elemanlar modellenmektedir. Sistemin temel yapısı Şekil 3.1’de görülmektedir.

Lazer kaynağından çıkan ışın bir lens ile paralelleştirilip polarizörün üzerine gelmektedir. Burada doğrusal polarize edilen ışın bir lens yardımı ile akım taşıyan iletken kablo üzerine sarılan fiber optik içine sokulmaktadır. Işının polarizasyon açısı bu akımla orantılı olarak değişmektedir. Fiber optik sonunda ışın, tekrar paralelleştirilip bir analizör ile x,y bileşenlerine ayrılmaktadır. Fotodiyotların algıladığı bu ışınlar elektrik enerjisine çevrilerek sinyal işleme birimine gelmektedir. Bu iki sinyal kullanılarak hesaplanan I akımı sistem çıkışından alınmaktadır.



Şekil 3.1: Faraday etkili fiber optik akım sensörü ve elemanları

Sistemi oluşturan modellerin, model dosyasının önyükleme bölümüne yerleştirilen parametre değerleri Tablo 3.1’de verilmektedir. Simulink programının çalışmasında herhangi bir sorunla karşılaşmamak için modellerin matematiksel denklemlerinde kullanılan Yunan karakterleri, bloklarda okundukları gibi yazılmaktadır. Modeller Matlab Simulink programında oluşturulmaktadır.

Tablo 3.1: Modellerde kullanılan parametrelerin değerleri [21]

lamda=950e-9	q=1.602e-19	No=1.2e18	beta=4e-4
c=3e8	r=0.05	epsilon=3.4e-17	Va=9e-11
v=c/lamda	gama=0.44	Tp=1e-12	eta=0.1
h=6.624e-34	g0=3e-6	Tn=3e-9	alfaL= 5.6 [22]

3.1. Yarıiletken Lazer Diyot Modeli

Fiber optik akım sensörlerinin çalışması için bir ışık kaynağına ihtiyaç vardır. Bu sistemde ışık kaynağı olarak bir lazer diyot modellenmiştir.

Yarıiletken lazer diyotun matematiksel modeli üç adet diferansiyel denklemden oluşmaktadır [21].

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{i(t)}{q.Va} - g_0 \frac{[N(t) - N_0].S(t)}{1 + \epsilon.S(t)} - \frac{N(t)}{\tau_n} \quad (3.1)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = \Gamma . g_0 \frac{[N(t) - N_0].S(t)}{1 + \epsilon.S(t)} - \frac{S(t)}{\tau_p} + \frac{\Gamma . \beta}{\tau_n} N(t) \quad (3.2)$$

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{1}{2} \alpha l \left[\Gamma . g_0 [N(t) - N_0] - \frac{1}{\tau_p} \right] \quad (3.3)$$

Yukarıdaki denklemlerde;

$N(t)$ taşıyıcı yoğunluğunu,

$i(t)$ lazer giriş akımını,

q elektron yükünü,

Va aktif bölgenin hacmini,

$\phi(t)$ lazer ışının fazını,

g_0 kazanç eğimini,

N_0 saydamlıkta taşıyıcı yoğunluğunu,

$S(t)$ foton yoğunluğunu,

ε kazanç doyumu parametresini,
 τ_p foton ömrünü,
 Γ optik faktörü,
 β kendiliğinden yayılım faktörünü,
 τ_n taşıyıcı ömrünü
 αl ek faktörünü
ifade etmektedir.

Lazer diyot optik çıkış gücü ise aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir [21].

$$P(t) = \frac{Va \cdot \eta \cdot h \cdot \nu}{2 \cdot \Gamma \cdot \tau_p} S(t) \quad (3.4)$$

Yukarıdaki denklemde kullanılan parametreler;

$P(t)$ optik gücü,
 η toplam kuantum verimini,
 h Planck sabitini
 ν lazer ışınının frekansını
ifade etmektedir.

Lazerin çıkış gücü elektriksel alan olarak aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir [23].

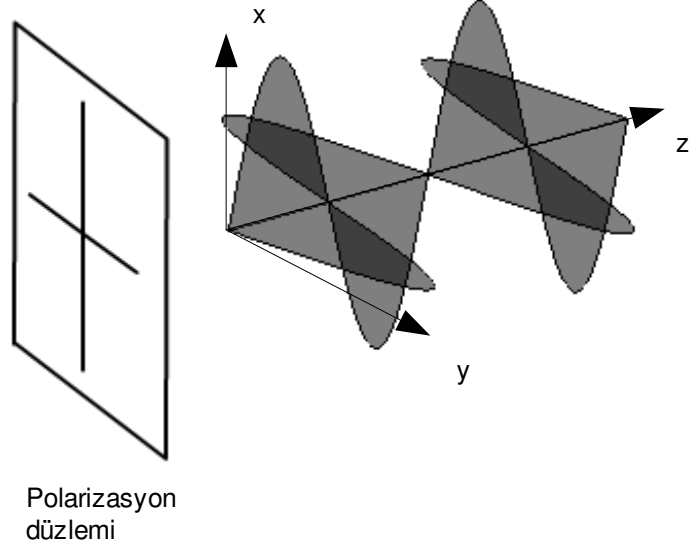
Bu denklemde $i = \sqrt{-1}$ 'e eşittir.

$$E_{kaynak}(t) = \sqrt{P(t)} e^{i\phi(t)} \quad (3.5)$$

Bu denklemlerden yararlanarak Şekil 3.2'deki Simulink modeli oluşturulmaktadır.

3.2. Polarizör Modeli

Modelde kullanılan polarizör, lazerin ürettiği elektrik alanını x ve y yönünde doğrusal polarize etmektedir.

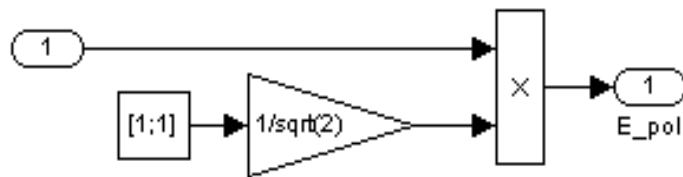


Şekil 3.3: x ve y yönünde polarize edilmiş ışık

Şekil 3.3’de x ve y yönünde polarize edilmiş ışığın matematiksel denklemi aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir [24].

$$E_{pol} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} E_{kaynak} \quad (3.6)$$

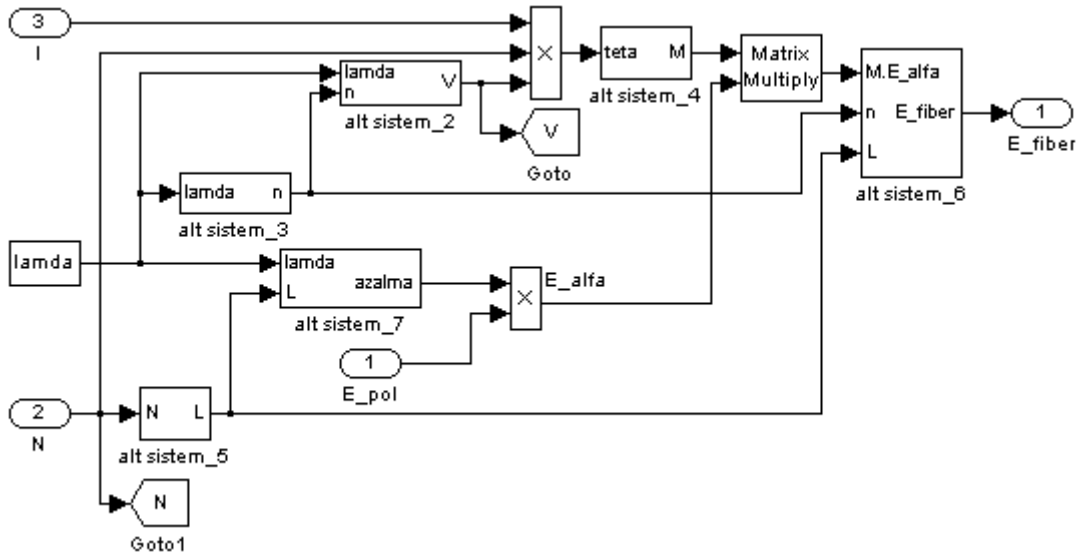
Burada; E_{kaynak} , lazerin ürettiği elektrik alanını; E_{pol} , x ve y yönünde polarize edilmiş elektrik alanını ifade etmektedir. Bu polarizörün Simulink modeli Şekil 3.4’de gösterilmektedir.



Şekil 3.4: Polarizör modeli

3.3. Fiber Optik Modeli

Algılayıcı fiber modeli fiber optik kabloyu modellemektedir. İletkenden geçen akım, fiber sarım sayısı ve polarize edilmiş elektrik alanı Şekil 3.5’de gösterildiği gibi giriş olarak alınmaktadır. Faraday dönmesi, “alt sistem_4” adına sahip teta (θ) açısını M matrisine çeviren bir blok olarak gösterilmektedir.

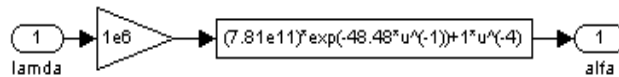


Şekil 3.5: Fiber optik modeli

Bu çalışmada fiber optik modeli tasarlanırken zayıflama ve ışığın fiber içinde ilerlediği süre dikkate alınmaktadır. İkinci bölümde izah edilen zayıflama katsayısı ışığın dalga boyuna bağlı olduğundan ilk olarak $\alpha(\lambda)$ fonksiyonu aşağıdaki denklem ile bulunmaktadır [25].

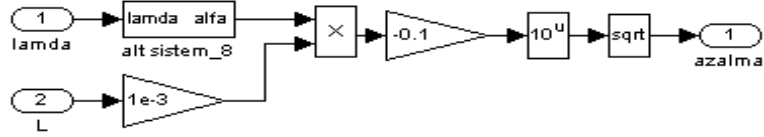
$$\alpha(\lambda) = 7.81 * 10^{11} e^{-\left(\frac{48.48}{\lambda}\right)} + \frac{1}{\lambda^4} \quad (3.7)$$

Tezde bahsedilen zayıflama katsayısında Rayleigh saçılma kaybı ve kızılötesi absorpsiyon kaybı dikkate alınmaktadır [25]. Bu veriler sayesinde, zayıflama katsayısını veren Şekil 3.6’deki Simulink modeli “alt sistem_8” elde edilmektedir.



