

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OPTİK FİBER BRAGG IZGARA ALGILAYICILARIN ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS

Elektronik ve Haberleşme Müh. Ceyhun PEHLİVAN

Anabilim Dalı: Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği

Danışman: Yrd. Doç.Dr. Arif DOLMA

KOCAELİ, 2007

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OPTİK FİBER BRAGG IZGARA ALGILAYICILARIN ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS

Elektronik ve Haberleşme Müh. Ceyhun PEHLİVAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 04 Haziran 2002

Tezin Savunulduğu Tarih: 19 Temmuz 2002

Tez Danışmanı

Üye

Üye

Yrd.Doç.Dr.Arif DOLMA Doç.Dr.Namık YENER Doç.Dr.Arif ERGİN

(.....)

(.....)

(.....)

KOCAELİ, 2007

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OPTİK FİBER BRAGG IZGARA ALGILAYICILARIN ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS

Elektronik ve Haberleşme Müh. Ceyhun PEHLİVAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 04 Haziran 2002

Tezin Savunulduğu Tarih: 19 Temmuz 2002

Tez Danışmanı

Üye

Üye

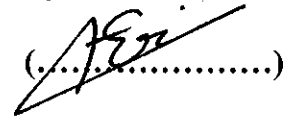
Yrd.Doç.Dr.Arif DOLMA

Doç.Dr.Namık YENER

Doç.Dr.Arif ERGİN


(.....)


(.....)


(.....)

KOCAELİ 2007

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Günümüzde sensörlerin kullanım alanı sürekli artmaktadır ve çeşitli amaçlara göre yeni sensörler geliştirilmektedir. Uygulamadaki birçok sensörün elektriksel tabanlı olmasına rağmen günümüzün artan ihtiyaçları yeni arayışları da beraberinde getirmiştir. Fiber optik sensör sistemleri, yüksek çözünürlük, kolay üretilebilirlik, sağlamlık, ağır çevre şartlarında ve geniş alanlara yayılmış yapılarda işlevsellik gibi yeni ihtiyaçları karşılayabilecek özelliklerinden dolayı araştırmacıların yoğun ilgisini çekmektedir. Uygulamada, değişik prensiplerle çok çeşitli parametreleri ölçebilen birçok fiber optik sensör yerini almıştır. Çoğullanabilme kapasiteleri ve dağıtılmış uygulamalardaki performansları süreç yönetimi gibi birçok alanda fiber optik sensörlerin şimdiden geleceğin teknolojisi olarak algılanmasını sağlamıştır.

Süreç yönetiminde fiber optik sensörlerle performans artırımı konusunda bana çalışma imkanı veren danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Arif DOLMA'ya ve hayatım boyunca beni destekleyen ve bugünlere getiren babam Öğr. Görv. Ekrem PEHLİVAN ve annem Gönül PEHLİVAN'a sonsuz minnet duygularımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ.....	vii
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR.....	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
1.GİRİŞ.....	1
2. FİBER OPTİK SENSÖRLER.....	5
2.1. Fiber Optik Sensörlerin Sınıflandırılması.....	7
2.1.1 Yoğunluk modülasyonlu sensörler.....	8
2.1.2. Faz modülasyonlu sensörler.....	9
2.1.2.1. Mach-Zehnder interferometresi.....	10
2.1.2.2 Michelson interferometresi.....	11
2.1.2.3 Fabry-Perot interferometresi.....	11
2.1.2.4 Sagnac interferometresi.....	13
2.1.3 Dalgaboyu modülasyonlu sensörler.....	14
2.1.4 Polarizasyon modülasyonlu sensörler.....	17
3. FİBER OPTİK SENSÖRLER İÇİN ÇOĞULLAMA ŞEMALAR.....	19
3.1. Topoloji.....	19
3.1.1. Seri topoloji.....	19
3.1.2. Yıldız topoloji.....	20
3.1.3. Merdiven topoloji.....	21
3.1.4. Hibrid topoloji.....	21
3.2. Fiber Optik Sensörlerin Çoğullanma Teknikleri.....	22
3.2.1. Zaman bölmeli çoğullama.....	22
3.2.2. Frekans bölmeli çoğullama.....	23
3.2.3. Dalga boyu bölmeli çoğullama.....	25
3.2.4. Diğer çoğullama şemaları.....	27
4. DAĞITILMIŞ ALGILAMA.....	28
4.1 Tam Dağıtılmış Fiber Optik Sensörler.....	28
4.1.1 Rayleigh saçılmasına dayalı fiber optik sensörler.....	29
4.1.2 Raman saçılmasına dayalı fiber optik sensörler.....	30
4.1.3 Brillouin saçılmasına dayalı fiber optik sensörler.....	33
4.2 Tam Dağıtılmış Fiber Optik Sensörlerdeki Problemler.....	33
4.3 Yarı Dağıtılmış Fiber Optik Sensörler.....	34
5. FİBER BRAGG IZGARALAR VE FOTO DUYARLILIĞIN TEMELİ VE PRENSİPLERİ.....	34
5.1 FiberdeFotoDuyarlılıkOlgusu.....	36
5.1.1. Fiberde foto duyarlılığın keşfi.....	36
5.1.2. Farklı GeO ₂ katkılı silika fiberler üzerindeki testler.....	37
5.1.3. FBG oluşumu için foto duyarlılık mekanizmaları ve modelleri.....	39
5.1.4 Fiberde hidrojen uyarımlı kayıplar.....	39

5.1.5 UV indüklü beyazlatmanın gözlemlenmesi.....	39
5.2 Fiberin Foto Duyarlılığının Artırılması.....	39
5.2.1 Bor katkılı germanyum silika fiber.....	39
5.2.2 Ateş fırçası tekniği.....	41
5.2.3 Yüksek basınçlı H ₂ yüklemesi.....	41
5.3 Fiber Bragg Izgara Sensörlerin Avantajları.....	42
5.4 Bragg Izgaraların Çalışma Prensipleri.....	42
5.5 Yaygın FBG Sensörlerin Çalışma Prensipleri.....	44
5.5.1 Gerilme algılama.....	44
5.5.2 Sıcaklık algılama.....	46
5.5.3 Basınç algılama.....	46
5.5.4 Diğer sensörler.....	46
6. FİBER BRAGG IZGARALARIN ÜRETİMİ, TEMİZLENMESİ.....	47
6.1 Giriş.....	47
6.2. Fiber Bragg Izgara Üretim Metodları.....	47
6.2.1. Duran dalga metodu.....	47
6.2.2. Çapraz holografik metod.....	48
6.2.3. Noktadan noktaya yazma tekniği.....	49
6.2.4. Tek uyarılmış atom çifti darbesi kullanarak üretim.....	50
6.2.5. Noktadan noktaya tek uyarılmış atom çifti darbesi tekniği.....	51
6.2.6. Faz maskesi metodu.....	52
6.2.7. Faz maskesi metodundaki çeşitlilikler.....	53
6.2.8. Fiber çizimi sırasında üretim.....	55
6.2.9. Diğer teknikler.....	57
6.3 Fiber Bragg Izgaraların Silinmesi.....	57
7. FİBER OPTİK SENSÖRLERDEKİ SICAKLIK VE GERİLME ALGILAMA ARASINDAKİ AYIRIM METOTLARI.....	58
7.1 Giriş.....	58
7.2 Fiber Optik Sensörlerin Gerilme ve Sıcaklığa Çapraz Hassasiyetine Karşı Önerilen Çözümler.....	58
7.2.1 İnterferometrik sensörler ile çift kırılmalı interferometre kullanımı.....	59
7.2.2 İkili dalga boyu fiber ızgara sensörleri.....	59
7.2.3 Gerilme ve sıcaklıkta çiftkırılma ve fiber kırılma indeksinin bağımlılığını kullanma.....	60
7.2.4 Sıcaklık sıkıştırılmalı bragg ızgara.....	61
7.2.5 Sıcaklıktan bağımsız gerilme algılama.....	61
7.2.6 Hibrid sensörler.....	62
7.2.7 Süperstrüktür fiber bragg ızgara.....	63
7.2.8 Cam tüpte azalan adımlı ızgara.....	64
7.2.9 Tek fiber ızgara kurgusu.....	65
8. FİBER BRAGG MODELLEME	66
8.1 Fiber Bragg Izgaralara Genel Bakış.....	66
8.2 Bağlaşımlı Kip Teorisi.....	67
8.3 Fiber Bragg Izgaraları Simulasyonu.....	70
8.3. Giriş.....	70
8.3.3 Tekdüze bragg ızgaraları.....	73

8.3.4. Direkt sayısal integrasyon metodu.....	75
8.3.4.1. Runge-Kutta metodu.....	75
8.3.5. Tekdüze ızgaralar için transfer matris metodu.....	76
8.3.5.1. Tekdüze olmayan ızgaralar için transfer matris metodu.....	77
8.3.6. Zaman gecikmesinin ve dispersiyonun hesaplanması.....	78
8.4. Programın Akış Şemaları.....	79
8.5. Simulasyon Sonuçları.....	81
8.5.1. Maksimum yansıma ve yansıma bandgenişliği ile ızgara uzunluğu.....	81
8.5.2. Maksimum yansıma ve yansıma bandgenişliği ile indis değişimi.....	83
8.5.3. Diğer simulasyon grafikleri.....	85
9. SONUÇLAR.....	88
KAYNAKLAR.....	90
ÖZGEÇMİŞ.....	93

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Optik Fiber Algılama Sisteminin Temel Elemanları.....	6
Şekil 2.2 Fiberin kendisinin dönüştürücü olduğu direk(içte etkileşimli) sensör sistemi.	6
Şekil 2.3 Dönüştürücünün fibere göre davrandığı endirek (dışta etkileşimli) sensör sistemi.....	7
Şekil 2.4 Mikrobükme Basınç Sensörünün Yapısı.....	9
Şekil 2.5 Bir optik fiber Mach-Zehnder İnterferometrik sensör sistemi.....	10
Şekil 2.6. Tipik bir optik fiber Michelson İnterferometrik sensör sistemi.....	11
Şekil 2.7 İletim modunda Fabry-Perot (FP) sensör.....	12
Şekil 2.8 Yansıma modunda Fabry-Perot (FP) sensör.....	12
Şekil 2.9 Fabry-Perot (FP) İnterferometrik sensör (a) IFPI sensör (b) EFPI sensör.....	13
Şekil 2.10 Tipik bir Sagnac interferometrik jireskop.....	14
Şekil 2.11. Fiber Bragg Izgara yapısı.....	15
Şekil 2.12. Fiber Bragg Izgara yansıma Spektrumu.....	15
Şekil 3.1 Seri topolojili bir sensör dizisi.....	20
Şekil 3.2. Yıldız topolojili bir sensör dizisi.....	20
Şekil 3.3:Merdiven topolojili bir sensör ağı.....	21
Şekil 3.4. Yıldız ve seri topolojiden oluşan karma bir sensör ağı.....	22
Şekil 3.5. OTDR tabanlı bir TDM sensör dizisi.....	23
Şekil 3.6 FCMW tabanlı FDM sensör dizisi.....	25
Şekil 3.7 Bir dalga boyu bölmeli çoğullama sensör dizisi.....	25
Şekil 3.8 FBG sensörler için bir WDM şeması.....	26
Şekil 4.1 OTDR çalışma prensibi.....	28
Şekil 4.2. (a) Raman enerji seviye geçişleri.....	31
Şekil 4.2.(b) Raman spektrumu.....	31
Şekil 4.2. (c) Silika için raman spektrumu.....	32
Şekil 4.3. Raman dağıtılmış fiber sıcaklık sensörü.....	32
Şekil 4.4. FFPI sensörün temel çalışma prensibi.....	35
Şekil 5.1. Bir Bragg ızgarada iletim ve yansıma.....	43
Şekil 5.2. Bragg ızgaralı fiber.....	44
Şekil 5.3. Boyuna gerilmeden kaynaklanan ızgaranın dalgaboyu kayması.....	45
Şekil 6.1 Duran Dalga üretim metodunun deneysel düzeneği.....	48
Şekil 6.2. Çapraz Holografik Metod	49
Şekil 6.3. Tek darbe ızgara yazımı için interferometre.....	51
Şekil 6.4. Faz maske ile ızgara yazma metodu.....	52
Şekil 6.5. Modifiye edilmiş faz maske metodu.....	55
Şekil 7.1. İki dalgaboyu gerilme/sıcaklık ayırımı için deneysel düzenek.....	60
Şekil 7.2. İki polarizasyon sallantı filtresi ve bir Bragg ızgara içeren sensor.....	61
Şekil 7.3. Hibrid FBG/LPG sensörünün yansıma spektrumu.....	63
Şekil 7.4. Azalan adımlı fiber Bragg ızgara(CFBG) ve cam tüp kullanılan gerilme .sensörü.....	64
Şekil 7.5. Eşzamanlı gerilme ve sıcaklık sensörü ile tek FBG'nin yapısı	65
Şekil 8.1. Başlangıç koşulu ve giren alan ızgara cevabının hesaplanması.....	72
Şekil 8.2(a) Tekdüze ızgaralar için transfer matrisi metodu ilke diyagramı.....	76

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Optik Fiber Algılama Sisteminin Temel Elemanları.....	6
Şekil 2.2. Fiberin kendisinin dönüştürücü olduğu direk(içte etkileşimli) sensör sistemi...6	6
Şekil 2.3. Dönüştürücünün fibere göre davrandığı endirek (dışta etkileşimli) sensör sistemi.....	7
Şekil 2.4. Mikrobükme Basınç Sensörünün Yapısı.....	9
Şekil 2.5. Bir optik fiber Mach-Zehnder İnterferometrik sensör sistemi.....	10
Şekil 2.6. Tipik bir optik fiber Michelson İnterferometrik sensör sistemi.....	11
Şekil 2.7 İletim modunda Fabry-Perot (FP) sensör.....	12
Şekil 2.8 Yansıma modunda Fabry-Perot (FP) sensör.....	12
Şekil 2.9 Fabry-Perot (FP) İnterferometrik sensör (a) IFPI sensör (b) EFPI sensör.....	13
Şekil 2.10 Tipik bir Sagnac interferometrik jireskop.....	14
Şekil 2.11. Fiber Bragg Izgara yapısı.....	15
Şekil 2.12. Fiber Bragg Izgara yansıma Spektrumu.....	15
Şekil 3.1 Seri topolojili bir sensör dizisi.....	20
Şekil 3.2. Yıldız topolojili bir sensör dizisi.....	20
Şekil 3.3:Merdiven topolojili bir sensör ağı.....	21
Şekil 3.4: Yıldız ve seri topolojiden oluşan karma bir sensör ağı.....	22
Şekil 3.5: OTDR tabanlı bir TDM sensör dizisi.....	23
Şekil 3.6 FCMW tabanlı FDM sensör dizisi.....	25
Şekil 3.7 Bir dalga boyu bölmeli çoğullama sensör dizisi.....	25
Şekil 3.8 FBG sensörler için bir WDM şeması.....	26
Şekil 4.1 OTDR çalışma prensibi.....	28
Şekil 4.2. (a) Raman enerji seviye geçişleri.....	31
Şekil 4.2.(b) Raman spektrumu.....	31
Şekil 4.2. (c) Silika için raman spektrumu.....	32
Şekil 4.3. Raman dağıtılmış fiber sıcaklık sensörü.....	32
Şekil 4.4. FFPI sensörün temel çalışma prensibi.....	35
Şekil 5.1. Bir Bragg ızgarada iletim ve yansıma.....	43
Şekil 5.2. Bragg ızgaralı fiber.....	44
Şekil 5.3. Boyuna gerilmeden kaynaklanan ızgaranın dalgaboyu kayması.....	45
Şekil 6.1 Duran Dalga üretim metodunun deneysel düzeneği.....	48
Şekil 6.2. Çapraz Holografik Metod	49
Şekil 6.3. Tek darbe ızgara yazımı için interferometre.....	51
Şekil 6.4. Faz maske ile ızgara yazma metodu.....	52
Şekil 6.5. Modifiye edilmiş faz maske metodu.....	55
Şekil 7.1. İki dalgaboyu gerilme/sıcaklık ayırımı için deneysel düzenek.....	60
Şekil 7.2. İki polarizasyon sallantı filtresi ve bir Bragg ızgara içeren sensor.....	61
Şekil 7.3. Hibrid FBG/LPG sensörünün yansıma spektrumu.....	63
Şekil 7.4. Azalan adımlı fiber Bragg ızgara(CFBG) ve cam tüp kullanılan gerilme sensörü.....	64
Şekil 7.5. Eşzamanlı gerilme ve sıcaklık sensörü ile tek FBG'nin yapısı	65
Şekil 8.1. Başlangıç koşulu ve giren alan ızgara cevabının hesaplanması.....	72

Şekil 8.2(b) Tekdüze olmayan ızgaralar için transfer matrisi metodu ilke diyagramı....	77
Şekil 8.3 Izgara sınıfı kullanımının akış şeması.....	79
Şekil 8.4. Simulasyon Prosesinin Akış Şeması.....	80
Şekil 8.5 $n_{core}=1.447$, $\delta n=0.0009$, $L_1=267500$ iken yansıma-dalgaboyu grafiği.....	81
Şekil 8.6 $n_{core}=1.447$, $\delta n=0.0009$, $L_2=535000$ iken yansıma-dalgaboyu grafiği.....	81
Şekil 8.7 $n_{core}=1.447$, $\delta n=0.0009$, $L_3=2675000$ iken yansıma-dalgaboyu grafiği.....	82
Şekil 8.8 $n_{core}=1.447$, $L=535000nm$, $\delta n=0.003$ iken yansıma-dalgaboyu grafiği.....	83
Şekil 8.9 $n_{core}=1.447$, $L=535000nm$, $\delta n=0.0009$ iken yansıma-dalgaboyu grafiği.....	83
Şekil 8.10 $n_{core}=1.447$, $L=535000nm$, $\delta n=0.0004$ iken yansıma-dalgaboyu grafiği.....	84
Şekil 8.11 $n_{core}=1.447$, $L=535000nm$, $\delta n=0.0001$ iken yansıma-dalgaboyu grafiği.....	84
Şekil 8.12 $n_{core}=1.447$, $L=535000nm$, $\delta n=0.0009$ iken faz-dalgaboyu grafiği.....	85
Şekil 8.13 Faz ve yansıma şiddeti ile dalgaboyunun karşılaştırmalı grafiği.....	85
Şekil 8.14 $n_{core}=1.447$, $L=535000nm$, $\delta n=0.0009$ iken iletim -dalgaboyu grafiği.....	86
Şekil 8.15 $n_{core}=1.447$, $L=535000nm$, $\delta n=0.0009$ iken gecikme-dalgaboyu grafiği.....	86
Şekil 8.16 $n_{core}=1.447$, $L=535000nm$, $\delta n=0.0009$ iken dispersiyon-dalgaboyu grafiği..	87

Şekil 8.2(a) Tekdüze ızgaralar için transfer matrisi metodu ilke diyagramı.....	76
Şekil 8.2(b) Tekdüze olmayan ızgaralar için transfer matrisi metodu ilke diyagramı....	77
Şekil 8.3 Izgara sınıfı kullanımının akış şeması.....	79
Şekil 8.4. Simulasyon Prosesinin Akış Şeması.....	80
Şekil 8.5 $n_{core}=1.447$, $\delta n=0.0009$, $L_1=267500$ iken yansıma-dalgaboyu grafiği.....	81
Şekil 8.6 $n_{core}=1.447$, $\delta n=0.0009$, $L_2=535000$ iken yansıma-dalgaboyu grafiği.....	81
Şekil 8.7 $n_{core}=1.447$, $\delta n=0.0009$, $L_3=2675000$ iken yansıma-dalgaboyu grafiği.....	82
Şekil 8.8 $n_{core}=1.447$, $L=535000nm$, $\delta n=0.003$ iken yansıma-dalgaboyu grafiği.....	83
Şekil 8.9 $n_{core}=1.447$, $L=535000nm$, $\delta n=0.0009$ iken yansıma-dalgaboyu grafiği.....	83
Şekil 8.10 $n_{core}=1.447$, $L=535000nm$, $\delta n=0.0004$ iken yansıma-dalgaboyu grafiği.....	84
Şekil 8.11 $n_{core}=1.447$, $L=535000nm$, $\delta n=0.0001$ iken yansıma-dalgaboyu grafiği.....	84
Şekil 8.12 $n_{core}=1.447$, $L=535000nm$, $\delta n=0.0009$ iken faz-dalgaboyu grafiği.....	85
Şekil 8.13 Faz ve yansıma şiddeti ile dalgaboyunun karşılaştırmalı grafiği.....	85
Şekil 8.14 $n_{core}=1.447$, $L=535000nm$, $\delta n=0.0009$ iken iletim -dalgaboyu grafiği.....	86
Şekil 8.15 $n_{core}=1.447$, $L=535000nm$, $\delta n=0.0009$ iken gecikme-dalgaboyu grafiği.....	86
Şekil 8.16 $n_{core}=1.447$, $L=535000nm$, $\delta n=0.0009$ iken dispersiyon-dalgaboyu grafiği.....	87

TABLolar DİZİNİ

Tablo 5.1 Değişik fiberler üzerindeki foto duyarlılık testleri.....	38
Tablo 5.2 Dört farklı fiberin göreceli foto duyarlılığı.....	40

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

A :Genlik
 Ω :Açısal frekans
 φ :Faz
 λ :Dalga Boyu
 Λ :Izgara Adımı
 α :Fiberin Isıl Genleşme Katsayısı
 σ :Fiberin Termo-optik Katsayısı
W :Darbe Genişliği
 v :Fiberdeki Işık Hızı
S :Gerilim
n :Yansıma indeksi

FBG :Fiber Bragg Grating
SNR :Signal to Noise Ratio
TDM :Time Division Multiplexing
FDM :Frequency Division Multiplexing
WDM :Wavelength Division Multiplexing
CM :Coherence Division Multiplexing
CDM :Code Division Multiplexing
SDM :Space Division Multiplexing
UV :Ultraviole
EMI :Electromagnetic Interference
RFI :Radio Frequency Interference
IPO :Intrinsic Fabry Perot Interferometer
EFPI :Extrinsic Fabry Perot Interferometer
OTDR :Optical Time-Domain Reflectometer
FMCW :Frequency Modulation Continuous Wave
OFDR :Optical Frequency-Domain Reflectometer
OPD :Optical Path Difference
DWDM :Dence Wavelength Division Multiplexing
DTS :Distributed Temperature Sensing
FFPI :Fiber Fabry Perot Interferometer
FWHM :Full width half maximum
OSA :Optical Spectrum Analiser
LPG :Long Period Grating
SFBG :Superstructure Fiber Bragg Grating
CFBG :Chirped Fiber Bragg Grating
EDFA :Erbium Doped Fiber Amplifier

OPTİK FİBER BRAGG IZGARA ALGILAYICILARIN ANALİZİ

Ceyhun PEHLİVAN

Anahtar Kelimeler: Fiber Optik Sensörler, Gerilme, Sıcaklık, Foto Duyarlılık, Fiber Izgaraları

Özet: Akıllı yapılar, sistem kontrol ve imalat süreci izleme gibi faaliyetlerde sıcaklık, gerilme ve basınç gibi fiziksel parametrelerin doğru ve hızlı ölçümü önem kazanır. Bunun için çeşitli sıcaklık, gerilme ve basınç ölçüm teknikleri geliştirilmiştir. Uygulamada bu tekniklerin çoğu elektriksel tabanlıdır. Günümüzün artan ihtiyaçları bu parametrelerin ölçümünün aynı anda birden çok noktadan izlenmesini talep etmektedir. Geleneksel sensörlerin bu taleplere göre yeniden şekillendirilmesi gerekmektedir. Bu tezde, bu gibi artan ihtiyaçları karşılayabilecek yüksek çözünürlüklü, düşük maliyetli, kolay üretilen, sağlam ve çevre şartları veya yayılmış bünyeli yapılarda işlevsel yarı dağıtılmış fiber optik gerilme ve sıcaklık algılama sistemleri ve bu sistemler için en uygun tekniklerden biri olan Fiber Bragg Izgara (FBG) metodu tanıtılmıştır.

ANALYSIS OF OPTICAL FIBER BRAGG GRATING SENSORS

Ceyhun PEHLIVAN

Keywords: Optical Fiber Sensors, Strain, Temperature, Photosensitivity, Fiber Gratings

Abstract: Accurate and Rapid measuring of physical parameters like strain, temperature and pressure has great importance to smart structure, system control and manufacturing process monitoring. Hence, various temperature, strain and pressure measurement Technologies have been developed. In practice, almost all these Technologies are electrically based. Necessities of our century require monitoring of these parameters at multiple locations at the same time. So, traditional sensors should be rearranged according to that request. In this research, quasi distributed strain and temperature sensing systems with high resolution, low cost, easy fabrication and robustness that can be operated reliably in harsh environment or extended structures and Fiber Bragg Gratings (FBG) which is one of the best techniques of these systems are introduced for that increasing demands.

1. GİRİŞ

Sıcaklık, basınç, gerilme gibi fiziksel faktörlerin doğru, hızlı ve sık ölçümünün akıllı yapılarda, sistem kontrolde ve imalat süreci izlemede çok büyük önemi vardır. Sıcaklık, basınç, gerilme gibi ölçümlerin yerinde ve doğru yapılması problemleri önceden saptayarak bakım programlarına yardımcı olur. Böylece işlevsel ömrü artırmak, bakım maliyetlerini azaltmak, güvenilir ve etkili bir ilerleyiş sağlamak için uygun bir faaliyet benimsenebilir. Sıcaklık, basınç, gerilme sensörleri hava taşıtları, yüksek binalar, nükleer kazanlar, türbin bıçakları, tüneller, asansörler, köprüler, petrol ve doğalgaz boru hatları, deprem takibi gibi çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılabilirler.

Çok çeşitli sıcaklık, basınç ve gerilme ölçüm teknikleri geliştirilmiştir. Pratikte ise bu sensörlerin bir çoğu yüksek doğruluk, güvenilirlik ve en önemlisi ucuzlukları dolayı ise elektriksel tabanlıdır. Elektriksel tabanlı sensörlerden oluşan kontrol sistem tipleri geleneksel olarak nokta ölçümü sistemine dayalıdır; yani özel olarak alınan noktadaki tek değerleri ölçen bağımsız sensör ve ölçme aletlerinden toplanan verilerle çalışırlar. Her sensörün kendine tahsisli elektriksel bağlantıya ve sorgulayıcı cihazına ihtiyacı vardır. Bu da birçok uygulamada izlemenin hızını, doğruluğunu ve çözünürlüğünü kısıtlar. Birçok yapısal ve süreçsel kontrol uygulamasında sıklıkla sıcaklık ve gerilme gibi ölçümlerin aynı anda bir çok noktadan izlenmesi tercih edilir, hatta bazı durumlarda bu mecburidir. Bu gibi durumlar için geleneksel elektriksel sıcaklık, basınç veya gerilme sensörleri kullanıldığı zaman, sensör ağları çok kompleksleşir, kurulması ve bakımı zorlaşır ve pahalılaşır. Bu tezde bu gibi artan ihtiyaçları karşılayabilecek yüksek çözünürlüklü, düşük maliyetli, kolay üretilen, sağlam ve hatta ağır çevre şartları veya yayılmış bünyeli yapılarda işlevsel yarı-dağıtılmış fiber optik gerilme ve sıcaklık algılama sistemleri ile bu sistem için en uygun tekniklerden biri olan Fiber Bragg Izgara(FBG) metodu tanıtılmıştır.

Optik fiber sensörler elektromanyetik bozulmaya karşı içsel bağışıklıkları yüksek duyarlılıkları, yüksek doğrulukları, küçük boyutları, uzaktan çalışabilme kapasiteleri

ve zor koşullardaki süreklilikleri sayesinde altyapısal izleme için birçok araştırmanın ilgisini çekmiştir. Optik fiber sensörler geniş çeşitlilikteki fiziksel, kimyasal ve biyolojik parametrelerin algılanmasında başarılı olmuştur. Yer değişim, rotasyon, sıcaklık, gerilme, akış, manyetik alan vs. gibi birçok fiziksel parametre optik fiberlerle algılanabilir. Sıcaklık ve gerilme endüstriyel süreç izleme ve sivil yapıların yapısal sağlıklarının izlenmesi gibi yarı-dağıtılmış ve tam dağıtılmış uygulamalarda en çok talep edilen parametreler arasındadır.

Optik fiber sensörler ölçülenin tek fiberin herhangi bir noktasında kesin bir uzamsal çözünürlükte ölçüldüğü (sıcaklık ve gerilme için) tam dağıtılmış bir algılama modu olarak tasarlanabilir. Bu optik fiber sensörlerin eşsiz ve güçlü bir karakter özelliğidir. Yaygın dağıtılmış algılama teknolojileri, ilgilenilen parametreyi yoğunluk (ışık) veya seçilen ışığın frekansının ölçümüyle hesaplayan Rayleigh, Raman ve Brillouin saçılımını kullanır. Bu tür uygulamalarda ölçülenin konumu genellikle ışık darbelerinin ilerleme zamanı yardımıyla, uzamsal çözünürlük de ışık darbelerinin genişliği ile hesap edilir. Bu ölçüm sistemlerinin ışaret/gürültü oranı (SNR) genellikle saçılan ışığın zayıf dalga gücü ve ışık darbelerinin dar genişliği nedeniyle sınırlıdır. Bu yüzden, saçılan sinyalin nispeten uzun bir fiber parçası ve uzun bir zaman periyodu üzerinde sorgulaması makul bir ölçüm doğruluğu sağlamak için gereklidir.

Birçok uygulama için optik fiber sensörler ilgilenilen parametrenin özel bir noktadan ölçümü olan nokta ölçüm modunda tasarlanabilir. Optik fiber sensörler geleneksel sensörlerle aynı modda çalışırken de daha iyi bir performans gösterirler fakat fiber sensör teknolojisi küçük pazar üretimi ve karışık ölçüm sistemi nedeniyle genelde çok pahalıdır. Ayrıca optik fiber iletim ortamının yüksek band genişliği gibi önemli karakter avantajları tek nokta sensörlerce çok nadiren ihtiyaç duyulan bir özelliktir. Fakat çok sayıda noktadan ölçüm alınacağı zaman birçok fiber ortak sensör başlığına ve terminal cihazlarına bağlanabilir. Böylece bir fiber ve fiber çiftleri üzerinde çoğullanmış bir dizi algılama elemanı maliyet kazancı fırsatı verir. Optik fiber sensörlerin etkili bir biçimde çoğullanabilmesi kabiliyetleri fiber sensör teknolojisine diğer teknolojilere göre önemli bir avantaj sunar ve ölçüm sisteminin ortalama maliyetini düşürür. Bu yüzden araştırmacılar ölçüm noktası başına maliyeti

düşürebilmek için mümkün olduğunca çok sensörü çoğullamaya çalışmaktadır. York DTS-800 durumundaki gibi (1996'da yayınlanan) tek bir fiber üzerinden eş zamanlı olarak 10000 nokta ölçülür [1].

Birçok uygulamada ölçülenin uzamsal çözünürlüğünü sağlamak önemlidir. Örneğin, enerji (elektrik) üretim endüstrisinde güç jeneratörü bobininin sıcaklığı takip edilmelidir. Soğutma borusunun işlevsel bozukluğunun sebep olduğu tek bir jeneratör kaybının maliyeti 3 milyon \$'ın üzerindedir [2]. Enerji iletim endüstrisinde, yüksek-voltaj iletim hatlarının gerçek zamanlı izlenmesi için dağıtılmış sıcaklık sensörü kullanılması ile oluşan ekstra azami yük taşıyabilme kapasitesinin önemli bir yarar olduğu belirtilir. 100MW'ın 230kV'da 10 mil boyunca ekstra kapasitesinin değerinin yılda 3,5 milyon \$ olduğu hesap edilmiştir. Dağıtılmış sıcaklık sensörleri ayrıca bir binanın yangın alarm sistemi olarak oluşturulabilir. Dağıtılmış gerilme sensörleri de köprüler, binalar barajlar gibi sivil yapıların yapısal sağlık takibi için kullanılabilirler. Dağıtılmış basınç sensörleri de derin petrol kuyularında uygulama alanı bulur.

