



**ERBİYUM KATKILI FİBER YÜKSELTEÇLERDE OPTİK KAZANÇ
KONTROLÜ**

Gökhan YENİLMEZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ (TEKNOLOJİ FAKÜLTESİ)
ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2014

Gökhan YENİLMEZ tarafından hazırlanan “ERBİYUM KATKILI FİBER YÜKSELTEÇLERDE OPTİK KAZANÇ KONTROLÜ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği (Teknoloji Fakültesi) Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç.Dr.Murat YÜCEL

Elektrik-Elektronik Mühendisliği (Teknoloji Fakültesi), Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan : Prof.Dr.Fatih V.ÇELEBİ

Bilgisayar Mühendisliği, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye : Doç.Dr.Necmi ALTIN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği (Teknoloji Fakültesi), Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez SavunmaTarihi: 22/10/2014

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Gökhan YENİLMEZ
22/10/2014

ERBİYUM KATKILI FİBER YÜKSELTEÇLERDE OPTİK KAZANÇ KONTROLÜ
(Yüksek Lisans Tezi)

Gökhan YENİLMEZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2014

ÖZET

Optik haberleşme sistemlerinde optik yükselteçler büyük önem taşımaktadır. Bu yükselteçler içerisinde en yaygın kullanılanı ise erbiyum katkılı fiber yükselteçlerdir (EKFY). Hızla artan kapasite ihtiyaçları nedeniyle bu sistemlerde sadece yüksek kazanç değil aynı zamanda düz kazanç karakteristiği de büyük önem arz etmektedir. Ancak, EKFY'nin kazanç spektrumu düz değildir. Bu durum çıkış sinyal kazanç seviyelerini etkiler ve uzun mesafeli optik iletim sistemlerinde bazı sinyaller alıcıya ulaşamaz. Bu nedenle, iletim mesafesi ve kapasiteyi arttırmak için EKFY kazancının düzleştirilmesi gerekir. Bu tez çalışmasında EKFY'nin bu dezavantajlarını gidermek için optik kazanç kontrolü ile çıkış sinyal kazançlarının düzleştirilmesi sağlanmıştır. Bu amaçla OptiSystem 12.0 yazılımı kullanılarak, C bandı boyunca 3 adet, L bandı boyunca ise 2 adet düzeneğin benzetimi yapılarak kazanç spektrumu optimize edilmiştir. Ayrıca fiber Bragg ızgara (FBI), kazanç düzleştirici filtre (KDF), iki aşamalı sistem, optik geri besleme döngüsü ve yükseltilmiş kendiliğinden yayılma (YKY) yansıtma tekniğinin bu düzenekler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Daha sonra benzetimi yapılan bu sistemler karşılaştırılarak, her bir sistemin avantajları ve dezavantajları belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 905.1.035
Anahtar Kelimeler : EKFY kazanç düzleştirme, optik kazanç kontrolü
Sayfa Adedi : 53
Danışman : Doç. Dr. Murat YÜCEL

THE OPTICAL GAIN CONTROL OF THE ERBIUM DOPED FIBER AMPLIFIERS
(M. Sc. Thesis)

Gökhan YENİLMEZ

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2014

ABSTRACT

The optical amplifiers are very important in the ultra long haul fiber optical communication systems. Erbium doped fiber amplifier (EDFA) is the most widely used type in optical amplifier. In consequence of the rapidly increasing capacity needs in these systems, not only high gain but also flat gain characteristics are very important. However, gain spectrum of the EDFA is not flat. This property affects the output signal gain levels and some signal channels lost in the ultra long haul communication systems. For this reason, signal gain must be flattened in the EDFA. In this thesis, the output gain of EDFA is flattened with optical gain control method to eliminate these disadvantages of EDFA. For this purpose, three C band EDFA and two L band EDFA configurations are simulated in the OptiSystem 12.0 optical software and gain spectrum of the EDFA is optimized. The effects of the fiber Bragg grating (FBG), gain flattening filter (GFF), two stage system, optical feedback loop, and amplified spontaneous emission (ASE) reflection technique are analyzed in these configurations. After, all configurations are compared and determined the advantages and the disadvantages of these configurations.

Science Code : 905.1.035
Key Words : EDFA, gain flattening, optical gain control.
Page Number : 53
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Murat YÜCEL

TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum çalışmalar boyunca, yardımlarıyla beni yönlendiren ve desteklerini esirgemeyen çok değerli hocam Doç.Dr. Murat YÜCEL'e, göstermiş olduğu anlayış ve destekle, bu tez çalışmasının hazırlanmasında manevi katkılarını eksik etmeyen Dr. M. Kemal KARTAL'a, maddi ve manevi olarak bana her zaman destek olan annem Adalet YENİLMEZ ve babam Zihni YENİLMEZ ile çok değerli ablalarım Gülay GÜLTEPE ve Dr. Günay GÜVENÇ'e teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. OPTİK YÜKSELTME VE OPTİK YÜKSELTEÇLER	3
2.1. Optik Yükselteçlerin Tarihsel Gelişimi.....	3
2.2. Yarı iletken Optik Yükselteçler	5
2.3. Fiber Yükselteçler	7
2.3.1. Fiber Raman yükselteçler	7
2.3.2. Fiber Brillouin yükselteçler	7
2.3.3. Nadir toprak elementleri ile katkılandırılmış fiber yükselteçler.....	8
3. ERBİYUM KATKILI FİBER YÜKSELTEÇLER	9
3.1. Giriş	9
3.2. EKFY Çalışma Prensibi ve Temel Özellikleri	10
3.2.1. Atomik Oran Denklemleri	11
3.2.2. Soğurma ve yayılım kesit alanı	14
3.2.3. Örtüşme faktörü ve A_{eff}	14
3.2.4. Yükseltilmiş kendiliğinden yayılma.....	15
3.2.5. Yaşam süresi	17

	Sayfa
3.3. EKFY Gürültü ve Doyum	17
3.4. EKFY 'de Kazanç Kontrolü ve Kazanç Düzleştirme	18
3.4.1. Kazanç kontrolü için klasik metot	19
3.4.2. Halka lazer yapısı ile tam optik kazanç kontrolü	20
3.4.3. Fiber bragg ızgara ile tam optik kazanç kontrolü	22
3.4.4. Literatür çalışmaları	22
4. ÖNERİLEN SİSTEMLERİN BENZETİMİ	27
4.1. Giriş	27
4.2. C Band EKFY'de FBI ve KDF Kullanılarak Kazanç Düzleştirme	27
4.2.1. ÜFBI ve KDF ile iki aşamalı C band EKFY	28
4.2.2. FBI ile iki aşamalı C band EKFY	31
4.2.3. ÜFBI ile tek aşamalı C band EKFY	34
4.3. L Band EKFY'de Kazanç Düzleştirme	36
4.3.1. Optik döngü ile tek aşamalı L band EKFY	37
4.3.2. Optik geri besleme döngüsü ile iki aşamalı L band EKFY	39
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	43
KAYNAKLAR.....	45
ÖZGEÇMİŞ	53

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Benzetim çalışmalarında elde edilen sonuçlar	43

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. YOY'nin temel yapısı.....	5
Şekil 2.2. İki seviyeli enerji diyagramı	6
Şekil 3.1. (a) Soğurma, (b) Uyarılmış yayılım.....	10
Şekil 3.2. EKFY'nin temel yapısı	11
Şekil 3.3. Temel üç seviyeli lazer sistemi enerji seviye diyagramı	12
Şekil 3.4. Erbiyum iyon dağılımı ve eşdeğer düz üst dağılım grafiği.....	15
Şekil 3.5. EKFY'nin dalga boyuna bağlı olarak değişen kazanç spektrumu.....	18
Şekil 3.6. Geri besleme döngü yapısı ile otomatik kazanç kontrolü için iki klasik konfigürasyon (a) Pompa kontrolü ile geri besleme (b) Yardımcı sinyal kontrolü ile geri besleme.....	20
Şekil 3.7. Geri beslemeli halka döngüsü ile kazanç kenetlemeli EKFY konfigürasyonu	21
Şekil 3.8. Farklı ortalama inversiyon seviyelerinde kazanç katsayı spektrumu	21
Şekil 3.9. FBI fiber lazer yapısı ile kazanç kenetlemeli EKFY konfigürasyonu.....	22
Şekil 4.1. ÜFBI ve KDF ile iki aşamalı C band EKFY	29
Şekil 4.2. KDF'nin iletim spektrumu.....	29
Şekil 4.3. ÜFBI ve KDF ile C band EKFY'nin çıkış kazanç ve gürültü spektrumu	30
Şekil 4.4. KDF ve ÜFBI kullanılan sistemde kazanç dalgalanma grafiği	30
Şekil 4.5. FBI ile iki aşamalı C band EKFY	32
Şekil 4.6. FBI ile iki aşamalı C band EKFY'nin çıkış kazanç ve gürültü spektrumu	33
Şekil 4.7. FBI kullanılan iki aşamalı sistemin kazanç dalgalanma grafiği	33
Şekil 4.8. ÜFBI ile tek aşamalı C band EKFY	35

Şekil	Sayfa
Şekil 4.9. ÜFBI ile tek aşamalı C band EKFY'nin çıkış kazanç ve gürültü spektrumu.	35
Şekil 4.10. ÜFBI kullanılan tek aşamalı sistemin kazanç dalgalanma grafiği.....	36
Şekil 4.11. Optik döngü ile tek aşamalı L band EKFY	38
Şekil 4.12. Optik döngü ile tek aşamalı L band EKFY'nin çıkış kazanç ve gürültü spektrumu.....	38
Şekil 4.13. Optik döngü kullanılan tek aşamalı sistemin kazanç dalgalanma grafiği.....	39
Şekil 4.14. Optik geri besleme döngüsü ile iki aşamalı L band EKFY	40
Şekil 4.15. Optik geri besleme döngüsü ile iki aşamalı L band EKFY'nin çıkış kazanç ve gürültü spektrumu	41
Şekil 4.16. Optik geri besleme döngüsü kullanılan iki aşamalı sistemin kazanç dalgalanma grafiği	41

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A	Kendiliğinden ısıma oranı
A_{eff}	Etkin alan
A_2	2.seviye kendiliğinden düşme oranı
A_{21}	Seviye 2'den 1'e kendiliğinden düşme oranı
A_{21}^R	Seviye 2'den 1'e ışımalı kendiliğinden düşme oranı
A_{21}^{NR}	Seviye 2'den 1'ye ışımasız kendiliğinden düşme oranı
A_3^R	3. seviye ışımalı kendiliğinden düşme oranı
A_{31}^R	Seviye 3'den 1'e ışımalı kendiliğinden düşme oranı
A_{32}	Seviye 3'den 2'ye kendiliğinden düşme oranı
A_{32}^R	Seviye 3'den 2'ye ışımalı kendiliğinden düşme oranı
A_{32}^{NR}	Seviye 3'den 2'ye ışımasız kendiliğinden düşme oranı
δv	Band genişliği
$g(v)$	Normalize çizgi fonksiyonu
Γ	Örtüşme faktörü
h	Planck sabiti
$h\nu$	Foton enerjisi
λ_B	Bragg dalga boyu
λ_s	Sinyal dalga boyu
N_1	1. Enerji seviyesi atom yoğunluğu
N_2	2. Enerji seviyesi atom yoğunluğu
N_3	3. Enerji seviyesi atom yoğunluğu
n	Ortam kırılma indisi
$\Delta\Omega$	Yoğun açılı yakalaması
ρ	Lazer iyon yoğunluğu

Simgeler**Açıklamalar**

P_0	Eşdeğer giriş gürültüsü
r	Erbiyum iyon dağılımının eşdeğer düz üst yarıçapı
R	Pompalama oranı
R_{13}	Seviye 1'den seviye 3'e pompalama oranı
σ_{12}^a	Soğurma kesit alanı
σ_{21}^e	Yayılım kesit alanı
τ	Ömür
τ_R	Işımalı ömür
τ_{NR}	Işımasız ömür
W	Uyarılmış yayılma oranı
W_{12}	Seviye 1'den 2'ye uyarılmış soğurum oranı
W_{21}	Seviye 2'den 1'ye uyarılmış yayılım oranı
ν	Frekans
Λ	Izgara periyodu

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ALK	Ayarlanabilir lazer kaynağı
AOZ	Ayarlanabilir optik zayıflatıcı
CFBI	Cıvıltı fiber Bragg ızgara
dB	Desibel
DBÇ	Dalga boyu bölmeli çoğullama
dBm	1 mW'la ilgili desibel
E1	Valans bandı
E2	İletim bandı
EKF	Erbiyum katkılı fiber
EKFY	Erbiyum katkılı fiber yükselteç
Er³⁺	Erbiyum
FBI	Fiber Bragg ızgara
FBY	Fiber Brillouin yükselteç
FRY	Fiber Raman yükselteç
Ho³⁺	Holdmiyum

Kısaltmalar**Açıklamalar****InP**

İndiyum fosfat

KDBÇ

Kaba dalga boyu bölmeli çoğullama

KDF

Kazanç düzleştirici filtre

LD

Lazer diyod

mW

Miliwatt

Nd³⁺

Neodmiyum

nm

Dalga boyu

NTKFY

Nadir toprak elementi katkılı fiber yükselteç

OSA

Optik spektrum analizörü

OZBÇ

Optik zaman bölmeli çoğullama

Pr³⁺

Prasedmiyum

Sa³⁺

Samariyum

SDH

Senkron dijital hiyerarşi

TKFY

Tulyum katkılı fiber yükselteç

Tm³⁺

Tulyum

UBS

Uyarılmış Brillouin saçılması

URS

Uyarılmış Raman saçılması

ÜFBI

Üniform fiber Bragg Izgara

Yb³⁺

İterbiyum

YDBÇ

Yoğun dalga boyu bölmeli çoğullama

YKY

Yükseltilmiş kendiliğinden yayılma

YOY

Yarı iletken optik yükselteçler

µm

Mikrometre

1. GİRİŞ

Elektronik iletişime olan ihtiyacın son yıllarda önemli derecede artış göstermesi, daha geniş kapasiteli ve ekonomik sistemlerin ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır. Uydu iletişim sistemleri, koaksiyel kablo sistemleri ve küresel radyolink gibi sistemler geniş kapasiteli, hızlı ve ekonomik haberleşme ihtiyacını kısmen karşılar, daha yüksek hızlı, daha geniş kapasiteli ve daha ekonomik iletişim sistemleri arayışında ki ivme her geçen gün artmaktadır. Günümüzde, haberleşme sistemlerindeki gelişmeler ve internet kullanımına olan ilginin artmasıyla, ses görüntü ve veri trafiğinin daha hızlı ve verimli bir şekilde taşınması ihtiyacı büyük önem arz etmektedir. Bilgi taşınmasında ışığı kullanan fiber optik haberleşme sistemleri, bu ihtiyacı önemli ölçüde karşılamakta ve sağladığı yüksek kapasite, veri iletim hızı ve kaliteyle hızla yaygınlaşmaktadır.

Optik iletişim sistemlerinde ses, görüntü ve veri trafiğinin verimli ve hızlı bir biçimde ortak bir optik veri yolunda taşınması için daha fazla bant genişliği sunan ve zaman bölmeli çoğullama teknolojisi olan senkron dijital hiyerarşi (SDH) formatı önemli ölçüde kullanılmaktadır. Aynı şekilde dalga boyu bölmeli çoğullama (DBÇ) teknolojisi ile iletim kapasitesi arttırılmış, daha fazla kanal taşımak için ise yoğun dalga boyu bölmeli çoğullama (YDBÇ) ve kaba dalga boyu bölmeli çoğullama (KDBÇ) teknolojileri geliştirilmiştir [1].

Optik iletişim sistemlerinin taşıyıcı elamanları olan optik fiberler birçok avantaj sunarken, zayıflama ve dispersiyon olmak üzere iki temel sınırlayıcı etkeni de bünyelerinde barındırmaktadırlar. Dispersiyon ile sinyal darbe genişliği artıp sinyaller arası etkileşim oluşurken, zayıflama ile de sinyal gücü ve iletim mesafesi azalmaktadır. Kullanılan fiber boyunun artmasıyla zayıflama ve dispersiyonun da artması, sinyalin yükseltilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Klasik yöntemle yapılan elektriksel yükseltme işleminde elektron-foton, foton-elektron dönüşümlerinin yapılarak sinyalin yeniden iletilmesi gerektiğinden, ışığın optik ortamda yükseltilmesi gerekliliği ortaya çıkmış, bunun sonucunda da optik yükselteçler geliştirilmiştir [2].

Optik yükselteçler optik sinyali optik olarak yükseltirler. Bu işlem gerçekleştirilirken belirli bir kazanç ve gürültü değeri elde edilir. Yükselteçler tasarlanırken genelde optik zayıflamanın düşük olduğu S, C, ve L bandları tercih edilir [1].

Optik haberleşme sistemlerinde çeşitli fiber yükselteçler ve yükseltilmiş kendiliğinden yayılma (YKY) optik kaynaklarının geliştirilmesi gibi çalışmalarla, YDBÇ kullanılan iletişim sistemlerinde daha geniş bir iletim penceresi elde edilmiştir. Tümüyle optik anahtarlama tekniğinin geliştirilmesiyle, yüksek hızlı optik zaman bölmeli çoğullama (OZBÇ) ve DBÇ iletişim sistemleri ve bilişim ağları için kritik önemde bir gelişme sağlamıştır.

Bu tez çalışmasında, daha düz bir kazanç karakteristiği elde etmek için C band EKFY ve L band EKFY analiz edilmiştir. Bu amaçla, 3 adet C band EKFY ve 2 adet L band EKFY konfigürasyonun Optisystem 12.0 yazılımı kullanılarak benzetimi yapılmıştır. Ayrıca FBI, KDF, iki aşamalı sistem, optik geri besleme döngüsü ve YKY yansıtma tekniğinin bu sistemler üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Her bir sistem için benzetim sonucunda elde edilen kazanç, gürültü faktörü ve dalgalanma faktörü değerleri incelenmiş ve bu sonuçlar karşılaştırılarak, her bir sistemin avantajları ve dezavantajları belirlenmiştir. Böylece tasarımcıların öncelik verdikleri parametreye göre en uygun maliyetle ve en az malzemeyle çok daha iyi bir sistemi nasıl kuracakları konusunda fikir sahibi olmaları sağlanmıştır.

Bu tez çalışmasının 2. bölümünde, optik yükseltme hakkında bilgi verilerek optik yükselteçlerin tarihsel gelişimi anlatılmış ve optik yükselteç çeşitleri incelenmiştir. 3. bölümde, EKFY'nin temel özellikleri anlatılarak, kazanç kontrolünde kullanılan birtakım teknikler anlatılmış, 4. bölümde önerilen sistemler tasarlanarak benzetimleri yapılmış ve son bölümde de yapılan çalışmaların sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

2. OPTİK YÜKSELTEME VE OPTİK YÜKSELTEÇLER

İletişim sistemlerinde mesafelerin artmaya başlamasıyla, hat boyunca zayıflayan sinyali yükseltme ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Elektro-optik dönüşümle sinyalin elektriksel hale getirilip elektriksel yükselteçlerde yükseltilmesi, artan kapasite ve hız ihtiyaçları nedeniyle yetersiz kalınca, sinyali yükseltmek için yeni teknikler aranmaya başlanmıştır. Sonunda, ışık herhangi bir elektro-optik dönüşüme gerek kalmadan optik ortamda yükseltilmiş ve taşınmıştır [3].

Optik yükselteçlerde geri besleme yoktur. Optik yükselteçler, bir kazanç ortamının ters birikmeye ulaşınca kadar pompalanmasına dayanan lazer prensiplerine göre çalışır. Bununla, fotonların uyarılmış yayını ile çoğalıp yeni sinyal fotonları oluşturulması sağlanarak, yükseltme işlemi gerçekleştirilir. Optik yükselteçleri yarı iletken optik yükselteçler (YOY) ve fiber yükselteçler olmak üzere iki grupta sınıflandırmak mümkündür [4,5].

2.1. Optik Yükselteçlerin Tarihsel Gelişimi

Optik yükseltmenin temeli uyarılmış yayınına dayanmaktadır. Bu konuda yaşanan en önemli gelişme, 1954'de Charles Townes'in uyarılmış yayını kullanarak mikrodalga osilasyonu ile maser ışını üretmesi olmuştur. Theodore Maiman tarafından 1960'da ilk lazerin yapılmasının ardından, fiber optik haberleşmenin hızla gelişmesi sonucunda optik yükselteç arayışlarına gidilmiştir [4].

Yarı iletken lazerlerden bir yükselteç geliştirmek, optik yükselteç tasarımında ilk yaklaşım olarak öne çıkmaktayken, uyarılmış Raman saçılması (URS) konusunda da çalışmalar yapılmıştır [6]. 1964 yılında Koestner ve Snitzer, neodmiyum nadir toprak iyonu ile katkılanmış fiber fikrini ortaya çıkarmış ve fiber lazerler geliştirilmiştir [7]. İlk olarak Snitzer tarafından lazer, bir flaş lambasıyla pompalanmış, daha sonraları Charles Burrus Bell laboratuvarlarında neodmiyum katkılı çok modlu fiber lazeri bir lazer diyotu ile pompalamıştır [6].

Payne'nin grubu tek modlu fiber için daha yüksek pompalama gücü üretmiş ve neodmiyum, tulyum, iterbiyumun ardından 1985 yılında erbiyum ile çalışmışlardır [8]. 1986'da Southampton'un grubu, argon lazerle pompaladıkları 3 m erbiyum katkılı fiber (EKF) ile tepe kazancı 1536 nm'de 26 dB olan ilk yükselteçlerini yapmışlardır [8-10]. British Telecom'un erbiyum fiber lazere 808 nm boya lazeri ile yaptığı pompalamada, uyarılmış soğurmanın olduğu ortaya çıkmıştır. Buna neden olmayan bir dalga boyu 980 nm'dir. Ayrıca, Bell laboratuvarlarında 1480 nm'de pompalama yapılarak 37 dB kazanç elde edilmiştir [6]. 1989'da Masataka Nakazawa, NTT İletim Sistemlerinde EKF'yi, 1480 nm'de 40 mW gücünde pompa diyotu ile pompalamış ve 46,5 dB kazanç elde etmiştir [11].