Şekil 3.6: λ - α modeli

Azalma, fibere giren sinyalin elektrik alanı ile çarpıldığında zayıflamaya uğrayan elektrik alan değerini vermektedir. Denklem (3.8), Simulink modeli olarak Şekil 3.7’de “alt sistem_7” gösterilmektedir. L fiber kablonun uzunluğu 1e-3 yani 1/1000 ile çarpılıp kilometreye çevrilmektedir.



Şekil 3.7: λ -azalma modeli

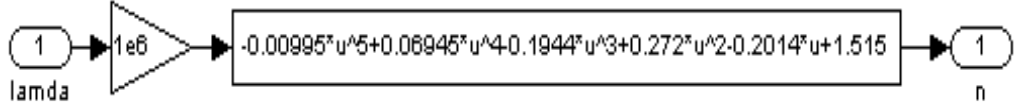
Zayıflama sonucundaki elektrik alanı, dağılıma ihmal edildiğinde E_{alfa} , [25]’e benzer olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$E_{alfa} = E_{pol} \sqrt{10^{-\frac{\alpha L}{10}}} \quad (3.8)$$

n , özün kırılma indisi lazerden çıkan ışının dalga boyuna bağlıdır. Saf silikanın $n(\lambda)$ fonksiyonunu elde etmek için Tablo 3.2’den yararlanılmaktadır. Şekil 3.8’deki polinomal fonksiyon “alt sistem_3” elde edilmektedir.

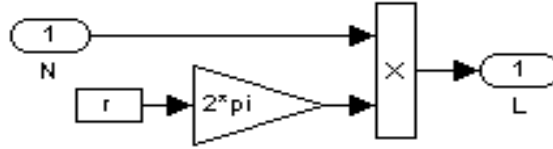
Tablo 3.2: Saf silikada λ -n ilişkisi [26]

λ (nm)	n
600	1.4580
700	1.4553
800	1.4533
900	1.4518
1000	1.4504
1100	1.4492
1200	1.4481
1300	1.4469
1400	1.4458
1500	1.4446
1600	1.4434
1700	1.4422
1800	1.4409



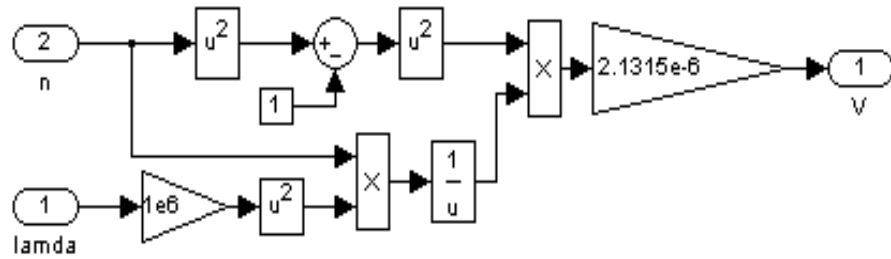
Şekil 3.8: λ -n modeli

Burada, fiber optik kablonun uzunluğu hesaplanırken sadece kabloya sarılan kısmının uzunluğu dikkate alınmaktadır. Şekil 3.9’da “alt sistem_5” fiber optik iletkenin yarı çapı r , sarım sayısı ile çarpılıp fiber uzunluğu bulunmaktadır.



Şekil 3.9: Fiber optik sarım sayısının uzunluk hesabı modeli

Fiber optik kablonun Verdet sabiti lazerden çıkan ışığın dalga boyu ve malzemenin kırılma indisi ile değişmektedir. $V(\lambda)$ fonksiyonu $(n^2-1)^2/(n\lambda^2)$ ile orantılıdır [27]. Şekil 3.10’da “alt sistem_2” Verdet sabiti λ ve n parametrelerine bağlı bir fonksiyon olarak modellenmiştir.



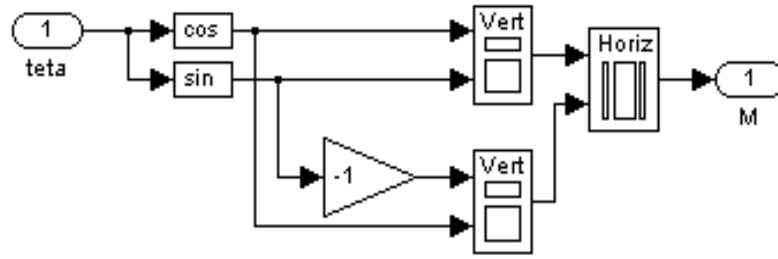
Şekil 3.10: λ -V modeli

Fiber optik kablonun kendisi algılayıcı başlığı olarak kullanılmaktadır. θ açısının, polarize edilmiş elektrik alanına etkisi, doğrusal çift kırınım sıfır kabul edildiğinde aşağıdaki gibi M matrisi ile ifade edilir [24].

$$M = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\theta = VNI \quad (3.10)$$

θ açısını M matrisine çeviren Simulink modeli Şekil 3.11'deki gibidir. “Vert” bloku girişleri dikey, “Horiz” bloku ise yatay olarak matris biçiminde birleştirmektedir. Elde edilen bu M matrisi x ve y yönünde polarize edilmiş elektrik alanı ile çarpılarak elektrik alandaki değişim bulunmaktadır.

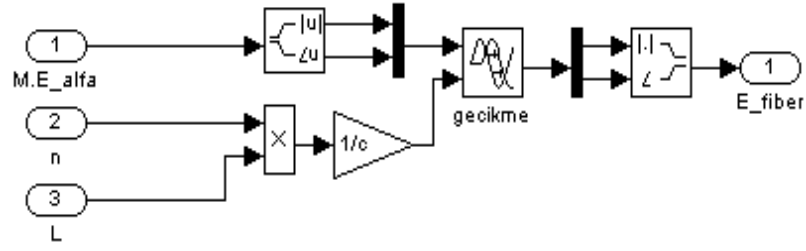


Şekil 3.11: θ - M modeli

Işık, fiber optik içinde ilerlerken geçen zaman gecikme olarak denklem (3.11)'deki gibi ifade edilmektedir. Burada n , özün kırılma indisi; L , fiber optik kablonun uzunluğu; c , ışığın boşluktaki hızıdır.

$$t = \frac{nL}{c} \quad (3.11)$$

Şekil 3.12'de (alt sistem_6) Simulink modeli verilen $M E_{\text{alfa}}$ ise zayıflamaya uğramış elektrik alanın Faraday etkisinde kalması ile oluşan elektrik alanıdır. Simulink kütüphanesinde gecikme modeli gerçek sayı ile çalıştığından sinyal girişi gerçek sayı vektörüne çevrilmekte ve gecikme sağlandıktan sonra karmaşık sayı biçimine çevrilmektedir.



Şekil 3.12: Fiber optik zaman gecikme modeli

Fiber optik çıkışındaki elektrik alan denklem (3.12)'deki gibidir. Yapılan düzenlemeler ile E_{fiber} denklem (3.15)'de görüldüğü gibi olmaktadır.

$$E_{fiber} = M E_{alfa} \quad (3.12)$$

$$E_{fiber} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} E_{pol} \sqrt{10^{-\frac{\alpha L}{10}}} \quad (3.13)$$

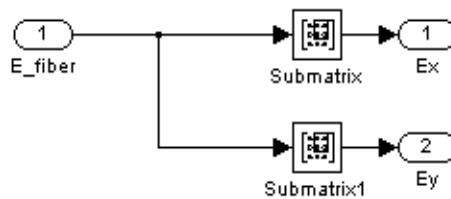
$$E_{fiber} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} E_{kaynak} \sqrt{10^{-\frac{\alpha L}{10}}} \quad (3.14)$$

$$E_{fiber} = E_{kaynak} \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{10^{-\frac{\alpha L}{10}}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Optik fiberin elektriksel eşdeğer devresi Ek-C'de görülmektedir.

3.4. Analizör Modeli

Modelde kullanılan analizör Wollaston prizmasıdır. İkinci bölümde şekil olarak ifade edilen bu analizörün Simulink modeli Şekil 3.13'de gösterildiği gibi fiberden çıkan sinyalin elektrik alanını x ve y bileşenlerine ayırmaktadır.



Şekil 3.13: Analizör modeli

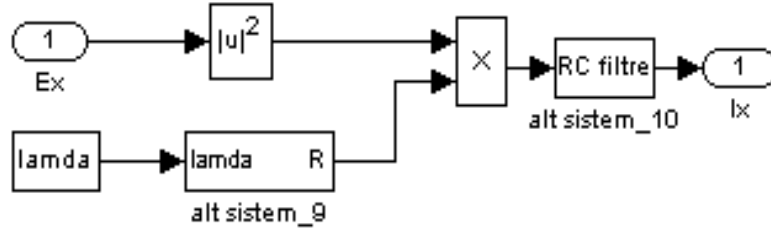
Analizör çıkışındaki elektrik alanları aşağıdaki iki denklem gibi olmaktadır.

$$E_x = E_{kaynak} \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{10^{-\frac{\alpha L}{10}}} (\cos \theta - \sin \theta) \quad (3.16)$$

$$E_y = E_{kaynak} \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{10^{-\frac{\alpha L}{10}}} (\cos \theta + \sin \theta) \quad (3.17)$$

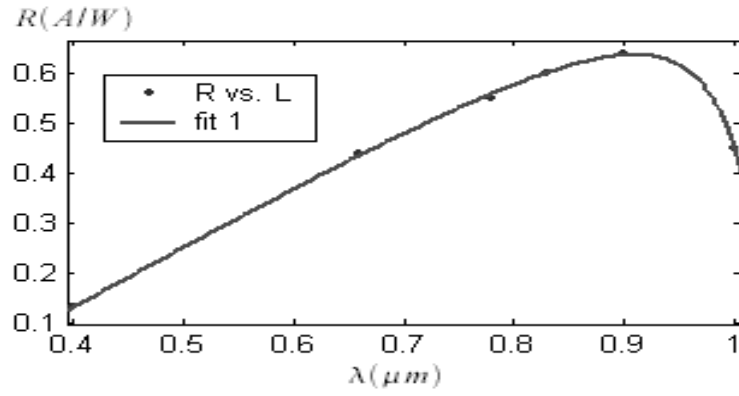
3.5. Fotodiyot Modeli

Şekil 3.14’de modellenen fotodiyot görülmektedir. Fotodiyot üzerine düşen ışığın elektrik alanı büyüklüğünün karesi alınarak optik güce çevrilmekte ve bir akım üretmektedir. Fakat bu optik güç aynen fotodiyot çıkışından alınamamaktadır. Bunun nedeni fotodiyotun duyarlılığıdır. Bundan dolayı bir miktar azalan optik güç, daha sonra RC (direnç-kondansatör) filtre modelinden geçmektedir.