Farklı noktadaki ölçülenlerin eş zamanlı izlenmesi için ortak bir sorgulama sisteminin kullanıldığı çoğullanmış bir sensör sistemi genelde yarı-dağıtılmış algılama sistemi olarak adlandırılır. Birçok farklı fiber optik sensör çoğullama teknolojisi tasarlanmış ve sunulmuştur. Bunların önemlileri Zaman Bölmeli Çoğullama (TDM), Frekans-Bölmeli Çoğullama (FDM), Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama (WDM), Uyumluluk Çoğullama (CM), Kod Bölmeli Çoğullama (CDM) ve Uzay-Bölmeli Çoğullama (SDM)'dir

Teorik olarak birçok sensör çeşidi yoğunluk modülasyonlu, faz veya dalgaboyu modülasyonlu olup olmadığına bakılmaksızın yukarıdaki çoğullama şemalarından biri ile çoğullanabilir. Fakat, çoklu sensörlerin tek bir fiber üzerinde dizildiği yarı-dağıtılmış sıcaklık ve gerilme algılama için düşük ekleme ve dönüş kayıplı, sıralı sensör tipleri tercih edilir. Bu konudaki en yaygın örnekler sıralı Fabry-Perot interferometrik sensör ve Fiber Bragg Izgara sensör sistemleridir.

Bir sensöre kısmi aynalar eklenmesi ile inşa edilen sıralı Fabry-Perot interferometrik sensörlerin birçok çeşidi mevcuttur. Bunlar kısmi aynalar dielektrik ince filmler, hava-cam arayüzleri veya UV ışınlamalı uyarılan yansıtıcılar olabilir. İnce film aynalı ve hava-cam aynalı Fabry-Perot interferometrik sensörler genelde yüksek dönüş kaybı ve yüksek ekleme kaybına sahiptir ve çoğullama kapasiteleri de genelde küçük bir sayı ile sınırlıdır. UV uyarımlı içsel aynalı Fabry-Perot interferometrik sensörler ise düşük yansıma ve düşük güç kaybına sahiptir ve potansiyel olarak sıklıkla çoğullanabilir. Fakat UV-uyarımlı aynaların düşük yansıması nedeni ile optik algılama ve sinyal işleme, UV-uyarımlı Fabry-Perot interferometrik sensör çoğullaması için yorucu bir külfete sahiptir.

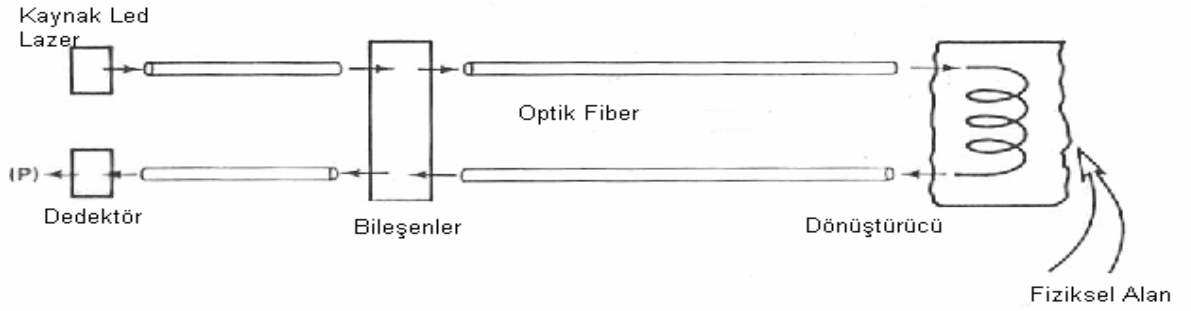
Foto duyarlı bir fiberin içinde UV ışınlama ile periyodik kırıcı indeks değişimi yaratılmasıyla üretilen Fiber Bragg Izgaralı sensörler düşük ekleme kayıplı ve sıklıkla çoğullanma potansiyeline sahip dar-band yansıtıcılarıdır. Fiber Bragg Izgaralı sensörler için en uygun çoğullama şeması Fiber Bragg Izgaralı sensörlerin farklı Bragg dalga boyuna sahip olduğu Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama (WDM) tabanlı entegrasyondur.

2. FİBER OPTİK SENSÖRLER

On yıldan fazla bir süredir optik fiber sensörler gerilme, sıcaklık, basınç ve diğer fiziksel, kimyasal ve biyolojik parametrelerin algılanmasında dikkate değer bir ilgi çekmektedir. Geleneksel elektrik sensörlerle karşılaştırıldığında, optik fiber sensörler eşsiz sensör materyalleri, algılama prensipleri ve sinyal işleme özellikleri dolayısıyla kendine özgü avantajlar sunar[3]. Bu avantajlardan bazıları şunlardır:

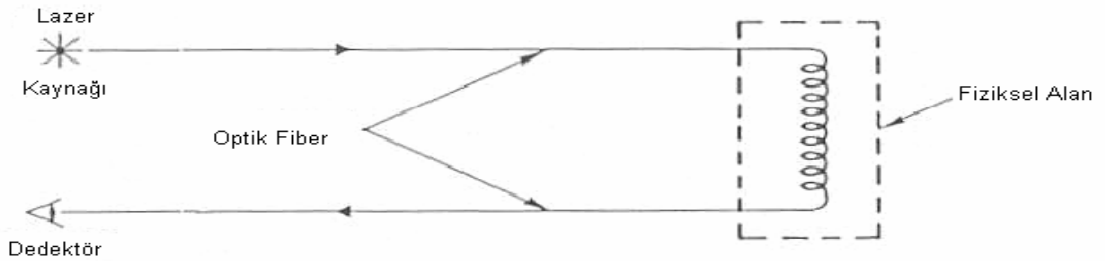
1. Algılanan sinyal elektromanyetik girişime (EMI) ve radyo frekans girişimine (RFI) karşı bağışıklık sahibidir.
2. Ateş yada kıvılcım riskine sahip olmadığından patlayıcı çevrelerde doğasından gelen bir emniyete sahiptir.
3. Düşük ağırlıklı ve hacimlidir. Örneğin, 200µm silika fiberin bir kilometresinin ağırlığı 70gr.'dır. Hacmi ise sadece 30 cm² civarındadır.
4. Çoğu geleneksel sensörden daha hassastır, band genişliği daha fazladır ve dinamik aralığı daha yüksektir.
5. Yüksek sıcaklık ve yüksek basınç gibi elektriksel sensörlerin çalışamayacağı zor çevre şartlarına dayanıklıdır.
6. Fiberin düşük kayıpları sayesinde uzak mesafeli operasyon olanaklıdır.
7. Potansiyel olarak birçok fiberin tek bir optik fiber kablo üzerinde çoğullanabilmesi kapasitesine sahiptir.

Basit bir optik fiber algılama sisteminin temel elemanları Şekil 2.1'de gösterilmiştir [4]. Bu optik fiber sistemi çok basit olarak bir ışık kaynağı, algılayıcı eleman veya dönüştürücü olarak bir optik fiber ve bir dedektörden oluşur. Optik fiber sensörün çalışma prensibi ise dönüştürücünün dedektörde alınan optik sinyalin karakteristiğinde değişime neden olan bazı optik sistem parametrelerini (yoğunluk, dalgaboyu, faz ve polarizasyon gibi) modüle etmesi şeklindedir.

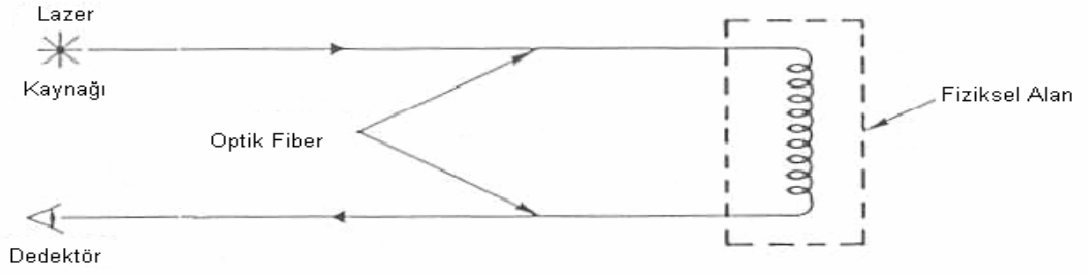


Şekil 2.1: Optik Fiber Algılama Sisteminin Temel Elemanları

Fiber optik sensörler, modülasyonun direk olarak fiberin içinde olduğu içte etkileşimli şekilde de olabilir; modülasyonun bazı dışsal dönüştürücüler tarafından yapıldığı dışta etkileşimli şekilde de olabilir. Şekil 2.2’de direk (içte etkileşimli) sensör sisteminin temel yapısı görülmektedir. Şekil 2.3’de ise endirek (dışta etkileşimli) sensör sisteminin temel yapısı görülmektedir.



Şekil 2.2: Fiberin kendisinin dönüştürücü olduğu direk (içte etkileşimli) sensör sistemi



Şekil 2.3: Dönüştürücünün fibere göre davrandığı endirek (dışta etkileşimli) sensör sistemi

Fiber optik sensörler birçok avantaja sahip olmalarına rağmen karmaşık üretim sistemleri ve pahalı sinyal işleme birimleri gerektirmelerinden dolayı uygulama alanlarını sınırlayan önemli dezavantajlarına da sahiptir. Çoğu ticari açıdan başarılı fiber optik sensör, mevcut sensörlerin çalışmadığı zor çevrelerdeki veya çoğu durumda var olmadığı şartlardaki uygulamaları hedeflemişlerdir. Neyse ki, çoğullama kapasitelerinin getirdiği önemli fırsatlar yüksek fiyat dezavantajlarını gidermektedir. Çoğullama ile birçok fiber farklı noktalardan ölçüm yapmak üzere tek bir fiber üzerinde düzenlenebilir ve bir tek sinyal entegrasyon ünitesine entegre edilebilir. Entegrasyon ünitesinin paylaşılması ile ölçüm noktası başına maliyet önemli ölçüde düşer. Ne kadar çok sensör çoğullanırsa maliyet de o kadar çok düşer. Böylece çoğullanmış sensör sayının genişletilmesi ile fiber optik sensör ağının maliyeti çoğullanamayan geleneksel sensör ağına karşı makul, hatta daha düşük bir seviyeye indirilebilir. Algılama noktası başına maliyetin düşürülmesinin dışında, fiber optik sensörlerin çoğullanması yapısal sağlık takibi ve süreç yönetiminde sıcaklık ve gerilme gibi parametrelerin uzamsal dağılımının ölçülmesindeki artan talep içinde mükemmel bir çözüm sağlar.

2.1. Fiber Optik Sensörlerin Sınıflandırılması

Spesifik olarak optik fiber sensörler değişim tipine ve çalışma prensibine göre sınıflandırılabilir. Bu yüzden kimyasal konsantrasyon, elektrik alan, gerilme, sıcaklık,

basınç veya diğer fiziksel bileşenler cinsinden tanımlanabilir. Çalışma prensibi yoğunluk, faz, polarizasyon ve dalga boyundaki değişimlere dayanır.

Bir sensördeki ışığın elektriksel alanı şu şekilde ifade edilebilir;

$$\vec{E} = \vec{e} A e^{(j\omega t + \phi)} \quad (2.1)$$

Bu denklemde A genlik, ω açısal frekansı, ϕ fazı ve \vec{e} de polarizasyon durumunu temsil eden birim vektördür. Işık yoğunluğu $|A|^2$ ile orantılıdır. Işığın dalgaboyu $\lambda = 2\pi c / \omega$ şeklindedir. Bu denklemdeki c ışığın boşluktaki hızını temsil etmektedir. Yoğunluk, dalgaboyu, faz ve polarizasyon durumu ışık alanının dört temel elemanıdır.

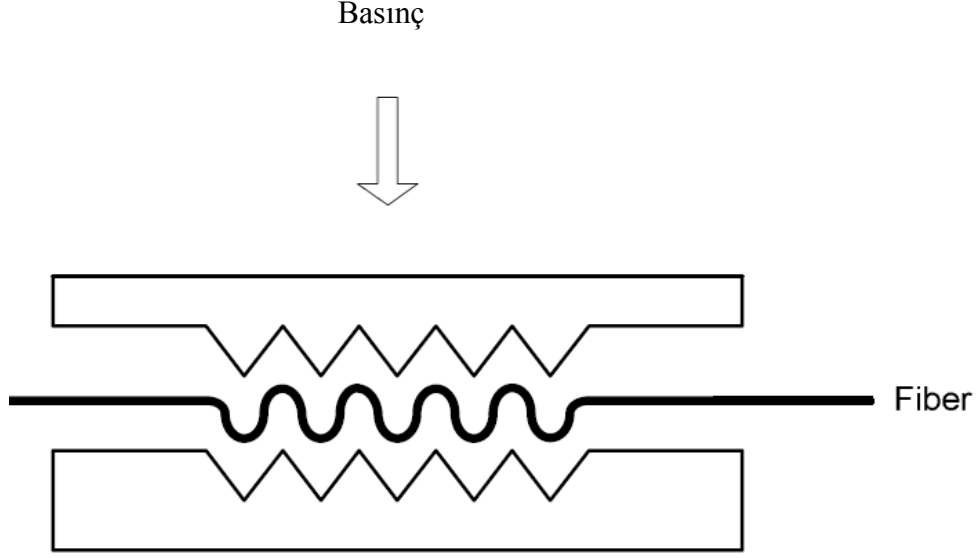
Ölçülenin herhangi bir değişimi bu temel elemanların bir yada bir kaçını değiştirir. Buna paralel olarak optik fiber sensörler de yoğunluk modülasyonlu, faz modülasyonlu, dalgaboyu modülasyonlu ve polarizasyon modülasyonlu olmak üzere 4 temel kategoride sınıflandırılabilir. Literatürde bazıları polarizasyon modülasyonlu sensörleri, birçok sistemin polarizasyon durumu değişimini tespit etmekte interferometrik teknikleri kullanmasından dolayı faz modülasyonlu kategoride değerlendirdiği de görülmüştür.

2.1.1 Yoğunluk modülasyonlu sensörler

Yoğunluk modülasyonlu sensörler çevresel değişimlerle alakalı olarak ışık yoğunluğundaki değişimleri tespit eden sensörlerdir. Çevresel değişimler sensör tarafından iletilen yada yansıtılan ışığın yoğunluğunda bir değişime yol açar. Ölçülen büyüklük alınan ışık yoğunluğu yardımıyla hesap edilebilir.

Literatürde yoğunluk modülasyonlu sensörlerin birçok çeşidi sunulmuştur [5]. Bunlardan bir tanesi de mikro-bükümlü fiber sensördür [6,7]. Şekil 2.4'de tipik bir mikrobükme basınç sensörü gösterilmiştir. Dışarıdan bir basınç uygulandığında fiber bükülür ve böylece fiber dışına olan ışık sızıntısının yol açtığı büküm kaybı

nedeniyle iletilen ışığın yoğunluğu azalır. Alınan ışığın yoğunluğu, dış kuvvet yada basıncın neden olduğu yerdeğiştirme ile ilgili olarak değişir.



Şekil 2.4: Mikrobükme Basınç Sensörünün Yapısı

Mikrobükme fiber sensörleri gerilme, basınç vs. uygulamalarının dağınık algılaması için de sunulmuştur. Bir mikrobükme sensörün yapısı ve çalışma prensibi basittir ve çoğullaması da kolaydır. Fakat yoğunluk tabanlı sensörlerin performansı, ışık kaynağının yoğunluğunun sapmaları, fiberin büküm kayıpları ve optik bağlayıcılardaki güç kayıpları nedeni ile sınırlıdır. Mikrobükme fiber sensörlerin uzun zamanlı kararlılığı zayıftır. Dolayısıyla, Mikrobükme sensörlerin pratik uygulamaları sınırlıdır.

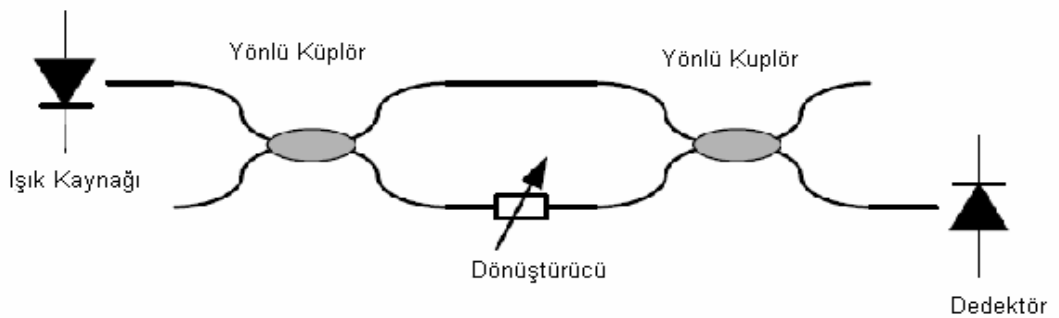
2.1.2. Faz modülasyonlu sensörler

Faz modülasyonlu optik fiber sensörler genellikle interferometrelerle ilgilidir. Çünkü ışık dalgasının optik fazı veya iki ışık dalgası arasındaki faz farkı genelde interferometrik teknikler vasıtasıyla tespit edilir. Bu teknikler de eşvreli (koherent) ışık kaynakları kullanır ve ilgilenilen çevresel parametrenin neden olduğu faz kaymasını kesin bir şekilde tespit eder. Dört temel interferometrik optik fiber sensör vardır. Bunlar Michelson, Mach-Zehnder, Fabry-Perot, ve Sagnac olarak isimlendirilir[5].

2.1.2.1. Mach-Zehnder interferometresi

Mach-Zehnder İnterferometresi iletim modunda çalışan iki-ışınlı bir interferometredir. Optik sensör ve optik modülatör, optik filtre vs. gibi optik bileşenler olarak kullanılmaktadır [8]. Tipik bir optik fiber Mach-Zehnder İnterferometre sensör sistemi Şekil 2.5’de gösterilmiştir. Işık kaynağından ışık fibere fırlatılır ve yönlü kuplör vasıtasıyla ikiye bölünür. Bir kolun fazı ölçülecek çevresel parametre tarafından module edilir. Daha sonra iki koldaki ışık başka bir yönlü kuplör ile birleştirilir ve birbiriyle giriştirilir. İki kol arasındaki faz Mach-Zehnder İnterferometresinden elde edilen girişim sinyalinin ölçümüyle tespit edilir.

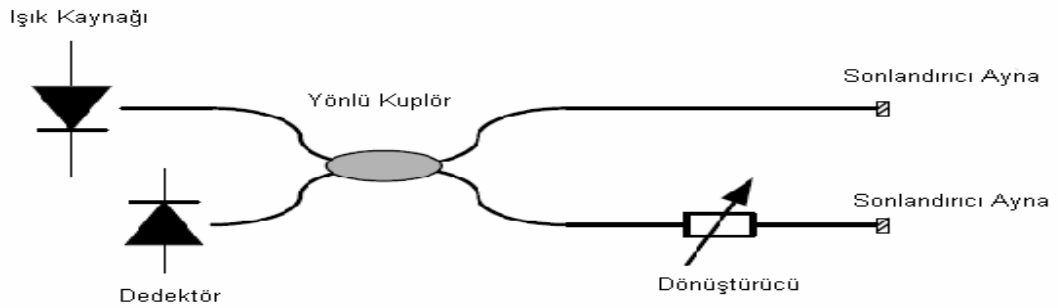
Çoklu bir optik fiber Mach-Zehnder İnterferometresi kademeli bir sensör dizisinde, merdiven tipi ağlarda ve diğer topolojilerde çoğullanabilir. Fakat fiber tabanlı bir Mach-Zehnder İnterferometresi kullanıldığında, görece uzun fiber kolları sıcaklık değişimlerinin yol açtığı kararlılık problemlerine ve polarizasyon durumunun rastgele değişmesine ile alınan ışığın yoğunluğunda dalgalanmalara sebep olan optik fiberin çift kırılmasından dolayı oluşan polarizasyon-sönümü problemine neden olur. Ayrıca Mach-Zehnder sensörler sistem kompleksliğini ve toplam maliyeti artıran bir dizi bölücü ve birleştiriciye gerek duyar.



Şekil 2.5: Bir optik fiber Mach-Zehnder İnterferometrik sensör sistemi

2.1.2.2 Michelson interferometresi

Tipik bir optik fiber Michelson İnterferometrik sensör sistemi Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Işık kaynağından ışık fibere fırlatılır ve yönlü kuplör vasıtasıyla ikiye bölünür. Bu iki ışık ışını farklı kollarda ilerler ve ışık ışınlarından bir tanesinin fazı ölçülecek çevresel parametre tarafından modüle edilirken her iki ışınında sonlandırıcı aynalar vasıtasıyla geri yansıtılması sağlanır. Bu her iki yansıyan ışın da aynı yönlü kuplör ile birleştirilerek birbirine girişimi sağlanır. Yansıyan ışınlar arasındaki faz farkı girişim sinyalinin ölçümü ile tespit edilir.



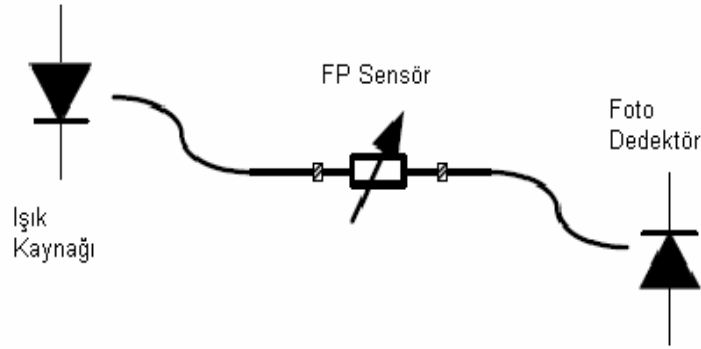
Şekil 2.6: Tipik bir optik fiber Michelson İnterferometrik sensör sistemi

Bir Michelson İnterferometresi yansıma modunda çalışan iki ışınlı interferometredir. Optik fiber Mach-Zehnder İnterferometresi gibi optik fiber Michelson İnterferometresi de sıcaklık değişimlerinin yol açtığı faz değişimlerinin neden olduğu kararlılık sorunlarına ve optik fiberin çift kırılmasından dolayı oluşan polarizyon-sönümü problemlerinden etkilenmektedir.

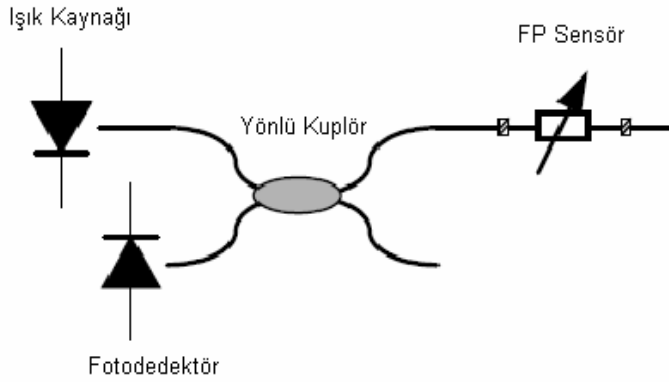
2.1.2.3 Fabry-Perot interferometresi

Bir Fabry-Perot (FP) İnterferometresi bir çift kısmi ayna içerir. Çok yollu yansıyan sinyaller FP oyuğunda birbiri ile girişir. FP sensörler Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'de de görüldüğü gibi hem iletim hem de yansıma modunda çalışabilir. Aynalardaki

yansımalar yüksek olduğu zaman, Fabry-Perot (FP) İnterferometresi genellikle Şekil 2.7'de gösterildiği gibi FP kovuk fonksiyonlarının optik bir filtre gibi çalıştığı iletim modunda olur. Aynalardaki yansımalar düşük olduğu zaman, Fabry-Perot (FP) İnterferometresi genellikle Şekil 2.8'de gösterildiği gibi Fabry-Perot (FP) İnterferometresinin bütün çok yollu yansımaların ihmal edildiği iki ışınlı bir interferometre olarak dikkate alınacağı yansıma modunda çalışır.

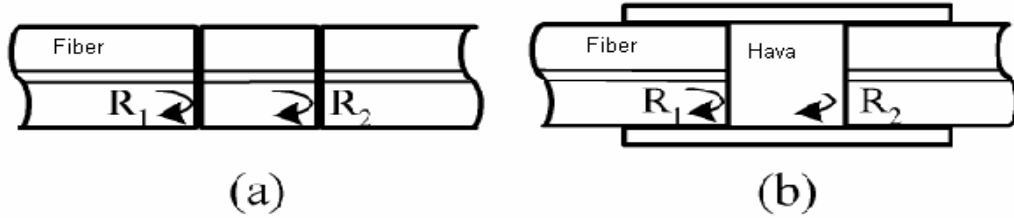


Şekil 2.7: İletim modunda Fabry-Perot (FP) sensör



Şekil 2.8: Yansıma modunda Fabry-Perot (FP) sensör

Fabry-Perot (FP) İnterferometrik sensör içte etkileşimli (intrinsic) Fabry-Perot interferometresi (IFPI) ve dışta etkileşimli (extrinsic) Fabry-Perot interferometresi (EFPI) olmak üzere iki temel kategoriye ayrılır. Bir IFPI iki dahili kısmi yansıtıcı aynalar içerir. Yansıtıcılar arası fiber hem algılama elemanı hem de ışık dalga kılavuzu olarak çalışır. Tipik bir IFPI Şekil 2.9(a)'da gösterilmiştir. Bir EFPI sensör, giriş kısmında sonu kısmi aynalı fiber, sonrasında hava veya diğer bir saydam ortamdan meydana gelen bir kovuk ve en sonunda bir fiber parçasından da oluşabilecek bir yansıtıcıdan oluşur. Tipik bir EFPI Şekil 2.9(b)'de gösterilmiştir. IFPI sensörler genellikle EFPI sensörlerden daha düşük güç kaybına sahiptir ve sık çoğullama uygulamalarında daha çok tercih edilir.



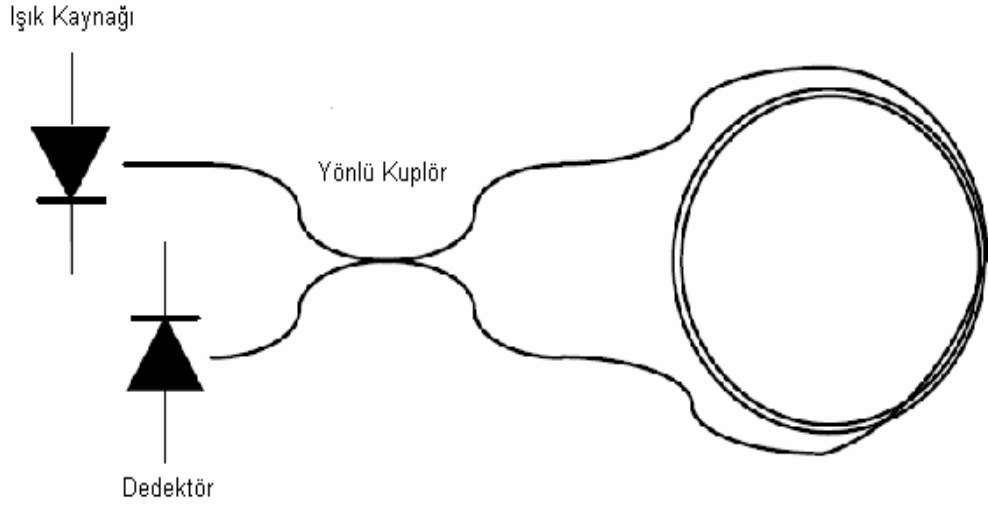
Şekil 2.9: Fabry-Perot (FP) İnterferometrik sensör a) IFPI sensör b) EFPI sensör

Fabry-Perot (FP) sensörler çoğullanmış sensör ağları için diğer fiber sensörlere göre bazı avantajlara sahiptir. Fabry-Perot (FP) sensörlerin en önemli karakter avantajı sıralı sensör olarak tasarlanabilmeleri ve yarı-dağılmış sıcaklık ve gerilme uygulamaları için tek bir fiber boyunca çoğullanabilmeleridir. Birçok optik bölücü ve birleştiriciye ihtiyaç duyan Mach-Zehnder ve Michelson İnterferometrelerinin çoğullamasının tersine FP sensörlerin çoğullaması görece daha kolaydır.

2.1.2.4 Sagnac interferometresi

Tipik bir optik fiber Sagnac İnterferometrik sensör sistemi Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Işık kaynağından ışık iki ışına ayrılır ve fiber çemberine gönderilir. Saat yönünde ve tersine ilerleyen ışınlar kuplörde birleştirilir ve iki ışınlı bir

interferometre oluşturulur. Bu konfigrasyon rotasyonun iletim zamanının dengesizliğine ve böylece iki ışın arasında faz farkına yol açtığı rotasyon ölçümlerinde kesin bir ölçüm sağlayan jiroskoplar olarak kullanılırlar.



Şekil 2.10: Tipik bir Sagnac interferometrik jireskop

2.1.3 Dalgaboyu modülasyonlu sensörler

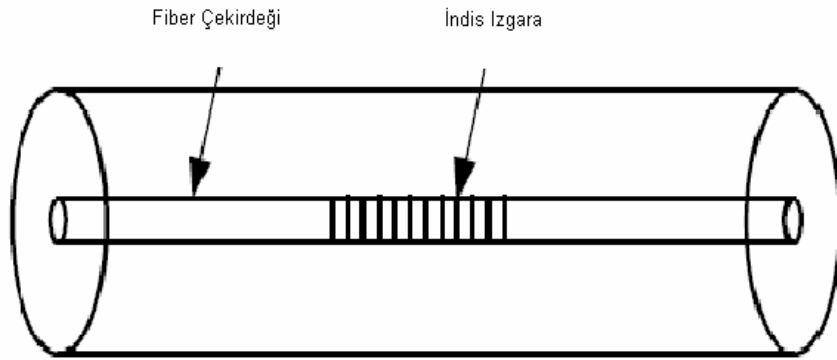
Dalgaboyu modülasyonlu optik fiber sensörler ışık iletilirken, yansıtılırken veya yayılırken ışığın spektrumunu değiştirirler. Bu sensor örneklerinden bazıları kara cisim ışıması, floresan, fosforesans ve fiber Bragg Izgara sensörleridir [5].

Yansıma ve iletim spektrumları sıcaklık ve gerilmeye bağlı olan FBG sensörler tam anlamıyla dalgaboyu modülasyonlu sensörlerdir. Bir FBG 'nin diyagramı Şekil 2.11'de gösterilmiştir. Periyodik kırıcı indeks değişimli bir Bragg ızgarası UV-ışınlaması ile gösterilebilir. Noktasal, interferometrik ve faz maske tabanlı yazma metotlarını da içeren bir çok farklı teknik ile FBG imal edilebilir. FBG bir dar band yansıtıcıdır. Bir FBG'nin karakteristik yansıtma spektrumu Şekil 2.12'de gösterilmiştir.

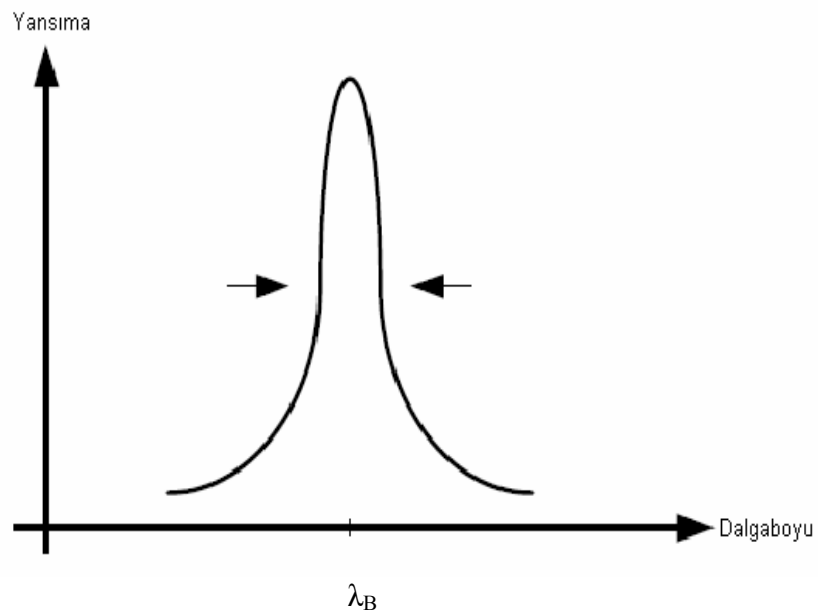
Bragg dalgaboyu olarak bilinen bir FBG'nin yansımaya spektrumundaki merkez dalgaboyu şöyle ifade edilir.

$$\lambda_B = 2n_e \Lambda \quad (2.2)$$

Bu denklemde n_e fiberin etkin kırılımını, Λ ızgara periyodunu sembolize eder. $1.5\mu\text{m}$ Bragg dalgaboyu için, Λ $0.5\mu\text{m}$ olarak seçilir.



