

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OPTİK KUVVETLENDİRİCİLERİN ANALİZİ VE
UYGULAMALARI**

TOLGA KÜÇÜKARSLAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI
HABERLEŞME PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. N. ÖZLEM ÜNVERDİ**

İSTANBUL, 2012

ÖNSÖZ

Tez çalışmam sırasında, lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca bana her konuda yardımcı olan ve aynı zamanda çalışmalarım boyunca son aşamaya kadar desteğini esirgemeyen Tez Danışmanım ve Hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. N. Özlem ÜNVERDİ'ye ve bu süre zarfında her zaman yanımda olup kararlarımın saygı duyan sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Ağustos, 2012

Tolga KÜÇÜKARSLAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÖZET	xi
ABSTRACT.....	xiii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	3
1.3 Hipotez.....	3
BÖLÜM 2	
ERBİYUM KATKILI FİBER OPTİK KUVVETLENDİRİCİ	4
2.1 EDFA'nın Modellenmesi.....	4
2.1.1 EDFA'nın Çalışma Prensibi.....	5
2.2 EDFA'nın Optik Kazancı ve Eşdeğer Denklemleri.....	6
2.2.1 Kuvvetlendirici Kazancı ve Band Genişliği	6
2.2.2 EDFA Eşdeğer Denklemleri.....	9
2.3 Sürekli Dalga Koşulunda Kuvvetlendirme	12
BÖLÜM 3	
İTERBİYUM KATKILI FİBER OPTİK KUVVETLENDİRİCİ	15
3.1 YDFA'nın Modellenmesi	15
3.1.1 YDFA'nın Çalışma Prensibi.....	15
3.2 YDFA'nın Kazanç ve Eşdeğer Denklemleri	17

BÖLÜM 4

YARIİLETKEN OPTİK KUVVETLENDİRİCİLER 21

- 4.1 SOA'nın Modellenmesi 21
 - 4.1.1 SOA'nın Çalışma Prensibi 22
- 4.2 SOA'nın Eşdeğer Denklemleri ve Optik Kazancı 24
 - 4.2.1 Taşıyıcı Yoğunluğu İçin Eşdeğer Denklemler 25
 - 4.2.2 Kuvvetlendirici Kazancı ve Band Genişliği 26

BÖLÜM 5

RAMAN FİBER KUVVETLENDİRİCİLER 29

- 5.1 Raman Etkisi..... 29
 - 5.1.1 Spontane Raman Saçılımı..... 30
 - 5.1.2 Uyarılmış Raman Saçılımı 31
- 5.2 Optik Fiberlerde Raman Kazanç Sprektrumu..... 31
- 5.3 Raman Fiber Kuvvetlendiricilerin Modellenmesi 33
 - 5.3.1 Raman Fiber Kuvvetlendiricilerin Çalışma Prensibi..... 34

BÖLÜM 6

OPTİK KUVVETLENDİRİCİ TASARIMI VE SİMÜLASYONU 39

- 6.1 Erbiyum Katkılı Fiber Kuvvetlendirici Tasarımı ve Kazanç – Gürültü Analizi..... 39
- 6.2 İterbiyum Katkılı Fiber Kuvvetlendirici Tasarımı ve Kazanç – Gürültü Analizi..... 44
- 6.3 Yarıiletken Optik Kuvvetlendirici Tasarımı ve Kazanç – Gürültü Analizi 50
- 6.4 Raman Fiber Kuvvetlendirici Tasarımı ve Kazanç – Gürültü Analizi 55

BÖLÜM 7

HİBRİD OPTİK KUVVETLENDİRİCİ TASARIMI 65

- 7.1 Hibrid Optik Kuvvetlendirici Düzeneği 65

BÖLÜM 8

SONUÇ VE ÖNERİLER..... 71

KAYNAKLAR 74

ÖZGEÇMİŞ 75

SİMGE LİSTESİ

A	Amper
A_c	Fiber çekirdeğinin kesit alanı
A_{eff}	Fiberin etkin alanı
A_m	SOA aktif bölgesinin efektif mod alanı
B_0	Kuvvetlendirilmiş kendiliğinden emisyonun olduğu band genişliği
c	Işık hızı
d	Dipol moment
dB	Desibel
dBm	Desibel miliwatt
E_g	Band aralığı
Er	Erbium
eV	Elektron volt
$F(z,t)$	Optik alan
fs	Femto saniye
G	Kuvvetlendirici kazancı
$g(\omega)$	Fiber kuvvetlendiricideki kazanç katsayısı
g_R	Raman kazanç katsayısı
h	Planck sabiti
I_p	Pompa yoğunluğu
I_s	Sinyal yoğunluğu
J	Dönme-orbit kuplajından kaynaklanan momentum
k_B	Boltzmann sabiti
L	Kuvvetlendirici uzunluğu
N	Atom yoğunluğu
n_{sp}	İyon yoğunluk evirtim parametresi
$\rho(z)$	Taşıyıcı enjeksiyon oranı
P_{ASE}	Kuvvetlendirilmiş kendiliğinden emisyon gücü
P_p^{sat}	Pompa doyma gücü
P_s^{sat}	Sinyal doyma gücü
R_{ab}	Pompa sinyali için a seviyesinden b seviyesine geçiş oranı
S	Elektronların toplam dönme sayısı
T	Fiberin mutlak sıcaklığı
t	Zaman
T_1	Popülasyon geçiş zamanı
T_2	Dipol geçiş zamanı