EKFY'ler ilk olarak C bandında tasarlanmışlardır. L band EKFY'ler ise ilk olarak 1992 yılında tanımlanmış ve uygulamalarına 1997 yılında geçilmiştir. Bununla birlikte, DBÇ iletim sistemlerinde kapasiteyi arttıracak şekilde hat yükselteci olarak, C banda paralel L band yükselteçler tasarlanmıştır [12-14]. Bu çalışmaların yanı sıra, iki geçişli ve üç geçişli konfigürasyonlar geliştirilmiş [4, 15-20], çıkış kazancını düzleştirmek için kazanç düzleştirici konfigürasyonlar kullanılmış [21-29], ayrıca artan pompa gücüne karşılık kazanç kararlılığı için kazanç kenetleyiciler incelenmiştir [30-31].

Band genişliğini arttırmak için son yıllarda S ve U bandının ortalarında çalışabilen tulyum katkılı fiber yükselteçler (TKFY) üzerinde durulmaya başlanmıştır. Ancak TKFY'nin pratik olmayan 1050 nm dalga boyundaki pompa kaynağı ve yaklaşık %4 oranındaki düşük optik-optik dönüşüm verimliliği önemli dezavantajlar olarak karşımıza çıkmaktadır [32,33].

EKFY tabanlı DBÇ sistemlerinde C ve L bandının tamamı kullanılmaktadır. Haberleşme trafiğinin her geçen gün artması ve yüksek güçlü kompakt yarı iletken lazer diyot pompaların geliştirilmesi, fiber Raman yükselteç (FRY) araştırmalarını arttırmıştır. FRY'lerde de EKFY'de olduğu gibi çift geçişli sistemler ve kazanç düzleştirici konfigürasyonlar kullanılmıştır [34,35].

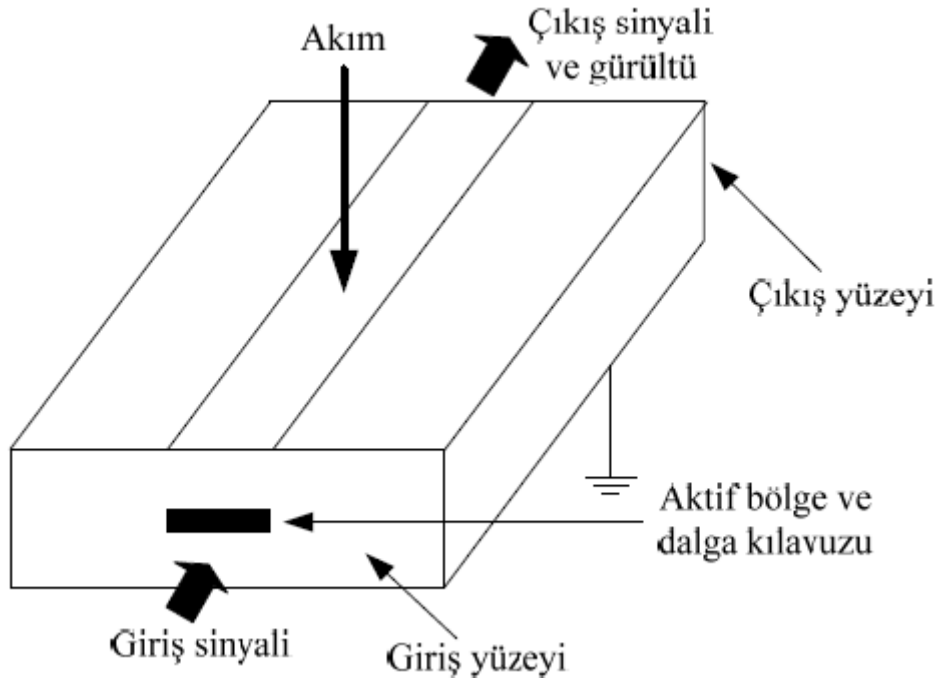
Optik yükselteç kullanılan ilk transatlantik fiber optik iletişim hattı TAT-12/13, 1996'da bir dalga boyunda 5 Gbit/s iletim hızında ve 1998'de dört veya sekiz dalga boyunda her biri 2,5 Gbit/s toplam 10-20 Gbit/s hızla çalışacak şekilde tasarlanmıştır. 2001 yılında

bilim adamları her biri 10 Gbit/s hızda 100 dalga boyunu toplam 1 Tbit/s hıza ulaştırmışlardır. Ocak 2003’de, toplam transatlantik iletim kapasitesi 2700 Gbit/s ve toplam potansiyel kapasite 12300 Gbit/s’ye yükselmiştir [36]. NTT firması 2006 yılında 14 Tbit/s’lik çok büyük kapasiteli optik iletimi 160 km uzunluğunda optik fiberde başarıyla gerçekleştirmiştir [6]. Gasulla ve J. Capmany, 2008 yılında çok modlu fiber ile bir kanalda 20 Gbit/s iletim kapasitesine ulaşmışlardır [37].

Optik yükselteçler günümüzde daha da gelişerek haberleşme sistemlerinin vazgeçilmezi olmuşlardır.

2.2. Yarı İletken Optik Yükselteçler

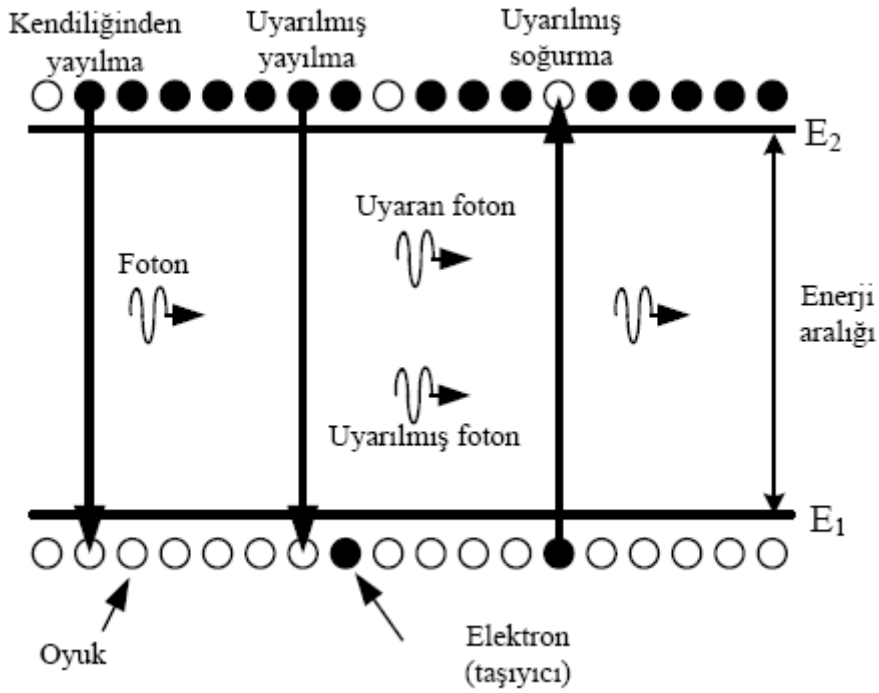
Yarı iletken optik yükselteç (YOY), girişindeki ışık sinyalini yükselten optoelektronik bir cihazdır. Aktif bölgeye gömülü bir dalga kılavuzu içerisinde geçen ışık sinyali, dışarıdan uygulanan bir akım ile yükseltilmekte ve çıkışta optik bir yükseltme sağlanmaktadır [3].



Şekil 2.1. YOY’nin temel yapısı [4]

YOY’ler yüksek hızlı anahtarlama yeteneği, yüksek sönüm oranı ve yüksek birleştirme potansiyeli sağlarlar. Ayrıca, tüm optik dalga boyu dönüşümü, tekrarlama, dalga boyu

seçme, güçlendirme, hat yükseltmesi ve optik ön yükseltme yaparlar. YOY'nin temel yapısı Şekil 2.1'de görülmektedir [4]. Elektrik akımı ile sürülen cihaz, ışık sinyalini yükseltmekte ve çıkışta optik bir yükseltme sağlamaktadır [3]. Çıkışta, aynı zamanda yükseltilmiş kendiliğinden yayılma (YKY) adı verilen ve yükseltme işlemi sonucunda oluşan bir de gürültü meydana gelmektedir [2]. YOY'ların yapısında ve InGaAsP tabakalarının içerdiği aktif malzemeler içinde Indiyum fosfat (InP) kullanılır. YOY, bir yarı iletkenidir ama giriş ve çıkışında geri besleme yoktur. Şekil 2.2'de iki seviyeli enerji seviye geçişi görülmektedir. Uyarılmış soğurma ile E1 enerji seviyesinden E2 enerji seviyesine geçen fotonlar, buradan tekrar E1 seviyesine düşerken uyarılmış yayılma ile mevcut foton enerjisini yükseltmekte ve optik yükseltme gerçekleşmektedir [38-42].



Şekil 2.2. İki seviyeli enerji diyagramı

Bir YOY'un kazancı, çıkış sinyal gücü ve yükseltme işlemi sırasında oluşan iç gürültüden etkilenir. Çıkış sinyal gücündeki artmaya karşılık kazanç düşer. Bu kazanç doyumu önemli sinyal bozulmalarına neden olur [2]. YOY'lar; faz modülatörü, dalga boyu çevirici, optik anahtar, sayısal kapı, artırıcı/azaltıcı çoklayıcı, ayarlanabilir filtre, pals üretici, saat üretici, dispersiyon kompanzatorü, dedektör gibi uygulama alanlarına sahiptirler [40-44].

2.3. Fiber Yükselteçler

Fiber yükselteçleri 3 ana grupta sınıflandırmak mümkündür. Bunlar; fiber Raman yükselteçler (FRY), fiber Brillouin yükselteçler (FBY) ve nadir toprak elementi katkılı fiber yükselteçler (NTKFY)'dir. Bu tez çalışmasında, nadir toprak katkılı fiber yükselteçlerden EKFY kullanılmıştır ve bu optik yükselteç bölüm 3'te detaylı olarak incelenmiştir.

2.3.1. Fiber Raman yükselteçler

İletim hattını tıpkı bir Raman kazanç ortamı gibi kullanan FRY'ler, özellikle çok kanallı iletişim sinyallerinin yükseltilmesinde, daha az tekrarlayıcıli iletimlerde fiber kayıplarının karşılanması için optik kazançların gerektiği DBÇ sistemlerinde tercih edilirler [4]. FRY'ler sinyali, pompalama sinyali ile silika fiberde meydana gelen uyarılmış Raman saçılması (URS) yoluyla yükseltirler. URS'de, pompalama fotonu düşme esnasında enerji kaybeder ve azalan enerjiyle düşük bir frekansta daha az enerjiye sahip başka bir foton üretilir. Kalan enerji, moleküler titreşimler halinde ortam tarafından emilir. Böylece FRY'ler optik olarak pompalanmış olurlar [45-47].

FRY'ler NTKFY'lerle kıyaslandığında, sinyalden daha düşük pompa dalga boyları kullanılarak sinyal yükseltilebilmesi (1500 nm bölgesi için 100–170 nm daha düşük dalga boyları) ve iletilen veri sinyallerine orta seviyede Raman yükseltmesi sağlayan optik fiber kullanılabilmesi (dağıtılmış yükseltme) gibi avantajlar sağlar [4].

2.3.2. Fiber Brillouin yükselteçler

Optik kazanç sağlama dışında, FBY'lerin çalışma prensibi FRY'lerle benzerdir. FBY'de URS yerine uyarılmış Brillouin saçılması (UBS) kullanılır. FBY aynı zamanda optik olarak pompalanır ve pompalama gücünün bir kısmı UBS aracılığı ile sinyal dalga boyuna transfer edilir. UBS ve URS arasında biçimsel benzerlik olmasına rağmen, Brillouin kazanç spektrumunun son derece dar bir band genişliğine sahip olması (<100 MHz), URS ve pompalama frekansına bağlı olarak karşılaştırıldığında, UBS'de Stokes kaymasının binde birden daha küçük olması (~10 GHz) ve sadece sinyal ışınının pompalama ışınına zıt yönde yayıldığı zaman yükseltmenin gerçekleşmesi (geri pompalama konfigürasyonu) gibi

hususlar, UBS'yi URS'den ayıran temel özellikler olarak karşımıza çıkmaktadır. Sahip oldukları dar band genişliği nedeniyle FBY'lerin, optik sistemlerde güç yükselteci, ön yükselteç veya hat yükselteci olarak kullanımı çok yaygın değildir [4].

2.3.3. Nadir toprak elementleri ile katkılanmış fiber yükselteçler

Bu yükselteçlerde kullanılan fiberlerin nüvesi doğada az rastlanan, İterbiyum (Yb^{3+}), Neodmiyum (Nd^{3+}), Erbiyum (Er^{3+}), Holdmiyum (Ho^{3+}), Prasedmiyum (Pr^{3+}), Samariyum (Sa^{3+}), disprosyum (Dy^{3+}), Tulyum (Tm^{3+}) gibi elementlerle katkılanır. Böylece farklı katkı malzemeleri kullanılarak, pompalama ve sinyal dalga boyu, kazanç ve gürültü parametreleri değiştirilmekte ve uygulama alanına göre fiber yükselteç çeşitliliği sağlanmaktadır. Katkılı fiber yükselteçler üzerindeki ilk çalışmalar 1964 yılında başlamasına rağmen, bu olayın pratikte uygulanabilmesi yaklaşık 25 yıl sonra gerçekleşmiştir. Bunlar içerisinde en yaygın olarak kullanılan optik yükselteç çeşidi, yüksek kazanç, düşük gürültü ve yüksek band genişliklerine sahip olan EKFY'lerdir [4, 47-48]. EKFY, silika fiberdeki zayıflamanın en düşük olduğu 1550 nm penceresindeki geniş bir dalga boyu aralığında çalışabildiğinden, uzak mesafe fiber optik iletişim sistemleri için vazgeçilmez bir eleman olmuştur.

3. ERBİYUM KATKILI FİBER YÜKSELTEÇLER

3.1. Giriş

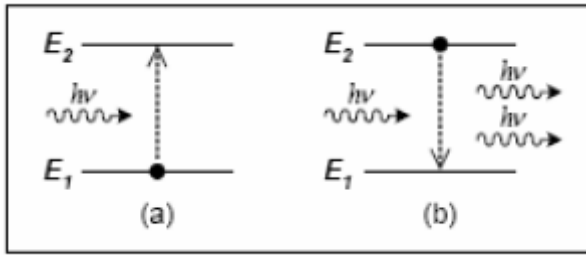
EKFY, günümüz optik iletim ağları ve bunların optik iletişim sektörüne dönüştürülebilen uygulamaları için en önemli bileşenlerden biridir. İlk EKFY, 1500 nm dalga boyundaki sinyaller için, 1987 yılında, Southampton Üniversitesi ve AT&T Bell Laboratuvarlarında aynı anda bildirilmiştir [49,50]. Yapılan deneylerde fark edilen en önemli başarı, erbiyum iyonlarının 1500 nm’de çalışan modern optik fiber iletim sistemlerindeki optik yükseltme için en uygun olduğudur. O zamandan beri EKFY’nin temel özellikleri ve optik ağlardaki olası uygulamalarını keşfetmek önemli bir araştırma konusu olmuştur [51-53]. EKFY’ler, verici gücünü arttırmak için güç yükselteçi, sistem erişimini arttırmak için hat yükselteçi ya da alıcı duyarlılığını arttırmak için ön yükselteç olarak kullanılabilir. Bunların tümü uzun mesafeli iletişimi gerçekleştirmek için vazgeçilmez unsurlardır.

Optik fiber ağlarında optik yükselteç olarak kullanılan EKFY’lerin birçok avantajı vardır. EKFY’ler ortaya çıkmadan önce, bir iletim sisteminin ortasında zayıflamayı dengelemek için, alıcı ve vericinin her ikisini de içeren optoelektronik rejeneratörlere ihtiyaç vardı. EKFY’ler ile ışık sinyalleri, optik-elektronik-optik dönüşüme gerek kalmadan doğrudan optik ortamda yükseltilir. Böylece sistemin karmaşıklığı ve maliyeti büyük ölçüde azaltılmış olur. İkinci olarak, erbiyum iyonlarının üst seviyedeki ömrünün uzunluğundan dolayı, eğer modülasyon hızı 1Mbit/s’den büyükse, EKFY’ler hem sürekli dalga hemde modüle edilmiş dalgaların ikisine birden uygulanabilir. EKFY’ler, aynı anda birçok kanalı yükseltmek için kullanılabilir [49].

EKFY, Er^{3+} iyonunu 1550 nm sinyal yükseltmesinde kullanır. EKFY’ler fiber kabloların minimum zayıflamaya sahip olduğu üçüncü pencere bandında oldukça verimli olarak çalışmaktadır. S band (1460-1530 nm) içerisindeki 1490-1520 nm bölgesinde, C band (1530-1565 nm) içerisindeki 1530-1565 nm bölgesinde, L band (1565-1625 nm) içerisindeki 1570-1600 nm bölgesinde kullanılabilirler. Yüksek kazanç, düşük gürültü ve yüksek bant genişliklerine sahiptirler [4].

3.2. EKFY'lerin Çalışma Prensibi ve Temel Özellikleri

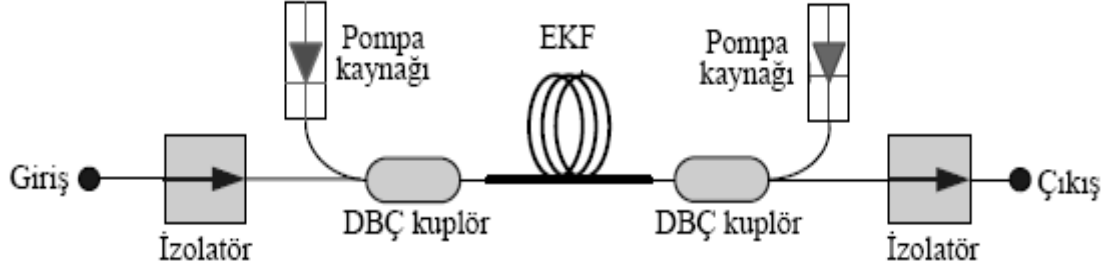
EKFY'ler, foton foton etkileşimi ile iyon sayılarının ters birikmeye uğraması ve bunun sonucunda, biriken fotonların yüksek enerji seviyesinden düşük enerji seviyesine düşmesiyle yeni bir foton yayması ve sonuçta zayıflamış sinyalin EKFY çıkışında yükseltilmesi prensibine göre çalışırlar [4,48]. Erbiyum iyonunda atomlar farklı enerji seviyelerinde bulunurlar. Enerji düzeyleri E_1 ve E_2 olan bir atoma, $h\nu = E_2 - E_1$, (burada h Plank sabitidir) koşulunu yerine getiren ν frekanslı bir elektromanyetik alan ile verilen enerji, atomun bu iki farklı enerji seviyesinde geçişine neden olabilmektedir. Optiksel bir ortamda, elektromanyetik alan, atomal enerji geçişlerine uygun olarak, $h\nu$ enerjili fotonların bir araya gelmesiyle oluşan optiksel bir ortamdır.



Şekil 3.1. a) Soğurma, b) Uyarılmış Yayınım [1]

Şekil 3.1'de atomların ışınım olayı sırasında etkileşebilme yolları görülmektedir. *Soğurma*, düşük enerji seviyesindeki bulunan erbiyum iyon elektronlarının, fiber boyunca, pompa sinyalinden, enerjisi $h\nu$ olan tesadüfi bir foton soğurması ve bir üst enerji seviyesi olan kararlı seviyeye geçiş yapmalarıyla meydana gelmektedir. Geçiş ışınım modunda ise zayıflamış optiksel sinyalden gelen tesadüfi bir foton, uyarılmış bir elektronun toprak seviyesine düşmesine, aynı yön, faz ve polarizasyonda foton yaymasına neden olur. Bu süreç, ana optiksel lazer yükselteçlerin çalışma şeklinin temelini oluşturan *uyarılmış yayınım* olarak bilinmektedir. Foton atom etkileşimi *kendiliğinden yayınım* ile de olabilir. Bu olay, önceden yüksek enerji seviyesinde olan bir atomun daha düşük bir enerji seviyesine düşerken, $h\nu$ enerjisine sahip bir foton yayınlamasıyla meydana gelir. Bu fotonların sonradan ortaya çıkan uyarılmış foton yayınımları ile birlikte yükseltilmesi, optiksel yükselteç çıkışında gürültü olarak görülen, yükseltilmiş kendiliğinden yayılımı (YKY) oluşturur [1].

EKFY'nin temel yapısı Şekil 3.2'de görülmektedir. Diğer optik yükselteçlere göre daha basit bir tasarıma sahip olan EKFY genel olarak; bir pompalama kaynağı, pompa ve optik sinyallerini birleştirip EKF'ye aktaran DBÇ kuplör ve sinyal geri dönüş kayıplarını engellemek için kullanılan optik izolatörlerden oluşmaktadır [3].