Şekil 2.11: Fiber Bragg Izgara yapısı



Şekil 2.12: Fiber Bragg Izgara yansımaya Spektrumu

FBG'ler sıcaklık ve gerilme algılamada kullanılabilir. FBG'nin merkez dalgaboyu, çevresel sıcaklık ve gerilme parametrelerine bağlı olarak oluşan kırıcı indis ve periyodik ızgaralar arası uzaklık değişimlerinden etkilenir. Bu yüzden, FBG sensörlerde sıcaklık ve gerilme değişimleri Bragg dalgaboyu kaymasının takip edilmesi ile hesaplanır.

Sıcaklık değişimi ΔT 'den dolayı oluşan λ_B kayması şu şekilde ifade edilir:

$$\Delta\lambda_B = 2\left(\Lambda \frac{\partial\eta_e}{\partial T} + \eta_e \frac{\partial\Lambda}{\partial T}\right)\Delta T = \lambda_B(\alpha + \sigma)\Delta T \quad (2.3)$$

Bu denklemde $\alpha = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial T}$ ısı genleşme katsayısı ve $\sigma = \frac{1}{\eta_e} \frac{\partial\eta_e}{\partial T}$ de fiberin termo-

optik katsayısıdır.

Gerilme ε_z değişiminin neden olduğu λ_B kayması da şu şekilde ifade edilir:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\varepsilon_z \quad (2.4)$$

Bu denklemde ε_z aksel gerilme ve p_e de etkin gerilme-optik sabittir. Tipik bir optik fiber için $p_e=0.22$ 'dir.

FBG sensörlerin düşük güç kaybı, yüksek duyarlılık ve geniş ölçekli çoğullama kapasiteleri gibi birçok avantajları vardır. FBG sensörlerden meydana gelen yarı-dağılmış sıcaklık ve gerilme algılama sistemleri farklı çoğullama şemaları ile oluşturulabilir. Çoklu FBG sensörler genellikle seri diziler halinde düzenlenir. En yaygın çoğullama şemaları TDM, WDM, FDM ve bunların kombinasyonlarıdır.

Bir TDM şemasında, FBG sensörlerin yerleri yansıyan sinyalin zaman gecikmesine göre hesap edilir. Her bir sensörden yansıyan ışın interferometrik sistem, dalgaboyu filtreleri taraması ve sınır filtrelerini içeren dalgaboyu ölçüm teknikleri çeşitleri ile ölçülür. Bir TDM şemasındaki FBG sensörler farklı merkez dalgaboyları veya düşük

yansıtıcılıkla aynı merkez dalgaboyu durumlarından her ikisinden biri olabilir. Sensörler arası girişim ve diyafoni TDM sensör dizisi için önemli sorunları neden olmaktadır.

Bir WDM şemasında FBG sensörler farklı dalgaboylarında imal edilir. Bir genişband ışık kaynağı ile ışıklandırıldığında, farklı FBG'ler ışığı farklı dalgaboylarında yansıtacaktır. Bağımsız sensörlerden ışığı seçmek için ayarlanabilir optik filtreler ve zaman domenindeki dalgaboyu değişikliğini tespit etmek için frekans ayırıcı veya spektral domende dalgaboyunu tespit etmek için optik spektrometre'den her ikisi de kullanılabilir. Her bir FBG dalgaboyu için belirli bir band genişliği kaplar. Uygun dalgaboyu aralığından dolayı FBG'lerin WDM şemasının çoğullama kapasitesi sınırlıdır.

2.1.4 Polarizasyon modülasyonlu sensörler

Polarizasyon modülasyonlu optik fiber sensörler elektrik alan, manyetik alan vs. gibi dış çevresel değişimlerden dolayı ışığın polarizasyon durumunun değiştiği sensörlerdir. Polarizasyon modülasyonlu sensörlerin bir örneği polarizasyon düzlemini döndüren magneto-optik Faraday etkisi tabanlı optik akım sensörüdür. Birkaç sarımlı bir optik fiber bobini akım ve voltaj algılama elemanı olarak kullanılabilir. Kütle-cam, itriyum demir grena vs. gibi büyük magneto-optik sabitli diğer bazı materyaller de akım sensörü olarak kullanılır. Polarizasyon tesirli sensörlerin bir diğer tipi de kristalimsi materyallerin anizotropik özellikleri ile ilgilir. Kristallerde dikey polarizasyonla ilerleyen ışığın farklı yayılım hızları vardır ve bu da polarizasyon durumlarını değiştirir. Çevresel etkilerin ışığın polarizasyon durumunu ve kristalin kırıcı indisini değiştirdiği termal-optik ve Kerr etkileri temelli optik sıcaklık ve elektriksel alan sensörleri bildirilmiştir.

Polarizasyon modülasyonlu sensörler ortogonal polarizasyonlar arası optik faz farkını tespit etmek için genellikle faz modülasyonlu sensörlerin interferometrik tekniğine benzer polimetrik teknik kullanırlar.

Polarizasyon modülasyonlu sensörlerin çoğullamasına polarizör, dalga düzlemi ve diğer optik bileşenleri gerektiren polimetrik tespit kompleksliği nedeniyle sık rastlanmaz.

3. FİBER OPTİK SENSÖRLER İÇİN ÇOĞULLAMA ŞEMALARI

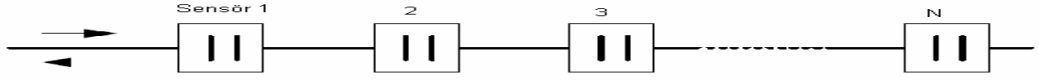
Zaman, frekans, dalga boyu, koherans, polarizasyon ve uzay bölmeli çoğullama şemalarını da içeren birçok çoğullama şeması optik fiber sensörler için de önerilmiştir. Farklı sensörler için uygun olan birçok farklı çoğullama topolojisi ve çoğullama konfigürasyonu vardır. Bu kısımda TDM, FDM, WDM'yi içeren çoğullama konfigürasyonları ve seri, yıldız ve merdiven gibi çoğullama topolojileri incelenecektir[9].

3.1. Topoloji

Topoloji çoklu sensörlerin bir sensor dizisinde nasıl dizileceğini belirleyen bir metot anlamına gelir. Seri, yıldız, merdiven, ağaç, matris ve bunların kombinasyonlarını içeren çeşitli topolojiler vardır. Sensörden yansıyan ve iletilen ışık tespit edilebilir. Bu sayede sensor ağları iletim ve yansıma modunun her ikisinde de çalışabilir.

3.1.1. Seri topoloji

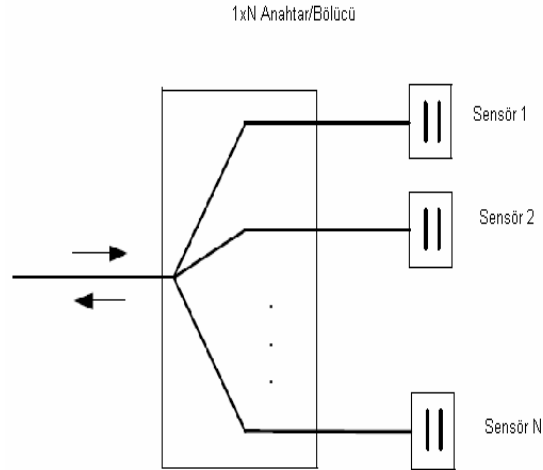
Seri Topolojide çoklu sensörler bir seri devredeki elektrik bileşenler olarak seri biçimde dizilirler. Seri Topolojinin en önemli avantajı tek bir fiber boyunca, Fabry-Perot ve FBG sensörler gibi, çoklu sıralı fiber sensörler olarak dizilebilmeleridir. Bu da yarı-dağıtılmış algılamanın yerleştirilmesini kolaylaştırır. Şekil 3.1'de Seri Topoloji ile tipik bir sensör dizisi görülmektedir. Çoğullanacak sensörler sık çoğullama için düşük yansıtıcılık ve güç kaybına ihtiyaç duyar. Seri Topolojinin zorlukları şunlardır: sensörler arası girişim ve diyafoni sensör sisteminin performansını sınırlayabilir ve herhangi bozuk bir sensör tüm sistemin sinyal akışını kesebilir. Mikro bükme, Mach-Zehnder, Fabry-Perot, FBG vs. gibi birçok sensör seri topolojide çoğullanabilir.



Şekil-3.1: Seri topolojili bir sensör dizisi

3.1.2. Yıldız topoloji

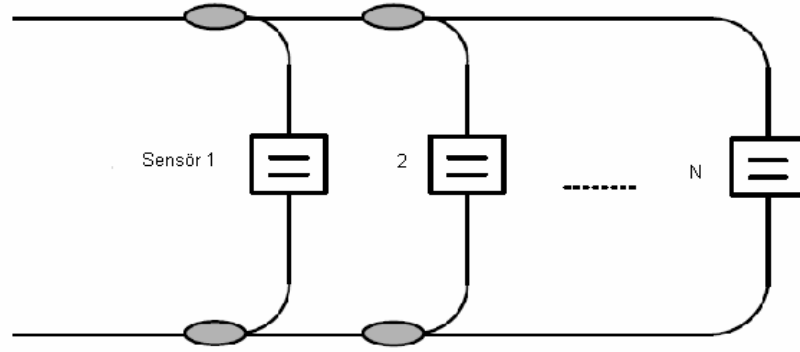
Yıldız Topolojide çoklu sensörler bağımsız olarak merkezi bir ortak noktaya bağlanır. Şekil 3.2’de Yıldız Topoloji ile tipik bir sensör ağı görülmektedir. Merkez birimde 1xN optik anahtar veya optik ayırıcı kullanılmıştır. Yıldız sistemin en büyük avantajı güvenliği artan ve daha az diyofoni sağlayan sensörler arası bağımsızlıktır. Fakat, çok büyük sayı da sensörlerin yerleştirilmesi için optik gücün bölünmesi ve çoklu fiberlerin yapılara montesi gibi sorunlar nedeniyle zorluklarla karşılaşmaktadır.



Şekil 3.2: Yıldız topolojili bir sensör dizisi

3.1.3. Merdiven topoloji

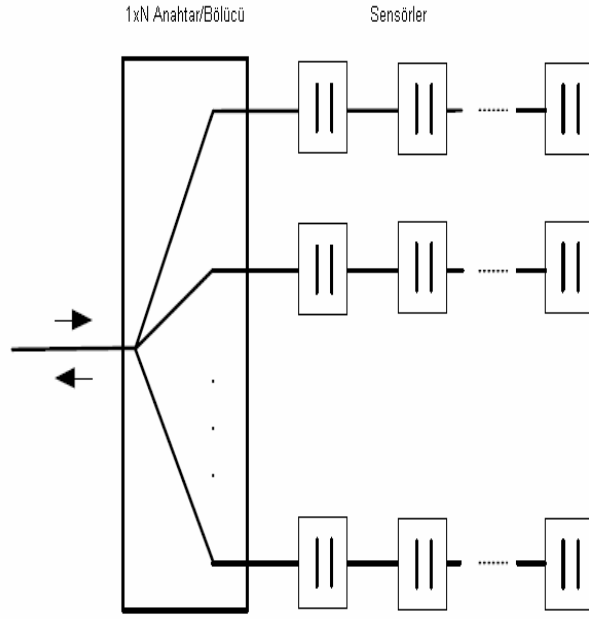
Merdiven Topolojide çoklu sensörler paralel olarak dizilirler. Şekil 3.3’de Merdiven Topoloji ile tipik bir sensör ağı görülmektedir. Çoklu ışık ışını bölücüler ve birleştiriciler farklı sensörlere ışığı iletmek üzere kullanılırlar. Merdiven topolojisinin sensörlerin bağımsızlığının getirdiği avantajlara sahip olmasına rağmen, çoklu bölücüler ve birleştiricilerin kullanımı sistemin kompleksliğini artırır.



Şekil 3.3: Merdiven topolojili bir sensör ağı

3.1.4. Hibrid topoloji

Değişik temel topolojilerin bir arada kullanıldığı hibrid topolojilerin de kullanılması mümkündür. Şekil 3.4’de yıldız ve seri topolojiden oluşan karma bir sensör ağı görülmektedir. Temel yapı yıldız topolojidir. Yıldız topolojinin her dalında ise seri topolojideki çoklu sensörler dizilmiştir. Bu şekilde bir hibrid topoloji çok sayıda sensörün çoğullanması ve güvenlik ve sensör performansının dengelenmesi için kullanılabilir.



Şekil 3.4: Yıldız ve seri topolojiden oluşan karma bir sensör ağı

3.2. Fiber Optik Sensörlerin Çoğullanma Teknikleri

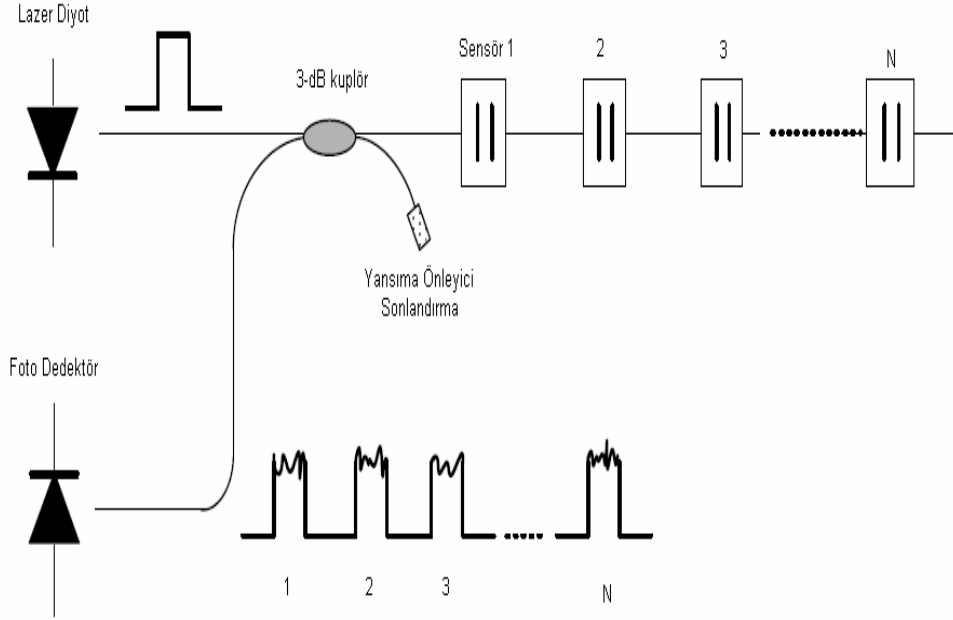
Sensör ağlarının topolojisi sensörlerin sinyallerinin çoğullama şemalarına bağlı değildir. Örneğin seri topolojideki bir sensör dizisi TDM, FDM, WDM şemalarında çoğullanabilir [10].

3.2.1. Zaman bölmeli çoğullama

Bir TDM şemasında sensörler bir darbeli giriş sinyalinin sensör ağına sıralı olarak enjekte edilmesiyle oluşturulurlar. Farklı sensörlerde iletilen veya yansıyan ışık farklı ilerleme zamanları gecikmesine sahip olacaktır. Bu da bağımsız sensörlerin seçilmesine izin verir.

TDM şemaları seri, merdiven ve yıldız topolojisi gibi farklı topolojilerdeki sensör ağlarını kullanabilir. TDM sistemindeki sensör diziliminin ihtiyacı farklı sensörlerin farklı gecikmelere sahip sinyallerden oluşmasıdır. Bir TDM şeması için en düzgün tasarım şekil 3.5’de gösterilen yansıma modunda çalışan OTDR tabanlı seri dizilerdir. Bir OTDR bir lazer diyot, ışık darbesi yaratmak için bir ışık modülatörü,

sensörlerden yansıyan ışığın zaman gecikmesini tespit eden bir foto dedektörü içerir. Yansıyan ışık darbesinin yoğunluk frekans veya faz değişimi ilgilenilen parametrenin tespiti için kullanılır.



Şekil 3.5: OTDR tabanlı bir TDM sensör dizisi

TDM şeması hem iletim hem yansıma modunda çalışan mikro büküm, interferometrik ve FBG sensörler gibi değişik sensörlerin çoğullaması için kullanılır.

3.2.2. Frekans bölmeli çoğullama

Bir FDM şemasında farklı sensörlerden gelen sinyallerin farklı frekansları vardır. Eğer frekanslar optik frekanslarsa çoğullama şeması genellikle dalga boyu bölmeli çoğullama olarak dikkate alınır. Bundan dolayı bir FDM şemasındaki frekans bileşenleri genellikle farklı frekanslardaki elektrik sinyalleridir.

FDM şeması ışık kaynağını periyodik olarak modüle etmek için genellikle bazı modülasyon tekniklerini kullanır. En yaygın modülasyon şemaları sinüzoidal testere dişi ve üçgen modülasyondur. Farklı sensörlerden gelen sinyaller ışık kaynağının modülasyonundan dolayı farklı frekanslara sahiptir. Farklı frekanslar taşıyıcı

frekanslar, sensörlerin pozisyonları veya sensörlerin optik yol dengesizliği olabilecek farklı fiziksel manalar için kullanılabilir.

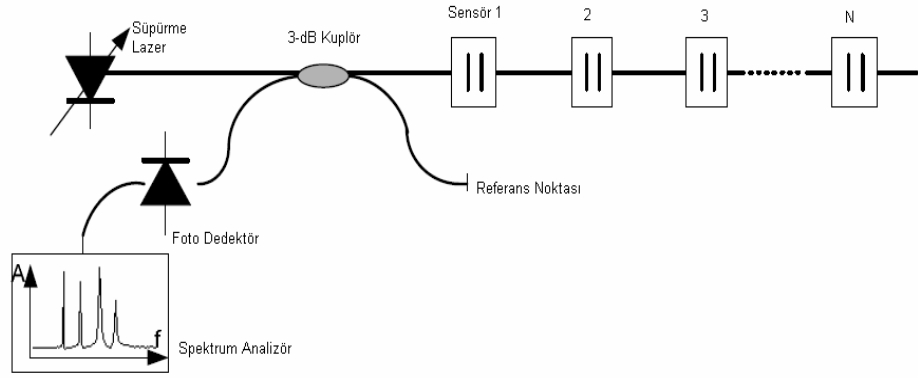
En ilgi çekici FDM şeması temelde radar mesafe tespiti için geliştirilen ve daha sonra lazer mesafe tespiti ve optik sensör ölçümlerine uygulanan frekans modülasyonlu sürekli dalga (FMCW) tabanlı tekniktir.

FMCW tekniği bir optik fiber ağında kullanıldığı zaman genelde optik frekans domen reflektrometri(OFDR) olarak adlandırılır. Bir OFDR yansıma modunda çalışan özel bir FMCW tekniğidir. Uyumlu ve uyumsuz OFDR'lerin her ikisi de ışık kaynağının farklı modülasyon metodlarında geliştirilmiştir.

Uyumlu bir FMCW genellikle pikometreden birkaç nanometreye kadar olan dalga boyu aralığında optik frekansı direk olarak modüle eder. Farklı optik yollar boyunca yayılan ışık ışınları farklı optik frekanslara sahiptir ve birleştirildiği zaman birbirlerine karışır. Karışım frekansı iki ışık ışınının optik frekans farkına eşittir ve iki ışık ışını arasındaki optik yol farkının hesaplanmasında kullanılabilir.

Uyumsuz bir FMCW optik taşıyıcı frekansının yerine ışık kaynağının yoğunluğunu modüle eder, genellikle MHz-GHz aralığında bir mikrodalga frekansında. Yoğunluk modülasyonu genellikle dışsal optik modülatörün dinamik sinyalin veya lazer diyotun dinamik akımının modülasyonu ile başılır. Uyumsuz bir FMCW sistemindeki karışım sinyali uyumlu bir FMCW deki optik frekansların aksine mikrodalga frekanslardan gelir.

FMCW reflektrometri tabanlı fiber sensör sisteminin tipik bir FDM şeması Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Uyumlu bir ışık kaynağı doğrusal olarak frekans modüle edilmiştir. Bir referans yansıma noktası kullanılır. Sensörden yansımalar referans noktasının yansıması ile karışacaktır. Farklı sensörlerden yansımalar farklı frekanslı elektrik sinyallerini üretecektir. Karışım sinyalinin frekans bileşenini analiz etmek için bir spektrum analizör kullanılır. İlgilenilen çevresel parametre karışım frekansının genliğiyle alakalı olan sensörlerden yansıyan ışığın yoğunluğunu tespit ederek hesaplanır.

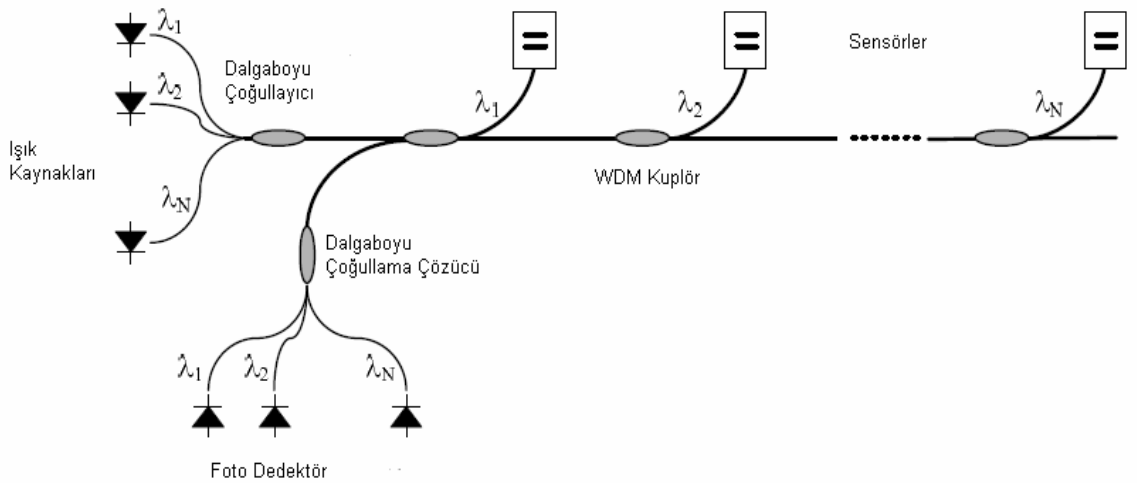


Şekil 3.6: FCMW tabanlı FDM sensör dizisi

Eğer FMCW konfigürasyonundaki karışım sinyali bir interferometrenin iki farklı ışık ışınından geliyorsa, karışım frekansı iki ışık ışını arasındaki OPD ile karakteristiktir. Farklı OPD'li sensörler farklı karışım frekanslarına sahiptir ve bir alt taşıyıcı frekans domeninde çoğullanabilirler.

3.2.3. Dalga boyu bölmeli çoğullama

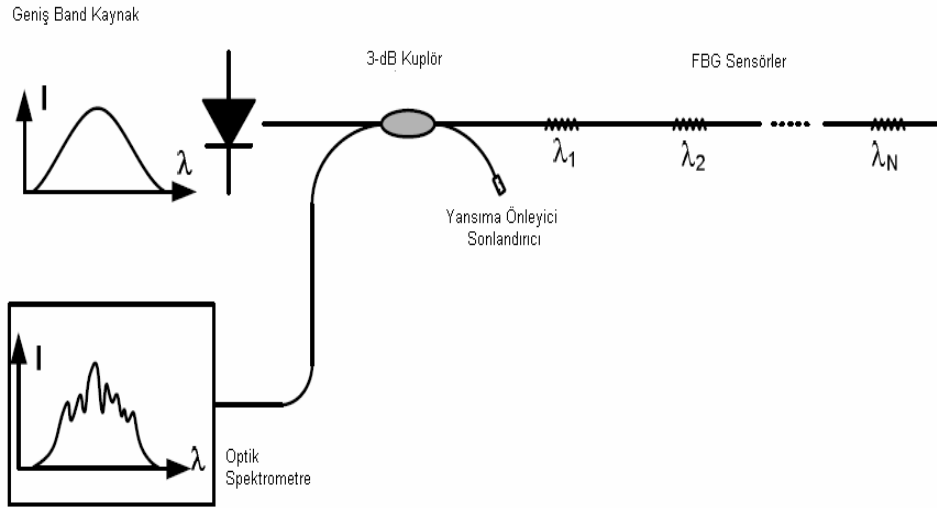
Dalga boyu bölmeli çoğullamanın optik haberleşme sistemlerinin kapasitesini arttırmak için en güçlü teknik olduğu kanıtlanmıştır ve uzak mesafeli optik linklerde ve yerel optik ağlarda yaygınlaşmıştır.



Şekil 3.7: Bir dalga boyu bölmeli çoğullama sensör dizisi

WDM tekniğinin uygulamasının en düzgün olduğu yer farklı sensörlerin farklı dalga boylarında çalışmak üzere dizayn edildiği sensör ağlarıdır. WDM şeması kullanan bir sensör dizisinin bir tertibi şekil 3.7’de görülmektedir. Belirli bir kaynaktan gelen ışık belirli bir sensöre yönlendirilir ve belirli bir fotodedektör tarafından alınır. Ortak bir fiber linki paylaşımlarına rağmen sensör elemanları WDM bölücüler, bağlayıcılar ve birleştiriciler kullanarak dalga boyu domeninde her biri bağımsız olur. Yoğun dalga boyu çoğullamanın evrimi (DWDM) bu gibi optik bileşenlerin makul maliyetlerde olmasını sağlar.

FBG sensörler için geliştirilmiş diğer önemli WDM sensör entegrasyon şeması şekil 3.8’de gösterilmektedir. FBG sensörler ışığı farklı dalga boylarında yansıtmak için dizayn edilmiştir. Sensör dizisi bir geniş bant ışık kaynağı ile ışıklandırıldığında, FBG sensörler ışığın farklı dalga boylu kısımlarını yansıtabilir. Bir optik spektrometre her FBG sensörün merkezi dalga boyunu izlemek için kullanılabilir ve böylece sıcaklık ve gerilme hesaplanabilir. Bir optik spektrometrenin yerine dedektör olarak bir foto dedektör kullanılırken ışık kaynağı olarak da ayarlanabilir bir lazer kullanılabilir.



Şekil 3.8: FBG sensörler için bir WDM şeması

Bir WDM şemasındaki sensörler sensör dizaynı ve imalindeki kompleksliği arttırabilecek farklı dalga boylarında çalışacak şekilde dizayn edilmelidir. Işık bant genişliğinin sınırlı olmasından dolayı bir WDM şemasının çoğullama kapasitesi

genellikle küçük sayılarla sınırlıdır. Örneğin FBG sensörler bir WDM şemasında entegre edildiği zaman her FBG birkaç nanometreye kadar bir bant genişliğine ihtiyaç duyar. Işık kaynağının toplam kullanılabilir bant genişliği onlarca nanometredir. Böylece çoğullama sayısı kaynağın spektral genişliğinin oranı ile sınırlıdır.

3.2.4. Diğer çoğullama şemaları

Optik fiber sensörler için kod bölmeli çoğullama (CDM) ve uzay bölmeli çoğullama (SDM) gibi diğer bazı çoğullama şemaları da vardır.

Bir CDM şemasında yaygın bir spektrum sinyal üretmek için optik kaynak sözde rasgele bit dizisi (PBRS) kullanarak modüle edilir. Sensörlerin yerleri çoklu bit periyodlarının gecikmelerinde dizayn edilir. Sensör dizilerinden alınan sinyal PBRS optik darbelerin gecikmeli versiyonlarıyla şifrelenir. Senkronize ilişki tespit tekniği farklı sensörlerden ilgili sinyali elde etmek için kullanılır. İnterferometrik sensörler için birkaç CDM şeması önerilmiştir. CDM bir çeşit geleneksel TDM olarak düşünülebilir. Fakat bir dizi ışık darbesi kullanıldığından çıkışta daha güçlü optik sinyaller elde edilir, böylece CDM metodu TDM metodundan daha iyi güç stoğu sağlar.

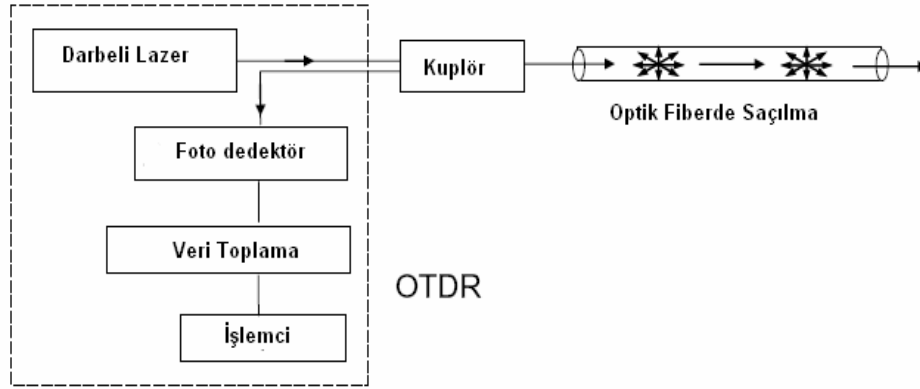
Bir SDM şemasında ortak kaynaktan gelen ışık bölünür ve sensör entegrasyonu için farklı noktalara yönlendirilir. Bir SDM şemasındaki sensörler farklı fiber linkleri üzerinde yerleştirilir. SDM metodunun en avantajlı özelliği her fiber linki için dengeli bir güç stoğu içermesi ve sensörler arası diyafoniden tamamen bağımsız olmasıdır.

4. DAĞITILMIŞ ALGILAMA

Dağıtılmış optik fiber algılama ölçülen büyüklüğün hem uzamsal hem de sıcaklık özelliklerini eş zamanlı ölçmek için optik fiberin özgün özelliklerini kullanan bir tekniktir. Uzamsal ölçümün sürekliliği temeline göre dağıtılmış optik fiberler iki kısma ayrılabilir. Bunlar tam dağıtılmış fiber sensörler ve yarı-dağıtılmış fiber sensörlerdir.

4.1 Tam Dağıtılmış Fiber Optik Sensörler

Saçılma tabanlı fiber optik sensörlerde, fiberdeki geri saçılan ışık ölçülecek dış fiziksel parametrelere hassaslaştırılmıştır. Geri saçılan ışığı ölçmek ve aynı zamanda saçılmanın uzamsal bilgisini elde etmek için bir optik zaman domein reflaktometri teknolojisi kullanılır. OTDR işleminin temel prensibi Şekil 4-1’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1: OTDR çalışma prensibi

OTDR sistemi bir darbeli lazer, bir foto dedektör, veri toplama ve sinyal işlemcisinden oluşur. Çalışma sırasında, darbeli lazer yönlü bir optik kuplör üzerinden fibere kısa optik dalgalar gönderir. Darbe fiber boyunca ilerlerken, her yönde saçılır. Bu geri saçılmanın bir kısmı aynı fiberde tekrar bağlaştırılır ve gücünün zamanın bir fonksiyonu olarak ölçüldüğü işlemci ve foto dedektöre yönlendirilir. Fiberdeki yayılma sürecindeki saçılmadan dolayı darbeler zamanla

sönümleştireceğinden zaman arttıkça alınan güç zayıflar. Saçılmanın yeri fiberdeki bir referans noktasına göre alınan darbenin zaman gecikmesinin analiz edilmesi ile ayırt edilir. Geri saçılma katsayısı değişiminin ölçülmesi ile fiberin herhangi bir noktasındaki değişim hesap edilebilir. Tam dağınık sensör uygulaması için çeşitli saçılma mekanizmaları kullanılmaktadır. Bunlar Rayleigh saçılma, Raman Saçılma ve Brillouin saçılmasıdır. Her mekanizma için değişik ölçme sistemleri geliştirilmiştir.