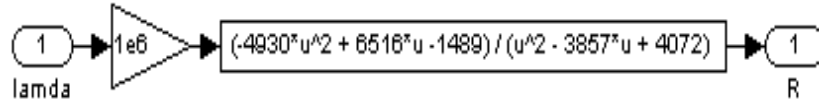
Şekil 3.14: Fotodiyot modeli

Fotodiyot modellenirken fotodiyot duyarlılığı ve sinyal gecikmesi dikkate alınmaktadır. Hamamatsu firmasının ürettiği silikon fotodiyot S5971 duyarlılığının ışığın dalga boyuna bağlı fonksiyonunu elde etmek için, S5971 veri sayfasındaki tayfsal cevap grafiğinden 6 nokta alınmaktadır [28]. Elde edilen fonksiyonun grafiği Şekil 3.15’de görülmektedir.



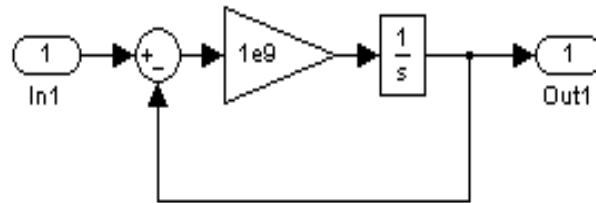
Şekil 3.15: λ -R elde edilmiş fonksiyon grafiği

Bu fonksiyonun Simulink modeli Şekil 3.16’da görülmektedir.



Şekil 3.16: λ -R elde edilmiş fonksiyon modeli

RC filtresinin modellenmesi Şekil 3.17’deki gibi yapılmaktadır. Bu model ile fotodiyot, yaklaşık 2 ns sonra istenilen cevabın %10’undan - %90’ına (yükselme zamanı) ulaşmaktadır.



Şekil 3.17: RC filtre modeli

Elektrik alanının x ve y bileşenlerini algılayan iki ayrı fotodiyot akımı [24]’e benzer olarak aşağıdaki denklemler ile bulunmaktadır .

$$I_{x,y} = R |E_{x,y}|^2 \quad (3.18)$$

$$I_{x,y} = R \left| E_{kaynak} \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{10^{-\frac{\alpha L}{10}}} (\cos \theta \mp \sin \theta) \right|^2 \quad (3.19)$$

$$I_{x,y} = R \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{10^{-\frac{\alpha L}{10}}} (\cos \theta \mp \sin \theta) \right)^2 |E_{kaynak}|^2 \quad (3.20)$$

P giriş gücü, lazerin optik fibere girdiği andaki optik gücüdür ve yukarıda izah edildiği üzere elektrik alanın büyüklüğünün karesine eşittir.

$$I_{x,y} = RP \frac{1}{2} 10^{-\frac{\alpha L}{10}} (\cos \theta \mp \sin \theta)^2 \quad (3.21)$$

$$I_x = RP \frac{1}{2} 10^{-\frac{\alpha L}{10}} [1 - \sin(2\theta)] \quad (3.22)$$

$$I_y = RP \frac{1}{2} 10^{-\frac{\alpha L}{10}} [1 + \sin(2\theta)] \quad (3.23)$$

Fotodiyotun literatürde rastlanan elektriksel eşdeğer devresi Ek-D’de görülmektedir.

3.6. Sinyal İşleme Biriminin Modeli

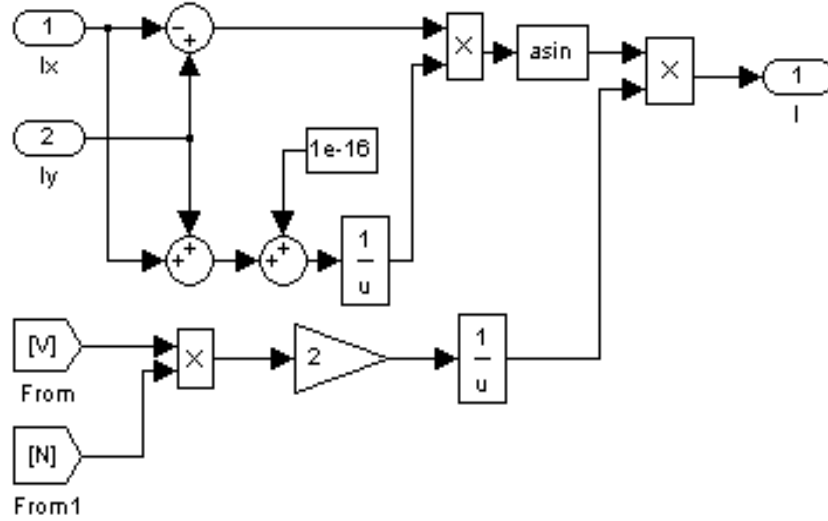
x ve y bileşenlerine ayrılan ışığın I_x ve I_y akımlarından yararlanılarak iletkenin içinden geçen akım hesaplanmaktadır. Akımların toplamının farkına bölünmesi ile aşağıdaki gibi $\sin(2\theta)$ elde edilir [24].

$$\frac{I_y - I_x}{I_y + I_x} = \frac{RP \frac{1}{2} 10^{-\frac{\alpha L}{10}} [1 + \sin(2\theta)] - RP \frac{1}{2} 10^{-\frac{\alpha L}{10}} [1 - \sin(2\theta)]}{RP \frac{1}{2} 10^{-\frac{\alpha L}{10}} [1 + \sin(2\theta)] + RP \frac{1}{2} 10^{-\frac{\alpha L}{10}} [1 - \sin(2\theta)]} \quad (3.24)$$

$$\frac{I_y - I_x}{I_y + I_x} = \frac{2\sin(2\theta)}{2} \quad (3.25)$$

$$\frac{I_y - I_x}{I_y + I_x} = \sin(2\theta) \quad (3.26)$$

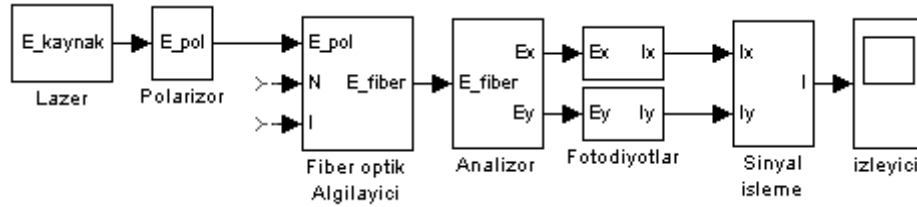
Denklem (3.26)'daki sonucun ters sinüsü alındığında 2θ değeri bulunmaktadır. Diğer taraftan bu açının (radyan olarak) VNI değerine eşit olduğu bilindiğinden; iletken den geçen akımı hesaplayabilmek için, fiber optik algılayıcı modelinde hesaplanan Verdet sabiti ve bu modelin girişindeki N fiber sarım sayısı kullanılmaktadır. Bu hesaplamalar Şekil 3.18'de görüldüğü gibi sinyal işleme birimi olarak modellenmektedir. $I_x + I_y$ paydada bulunduğu için değerinin sıfır olması durumunda sistem hata vereceğinden dolayı $1e-16$ değeri ile toplanmaktadır.



Şekil 3.18: Sinyal işleme biriminin modeli

4. SİSTEM DEĞİŞKENLERİN İNCELENMESİ

Birleşik model sayısal benzetiminde Şekil 4.1’de fiber optik akım algılayıcısının çalışması için ihtiyaç duyulan elemanların birleştirilmesi ile oluşan model görülmektedir. Fiber optik algılayıcı modelinde N (fiber optik sarım sayısı) ve I (iletkenen geçen akım) girişlerine istenilen sinyal uygulanarak sistem analiz edilmektedir.



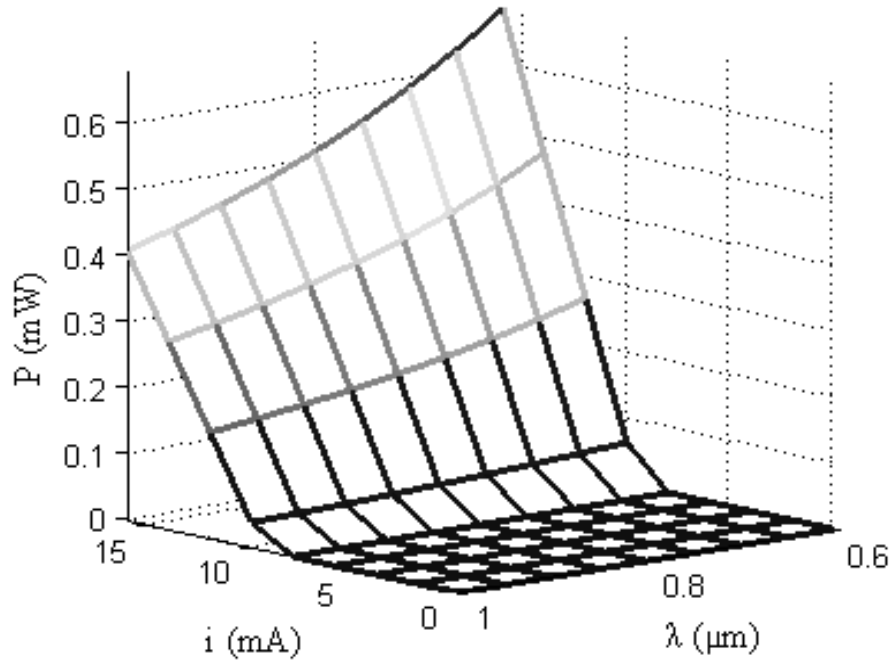
Şekil 4.1: Sistem modeli

Şekil 4.1’de lazer kaynağından çıkan ışık, polarizör modeli sayesinde x ve y yönünde polarize olmakta ve fiber optik kablonun içine girmektedir. I akımı geçen iletkenin üzerine, N tur sarılan fiber optik kabloya giren bu ışığın polarizasyon açısının θ kadar dönmesi ile fiber dışına çıkan ışık, analizör modeli sayesinde x ve y bileşenlerine ayrılmaktadır. Işık, fotodiyotlar yardımıyla algılanarak akım sinyallerine çevrilmektedirler. Sinyal işleme birimi sayesinde bu iki sinyal işlenerek iletkenen geçen akım daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi hesaplanmaktadır.