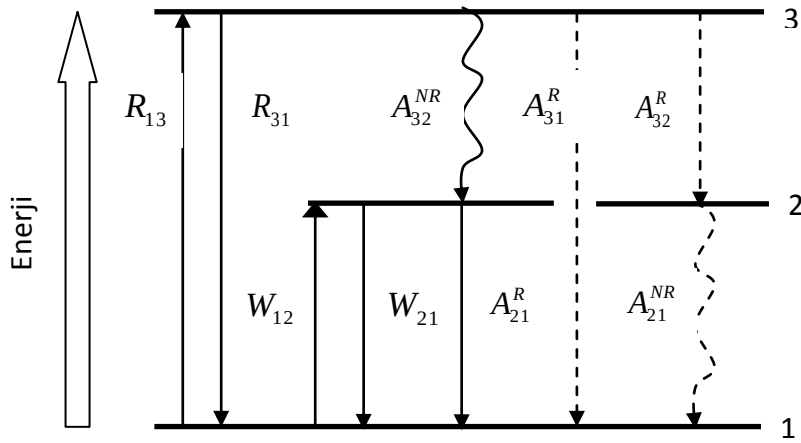


Şekil 3.2. EKFY'nin temel yapısı [54]

Katkılı fiberin temel malzemesi silika olup, öz bölgesindeki erbiyum ve olası diğer katkı maddeleri ile standart telekomünikasyon fiberlerinden farklıdır. DBÇ kuplör, pompa ve optik sinyali EKF'ye aktarır ve 0,2 dB'nin altında oldukça küçük kayıplara sahiptir. EKF'lerin yüksek kaliteli ve düşük maliyetli fiber üretiminin yerleşik düzenini kullanması ve katkılı fiber ile bunun kullanıldığı iletim ortamı olan standart fiberler arasındaki benzerlik nedeniyle, 0,1 dB gibi az kayıplı eklerle basit birleştirme olanağı sağlaması en önemli avantajlarından [55, 56]. Optik izolatörler ise optik sinyalde oluşan sahte salınımları engeller ve kararlı yükseltme işlemini gerçekleştirmek için kullanılırlar.

3.2.1. Atomik oran denklemleri

Bu analizde üç seviyeli sistemde toprak seviyesinden 3 nolu seviyeye lazer geçişi dikkate alınmıştır. Pratikte bu durum, 980 nm'lik pompalama dalga boyunun kullanılmasına karşılık gelir. Şekil 3.3'de üç seviyeli lazer sisteminin enerji seviyeleri görülmektedir. Seviye 1 toprak seviyesi, seviye 2 uzun ömürlü bir τ tarafından karakterize edilen yarı kararlı seviye ve seviye 3 pompalama seviyesini göstermektedir.



Şekil 3.3. Temel üç seviyeli lazer sistemi enerji seviye diyagramı [3]

Şekil 3.3’de 1 (toprak) ve 2 (yarı kararlı) seviyeler arası lazer geçişi olmaktadır. R , W ve A sırasıyla pompalama oranı, uyarılmış yayılma oranı ve kendiliğinden ışıma oranı, R ve NR üst sembolleri ise sırasıyla ışımalı ve ışımasız yayılmayı göstermektedir.

Seviye 1’den seviye 3’e pompalama oranı R_{13} ve seviye 3 ile seviye 1 arasındaki uyarılmış yayılma oranı R_{31} ’dir. Seviye 3’e karşılık gelen uyarılmış durumda düşmenin iki olasılığı vardır; ışımalı oran ($A_3^R = A_{32}^R + A_{31}^R$), ışımasız oran (A_{32}^{NR}). Seviye 3’ten kendiliğinden düşmede varsayılan ışımasız düşmedir. ($A_{32}^{NR} \gg A_3^R$). Seviye 1 ve seviye 2 arasındaki uyarılmış soğurma ve yayılma oranları sırasıyla W_{12} ve W_{21} ’dir. Kendiliğinden ışımalı ve ışımasız uyarılmış durumda seviye 2’den düşmeye neden olur. $A_2 = A_{21}^R + A_{21}^{NR}$ ile $A_{21}^R = 1/\tau$, burada τ floresan (kendiliğinden çeşitli renklerde ışık saçma niteliği) ömrü olarak tanımlanır. Varsayılan kendiliğinden düşme aslında ışımadır ($A_{21}^R \gg A_{21}^{NR}$). Şekil 3.3’de 2. seviye ve 3. seviyede kendiliğinden bozulma sadece A_{21} ve A_{32} gibi görülmektedir. ρ lazer iyon yoğunluğu ve N_1 , N_2 ve N_3 sırasıyla 1, 2 ve 3 enerji durumlarındaki atomların oransal yoğunlukları veya popülasyonlarıdır. $N_1 + N_2 + N_3 = \rho$

Bunlara karşılık gelen atomik oran denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\frac{dN_1}{dt} = -R_{13}N_1 + R_{31}N_3 - W_{12}N_1 + W_{21}N_2 + A_{21}N_2 \quad (3.1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{12}N_1 - W_{21}N_2 - A_{21}N_2 + A_{32}N_3 \quad (3.2)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = R_{13}N_1 - R_{31}N_3 - A_{32}N_3 \quad (3.3)$$

Sistemde, popülasyonların zamanla değişmediği kararlı durumları göz önüne alınmıştır. Bu durumda, $dN_i/dt = 0$ ($i=1,2,3$). $a = R_{31} + A_{32}$ ve $b = W_{21} + A_{21}$. Eş. 3.2 ve 3.3'den aşağıdaki denklemler elde edilir [3]:

$$W_{12}N_1 - bN_2 + A_{32}N_3 = 0 \quad (3.4)$$

$$R_{13}N_1 - aN_3 = 0 \quad (3.5)$$

Yukarıdaki ifadelerde N_1 , N_2 için N_3 yerine $N_3 = \rho - N_1 - N_2$ yazılırsa:

$$N_1 = \rho \frac{ab}{b(a + R_{13}) + aW_{12} + R_{13}A_{32}} \quad (3.6)$$

$$N_2 = \rho \frac{R_{13}A_{32} + aW_{12}}{b(a + R_{13}) + aW_{12} + R_{13}A_{32}} \quad (3.7)$$

halini alır. 3.6 ve 3.7 eşitliklerinde A_{21} , A_{32} terimleri ile a ve b tanımları yerine koyulursa:

$$N_1 = \rho \frac{(1 + W_{21}\tau) \left(1 + \frac{R_{13}}{A_{32}}\right)}{(1 + W_{21}\tau) \left(1 + \frac{R_{13} + R_{31}}{A_{32}}\right) + W_{12}\tau \left(1 + \frac{R_{31}}{A_{32}}\right) + R_{13}\tau} \quad (3.8)$$

$$N_2 = \rho \frac{R_{13}\tau + W_{12}\tau \left(1 + \frac{R_{13}}{A_{32}}\right)}{(1 + W_{21}\tau) \left(1 + \frac{R_{13} + R_{31}}{A_{32}}\right) + W_{12}\tau \left(1 + \frac{R_{31}}{A_{32}}\right) + R_{13}\tau} \quad (3.9)$$

eşitlikleri elde edilir. Işımasız düşme oranı olan A_{32} , pompalama oranı olan $R_{13,31}$ 'in çok üzerinde kabul edilirse ($A_{32} \gg R_{13,31}$) ve $R = R_{13}$ alınır Eş. 3.8 ve 3.9'dan;

$$\begin{aligned}
N_1 &= \rho \frac{1 + W_{21}\tau}{1 + R\tau + W_{12}\tau + W_{21}\tau} \\
N_2 &= \rho \frac{R\tau + W_{12}\tau}{1 + R\tau + W_{12}\tau + W_{21}\tau}
\end{aligned} \tag{3.10}$$

bulunur. Bu sonuçla $N_3 = \rho - N_1 - N_2 = 0$ olur. Hakim ışımasız düşme karşısında (A_{32}) pompalama seviyesindeki popülasyon ihmal edilebilir ve A_{32} 'den yarı kararlı seviye olan 2. seviyeye düşer [57]. 1480 nm'lik pompa kullanıldığında, direk yarı kararlı seviyeye pompalama olduğundan, 3 seviyeli analize gerek yoktur ve ifadeler 2 seviyeye indirgenerek kullanılabilir.

3.2.2. Soğurma ve yayılım kesit alanı

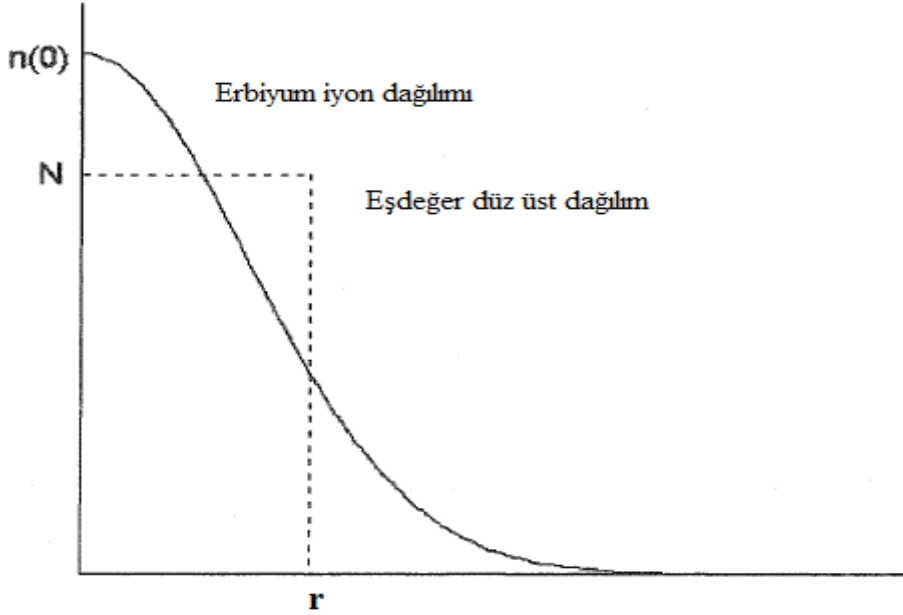
Soğurma ve yayılım kesit alanı EKF'ler için çok önemli iki parametredir. Bunlar, ışık yaymak ve emmek için EKF içerisindeki erbiyum iyonlarının yeteneklerini ölçerler. Kesit alanı, uyarılmış durum ve temel durum arasında oluşması için geçişlerin olasılıklarını ifade eder. Örneğin, 1 ve 2 durumları göz önüne alındığında soğurulan ve yayılan bir fotonun olasılığı sırasıyla soğurma kesit alanı σ_{12}^a ve yayılım kesit alanı σ_{21}^e ile orantılıdır. Bu nedenle, yoğunluğun tek bir dalga boyunda bir ışık ışınının gücü içerisindeki toplam değişimi I , $\Delta P_\lambda = P_\lambda^e - P_\lambda^a = (N_2\sigma_{21}^e - N_1\sigma_{12}^a)I$ eşitliği ile verilir. Bu eşitlik EKF boyunca ışık yayılımının zayıflaması ya da yükseltilmesini açıklamak için kullanılabilir. Bu soğurma ve yayılım olasılıklarının ışık gücü yerine ışık yoğunluğuyla orantılı olduğunu belirtmektedir. Işık yoğunluğu, etkin kesit alanı ile ters orantılı olduğu için (A_{eff} olarak belirtilir) A_{eff} aynı zamanda soğurma ve yayılım olasılıklarını belirlemede de önemlidir [49].

3.2.3. Örtüşme faktörü ve A_{eff}

Soğurma ve yayılım kesit alanının etkin alanını elde etmek için, optik modun çapraz şekli ve onun çapraz erbiyum iyon dağılım profili ile örtüşmesi, soğurma ve yayılımı erbiyum iyon dağılımı ile örtüşen optik modun sadece bir kısmı etkileyeceği için, oldukça önemlidir. Örtüşme faktörü Γ , erbiyum iyon dağılımı ve optik mod arasındaki ilişkiyi tanımlamak için bir parametre olarak tanımlanır. Genel olarak, optik modun bir bölümü

kaplama içerisinde yayılacaktır; ancak erbiyum iyonları genellikle fiberin özüne takviye edilir. Bu yüzden örtüşme faktörü daima 1'den küçüktür.

Etkin kesit alanı erbiyum iyon dağılımının şekli tarafından belirlenir ve $A_{eff} = \pi r^2$ ile elde edilebilir. Burada r , erbiyum iyon dağılımının eşdeğer düz üst yarıçapıdır.



Şekil 3.4. Erbiyum iyon dağılımı ve eşdeğer düz üst dağılım grafiği [49]

Erbiyum iyonlarının gerçek enine dağılımının elde edilmesi zor olduğu için, A_{eff} genellikle model içerisinde basitçe hesaplamada kullanılır. Şekil 3.4 gerçek erbiyum iyon dağılımı ve eşdeğer düz üst dağılımın bir örneğini göstermektedir. Düz tepe dağılımın yarıçapı r , gerçek erbiyum iyon dağılımının geometrik profili tarafından belirlenir [49].

3.2.4. Yükseltilmiş kendiliğinden yayılma

Kendiliğinden yayılma optik yükselteçlerde çok önemli bir olaydır. Lazer iyonlarının kendiliğinden uyarımında temelde optik yükselteçlerde gürültü oluşmaktadır. İyonların bazıları belirli bir süre sonunda toprak seviyesine geri dönerken, bazıları rastgele olarak toprak seviyesine geri dönerler ve bu arada bir foton yayarlar. Bu foton karakteristiği, gelen sinyale göre uyumlu değildir ve uyarılmış yayılda bir foton oluşumuna zıttır. Böylece kendiliğinden oluşan fotonlar toplanarak fiber yükselteci tarafından çoğaltılırlar

ve temel olarak sinyal ışığına gürültü şeklinde eklenirler. Bu temel gürültüye yükseltilmiş kendiliğinden yayılma (YKY) adı verilir.

Sonsuz küçük dV hacimli bir lazer ortamında $+z$ yönünde kendiliğinden üretilen ve fiber moduna kuple edilen, ν ve $\nu + \delta\nu$ arasındaki frekansta rasgele kutuplanmış fotonların sayısı [57] :

$$dn(\nu) = A_{21}g(\nu)\delta\nu \frac{\Delta\Omega}{4\pi} dV \int_S N_2(r, \theta) \bar{\psi}_s(r, \theta) r dr d\theta \quad (3.11)$$

ile verilir. Burada $g(\nu)$ çizgi fonksiyonu [59,60], $A_{21} = 1/\tau$ kendiliğinden düşme oranı, $\Delta\Omega/4\pi$ fiberde kendiliğinden tutulmuş ışığın yakalama oranı ve integral terimide kılavuzlanmış mod ve uyarılmış iyonların yoğunluk dağılımları arasındaki örtüşmeyi göstermektedir. Çizgi fonksiyonu $g(\nu) = 8\pi n^2 \tau \sigma_e(\nu) / \lambda_s^2$ ile tanımlanır, burada n ortam kırılma indisidir [60]. Yoğun açılı yakalaması $\Delta\Omega$ ile tanımlanabilir, kılavuzlanmış lazer boşluklarında, ışın enerjisini yüzeyinde soğuran moda karşılık gelir. $\Delta\Omega = \lambda_s^2 / n^2 \pi \omega_s^2$ ve $dV = \pi \omega_s^2$ ile tanımlanır. Birim frekans başına kendiliğinden yayılım gücü $dP_{SE} = h\nu dn(\nu)$ 'dir. Bu tanımlamalarla $\delta\nu$ band genişliğinde kendiliğinden yayılma oranı;

$$\frac{dP_{SE}}{dz} = 2P_0 \sigma_e(\nu) \int_S N_2(r, \theta) \bar{\psi}_s(r, \theta) r dr d\theta \quad (3.12)$$

burada $P_0 = h\nu \delta\nu$, $\delta\nu$ band genişliğinde kendiliğinden yayılmış olan bir foton gürültüsünün gücüdür. P_0 terimi eşdeğer giriş gürültüsü olarak da tanımlanır. Eş. (3.11)'deki 2 faktörü, fiberin her iki kutuplu modlarında meydana gelen kendiliğinden yayılmayı göstermektedir. λ_s dalga boyunda ve $\delta\nu$ band genişliğindeki toplam sinyal gücü:

$$\frac{dP_s(\lambda_s)}{dz} = \sigma_a(\lambda_s) 2\pi \int_S \{ \eta(\lambda_s) N_2(r) [P_s(\lambda_s) + 2P_0] - N_1(r) P_s(\lambda_s) \} \bar{\psi}_s(r) r dr \quad (3.13)$$

ifadesi ile tanımlanır. Bu eşitlik kendiliğinden gürültünün yükseltilmesi ve sinyalin yükseltilmesi olaylarının her ikisini de tanımlar. Şayet uyarılmış durumdaki N_2

popülasyonu sıfırdan farklı ise, Eş. (3.12)'nin sağ tarafındaki $2P_o$ sabit terimi fiber boyunca optik gürültünün oluşmasına neden olur, fiberin girişinde optik sinyal olup olmadığını, $\delta\nu$ band genişliğindeki kılavuzlanmış toplam YKY'yi gösterir. YKY negatif z yönünde oluşur ve sinyalin tersi yönünde yayılır.

3.2.5. Yaşam süresi (Ömür)

Bir üst durumun yaşam süresi EKFY'lerin modellenmesinde bir diğer önemli parametredir. Bu parametre, fotonların temel seviyeye dönmeden önce uyarılmış seviyede kaldıkları ortalama süreyi ifade eder. EKFY'ler için yaşam süresi ışımalı ve ışımasız geçişler olmak üzere iki temel durumla ilişkilidir. Yaşam süresi, erbiyum iyonlarının düşme olasılığı ile ters orantılı olduğu için, toplam yaşam süresi, $\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_{NR}}$ eşitliği ile elde edilebilir. Burada τ toplam yaşam süresi, τ_R ve τ_{NR} sırasıyla ışımalı ve ışımasız yaşam sürelerini ifade etmektedir. Işımalı yaşam süresi, uyarılmış seviyeden altındaki tüm diğer seviyelere ışımadan kaynaklanmaktayken, ışımasız yaşam süresi daha çok camın ya da kristal yapısının doğal yapısına bağlıdır [49].

3.3. EKFY'de Gürültü ve Doyum

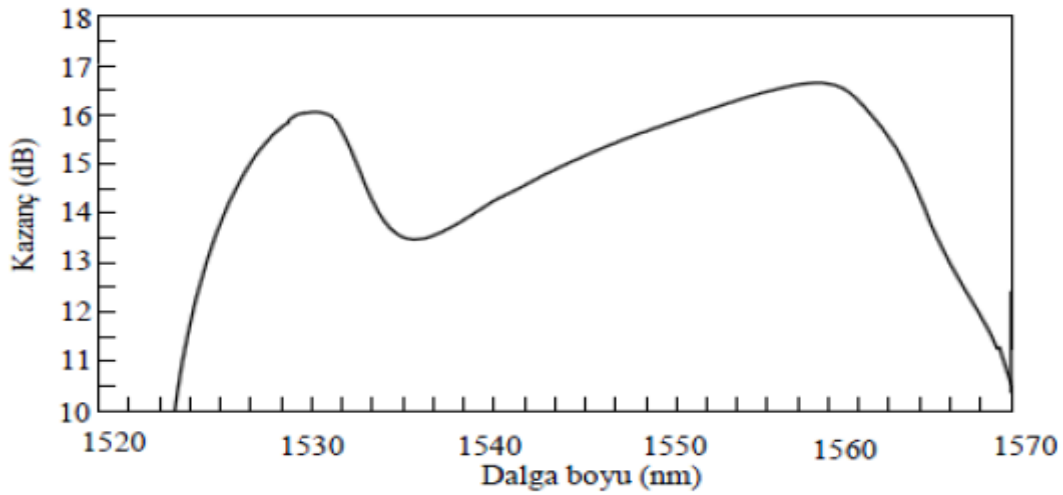
Kimi fotonlar, bir işaretin fotonuyla uyarılmaksızın, toprak seviyesine hemen dönerken, sinyalle ilişkisiz bir foton yayılır. Bu durum EKFY'lerde dikkate değer tek gürültü kaynağıdır. Ani ışımayla üretilen fotonlar, katkılı fiber boyunca her iki yöne yayılırlar. Fotonlar hangi tarafa giderlerse gitsinler, kendiliğinden daha fazla foton ışımasını uyarabilirler. Aniden ışılan fotonlarla uyarılmış yayılma iki probleme neden olur. Birincisi, bu durum gürültüyü kuvvetlendirir. Dolayısıyla bu 3.2.4'te de anlatıldığı üzere yükselteçte ani ışıma (YKY) gürültüsünün tanımıdır. İkincisi, bu yayılma yarı kararlı seviyedeki elektronların bazılarını kaldırır. Bu ise iyonların ters birikmesini azaltır. Bu ikinci etki ters yönde YKY olarak bilinir ve yükseltecin çıkış gürültüsüne doğrudan katkı yapmasa bile, EKFY performansını olumsuz yönde etkilemektedir.

Herhangi bir yükselteçte olduğu gibi, EKFY de, çıkış şiddetinin arttırılmaya başlanmasıyla doyuma girmeye başlar. Bir EKFY doyumu, iyon yoğunluğu tersliğinin bastırılarak genişlemesiyle meydana gelir. EKFY doyumunda, uyarılmış seviyede birkaç erbiyum

iyonu kazançta bir azaltma yaratır. Bu fark, doyumun uzun süreli etkisinden kaynaklanmaktadır. Yüksek kazanç, gelen fotonlarla etkileşebilecek uyarılmış erbiyum iyonlarının çok büyük haznesine sahip olarak sağlanır. Eğer ortalama işaret gücü yüksek olursa, iyon deposu boşalır ve kazanç azalır. Yüksek güçlü kısa ani darbeler veya tersine az güçlü işaretler, uyarılmış iyonların, büyük haznesine erişebilir ve aynı kazanç denemesi, benzer sinyaldeki daha az güçlü ani darbelerle sağlanır.

3.4. EKFY’de Kazanç Kontrolü ve Kazanç Düzleştirme

EKFY’lerin kazanç spektrumları, enerji seviyelerinin dalga boyuna bağlı olarak farklılık göstermesi nedeni ile düz değildir. EKFY’nin düz olmayan kazanç spektrumundan dolayı, DBÇ sistemlerinin kapasitesi sınırlanmaktadır. Tek bir fiberden daha fazla kanal iletmek için düz kazanç spektrumunun oluşturulmasına ihtiyaç duyulmakta ve bunu sağlamak içinde EKFY’den çıkan sinyalin kazanç spektrumunun düzleştirilmesi gerekmektedir [61].