4.1.1 Rayleigh saçılmasına dayalı fiber optik sensörler

Optik fiberdeki Rayleigh Saçılması fiber boyunca indeks profilindeki rastgele dalgalanmalardan kaynaklanan küçük parçacıklar nedeni ile olur. Bu parçacıkların boyutu ışığın onda biri veya daha azı mertebelerindedir. Saçılan ışık gelen ışıkla aynı frekanslara sahiptir. Rayleigh Saçılması tabanlı sensör sistemlerinde sıcaklıkla değişebilecek geri saçılan ışığın gücünü tespit etmek üzere basit bir OTDR sistemi tasarlanır. Zamanla değişen ışık gücü aşağıda verilen optik fiberde Rayleigh saçılması nedeni ile fırlatılan uca geri döner [11].

$$p(t) = \frac{1}{2} P_0 W S(z) \alpha_s(z) V_g \exp\left(-\int_0^t \alpha(z) V_g dt\right) \quad (4.1)$$

Bu denklemde P_0 , fibere fırlatılan ışığın gücü, W darbe genişliği, $S(z)$ saçılma noktasındaki toplam saçılma gücü ve ters kuplajlı güç arasındaki oran, $\alpha_s(z)$ Rayleigh Saçılma kaybı, V_g grup hızı ve $\alpha(z)$ fiber zayıflama katsayısıdır. Fırlatılan uçtan uzaklık olan z , $z = V_g t/2$ formülü ile hesaplanır.

Rayleigh Saçılması elektro-magnetik alanın tetiklemesi ile zayıf bağlı elektronik moleküllerin yer değişiminin neden olduğu elastik bir saçılmadır. Silika fiberde SiO_2 'nin temel yapısı bir silisyum atomunu çevreleyen dört tane oksijen atomunun oluşturduğu tetrahedrondur. Her oksijen atomu komşu bir tetrahedron tarafından paylaşılır. Cam hızlıca soğutulduğunda üretim esnasında yapısal düzensizlikler meydana gelir. Bu da nihai materyale soğutmada yüksek sıcaklık özelliklerine yol

açar. Bunun sonucu olarak, bu yapıyla alakalı materyal yoğunluğu saçılma merkezi gibi davranan rastgele mikroskobik değişimler gösterir.

Rayleigh saçılması tabanlı bir dağıtılmış algılama sisteminde saçılma katsayısı α_s sabittir. Eğer fiberin α kaybı ilgilenilen ölçülen ile tek değişen parametre ise, bu OTDR ile tespit edilebilir. 4.1 eşitliğine göre fiberin kaybındaki değişimi geri saçıcı dalga formunda logaritmik düzlemde eğrinin değişimi olarak ortaya çıkar.

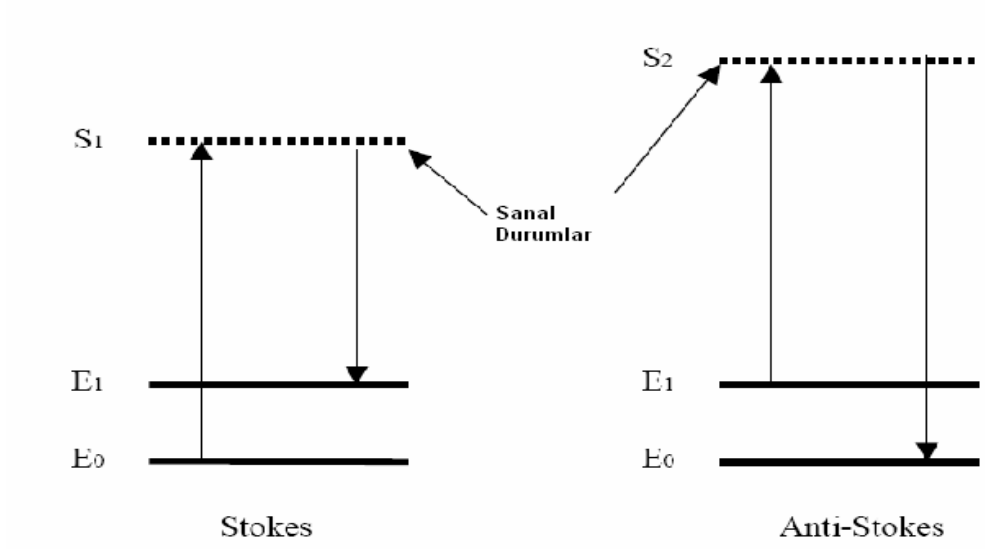
Bu prensip fiberde seçili noktalara ince renkli cam filtreler sokulması ve lantanit iyonu katkılı fiber kullanımı gibi çeşitli yaklaşımlar yardımıyla kanıtlanabilir. Fiber kılavuzundaki değişimler tek modlu fiberin kılıfı ve çekirdeği için kullanılan farklı termo-optik katsayılı camlar içinde kullanılır. Böylece indeks değişimi fiberin sıcaklığı ile modüle edilir. Kılıf materyali çekirdeğe göre çok daha fazla zayıflamalı olacak şekilde seçilir. Fiberin toplam kaybı böylece sıcaklığı ile modüle edilir. 100 metrelik bir fiber boyunca 10 cm'lik uzamsal çözünürlük 0-150°C aralığında $\pm 5^\circ\text{C}$ 'lik çözünürlük ile sağlanır [3].

4.1.2 Raman saçılmasına dayalı fiber optik sensörler

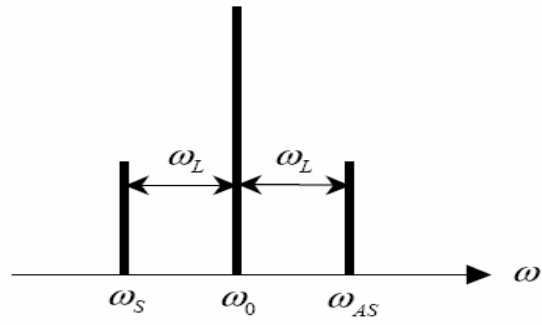
Raman Saçılması saçılan ışınının dalga boyunun gelen ışığınkenden farklı olduğu ve saçılma ortamının iç enerjisinde bir değişikliğin meydana geldiği elastik olmayan bir saçılma prosesidir. Raman Saçılması materyalde, katılardaki termal olarak yönlendirilmiş moleküler titreşimler örneğindeki gibi propagasyonsuz kolektif modlar içerir. Raman Saçılması Şekil 4.2'deki yarı klasik modelde görülebilir. İki foton etkileşiminde, materyal ilk durumdan son duruma gerçek bir geçiş yapar. Bir stokes veya antistokes foton yaratılırken ilgili foton yok edilir. İlgili ışık, ω_L olarak adlandırılan, ω_0 frekansında ortamın bir içsel modunun uyarımıyla beraber daha uzun ve daha kısa dalga boyundaki , sırasıyla stokes dalgası ω_S ve antistokes dalgası ω_{AS} olarak adlandırılan, ışığa saçılır.

Bağımsız atom ve moleküllerin gösterdiği dar spektrumun tersine silika camın Raman spektrumu Şekil-4.2'de gösterilen 440cm^{-1} civarında merkezlenen 200cm^{-1} lik çok geniş bir bant içerir. Bu spektrum hatlarının yoğunluğu sıcaklığa duyarlıdır.

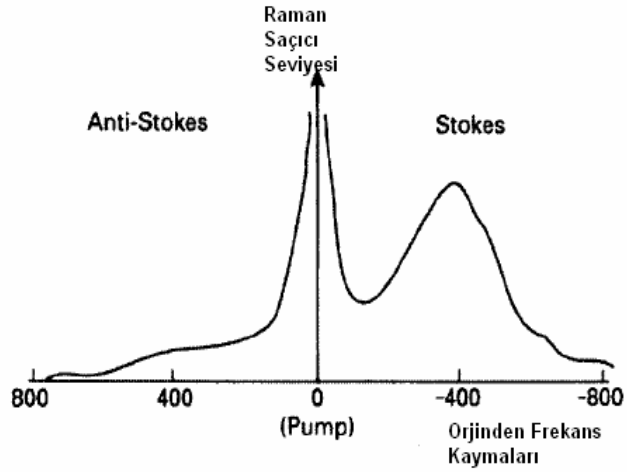
Saçılan ışık spektrumu bu parçalarının sadece birinin filtrelenmesiyle ölçülen sinyalin sıcaklığa duyarlılığı kolayca elde edilir. Bu Raman saçılma temelli dağıtılmış fiber sıcaklık sensörünün temel prensibini oluşturur.



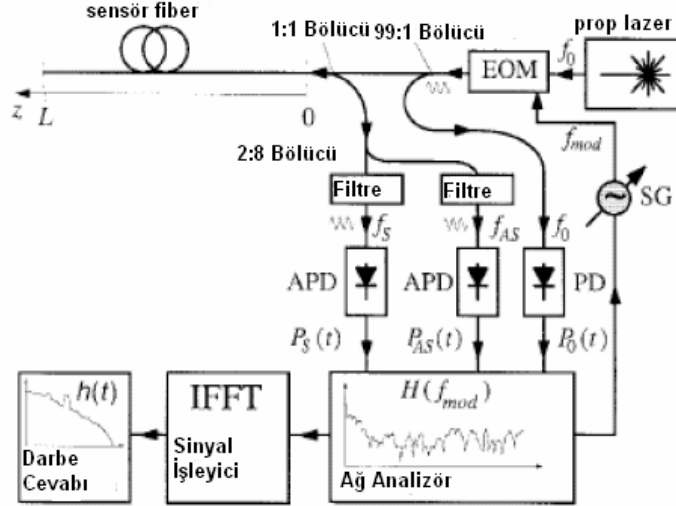
Şekil 4.2 (a): Raman enerji seviye geçişleri



Şekil 4.2(b): Raman spektrumu



Şekil 4.2(c): Silika için raman spektrumu



Şekil 4.3: Raman dağıtılmış fiber sıcaklık sensörü

Şekil 4.3’de anti-Stokes spektrumunun sıcaklık bilgisini elde etmek üzere süzül­düğü, Stokes spektrumu ve Rayleigh saçılımlı ışığın süz­ül­düğü, fiberin zayıflatıcı etkisinin bertaraf edildiği bir Raman dağıtılmış fiber sıcaklık sensörünün sistem diyagramı gösterilmektedir.1995 ‘de york DTS sistem 30 km’lik tek modlu fiberde 2°C’lik sıcaklık çözünürlüğü ve 8m’lik uzamsal çözünürlüğü gerçekleştirmeyi başarmıştır.

4.1.3 Brillouin saçılmasına dayalı fiber optik sensörler

Brillouin saçılma katılardaki akustik dalgalar gibi düşük frekans yayımlı dalgaları içerir. Saçılma Stokes dalgası olarak adlandırılan daha uzun bir dalga boyuna veya anti-Stokes dalgası olarak adlandırılan daha kısa bir dalga boyuna olabilir. Brillouin saçılması için modların enerjileri Raman saçılmasından daha düşüktür. 0.1'den 100 GHz frekans değişimlerinde sonuçlanır ve materyal özellikleri kadar uyarılan dalga boyuna ve etkileşim geometrisine de bağlıdır.

Brillouin saçılması ile ilgili 1.4°C'lik sıcaklık çözünürlüğü ve 10m 'lik uzamsal çözünürlüklü araştırmalar sunulmuştur. Uyarılmış Brillouin saçılması dağıtılmış algılama için de hazırlanmıştır. Brillouin kazanç spektrumunun frekans kaymasının sıcaklık ve gerilmeye duyarlı olduğu bulunmuştur. Literatürde farklı Brillouin saçılmasına dağıtılmış algılama şemaları bulmak da mümkündür.

4.2 Tam Dağıtılmış Fiber Optik Sensörlerdeki Problemler

Tam dağıtılmış sensörler üzerinde 20 yıldır araştırmalar yapılmaktadır ve bu sensörlerin bazıları endüstriyel uygulamalarda kendine yer bulmuştur. Fakat bu tip sensörlerle olan problemler hala devam etmektedir. Bunlardan bazıları kalıtsaldır bazıları da gelecekteki araştırmalarla çözülebilir.

Saçılma tabanlı sensörlerin ortak problemi çok kısa optik darbe genişliği elde etmenin zorluğundan kaynaklanan düşük uzamsal çözünürlükleridir. OTDR' nin uzamsal çözünürlüğü δz şöyledir.

$$\delta z = vW/2 \quad (4.2)$$

v fiberdeki ışık hızı W dalga süresidir. 100ns dalga genişliği için yukarıdaki eşitlik 10 metre uzamsal çözünürlük sağlar. Bir başka dezavantaj saçılan sinyalin çok zayıf olması ve ölçüm doğruluğu ve çözünürlüğünü sınırlayan çok düşük bir sinyal görüntü oranı vermesidir. 1 °C mertebesinde sıcaklık çözünürlüğü ve 10 µε mertebesinde gerilme çözünürlüğü elde edilebilir. Ek olarak saçılma tabanlı

sensörler optik yoğunluk modülasyonludur böylece tahmin edilemeyen fiber bükülme kayıplarından dolayı çok sık meydana gelen optik güç dalgalanmaları, sıcaklık değişimlerinin neden olduğu ışık kaynağı değişimi büyük ölçüm hatalarına sebep olabilir.

4.3 Yarı Dağıtılmış Fiber Optik Sensörler

Yarı dağıtılmış optik sensör sistemi bir dizi nokta sensörün tek bir optik üzerinde entegrasyonu ile gerçekleştirilir. Tam dağıtılmış sensörlerle karşılaştırıldığında yarı dağıtılmış sensörler bağımsız bir nokta sensörün tipik olarak 1 cm'den daha az ve 1 mikronun onda biri kadar küçük mertebelerdeki kadar küçük yapılabilmelerinden dolayı daha yüksek uzamsal çözünürlüğe sahiptir. Yarı dağıtılmış sensörlerin bir başka avantajı da daha güçlü optik sinyal yaratabilmesi ve daha yüksek sinyal görüntü oranı sağlamasıdır. Böylece tam dağıtılmış sensörden daha yüksek doğruluğa ve çözünürlüğe imkan sağlar. Nokta sensörlerin 2 tipi, fiber Bragg ızgara sensör ve fiber Fabry-Perot interferometri sensör yarı dağıtılmış optik fiber algılama uygulamaları için en uygun araştırma konularıdır. Bunlardan fiber Bragg ızgaralı sensöre daha sonraki bölümlerde detaylıca inceleyeceğiz.

FFPI sensörler basit yapıları yüksek kararlılıkları düşük maliyetleri ufak boyutları ve yapısal materyallere kolayca gömülebilmelerinden dolayı akıllı yapı takibindeki yarı dağıtılmış gerilme sıcaklık ölçümleri için büyük bir potansiyel sunarlar.

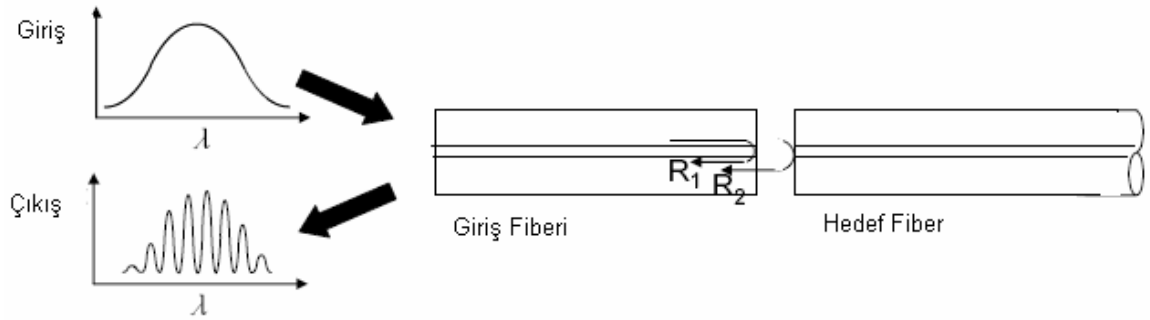
Bir FFPI sensör iki paralel kısmı yansıtıcı ayna içerir. Gelen ışık optik fiber boyunca iki aynaya yönlendirilir. Gelen ışık ilk aynada kısmi olarak yansıtılır. İletilen ışık iki ayna arasındaki boşluk boyunca ilerler ve ikinci aynada tekrar kısmen yansıtılır. İki aynadan yansıyan ışık sinyali aynı fiberde bağlaştırılır ve bir dedektöre yönlendirilir. Farklı optik yol uzunlukları nedeniyle iki ayna arasında bir faz farkı oluşur. İki ışık arasındaki girişim ışık spektrumunda saçaklı bir örüntü üretir. Temel prensip fiber eksenel yön üzerinde dizilen iki fiberin bulunduğu Şekil 4-4'de gösterilmiştir. İki fiber sensör yansıtıcı aynalar olarak davranması için ikiye ayrılır. Giriş fiberi ışığı boşluğa yönlendirir ayrıca boşluktan yansıyan ışınları toplar. Zayıf yansıma için girişim saçığı şöyle yazılabilir.

$$R = R_1 + R_2 + \sqrt{R_1 R_2} \cos \varphi \quad (4.3)$$

R_1, R_2 iki ayna yansıtıcılığıdır. φ ise faz farkıdır şöyle ifade edilir.

$$\varphi = \frac{OPD}{\lambda} 2\pi \quad (4.4)$$

OPD iki yansıyan ışık arasındaki optik yol uzunluğu farkıdır. Girişim saçığının analiziyle FFPI'nın OPD'si çıkartılabilir. FFPI'nın OPD'si farklı parametrelere duyarlı olarak dizayn edilebilir. Böylece farklı sensörler yaratılır.



Şekil 4.4.: FFPI sensörün temel çalışma prensibi

FFPI sensör basit yapısının düşük maliyetinin kolay üretimin ve çok yönlülüğünün avantajlarına sahiptir. Birçok uygulama için FFPI sensör yapısının çeşitli dizaynları vardır. Gerilme ve sıcaklık uygulama için fiber boyunca yapılabilir veya basınç akustik dalga ve biyomedikal algılama için fiber sonunda üretilebilir. Fabry-Perot boşluğunun yapısına göre FFPI sensörle iki gruba ayrılır. Dışsal Fabry-Perot interferometre sensör (EFPI) ve içsel Fabry-Perot interferometre sensör IFPI bir EFPI sensörde Fabry-Perot boşluğu fiberin dışındadır. Fiber sadece ışık iletim ortamı olarak kullanılır. Gelen ışığı FFPI sensöre yönlendirir ve daha sonrasında tekrar toplar ve sensörden yansıyan ışık sinyalini tekrar dedektöre yönlendirir. Bir IFPI sensörde aynalar fiber içinde üretilir. İki ayna arasındaki boşluk hem algılanma elemanı hem de dalga kılavuzu olarak kullanılır. Işık asla fiberi terk etmez.

BÖLÜM 5. FİBER BRAGG IZGARALAR VE FOTO DUYARLILIĞIN TEMELİ VE PRENSİPLERİ

5.1 Fiberde Foto Duyarlılık Olgusu

5.1.1. Fiberde foto duyarlılığın keşfi.

Optik fiberlerde foto duyarlılığın keşfinin arkasındaki itici güç, ışık-dalga haberleşme sistemleri için optik dalga kılavuzu filtrelerine olan kayda değer ilgidir. Bu konudaki ilk araştırmalar 1978 yılında Hill tarafından ortaya konulmuştur [11] .

Dalga kılavuzu filtreleri, kanal ayırımı için gerekli olan doğru frekans ayrıştırılmasını sağlayarak, ışık-dalga haberleşme linklerinin veri taşıma kapasitesini artırmıştır. Bu saçılma kompanzasyon filtreleri, dalga kılavuzu yapısının uygun boylamsal periyodik olmayan etkileşimini uygulayarak yapılmaktadır. Bir önceki sistemler basit bant durdurucu filtrelerle veya düzlemsel dalga kılavuzlarında doğrusal azalan adımlı filtrelerle kısıtlanmıştır. Onların pratikte kullanımı optik kayıplarından dolayı ve optik dalga kılavuzları ile mod uyumsuzlukları nedeniyle zordur.

Buna karşı Hill ve arkadaşları, düşük yayılma kayıplı ayarlanabilir bir optik dalga kılavuzunun yapısını gösterdi. Bunun çok yüksek frekans seçicilik potansiyeli vardı. Bu araştırmada filtre, yoğun zıt yönlü yayılan eş fazlı ışıklardan oluşmuştur. Oluşan durağan dalga fiber çekirdeğine etki eder ve çekirdek kırılma indeksinde periyodik bozulma meydana getirir ki bu filtre olur. Bunun için 488 nm civarında çalışan tek mod argon bir lazer, doğal foto duyarlı olan germanyum katkılı fiberle kullanılmıştır.

Optik fiberin foto duyarlılığın keşfedilmesi fiber Bragg ızgaraların ilk adımıdır. Hill, filtre karakteristiklerinin çevre sıcaklığına ve uygulanan gerilmeye bağımlılığını şu şekilde göstermiştir:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{1}{n} \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right) \Delta T + \frac{1}{d} \left(\frac{\partial d}{\partial T} \right) \Delta T + \left(1 + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial S} \right) \left(\frac{1}{d} \frac{\partial d}{\partial F} \right) \Delta F \quad (5.1)$$

(5.1) denkleminde $\Delta\lambda/\lambda$, ΔT sıcaklık değişimi ve uygulanan ΔF gücüne bağlı normalize rezonans kaymasıdır. S gerilim, n yansıma indeksi ve d filtre yapısını oluşturan bozulmanın uzaysal periodudur. Bu bağıntılar filtreleri istenen tepkiye göre sentezlenmesinde kullanılabilir.

Örneklenen filtrenin % 20 yansıtma verimliliği var, fakat araştırmacılar yansıtıcılığın %100'e yaklaşabileceğini bahsetmiştir. Bu filtrenin, daha sonraki filtrelerle karşılaştırıldığında dezavantajı, sadece lazer frekans aralığında yapılabilir olmasındır.

5.1.2. Farklı GeO₂ katkılı silika fiberler üzerindeki testler

Hill'in çalışmaları yayımlandıktan sonraki 10 yıl içinde konu üzerinde çok az Őey yayımlandı. Bununla birlikte 1987'de Stone farklı tip fiberlerin foto duyarlılığı üzerine testler yapıldığını ifade etti [10].

Deneysel kurulum, belirli bir dalga uzunluğunun yansımaya neden olan gerçekteki foto duyarlılık olgusu olan ızgara dizilimi prosesini doğrulama süresince gerilen fiber hariç, temelde Hill'in düzeneği ile aynıydı. Tablo 5.1 değişik fiber tiplerinden elde edilen sonuçların bir özetini sunmaktadır.

Denenen diğer fiberlerde bir ızgaralama oluşturulmadı. Stone' a göre görünen o ki, uzun dalga boylarında fiberler tek mod oluyorlar ve bu sebeple yeşilde son derece çoklu mod oluyorlar düşük seviye GeO₂ veya bir silika çekirdeği ihtiva ediyorlar ve gözlemlenebilir bir ızgaralama oluşturmuyorlar.

Tablo 5.1: Değişik fiberler üzerindeki foto duyarlılık testleri

Fiber	Izgara Formu	Notlar
Kanada Fiberi	~50% Yansıma $\lambda=514.5$ nm	Hemen hemen OH ile doymuş (>1000 ppm wt)
3.9 μm çekirdek GeO ₂	~15% Yansıma $\lambda=514.5$ nm	OH içeriği < 1 ppm wt
Diğer bir GeO ₂ Fiber	Zayıf Izgara $\lambda=514.5$ nm	Yukarıdaki fiberlerden daha az GeO ₂ konsantrasyonu
Yüksek GeO ₂ Konsantrasyonu	Güçlü Izgara $\lambda=514.5$ nm	~15% mol GeO ₂ 'den daha azında oluşturulmuş ızgaralı
Çok Yüksek GeO ₂ Fiber	~20% Yansıma $\lambda=514.5$ nm	~30% mol GeO ₂ . Her zaman çekirdeğin aynı yüksek indis adımıda değil
Üçgensel Profilli Fiber	Zayıf Izgara $\lambda=514.5$ nm	~8% mol GeO ₂ 'de zirvede
Çift Kırılımlı Fiber	Zayıf Izgara ,Tekrarlı $\lambda=514.5$ nm	Büyük ihtimalle yüksek GeO ₂ konsantrasyonu. 1.5 μm 'de tek modlu

Gerçek şu ki bütün fiberler sadece foto kırılmalarının nitel bir karşılaştırmasına izin veren ızgara yazma dalga boyunda çoklu modda test edilmişlerdi. O zamanlar (1987) tahrik modundaki ve optik güç yoğunluğundaki farklılıklar farklı kompozisyonların ızgara yazma verimliliğinin karşılaştırılmasının güçleştirerek kolaylıkla kontrol edilemiyor ve belirlenemiyordu. Gelecekteki ölçümlerin iyi karakterize edilmiş tekli mod fiberlerde yapılması gerektiği öngörülüyordu.

Sonuçlar bugünlerde genellikle foto kırılımının GeO₂ konsantrasyonu ile artarak ve mevcut OH'a ihtiyaç duymayarak foto duyarlılığa atfediliyor.

Bu aşamada foto duyarlılık olgusu hala açıklanamıyor. Etkinin endüklenebileceği spektral aralık da bilinmiyor.

5.1.3. FBG oluşumu için foto duyarlılık mekanizmaları ve modelleri

1990'da yayınlanan bir çalışmada hem fiber kırılım indeksindeki artış hem de Bragg ızgaralama düzenlerinin dinamikleri için muhtemel mikroskobik mekanizmaları araştırmıştır [12].

5.1.4 Fiberde hidrojen uyarımlı kayıplar

Ayrıca 1990'da silika tabanlı optik fiberlerdeki hidrojen endüklü kayıplar üzerine bir çalışma yapılmıştır. Cam ağları ile reaksiyon için sorumlu bir grup ve diamanyetik bozulma merkezleriyle reaksiyon için bir grup kurdular. Araştırmacılara göre hidrojen atomlarının diamanyetik merkezlerle reaksiyonu sürecinde OH ve 1.52 μm özümseme artışı oluşabilir [10].

5.1.5 UV indüklü beyazlatmanın gözlemlenmesi

Araştırmacılar optik fiberdeki foto duyarlılığın sebebi hususunda emin değildi ama Kramers-Kronig mekanizmasını desteklediler. Daha sonrasında fiber korda 252 Nm'de ışık merkezli yoğun bir emilimi deneysel olarak belirlendi. 242 Nm'deki ışınlamadan sonra 215 Nm'de buna eşlik eden bir emilim artışı gözlemlendi [10,12].

5.2 Fiberin Foto Duyarlılığının Artırılması

5.2.1 Bor katkılı germayum silika fiber

Yaklaşık %100 yansımali bir ızgara ve 1 Nm'den büyük bir bant genişliğinin yaklaşık 10 dakikada yapılabileceğini gösterilmiştir. Şu da gözlenmiştir ki, bor katkılamak ne 240 Nm'deki tepe emilimi ne de 240 Nm tepedeki şekli etkilemiştir [10,30].

Daha yüksek foto duyarlılık için verilen açıklama şudur ki; Bor ekleme oluşacak bir foto indüklü vurgu rahatlaması sağlayacaktır.

Tablo 5.2: Dört farklı fiberin göreceli foto duyarlılığı

Fiber	Fiber Δn	Doyma İndeks modülasyonu	2mm'lik ızgara için Azami Yansıtıcılık	Doyma yansıtıcılığı süresi
Standart Düşük kayıplı Fiber ~4 mol % germanyum	0.005	3.4×10^{-5}	1.2 %	~2 saat
Yüksek İndeks Fiber ~20 mol % germanyum	0.03	2.5×10^4	45%	~2 saat
İndirgenmiş Fiber ~4 mol % germanyum	0.01	5×10^4	78%	~1 saat
Bor katkılı Fiber ~15 mol % germanyum	0.003	7×10^4	95%	~10 dk.

Tablo 5.2 Dört farklı tip fiber için ilgili foto duyarlılığın bir özetini sunmaktadır. Burada bor katkılı germanyum silikat fiberin avantajları görülebilmektedir.

5.2.2 Ateş fırçası tekniği

Ge katkılı çekirdek fiberlerdeki duyarlılık 240 Nm Uv bölgesindeki oksijen-boşluk bozulmalarının bir sonucudur. Buna nispeten düşük konsantrasyondaki bozukluklar yüksek kalitedeki optik fiberlerde bulunurlar ve zayıf foto duyarlılık olarak karakterize edilirler. Buna karşı çoğunlukla çekirdekte, fiberdeki bozukluklara neden olan bir metot önerilmiştir[10,30].

Metot, yakıt olarak hem hidrojen kullanılmış bir alev ve hem de bazen 1700 °C'ye kadar sıcaklığa sahip oksijen kullanır. Prosesin fiberi fırçalaması yaklaşık 20 dakika alır.

Tekniğin avantajları şudur ki; üç temel optik haberleşme penceresindeki kayıp artışı ihmal edilebilir ve teknik, düşük alevle bağlı olarak son derece bölgeselleştirilmiştir. Deneysel olarak şu bulunmuştur ki, alev fırçalamasız 1.6×10^{-4} 'lük indeks değişimine sahip bir fiber çekirdeği, alev fırçalamadan 20 dakika sonra 1.75×10^{-3} 'lük bir indeks değişimine sahip olmuştur.

5.2.3 Yüksek basınçlı H₂ yüklemesi

GeO₂ katkılı optik fiberlerin UV foto duyarlılığını artırmak için başka bir teknik Yüksek Basınçlı H₂ Yüklemesi olarak yayınlanmıştır. Hidrojen yüklemesi olarak adlandırılan bu metotta H₂ molekülleri 21 °C -75 °C' deki düşük sıcaklıklarda 20 atm – 750 atm deki yüksek basınçlarda fiber içine yayılırlar. Deneylerinin yüklenme zamanı tipik olarak birkaç gündü [10,30].

Fiberin Hidrojen yüklemesinden sonra UV veya yoğun sıcaklığa maruz kalması çözülmüş H₂' nin cam içerisinde reaksiyona girerek fiber çekirdeğinde geniş çaplı indeks değişikliklerine sebep olmasını sağlar.

İlerleyen araştırmalar sonucunda Daha yüksek foto duyarlılığa sahip Hidrojen yüklü germano silikat fiberlerin GeH merkezlerinden ek bir katkı ile Ge E' merkezlerinin daha yüksek bir düzen verimliliğinin sonucu olduğu kanısına varılmıştır.

Hidrojen yükleme fiber çekirdeğinin foto duyarlılığının artırılmasında popüler bir metot haline gelmiştir.

5.3 Fiber Bragg Izgara Sensörlerin Avantajları

Fiber Bragg ızgara sensörlerinin en önemli avantajı mutlak bir parametre olan dalga boyu içerisine belirlenen bilginin doğrudan kodlanmasıdır. Bu çıkışın doğrudan toplam ışık seviyelerine, fiber veya bağlaştırıcı kayıplarına veya güç kaynağına bağlı olmadığı anlamına gelir.

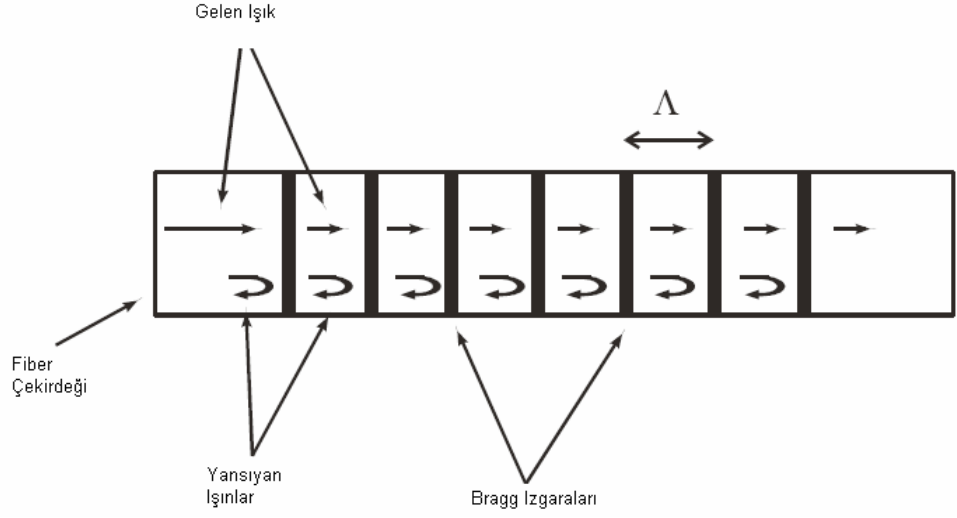
Fiber Bragg ızgaraları (FBG'ler) geleneksel optik fiber sensörlerin bütün avantajlarına sahiptirler, ama ayrıca kendini referans alan yeterliliğe de sahiptirler. Tek bir fiber boyunca seri olarak çoklanabilirler. Bir Bragg ızgaralama sensörü aynı anda çoklu parametreleri ölçebilir veya aynı sensör farklı zamanlarda farklı parametreleri ölçebilir.