Oluşturulan modelde lazer, tek modlu ve tek bir dalga boyunda ışık üretmekte; polarizör, ideal olarak yalnızca ışığı polarize etmekte; fiber, tek modlu olarak, özün kırılma indisi, Verdet Sabiti, zayıflama katsayısı, dış manyetik alandan dolayı içinden geçen ışığın polarizasyon açısı ve gecikme dikkate alınmakta; analizör, ideal olarak ışığı x ve y dik bileşenlerine ayırmakta, fotodiyot içerisinde yalnızca duyarlılık ve RC filtresi modellenmekte; sinyal işleme birimi ideal olarak sayısal işlemleri yapmaktadır.

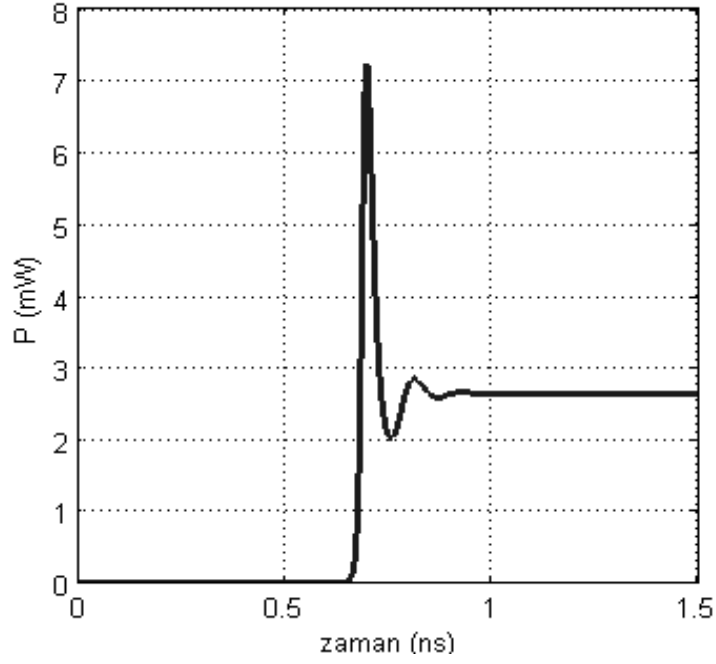
4.1. Lazer Diyot Değişkenlerinin İncelenmesi

Sistemin en önemli elemanlarından biri ışık kaynağı olan lazer diyottur. Şekil 4.2’de lazer çıkış gücünün lazer giriş akımı ve dalga boyu ile değişimi incelenmektedir. Lazer giriş akımı 2 mA’lık, dalga boyu ise 50 nm’lik arttırmalar ile çizilen bu grafikte lazer çıkış gücünün belli bir lazer giriş akımından sonra arttığı belirlenmektedir. Lazer giriş akımının artması lazer çıkış gücünü arttırmasına rağmen dalga boyunun artması lazer çıkış gücünün azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.2: Lazer çıkış gücünün, lazer giriş akımı ve λ ile değişimi

Şekil 4.3’de dalga boyu 950 nm ve lazer giriş akımı 50 mA iken lazer çıkış gücünün geçici rejimi incelenmektedir. Sürekli durumda yaklaşık 2.6 mW çıkış gücü alınmasına rağmen geçici rejimde bu değer yaklaşık iki katı güç üretilmekte, yaklaşık 1 ns sonra lazer çıkış gücü geçici rejimini tamamlamakta ve sürekli duruma geçmektedir.

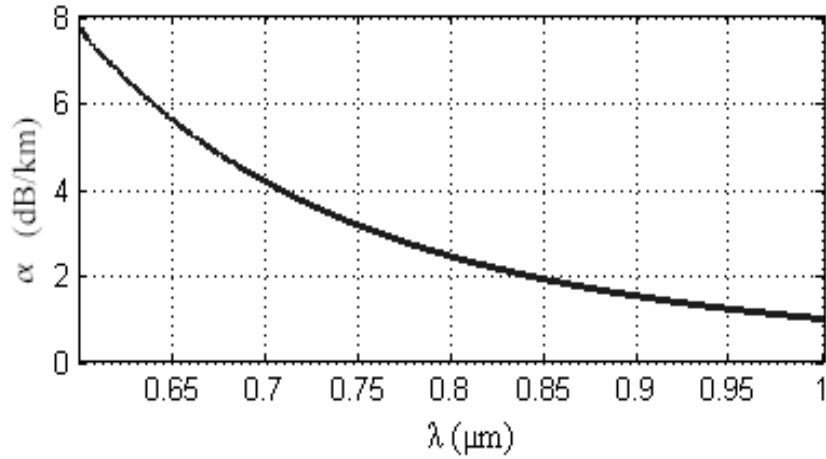


Şekil 4.3: Lazer çıkış gücü geçici rejimi zaman grafiği

4.2. Fiber Optik Değişkenlerinin İncelenmesi

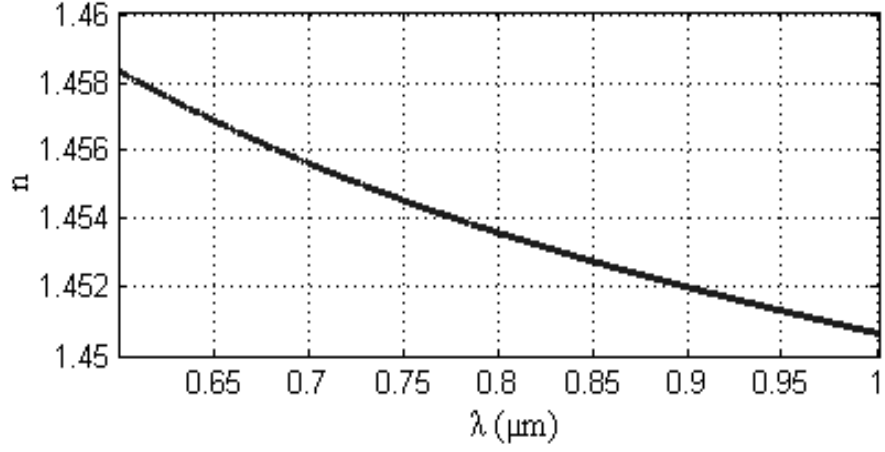
Fiber, algılayıcı eleman olması nedeniyle bu sistemin en kritik elemanıdır ve bu nedenle parametrelerinin değişimi oldukça önemlidir.

Şekil 4.4'de 50 nm arttırmalarla, 0.6-1 μm arası dalga boyunun zayıflama katsayısına etkisi görülmektedir. Verilen sınırlar içinde zayıflama katsayısı, dalga boyunun artması ile hemen hemen üstel olarak azaldığı görülmektedir.



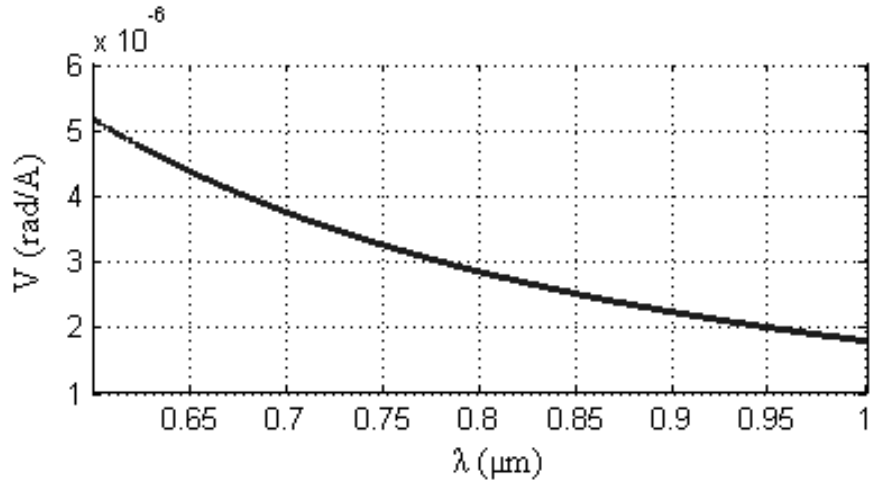
Şekil 4.4: λ - α değişimi

Şekil 4.5’de 50 nm arttırmalarla, 0.6-1 μm arası dalga boyunun n kırılma indisi ile değişimi görülmektedir. Verilen sınırlar içinde n kırılma indisi, dalga boyunun artması ile hemen hemen düzgün bir azalma göstermektedir.



Şekil 4.5: λ -n değişimi

Şekil 4.6’da 50 nm arttırmalarla, 0.6-1 μm arası dalga boyunun Verdet sabitine etkisi görülmektedir. Verilen sınırlar içinde dalga boyunun artması Verdet sabitini azaltmaktadır.