Şekil 3.5. EKFY’nin dalga boyuna bağlı olarak değişen kazanç spektrumu [61]

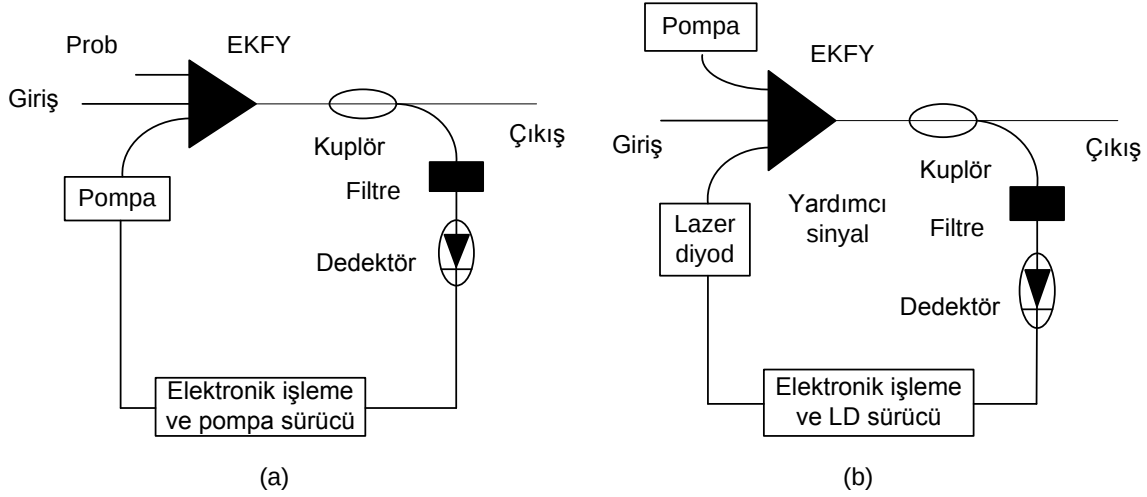
Şekil 3.5’de EKFY’nin dalga boyuna bağlı kazanç spektrumu görülmektedir. Kazanç spektrumu incelendiğinde birbirinden farklı görünümde iki tepeliğin oluştuğu görülür. Bu nedenle, EKFY tarafından yükseltilecek sinyallerin güçleri arasında farklılıklar oluşur. Bu farklılıklar sinyal gürültü oranını daha da düşürerek sinyalin bozulmasına neden olur ve iletim mesafesi kısalmır. Bu nedenle EKFY’lerin kazanç spektrumlarının düzleştirilmesi gerekir.

Fiber optik haberleşmede S, C ve L band yükseltmesi ve bu bandlarda kazanç düzleştirme işlemi için çeşitli yöntemler kullanılır. EKIFY, tüm bandlar için kullanılabilir. Fakat, S bandının tamamında yeterli yükseltmeyi sağlayamaz [32-33, 62]. Kazanç band genişliğini büyütmek ve düzleştirmek için çeşitli yaklaşımlar vardır. Yaklaşımlardan birisi erbiyum katkılı silika cam fibere Al_2O_3 ve P_2O_5 gibi yeni malzemeler eklemektir [63-65]. Başka bir yaklaşım ise Mach-Zender optik filtresi, akusto-optik filtre veya uzun periyotlu fiber-ızgara filtreleri gibi kazanç eşitleyici optik filtrelerin kullanılmasıdır [66-69]. Bu metotta EKIFY kazancının yüksek olduğu dalga boylarında, filtre ile kayıp oluşturularak toplam kazanç düzleştirilir. Optik kazanç düzleştirici filtre olarak adlandırılan bu filtreler, düşük maliyete ve yüksek kararlılığa sahiptir [4].

3.4.1. Kazanç kontrolü için klasik metot

Kazanç kontrolü yapmak için pompa kontrolü ve sinyal kontrolü olmak üzere iki klasik yaklaşım vardır. Şekil 3.6'da halka geri besleme yapısına dayalı bu iki metodun tipik konfigürasyonları görülmektedir. Pompa kontrolü metodunda çıkış gücünün küçük bir kısmı kullanılır, prob sinyali filtre edilir, algılanır ve pompa sürücüsüne bir elektrik sinyali tanımlamak için kullanılır. Giriş sinyal güçleri değiştiği zaman, prob sinyalinin gücündeki değişimler ilk olarak geri besleme döngüsünde algılanır. Ardından; pompa sürücü devresi, sürekli olarak prob sinyalinin önceden belirlenmiş değeri elde edilene kadar, EKIFY'ye enjekte edilen pompa gücünü ayarlar. Bununla birlikte, doğrudan giriş sinyal gücü değişimlerini izlemek için giriş ucu kullanan uygulamalar da vardır. Bu pompa kontrol metodlarının amacı, giriş sinyal gücü değişimlerine karşı arttırılan ya da azaltılan pompa gücü ile kazanç doygunluğunu bastırmaktır [49].

Şekil 3.6 (b)'de gösterilen sinyal kontrol metodu, çıkıştaki sinyal gücü değişimlerini izlemek için benzer bir geri besleme döngüsü kullanır. Pompa gücü değiştirme yerine, ilave bir lazer sinyali (yardımcı sinyal) girişe eklenir ve yükseltece enjekte edilen güç seviyesi çıkış gücüne bağlı olarak ayarlanabilir. Bu ilave sinyalin fonksiyonu, EKIFY sabitine toplam giriş gücünü uydurarak, giriş sinyal gücünün değişimlerini dengelemektir. Bu nedenle, bu yükseltecin kazanç doyumu, tüm giriş sinyalleri için kenetlenmiş bir kazançta yol açan bir seviyeye sabitlenir.

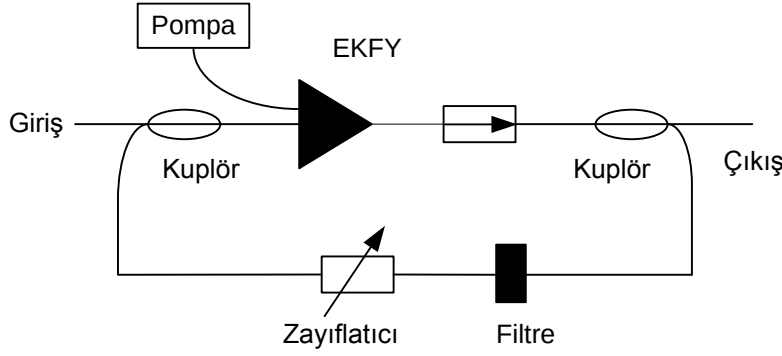


Şekil 3.6. Geri besleme döngü yapısı ile otomatik kazanç kontrolü için iki klasik konfigürasyon (a) Pompa kontrolü ile geri besleme, (b) Yardımcı sinyal kontrolü ile geri besleme [49]

Her iki yöntem de sinyal kazancını kenetlemede çok etkili olmasına rağmen, aynı zamanda birçok sakıncayı da bünyelerinde barındırmaktadırlar. İlk olarak; her iki yöntem de optik prob sinyali elde etmek için detektör, filtre ve bağlantı ucu gibi optik ve optoelektronik ilave araçlar ile kazanç kontrolü için geri besleme döngüsü içinde elektronik bir kontrol sinyali üretilmesine ve işlenmesine ihtiyaç duyarlar. Böylece maliyet büyük ölçüde artar. İkinci olarak; kazanç kenetleme, yükselteç ile öz düzenlemeli değildir. Örneğin, geri besleme döngüsü içinde lazer diyod (LD) sürücü devresi ya da bir pompa sürücü devresine ek olarak işleme elektroniği ile kontrol edilir. Bu nedenle, pompa gücü ya da LD çıkış gücü, kazanç değişimlerini dengelemek için büyük bir aralıkta değiştirilebiliyor olmalıdır. Bu daha iyi bir kenetleme performansı elde etmek için çok karmaşık bir pompa/LD sürücü devresi gerektirmektedir.

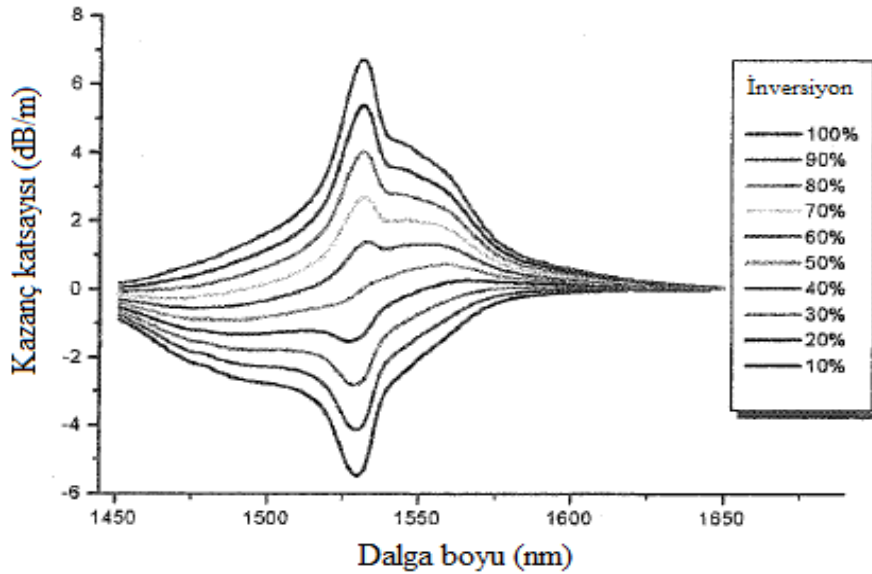
3.4.2. Halka lazer yapısı ile tam optik kazanç kontrolü

Kazanç kontrolü için diğer bir alternatif metot ise bir geri besleme halka lazerinin kullanıldığı halka lazer konfigürasyonudur [70,71]. Tipik konfigürasyon Şekil 3.7’de görülmektedir. Burada geri besleme döngüsü sadece birkaç pasif, tam optik cihazlardan oluşur. Bu metotta kazanç kontrolü, herhangi bir optik-elektronik dönüşüm olmadan tamamen optik ortamda yapılır.



Şekil 3.7. Geri beslemeli halka döngüsü ile kazanç kenetlemeli EKFY konfigürasyonu [49]

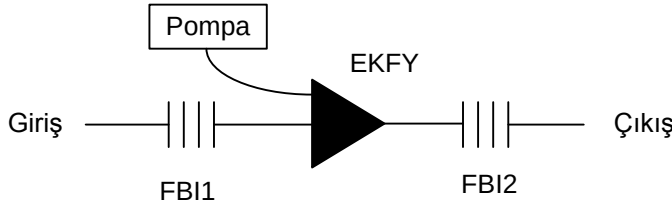
Bu konfigürasyondaki kazanç kenetleme teorisi, sinyal kontrol metoduyla benzerdir. Ancak, yardımcı sinyal ayrı bir lazer diyot tarafından üretilmez, bunun yerine bir erbiyum katkılı fiber halka lazer yükselticiye dahil edilir. Bu lazer sinyali, veri sinyali ile birlikte yükselticiye girer. Burada dikkat edilmesi gereken husus, lazer sinyalinin, giriş sinyali ile ters ya da aynı yönde yayılabiliyor olmasıdır. Lazer durumu nedeniyle (örneğin, kararlı durumda kazanç, toplam boşluk kaybına eşit olmalıdır) yükselteç içindeki bu lazer sinyalinin kazancı, EKFY'nin ortalama ters düzeyinde sabitleyen bir seviyeye kenetlenebilir. Şekil 3.8 ortalama ters seviyenin farklı değerleri için kazanç katsayı spektrumunu göstermektedir. Buradan, belirli bir ters seviyenin, her dalga boyu için bir kazanç seviyesine karşılık geldiği ve tam tersi görülebilir. Bu nedenle, lazer dalga boyunda sabitlenmiş bir kazanç seviyesi tüm kazanç spektrumunu düzenler.



Şekil 3.8. Farklı ortalama inversiyon seviyelerinde kazanç katsayı spektrumu [49]

3.4.3. Fiber Bragg ızgara ile tam optik kazanç kontrolü

Kazanç kontrolü için halka lazer yapısının bulunmasından sonra, FBI konfigürasyonu olarak adlandırılan iyi bir kazanç kenetleme etkisine sahip basit bir tasarım bulunmuştur [72,73].



Şekil 3.9. FBI fiber lazer yapısı ile kazanç kenetlemeli EKFY konfigürasyonu [49]

Şekil 3.9’da görüldüğü gibi bir çift FBI klasik bir yükseltecin önüne ve arkasına yerleştirilmiştir. FBI’nın temel çalışma şekli, Bragg dalga boyunda gelen optik sinyali yansıtma şeklindedir [74,75]. Bu nedenle, Şekil 3.9’da ki FBI1 ve FBI2, aynı Bragg dalga boyunda seçilirse, erbiyum katkılı fiber ızgara lazer oluşturulur. Bu konfigürasyondaki lazer sinyali, halka lazer konfigürasyonundaki ile tamamen aynı işlevlere sahiptir. Sinyal kazancını etkin olarak kenetleyebilir. Bu yapının avantajları, optik zayıflatıcı, optik filtre ve bağlantı ucu gibi birçok optik malzemeyi barındırması, fiber ızgaranın direkt olarak EKF’den yapılabilmesi ve bunun, fiber ekleme ile ilgili ek kayıplarını önlemesi ile yüksek yansıtıcılıkla FBI kullanarak çok düşük boşluk kaybının gerçekleştirilebilmesidir. Halka lazer konfigürasyonunda çıkıştaki bir bağlantı ucu, optik gücün küçük bir kısmını geri besleme döngüsüne döndürmek için kullanılır. Bu kısım, sinyal gücünün kaybını en aza indirmek için çok küçük olmalıdır. Bu nedenle, toplam boşluk kaybı genelde oldukça büyüktür. FBI konfigürasyonu için boşluk kaybı, uygun yansıtıcılıklara sahip FBI seçilmesiyle, 1 dB ile 20 dB arasında değiştirilebilir. Bu durum, EKFY tasarımına daha fazla esneklik kazandırır. Ayrıca, FBI’lar çok dar bant olabilir ve geri besleme seviyesi, sinyal dalga boyu için kayıp yaratmadan, oldukça yüksek seçilebilir.

3.4.4. Literatür çalışmaları

EKFY kazancının düzeltilmesi için literatürde birçok çalışma yapılmıştır [48,76]. Yapılan çalışmalar tek geçişli EKFY, iki aşamalı EKFY, çift geçişli EKFY veya çok

geçişli EKFY [77-86] üzerine yoğunlaşmışken; ayarlanabilir optik zayıflatıcı (AOZ) ile toplam kazanç ayarlanıp düzleştirilmiş [87], uzun periyotlu fiber ızgaralar kullanılarak EKFY'nin kazancının düzleştirilmesi önerilmiş [88], EKFY pompa gücünü ayarlamak için negatif geri besleme döngüsüne dayalı YOY kullanılması önerilmiş [89], fiber döngü aynası ile tam optik kazanç kenetlemeli EKFY incelenmiş [90], kaskat bağlı EKFY'lerde kanal ekleme/çıkarmayla geçişlerin kontrolü sağlanmış [91], kanalın ya da bağlantının gücünün geçici davranışı ayarlanıp korunarak (güç şekillendirme) EKFY güç geçişlerinin süre ve genliğinin azaltılması sağlanmış [92], uzun periyotlu ızgaranın bükülmesiyle her bir dalga boyu için gidiş dönüş kaybının ayarlanmasıyla tam optik kazanç kontrollü EKFY'nin kazancı kontrol edilmiş [93], halka rezonatör ve iki aşamalı sistem kullanılarak çift geçişli L-band EKFY'nin kazanç kontrolü sağlanmış [94], dinamik kazanç dalgalanmalarını azaltmak için optik gecikme hattı kullanılarak, yüksek hızlı otomatik kazanç kontrollü EKFY geliştirilmiş [95], iki aşamalı bir EKFY'de, hızlı link kontrol kanalı ile her bir aşamanın orta evre zayıflama ve pompa gücü kontrol edilerek, akış kayıpları ve kanal sayısının ani değişimlerinden bağımsız, düz kazanç ve sabit bir çıkış gücü elde edilmiştir [96].

Literatürde yer alan çalışmaların bazıları özetlenecek olursa:

L band için FBI ile çift geçiş EKFY birleştirerek yeni bir EKFY önerilmiştir. Klasik L band ile önerilen bu konfigürasyon karşılaştırıldığında, -30 dBm güçte 1580 nm dalga boyunda ki giriş sinyali için kazancın yaklaşık 6 dB iyileştirildiği, gürültü faktörünün ise büyük ölçüde azaldığı görülmüştür [97].

Tek aşamalı çift geçiş ve iki aşamalı çift geçiş Tip A, iki aşamalı çift geçiş Tip B, iki aşamalı çift geçiş Tip C ve iki aşamalı çift geçiş Tip D olmak üzere beş farklı EKFY konfigürasyonu incelenmiştir. Bu çalışmada her bir konfigürasyon için 1480 nm dalga boyu pompa lazeri, sirkülatör ve sinyali yansıtmak için fiber ayna kullanılarak, FBI ve çift geçiş yöntemiyle yüksek kazanç ve düşük gürültüye sahip L band EKFY gerçekleştirilmiştir. Tip A konfigürasyonunun ortalama kazancı, tek geçişli konfigürasyondan 6,6 dB daha yüksek bulunmuştur. EKF ve fiber ayna arasına FBI yerleştirilmesiyle 2,9 dB'lik bir kazanç değişimi ve 4,8 dB daha düşük bir gürültü faktörü elde edilmesi sağlanmıştır [98].

1480 nm’de ileri yönde pompalanmış tek geçiş, çift geçiş ve filtreli çift geçiş EKFY sistemleri deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmada, 1550 nm dalga boyu 40 mW pompa gücünde, -34 dBm ve 0 dBm arasında 2 dB aralıklarla sinyal gücü uygulanmıştır. Çift geçişli EKFY’nin kazancı, küçük sinyal güçleri için tek geçişli EKFY’den daha yüksek çıkmıştır. Yükselteç doyumunda değilken, çift geçişli EKFY’nin kazancı tek geçişli EKFY den 3 dB daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca, dar bant filtrenin kullanıldığı çift geçişli EKFY yapısında kazancın 8 dB arttığı görülmüştür [99].

Yükseltecin kendi doyum etkisini azaltan bir filtre görevi gören cıvıltı fiber Bragg ızgara (CFBI) ile tasarlanan yeni bir EKFY konfigürasyonu sunulmuştur. Bu çalışmada, -40 dBm giriş sinyal gücü ve 100 mW pompa gücüne karşılık, 53,4 dB kazanç ve 5,36 dB gürültü faktörü elde edilmiştir. Gürültü faktöründe 1,5 dB’lik kazançta ise 17,1 dB’lik bir iyileşme elde edilmiştir [100].

Tam çift geçişli bir sistem ile iki aşamalı kısmi çift geçişli L Band EKFY karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, çift geçişli sisteme göre kısmi çift geçişli sistemin, küçük giriş sinyal gücüne karşılık daha yüksek kazanç ve daha düşük gürültü faktörüne sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, 31,2 dB kazanç ve 6,2 dB gürültü faktörü değeri elde edilmiştir. Ancak elde edilen veriler ışığında yüksek giriş sinyal güçleri için tek geçişli düzeneğin daha iyi gürültü faktörü performansına sahip olduğu görülmüştür [101].

Yücel ve Aslan deneysel olarak tek ve çift geçişli EKFY’yi incelemişlerdir. Öncelikle, 1554 nm dalga boyundaki giriş sinyal gücü -40 dBm ile +5 dBm arasında değiştirilerek tek ve çift geçişli EKFY’lerin kazanç ve gürültü faktörü değerleri ölçülmüş, daha sonra -30 dBm gücündeki giriş sinyalinin dalga boyu değerleri 1526 nm ile 1570 nm aralığında değiştirilerek ölçümler tekrarlanmıştır. Bu çalışmanın sonucunda çift geçişli EKFY kazancının yaklaşık 3-9 dB iyileştiği görülürken, YKY’nin fiber boyunca hem ileri hem de geri yönlü yayılması nedeniyle, gürültü faktörünün yaklaşık 2-5 dB yükseldiği gözlemlenmiştir [76].

Yücel ve Göktaş’ın yaptığı çalışmada ise, tek aşamalı, iki aşamalı, iki aşamalı kazanç düzleştirici filtreli ve çift geçişli L band EKFY konfigürasyonlarının çıkış sinyal kazanç spektrumları ile gürültü şekilleri incelenmiştir. Bu dört konfigürasyona, 1565–1610 nm dalga boyu arasında -20 dBm güçteki L band sinyaller uygulanmıştır. Sonuç olarak, en yüksek kazanç, çift geçişli konfigürasyonda, en düşük gürültü şekli, iki aşamalı ve iki

aşamalı kazanç düzleştirici filtreli konfigürasyonlarda ve en düşük kazanç dalgalanması, iki aşamalı kazanç düzleştirici filtreli konfigürasyonda elde edilmiştir [78].

Wang ve arkadaşları, çift geçişli konfigürasyonda yüksek kazanç ve düşük gürültü faktörü elde etmek için, etkin bir pompalama şeması sunmuşlardır. Bu çalışma sonucunda FBI'nın olduğu sistemin daha yüksek kazanç ve daha düşük gürültü faktörü sağladığı görülmüştür [102].

Tek aşamalı, önerilen iki aşamalı, tek aşamalı tek yönlü ve iki aşamalı tek yönlü yansıtıcı tip EKFY düzenekleri sunularak, tek aşamalı yansıtıcı yükselteç ve önerilen iki aşamalı yansıtıcı sistem ile gürültü faktöründe 2 dB daha iyileşme ve nispeten daha düz bir sinyal kazancı karakteristiği elde edilmiştir [103].

Yücel ve Göktaş, 0°C ile 60°C arasındaki sıcaklıkta, tek geçişli ve çift geçişli L band EKFY'nin sıcaklığa bağımlı kazanç değişimini, -20 dBm güçteki giriş sinyalleri ve 980 nm pompa lazerleri ile iki yönlü pompalayarak deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuçta, çift geçişli L band EKFY kazancının tek geçişli L band EKFY kazancından daha yüksek olduğu görülmüştür [80].