Sensörlerin diğer avantajları:

- i) EM girişime ve kesintiye gerçel bağımsızlık;
- ii) Hafif ağırlık ve küçük boyut;
- iii) Kompozit materyallere uygulanabilir;
- iv) Kendine özgü çoklama yeteneği;
- v) Dalga boyu-bölme çoklaması (WDM) ile uyumludur.

5.4 Bragg Izgaraların Çalışma Prensipleri

Fiber çekirdeğin kırılmasının indeksinin modülasyonu sebebi ile belirli dalga boyları geri yansıtılır. Bir fiber Bragg ızgaraları iletilmeyen dalga boylarının bandını yansıtarak bir bant durduran filtre gibi hareket eder. Şekil 5.1 bu etkin basit bir sunumunu göstermektedir.



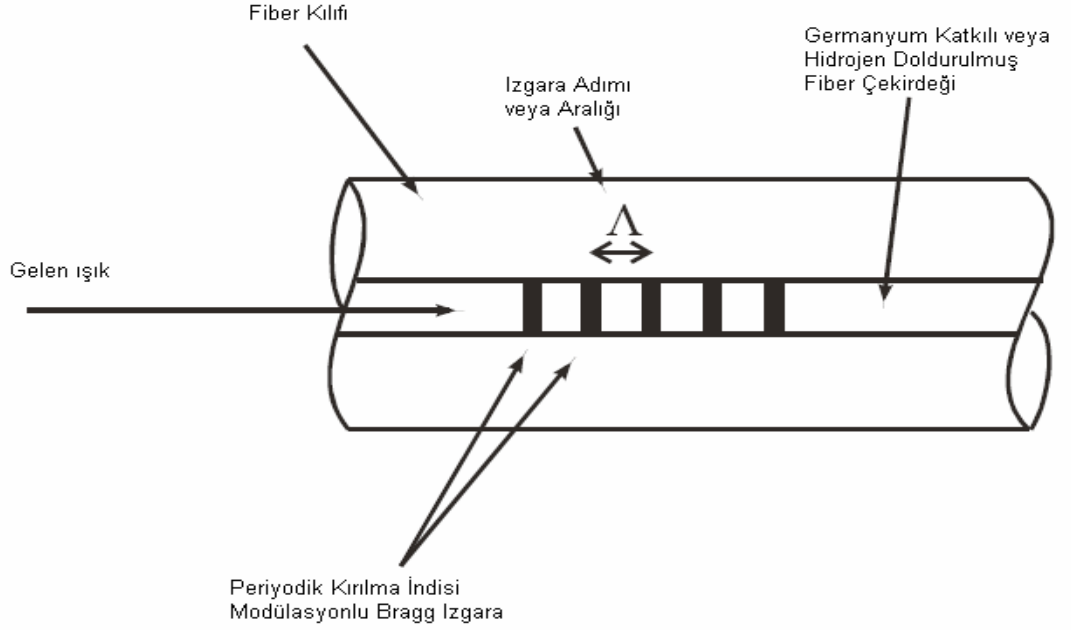
Şekil 5.1: Bir Bragg ızgarada iletim ve yansımaya

Bölüm 2’de de değinildiği üzere ızgara periyodu, Λ , yansıyan ışının dalga boyunun hesaplanmasını sağlar. Bu denklemi tekrar yazarsak;

$$\lambda_B = 2\eta_e \Lambda \quad (5.2)$$

Denklemden η_e fiberin çekirdeğinin etkin kırılma indeksidir. Daha önce değinmediğimiz nokta ise ızgara aralığının sabit olmasına gerek olmadığıdır. Doğrusal olarak artan veya azalan ızgaralar artan veya azalan adımlı ızgara olarak adlandırılır.

Fiber Bragg ızgara sensörleri η_e ve/veya Λ ’deki herhangi bir değişimin Bragg dalga boyunda, λ_B , yol açtığı değişimi ölçerler. Bu ölçüm sensörün sorgulama sistemi tarafından yapılır.



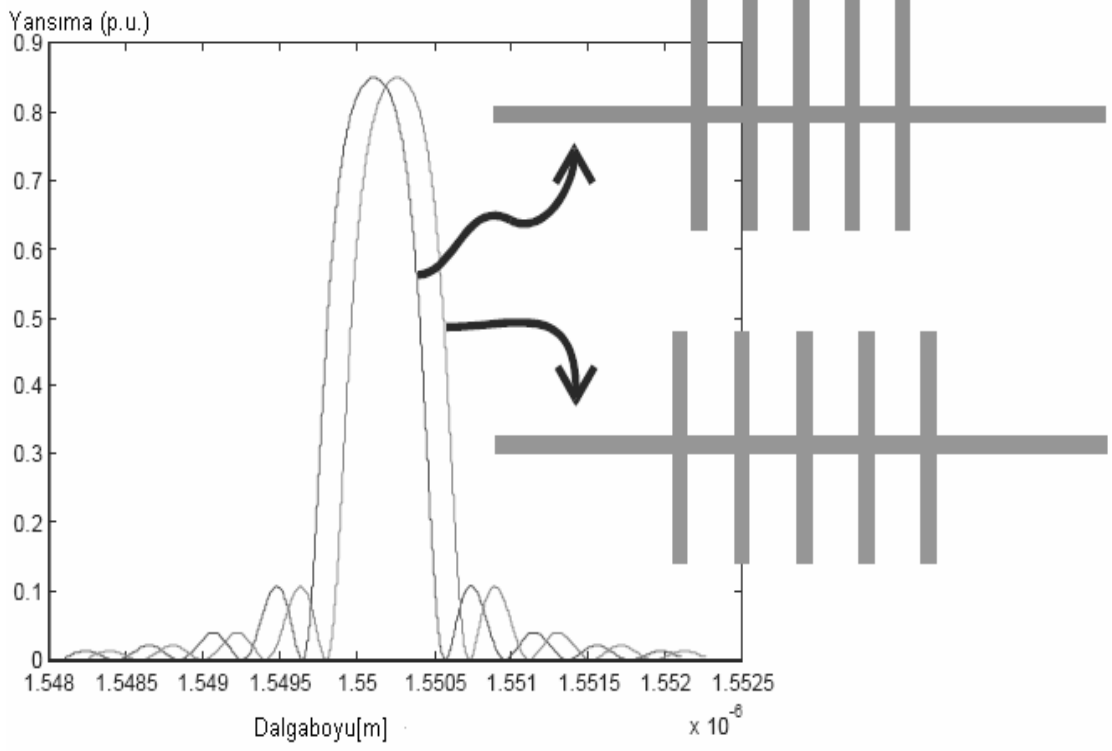
Şekil 5.2: Bragg ızgaralı fiber

5.5 Yaygın FBG sensörlerin Çalışma Prensipleri

Özel sensörler için n_e ve/veya Λ 'deki değişimleri bu kısımda inceleyeceğiz.

5.5.1 Gerilme algılama

Bragg ızgara içeren optik bir fibere gerilim uygulandığında fiber uzar ve dolayısı ile Bragg ızgarasının da uzamasına sebep olur. Bu ızgara aralığının, Λ , ve foto-elastik etki ile birlikte Bragg dalga boyunun artmasına yol açar. Fiberin etkin kırınım indeksi, n_e , de değişir fakat bu ızgara aralığı ile karşılaştırıldığında çok küçüktür ve ihmal edilebilir. Şekil 5.3'de gerilim ile Bragg dalga boyunun değişimi verilmiştir.



Şekil 5.3: Boyuna gerilmeden kaynaklanan ızgaranın dalgaboyu kayması

Şekil 5.3’de ızgaranın negatif gerilme ile sıkıştırıldığındaki uygulama gözükmektedir.

Boyuna bir gerilme, $\Delta\epsilon$, dalga boyu kayması daha önce ikinci bölümde de verdiğimiz aşağıdaki denkleme göre hesaplanır.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1 - \rho_e) \epsilon_z \quad (5.3)$$

Bu deklemdaki fiberin foto-elastik katsayısı ise şu şekilde verilmiştir.

$$\rho_e = \frac{n^2}{2} [\rho_{12} - \nu(\rho_{11} + \rho_{12})] \quad (5.4)$$

Bu denklemdeki ρ_{11} ve ρ_{12} fiber optik gerilme tansörü bileşenleridir. ν ise Poisson oranıdır.

Silika fiber için 1550 nm’de tipik dalgaboyu-gerilme duyarlılığı yaklaşık olarak mikro gerilme başına 1 pm’dir.

5.5.2 Sıcaklık algılama

Sıcaklık değişimi nedeni ile ızgaranın dalgaboyu değişimi, $\Delta\lambda_B$, fiberin termo-optik katsayısına, ξ_T , bağlıdır.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1 + \xi_T) \Delta T \quad (5.5)$$

Fiberin tipik dalgaboyu-sıcaklık duyarlılığı 1550 nm’de 13pm/°C’dir.

5.5.3 Basınç algılama

Basınç değişiminden kaynaklanan, ΔP , dalgaboyu kayması, $\Delta\lambda_B$, aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta(n\Lambda)}{n\Lambda} = \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial P} + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial P} \right) \Delta P \quad (5.6)$$

Germanyum katkılı fiber için 1550 nm’de dalga boyu basınç duyarlılığı kabaca -3×10^{-3} nm/MPa’dır.

5.5.4 Diğer sensörler

Kimyasal sensörler, ivme ölçerler ve magnetik sensörleri içeren diğer FBG sensörler de aynı prensipleri içerir. Fakat yukarıda anlatılan sensörler en yaygın FBG sensörlerdir ve büyük ihtimalle geleneksel sensörlerin yerini ilk alacak olanlardır

6. FİBER BRAGG IZGARALARIN ÜRETİMİ ve TEMİZLENMESİ

6.1 Giriş

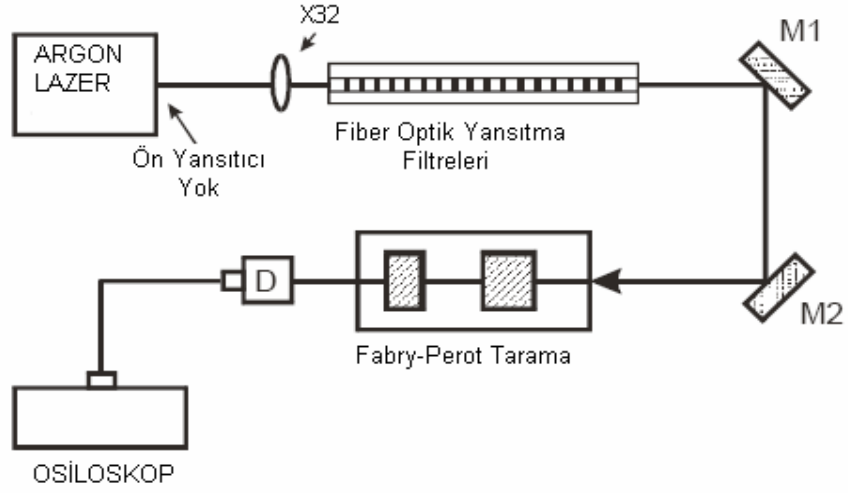
Birçok büyük icat gibi optik fiberin foto duyarlılığı ve Bragg ızgara oluşumu icatları da kazara ortaya çıkmıştır. Foto duyarlılık olgusu hala kesin bir dille açıklanamazken, fiber Bragg ızgaralar iyi bir tekrarlanabilirlikle üretilebiliyor ve geleneksel elektronik sensörlere alternatif olma konusunda oldukça popüler bir duruma gelmiştir.

6.2. Fiber Bragg Izgara Üretim Metodları

6.2.1. Duran dalga metodu

Optik fiber iletişim sistemleri tek sinyal üzerinde gelişmiş bir kapasiteye ihtiyaç duyduğundan, optik dalga kılavuzu filtreleri dikkatle incelenmelidir [11].

Hill'in çalışmasında bu filtrelerden biri düşük mod numaralı Ge katkılı silika fiber'de dizayn edilmiştir. Bu çalışmada Hill ve arkadaşları fiber çekirdeğini tek modlu argon-iyon lazer ile yoğun ters yönde propagasyonlu evre uyumlu ışınlarla maruz bıraktılar. Duran dalga örüntüsü fiber çekirdeğinin 488 ya da 514.5 nm'lik kısmında ortaya çıktı. Periyodik bozulmalar foto duyarlılığından dolayı fiberin çekirdeğinde oluştu ve filtrede sonuçlandı. Filtre duran dalga üreten lazerin dalga boyunun ayarlanması ile veya farklı lazer kullanılmasıyla farklı frekanslarda üretilebilir. Şekil 6.1'de Duran Dalga üretim metodunun deneysel düzeneği gösterilmiştir.



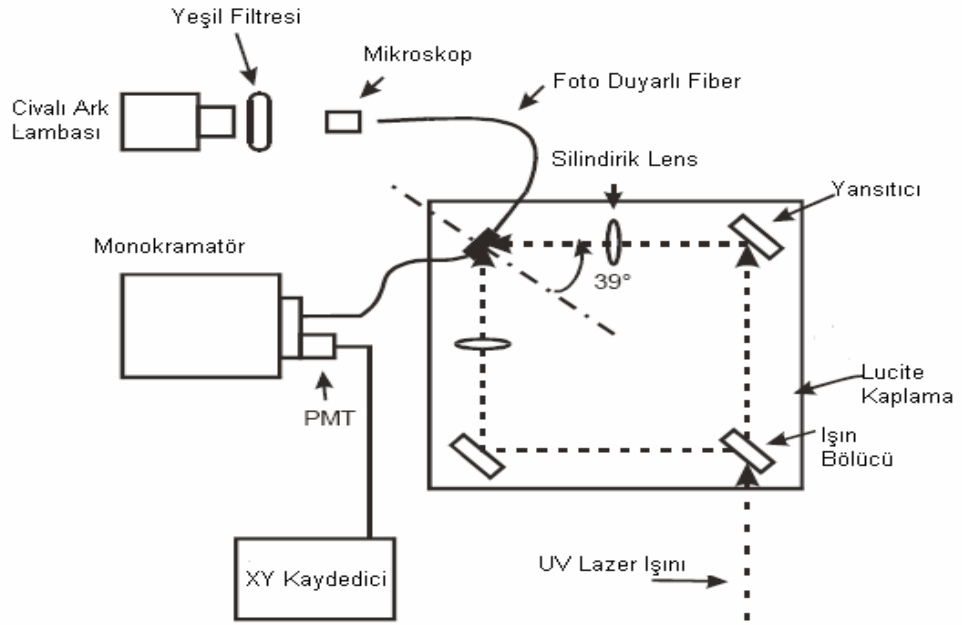
Şekil 6.1: Duran Dalga üretim metodunun deneysel düzeneği

Bragg filtreleri üretim süresince olduğu kadar ölçüm süresince de çevresel faktörlere karşı aşırı hassastır. Izgaraların pik yansıma dalga boyu ve genlikleri etkilenebilir. Bu çevresel faktörlerin içinde dalga kılavuzunu etkileyen mekanik stresin yanısıra sıcaklık dalgalanmaları ve düşümleri de vardır.

Bu üretim tekniğinin en büyük dezavantajı filtrenin lazerin dalga boyunda veya çok yakınında üretilebilmesidir. Bu, ayrıca iç yazma tekniğine ile de ilişkilidir.

6.2.2 Çapraz holografik metod

Araştırmalar sonucu kısa uzunluklu, foto duyarlı, germanyum silika bir fibere evre uyumlu UV ışın çiftlerini bindirerek bir ızgara oluşturulabileceğini gösterilmiştir. Çapraz holografik metod adı verilen bu araştırmada 486 ve 500 nm'lik dalga boyunda çalışan lazer kaynağı ile fiberin en fazla ışığa duyarlı olduğu 244 nm'lik bantta uzanan bir UV kaynağı sağlayabilmek için frekans çiftleyici kristal kullanılmıştır. Işın iki eş yoğunluklu ışına ayrılmış ve çekirdekte fiber eksenine dik olan girişim örneğini oluşturmak için tekrar birleştirilmiştir. Girişimin yoğunluğunu artırmak için fiberdeki ışınları odaklayan bir çift silindirik lens kullanılmıştır. Sonuç, yaklaşık 4 mm uzunluğunda ve 125 μm genişliğinde bir odaksal ışık olmuştur [13].



Şekil 6.2: Çapraz Holografik Metot

Şekil 6.2’de gösterilen deneysel düzenekte yansımayı ve ızgaranın iletim spektrumunun ölçmek için yüksek çözünürlüklü monokromatörle birlikte filtrelenmiş civalı ark kaynağı kullanılmıştır.

Izgaralar %50-55 yansımaya ve 42 GHz’de FWHM’ye sahiptir.

Kashyap 1500 nm civarındaki ilk ızgarayı oluşturabilmek için frekans çiftleyici argon-iyon lazerle benzer bir kurulum kullanmıştır. 1450-1600 nm.ler arasında oluşan ızgaraların uzunluğu 3mm ve yansıması %10’dur [12].

6.2.3 Noktadan noktaya yazma tekniği

Hill tarafından ızgara mesafesi, uzunluğu ve parlaklığının bağımsız olarak belirlenebileceği bir Bragg ızgara üretim metodu olduğunu gösterilmiştir [14]. Bu metod, kırılma indisinin periyodik değişiminin nokta nokta oluşturulduğunda ızgara spektrumunu cevabının tam kontrolünü sağlayabilir.

Bunun üzerine araştırmacılar iki noktadan noktaya yazmağa tekniğini karşılaştırdılar; biri her noktada motoru durdurup yarık boyunca fibere tek darbe göndermek ve diğeri motoru sürekli çalıştırıp düzenli aralıklarla lazer flaş oluşturmak. İlk seçenekte ızgaranın doğruluğu motorun doğru pozisyonuna bağlıyken ikinci seçenekte motor hızının sabitliğine ve lazer flaşlarına bağlıdır. Deneyler motorun hassasiyetinin 0.001° olduğunda, motoru durdurmanın daha doğru olduğunu göstermiştir.

60 cm uzunluğundaki ızgaralar 600-900 nm aralığında üretilir.

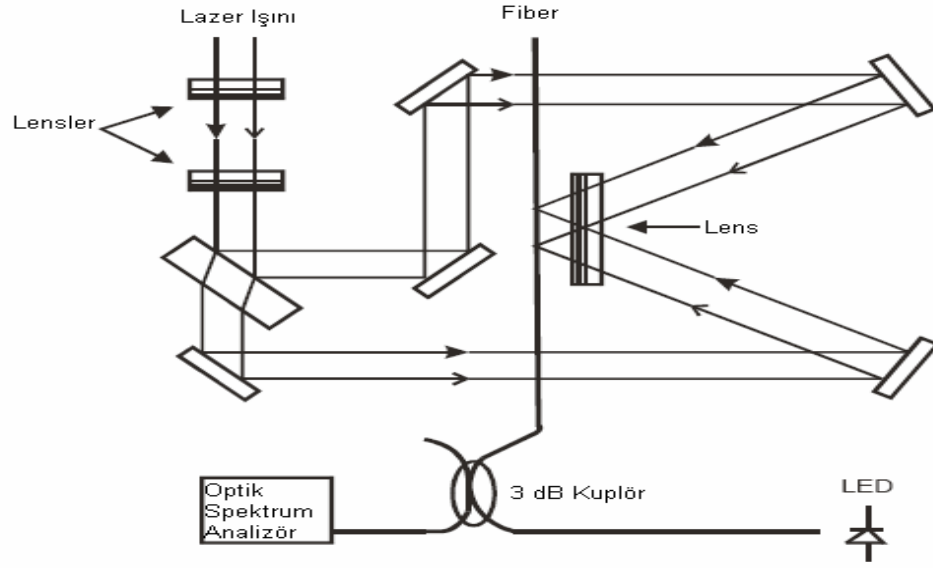
Bu retim tekniği ızgara periyodunun tek olmasını gerektirmez ve sensörlerde olduğu kadar iletişim için de büyük bir potansiyeldir.

6.2.4 Tek uyarılmış atom çifti darbesi kullanarak retim

GeE' kusur merkezlerinin beyazlamatılmasının Germanyum katkılı silikanın n oluşumunda ve fiberde düşük-akılı, tek darbeli KrF uyarılmış atom çifti ile pozlanmasıyla oluştuğunun gzlememesinden sonra, tek uyarılmış atom çifti darbesi ile bir taraflı ızgara yazılabileceği ne sürülmüştür. ızgaraların 20 ns'lik tek darbe ile oluşturulduğu düzenekte başlangıç sıralaması dışında kararlılık gerekmiyordu. ızgaraların yansımaları yaklaşık % 2'lerde ve çizgi genişliği de yaklaşık 0.1 nm'de oluşmuştur [15].

Tek darbe ızgara oluşumu, vibrasyona karşı i bağışıklığından dolayı çoklu element sensörlerinin ekonomik üretimini sağlar.

Oluşturulan bu ızgaralar daha sonra geliştirilmiştir. Bu yeni ızgaralar 248 nm'de %65'lik yansıma ve tek 20 ns'lik uyarılmış atom çifti darbesi idi [16]. ızgaraları yazmak için kullanılan interferometre Şekil 6.3'te gösterilmektedir.



Şekil 6.3: Tek darbe ızgara yazımı için interferometre

6.2.5 Noktadan noktaya tek uyarılmış atom çifti darbesi tekniği

Noktadan noktaya tekniğinin esas zorluğu fiberi yarığın sanal düzlemi boyunca hizalamak ve aktarma ihtiyacı olarak ortaya çıkmaktadır. Tek Uyarılmış Atom Çifti Darbesi kullanarak noktadan noktaya tekniğiyle oluşturulan Bragg ızgaralarının bu zorlukları hissedilir derecede azalttığını gösterilmiştir. Bu örnekte oluşturulan ızgaralar yaklaşık 1535 nm civarındadır [12].

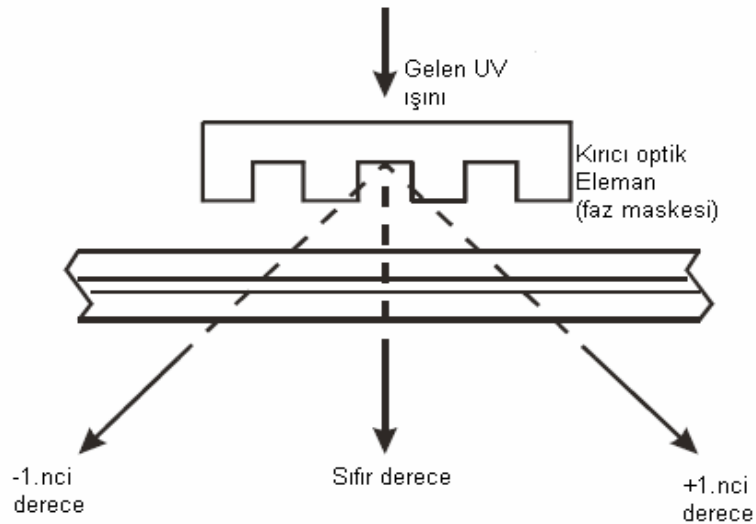
Fiber çekirdeğinde bir yarığın hayal ederek ve normal sıklıkla tek darbe ile bu yarığın ışıklandırılmasıyla bir noktadan noktaya ızgara oluşturulur. Bu ızgaranın her elemanı için yapılıdır.

İzgaralar tek darbe ile oluşturulduğunda çekirdekdeki indeks değişiminin sadece yoğunluğu kesin eşik değerinin üstünde olan ışığın odaksal bölgesinde olduğu görülmüştür. Bu, kırılma oranı değişiminin odaklanan ışının spot ölçüsünden daha küçük olduğu bölgede olması anlamına gelmektedir.

Gösterilen ızgaralar 0.5 mm'den daha kısa ve % 70'den daha zayıf yansıma oranına sahiptir. Bu teknik oldukça esnektir ve nokta sensörler ya da uzunluk, periyot ve spektrum esnekliğine ihtiyaç duyan uygulamalar için kullanılabilir.

6.2.6 Faz maskesi metodu

Çaprazlama holografik metodu ve noktadan noktaya metodu gibi yukarıda açıklanan harici yazım teknikleri tekrarlanabilirliğe bağlı olarak bir sınırlamaya sahiptirler. Fiber Bragg ızgaralarının daha fazla aerodinamiğe sahip bir şekilde üretilmesinin sonraki basamağı Hill tarafından gerçekleştirilmiştir [17]. Bunun için silika camından yapılmış özel üretim bir faz maskesi kafesi kullandılar. Bu UV ışınının fazını uzaysal olarak modüle etmek için kullanılan bir kırıcı optik elemanı idi. Faz maskesi, fiber eksenine dik bantlar ve çizgilerle temas veya yarı temas halinde yerleştirildi. UV ışını faz maskesinden geçti ve foto duyarlı fiber çekirdeği içerisinde fotonun bir dağılımlı indeks modülasyonu etkisi yaptığı bir girişim şablonu oluşturmak için yayıldı. Faz maskesinin üstten görünüşü ve geriye kalan deneysel düzenek Şekil 6.4'de gösterilmiştir.



Şekil 6.4: Faz maske ile ızgara yazma metodu

Arzu edilen faz maskesinin önemli bir özelliği ise, faz maskesinin arkasındaki tüm fiber parçasının istenmeyen bir dağılım indeksi sapmasına sebep olacak şekilde uniform aydınlatılmayacağı, sıfır-sırası ışınının bastırılmasıdır. Bu olay π radyanları

tarafından uyarılmış atom çifti(excimer) lazer ışınının fazını modüle etmek için periyodik yüzey-dağılım şablonunun genliği seçilerek gerçekleştirilir. Dağılım ve dağılımın optik dağılım elemanlarının detaylı bir şekilde tartışılması bu tezin kapsamının ötesindedir.

Yaklaşık aynı zamanda başka araştırmacılar da bir optik dağılım elemanı kullanarak bağımsız bir araştırma yapmıştı. Faz maskesini lazer ışınına dik yerleştirmek, sıfır-sıra dağılımını bastırmak ve kafesleri tescil etmek için +1 sırası ve -1 sırasını kullanmak yerine deneyde faz maskesini belirli bir açıda 13° ile yerleştirdiler ve -1 ile sıfır-sıra dağılımı kullandılar. Yaklaşık 3.6 sn içerisinde 1508.5 nm 'de %94 yansımali bir ızgara (kafes) ürettiler [18].

Bu fabrikasyon metodunun avantajları düşük eş fazlı lazerlerin endüstriyel çevrelerde kullanıma uygun oluşu ve faz maskelerinin kullanımda hasar görmemesidir. Bu metodu kısım 6.2.4'deki tek-darbe metodu ile kombine etmek düşük maliyetli yüksek performanslı cihazlar için bir potansiyel teşkil eder.

6.2.7 Faz maskesi metodundaki çeşitlilikler

Faz maskesi ve fiberi bir arada tutma ve bir Bragg ızgarasını bir faz maskesine yazarken UV ışını hareket ettirmek düşüncesi yeni bir araştırma konusu olarak araştırılmıştır. Bu teknik saçak şablonunun ışına olan pozisyonunun fazının duyarsızlığının avantajını kullanır. Bu tekniği kullanmak ışın açısını faz maskesi ve fibere bağlı olarak değişmediği müddetçe maske uzunluğuna kadar ızgaralar üretilebilir. Gösterim olması durumunda faz maskesi ızgaraların 1.5 cm 'e kadar olan uzunluğuyla sınırlandırılmıştır.

Tepe yansıtması %98.5 olan 1535 nm civarı ızgaralar hidrojen yüklü fiber içinde ifade edilirler. Deneysel kurulum şekil 6.4'de (UV ışınının gelme açısındaki fark) gösterilen duruma benzerdir. Şekilde faz maskesi fibere oranla çok daha büyük çizilmiştir. Yapılan deneylerde şekildeki UV ışını soldan sağa doğru daha uzun bir Bragg ızgarası ile taranmıştır.

Benzer bir faz maskesi tarama tekniğinde ise tepe yansımaları %64 lük 50 mm uzunluğundaki ızgaralamalar ve 0.029 nm'lik genişliğe sahip bir hat kullanılmıştır. Faz maskesi uzunluğunca UV ışınını hareket ettirmek için kayan bir ayna kullanılmıştır. Bu ızgaralar yüksek duyarlılıklı sensörler, dar bant aynalar ve yoğun dalga boyu bölme çoklaması (DWDM) sistemlerinde kullanımı için bir potansiyele sahiptirler.

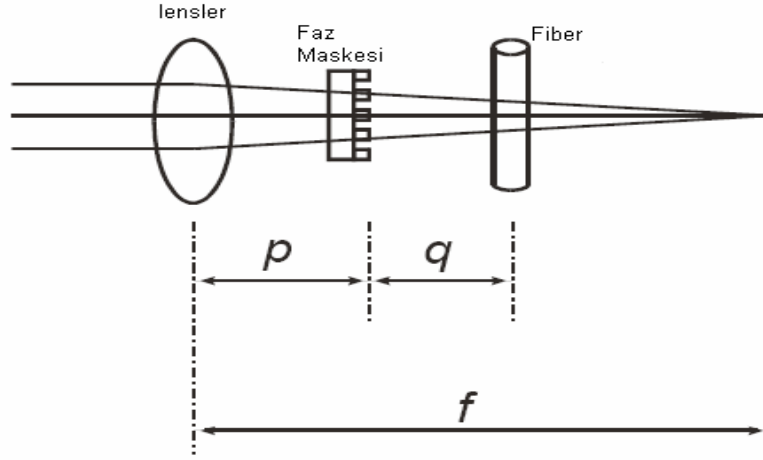
Yapılan sonraki çalışmalarda bir üniform faz maskeli azalan adımlı ızgaralar üretebilmek için aynı deneysel düzeneği kullanıldı. Her bölüm ifade edildikten sonra seri artırıldı veya azaltıldı. Bu çalışmanın bu tezle ilgili olan kısmı geniş seriler uygulandığında fiber kaymasının nasıl minimize edildiği üzerine olan notlardı. Fiber kaplaması sadece ızgaraların, kaplamanın kendisi kelepçenin içerisine yerleştirilebilecek şekilde ifade edilmesi gerektiğinde kaldırılır. En iyi sonuçlar fiberin kaplamayı gerdiği ve daha sonrasında yazılma süresince serinin azaldığının iddia edildiği durumlarda ortaya çıktı.

Yukarıda açıklanan teknikler birbiri ile sabit kalması için fiberin ve faz maskesinin pozisyonlarına bağlıdır. Diğer bir teknikte sürekli dalga UV ışını taranırken fiberin ilgili faz maskesine doğru hareket edebilmiştir. Eğer bu hareket üniform ise, sonuç Bragg dalga boyunun basit bir faz kaymasıdır. Eğer fiber ışın taranma hızının % 0,1'i kadar bir hızla hareket ederse yaklaşık 1 nm'lik bir kaymanın endükleneceğini belirlenmiştir. Sonuç deneylerle doğrulanmıştır. Işını ifade ederken fibere değişken bir kararsızlık uygulamak saf bir apodizasyonla sonuçlanır. Bu basit fiber / faz maskesi tarama ışını metodu faz maske tekniğinin esnekliğini geliştirerek kompleks ızgara yapılarının ifade edilmesine izin verir [12].

Değiştirilmiş faz maskesi metodunda Bragg dalga uzunluğunun tek bir faz maskesi ile kaymasına izin vererek UV ışınını faz maskesi üzerinden yakınsamak için uyarılmış atom çifti lazeri ile faz maskesi arasına bir lens yerleştirdiler. Büyütme, M aşağıdaki formülle ifade edilir [19].

$$M = \frac{f - p - q}{f - p} \quad (6.1)$$

Burada P, Q ve F Şekil 6.5'te verilen uzaklıklardır.



Şekil 6.5: Modifiye edilmiş faz maske metodu

Düzenek bu durumda 1300.38 nm'den 1298.67 nm'ye kadar daha düşük bir dalga boyuna ızgara dalga boyunu kaydırmak için kullanılmıştır. Izgara dalga boyu ayrıca faz maskesini ve fiberi lensin odaksal noktasından sonra yerleştirerek daha uzun bir dalga boyuna kaydırılabilir.