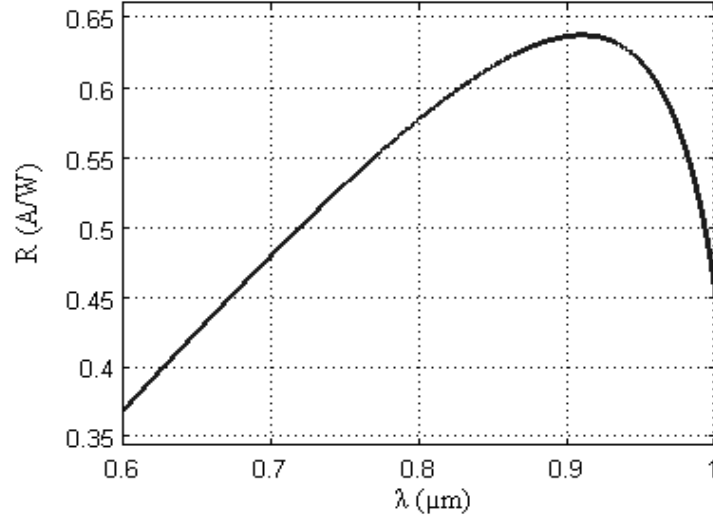


Şekil 4.6: λ -V değişimi

4.3. Fotodiyot Değişkenlerinin İncelenmesi

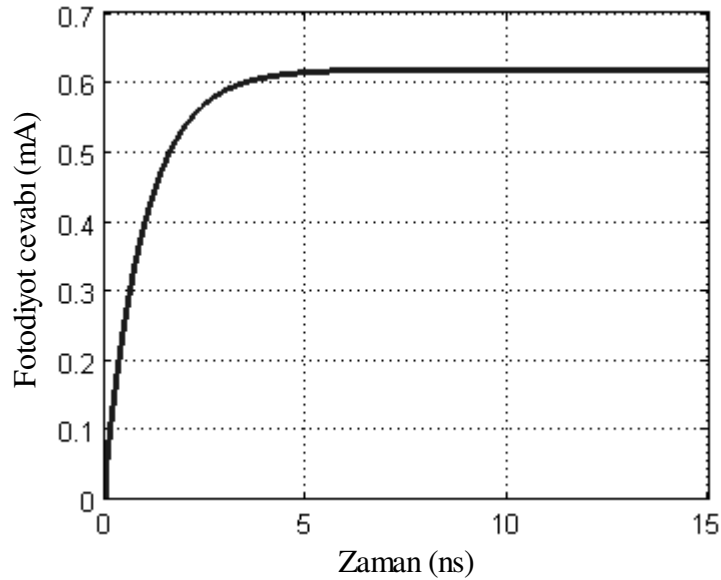
Şekil 4.7’de 50 nm arttırmalarla, 0.6-1 μm arası dalga boyunun fotodiyot duyarlılığına etkisi görülmektedir.

Verilen sınırlar içinde yaklaşık 900 nm’de en büyük değerine ulaşan duyarlılık bu değerden sonra silikonun kimyasından dolayı dalga boyunun artmasına rağmen büyük bir eğimle azalmaktadır.



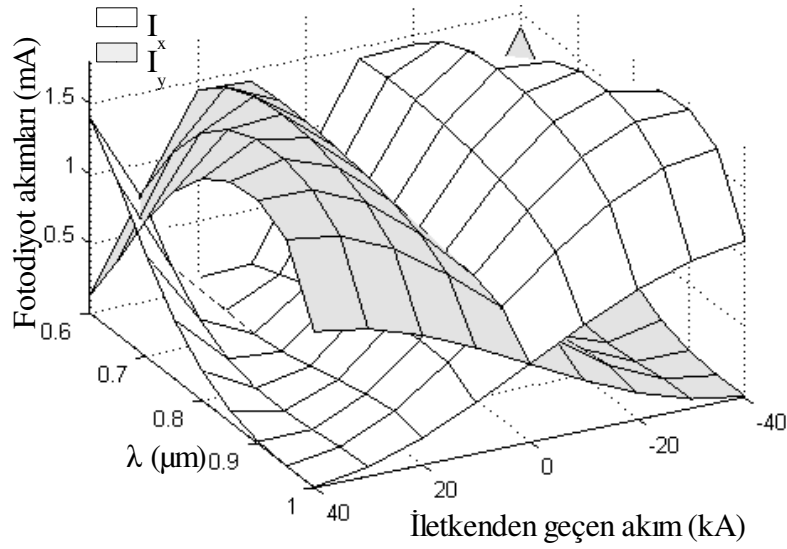
Şekil 4.7: λ-R değişimi

Şekil 4.8’de yükselme zamanı yaklaşık 2 ns olarak verilen fotodiyotun giriş gücü 1 mW ve dalga boyu 950 nm’de geçici rejimi görülmektedir. Fotodiyot, duyarlılıktan dolayı, giriş gücünün yaklaşık %62’sini fotodiyot akımına çevirmektedir.



Şekil 4.8: Fotodiyot geçici rejimi zaman grafiği

Şekil 4.9’da fiber optik sarım sayısı 10 tur ve lazer giriş akımı 50 mA iken 50 nm arttırmalarla, 0.6-1 μm arası dalga boyunun ve 10 kA’lık arttırmalarla -40 - 40 kA arası giriş akımının (iletkenden geçen akım) fotodiyot akımlarına etkisi görülmektedir. İletkenden akım geçmediğinde, fotodiyotların ürettiği akımlar birbirine eşit olmaktadır. Dalga boyu 1 μm civarında iken iletkenden geçen akım pozitif çok büyükse I_x akımı, negatif çok büyükse I_y akımı sifıra çok yakın olmaktadır. Yüksek giriş akımlarında, düşük dalga boylarında Verdet sabitinin artması fotodiyot akımları üzerinde istenmeyen değişimler meydana getirmektedir.

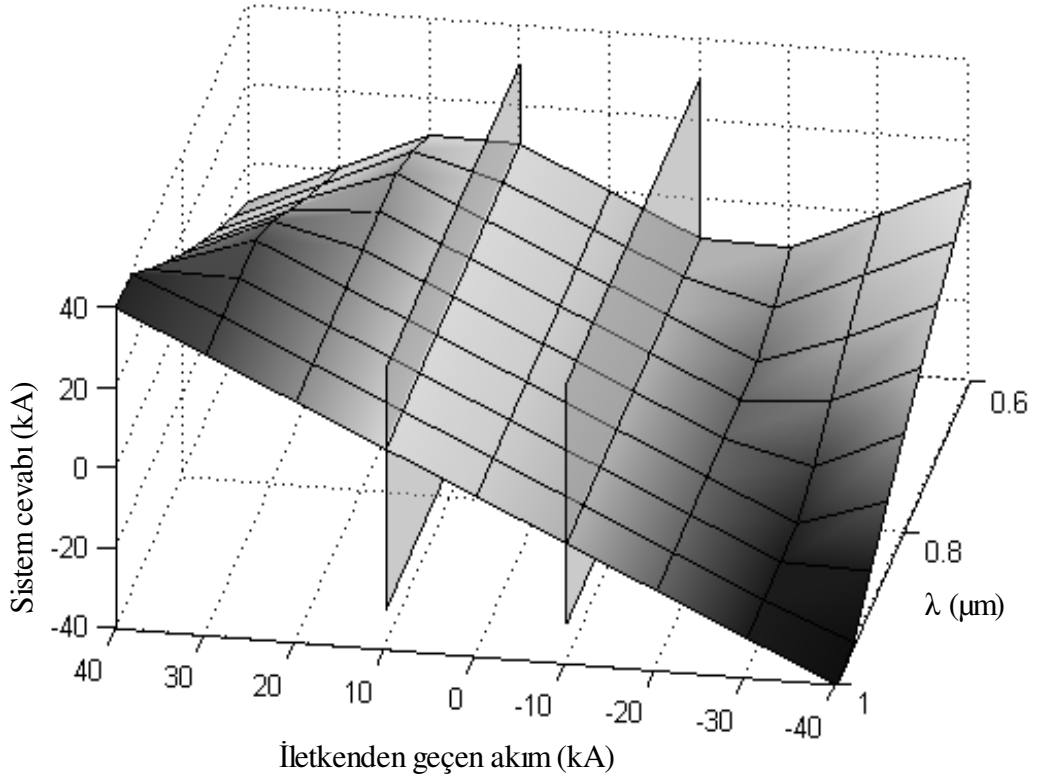


Şekil 4.9: Fotodiyot akımları

4.4. Sistem Cevabının İncelenmesi

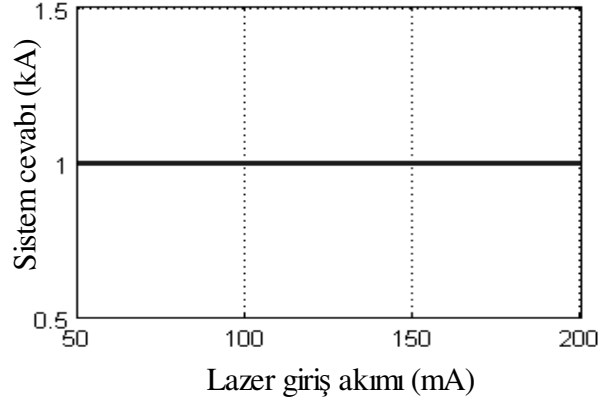
Şekil 4.10’da fiber optik sarım sayısı 10 ve lazer giriş akımı 50 mA iken 50 nm arttırmalarla, 0.6-1 μm arası dalga boyunun ve 10 kA’lık arttırmalarla -40 - 40 kA arası giriş akımının (iletkenden geçen akım) sistemin cevabına (akıma karşılık sistemin ürettiği sinyal) etkisi görülmektedir. Düşük dalga boylarında Verdet sabiti büyük değerler almaktadır. Eğer iletkenin içinden geçen akım kafi derecede yüksekse Verdet sabiti θ açısını $\pi/4$ radyandan daha yüksek bir değere ulaştırabilmektedir ($\pi/4 < \theta < \pi/2$). Sistem çıkışındaki polarizasyon açısı 2θ , analitik düzlemde ikinci bölgeye geçtiğinden dolayı bu açının ters sinüs fonksiyonundan geri dönen değerinin yarısı θ açısını vermemektedir. Sonuçta sistem çıkışı yanılmaktadır.