Harun ve arkadaşları, reflektör ile C band yükseltmede kendiliğinden yayılan YKY'yi etkili bir şekilde bastıran ve sömüren bir çift geçiş L band EKFY sunmuşlardır. FBI ile çift geçişli sistemde, EKFY de ki sinyal ve YKY yansıtılmıştır. Klasik tek geçişli EKFY'ye göre çift geçişli EKFY'nin kazancının yaklaşık 10 dB ve gürültü faktörünün ise 3 dB geliştirilebileceği gösterilmiştir [104].

Zayıf güç dönüşüm verimliliğini artırmak için, 1. ve 2. kısmı geçerek 3. kısma gelen pompa sinyali ve üçüncü EKF'de harcanan YKY kullanılarak, 3 aşamalı bir L band EKFY konfigürasyonu tasarlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, 1570 nm'den 1610 nm'ye kadar yüksek kazanç ve geniş kararlılık sağlanabilmektedir [105].

Akhter ve arkadaşları, TP1, TP2 ve TP3 olmak üzere iki aşamalı ve üç aşamalı üç geçişli sistemler modellemiş ve karakterize etmişlerdir. Sinyal gücü ve pompa gücü oranı tüm konfigürasyonlarda analiz edilmiştir. 10:50 mW pompa gücü oranına karşılık yapılan ölçümlere göre TP1 konfigürasyonu 3,24 dB'lik bir gürültü faktörüne ve TP2

konfigürasyonu 3,37 dB'lik bir gürültü faktörüne, TP3 konfigürasyonunun ise 10:50:100 mW pompa gücü oranında 3,81 dB'lik bir gürültü faktörüne sahip olduğu görülmüştür. TP1, TP2 ve TP3 konfigürasyonları için, -5 dBm sinyal gücüne karşılık sırasıyla 35,148 dB, 21,639 dB ve 26,624 dB'lik kazanç değerleri elde edilmiştir [43].

Yücel ve arkadaşları, maksimum kazanç, minimum gürültü faktörü ve minimum kazanç dalgalanması elde etmek için, 3 aşamalı L band EKFY'nin her bir aşama için fiber uzunluklarını ve pompa lazer güçlerini optimize etmişlerdir. Sisteme, -30 dBm güçte, 1570 nm ile 1610 nm dalga boyları arasında, 2,5 nm aralıklarla, 17 sinyal uygulanmıştır. Bu çalışma sonucunda, 980-1480 nm pompa dalga boyları için ortalama 34,7 - 37,1 dB kazanç, 6,28 - 6,0 dB gürültü faktörü ve 2,13 -2,28 dB kazanç dalgalanması elde edilmiştir [77].

Yücel ve Yenilmez, düz bir kazanç spektrumu sağlamak için, simülasyon programı aracılığıyla C band boyunca iki fiber arasına KDF ve ikinci fiber sonuna üniform fiber Bragg ızgara (ÜFBI) yerleştirerek tüm sistemin kazanç spektrumunu optimize etmişlerdir. Önerilen sistemle kazancın düzleştirilmesinin yanı sıra, 1530-1565 nm aralığında her bir dalga boyu için YKY'nin daha iyi olması ve azda olsa bastırılması nedeniyle gürültü faktörünün de azaldığı ayrıca gözlemlenmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada C band için iki aşamalı sistemde KDF ve ÜFBI kullanılarak toplamda yaklaşık 26,04 dB kazanç ve yaklaşık 0,68 dB dalgalanma faktörü elde edilmiştir. Tüm sistemin kazanç spektrumu elektronik bir kontrol olmadan tamamen optik olarak kontrol edilmiştir [106].

4. ÖNERİLEN SİSTEMLERİN BENZETİMİ

4.1. Giriş

Bu tez çalışmasında, C ve L band EKFY için tam optik kazanç düzleştirme sistemleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu amaçla, Optisystem 12.0 yazılımı kullanılarak, üç adet C band ve iki adet L band EKFY konfigürasyonun benzetimi yapılmış ve bu konfigürasyonlar karşılaştırılmıştır. Kazanç ve gürültü faktörü spektrumları her bir konfigürasyon için ayrı ayrı incelenmiştir. Bu konfigürasyonların avantajları ve dezavantajları belirlenmiş, tasarımcıların öncelik verdikleri parametreye göre en uygun maliyetle ve en az malzemeyle en ideal sistemi nasıl kuracakları konusunda fikir sahibi olmaları sağlanmıştır.

4.2. C Band EKFY’de FBI ve KDF Kullanılarak Kazanç Düzleştirme

Bir fiber Bragg ızgarada kırılma indisinin değişiminden dolayı yayılan modların birbirine etkisi, zıt yönde ilerleyen modlar arasında meydana gelir. Kırılma indisinde meydana gelen değişimden dolayı, optik fiberin çekirdek bölgesinde ızgara oluşumu meydana gelir. Bragg şartı olarak bilinen belirli şartlar altında, ızgarayı oluşturan saçaklardan yansıyan ışık birbirine eklenir ve büyük bir yansıma meydana gelir. Izgara saçak aralığı (Λ) ızgara periyodu olarak isimlendirilir. Üniform ızgaralar için periyot, ızgara boyunca sabit kalırken, civıltı ızgaralarda değişir. Kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarı, üniform ızgaralarda ızgara uzunluğu boyunca sabit kalırken, apodize ızgaralarda farklılık gösterir. Bragg ızgaralarda, ızgara periyodu 1 μm ’den küçüktür. Yansıma modunda çalışan fiber Bragg ızgaralar, fiber girişine uygulanan ışığın bir kısmını ızgara saçaklarından geri yansıtarak çalışırlar. Bu yansıtıcılık Bragg dalgaboyunda en yüksek değerine ulaşır. Yansıyan ışık spektrumu çok dar ve Bragg dalgaboyunda merkezlenmiş durumdadır [107]. Çok kanallı sinyallerin güçlerinin, EKFY çıkışında gösterdiği farklılığın giderilmesi amacıyla kazanç düzleştirici filtreler kullanılabilir. Filtre, zayıflatıcı bir etki göstererek kazanç spektrumunun düzleştirilmesine katkı sağlar. Filtreden dolayı oluşan kazanç kaybını gidermek için genellikle ikinci bir EKFY kullanılır ve bu nedenle sistem iki aşamalı olarak adlandırılır [61].

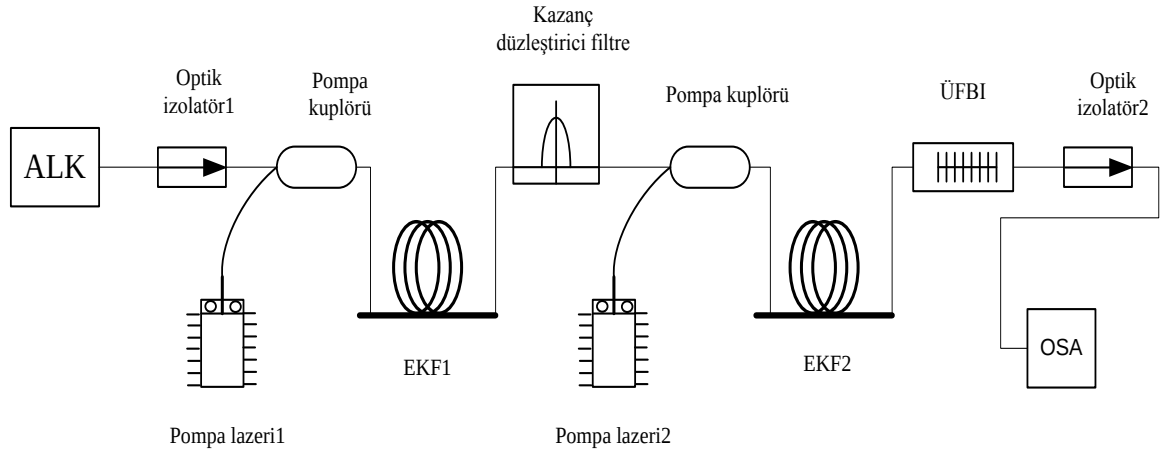
4.2.1. ÜFBI ve KDF ile iki aşamalı C band EKFY

Bu çalışmada düz bir kazanç spektrumu sağlamak için, C band boyunca iki EKF arasına KDF ve ikinci EKF sonuna ÜFBI yerleştirilerek tüm sistemin kazanç spektrumu optimize edilmiştir.

EKFY'lerde kazanç düzleştirmek için optik ve elektronik yöntemler kullanılmaktadır. Elektronik yöntemlerde yaygın olarak, pompa lazerinin akımı çıkış kazancına göre kontrol edilerek yüksek kazançlı sinyallerin kazançları azaltılır. Optik yöntemlerde ise, elektronik bir uygulama yerine tamamen optik ortamda kazanç düzleştirilmesi hedeflenmektedir. Bu çalışmada, tamamen optik olarak C band bir EKFY'nin kazanç spektrumu OptiSystem 12.0 yazılımı kullanılarak düzleştirilmiştir. Şekil 4.1'de kazancın düzleştirilmesi için önerilen sisteme ait benzetim düzeneği görülmektedir. Bu düzenekte giriş sinyali olarak 1530 nm ile 1565 nm arasında – 20 dBm güçte 8 adet sinyal simüle edilmiştir.

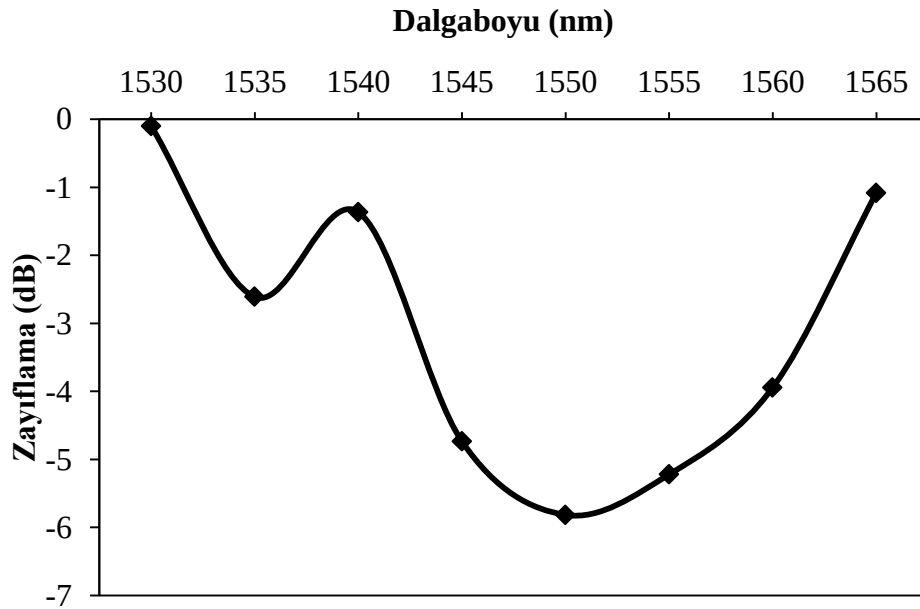
Şekil 4.1'de, ayarlanabilir lazer kaynağı (ALK) ile uygulanan sinyaller, geri yansımaları önleyen fiber izolatörden (Optik izolatör1) geçtikten sonra 980 nm dalga boyuna ve 95 mW güce sahip pompa lazeri (Pompa lazeri1) ile pompa kuplöründe birleştirilmektedir. Buradan 11,5 m'lik erbiyum katkılı fibere (EKF1) ulaşarak yükseltilecek sinyaller, EKF1 sonuna yerleştirilen KDF'ye ulaşmakta ve ikinci aşamada 980 nm dalga boyuna ve 95 mW güce sahip başka bir pompa lazeri (Pompa lazeri2) ile pompa kuplöründe birleştirilmektedir. 11,5 m'lik ikinci bir EKF'e (EKF2) ulaşarak tekrar yükseltilecek sinyaller, EKF2 sonuna yerleştirilen 1560 nm merkez dalga boyu, 30 nm band genişliği ve %50 yansıtıma sahip, üniform fiber Bragg ızgaraya (ÜFBI) ulaşmakta ve geri yansımaları önleyen fiber izolatörden (Optik izolatör2) geçtikten sonra optik spektrum analizör (OSA) ile ölçülmektedir.

EKF boyları ve pompa lazerinin güçleri minimum çıkış kazanç dalgalanmasını sağlamak için elde edilmiş optimize değerlerdir.



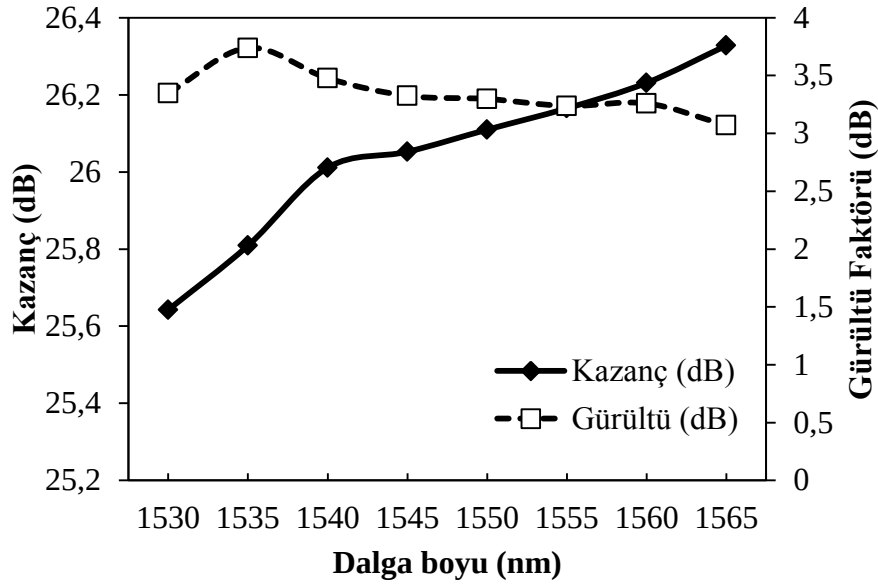
Şekil 4.1. ÜFBI ve KDF ile iki aşamalı C band EKFY

Şekil 4.2’de iletim spektrumu verilen KDF ile, özellikle 1545-1565 nm arasındaki yüksek kazançlı dalga boylarının kazançları zayıflatılarak, diğer dalga boylarıyla aynı seviyeye getirilmesi sağlanmıştır. İkinci aşamada kullanılan 1560 nm merkez dalga boyu, 30 nm band genişliği ve %50 yansıtıma sahip ÜFBI ile ise, 1550, 1555, 1560 ve 1565 nm dalga boyuna sahip sinyallerin bir kısmı sabit bir oranda yansıtılarak, bu dalga boyuna sahip sinyallerin iletilen güç miktarı azaltılmıştır.



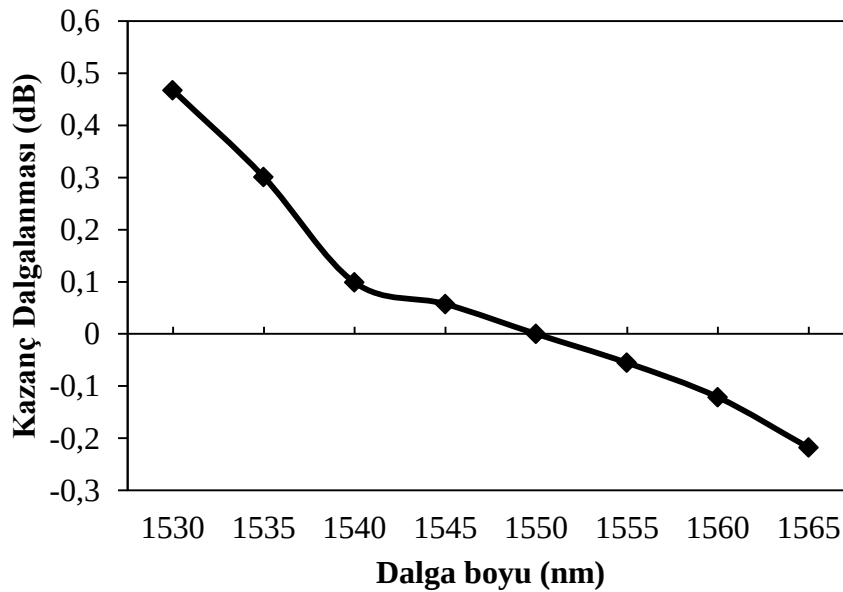
Şekil 4.2. KDF’nin iletim spektrumu

1530-1565 nm dalga boyu aralığında, -20 dBm’lik sinyal seviyesi için, çıkış kazanç ve gürültü spektrumları Şekil 4.3’de görülmektedir.



Şekil 4.3. ÜFBI ve KDF ile C band EKFY’nin çıkış kazanç ve gürültü spektrumu

Şekil 4.3’de görüldüğü gibi önerilen sistem ile 1530 nm’den 1565 nm’ye kadar kazanç spektrumu yükselmiştir. Gürültü faktörü ise YKY’nin azaltılmasıyla, ortalama 3,34 dB seviyesine indirilmiştir.



Şekil 4.4. KDF ve ÜFBI kullanılan sistemde kazanç dalgalanma grafiği

Şekil 4.4’de görüldüğü gibi önerilen sistem ile KDF ve ÜFBI kullanılarak kazanç dalgalanması oldukça düşürülmüş, 1530- 1565 nm aralığında yaklaşık 0,5 dB ile -0,2 dB arasında değişmesi sağlanmıştır.

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 incelendiğinde, önerilen sistem ile 1530, 1535, 1540 nm dalga boylarında kazanç arttırılmış, 1545-1565 nm aralığında ise kazanç kırılarak, dalgalanma faktörü yaklaşık 0,68 dB’ye düşürülmüştür. Böylece EKFY’nin çıkış kazanç spektrumunun tamamen optik olarak düzleştirilmesi sağlanmıştır.

Önerilen sistemle kazancın düzleştirilmesinin yanı sıra, 1530-1565 nm aralığında her bir dalga boyu için YKY’nin daha iyi olması ve azda olsa bastırılması nedeniyle gürültü faktörünün de azaldığı ayrıca gözlemlenmiştir.

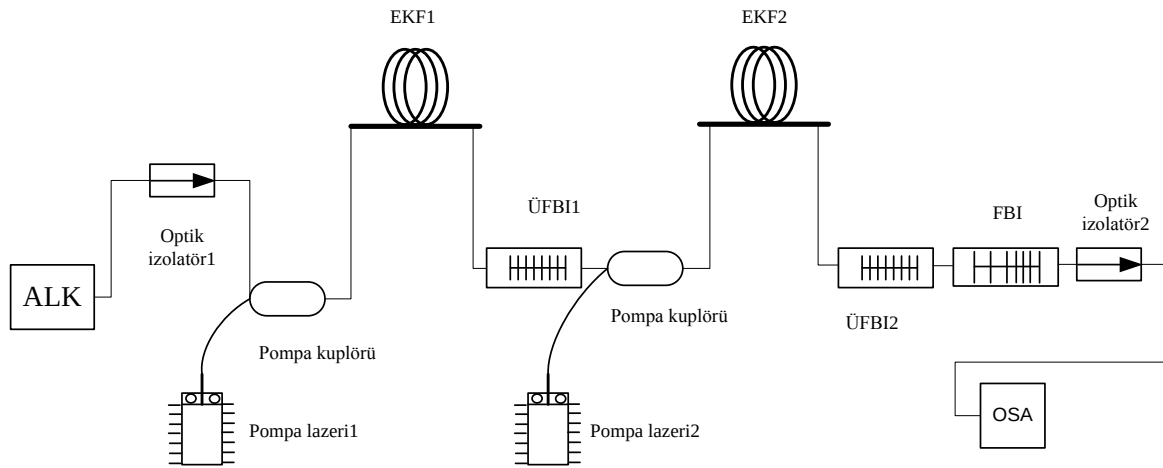
Sonuç olarak bu çalışmada, C band için iki aşamalı sistemde KDF ve ÜFBI kullanılarak toplamda yaklaşık 26,04 dB kazanç ve yaklaşık 0,68 dB dalgalanma faktörü elde edilmiştir.

4.2.2. FBI ile iki aşamalı C band EKFY

Önerilen sistemle, düz bir kazanç spektrumu sağlamak için, C band boyunca ilk aşamada EKF1 sonuna ÜFBI1, ikinci aşamada EKF2 sonuna sırasıyla ÜFBI2 ve FBI yerleştirilerek tüm sistemin kazanç spektrumu OptiSystem 12.0 yazılımı kullanılarak optimize edilmiştir. Şekil 4.5’de kazancın düzleştirilmesi için önerilen sisteme ait simülasyon düzeneği görülmektedir. Bu düzenekte giriş sinyali olarak 1530 nm ile 1565 nm arasında – 20 dBm güçte 8 adet sinyal simüle edilmiştir.