Eğer fiberi faz maskesinin karşısına konumlandırmak bir gereklilik değilse fiber yazımını ızgara dalga boyunu ayarlamak için faz maskesine göre eğilebilir [20].

6.2.8 Fiber çizimi sırasında üretim

6.2.1 kısmının dahili yazma tekniği hariç yukarıdaki bütün fabrikasyon metotları fiber çekirdeğine uygulanabilmesi için fiber bölümünün UV emilim polimer kaplamasından sıyrılmasını ister. Yüzey kirlendiğinden dolayı sonradan yeniden kaplanmış olsa bile bu fiberin gücünü azaltır. Tek bir fiberde makul bir zaman skalası içerisinde çok sayıda Bragg ızgaralarının kütle üretimi de imkansızdır. Bu iki probleme işaret etmek için fiber polimer ile kaplanmadan hemen önce fiber çizimi süresince fiber Bragg ızgaralarının üretimi gösterilmiştir [21].

Bu deneyde ışın tabanın altındaki 8 ayna vasıtasıyla yönlendirilmiştir. İnterferometre Şekil 6.3'te gösterildiği gibi şekilde ızgaraları ifade etmek için kullanıldı. Bu

interferometre fiber çapı monitörü ile kaplama kabı arasında fiber çizim kulesine doğrudan monte edildi. Yazma noktasının birkaç cm altında fiber içerisindeki yanal vibrasyonları azaltan kaplama sıvısı vardı. Bir tek silindirik lens 7x0.5 mm'lik bir ışına odaklandı. 3 m/dakika'lık bir hızla fiber çizilirken 20 ns'lik darbe süresince sadece 1 nm hareket etti. Eksenel yer değiştirme sonradan ihmal edildi. 23 m/dakika'ya kadar hızlar kullanıldı. Fiber çizim kulesi düzeneği ızgarayı yazıldıktan sonra teşhis eden bir 50:50 koplör ve bir spektrum analizör olan bir ELED'e yer açmak için hafifçe değiştirilmiştir.

Fiber çizimi süresince farklı Bragg dalga boylarının ilk zaman FBG'leri için üretiminde bulunarak Bragg ızgaraları ifadeleri sürecini geliştirmiştir. Fabrikasyon süresince çizim prosesinin 3 avantajından söz edilir.

1. Fiber Bragg ızgaraları çok daha hızlı üretilebilir. Üretimin daha önceden saat başına birkaç ızgara ile sınırlandırıldığı yerde şu anda sadece yazım lazerinin ateşleme frekansı ve fiber çizim hızıyla sınırlandırılmıştır.
2. Soyma, temizleme ve yeniden kaplama gerekli değildir. Böylelikle fiberde daha az güç azalması sağlanır.
3. Birçok FBG aralarında bağlantı olmadan aynı fiber serisi içerisinde dizilebilir. Bu dağılımlı hissetme uygulamaları için çok avantajlıdır.

Önerilen sistem normal fiber çizimi ile karşılaştırıldığında çalışma zamanında daha az maliyet içermekteydi. Gösterim için bir holografik girişim metre tasarlanmıştı. Odaksal sapma, ışın kesişimi ve fiber pozisyonu iki eğilme ve iki çevirme eksenini kullanarak sağlanmıştı. Kesişme açısı Bragg dalga boyunu değiştirmek için değişime uğratılmışlardı.

Bu deneydeki ızgaralar optimize edilmemiş ön şekle bağlı olarak en fazla % 3 yansıtılabilirliğe sahiptiler. Bu metot dağılımlı hissetme için özellikle gösterişli yapılarda büyük potansiyele sahiptir.

6.2.9 Diğer teknikler

Kaynak ayarlanabilir girişim ölçer metodu , prizma girişim ölçer metodu ve maske imge yansıtma metodu gibi metotlar fiber Bragg ızgaraları üretmenin başka metotları olarak gösterilmişlerdir.

Optik bir faz kayması tarafından ayrılan iki dalgalı Bragg ızgarası bir Moire ızgaralama rezonatörü olarak adlandırılır. 5 GHz bandında bir cevap içinde filtreler kullanılarak gösterilmiştir. Bu filtreler haberleşmede ve sinyal işlemede uygulamalara sahiptir.

Apodize ızgaralar normal bir faz maskesi ile ifade edilebilirler. Normalde apodizasyon ızgaraların uzunluğu boyunca kuplaj sabitinin genliğini değiştirerek meydana getirilir. Değişken yayılım verimliliğiyle oluşturulan bir faz maskesinin en büyük avantajı yeniden üretilebilirliktir. Apodize edilmiş ızgaraları için % 90 lık tepe yansıtabilirliği ile üretebilmek için bir faz maskesi ile çift maruz bırakma metodunun kombinasyonu kullanmıştır. ızgaralar, eğer bir tanesi merkez dalga boyundan ± 0.4 nm yansıtabilirlikle karşılaştırılırsa benzer karakteristiklerin apodize edilmemiş ızgaralara göre 20 dB'lik artış gösterirler.

6.3 Fiber Bragg ızgaraların Silinmesi

Fiber Bragg ızgaraların silinmesi konusundaki ilk deneyler ızgaraların monotonik UV aydınlatması tarafından silinebileceğini göstermiştir. Yeni ızgaralar önceki ızgaraların silindiği pozisyonda oluşturulurlar.

UV endüklü kırınım indeks değişikliklerinin termal silinmesi de mümkündür. Bu amaçla 1.559 μm 'lik bir Bragg dalga boyu ile % 81 yansıtabilirlikli ızgara AT&T Accutether 200 markalı fibere çizilmiştir. ızgaralar 15 dakika süre ile 450 °C bir sıcaklıkta 150 μm 'lik uzunluğa sahip fiber kısmının ısıtılmasıyla silindiler. Sonuçlar şunu gösterdi ki dizilim prosesi tarafından endüklenen değişiklikler önemli derecede tersine dönmüştür [12].

7. FİBER OPTİK SENSÖRLERDEKİ SICAKLIK VE GERİLME ALGILAMA ARASINDAKİ AYIRIM METOTLARI

7.1 Giriş

Gerilme ve sıcaklık arasındaki çapraz algılama problemi interferometrik fiber optik sensörler ve fiber Bragg ızgara (FBG) sensörlerinin her ikisinde de bulunmaktadır [22].

İnterferometrik sensörlerde, bu durum optik yolun çeşitli dış uyarılara hassas olması gerçeğinden dolayı oluşur. Uzun fiber algılama elemanı olarak kullanıldığında ve geniş uygulamalı gerilme veya sıcaklık değişimleri için kullanıldığında bu etkinin dikkate değer bir önemde olduğu görülmüştür [23].

FBG sensörlerinde sıcaklık ve gerilmenin her ikisi de sensörün pik yansımada dalgaboyu değişimine sebep olmaktadır. Bu yüzden gerilme ve sıcaklık arasındaki ayırımı tek ölçümle yapmak imkansızdır.

İnterferometrik ve FBG sensörlerinde doğruluk eşittir, ama FBG’de bilgi dalgaboyu domeninde sağlanmakta, kalibrasyon gereksinimini ve interferometrelerle ilgili olan önemli faz belirsizliğini ortadan kaldırmaktadır.

7.2 Fiber Optik Sensörlerin Gerilme ve Sıcaklığa Çapraz Hassasiyetine Karşı Önerilen Çözümler

Fiber Bragg sensörünün doğasından dolayı, gerilme mi yoksa sıcaklık değişimine mi maruz kaldığı açıklanamamaktadır. Bu bölümde gerilme ve sıcaklığın eş zamanlı ölçümlerine izin veren uygulanabilir birkaç yöntem tanıtılmıştır.

7.2.1 İnterferometrik sensörler ile çift kırılmalı interferometre kullanımı

Çift kırılmalı interferometre kullanmanın, polarizasyonu ve faz bilgisini iyileştirmenin hepsinin aynı anda yapılmasının, gerilme ve sıcaklık arasındaki çapraz hassasiyeti ortadan kaldırıldığı gösterilmiştir. Bu ölçme aralığını artırmak için kullanılan tekniklere benzer özelliktedir. Burada kullanılan polarizasyon hassasiyetinin faza oranı sıcaklık ve gerilme için farklıdır. Sıcaklık ve gerilme iki eşzamanlı denklemlerin çözülmesi ile bulunmuştur. Bu özgün sıcaklık sıkıştırılmalı gerilme sensörünün gerçekleştirilmesi için kullanışlı bir yöntemdir [24].

İki farklı optik modlarının veya yaygın Fourier spektroskopi dönüşümleri gibi diğer metotlar interferometrik sensörlerde kullanılmışlardır.

7.2.2 İkili dalga boyu fiber ızgara sensörleri

Akıllı yapılarda gerilme ölçmek için Fiber Bragg ızgara sensörlerinin dikkate değer uygunluğundan dolayı, bu sensörlerde sıcaklık ve gerilme arasındaki ayırımı yapabilmek çok önemlidir [25]. İnterferometrik fiber optik sensörlerin sıcaklık ve gerilme ayırımını yapabilmek üzerindeki araştırmaları takip eden araştırmalar sonucu iki üst üste getirilmiş Bragg ızgarasını içeren FBG sensöründe iki farklı Bragg dalgaboyunu kullanarak yapılmıştır. Kullanılan iki dalga boyu 1300 nm ve 850 nm'dir.

Bu metotun prensibi, gerilme ile ve termal olarak tetiklenmiş etkileşimlerin doğrusal olduğu kabul edilerek açıklanmıştır. Bragg dalgaboyu değişiklikleri $\Delta\lambda_{B\varepsilon}$ ve $\Delta\lambda_{BT}$ ile gösterilebilir.

$$\Delta\lambda_{B\varepsilon} = K_\varepsilon \Delta\varepsilon \quad (7.1)$$

$$\Delta\lambda_{BT} = K_T \Delta T$$

Bu denklemde $\Delta\varepsilon$ gerilme değişimini, ΔT sıcaklık değişimini gösterir ve $K_\varepsilon = \partial\lambda/\partial\varepsilon$ fiberin poisson oranı, fotoelastik katsayısı ve çekirdeğin etkili sapma içeriği ile

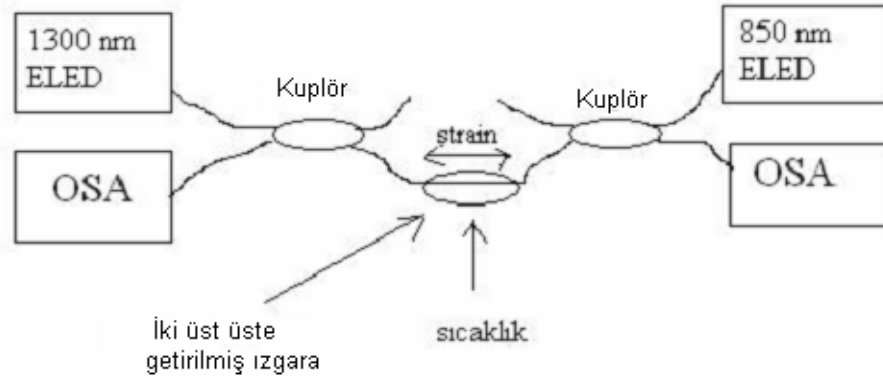
ilişkilidir. $K_T = \partial\lambda/\partial T$ termo-optik katsayı ve genleşme katsayısından gelmektedir [26,27].

Her iki üst üste getirilmiş ızgara aynı sıcaklık ve gerilme değişimlerine maruz bırakılmıştır. Fakat fotoelastik ve termo-optiğin dalgaboyu bağımsızlığından dolayı iki ızgaranın dalgaboyu değişimleri farklı olmuştur. Bu metot gerilme ve sıcaklık arasındaki ayırım için kullanılabilir. Gerilme ve termal yanıtın bağımsız olduğu kabulüne dayandığımızda 7.2 denklemi olarak verilen matris iki Bragg dalgaboyunu ölçmek için kullanılmaktadır.

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{\varepsilon 1} & K_{T1} \\ K_{\varepsilon 2} & K_{T2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{pmatrix} \quad (7.2)$$

Bu denklem küçük etkileşimler için ispatlanmıştır.

Deneysel kurulumun şematik gösterimi Şekil 7.1’de gösterilmiştir.



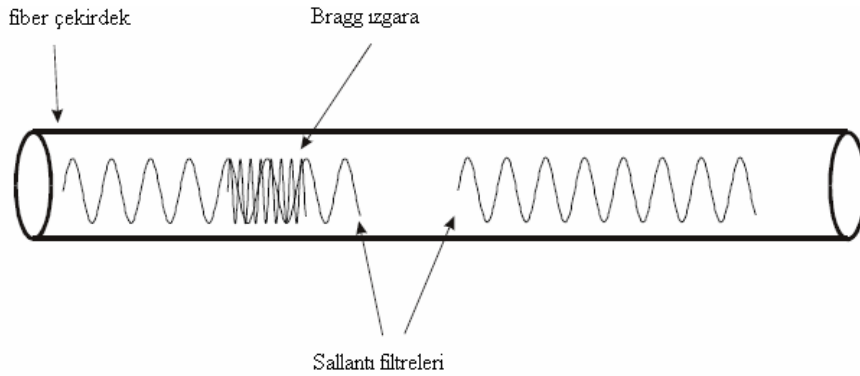
Şekil 7.1: İki dalgaboyu gerilme/sıcaklık ayırımı için deneysel düzenek

7.2.3 Gerilme ve sıcaklıkta çift kırılma ve fiber kırılma indeksinin bağımlılığını kullanma

Gerilme ve sıcaklık ölçümlerinde bir diğer eşzamanlı çözüm Çift kırılma ve Fiber Kırılma İndeksinin Bağımlılığını Kullanmadır. Burada Bragg ızgarası ve polarizasyon sallantı filtresi (her ikisi de foto-uyarımli fiber ızgaralar), algılama

bölgesi olan fiber parçasında aynı fiziksel bölümde yazılmışlardır. Fiber yayılım içeriğinin ve gerilme ve sıcaklığın çift kırınımının farklı bağımlılıklarını kullanarak, her iki ölçüm, her iki ızgaranın dalgaboyu rezonansına etkilerinden çıkartılabilir. Bragg ızgara sensörlerinde olduğu gibi, bilgi dalga boyu domeni içindedir. Bu kesin ölçümler kalibrasyon gereksinimini ortadan kaldırır [10].

Bu metot dalgaboyu veya zaman bölmeli çoğullamaya da uygulanabilir. Sensör Şekil 7.2’de görüldüğü gibidir.



Şekil 7.2: İki polarizasyon sallantı filtresi ve bir Bragg ızgara içeren sensör

7.2.4 Sıcaklık sıkıştırılmalı bragg ızgara

Gerilme ölçümünde sıcaklık için sıkıştırmada genel yöntem sensör ızgaraları ile dizi halinde olan aynı fiberlerin üzerinde ekstra ızgara olmasıdır. Bu ızgara daha sonra yerleştirilir, bu yüzden algılama ızgaraları gibi aynı sıcaklıkta deneyim elde eder, fakat ölçülen parametrelerden bağımsızdırlar. Bu yöntemde sadece sıcaklık ölçülür ve sıkıştırılabilir.

7.2.5 Sıcaklıktan bağımsız gerilme algılama

Yukarıdaki metodun çoklu algılama sisteminde birçok ızgaranın olduğu durumlarda uygulaması zordur.

Gerilme ve sıcaklık düzgün fiber Bragg ızgaradaki Bragg dalga boyunda değişikliğe sebep olur. Fakat etkili bant genişliği etkilenmez. Gerilme eğimi ızgara uzunluğunca etkilenirse, bant genişliği gerilme bağımlıdır. Diferansiyel aşındırma ile

sivrileştirilmiş çatı kalınlığında fiberdeki azalan adımlı fiber Bragg ızgaralarını üretme metodunu göstermiştir. Daha sonra bu yöntem gerilmeye başvurulduğu zaman doğrusal azalan adımlı olan ızgaralar gibi sivrilmemiş profilleri dizayn etme için kullanılmıştır. Bu ortalama gerilme ve ızgara boyunca gerilme değişkeni olan, daha sonra sıcaklıktan etkilenmeyecek etkili bant genişliğindeki değişim ile ölçülen, ε_{av} 'yi yaratmaktadır. Etkili bant genişliğinin sıcaklığa değil de gerilmeye bağlı olduğundan, ayırım imkansızdır. Eğer $R(\lambda, \varepsilon_{av})$ ızgara yansıtma profili ise, 7.3 ile verilen etkili bant genişliği;

$$B_{eff}(\varepsilon_{av}) = \int_0^{\infty} R_{eff}(\lambda, \varepsilon_{av}) d\lambda \quad (7.3)$$

Izgara eşzamanlı gerilme ve sıcaklık değişimine maruz bırakıldığı zaman, yansıyan ışık bant genişliği sadece gerilme değişimi ile değişir.

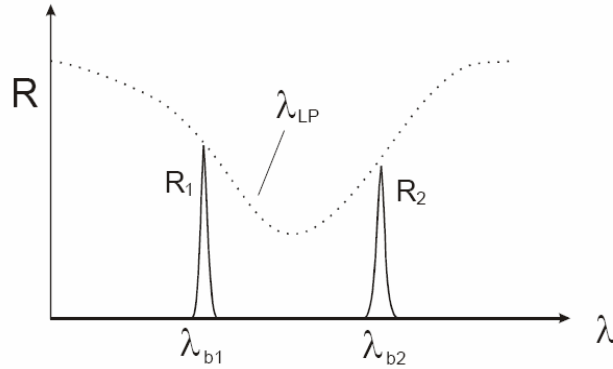
Bu dikkate değer kurgu, 4066 μe değer aralığı üzerinden 4.4 μe çözünürlüğü olan gerilme sensörü göstermiştir. Sıcaklıkta bant genişliğindeki değişimin yerine dalga boyundaki değişimin kontrolü ile eşzamanlı ölçülebilir.

7.2.6 Hibrid sensörler

FBG'den daha büyük sıcaklık, daha küçük gerilme tepkisi veren sıcaklık ve gerilme arasındaki ayırım için kullanılan diğer bir prensip uzun devirli ızgara(LPG) dir. Önceleri özel bir LPG'nin sıcaklığa cevabı FBG'nin kinin 7 katı olan 246 μm periyodda 0.06 nm/ $^{\circ}\text{C}$ olarak ölçmüştür. Gerilme hassaslığı da FBG'nin yarısı olarak 0.0005 nm/ μ 'dir.

Hibrid LPG/FBG sensörü LPG ve tek FBG ile kurulabilir, fakat LPG'nin büyük bant genişliğinden dolayı LPG merkez dalga boyunu ölçmek zordur. LPG nin yansıma spektrumunun olmayışı gerçeği, LPG'nin cevabını FBG'ninki ile karşılaştırmak için zor ve enstrümantasyon yoğunluklu yapmaktadır. Burada kullanılan teknik, LPG'nin merkez dalgaboyunun her iki tarafta pik yansımaları ile iki FBG içermektedir. FBG'nin bağlı yoğunluklarını ölçmek LPG'nin ordan sorgusuna izin verir. Şekil 7.3, LPG

nin, 2 ayrı fiber Bragg ızgaralarının R_1 ve R_2 yoğunluklarından nasıl sorgulandığını göstermektedir [28].



Şekil 7.3: Hibrid FBG/LPG sensörünün yansımaya spektrumu

Üç ızgara aynı fiberde seri halindedi ve LPG iki FBG'den önce yerleştirilmiştir.

7.2.7 Süperstrüktür fiber bragg ızgara

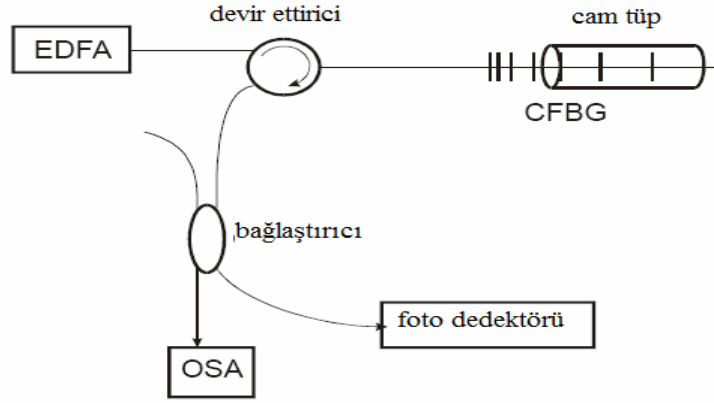
Gerilme ve sıcaklık eşzamanlı ölçümünü üretmenin diğer bir basit ve kolay metodu süperstrüktür fiber Bragg ızgaradır (SFBG). Bu, faz maske uzunluğu boyunca periyodik olarak modellenmiş pozlama kullanılarak üretilmiştir. SFBG, bir dalga boyu serisinde ileri propagasyonlu LP_{01} 'i ters propagasyonlu LP_{01} ile bitişirir. Bu iletim spektrumunda bazı dar kayıp uçlarına sebep olur. İleri yayılan LP_{01} modu ayrıca uzun periyodlu ızgarada olduğu gibi ileri yayılan kaplama modlarına bitişirilir [29]. Bundan dolayı, iletim spektrumunda çok geniş bant kayıp uçları artmaktadır. SFBG'nin bu parametreleri dar kayıp uçların geniş bant kayıp uçlarının bir tanesinin eğiminde yerleştirilmesi için optimize edilmelidir. Böylece her iki geniş bant ve dar bant kayıp uçlarındaki dalga boyu değişimi gerilme ve sıcaklığa hassastır fakat farklı tepkilerle. Gerilme ve sıcaklık, iletim spektrumunda dar bant kayıp uçlarının yoğunluk ve dalga boylarından eşzamanlı belirlenebilir çünkü dar bant uç dalga boyu ile ilgili olan bağıl geniş bant dalga boyuna bağımlıdır. SFBG'nin bu tipinin iletilen yoğunluğunun gerilme ve sıcaklığa logaritmik bir cevabı olduğu kabul edilir [31].

Bu sensörün avantajı yapımının kolay ve basit olması ve pahalı yayıcının veya bağlaştırıcının gereksinmediği yayılımcı tip sensör olmasıdır. Dezavantajı ise LPG'

nin geniş kayıp spektrumundan dolayı çoklu sistemlerde uygulamasının çok zor olmasıdır. Kaynak güç değişimleri için sıkıştırılmaya ihtiyacı olmasına rağmen.

7.2.8 Cam tüpte azalan adımlı ızgara

Cam tüpe azalan adımlı fiber Bragg ızgarayı (CFBG) kısmen gömerek sıcaklıktan bağımsız gerilmeyi algılayan bir metot Şekil 7.4’de gösterilmiştir.



Şekil 7.4: Azalan adımlı fiber Bragg ızgara(CFBG) ve cam tüp kullanılan gerilme sensörü.

EDFA : Erbiyum katkılı fiber amplifikatör.

Şekil 7.4. Azalan adımlı ızgaranın yarısının dalga boyunun uzun yansımasının silika cam tüpüne nasıl gömüldüğünü göstermektedir. Cam tüpü fibere yapıştırmak için epoksi kullanılmıştır. Böylece ızgaranın o parçası gerilmeden değil sadece sıcaklıktan etkilenmiştir. (Optiksel fiber ve cam tüp aynı sıcaklık tepkilerini verir).Cam tüpün dışındaki ızgaranın parçası gerilme ve sıcaklıktan etkilenmiştir. Cam tüp eğer orada olmasaydı bütün ızgara sıcaklıktan etkilenecek, ızgaranın tepkisi değişmez kalacaktı. Yansıyan dalga boyları değişebilir fakat bant genişliği değişmezdi.

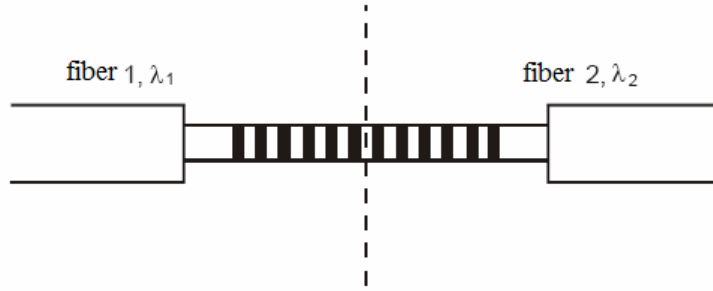
Gerilmeye cevabı orijinal CFBG sensöründen farklıdır. Daha uzun dalga boylarının gerilmeden etkilenmediği bilinmektedir. Başvurulan gerilme boyunca bu dalga boyları değişmez. Daha kısa yansıyan dalga boyları başvuru gerilme boyunca değişir ve daha uzun yansıyan dalga boylarının üzerine biner. Bu bant genişliğini

azaltır. Buna rağmen bu yansıyan gücü artırmaz. Şimdi daha dar bant genişliği olan yansıyan gücü ölçmek için foto dedektörü kullanıldığında, daha az yoğunluk ölçülür. Bu, kip çözücününun gerekmediği yoğunluk tabanlı sıcaklıktan bağımsız gerilme sensörünü verir.

Statik ve dinamik gerilmeler bu sensör ile ölçülebilir. Bu sorgulamak için ucuz ve üretilmesi kolaydır. Dezavantajları düşük çözünürlük ($\sim 13\mu$ gerilme rms/ $\sqrt{\text{Hz}}$) ve CFBG'nin büyük bant genişliğinden dolayı çoğullamanın zor olmasıdır. Trafik kontrolü gibi yüksek çözünürlük gerektirmeyen yerlerde uygulanabilmektedir.

7.2.9 Tek fiber ızgara kurgusu

Yapılan deneyler sonucu, tek fiber Bragg ızgara 2 farklı tip fiberi arasındaki ek yerine yazılmıştır. Şekil 7.5. Eşzamanlı gerilme ve sıcaklık sensörü ile tek FBG'nin yapısı gösterilmektedir [32].



Şekil 7.5: Eşzamanlı gerilme ve sıcaklık sensörü ile tek FBG'nin yapısı

Fiberler aynı çaptadırlar bu yüzden gerilmeye bağlı aynı ızgara mesafe değişikliklerine maruz kalırlar. Fakat fiberlerin farklı bileşimde olduklarından farklı termo-optik katsayılarına sahiptirler ve termal tepkileri de sonuç olarak farklıdır. Sonuçlar, tavlama sonrasında farklı bileşenlerden ötürü merkezleri arasında takriben 4 nm olan iki yansıma ucunu göstermektedir. Eşzamanlı sıcaklık ve gerilme ölçümleri için önerilen tek FBG sensörünün yapımı kolaydır ve algılama için sadece bir geniş bant kaynağa ihtiyaç vardır. Bu sensörleri çoğullama da mümkündür. Fakat her bir sensör için iki yansıma ucuna bağlı olarak ideal değildir.

BÖLÜM 8. FİBER BRAGG MODELLEME

Sensör performansını analiz etmek ve öneriler kısmında değindiğimiz faydaları elde etmek için Fiber Bragg ızgaraları kullanan bir simulasyon programı yapılmıştır.

8.1 Fiber Bragg Izgaralara Genel Bakış

Tezimizde de değindiğimiz üzere fiber Bragg ızgaraları fiber çekirdeğinin propagasyon yönü boyunca kırınım indisinin periyodik değişimleri ile oluşturulurlar. Bağlaşımlı kip teorisi zayıf kuplajlı dalga kılavuzundaki ışık propagasyonunu analiz etmek için yaygın olarak kullanılırlar. Fiber Bragg ızgaraları da zayıf kuplajlı dalga kılavuzu yapısındadır.

Bağlaşımlı kip teorisinden faydalanılarak ızgaradaki ışık propagasyonunu belirleyen bağlaşımlı kip eşitlikleri elde edilir. Bu bağlaşımlı kip eşitliklerini analitik yöntemlerle çözebilmek mümkün olmadığından sayısal yöntemler kullanılır. Transfer matrisi metodu ve direk sayısal integrasyon metodu bağlaşımlı kip eşitliklerini çözmek için kullanılabilir.

Denklem (8.1)'de fiber çekirdeğinin kırılma indisinin periyodik değişimi gösterilmiştir. Bu kırılma indisi değişimli kısa uzunluklu optik fibere fiber Bragg ızgarası denir. Kırılma indisi profili şu şekil ifade edilir [10]:

$$n(x, y, z) = \bar{n}(x, y, z) + \delta n(x, y, z) \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) \quad (8.1)$$

Bu denklemde $\bar{n}(x, y, z)$ çekirdeğin ortalama kırılma indisidir, $\delta n(x, y, z)$ kırılma indisi modülasyonu ve Λ da Bragg periyodudur.

Gelen ışığın küçük bir miktarı her periyodik kırılma indisi değişiminde yansımaya uğrar. Güçlü bir mod bağlaşımı oluşturulduğunda bütün yansıyan ışık dalgaları belirli

bir dalga boyundaki geniş bir yansımada toplanır. Buna Bragg şartı ve yansımının oluştuğu dalga boyuna da Bragg dalgaboyu denir. Daha önceki bölümlerde de verdiğimiz denklem 8.2 bu şartla ilişkilidir. Sadece Bragg şartını sağlayan bu dalga boyları etkilenir ve güçlü bir şekilde yansıtılır. Gelen ışığın yansıtılabilirliği Bragg dalga boyunda zirve yapar. Esasında Bragg ızgaraları gelen ve yansıyan ışınların faz çakışmasının oluştuğu Bragg dalga boyu dışındaki dalga boylarında gelen ışık için geçirgendir.

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (8.2)$$

(8.2) denkleminde Bragg dalga boyunun kırılma indisi ve ızgara periyoduna bağlı olduğu görülmektedir. Etkin kırılma indisi, n_{eff} , ve Bragg periyodu, Λ , tekdüze (uniform) Bragg ızgaraları için sabittir. Tekdüze Bragg dalga boyları temelde bir yansımaya filtresidir. Uygulamaya göre, 0.1 nm'den daha az band genişliğine sahip olabilirler. Bragg dalga boyundaki yansıtıcılık % 1 kadar küçük mertebelerde dizayn edilebileceği gibi % 99.9'dan büyük olarak da dizayn edilebilir. Foto duyarlılık, apodizasyon, dispersiyon, band genişliği kontrolü, sıcaklık ve gerilme cevabı gibi fiber Bragg karakteristikleri optik haberleşme ve sensör sistemlerinde kullanılırlar.

8.2 Bağlaşımlı Kip Teorisi

Çalışmanın genelinde ilgilendiğimiz konu Bragg ızgaralarının spektral cevabıdır. Fiber Bragg ızgara spektrumunun karakteristiği çeşitli yaklaşımlar ile çözülebilir. Bunlardan en çok kullanılanı bağlaşımlı kip teorisi. Bağlaşımlı kip teorisi dalga kılavuzu boyunca yavaşça değişen indisli bir dalga kılavuzunda optik dalganın propagasyonunu tarif etmek için uygun bir araçtır. Fiber Bragg ızgaralarda bu yapıdadır. Bağlaşımlı kip teorisinin temel düşüncesi pertubasyonlu bir dalga kılavuzunun elektriksel alanının, pertubasyonsuz alan dağılımı modlarının doğrusal bir kombinasyonu ile temsil edilebileceğidir.

Fiberin mod alanı şu şekilde ifade edilir:

$$E_{\pm j}(x, y, z) = e_{\pm jt}(x, y) \exp(\pm i\beta_j z) \quad j=1,2,3,\dots \quad (8.3)$$

Bu denklemde $e_{\pm jt}(x, y)$, j. propagasyon modunun enine elektrik alanının genliğidir ve \pm propagasyon yönünü temsil eder. β_j propagasyon sabitini veya j. modun özdeğerini olarak adlandırılır. Genellikle her mod kendine has bir β_j değerine sahiptir. Fiberdeki optik dalga kılavuzu boyunca ışığın propagasyonu Maxwell denklemleri ile açıklanır.

Bağlaşımlı kip teorisine göre, bozunumlu fiberin z pozisyonundaki elektriksel alanın enine bileşeni bozunumsuz fiberin ideal kılavuzlanmış modlarının doğrusal süperpozisyonu ile ifade edilebilir.

$$\vec{E}_t(x, y, z, t) = \sum_j [E_j(x, y, z, t) + E_{-j}(x, y, z, t)] \quad (8.4)$$

(8.3)'deki mod alan eşitliklerini (8.4)'de yerine koyduğumuzda elektriksel alanı şu şekilde yazabiliriz.

$$\vec{E}_t(x, y, z, t) = \sum_j [A_j^+(z) \exp(i\beta_j z) + A_j^-(z) \exp(-i\beta_j z)] \vec{e}_{jt}(x, y) \exp(-i\omega t) \quad (8.5)$$

$A_j^+(z)$ ve $A_j^-(z)$ sırasıyla j. ileriye ve geriye doğru hareket eden yavaşça değişen genliklerdir. β_j propagasyon sabiti, $\vec{e}_{jt}(x, y)$ ise enine mod alanıdır.