Dalga boyunun artmasıyla Verdet sabiti azalacağından sistem çıkışı doğrusallaşmaktadır. Fakat fotodiyot duyarlılığı yaklaşık 900 nm'den sonra yüksek bir eğimle azaldığından fotodiyot akımı çok azalmaktadır. Böyle bir sinyal güçlendirilmek istendiğinde gürültü parametresi önemini arttırmaktadır. Bunun yanında 0.6-1 μm arası dalga boyu değişiminde bile sistem -10 – 10 kA aralığında güvenli çıkış vermektedir.



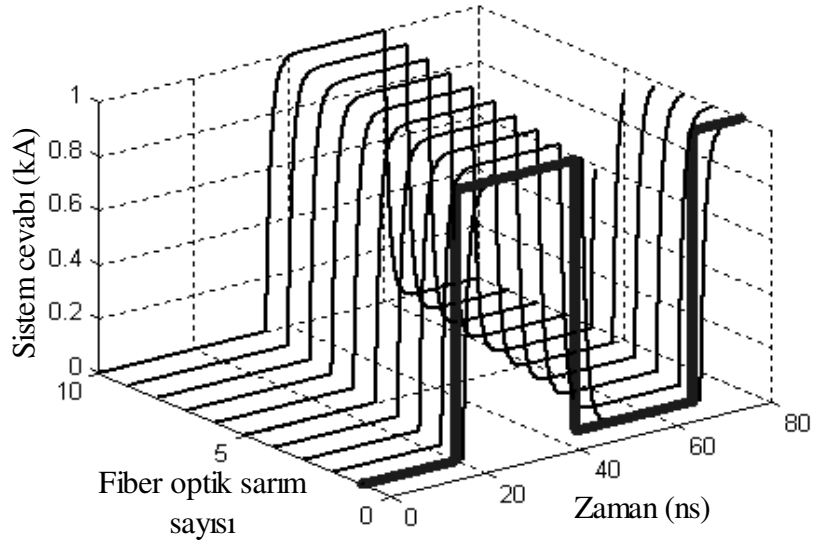
Şekil 4.10: İletkenin içinden geçen akım ve λ değişiminin sistem cevabına etkisi

Şekil 4.11'de görülen grafikte, fiber optik sarım sayısı 10, iletkenin içinden geçen akım 1 kA ve dalga boyu 950 nm iken, 50 mA'lik arttırmalarla lazer giriş akımını arttırmak suretiyle lazer giriş gücü artırılmakta ve sistemin cevabının lazer giriş gücüne bağlı olmadığı görülmektedir. Sistem çıkışı lazer giriş gücüne bağlı olmadığından fiber optik uzunluk boyunca meydana gelen zayıflamanın da sisteme etkisi olmadığı söylenebilir.



Şekil 4.11: Lazer giriş akımının sistem cevabına etkisi

Şekil 4.12’de dalga boyu 950 nm ve lazer giriş akımı 50 mA’de, 20. ns’de binen 20 Mhz’lik 1 kA’lık akım darbesinin (şekilde kalın çizgi ile gösterilmekte) ve N sarım sayısının sistem cevabına etkisi görülmektedir. N sarım sayısı arttıkça fiber optik kablunun uzunluğu artmakta bu nedenle ışığın bu yolda katettiği zaman uzamaktadır. Bu nedenle sinyalin alıcı uca ulaşması gecikmekte ve bunun sonucunda sistemin cevabı da gecikmektedir.



Şekil 4.12: Fiber optik sarım sayısının sistem cevabına etkisi

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Faraday etkili fiber optik akım algılayıcı sistemi oluşturan birimler önce ayrı ayrı sonra bütün olarak modellenmekte ve çeşitli dinamiklerin etkileri incelenmektedir.

Sistemin performansına etki eden elemanlardan biri olan yarıiletken lazer diyotlarda, giriş akımı ve dalga boyunun lazer çıkış gücüne etkisi incelenmesinden lazer giriş akımı belli bir eşik değer üzerine çıktığında lazerin çıkış gücü üretebildiği görülmektedir. Ayrıca dalga boyu azaldığında ışığın frekansı artacağından lazer çıkış gücünde de artış olduğu anlaşılmaktadır.

Algılayıcı fiber incelendiğinde, dalga boyunun 0.6-1 μm aralığında artması sırasında, fiber optik kablonun zayıflama katsayısının, n kırılma indisinin ve Verdet sabitinin azaldığı görülmektedir.

Fotodiyot duyarlılığı malzemeye ve üzerine düşen ışığın dalga boyuna bağlı olmaktadır. Fotodiyot geçici rejiminde fotodiyota gelen optik gücün akıma dönüşmesi sırasında bir gecikme meydana geldiği değişimlerden anlaşılmaktadır.

Verdet sabitinin optik fiber özünün kırılma indisi ve ışığın dalga boyuna bağlı olduğu bilinmektedir. Yüksek dalga boyu, yani düşük Verdet sabiti, daha yüksek akımlar ölçmeye imkan sağlarken aynı zamanda dalga boyu duyarlılık ilişkisinden dolayı da fotodiyot akımlarının çok düşük olmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda kuvvetlendirilen fotodiyot sinyalindeki gürültü değeri daha yüksek olmaktadır. Böyle bir sistemin tasarımında, sistem çıkışının lazer giriş gücüne bağımlılığı yoktur. Dolayısıyla zayıflamadan dolayı fiber optik kabloda meydana gelen güç azalmasının da bir önemi kalmamaktadır. Fiber optik kablonun sarım sayısı arttığında fiber optik kablo uzunluğunun da artması nedeniyle bir sinyal gecikmesi meydana gelmekte ve sistem çıkışı gecikmeli tepki vermektedir. Bununla beraber fiber optik kablonun sarım sayısını değiştirmek suretiyle de ölçüm sınırları değiştirilebilmektedir.

Böyle bir sistemin uygulamasında, fotodiyotlardan elde edilen akımlar gerilime dönüştürülmekte ve istenilen seviyeye kuvvetlendirilmektedir. Matematiksel işlemlerin yapılabilmesi için bu sinyaller analog–dijital dönüştürücüler aracılığıyla dijital sinyale dönüştürülmektedir. Bu dönüştürücünün referans gerilimini bulmak amacıyla ne kadarlık bir skalada ölçüm yapılacağı belirlenmelidir.

Yapılan bu çalışmada lazer, fotodiyot, sinyal işleme birimindeki gürültü parametreleri ihmal edilmektedir. Sistemin gerçekleşmesi süresince ihmal edilen parametreler, sinyal işleme kısmının gecikmesi ve birçok gürültü parametreleri işin içine girdiğinden dolayı sistem, sayısal benzetimdeki gibi hızlı ve güvenilir cevaplar vermeyebilir. Bununla beraber sayısal benzetimden elde edilen veriler nasıl ve hangi özelliklere sahip malzemeler kullanılması konularında çok önemli katkılar sağlamaktadır.

Bu tez sonunda; Faraday etkili fiber optik akım algılayıcısı yapımı sırasında meydana gelebilecek durumlar, sistem dinamiklerinin etkileri önceden incelenerek kestirilebilmektedir. Ayrıca, oluşturulan modeller; lazer, fiber optik, polarizör, analizör ve fotodiyot kullanan başka çalışmalarda da önemli katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Liehr, S., “Optical Measurement of Currents in Power Converters”, Master’s thesis project, *Microsystem Technology Group School of Electrical Engineering Royal Institute of Technology*, Stockholm, 1, 5-8, 12-15, 17, 25, 37,38, (2006).
- [2] Saraçoğlu, Ö. G., “Fiber Optik Manyetik Sensörlerle Algılama”, Yüksek lisans tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri,1, 4, 5-9, 11, 14, 28, (1995).
- [3] Leung, F.Y.C., Chiu, W.C.K., Demokan, M.S., “Fiber-Optic Current Sensor Developed For Power System Measurement”, *IEE International Conference on Advances in Power System Control*, 637,638,641,643, (1991).
- [4] Emerging Technologies Working Group, Fiber Optic Sensors Working Group, “Optical Current Transducers For Power Systems: A Review”, *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 9, No. 4, 1784, 1786, (1994).
- [5] Lin, H., Lin, W.W., Chen, M.H., Huang, S.C., “Fiber-Optic Current Sensor Using Passive Demodulation Interferometric Scheme”, *Fiber and Integrated Optics*, Vol. 18, 79, (1999).
- [6] Ulmer, E.A., “A High-Accuracy Optical Current Transducer For Electric Power System”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 2, 896, (1990).
- [7] Briffod, F., Alasia, D., Thévenaz, L., Cuénoud, G., Robert, P., “Extreme Current Measurements Using a Fibre Optics Current Sensor”, *Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, 1, (2002).
- [8] Steer, A.P., Turner S.J., Farrie, P.R.B., Tatam, R.P., Tobin, A.N., Jones, J.D.C., Jackson, D.A., “Optical Fibre Current Sensor For Circuit Protection”, *Developments in Power Protection Fourth International Conference*, 298,300, (1989).
- [9] Tantaswadi, P., “In-Line Sagnac Interferometer Current Sensor”, For the Degree of Doctor of Philosophy, *Office of Graduate Studies of Texas A&M University*, 1, 6-8, (1995).
- [10] Kumai, T., Nakabayashi, H., Hirata, Y., Takahashi, M., Terai, K., Kaminishi, T., Uehara, K., “Field Trial of Optical Current Transformer Using Optical Fiber as Faraday Sensor”, *IEEE*, 920, (2002).
- [11] Chipman, R.A., “Polarization Aberrations”, For the Degree of Doctor of Philosophy, *The University of Arizona Graduate College*,2, (1987).