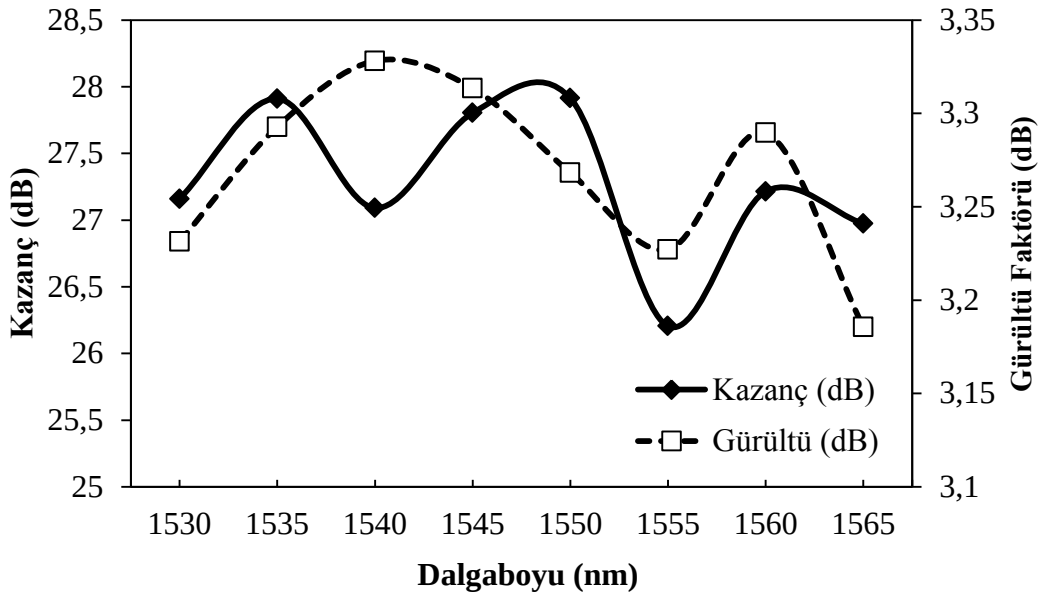
Şekil 4.5’de, ALK ile uygulanan sinyaller, geri yansımaları önleyen fiber izolatörden (Optik izolatör1) geçtikten sonra 980 nm dalga boyuna ve 55 mW güce sahip pompa lazeri (Pompa lazeri1) ile pompa kuplöründe birleştirilmektedir. Buradan 9,5 m’lik erbiyum katkılı fibere (EKF1) ulaşarak yükseltilecek sinyaller, EKF1 sonuna yerleştirilen 1555 nm merkez dalga boyu, 25 nm band genişliği ve %65 yansıtıma sahip ÜFBI1’e ulaşmaktadır. Fiber Bragg ızgaraları λ_B dalga boyunda bir optik yansıtıcı filtre gibi davranır. İlk aşamada kullanılan bu ızgara ile 1550,1555 ve 1560 nm dalga boyuna sahip sinyallerin bir kısmı sabit bir oranda yansıtılarak bu dalga boyuna sahip sinyallerin iletilen güç miktarı azaltılmıştır. İkinci aşamada ise ÜFBI1 çıkışındaki sinyaller, 980 nm dalga boyuna ve 55 mW güce sahip başka bir pompa lazeri (Pompa lazeri2) ile pompa kuplöründe

birleştirilmektedir. 10,5 m'lik ikinci bir EKF'e (EKF2) ulaşarak tekrar yükseltile sinyaller, EKF2 sonuna yerleştirilen 1543 nm merkez dalga boyu, 10 nm band genişliği ve %40 yansıtıma sahip ÜFBI2'ye gelmektedir. Burada, 1540 ve 1545 nm dalga boyuna sahip sinyallerin bir kısmı sabit bir oranda yansıtılarak, bu dalga boyuna sahip sinyallerin iletilen güç miktarı azaltılmıştır. Kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarı ızgara uzunluğu boyunca değişen, 1535 nm merkez dalga boyu ve 1,45 efektif indise sahip, 2,7 mm uzunluğundaki FBI ile ise, 1535 nm dalga boyuna sahip sinyalin bir kısmı yansıtılarak kazanç düzleştirme işleminin son aşaması gerçekleştirilmiş, iletilen sinyaller geri yansımaları önleyen fiber izolatörden (Optik izolatör2) geçtikten sonra optik spektrum analizör (OSA) ile ölçülerek kazanç ve gürültü spektrumları incelenmiştir. EKF boyları ve pompa lazerinin güçleri minimum çıkış kazanç dalgalanmasını sağlamak için elde edilmiş optimize değerlerdir. Benzetim sırasında, kazanç spektrumunun optimize edilmesi için gerekli olan yansıyan güç oranının sabit ya da değişken olmasına göre, ÜFBI ya da FBI seçilmiştir.



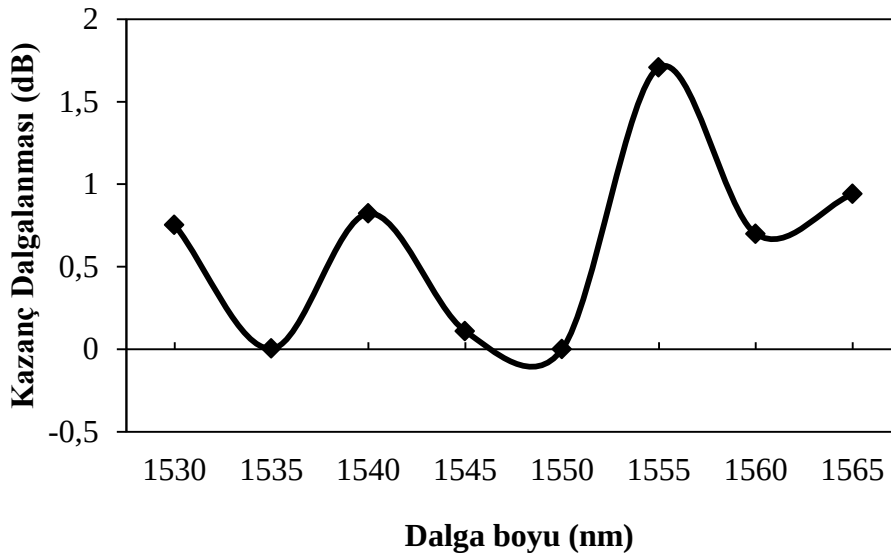
Şekil 4.5. FBI ile iki aşamalı C band EKFY

1530-1565 nm dalga boyu aralığında, -20 dBm'lik sinyal seviyesi için, çıkış kazanç ve gürültü spektrumları Şekil 4.6'da görülmektedir.



Şekil 4.6. FBI ile iki aşamalı C band EKFY'nin çıkış kazanç ve gürültü spektrumu

Şekil 4.6'da görüldüğü gibi önerilen sistem ile en yüksek kazanç 1550 nm civarında elde edilmiştir. Gürültü faktörü YKY'nin azaltılmasıyla ortalama 3,27 dB seviyesine indirilmiş, 1540 nm'de diğer dalga boylarına göre biraz daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 4.7. FBI kullanılan iki aşamalı sistemin kazanç dalgalanma grafiği

Önerilen sistem için 1550 nm'ye göre normalize edilmiş kazanç dalgalanma grafiği Şekil 4.7'de görülmektedir. Önerilen sistem ile ÜFBI ve FBI kullanılarak kazanç dalgalanması

oldukça düşürülmüş, 1530-1565 nm aralığında yaklaşık 0,004 ile 1,71 dB arasında değişmesi sağlanmıştır.

Şekil 4.7 incelendiğinde, önerilen sistem ile dalgalanma faktörü yaklaşık 1,71 dB'ye düşürülmüş, böylece EKFY'nin çıkış kazanç spektrumunun tamamen optik olarak düzeltilmesi sağlanmıştır. Buna ek olarak, 1530-1565 nm aralığında YKY'nin az da olsa bastırılması nedeniyle gürültü faktörünün de azaldığı ayrıca gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak bu çalışmada, C band için iki aşamalı sistemde 2 adet ÜFBI ve 1 adet FBI kullanılarak toplamda yaklaşık 27,32 dB kazanç ve yaklaşık 1,71 dB dalgalanma faktörü elde edilmiştir.

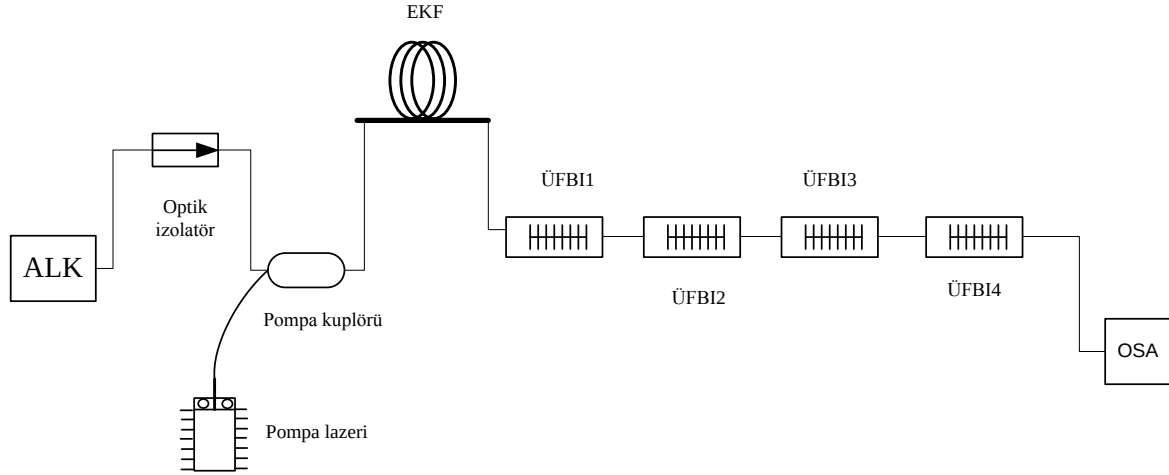
4.2.3. ÜFBI ile tek aşamalı C band EKFY

Önerilen sistem ile, düz bir kazanç spektrumu sağlamak için, C band boyunca EKF sonuna 4 adet ÜFBI yerleştirilerek tüm sistemin kazanç spektrumu optimize edilmiştir.

Bu çalışmada tamamen optik olarak C band bir EKFY'nin kazanç spektrumu OptiSystem 12.0 yazılımı kullanılarak düzeltilmiştir. Şekil 4.8'de kazancın düzeltilmesi için önerilen sisteme ait simülasyon düzeneği görülmektedir. Bu düzenekte giriş sinyali olarak 1530 nm ile 1565 nm arasında – 20 dBm güçte 8 adet sinyal simüle edilmiştir.

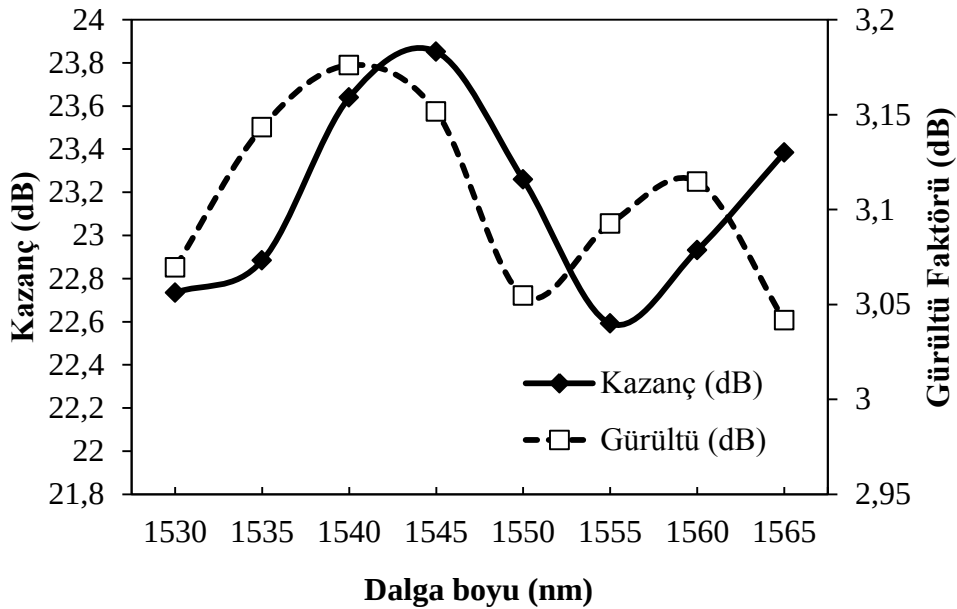
Şekil 4.8'de ALK ile uygulanan sinyal, geri yansımaları önleyen fiber izolatörden (Optik izolatör1) geçtikten sonra 980 nm dalga boyuna ve 55 mW güce sahip pompa lazeri (Pompa lazeri1) ile pompa kuplöründe birleştirilmektedir. Buradan 16 m'lik EKF'ye ulaşarak yükseltelen sinyaller, EKF sonuna yerleştirilen 1555 nm merkez dalga boyu, 20 nm band genişliği ve %45 yansıtıma sahip ÜFBI1'e ulaşmaktadır. Bu ızgara ile, 1550, 1555 ve 1560 nm dalga boyuna sahip sinyallerin bir kısmı sabit bir oranda yansıtılarak bu dalga boyuna sahip sinyallerin iletilen güç miktarı azaltılmıştır. 1547 nm merkez dalga boyu, 10 nm band genişliği ve %45 yansıtıma sahip ÜFBI2 ile, ÜFBI1 çıkışındaki 1545 ve 1550 nm dalga boyuna sahip sinyallerin bir kısmı, 1535 nm merkez dalga boyu, 5 nm band genişliği ve %30 yansıtıma sahip ÜFBI3 ile, ÜFBI2 çıkışındaki 1535 nm dalga boyuna sahip sinyalin bir kısmı, 1560 nm merkez dalga boyu, 5 nm band genişliği ve %30 yansıtıma sahip ÜFBI4 ile de ÜFBI3 çıkışındaki 1560 nm dalga boyuna sahip sinyalin bir kısmı sabit bir oranda yansıtılarak, bu dalga boyuna sahip sinyallerin yansıtılan güç miktarı

arttırılıp, iletilen güç miktarı azaltılmış ve C band boyunca kazanç dalgalanması minimum değere çekilmiştir. İletilen sinyaller OSA ile ölçülerek kazanç ve gürültü spektrumları incelenmiştir. EKF boyu ve pompa lazerinin gücü minimum çıkış kazanç dalgalanmasını sağlamak için elde edilmiş optimize değerlerdir.



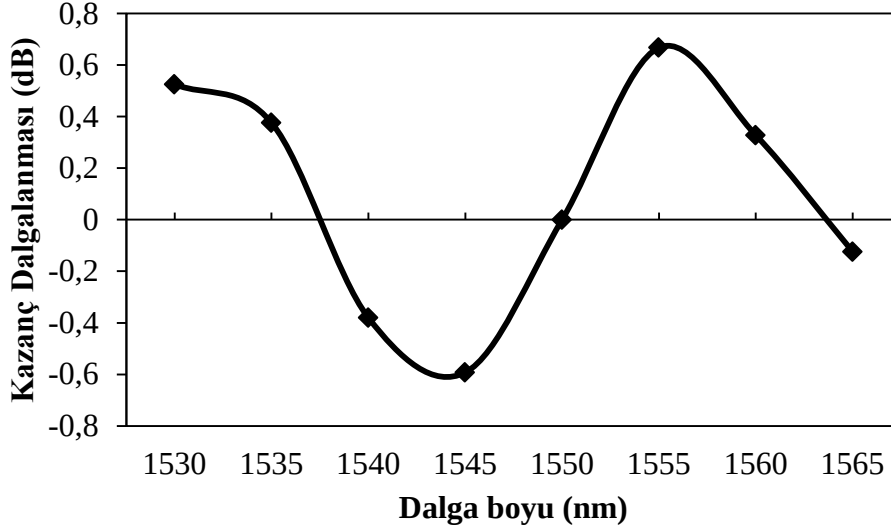
Şekil 4.8. ÜFBI ile tek aşamalı C band EKFY

1530-1565 nm dalga boyu aralığında, -20 dBm'lik sinyal seviyesi için, çıkış kazanç ve gürültü spektrumları Şekil 4.9'da görülmektedir.



Şekil 4.9. ÜFBI ile tek aşamalı C band EKFY'nin çıkış kazanç ve gürültü spektrumu

Şekil 4.9’da görüldüğü gibi önerilen sistem ile en yüksek kazanç 1545 nm civarında elde edilmiştir. Gürültü faktörü YKY’nin azaltılmasıyla ortalama 3,11 dB seviyesine indirilmiş, 1540 nm’de diğer dalga boylarına göre biraz daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 4.10. ÜFBI kullanılan tek aşamalı sistemin kazanç dalgalanma grafiği

Önerilen sistem için 1550 nm’ye göre normalize edilmiş kazanç dalgalanma grafiği Şekil 4.10’da görülmektedir. Önerilen sistem ile ÜFBI ile ızgara dizisi kullanılarak kazanç dalgalanması oldukça düşürülmüş, 1530-1565 nm aralığında yaklaşık – 0,59 ile 0,67 dB arasında değişmesi sağlanmıştır.

Şekil 4.10 incelendiğinde, önerilen sistem ile dalgalanma faktörü yaklaşık 1,26 dB’ye düşürülmüş, böylece EKFY’nin çıkış kazanç spektrumunun tamamen optik olarak düzleştirilmesi sağlanmıştır. Buna ek olarak 1530-1565 nm aralığında YKY’nin az da olsa bastırılması nedeniyle gürültü faktörünün de azaldığı ayrıca gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak bu çalışmada, C band için tek aşamalı sistemde 4 adet ÜFBI kullanılarak toplamda yaklaşık 23,18 dB kazanç ve yaklaşık 1,26 dB dalgalanma faktörü elde edilmiştir.

4.3. L Band EKFY’de Kazanç Düzleştirme

EKFY’ler ilk olarak C bandında (1530-1560 nm) kullanılmış, artan kapasite ihtiyaçları nedeniyle S bandı (1470-1520 nm) ve L bandında da (1570-1610 nm) kullanılmaya

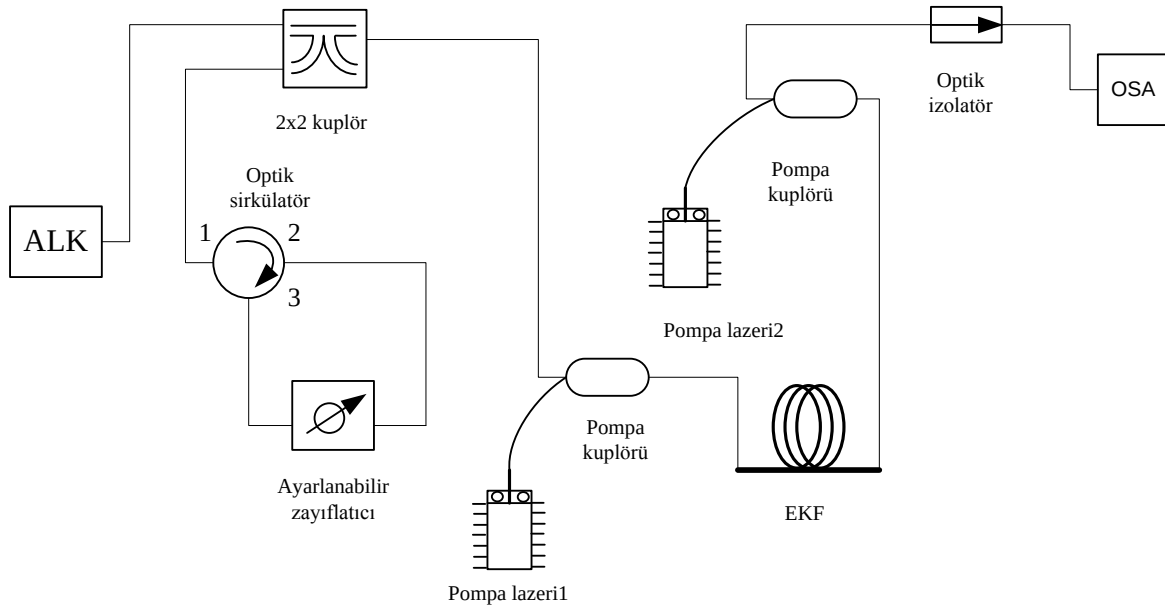
başlanmıştır. C ve L bandında EKFY kazancını arttırmak için birçok farklı konfigürasyon geliştirilmiştir. Bu konfigürasyonlarda, bir EKF kısmı kullanılan tek aşamalı sistemler çeşitli şekillerde pompalanmış, daha sonra iki veya daha fazla EKF kısmı olan yükselteçler geliştirilmiş, tek EKF kısmından yansıtıcılar yardımıyla iki kez sinyal geçirilerek oluşturulan çift geçişli sistemler oluşturulmuş ve son olarak, birden fazla EKF kısmı ve yansıtıcılar kullanılarak üç ve daha fazla geçişli sistemler geliştirilerek EKFY kazancı arttırılmıştır. Ayrıca, EKFY’de düz kazanç profili sağlamak için iki aşamalı sistemler, KDF’ler ve fiber ızgaralar kullanılmıştır.

4.3.1. Optik döngü ile tek aşamalı L band EKFY

Önerilen sistem ile, düz bir kazanç spektrumu sağlamak için, L band boyunca 17 dB zayıflatmaya sahip ayarlanabilir zayıflatıcı, 2x2 kuplör ve sirkülatör kullanılarak bir döngü oluşturulmuş ve tüm sistemin kazanç spektrumu optimize edilmiştir.

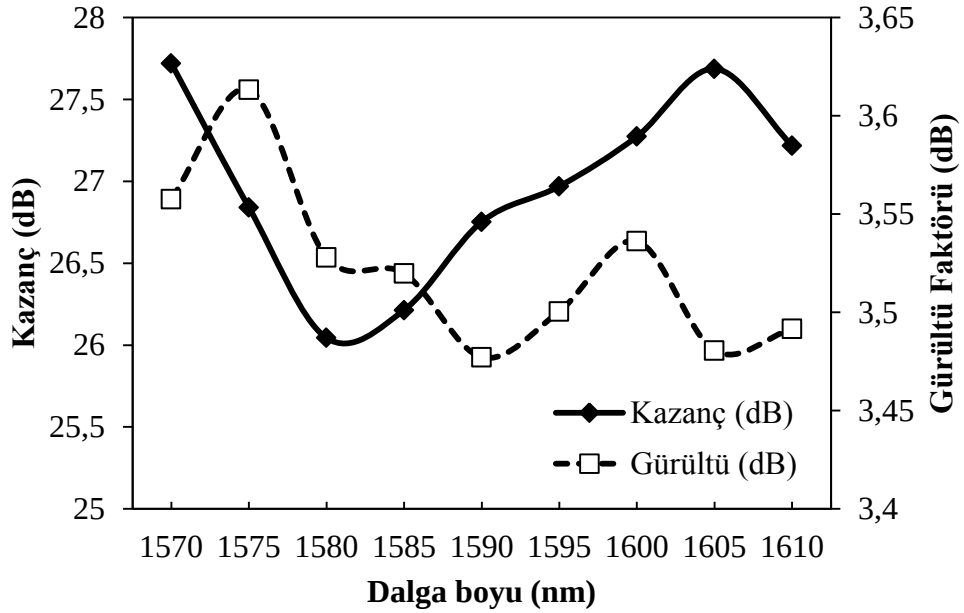
Bu çalışmada tamamen optik olarak L band bir EKFY’nin kazanç spektrumu OptiSystem 12.0 yazılımı kullanılarak düzleştirilmiştir. Şekil 4.11’de kazancın düzleştirilmesi için önerilen sisteme ait benzetim düzeneği görülmektedir. Bu düzenekte giriş sinyali olarak 1570 nm ile 1610 nm arasında – 20 dBm güçte 9 adet sinyal simüle edilmiştir.