Izgaranın indisi fiber boyunca z-bağımlıdır. Bundan dolayı (8.1) denklemindeki kırılma indisi $n(x, y, z)$ 'yi şu şekilde yazabiliriz.

$$n(x, y, z) = n(z) = n_0 + \delta n_0 + \delta n(z) \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + \varphi(z)\right) \quad (8.6)$$

Ortalama kırılma indisi \bar{n} , $n_0 + \delta n_0$ temsil edilmektedir ve $n_0 \gg \delta n_0$ 'dır. n_0 , çekirdeğin bozunumsuz kırılma indisi iken δn_0 , ortalama indis modülasyonudur (DC değişim). $\delta n(z)$ indis modülasyonunun küçük genliğidir (AC değişim). $\varphi(z)$ ise ızgaranın fazıdır.

Izgaradaki elektriksel alanın dağılımı, $\vec{E}_t(x, y, z, t)$, skaler dalga propagasyonu eşitliğini sağlar. Bunun öncesinde zayıf propagasyon yaklaşımı altında Maxwell denklemlerinin bir sadeleştirilmesi yapılır.

$$\left\{ \nabla_t^2 + k^2 n^2(x, y, z) - \beta^2 \right\} \vec{E}_t(x, y, z, t) = 0 \quad (8.7)$$

$k=2\pi/\lambda$, boşluktaki propagasyon sabitidir ve λ da boşluktaki dalga boyudur.

Elektriksel alanın $\vec{E}_t(x, y, z, t)$, ve kırılma indisi $n(x, y, z)$, (8.7)'deki dalga propagasyon denkleminde yerine koyulursa aşağıdaki bağlaşımlı kip denklemleri elde edilir.

$$\frac{dA_n^+}{dz} = i \sum_m A_m^+ (K_{mn}^t + K_{mn}^z) \exp[i(\beta_m - \beta_n)z] + i \sum_m A_m^- (K_{mn}^t - K_{mn}^z) \exp[-i(\beta_m + \beta_n)z] \quad (8.8)$$

$$\frac{dA_n^-}{dz} = -i \sum_m A_m^+ (K_{mn}^t - K_{mn}^z) \exp[i(\beta_m + \beta_n)z] - i \sum_m A_m^- (K_{mn}^t + K_{mn}^z) \exp[-i(\beta_m - \beta_n)z] \quad (8.9)$$

Bu denklemde $K_{mn}^t(z)$, n ve m modları arasındaki enine bağlaşım katsayılarıdır [33].

$$K_{mn}^t(z) = \frac{\omega}{4} \iint_{\infty} dx dy \Delta \varepsilon(x, y, z) \vec{e}_{mt}(x, y) \vec{e}_{nt}^*(x, y) \quad (8.10)$$

Bu denklemde $\Delta \varepsilon$, elektriksel geçirgenlikteki bozunumdur. Zayıf dalga kılavuzu yaklaşımı altında ($n \gg \delta n$), $\Delta \varepsilon \cong 2n\delta n$ 'dir. Genelde, fiber modlar için $K_{mn}^z \ll K_{mn}^t$ şeklinde olduğu için bu katsayı ihmal edilir.

8.3 Fiber Bragg Izzaraları Simulasyonu

8.3.1 Giriş

Optik fiberde çekirdeğin kırılma indisi yeleğinkinden büyüktür. Tek modlu fiberin yeleğinde hiçbir dalganın prapagasyonda olmadığını farz edersek, sadece fiberde sadece karşı prapagasyon modları bulunmaktadır. İki mod yaklaşımı altında, Bragg ızgaraların bağışlımlı kip eşitlikleri (8.8) ve (8.9), (8.12) ve (8.13) eşitliklerine basitleştirilebilir. Bu eşitliklerle tanımlanan tekdüze Bragg ızgaraları analitik metodlarla çözülebilir.

Tekdüze olmayan ızgaralar için, bu bağışlımlı kip eşitliklerine analitik bir çözüm bulmak çok zordur. Bu yüzden bu bağışlımlı kip eşitliklerine sayısal çözümler getirilir. Bunun için 2 uygun metod vardır. İlki Runge-Kutta metodu ile direk integrasyondur.

Diğer bir yaklaşımda transfer matris metodunu kullanmaktır [20], [33]. Bu metod neredeyse periyodik ızgaraların analizinde etkindir. Bu analiz için, ızgaralar her biri bir analitik transfer matrisli bir grup tekdüze parçaya bölünür. Bütün ızgaranın transfer matrisi bağımsız transfer matrislerinin çarpılması ile elde edilir. Spektrum cevabı, zaman gecikmesi ve dispersiyon her iki yöntemle de elde edilebilir.

8.3.2. Fiber bragg ızgaraların modellemesi

Bir çok fiber ızgarada, uyarılmış indis değişimi çekirdek boyunca yaklaşık olarak tekdüzedir ve çekirdeğin dışında prapagasyon modu yoktur. Bu faraziye dayanarak fiberin yeleğindeki modlar simulasyonda ihmal edilir. Yelekteki modları ihmal ettiğimizde ızgaranın elektriksel alanı sadece çekirdekteki ileriye ve geriye temel modların süperpozisyonu olarak sadeleştirilebilir. Denklem (8.4)'deki fiber çekirdeği boyunca elektriksel alan iki mod yaklaşımı altında iki karşı prapagasyon moduna göre ifade edilebilir.

$$E(x, y, z) = [A^+(z) \exp(-i\beta z) + A^-(z) \exp(i\beta z)]e_t(x, y) \quad (8.11)$$

$A^+(z)$ ve $A^-(z)$ sırasıyla fiber çekirdeği boyunca ileriye ve geriye hareketli dalgaların yavaşça değişen genlikleridir. $E(x,y,z)$ (8.8) ve (8.9) eşitliklerinde yerine koyulabilir. Böylece bağımlı kipler eşitlikleri şu şekilde iki moda sadeleştirilebilir.

$$\frac{dR(z)}{dz} = i\hat{\sigma}(z)R(z) + ik(z)S(z) \quad (8.12)$$

$$\frac{dS(z)}{dz} = -i\hat{\sigma}(z)S(z) + ik^*(z)R(z) \quad (8.13)$$

Bu denklemde $R(z) = A^+(z) \exp[i(\delta z - \phi/2)]$ ve $S(z) = A^-(z) \exp[-i(\delta z + \phi/2)]$ 'dir. $R(z)$ ileriye mod iken $S(z)$ tersine moddur ve yavaşça değişen zarf fonksiyonlarını temsil ederler. $\hat{\sigma}$ genelde DC oto-kuplaj katsayısı diye adlandırılırken yerel detuning diye de adlandırılır. $k(z)$ de AC kuplaj katsayısıdır ve ayrıca yerel ızgara direnci olarak da adlandırılır.

Sadeleştirilmiş bağımlı kipler eşitlikleri Bragg ızgaralarının spektrum cevabının simulasyonunda kullanılır. Kuplaj katsayısı $k(z)$ ve yerel detuning $\hat{\sigma}(z)$ sadeleştirilmiş bağımlı kipler eşitliklerinin iki önemli parametresidir. Bunlar Bragg ızgaralarının spektrum cevabının hesaplanmasında temel parametrelerdir.

$$\hat{\sigma} = \delta + \sigma - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz} \quad (8.14)$$

$\frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz}$ ızgaralama periyodunun olası lineer değişimini ifade ederken ϕ de ızgara fazını temsil eder. Detuning δ ise şu şekilde ifade edilir.

$$\delta = \beta - \frac{\pi}{\Lambda} = \beta - \beta_D = 2\pi n_{eff} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_D} \right) \quad (8.15)$$

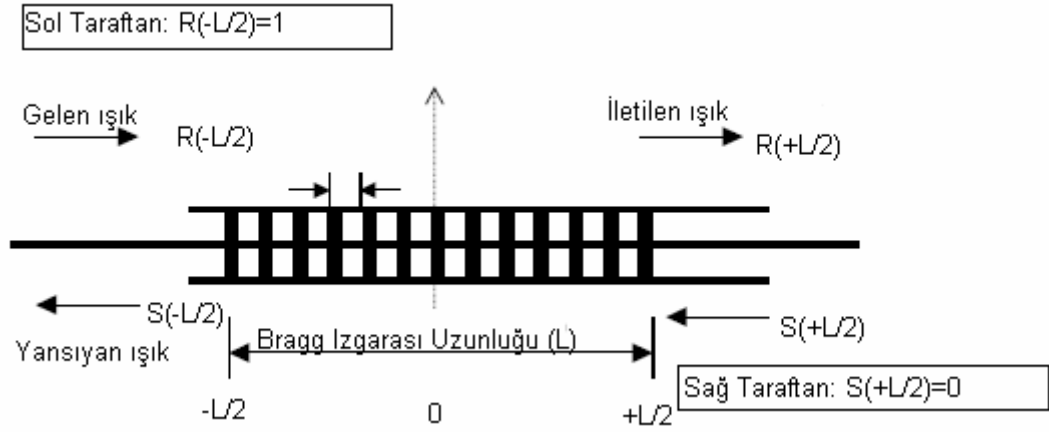
$\lambda_D = 2 n_{eff} \Lambda$ çok zayıf bir ızgara aracılığıyla ($\delta n_{eff} \rightarrow 0$) Bragg yansıması için dalga boyu modelidir.

$$\sigma = \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\delta n_{eff}} \quad (8.16)$$

$\overline{\delta n_{eff}}$, arka plan kırılma indisi değişimidir.

$$k(z) = \frac{\pi}{\lambda} \delta n(z) g(z) v \quad (8.17)$$

Bu denklemden $g(z)$ apodizasyon fonksiyonu iken v de saçak görünürlüğüdür. Kuplaj katsayısı $k(z)$ kırılma indisinin modülasyon derinliğine $\Delta n(z) = \delta n(z) g(z)$ orantılıdır.



Şekil 8.1: Başlangıç koşulu ve giren alan ızgara cevabının hesaplanması

Başlangıç koşulu ve giren alan ızgara cevabının hesaplanması Şekil 8.1’de gösterilmiştir. Iızgaranın sağ tarafından gelen herhangi bir giriş sinyali yoktur $S(+L/2)=0$. Iızgaranın sol tarafından gelen sinyal ise mevcuttur $R(-L/2)=1$. Bu iki sınır koşuluna dayanarak başlangıç koşulu olarak (8.18) ve (8.19) eşitlikleri yazılabilir. Iızgaranın yansıma ve iletim katsayıları başlangıç koşullarından ve bağımlı olarak eşitliklerinden çıkartılabilir.

Sol Taraf:

$$\begin{cases} S(-L/2) = ? \\ R(-L/2) = 1 \end{cases} \quad (8.18)$$

Sağ Taraf:

$$\begin{cases} R(+L/2) = ? \\ S(+L/2) = 0 \end{cases} \quad (8.19)$$

Yansıma katsayısının ρ , genliği şu şekilde yazılabilir.

$$\rho = \frac{S(-L/2)}{R(-L/2)} \quad (8.20)$$

Güç yansıma katsayısı, r , şu şekilde yazılabilir.

$$r = |\rho|^2 \quad (8.21)$$

8.3.3 Tekdüze bragg ızgaraları

Tekdüze Bragg ızgaraları şartında faz çakışması ve kuplaj katsayısı sabittir. (8.12) ve (8.13) denklemleri sabit katsayılı birinci dereceden diferansiyel eşitliklerdir. Bu eşitliklerin analitik çözümleri vardır. Bağlaşımli kip eşitliklerinin analitik çözümleri (8.18) ve (8.19) sınır koşulları ile bulunabilir.

Cıvıltı $\frac{d\phi}{dz}$ sıfır olduğundan, yerel detuning $\hat{\sigma}(z)$ de Detuning δ 'ye eşit olur [33].

Kompleks yansımanın ve iletim katsayısının çözümü şu şekilde ifade edilir:

$$A^-(z) = \frac{-ik \sinh[\gamma_B(z - L/2)]}{i\hat{\sigma} \sinh(\gamma_B L) + \gamma_B \cosh(\gamma_B L)} \quad (8.22)$$

$$A^+(z) = \frac{\gamma_B \cosh[\gamma_B(z - L/2)] - i\hat{\sigma} \sinh[\gamma_B(z - L/2)]}{i\hat{\sigma} \sinh(\gamma_B L) + \gamma_B \cosh(\gamma_B L)} \quad (8.23)$$

$$\gamma_B = \sqrt{k^2 - \hat{\sigma}^2} \quad (k^2 > \hat{\sigma}^2) \quad (8.24)$$

$$\gamma_B = i\sqrt{\hat{\sigma}^2 - k^2} \quad (k^2 < \hat{\sigma}^2) \quad (8.25)$$

Buradan yansıyan ve iletilen spektrum elde edilebilir.

$$r(\lambda) = \frac{k^2 \sinh^2(\gamma_B L)}{\hat{\sigma}^2 \sinh^2(\gamma_B L) + \gamma_B^2 \cosh^2(\gamma_B L)} \quad (8.26)$$

$$t(\lambda) = \frac{\gamma_B^2}{\hat{\sigma}^2 \sinh^2(\gamma_B L) + \gamma_B^2 \cosh^2(\gamma_B L)} \quad (8.27)$$

Enerjinin korunumu kanuna göre $r(\lambda) + t(\lambda) = 1$ 'dir. Gelen ışık ile ilgili olarak yansıyan ışığın fazı (8.22) ve (8.23) eşitliklerinden elde edilebilir.

$$\Phi(\lambda) = \tan^{-1} \left[\frac{\gamma_B}{\hat{\sigma}} \coth(\gamma_B L) \right] \quad (8.28)$$

Bragg dalgaboyunda, $\hat{\sigma} = 0$, ızgara azami yansıtıcılığa, r_{\max} , sahiptir.

$$r_{\max} = r(\lambda_D) = \tanh^2(|k|L) \quad (8.29)$$

(8.29) eşitliğinden de görüldüğü üzere indis modülasyonu ve ızgara uzunluğu artırıldığında Bragg ızgaralarının yansıtıcılığı bire yaklaşır. Band genişliği $\Delta\lambda$ $r(\lambda_D + \Delta\lambda/2) = r(\lambda_D)/2$ ve (8.26) eşitliğinden elde edilebilir. Bu eşitlikleri çözmek için sayısal yöntem kullanılır.

8.3.4. Direkt sayısal integrasyon metodu

Tekdüze olmayan ızgara şartında bağışlımlı kip eşitlikleri iki mod yaklaşımı altında yansıma ve iletim spektrumunun hesaplanması çeşitli farklı yaklaşımlar yardımıyla çözülebilir. Hali hazırda iki doğru simulasyon tekniğı uygundur. Bir tanesi 4.mertebeden sabit yada adaptif adımlı Runge-Kutta sayısal integrasyon metodu kullanarak bağışlımlı kip eşitliklerinin direkt sayısal integrasyonudur. Diğeri ise bir transfer matris metodu kullanmaktır.

Eğer sadece yansıma spektrumu ile ilgileniyorsak, fiber Bragg ızgaralarının spektrumunu, dispersiyonunu ve zaman gecikmesini elde etmenin diğeri basit bir yöntemi vardır. İki modlu bağışlımlı kip eşitlikleri (8.12) ve (8.13) Ricatti diferansiyel eşitliğı olarak bilinen tek bir diferansiyel eşitliğı sadeleştirilebilir. Simulasyon zamanı azaltılır çünkü sayısal entegrasyon için sadece bir denkleme ihtiyaç vardır.

8.3.4.1. Runge-Kutta metodu

Runge-Kutta metodu $dy/dx=f(x,y)$ 'nin daha yüksek türevlerini açık bir şekilde hesaplamak zorunda kalmaksızın bir Taylor serisinin daha yüksek mertebeden doğruluğunu sağlar. Bu metod orta nokta kuadratür kullanır. M. Dereceden Runge-Kutta metodunun olası formülünün genel formu şöyledir.

$$y_{n+1}=y_n+h_n(a_1K_1+a_2K_2+\dots+a_mK_m) \quad (8.30)$$

4. mertebeden Runge katsayılı Runge-Kutta formülü:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \quad (8.31)$$

Denklemdaki K_s şu şekilde hesaplanır:

$$K_1 = f(x_n, y_n) \quad (8.32)$$

$$K_2 = f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}K_1\right) \quad (8.33)$$

$$K_3 = f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}K_2\right) \quad (8.34)$$

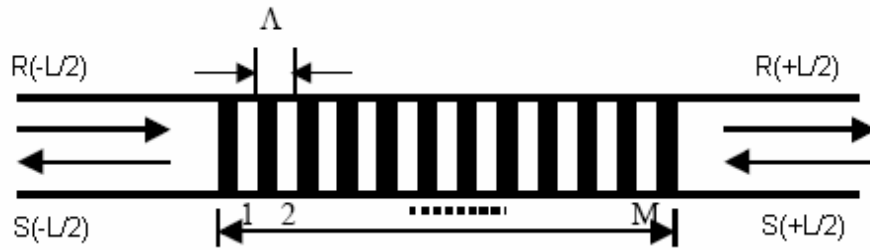
$$K_4 = f(x_n + h, y_n + hK_3) \quad (8.35)$$

Bu denklemlerde h, bir sonraki intgrasyon noktasına adım, x ise durum değişkenidir.

Yukarıdaki 4. mertebeden Runge-Kutta metodunun yerel kırpma hatası h^5 mertebesindedir.

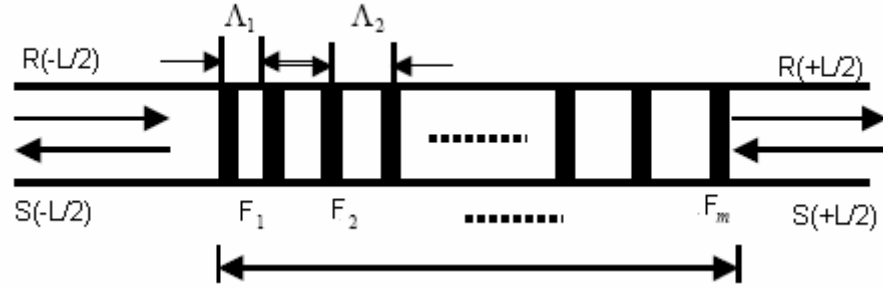
8.3.5. Tekdüze ızgaralar için transfer matris metodu

Bağlaşımli kip eşitlikleri (8.2) ve (8.3) tekdüze ve tekdüze olmayan ızgaraların her ikisi için de transfer matrisi metodu ile çözülebilir. Şekil (8.2) tekdüze bir Bragg ızgarasının çözümlü için transfer matrisi metodunun kullandığı temel ideal yapıdır. Kırılma indisi farklılığı ve periyodu sabit kalır. Bu durumda 2x2'lik transfer matrisi ızgaranın her periyodu için özdeştir. Toplam transfer matrisi bağımsız transfer matrislerinin çarpımı ile elde edilir.



$$\begin{bmatrix} R_{+L/2} \\ S_{-L/2} \end{bmatrix} = F^M \begin{bmatrix} R_{-L/2} \\ S_{+L/2} \end{bmatrix}$$

Şekil 8.2(a): Tekdüze ızgaralar için transfer matrisi metodu ilke diyagramı



$$\begin{bmatrix} R_{+L/2} \\ S_{-L/2} \end{bmatrix} = F_M \cdot F_{M-1} \dots F_i \dots F_1 \cdot \begin{bmatrix} R_{-L/2} \\ S_{+L/2} \end{bmatrix}$$

Şekil 8.2(b): Tekdüze olmayan ızgaralar için transfer matrisi metodu ilke diyagramı

8.3.5.1. Tekdüze olmayan ızgaralar için transfer matris metodu

Transfer matrisi tekdüze olmayan ızgaraların çözümü için de kullanılabilir. Bu metod hemen hemen periyodik ızgaraların analizinde etkilidir. Tekdüze olmayan fiber Bragg ızgaralar fiber boyunca birçok tekdüze kısma bölünebilir. Gelen ışık dalgası bir transfer matrisi, F_i ile tanımlanan her tekdüze kısım, i , boyunca propagasyonla ilerler. Fiber Bragg ızgara yapısı için matris, F_i , şu şekilde tanımlanır.

$$F_i = \begin{bmatrix} \cosh(r_B \Delta z) - i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sinh(r_B \Delta z) & -i \frac{k}{\gamma_B} \sinh(r_B \Delta z) \\ i \frac{k}{\gamma_B} \sinh(r_B \Delta z) & \cosh(r_B \Delta z) + i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sinh(r_B \Delta z) \end{bmatrix} \quad (8.36)$$

Buradaki k eşitlik (8.17)'de, $\hat{\sigma}$ eşitlik (8.14)'de ve γ_B 'de eşitlik (8.24) ve (8.25)'de tanımlanmıştır. Tüm ızgaralar da şu şekilde gösterilebilir.

$$\begin{bmatrix} R_{+L/2} \\ S_{-L/2} \end{bmatrix} = F_M \cdot F_{M-1} \dots F_i \dots F_1 \cdot \begin{bmatrix} R_{-L/2} \\ S_{+L/2} \end{bmatrix} \quad (8.37)$$

8.3.6. Zaman gecikmesinin ve dispersiyonun hesaplanması

Izgaranın grup zaman gecikmesi ve dispersiyonu yansıma ve iletim katsayılarının faz bilgisinden elde edilebilir.

Izgarada yansıyan ışığın zaman gecikmesi, τ_ρ , şu şekilde ifade edilir:

$$\tau_\rho = \frac{d\theta_\rho}{d\omega} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\theta_\rho}{d\lambda} \quad (8.38)$$

$$\frac{d\theta_\rho}{d\lambda} = -\tau_\rho \frac{2\pi c}{\lambda^2} \quad (8.39)$$

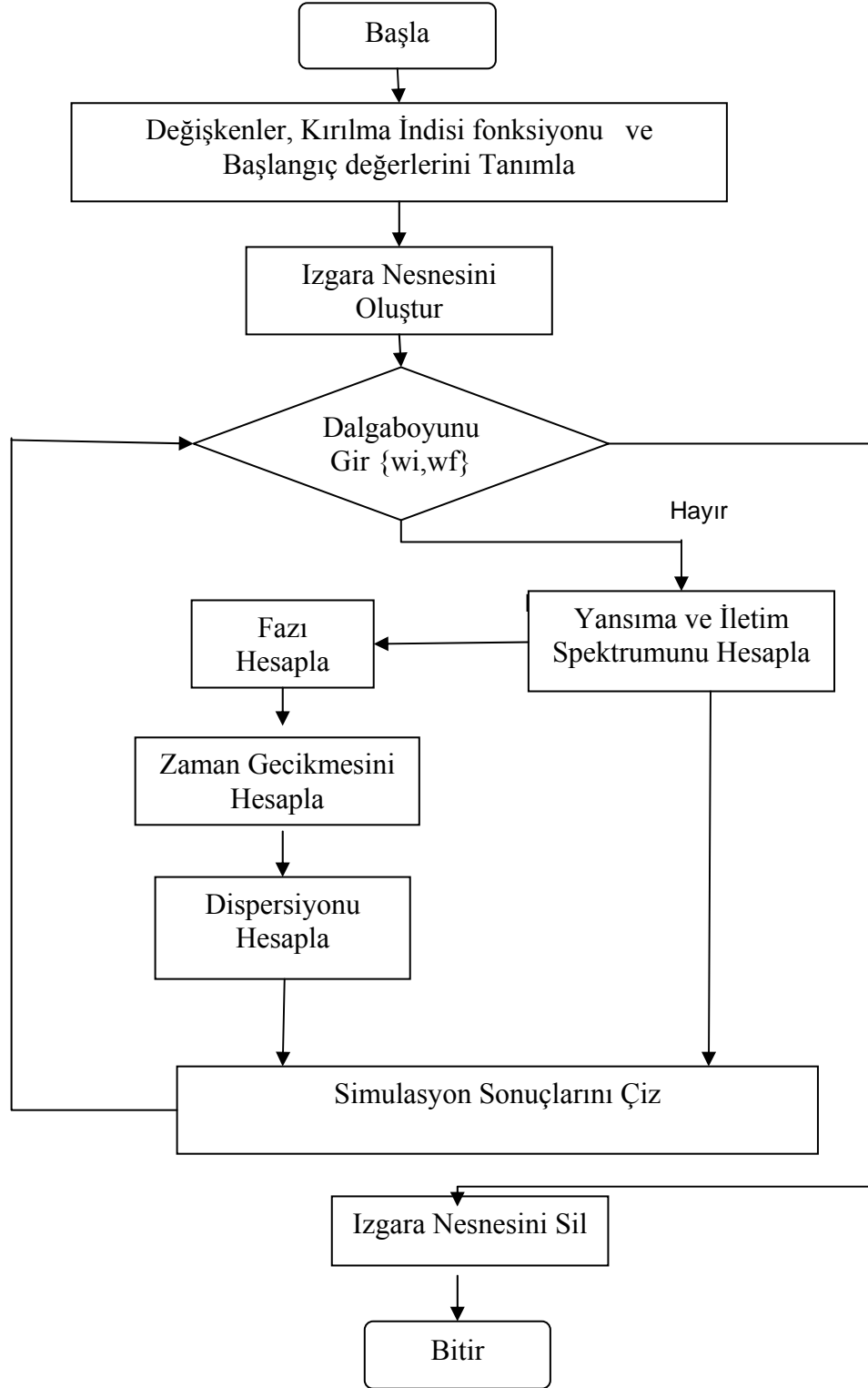
Dispersiyon, d_ρ , (ps/nm'de) şu şekilde ifade edilir:

$$d_\rho = \frac{d\tau_\rho}{d\lambda} = \frac{2\tau_\rho}{\lambda} - \frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d^2\theta_\rho}{d\lambda^2} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d^2\theta_\rho}{d\omega^2} \quad (8.40)$$

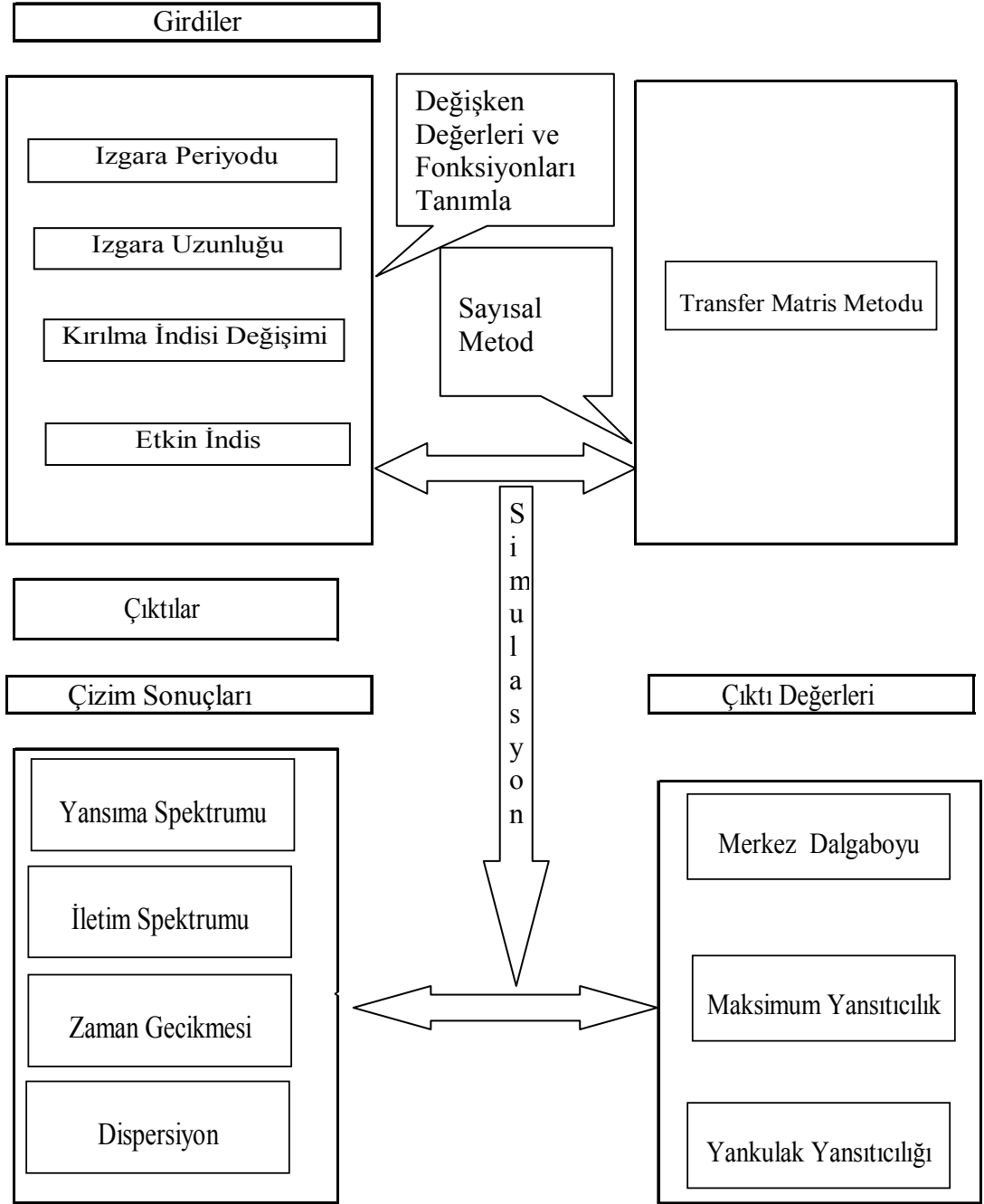
$$\frac{d^2\theta_\rho}{d\lambda^2} = \frac{2\pi c}{\lambda^2} \left(\frac{2\tau_\rho}{\lambda} - d_\rho \right) \quad (8.41)$$

Izgaradaki zaman gecikmesi ve dispersiyonun çıktı sonuçlarının hesaplanması ile sistem parametreleri optimizasyonu karşılaştırması yapılabilir. Bu da bize özel bir uygulama için en uygun olanı bulmamızı sağlar.