- [12] Ağiroğlu, O., “Fiber Optik Aydınlatma Sistemleri”, Yüksek lisans tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 12, 14, 16, 19,20, 26-28, 30, 33-40, 98, (2006).
- [13] Dökümanlar [online], Kocaeli Üniversitesi, <http://latarum.kou.edu.tr/dokumanlar.html> (Ziyaret tarihi: 09.04.2007).
- [14] Fiber Optik Kablonun Çalışması [online], <http://www.fiberturk.com/docall.php#lh1> (Ziyaret tarihi: 30.10.2006).
- [15] Goyal, S., “Fiber Optic Current Sensor Network”, For the Degree of Master of Science, *The University of Calgary Department of Electrical and Computer Engineering*, Alberta, 7, 10, (1997).
- [16] Uzgel, E., “Design, Assembly And Calibration of an Experimental Setup For Various Optical Measurements”, For the Degree of Master of Science, *The Graduate School of Natural and Applied Sciences Of The Middle East Technical University*, 3,4, (2004).
- [17] Sankaralingam, R., “High-Speed Photodetectors And Receivers For Long-Haul Communication Systems”, For the Degree of Doctor of Philosophy, *Graduate Program in Electrical Engineering*, India, 3, 4, (2005).
- [18] Photodiode Technical Information [online], http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/photodiode_technical_information.pdf, 4 (Ziyaret tarihi: 31.03.2007)
- [19] Durak, M., “Silikon Fotodiyotların Optik Karakterizasyonu”, Yüksek lisans tezi, *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gebze, 6, (2002).
- [20] Keiser, G., “Optical Fiber Communications”, Second Edition, **McGraw-Hill Inc.**, 26, (1991)
- [21] Schaer, T., Rusnov, R., Eagle, S., Jastrebski, J., Albanese, S., Fernando, X., “A Dynamic Simulation Model For Semiconductor Laser Diodes”, *IEEE CCECE Canadian Conference*, 293, 297, (2003).
- [22] Gan K. G., Bowers J. E., “Measurement of Gain, Group Index, Group Velocity Dispersion, and Linewidth Enhancement Factor of an InGaN Multiple Quantum-Well Laser Diode”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 16, No. 5, 1256, (2004)
- [23] Cvetković, M., Matavulj, P., Radunović, J., Marinčić, A., “An InGaAs P-i-N Photodiode Model: Description And Implementations in the Analysis of the 1.55 μm Lightwave System”, *Journal of Optical Communications*, Vol. XX, No. Y, 2, (2000).

- [24] Jiao, B., Wang, Z., Liu, F., Bi, W., “Interferometric Fiber-Optic Current Sensor With Phase Conjugate Reflector”, *Proceeding of the 2006 IEEE International Conference on Information Acquisition*, China, 707, 708, (2006).
- [25] Kerstetter, P.C., “Models of Optoelectronic Devices Suitable For Electrical Circuit Simulation”, For the Degree of Doctor of Philosophy, *Georgia Institute of Technology*, 13-17, 26, 27, 41, 61, 62, 180, 181, (1998).
- [26] Özkan, M., “Fiber Optik Kablolar İle İletişim ve Fiber Optik Dalgakılavuzları”, Yüksek lisans tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 10, (1998).
- [27] Stokes, J.L., Bartsch, R.R., Cochrane, J.C., Chrien, R.E., Forman, P.J., Looney, L.D., Tabaka, L.J., Veaser, L.R., “Precision Current Measurements on Pegasus II Using Faraday Rotation”, *Pulsed Power Conference*, IEEE, 381, (1995).
- [28] Si PIN photodiode S5971, S5972, S5973 series [online], http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/parts_S/S5971_etc.pdf, 2 (**Ziyaret tarihi: 04.04.2007**).
- [29] Optical Wave Guides [online], <http://electron9.phys.utk.edu/optics421/modules/m9/Optical%20Wave%20Guides.htm>, (**Ziyaret tarihi: 23.04.2008**).
- [30] Single-Mode Fibers [online], <http://electron9.phys.utk.edu/optics507/modules/m5/single.htm>, (**Ziyaret tarihi: 23.04.2008**).
- [31] Qian, X., Boucouvalas, A. C., “Propagation Characteristic of Single-Mode Optical Fibers With Arbitrary Complex Index Profiles”, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 40, No. 6, 771-773, (2004).

EKLER

Ek-A: Mod

Bir fiberde yayılan modlar silindirik kordinatlarda fiber içindeki ışığın elektrik alanı için Maxwell denklemlerinin çözümüyle bulunur. Uzay ve zaman boyutunda harmonik çözümü aşağıdaki şekildedir [29].

$$E(r, \theta, z) = f(r) \cos(\omega t - \beta z + \chi) \cos(q \phi) \quad (A1)$$

ω : ışığın açısal hızı

β : yayılım sabiti

z : yayılımın yönü

q : tamsayı

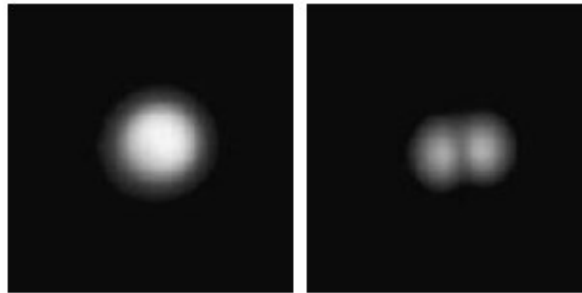
Modun grup hızı β/ω 'dır. Işın yaklaşımında, β , k 'nın z bileşenidir [29].

Normalize edilmiş dalga sayısı ya da V sayısı (Verdet sabiti değildir) $k_f a NA$ olarak tanımlanır. k_f , boşlukta dalga sayısı ($2\pi/\lambda_0$); a , fiber özünün yarıçapı; NA , fiberin nümerik açıklığıdır. NA aşağıdaki gibi ifade edilir [29].

$$NA = \sqrt{(n_{öz}^2 - n_{kılıf}^2)} \quad (A2)$$

Fiberin birçok parametresi V cinsinden ifade edilebilir. Kılavuzlanmış mod sayısı $V^2/2$ olarak ifade edilir. Basamak indisli fiber, verilen dalga boyu için $V < 2.405$ ise tek modlu fiber olur [29].

$n_{öz} - n_{kılıf}/n_{öz}$ değeri, 1 değerinden çok küçük ise fiberde yayılan modlar doğrusal polarize edilmiş (LP) modlardır. Bu modlar m ve n olmak üzere iki alt indis ile tanımlanır. m , azimut sayısını; n ise radyal dağılım sayısını göstermektedir. V değeri 2.405'den daha küçük olduğunda, fiber içinde yalnızca LP_{01} modu yayılır. V değeri 2.405'den daha büyük olduğunda bir sonraki doğrusal polarize edilmiş mod fiber tarafından taşınabilir ve böylece fiber içinde LP_{01} ve LP_{11} modları beraber yayılabilirler [29]. Şekil A1'de LP_{01} ve LP_{11} modları görülmektedir.



LP₀₁

LP₁₁

Şekil A1: LP'nin ilk iki modu [29]

İdeal metalik dalga kılavuzlarına ve dilim dalga kılavuzlarına karşın, optik fiberde E ve H teğetsel bileşen denklemleri birbirine bağlantılıdır. Genelde silindirik simetrik bir dalga kılavuzundaki modlar TE ve TM kılavuzlanmış dalgalar olarak gruplandırılmaz. Eğer fiberin simetri eksenini z eksenine alırsak, sıfır olmayan E_z ve H_z 'li modlar EH ve HE hibrit modlar olarak adlandırılır [30].

Ek-B: Yarıiletken Lazer Diyotunun Elektriksel Eşdeğer Devresi

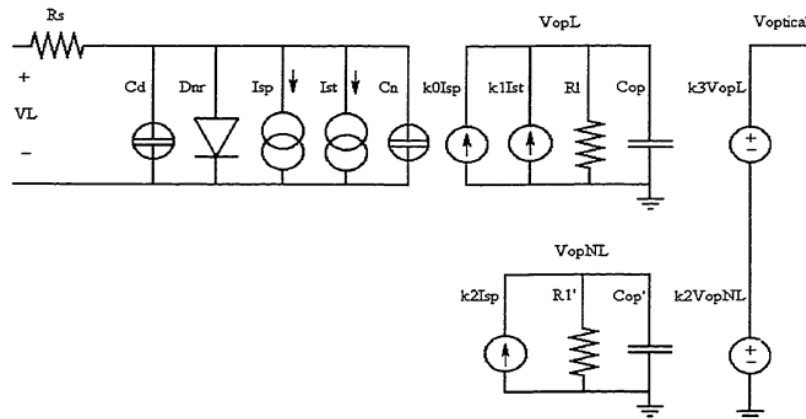
Kuantum kuyulu (quantum-well) lazer diyotun oran denklemleri aşağıdaki gibidir [25].

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{qN_w L_z} - BN^2 - \Gamma g_m c' S \quad (B1)$$

$$\frac{dS}{dt} = \beta BN^2 + \Gamma g_m c' S - \frac{S}{\tau_p} \quad (B2)$$

- S : ışımada foton yoğunluğu
 N : kuantum kuyusunda elektron yoğunluğu
 J : uygulanan akım yoğunluğu
 q : elektron yükü
 N_w : kuantum kuyularının sayısı
 L_z : bir tek kuantum kuyusunun kalınlığı
 B : geleneksel banttan banta tekrar birleşme katsayısı
 Γ : optik hapsedme faktörü (optical confinement factor)
 c' : ışımada ortamında ışığın hızı
 β : kendiliğinden yayılma bağlantı katsayısı
 τ_p : foton ömrü

Oran denklemleri, akım-gerilim ve optik güç cinsinden yazılabilmektedir. N , elektron yoğunluğu bir tek kuantum kuyusu için bulunmakta ve uygulanan gerilim V_L 'nin bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Elektron yoğunluğu ilk oran denkleminde yerine konulmakta ve bu denklem, üzerinde işlem yapılarak lazer için akım-gerilim ilişkisini ifade eden bir denklem haline almaktadır. Foton yoğunluğu optik güce çevrilmektedir. İkinci oran denklemini üzerinde işlem yapılarak optik güç ilişkisi bulunmaktadır [25]. Oran denklemleri verilen lazer diyotun devre modeli Şekil B1'deki gibi olmaktadır.