Şekil 4.11’de, ALK aracılığıyla 1570-1610 nm dalga boyu aralığındaki -20 dBm güce sahip sinyaller, 100 mW güçteki 980 nm pompa lazerleri ile iki yönlü olarak pompalanarak, 61 m uzunluğundaki L band EKF’ye uygulanmıştır. Pompa lazeri2 ile geri yönlü olarak pompalanıp fibere uygulanan sinyaller ve YKY, 2x2 kuplör aracılığıyla optik sirkülatöre gelmektedir. Sirkülatörün 1 nolu bacağından girip 2 nolu bacağından çıkan sinyaller, 17 dB zayıflatmaya sahip ayarlanabilir zayıflatıcıya verilmiştir. Zayıflatılan sinyaller, sirkülatörün 3 nolu bacağından girip 1 nolu bacağından çıkarak, 2x2 kuplör aracılığıyla tekrar sisteme döndürülmüştür. Kullanılan bu döngü ile EKF’de yükseltilecek sinyaller ve YKY belli bir değerde zayıflatılıp sisteme tekrar verilmiş, çıkışta ise geri yansımaları önleyen optik izolatör kullanılarak OSA yardımıyla ölçümler alınmıştır. EKF boyu, zayıflatma değeri ve pompa lazerlerinin güçleri minimum çıkış kazanç dalgalanmasını sağlamak için elde edilmiş optimize değerlerdir.



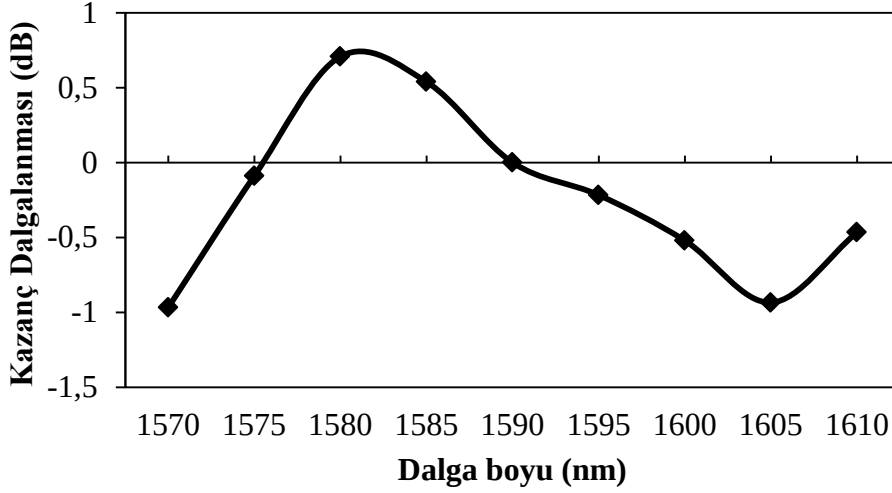
Şekil 4.11. Optik döngü ile tek aşamalı L band EKFY

1570-1610 nm dalga boyu aralığında, -20 dBm’lik sinyal seviyesi için, çıkış kazanç ve gürültü spektrumları Şekil 4.12’de görülmektedir.



Şekil 4.12. Optik döngü ile tek aşamalı L band EKFY’nin çıkış kazanç ve gürültü spektrumu

Şekil 4.12’de görüldüğü gibi önerilen sistem ile en yüksek kazanç 1570 nm civarında elde edilmiştir. Gürültü faktörü YKY’nin azaltılmasıyla ortalama 3,52 dB seviyesine indirilmiş, 1575 nm’de diğer dalga boylarına göre biraz daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 4.13. Optik döngü kullanılan tek aşamalı sistemin kazanç dalgalanma grafiği

Önerilen sistem için 1590 nm’ye göre normalize edilmiş kazanç dalgalanma grafiği Şekil 4.13’de görülmektedir. Önerilen sistem ile 1 adet sirkülatör, 1 adet 2x2 kuplör ve 1 adet AOZ kullanılarak bir döngü oluşturulmuş ve kazanç dalgalanması oldukça düşürülerek 1570-1610 nm aralığında yaklaşık - 0,97 ile 0,71 dB arasında değişmesi sağlanmıştır.

Şekil 4.13 incelendiğinde, önerilen sistem ile dalgalanma faktörü yaklaşık 1,68 dB’ye düşürülmüş, böylece EKFY’nin çıkış kazanç spektrumunun tamamen optik olarak düzleştirilmesi sağlanmıştır. Buna ek olarak, 1570-1610 nm aralığında YKY’nin az da olsa bastırılması nedeniyle gürültü faktörünün de azaldığı ayrıca gözlemlenmiştir.

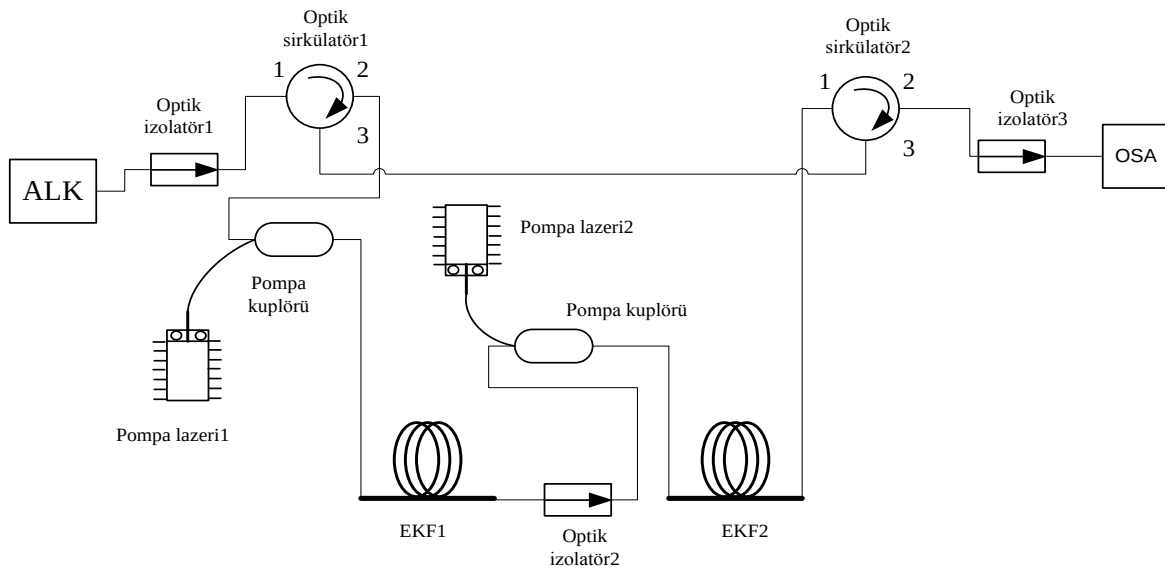
Sonuç olarak bu çalışmada, L band için tek aşamalı sistemde 1 adet sirkülatör, 1 adet 2x2 kuplör ve 1 adet ayarlanabilir zayıflatıcı kullanılarak bir döngü oluşturulmuş ve toplamda yaklaşık 27,00 dB kazanç ve yaklaşık 1,68 dB dalgalanma faktörü elde edilmiştir.

4.3.2. Optik geri besleme döngüsü ile iki aşamalı L band EKFY

Önerilen sistem ile, düz bir kazanç spektrumu sağlamak için, L band boyunca 2 adet optik sirkülatör kullanılarak tüm sistemin kazanç spektrumu optimize edilmiştir.

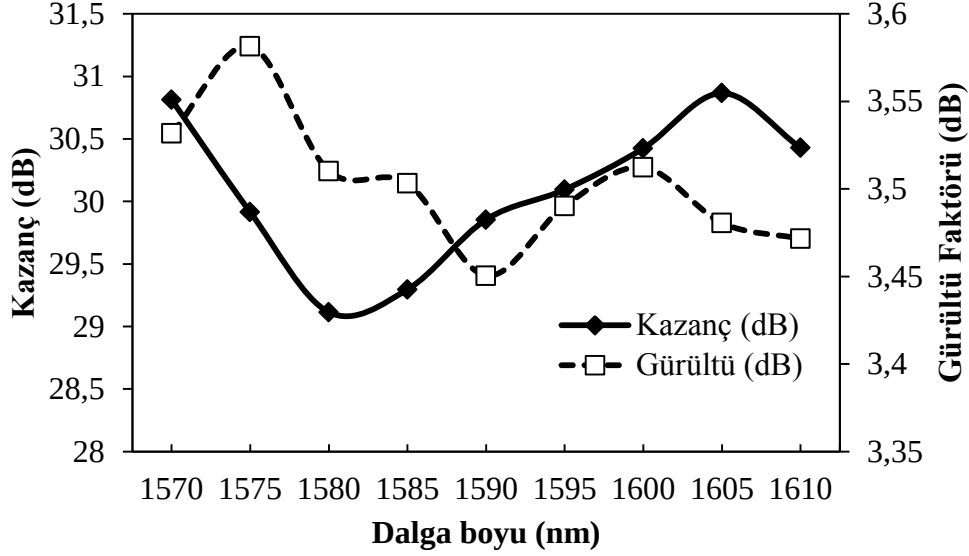
Bu çalışmada tamamen optik olarak L band bir EKFY'nin kazanç spektrumu OptiSystem 12.0 yazılımı kullanılarak düzleştirilmiştir. Şekil 4.14'de kazancın düzleştirilmesi için önerilen sisteme ait benzetim düzeneği görülmektedir. Bu düzenekte giriş sinyali olarak 1570 nm ile 1610 nm arasında -20 dBm güce 9 adet sinyal simüle edilmiştir.

Şekil 4.14'de, ALK aracılığıyla 1570 nm ile 1610 nm dalga boyu aralığındaki -20 dBm güce sahip sinyaller, geri yansımaları önleyen fiber izolatörden (Optik izolatör1) geçtikten sonra sirkülâtörün (Optik sirkülâtör1) 1 nolu bacağından girip 2 nolu bacağından çıkmakta ve 980 nm dalga boyu ve 55 mW güce sahip pompa lazeri ile (Pompa lazeri1) pompa kuplöründe birleştirilmektedir. Buradan 33,5 m'lik erbiyum katkılı fibere (EKF1) ulaşarak yükseltilen sinyaller, EKF1 sonuna yerleştirilen ve geri yansımaları önleyen fiber izolatörden (Optik izolatör2) geçtikten sonra, 1480 nm dalga boyu ve 107,9 mW güce sahip pompa lazeri ile (Pompa lazeri2) pompa kuplöründe birleştirilmektedir. İkinci aşamada, 100 m'lik erbiyum katkılı fibere (EKF2) ulaşarak tekrar yükseltilen sinyaller, ikinci sirkülâtörün (Optik sirkülâtör2) 1 nolu bacağından girip 2 nolu bacağından çıkarak geri yansımaları önleyen fiber izolatörden (Optik izolatör3) geçmektedir. Böylece iletilen sinyaller OSA ile ölçülerek kazanç ve gürültü spektrumları incelenmiştir. Sistemde kullanılan Optik sirkülâtör1 ve Optik sirkülâtör2'nin 3 nolu bacaklarının birbirine bağlanmasıyla, EKF1'de oluşan YKY'nin, EKF2'de tekrar yükseltilip, iletilen sinyal yönünde çıkışa ulaştırılması sağlanmıştır. EKF boyu ve pompa lazerlerinin güçleri minimum çıkış kazanç dalgalanmasını sağlamak için elde edilmiş optimize değerlerdir.



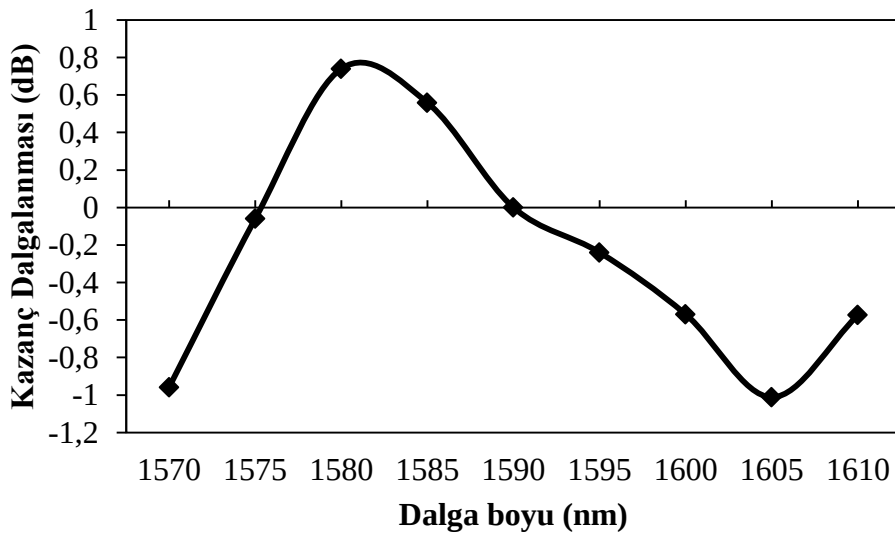
Şekil 4.14. Optik geri besleme döngüsü ile iki aşamalı L band EKFY

1570-1610 nm dalga boyu aralığında, -20 dBm’lik sinyal seviyesi için, çıkış kazanç ve gürültü spektrumları Şekil 4.15’de görülmektedir.



Şekil 4.15. Optik geri besleme döngüsü ile iki aşamalı L band EKFY’nin çıkış kazanç ve gürültü spektrumu

Şekil 4.15’de görüldüğü gibi önerilen sistem ile en yüksek kazanç 1605 nm civarında elde edilmiştir. Gürültü faktörü YKY’nin azaltılmasıyla ortalama 3,50 dB seviyesine indirilmiş, 1575 nm’de diğer dalga boylarına göre biraz daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 4.16. Optik geri besleme döngüsü kullanılan iki aşamalı sistemin kazanç dalgalanma grafiği

Önerilen sistem için 1590 nm'ye göre normalize edilmiş kazanç dalgalanma grafiği Şekil 4.16'da görülmektedir. Önerilen sistem ile 2 adet sirkülatör kullanılmış ve kazanç dalgalanması oldukça düşürülerek, 1570-1610 nm aralığında yaklaşık - 1,01 ile 0,74 dB arasında değişmesi sağlanmıştır.

Şekil 4.16 incelendiğinde, önerilen sistem ile dalgalanma faktörü yaklaşık 1,75 dB'ye düşürülmüş, böylece EKFY'nin çıkış kazanç spektrumunun tamamen optik olarak düzleştirilmesi sağlanmıştır. Buna ek olarak, 1570-1610 nm aralığında YKY'nin az da olsa bastırılması nedeniyle gürültü faktörünün de azaldığı ayrıca gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak bu çalışmada L band için iki aşamalı sistemde 2 adet sirkülatör kullanılıp bu sirkülatörlerin 3 nolu bacakları birbirine bağlanarak toplamda yaklaşık 30,13 dB kazanç ve yaklaşık 1,75 dB dalgalanma faktörü elde edilmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, tamamen optik olarak kontrol edilen beş adet konfigürasyonun benzetimi yapıp, her bir çalışma detaylı bir şekilde incelenmiştir. Her bir konfigürasyon için kazanç ve gürültü spektrumları verilmiş ve kullanılan her bir malzemenin kazanç, gürültü ve dalgalanma faktörleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Oluşturulan tüm sistemler kendi içerisinde tek tek optimize edilerek en uygun parametreler bulunmuştur. Bu parametreler EKF boyları, pompa lazerlerinin dalga boyları ve güçleri, FBI ve ÜFBI yansıtma değerleri ile merkez dalga boyları ile AOZ zayıflatma değeri gibi parametreler olup, bu parametrelerin optimizasyonu ile en uygun kazanç, gürültü faktörü ve dalgalanma değerleri elde etmek için 5 ayrı düzeneğin benzetimi yapılmıştır. Tek ve iki aşamalı EKFY için C ve L bandında yapılan benzetim çalışmalarında elde edilen sonuçlar Çizelge 5.1’de sunulmuştur.

Çizelge 5.1. Benzetim çalışmalarında elde edilen sonuçlar.

Konfigürasyon	Band Genişliği (nm)	Kazanç (dB)	Gürültü Faktörü (dB)	Dalgalanma (dB)	Kullanılan Malzeme Sayısı (Adet)
1. ÜFBI ve KDF ile iki aşamalı EKFY	1530-1565	26,04	3,34	0,68	12
2. FBI ile iki aşamalı EKFY	1530-1565	27,32	3,27	1,71	13
3. ÜFBI ile tek aşamalı EKFY	1530-1565	23,18	3,11	1,26	10
4. Optik döngü ile tek aşamalı EKFY	1570-1610	27,00	3,52	1,68	11
5. Optik geri besleme döngüsü ile iki aşamalı EKFY	1570-1610	30,13	3,50	1,75	13

Çizelge 5.1’de verilen sonuçlar incelendiğinde, kurulan düzenekler arasında en yüksek kazancın L band boyunca iki adet sirkülatör yardımıyla bir döngü kurulmasıyla oluşturulan

iki aşamalı EKFY sisteminde (5 numaralı konfigürasyon) olduğu görülmektedir. En düşük kazanç ise 3 numaralı konfigürasyon olan C band boyunca FBI dizisi kullanılarak oluşturulan tek aşamalı EKFY sisteminde elde edilmiştir.

Çizelge 5.1 incelendiğinde, en yüksek kazancın 5 numaralı konfigürasyonda elde edildiği görülürken, en düşük dalgalanma faktörü 1 numaralı konfigürasyon olan C band boyunca KDF ve ÜFBI'nın kullanıldığı iki aşamalı EKFY sisteminde elde edilmiştir. Diğer sistemlere göre en başarısız dalgalanma faktörü, L band boyunca iki adet sirkülatör yardımıyla bir döngü kurulmasıyla oluşturulan iki aşamalı EKFY sisteminde (5 numaralı konfigürasyon) çıkmıştır.

Gürültü faktörünün L band boyunca çalışılan 4 ve 5 numaralı konfigürasyonlarda birbirine yakın ve diğer düzeneklere göre daha yüksek çıktığı görülürken, en iyi gürültü, 3 numaralı konfigürasyon olan C band boyunca FBI dizisinin kullanıldığı tek aşamalı EKFY sisteminde elde edilmiştir.

Sonuç olarak, benzetim çalışmalarının sonuçları karşılaştırıldığında, L band için, iki aşamalı sistemin yaklaşık 30,13 dB kazanç değeriyle tek aşamalı sisteme göre daha iyi sonuç verdiği; C band için ise, FBI ile iki aşamalı sistemin 27,32 dB kazanç değeriyle en iyi kazanç değerine sahip olduğu görülmüştür. Fakat C band için en az kazanç dalgalanması 0,68 dB ile ÜFBI ve KDF ile iki aşamalı EKFY konfigürasyonunda elde edilmiştir. Ayrıca, L band için kurulan konfigürasyonların her ikisinde de neredeyse aynı kazanç dalgalanması elde edilmiştir. Bu tez çalışması sonucunda tasarımcılar, banda ve öncelik verdikleri parametreye göre en uygun maliyetle veya en az malzemeyle düz kazançlı bir EKFY tasarlayabilirler.

KAYNAKLAR

1. Yuvka, Ş. (2006). *Çift Geçişli L-Bandı Erbiyum Katkılı Fiber Amplifikatör (L-EDFA) Tasarımı ve Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 1-66.
2. Connelly, M. J. (2002). *Semiconductor Optical Amplifiers*. Boston/ABD:Kluwer Academic Publishers, 4-9.
3. Aslan, Z. (2013). *Çift Geçişli Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçlerde Gürültü Faktörünün Azaltılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü, Ankara, 1-41.
4. Yücel, M. (2008). *Kazancı Düzleştirilmiş Geniş Bandlı Fiber Yükselteçlerin Tasarımı*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü, Ankara, 1-88.
5. Naji, A.W., Abidin, M.S.Z., Kassir, A.M., Al-Mansoori, M.H., Abdullah, M.K. and Mahdi, M.A. (2004). Trade-Off Between Single and Double Pass Amplification Schemes of 1480-nm Pumped EDFA. *Microwave and Optical Technol. Lett.*, 43(1), 38-40.
6. Hecht, J. (2002). The Evolution of Optical Amplifiers. *Optics & Photon. News*, 13(8), 36-39.
7. Koestner, C.J. and Snitzer, E.A. (1964). Amplification in a fibre laser. *Applied Optics*, 3(10), 1182-1187.
8. Mears, R.J., Reekie, L., Jauncey, I.M. and Payne, D.N. (1987). Low-Noise Erbium-Doped Fibre Amplifier Operating at 1.54 μm . *Electronics Lett.*, 23(19), 1026-1028.
9. Mears, R. J., Reekie, L., Jauncie, I. M. and Payne, D. N. (1987). *High-Gain Rare-Earth Doped Fiber Amplifier at 1.54 μm* . Optical Fiber Communication Conference, Washington D.C.
10. Desurvire, E., Simpson, J. R. and Becker, P. C. (1987). High-Gain Erbium-Doped Traveling-Wave Fiber Amplifier. *Optics Lett.*, 12(11), 888-889.
11. Nakazawa, M., Kimura, Y. and Suzuki, K. (1989). Soliton Amplification and Transmission with Er^{3+} -Doped Fibre Repeater Pumped by GaInAsP Laser Diode. *Electron. Lett.*, 25(3), 199-200.
12. Yamada, M., Ono, H., Kanamori, T., Sudo, S. and Ohishi, T. (1997). Broadband and Gain-Flattened Amplifier Composed of a 1,55 μm -Band and a 1,58 μm -Band Er^{3+} -Doped Fibre Amplifier in a Parallel Configuration. *Electron. Lett.*, 33(8), 710-711.
13. Jinno, M., Sakamoto, T., Kani, J., Aisawa, S., Oda, K., Fukui, M., Ono H. and Oguchi, K. (1997). First Demonstration of 1580 nm Wavelength Band WDM Transmission for Doubling Usable Bandwidth and Suppressing FWM in DSF. *Electron. Lett.*, 33(10), 882-883.