8.4. Programın Akış Şemaları



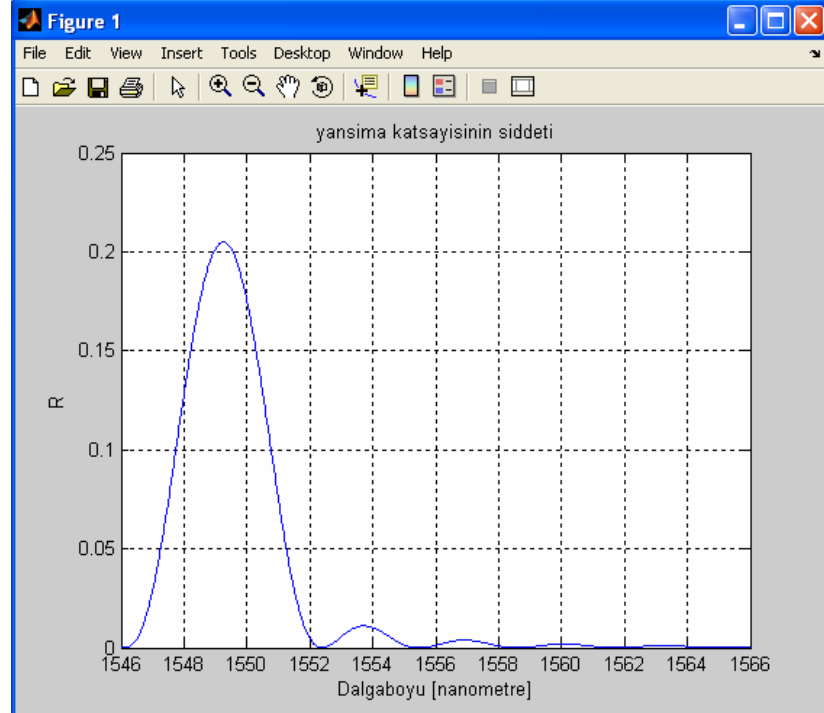
Şekil 8.3: Izgara sınıfı kullanımının akış şeması



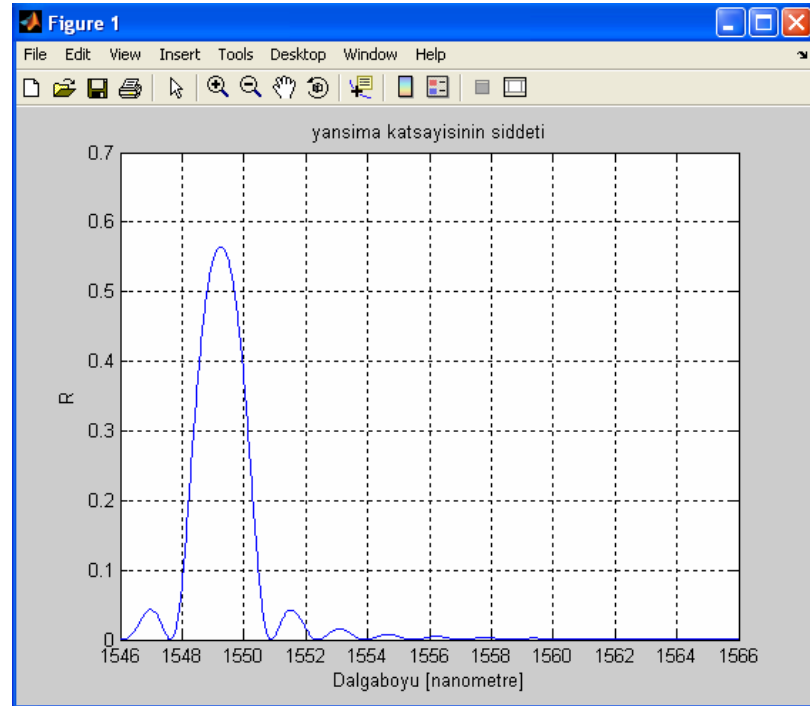
Şekil 8.4: Simulasyon prosesinin akış şeması

8.5. Simulasyon Sonuçları

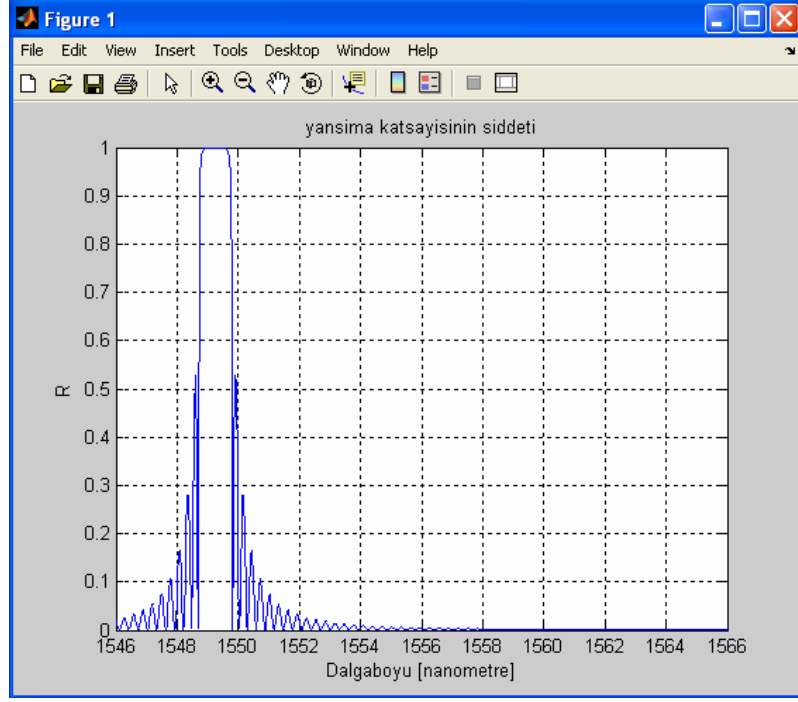
8.5.1. Maksimum yansıma ve yansıma bandgenişliği ile ızgara uzunluğu



şekil 8.5: $n_{core}=1.447, \delta n=0.0009$ için $L_1=267500$ iken yansıma-dalgaboyu grafiği



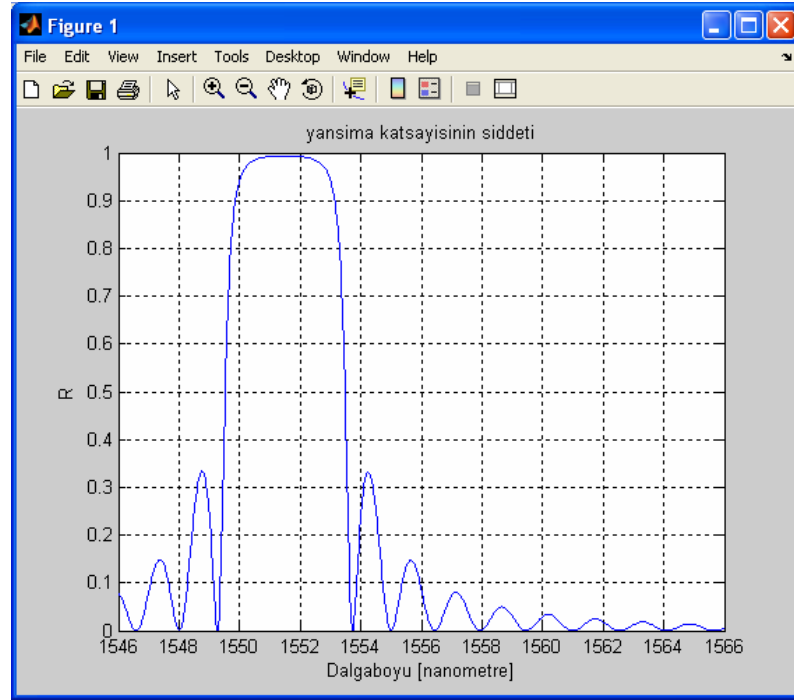
şekil 8.6: $n_{core}=1.447, \delta n=0.0009$ için $L_2=535000$ iken yansıma-dalgaboyu grafiği



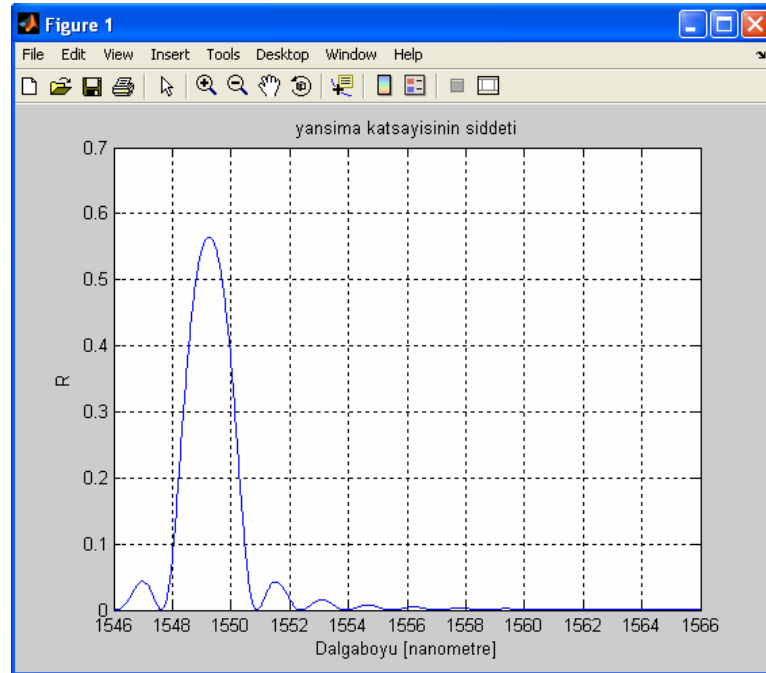
Şekil 8.7: $n_{core}=1.447, \delta n=0.0009$ için $L_3=2675000$ iken yansımada dalgaboyu grafiği

Şekil 8.5, şekil 8.6 ve şekil 8.7 maksimum yansımada ile ızgara uzunluğu arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Izgara uzunluğu artırılınca maksimum yansımada doymaya ulaşmaya kadar artar. Bunun yanı sıra yansımada band genişliği ile ızgara uzunluğu arasında ise ters orantı vardır. Izgara uzunluğu arttıkça yansımada band genişliği azalır. İndis değişimi yükseltildikçe azalma hızı yavaşlar.

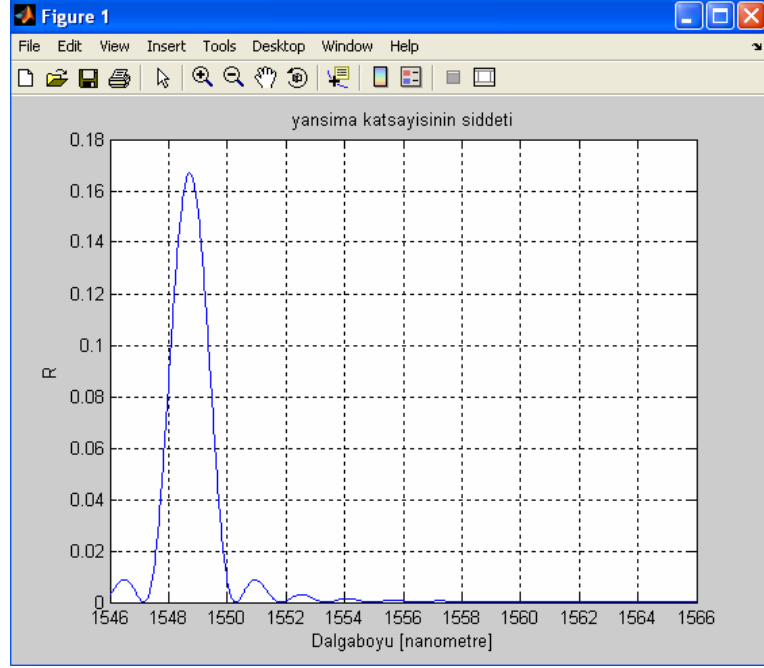
8.5.2. Maksimum yansımaya ve yansımaya bandgenişliği ile indis değişimi



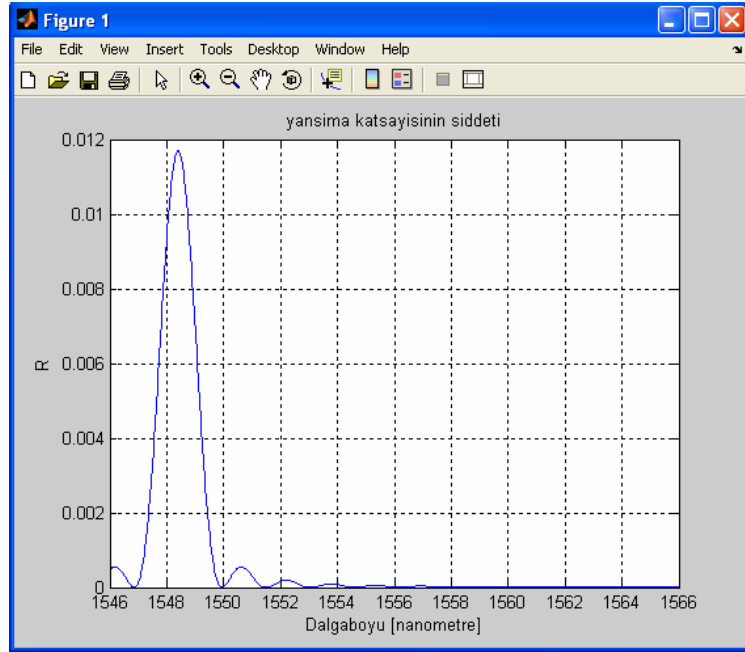
şekil 8.8: $n_{\text{core}}=1.447, L=535000\text{nm}$ için $\delta n=0.003$ iken yansımaya-dalgaboyu grafiği



şekil 8.9: $n_{\text{core}}=1.447, L=535000\text{nm}$ için $\delta n=0.0009$ iken yansımaya-dalgaboyu grafiği



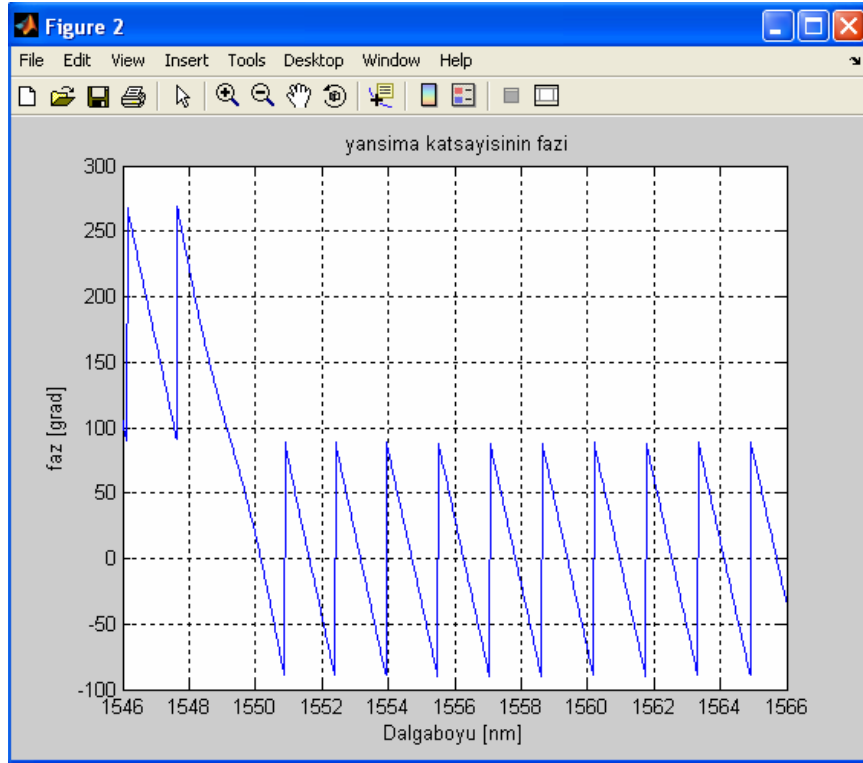
Şekil 8.10: $n_{core}=1.447, L=535000\text{nm}$ için $\delta n=0.0004$ iken yansımada-dalgaboyu grafiği



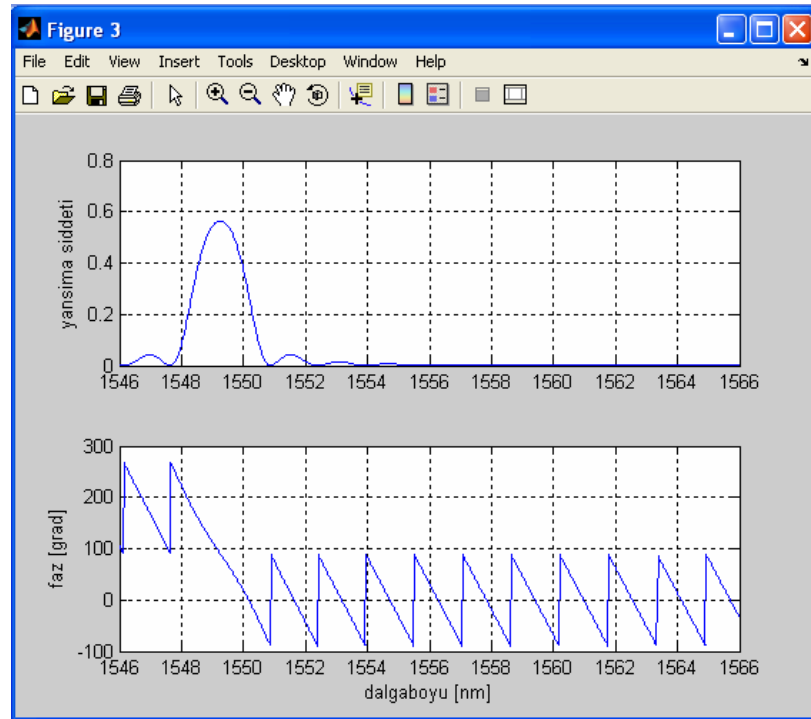
Şekil 8.11: $n_{core}=1.447, L=535000\text{nm}$ için $\delta n=0.0001$ iken yansımada-dalgaboyu grafiği

Şekil 8.8, şekil 8.9, şekil 8.10 ve şekil 8.11 maksimum yansımada ile indis değışimi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. İndis değışimi artırılınca maksimum yansımada doymaya ulaşınca kadar artar. Bunun yanı sıra indis değışimi artıkcaya yansımada band genişliği de artar. Bu ikisi arasında doğrusal bir ilişki vardır.

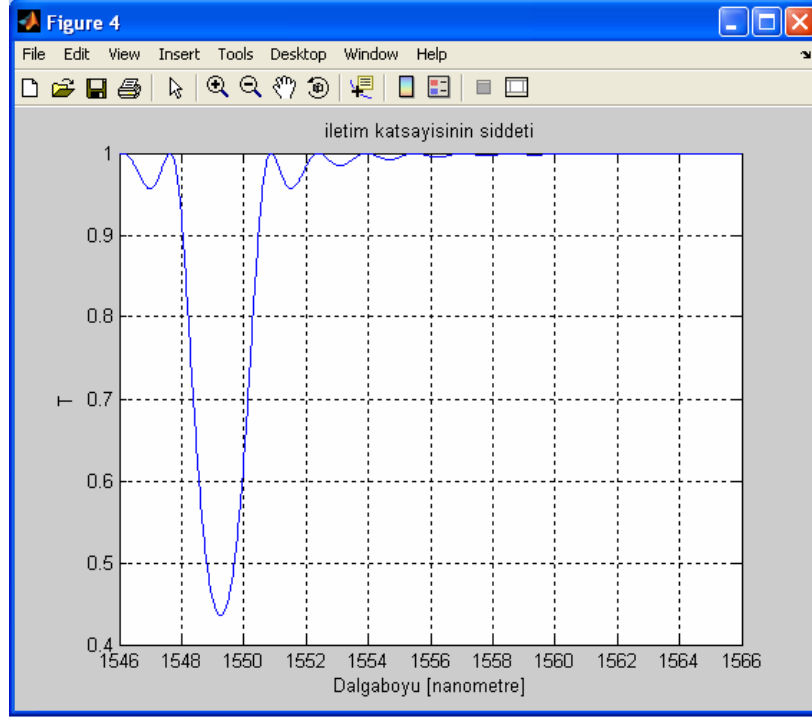
8.5.3. Diğer simulasyon grafikleri



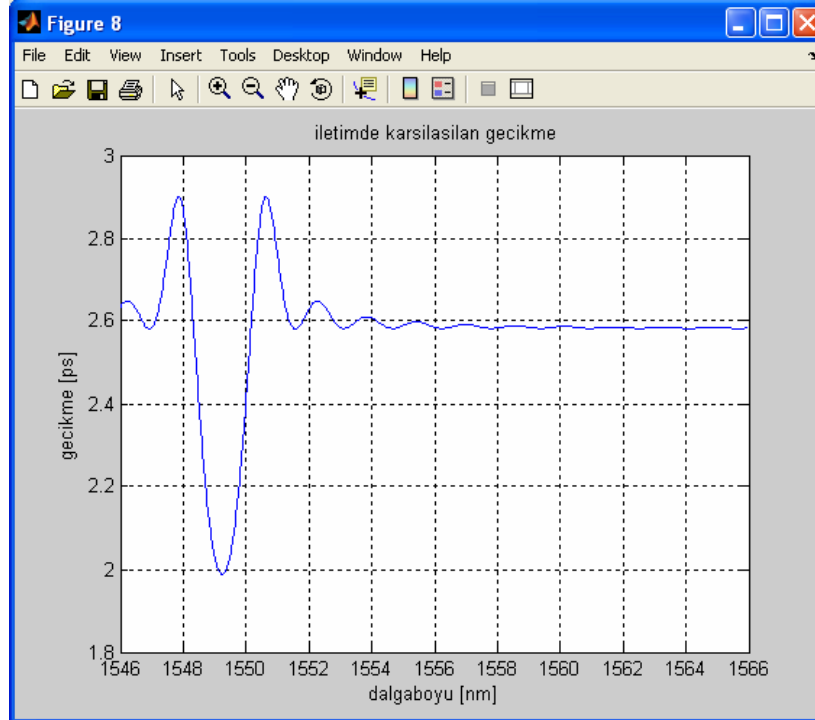
Şekil 8.12: $n_{core}=1.447, L=535000\text{nm}$ için $\delta n=0.0009$ iken faz-dalgaboyu grafiği



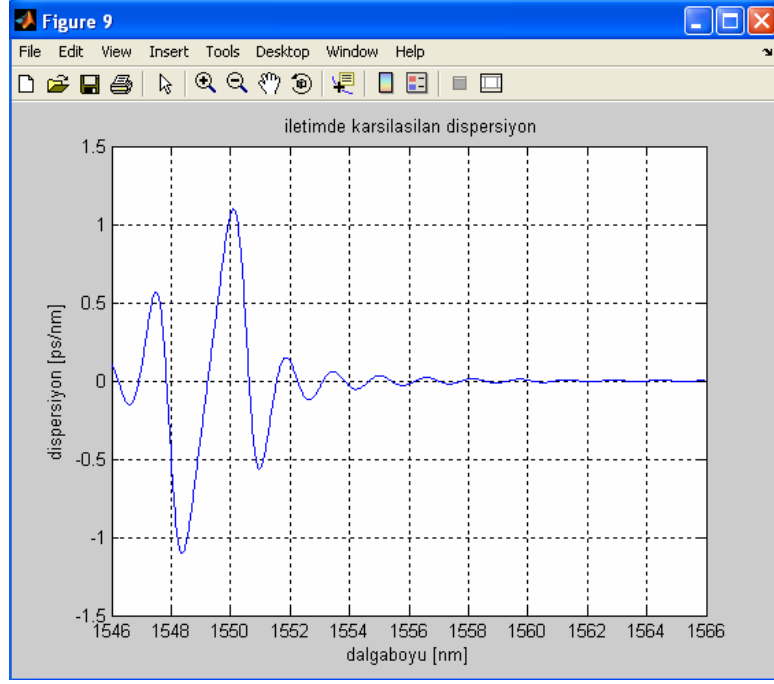
Şekil 8.13: Faz ve yansima şiddeti ile dalgaboyunun karşılaştırmalı grafiği



Şekil 8.14: $n_{\text{core}}=1.447, L=535000\text{nm}$ için $\delta n=0.0009$ iken iletim -dalgaboyu grafiği



Şekil 8.15: $n_{\text{core}}=1.447, L=535000\text{nm}$ için $\delta n=0.0009$ iken gecikme -dalgaboyu grafiği



Şekil 8.16: $n_{\text{core}}=1.447, L=535000\text{nm}$ için $\delta n=0.0009$ iken dispersiyon -dalgaloyu grafiği

9. SONUÇLAR

Bu tezde okuyucuya dağıtılmış fiber optik sensör sistemlerinin ve Fiber Bragg ızgaraların (FBG) özellikleri ve karakteristiği sunulmuştur. Bölüm 1’de günümüzün sensör ihtiyaçları ve fiber optik sensörlerin bu taleplere yanıtına kısa bir giriş yapılmıştır.

Bölüm 2’de fiber optik sensörlerin kendine özgü avantajları ve sınıflandırılması anlatılmıştır. Önerilen sensör sistemlerinin en önemli yararları da çoğullama kapasiteleridir. Bölüm 3’de çoğullama topolojileri ve teknikleri incelenmiştir.

Dağıtılmış algılama günümüz kontrol sistemleri için çok büyük öneme sahiptir. Bölüm 4’de tam ve yarı dağıtılmış fiber optik sensör sistemleri tanıtılmıştır.

Optik fiberin foto duyarlılığının keşfi fiber Bragg ızgaraları üretimine yol açmıştır. Fiberin foto duyarlılığını artıran temel teknikler bölüm 5’de tanıtıldı ve karşılaştırıldı.

Foto duyarlı fiber çekirdeğinde ızgara yazımı için ilk kullanılan duran dalga metodu sadece lazer frekansı civarında Bragg ızgara yazımına izin verdiği için pratik değildi. Bölüm 6’da farklı yazım teknikleri sunuldu ve aralarında bir karşılaştırma yapıldı. En yaygın metot faz metodu ve onun varyasyonlarıdır.

Fiber ızgaraları hem sıcaklığa hem de gerilmeye duyarlıdır. Bu yüzden bu iki parametrenin ayrılması gerekir. Deneysel bir sıcaklık dağılımı uygulamasında bile, sıcaklık değişimi ile deneysel metalin sıcaklıktan doğan termal genişlemesi sonucu oluşan gerilmeyi ayırabilmek birçok fayda sağlar. Bölüm 7’de bir Bragg ızgarası ile ölçülen sıcaklık ve gerilmeyi ayırtmak için kullanılan bazı metotlar tanıtıldı.

Fiber optik ızgara problemleri uygulamaları için hakkında çalışmak için bazı bilgisayar destekli dizaynları mevcut olmasına rağmen, bunlar da simülasyonun modelleme detayları ve kaynak kodlarını temin etmemekte. Bu da kullanıcıyı özel

ilgi alanındaki uygulamalar için kısıtlamaktadır. Bölüm 8’de fiber bragg ızgaraların teorik denklemleri ifade edilmiş ve simulasyon yaklaşımı anlatılmıştır. Yapılan simulasyondan elde edilen grafiklerde eklenmiştir..

KAYNAKLAR

- [1] Hartog A., “Optical Fiber Sensor Technology: Advanced Applications - Bragg Gratings and Distributed Sensors” , 1st Edition, Grattan K. T.V. and Meggitt B. T , *Kluwer Academic Publishers*, 241-303 , (2000)
- [2] Huang Z. “Quasi-Distributed Intrinsic Fabry-Perot Interferometric Fiber Sensor for Temperature and Strain Sensing”, Doktora Tezi, *Virginia Politeknik Enstitüsü*, Blacksburg- Virginia, 2-10, (2006)
- [3] Wang Z., “Intrinsic Fabry-Perot Interferometric Fiber Sensor Based on Ultra-Short Bragg Gratings for Quasi-Distributed Strain and Temperature Measurements”, Doktora Tezi, *Virginia Politeknik Enstitüsü*, Blacksburg-Virginia,10-16, (2006)
- [4] Optical Fiber Sensors Guide: Fundamentals& Applications, <http://www.micronics.com> (Ziyaret tarihi:19 Mayıs 2007).
- [5] Krohn D.A., “Fiber Optic Sensors: Fundamentals and Applications”, 3rd Ed.,*ISA (Instrument Society of America)*,25-67, (2000)
- [6] Berthold J.W., “Historical review of microbend fiber-optic sensors,” *Lighwave Technology.*, 13, 1193-1199, (1995)
- [7] Lagakos N., Cole J. H., Bucaro J. A., “Microbend fiber optic sensor”, *Applied Optics.*, 26, 2171-2180, (1987).
- [8] Agrawal G. P., “Lightwave Technology Components and Devices”,1st ed., *Wiley & Sons*, Ch. 2, 2004.
- [9] Kist R. , “Point sensor multiplexing principles” , *Optical Fiber Sensors: Systems and Applications*,2, 511-574, (1988)
- [10]. Othonos A., Kalli K., “Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunication and Sensing”, 1st Ed., *Artech House Inc.*, Ch. 2,6,7, (1999)
- [11] Hill K.O., Fujii Y., Johnson D.C., Kawasaki B.S., “Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication”, *Applied Physics Letters*, 32, 647-649, (1978)
- [12] Kashap R., “Fiber Bragg Gratings”, 1st Ed., Kelly P.L., Kaminow I., Agrawal G., *Academic Press*, Ch.2,3, (1999)
- [13] [Meltz G.](#), [Morey W. W.](#), [Glenn W. H.](#), “Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method”, *Optics Letters*, 14, 823-825, 1989

- [14] Hill K.O., Malo B., Vineberg K.A., Bilodeau F., Johnson D.C., Skinner I., “Efficient mode conversion in telecommunication fibre using externally written gratings”, *Electronics Letters*, 26, 1270-1272, (1990)
- [15] Askins C. G., Tsai T. E, Williams G. M., Putnam M. A., Bashkansky M., Friebele E. J., “Fiber Bragg reflectors prepared by a single excimer pulse”, *Optics Letters*, 17, 833-835, (1992)
- [16] Archambault, J.L., Reekie, L., Russell, P.S.J., “High reflectivity and narrow bandwidth fibre gratings written by single excimer pulse”, *Electronics Letters*, 29, 28-29, (1993)
- [17] [Hill](#) K. O., [Malo](#) B., [Bilodeau](#) F., [Johnson](#) D. C., [Albert](#) J., “Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask”, *Applied Physics Letters*, 62, 1035-1037, (1993)
- [18] Anderson D.Z., Mizrahi V., Erdogan T., White A.E., “Production of in-fibre gratings using a diffractive optical element”, *Electronics Letters*, 29, 566-568, (1993)
- [19] Rao Yun-J., “In-fibre Bragg grating sensors”, *Meas. Sci. Technol*, 8, 355-375, (1997)
- [20] Othonos A., 1997, Fiber Bragg Gratings [online], Nicosia, University of Cyprus, <http://www.ucy.ac.cy/~ultrafas/RS97-v68-4309.pdf> , (Ziyaret tarihi:19 Mayıs 2007).
- [21] Dong L., Archambault J. L., Reekie L., J. Russell St. P., Payne D.N, “Single pulse Bragg gratings written during fibre drawing”, *Electronics Letters*, 29, 1577-1578, (1993)
- [22] Brady G.P., Hope S., L. Ribeiro A.B. , Webb D.J., Reekie L., Archambault J.L., Jackson D.A., “Bragg grating temperature and strain sensors”, *Applied Optics Group, Physics Laboratory*, University of Kent, Canterbury, Kent, U.K., 510-513, (1994)
- [23]. Dwyer Martin J. O., Ye C.C., James S.W., Tatam R. P, “Thermal dependence of the strain response of optical fibre Bragg gratings”, *Measurement Science and Technology*, 15, 1607-1613, 2004
- [24]. Xu M.G., Archambault J. L., Reekie L., Dakin J.P., “Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors” , *Electronics Letters*, 30, 1085-1087, (1994)
- [25]. Rahman R.A., Ikhsan S., Supian H.M., Fizik J., Sains F., “Fibre optic Bragg grating sensors: a new technology for smart structure monitoring in Malaysia”, *TENCON 2000. Proceedings*, 3, 78-79, (2000)

- [26] Cooper David J. F., “Time Division Multiplexing of a Serial Fibre Optic Bragg Grating Sensor Array”, Doktora Tezi, *Graduate Department of Electrical and Computer Engineering University of Toronto*,1999
- [27] Wagreich R.B., Sirkis J.S., “Distinguishing fiber Bragg grating strain effects”, *Proceedings of the Optical Fiber Sensors Conference (OFS-12)*, Williamsburg, USA, 20-23, (1997)
- [28] Kersey Alan D. , Patrick Heather J., “Hybrid Fiber Bragg Grating/Long Period Fiber Grating Sensor for Strain/Temperature Discrimination”, *Department of The Navy, ADD019578*, (1999)
- [29] [Eggleton](#) B.J., [Krug](#) P.A., [Poladian](#) L., [Ouellette](#) F., “Long periodic superstructure Bragg gratings in optical fibres”, *Electronics Letters*, 30,1620-1622, (1994)
- [30] Zhu Y. “Fabrication of Long-Period Gratings and their Applications in Optical Fibre Communications and Sensing Systems”, Doktora Tezi, *Faculty of Engineering University of Johannesburg*, Johannesburg, Republic of South Africa, (2002)
- [31] Bhatia V., Vengsarkar Ashish M., “Optical fiber long-period grating sensors”, *Optics Letters*, 21, 692-694
- [32] Guan B.O., Tam H.Y., Ho S. L., Chung W. H., Dong X. Y., “Simultaneous strain and temperature measurement using a single fibre Bragg grating”, *Electronics Letters*, 30, 1018-1019,(2000)
- [33] Erdoğ an T., “Fiber Bragg Spectra”, *Lighwave Technology*, 15, 1277-1294, 1997

ÖZGEÇMİŞ

1980 Yılında Trabzon'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Trabzon'da tamamladı. 1999 yılında girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nden 2004 yılında Elektronik ve Haberleşme Mühendisi olarak mezun oldu.

2006 yılından beri Türk Standartları Enstitüsü Deney Laboratuvarları Merkezi Elektroteknik Laboratuvarında Mühendis olarak görev yapmaktadır.