Şekil B1: Lazer diyotun elektriksel eşdeğer devresi [25]

R_s , seri direnç; C_d , paralel kapasite; D_{nr} , ideal diyot, lazerin ışımsal olmayan akım-gerilim karakteristiğini ifade etmektedir. Direnç, ideal diyotun tüketim bölgesinin (depletion region) dış direncini göstermektedir. İkinci oran denkleminde akım-gerilim karakteristiği için ışımsal katkı vardır. Bu katkı, lazerin kendiliğinden yayılım akımını gösteren doğrusal olmayan bir direnç I_{sp} ; lazerin zorlamalı yayılım akımını gösteren doğrusal olmayan bir direnç I_{st} ve lazerin yük depolama etkisini gösteren C_n kapasitörüdür [25].

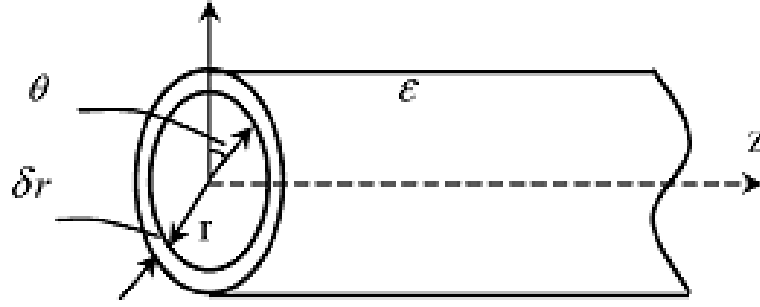
İkinci oran denklemini ifade etmek için dört adet devre elemanı kullanılmaktadır. İlk devre elemanı akım kontrollü akım kaynağı $k_0 I_{sp}$ 'dir. Bu eleman kendiliğinden yayınımdan dolayı akım yoğunluğuna katkısını göstermektedir. İkinci devre elemanı akım kontrollü akım kaynağı $k_1 I_{st}$ 'dir. Bu eleman zorlamalı yayınımdan dolayı akım yoğunluğuna katkısını göstermektedir. Üçüncü devre elemanı, lazer oyuğundaki ışığın emilimini ifade eden R_1 direncidir. Dördüncü devre elemanı ise Fabry-Perot rezonatöründeki foton depolama etkisini ifade eden C_{op} kapasitörüdür [25].

Bu devre elemanlarına ek olarak fotonların diğer ışımaya modlarına anında emilim yoluyla bağlantısını gösteren devre elemanları vardır. Bu devre elemanları akım kontrollü akım kaynağı $k_2 I_{sp}$, R_1' paralel direnci ve C_{op}' kapasitörüdür [25].

Sonuç olarak $k_2 V_{opNL}$ ve $k_3 V_{opL}$ gerilim kontrollü gerilim kaynakları, lazerin toplam optik çıkış gücünü vermektedir. Bu model tek modlu lazer için uygun olmaktadır [25].

Ek-C: Optik Fiberin Elektriksel Eşdeğer Devresi

Silindirik optik dalga kılavuzu, eş merkezli, homojen, δr kalınlığına, ϵ elektriksel geçirgenliğine, μ manyetik geçirgenliğine ve σ iletkenliğine sahip birçok silindirik katmana bölünmektedir [31]. Şekil C1’de homojen optik fiberin ince bir silindirik katmanı görülmektedir.



Şekil C1: Homojen optik fiberin ince bir silindirik katmanı [31]

Analiz, $\sigma=0$, $\mu=\mu_0$, eksenden r kadar uzaklıktaki katmanın kırılma indisi n olmak üzere $\epsilon=n^2 \epsilon_0$ olarak sınırlandırılmaktadır. Aşağıda gerilim ve akım değişkenleri tanımlanmaktadır [31].

$$V_s = \frac{V_M}{\sqrt{n}} + V_E \sqrt{n} \quad (\text{HE modu}) \quad (\text{C1})$$

$$V_d = \frac{V_M}{\sqrt{n}} - V_E \sqrt{n} \quad (\text{EH modu}) \quad (\text{C2})$$

$$I_s = I_M \sqrt{n} + \frac{I_E}{\sqrt{n}} \quad (\text{HE modu}) \quad (\text{C3})$$

$$I_d = I_M \sqrt{n} - \frac{I_E}{\sqrt{n}} \quad (\text{EH modu}) \quad (\text{C4})$$

$$V_M = \frac{l H_\theta + \beta r H_z}{j F} Z_0 \quad (\text{manyetik alan gerilimi}) \quad (\text{C5})$$

$$I_M = \frac{\omega \mu r H_r}{j Z_0} \quad (\text{manyetik alan akımı}) \quad (\text{C6})$$

$$V_E = \frac{l E_\theta + \beta r E_z}{F} Z_0 \quad (\text{elektrik alan gerilimi}) \quad (\text{C7})$$

$$I_E = \omega \epsilon_0 n^2 r E_r \quad (\text{elektrik alan akımı}) \quad (\text{C8})$$

$Z_0 = 120\pi$ boşluğun empedansı, $F = ((\beta r)^2 + l^2)/r$, l azimut mod sayısı, β yayınım katsayısı, ω mod frekansını ifade etmektedir [31].

$$\frac{\partial V_s}{\partial r} = \frac{-Y_s^2}{j\omega\epsilon_0 n F} I_s, \quad \frac{\partial I_s}{\partial r} = j\omega\epsilon_0 n F V_s \quad (\text{C9})$$

$$\frac{\partial V_d}{\partial r} = \frac{-Y_d^2}{j\omega\epsilon_0 n F} I_d, \quad \frac{\partial I_d}{\partial r} = j\omega\epsilon_0 n F V_d \quad (\text{C10})$$

$$Y_s^2 = \beta^2 + (l/r)^2 - n^2 k_0^2 \mp (2nk_0\beta l / ((\beta r)^2 + l^2)) \quad (\text{HE mod için } -, \text{EH mod için } +)$$

k_0 boşluktaki yayınım sabitini ifade etmektedir. Yukarıdaki denklem V_s ve V_d gerilimine ve I_s ve I_d akımlı iki bağımsız iletim hattını ifade etmektedir. Karakteristik empedanslar aşağıdaki gibi olmaktadır [31].

$$Z_s = \frac{Y_s}{j\omega\epsilon_0 n F}, \quad Z_d = \frac{Y_d}{j\omega\epsilon_0 n F} \quad (\text{C11})$$

Yukarıdaki denklemler, aşağıdaki empedanslara sahip elektrik devresinin çözümü için gerekli iletim hattı denklemleri olarak tanımlanmaktadır [31].

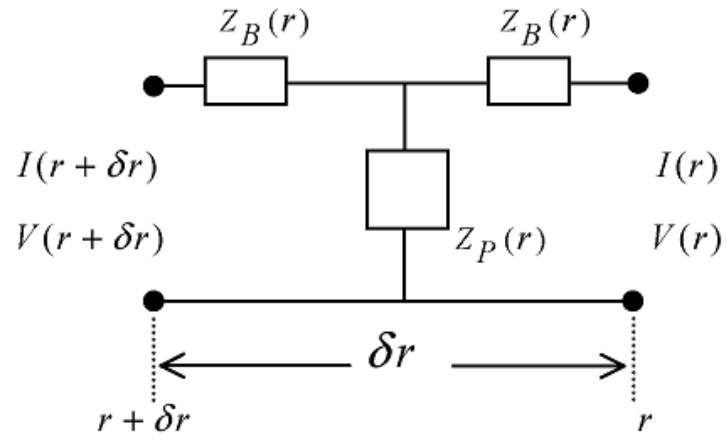
$$Z_B = Z_s \tanh\left(Y_s \frac{\delta r}{2}\right), \quad Z_P = \frac{Z_s}{\sinh\left(Y_s \delta r\right)} \quad (\text{C12})$$

$\delta r/r \ll 1$ olduğundan;

$$Z_B = \frac{1}{2} (\delta r)^2 Y_s^2 Z_P \quad (\text{C13})$$

$$Z_P = \frac{Z_0}{jn r (\delta r) k_0 \left(\beta^2 + \left(\frac{l}{r} \right)^2 \right)} \quad (\text{C14})$$

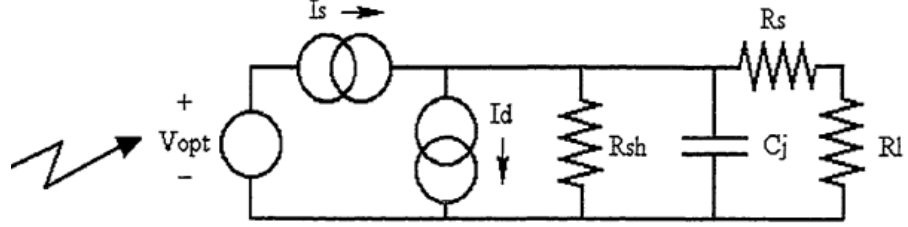
Şekil C2'de dielektrik bir dalga kılavuzunun eşdeğer devresi görülmektedir.



Şekil C2: Dielektrik bir dalga kılavuzunun eşdeğer devresi [31]

Ek-D: Fotodiyotun Elektriksel Eşdeğer Devresi

Şekil D1’de bir pin fotodiyotun elektriksel eşdeğer devresi görülmektedir.



Şekil D1: pin fotodiyotun elektriksel eşdeğer devresi [25]

Bu devre, optik gerilim kaynağı V_{opt} , doyma (saturation) akımını ifade eden doğrusal olmayan bir akım kaynağı I_s , karanlık (dark) akımını ifade eden doğrusal olmayan bir akım kaynağı I_d , paralel bir direnç R_{sh} , bir eklem (junction) kapasitörü C_j , seri bir direnç R_s ve bir R_l yük direncinden oluşmaktadır [25].

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Emirdağ'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Eskişehir'de tamamladı. 2001 yılında girdiği Fırat Üniversitesi Elektrik Öğretmenliği Bölümü'nden 2005 yılında mezun oldu. 2005 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı yüksek lisans programına devam etmektedir.