14. Sakamoto, T., Kani J., Jinno M., Aisawa S., Fukui M., Yamada M. and Oguchi, K. (1998). Wide Wavelength Band (1535-1560 nm and 1574-1600 nm), 28x10 Gbit/s 93 WDM Transmission over 320km Dispersion-Shifted Fibre. *Electron. Lett.*, 34(4), 392-393.
15. Hossain, N., Naji, A.W., Mishra, V., Abbou, F.M., Al-Mansoori, M.H., Mahdi, M.A. and Faidz, A.R. (2007). Modeling, Optimization, and Experimental Evaluation of Remotely Pumped Double-Pass EDFA. *Microwave and Optical Technol. Lett.*, 49(9), 2257-2261.
16. Harun, S.W., Dimyati, K., Jayapalan, K.K. and Ahmad, H. (2007). An Overview on S Band Erbium-Doped Fiber Amplifiers. *Laser Physics Lett.*, 4(1), 10-15.
17. Naji, A.W., Abidin, M.S.Z., Kassir, A.M., Al-Mansoori, M.H., Abdullah, M.K. and Mahdi, M.A. (2004). Trade-Off between Single and Double Pass Amplification Schemes of 1480-nm Pumped EDFA. *Microwave and Optical Technol. Lett.*, 43(1), 38-40.
18. Samsuri, N.M., Harun, S.W. and Ahmad, H. (2004). Comparison of Performances Between Partial Doublepass and full double-pass systems in Two-Stage LBand EDFA. *Laser Physics Lett.*, 1(12), 610-612.
19. Harun, S.W., Poopalan, P. and Ahmad, H. (2003). Double pass L-band erbium-doped fiber amplifier with enhanced gain characteristics. *Indian Journal of Physics*, 77B(4), 435-437.
20. Altuncu, A. (2006). Band Selection in Broadband Loop ASE Source Using Seed Signal Injection. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 18(9), 1043-1045.
21. Chen, S.P., Liu, Z.J., Li, Y.G., Lu, K. C. and Zhou, S.H. (2008). Resonantly pumped high power flat L-band erbium-doped superfluorescent fiber source. *Optics Express*, 16(1), 207-212.
22. Zhang, A.P., Chen, X.W., Guan, Z.G., He, S.L., Tam, H.Y. and Chung, W.H. (2005). Optimization of Step-Changed Long-Period Gratings for Gain-Flattening of EDFAs. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 17(1), 121-123.
23. Varshney, R.K., Nagaraju, B., Singh, A., Pal, B. P. and Kar, A. K. (2007). Design and Realization of an All-Fiber Broadband Tunable Gain Equalization Filter for DWDM Signals. *Optics Express*, 15(21), 13519-13530.
24. Zhang, A.P., Chen, X.W., Yan, J.H., Guan, Z.G., He, S.L. and Tam, H.Y. (2005). Optimization and Fabrication of Stitched Long-Period Gratings for Gain Flattening of Ultrawide-Band EDFAs. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 17(12), 2559-2561.
25. Liang, T.C., Cheng, N.J. and Hung, S.C. (2003). Gain enhancement in L-Band Gain-Flattened EDFA Using a Reflective-Type Structure. *Microwave and Optical Technol. Lett.*, 37(5), 393-395.
26. Ni, N., Chan, C.C., Tan, K.M., Tjin, S.C. and Dong, X. Y. (2007). Broad-Band EDFA Gain Flattening by Using an Embedded Long-Period Fiber Grating Filter. *Optics Comm.*, 271(2), 377-381.

27. Chung, K.W. and Yin, S. (2005). Design of a Phase-Shifted Long-Period Grating Using The Partial-Etching Technique. *Microwave and Optical Technol. Lett.*, 45(1), 18-21.
28. Masuda, H. and Miyamoto, Y. (2008). Low-Noise Extended L-Band Phosphorus Co-Doped Silicate EDFA Consisting of Novel Two-Stage Gain-Flattened Gain Blocks. *Electronics Lett.*, 44(18), 1082-1083.
29. Rao, Y.J., Hu, A.Z. and Niu, Y.C. (2005). A Novel Dynamic LPFG Gain Equalizer Written in a Bend-Insensitive Fiber. *Optics Comm.*, 244(2), 137-140.
30. Zirngibl, M. (1991). Gain Control in Erbium-Doped Fibre Amplifiers by an All Optical Feed Back Loop. *Electron. Lett.*, 27(7), 560-561.
31. Takushima Y. and Kikuchi, K. (1999). Gain spectrum equalization of All-Optical Gain- Clamped Erbium-Doped Fiber Amplifier. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 11(2), 176-178.
32. Kasamatsu, T., Yano, Y. and Ono, T. (2001). Gain-Shifted Dual-Wavelength-Pumped Thulium-Doped Fiber Amplifier for WDM Signals in the 1,48-1,51 μ m Wavelength Region. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 13(1), 31-33.
33. Kasamatsu, T., Yano, Y. and Ono, T. (2001). Laser-Diode-Pumped Highly Efficient Gain Shifted Thulium-Doped Fiber Amplifier Operating in the 1480-1510 nm Band. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 13(5), 433-435.
34. Mahdi, M.A., Ali, M.I.M. and Ahmad, A. (2008). Influence of the Pumping Scheme in Double-Pass Discrete Raman-Fiber Amplifiers. *Laser Physics*, 18(6), 807-809.
35. Emori, Y., Tanaka, K. and Namiki, S. (1999). 100 nm Bandwidth Flat-Gain Raman Amplifiers Pumped and Gain-Equalized by 12-Wavelength-Channel WDM Laser Diode Unit. *Electron. Lett.*, 35(16), 1355-1356.
36. Hecht, J. (1999). *City of Light: The Story of Fiber Optics*.(247). New York/ABD:Oxford University Press.
37. Gasulla, I. and Capmany, J. (2008). 1 Tb/s·km Multimode Fiber Link Combining WDM Transmission and Low-Linewidth Lasers. *Optics Express*, 16(11), 8033-8038.
38. Zhang, H., Yu, L., Liu, Y., Wang, C., Liu, L., Xiong, L., Yuan, S. and Dong, X. (2005). A Novel Method To Improve Noise Figure For Double-Pass L-Band EDFA. *Proc. of SPIE - Bellingham, WA*, 5623, 799-802.
39. Hossain, N., Naji, A.W., Mishra, V., Abbou, F.M., Al-Mansoori, M.H., Mahdi, M. A. and Faidz, A. R. (2007). Modeling, Optimization, and Experimental Evaluation Of Remotely Pumped Double-Pass EDFA. *Microwave and Optical Technol. Lett.*, 49(9), 2257-2261.
40. Yücel, M. ve Tuza, F. (2012). *Enjeksiyon Akımının Yarı İletken Optik Yükselteç Kazancına Etkisinin İncelenmesi*. URSİ 2012, İstanbul.

41. Connelly, M.J. (2002). *Semiconductor Optical Amplifiers*. Boston/ABD:Kluwer Academic Publishers.
42. Keiser, G. (2003). *Optical Communications Essentials*. New York /A.B.D: McGraw-Hill.
43. Akhter, F., Ibrahimy, M.I., Naji, A.W. and Siddiquei, H.R. (2012). Modeling And Characterization Of All Possible Triple Pass EDFA Configurations. *International Journal of the Physical Sciences*, 7(18), 2656-2663.
44. Harun, S.W. and Ahmad, H. (2007). Gain and Noise Figure Improvements in Double-Pass S-Band EDFA. *Optics and Laser Technol.*, 39, 935-938.
45. Dündar, Ö. (2007). *L-band Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteç Analizi ve Yapay Sinir Ağları ile Kazanç Tahmini*, Yüksek Lisans Tezi, S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 1-52.
46. Agrawal G.P. (1992). *Fiber-Optic Communication Systems*. John Wiley & Sons, Inc.
47. Çokrak, C. (2001). *Erbium Katkılı Fiber Optik Amplifikatörlerin Simülasyonu ve Gürültünün Sistem Performansına Etkisinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 16-62.
48. Yücel, M., Aslan, Z. ve Göktaş, H.H. (2013, 16-17 Mayıs). *Çeşitli Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteç Konfigürasyonları için Kazanç ve Gürültü Faktörünün İncelenmesi*. V. İletişim Teknolojileri Ulusal Sempozyumu, İzmir.
49. Xia, B. (2002). *Theoretical And Experimental Analyses All Optical Gain Clamped L Band EDFAs*, M.Sc. Thesis, McGill University Faculty of Graduate Studies and Research, Montreal.
50. Mears, R.J., Reekie, L., Jauncey, L.M. and Payne D.N. (1987). Low-Noise Erbium-Doped Fiber Amplifier Operating at 1.54 μm . *Electron. Lett.*, 23(19).
51. Will, D. and Teichmann B. (1994, 1-4 May). *Design of Erbium-Doped Fiber Amplifiers for Telecommunication Systems*. Electronic Components and Technology Conference, Proceedings, 44th, Washington DC.
52. Bayart, D., Clesca, B., Hamon, L. and Beylat, J.L. (1994). 1.55 μm Fluoride-Based EDFA with Gain-Flatness Control for Multiwavelength Applications. *Electron. Lett.*, 30(17), 1407-1409.
53. Ye Li, T. (1993). The Impact of Optical Amplifiers on Long-Distance Lightwave Telecommunications. *Proceedings of the IEEE*, 81(11), 1568-1579.
54. Mustafa, D.A.M. (2011). *L Band EKFY'nin Sıcaklığa Bağlı Boyunun Genetik Algoritma ile Optimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü, Ankara, 1-48.
55. Yücel, M. (2003). *Erbium Katkılı Fiber Yükselteç Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-35.

56. Yamada, M. and Shimizu, M. (2003). Ultra-Wideband Amplification Technologies for Optical Fiber Amplifiers. *NTT Technical Review*, 1(3), 80-84.
57. Desurvire, E. (1994). *Erbium-Doped Fiber Amplifiers Principles and Applications*. New York/ABD:John Wiley, 5-25.
58. Kagi, N., Oyobe, A. and Nakamura, K. (1991). Temperature Dependence of the Gain in Erbium Doped Fibers. *IEEE Journal of Lightwave Technol.*, 9(2), 261-265.
59. Saleh, B. E. A. and Teich, M. C. (1991). *Fundamentals of Photonics*. New York/ABD:John Wiley, 460-488.
60. Yariv, A. (1975). *Quantum Electronics*. New York/ABD:John Wiley, 171-174.
61. Gökteş, H.H. ve Yücel, M. (2006). İki Aşamalı C Band Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçlerde (EKFY) Kazanç Düzleştirici Filtre Optimizasyonu. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 10(1), 10-13.
62. Peterka, P., Faure, B., Blanc, W., Karasek, M. and Dussardier, B. (2004). Theoretical Modelling of S-band Thulium-Doped Silica Fibre Amplifiers. *Optical and Quantum Electronics*, 36(3), 201-212.
63. Yoshida, S., Kuwano, S. and Iwashita, K. (1995). Gain-Flattened EDFA with High Al Concentration for Multistage Repeated WDM Transmission Systems. *Electronics Lett.*, 31(20), 1765-1767.
64. B.O. Guan, H.-Y. Tam, S.-Y. Liu, P.K.A. Wai, and N. Sugimoto. (2003). Ultrawide-Band La-Codoped Bi₂O₃-Based EDFA for L-Band DWDM Systems. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 15(11), 1525-1527.
65. Bayart, D., Clesca, B., Hamon, L. and Beylat, J.L. (1994). Experimental Investigation of The Gain Flatness Characteristics for 1.55 μ m Erbium-Doped Fluoride Fiber Amplifiers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 6(5), 613-615.
66. Dung, S., Chi, J.C. and Wen, S. (1998). Gain Flattening of Erbium-doped Fibre Amplifier Using Fibre Bragg Gratings. *Electronics Lett.*, 34(6), 555-556.
67. Mizuno, K., Nishi, Y., Mimura, Y., Lida, Y., Matsuura, H., Yoon, D., Aso, O., Yamamoto, T., Toratani, T., Ono, Y. and Yo, A. (2000). Development of Etalon-Type Gain-Flattening Filter. *Furukawa Review*, 19, 53-58.
68. Cao, Y. (2003). *Design and Simulation of Gain-Flattened Ultra Wideband Fiber Amplifiers Covering S, C, and L Bands*, PhD. Thesis, The University of North Carolina, Charlotte, 43-82.
69. Vallon, S., Chevallier, P., Guiziou, L., Alibert, G., How Kee Chun, L. S. and Boos, N. (2003). 40-Band Integrated Static Gain-Flattening Filter. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 15(4), 554-556.
70. Yu, A. and O'Mahony, M.J. (1995). Properties of Gain Controlled Erbium Doped Fiber Amplifiers by Lasing. *Electron. Lett.*, 31(16), 1348-1349.

71. Zimgibl, M. (1991). Gain Control in Erbium-Doped Fiber Amplifiers by an All-Optical Feedback Loop. *Electron. Lett.*, 27(7), 560-561.
72. Delevaque, E., Georges, T., Bayon, J.F., Monerie, M., Niay, P. and Bemage, P. (1993). Gain Control in Erbium-Doped Fiber Amplifiers by Lasing at 1480 nm with Photoinduced Bragg Gratings Written on Fiber Ends. *Electron. Lett.*, 29(12), 1112-1114.
73. Zhao, Y., Bryce, J. and Minasian, R. (1997). Gain Clamped Erbium-Doped Fiber Amplifiers-Modeling and Experiment. *IEEE J Sel. Topics in Quantum Electron.*, 3(4), 1008-1012.
74. Hill, K. O. and Meltz, G. (1997). Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview. *IEEE J. Light. Tech.*, 15(8), 1263-1276.
75. Hill, K. O., Fujii, Y., Johnson, D.C. and Kawasaki R.S. (1978). Photosensitivity in Optical Fiber Waveguides: Application to Reflection Filter Fabrication. *Appl. Phys. Lett.*, 32, 647-649.
76. Aslan, Z. ve Yücel, M. (2012). Tek ve Çift Geçişli Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçlerin C bandında Deneysel Olarak Karşılaştırılması. *G.Ü. Politeknik Dergisi*, 15(3), 135-138.
77. Yücel, M., Göktas, H.H. and Akkaya, G. (2012, 18-20 April). *Optimization of the Three Stages L Band EDFA*. Signal Processing and Communications Applications, SIU 2012, IEEE 20th, Fethiye.
78. Yücel, M. and Göktas, H. H. (2007, 11-13 June). *Gain Flattening Configurations at the L Band Erbium Doped Fiber Amplifiers*. Signal Processing and Communications Applications, IEEE 15th, Eskişehir.
79. Yücel, M. and Aslan, Z. (2013). The Noise Figure and Gain Improvement of double-pass C-band EDFA. *Microwave and Optical Technology Letters*, 55(11), 2525-2528.
80. Yücel, M. and Göktas, H.H. (2012). Examination of Temperature Dependence of Double Pass L Band Erbium Doped Fiber Amplifier. *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, 27(2), 237-243.
81. Yücel, M. (2011). Fuzzy Logic-Based Automatic Gain Controller for EDFA. *Microwave and Optical Technology Letters*, 53(11), 2703-2705.
82. Yucel, M. and Goktas, H.H. (2008). Determination of Minimum Temperature Coefficient of C Band EDFA. *Journal of Applied Sciences*, 8(23), 4464-4467.
83. Yucel, M., Goktas, H.H. and Ozkaraca, O. (2010). Temperature Dependence of Noise Figure in the Erbium Doped Fiber Amplifier. *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.*, 25(3), 635-641.
84. Yücel, M., Göktas, H.H. and Çelebi, F. V. (2011, 20-22 April). *The Effect of Pump Laser Wavelength Change on The Temperature Dependence of EDFA*. Signal Processing and Communications Applications, IEEE 19th, Antalya.

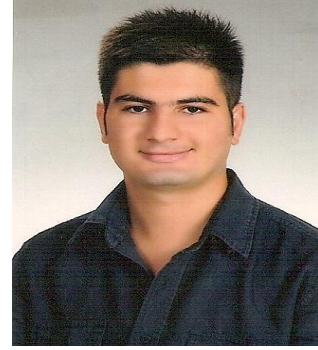
85. Yucel, M., Celebi, F.V. and Goktas, H.H. (2011). Temperature independent length optimization of L band EDFAs providing flat gain. *Optik - Int. J. Light Electron Opt.* 122(10), 872-876.
86. Yücel, M. and Göktas, H. H. (2008, 20-22 April). *C Band Erbium Doped Fiber Amplifier as a Flat Gain Optical Amplifier*. Signal Processing and Communications Applications, IEEE 16th, Didim.
87. Feng, X., Jin, T. and Wang, Y. (2002). A simple control algorithm for wide-band channel-power clamped EDFA. *Optics Communications*, 213(4-6), 285-292.
88. Rao, Y.J., Hu, A.Z. and Niu, Y.C. (2005). A novel dynamic LPFG gain equalizer written in a bend-insensitive fiber. *Optics Communications*, 244(1-6), 137-140.
89. Ben-Ezra, Y., Haridim, M. and Lembrikov, B. I. (2006). All-optical AGC of EDFA based on SOA. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 42(11-12), 1209-1214.
90. Zhang, H., Dou, QY. and Jin, Y.L. (2006). L-band all-optical gain-clamped erbium-doped fiber amplifier via ase reflection technique. *Microwave and Optical Technology Letters*, 48(5), 852-854.
91. Kaler, R. S. (2011). Effect of channel adding/dropping on EDFA transients. *Optik*, 122(5), 444-450.
92. Lin, W.W., Richard S. and Murney, B. (2008). Decreasing EDFA transients by power shaping. *Optical Switching and Networking*, 5(4), 188-195.
93. Zhao, C.L., Tam, H.Y. and Guan, B.O. (2003). Optical automatic gain control of EDFA using two oscillating lasers in a single feedback loop. *Optics Communications*, 225(1-3), 157-162.
94. Harun, S.W., Samsuri, N.M. and Poopalan, R. (2004). Gain control in double-pass L-band EDFA using ring resonator and two stage configuration. *Optik*, 115(11), 525-527.
95. Nakaji, H., Nakai, Y. and Shigematsu, M. (2003). Superiour high-speed automatic gain controlled erbium doped fiber amplifiers. *Optical Fiber Technology* 9(1), 25-35.
96. Park, S.Y., Kim, H.K. and Kang, S.M. (1998). A gain-flattened two-stage EDFA for WDM optical networks with a fast link control channel. *Optics Communications*, 153(1-3), 23-26.
97. Yi, L.L., Zhan, L., Ji, J.H., Ye, Q.H. and Xia, Y.X. (2004). Improvement of Gain and Noise Figure in Double-Pass L-Band EDFA by in Corporating a Fiber Bragg Grating. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 16(4), 1005-1007.
98. Liang, T.C. and Hsu, S. (2008). The L-band EDFA of High Clamped Gain and Low Noise Figure Implemented Using Fiber Bragg Grating and Double-Pass Method. *Optics Comm.*, 281(5), 1134-1139.

99. Naji, A.W., Abidin, M.S.Z., Al-Mansoori, M.H., Faiz, A.R. and Mahdi, M.A. (2007). Experimental Investigation of Noise in Double-Pass Erbium-Doped Fiber Amplifiers. *Laser Physics Lett.*, 4(2), 145-148.
100. Jamaludin, M.Z., Abdullah, M.K., Abdullah, F., Abas, A.F., Mahdi, M.A. and Rahman, F. (2008). A Hybrid High-Gain Double-Pass Erbium-Doped Fiber Amplifier with Dispersion Compensation Feedback Loop. *Optics and Laser Technol.*, 40(2), 270-272.
101. Samsuri, N.M., Harun, S.W. and Ahmad, H. (2004). Comparison Of Performances Between Partial Double Pass and Full Double-Pass Systems in Two-Stage L-Band EDFA. *Laser Physics Lett.*, 1(12), 610-612.
102. Chang, C.L., Wang, L. and Chiang, Y.J. (2006). A Dual Pumped Double-Pass L-Band EDFA with High Gain and Low Noise. *Optics Comm.*, 267(1), 108-112.
103. Ahn, J.T., Jeon, M.Y. and Kim, H.K.H. (2011). Two Stage Reflective-Type Erbium-Doped fiber Amplifier with Enhanced Noise figure Characteristics. *Optic Comm.*, 197, 121-125.
104. Harun, S.W., Poopalan, P. and Ahmad, H. (2003). Double Pass L-Band Erbium-Doped Fiber Amplifier With Enhanced Gain Characteristics. *Indian Journal of Physics*, 77B(4), 435-437.
105. Qin, S., He, J., Zou, Y. and Qiang, Z. (2010). *An Improved 3-Stage L-Band Erbium Doped Fiber Amplifier*. Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), 15-16.
106. Yenilmez, G. ve Yücel, M. (2014). Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçlerde Optik Kazanç Kontrolü. IEEE 22. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, Trabzon.
107. Karaman, L. ve Ünverdi, N. Ö., “Fiber Bragg Izgara Tabanlı Optik Sensörün Analizi”, Yıldız Teknik Üniversitesi.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YENİLMEZ, Gökhan
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 12.02.1985, Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (505) 9290827
 E-Posta : gokhanyenilmez@gmail.com



Eğitim

Derece	Okul/Program	Mezuniyet tarihi
Lisans	Kırıkkale Üniversitesi/Elk.Elkt.Müh.	2008
Lise	Yıldırım Beyazıt Lisesi	2003

İş Deneyimi

Yıl	Çalıştığı Yer	Görev
2010-2011	İris Telekomünikasyon A.Ş.	Mühendis
2011-	Milli Savunma Bakanlığı	Mühendis

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Yenilmez, G., Yücel, M. (2014, 23-25 Nisan). *Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçlerde Optik Kazanç Kontrolü. IEEE 22. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı*, Trabzon.

Hobiler

Kitap okumak, Müzik, Tiyatro.



GAZİ GELECEKTİR..