THz	Terahertz
W	Watt
W_{ab}	İşaret sinyali için a seviyesinden b seviyesine geçiş oranı
Yb	İterbiyum
α_p	Pompa kayıp faktörü
α_s	Sinyal kayıp faktörü
Γ	Azalma faktörü
$\Delta\omega_g$	Kazanç band genişliği
$\varepsilon(T)$	T sıcaklığındaki bir iyonu uyarılmış duruma getirmek için gereken uyarılma enerjisi
λ	Dalgaboyu
ν	Yoğunluk evirtiminin optik frekansı
ρ_0	Toplam katkı yoğunluğu
σ_{12}	Emisyon kesiti
σ_{21}	Soğurma kesiti
τ_e	Taşıyıcı ömrü
ν_p	Pompa dalgasının frekansı
ν_s	İşaret dalgasının frekansı
ω	İşaret frekansı
ω_a	Atomik geçiş frekansını

KISALTMA LİSTESİ

ASE	Amplified Spontaneous Emission
CW	Continuous Wave
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
FWHM	Full Width at Half Maximum
SOA	Semiconductor Optical Amplifiers
SRS	Stimulated Raman Scattering
WDM	Wavelength Division Multiplexed
YDFA	Ytterbium Doped Fiber Amplifier

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	Katkılanmış fiber optik kuvvetlendirici modeli [1]	4
Şekil 2.2	Erbiyum-cam enerji spektroskopisi [2].....	5
Şekil 2.3	980 nm dalgaboyunda pompalanan EDFA'daki erbiyum iyonlarının basitleştirilmiş üç seviyeli enerji modeli [2].....	6
Şekil 2.4	T=295 K'deki erbiyum katkılı aluminosilicate(aluminosilikat) fiberin soğurma ve emisyon kesit alan spektrumu	7
Şekil 2.5	1.48 µm dalgaboyunda pompalanan EDFA için (a) pompa lazer gücüne göre ve (b) kuvvetlendirici uzunluğuna göre 1.55 µm'deki küçük işaretli sinyal kazancı [2].....	13
Şekil 3.1	Yb ⁺³ iyonunun enerji seviyeleri ve bu seviyeler arası geçişler [4]	16
Şekil 3.2	YDFA'nın emisyon ve soğurma kesit alanları.....	16
Şekil 3.3	İterbiyum katkılı germanosilicate(germanosilikat) fiber için 910 nm dalgaboyunda, 0 ile 30 mW arasında 3 mW aralıklarla değişen pompa lazer gücüne karşılık hesaplanan kazanç spektrumu [5].....	18
Şekil 3.4	Çeşitli pompa dalgaboylarında, görünmez pompa gücünün işaret dalgaboyuna göre değişimi [5].....	19
Şekil 4.1	SOA'nın şematik diyagramı [6].....	22
Şekil 4.2	Direkt olmayan (a) ve direkt band aralığının (b) şematik gösterimi [2]	22
Şekil 4.3	3. ve 5. grup yarıiletkenlerinden 9 grup halinde oluşturulan üçlü ve dörtlü bileşiklerin kafes sabiti ve band aralığı enerjisi [2]	24
Şekil 5.1	Sanal enerji bandı, Stokes ve Anti-Stokes saçılımının şematik gösterimi [2]	30
Şekil 5.2	Aynı polarizasyona sahip pompa ve işaret sinyaline sahip silika fiberin Raman kazanç spektrumu [2].....	32
Şekil 5.3	Pompa ve işaret sinyalleri aynı polarizasyona ve dik polarizasyona sahip olduğu durumdaki normalize Raman kazancı [2].....	32
Şekil 5.4	İleri yönde pompalamalı Raman fiber kuvvetlendirici [7]	34
Şekil 5.5	Raman kuvvetlendiricisinin şematik olarak gösterimi [7]	35
Şekil 5.6	100 km uzunluğunda tek yönlü pompalanan bir Raman kuvvetlendirici boyunca işaret gücünün değişimi [2]	37
Şekil 6.1	Tasarlanan EDFA düzeneği	40
Şekil 6.2	Tasarlanan EDFA düzeneğindeki enerji soğurma ve emisyon spektrumu ..	40
Şekil 6.3	EDFA'nın kazanç ve gürültüsünün girişteki işaret kaynağının gücüne göre değişimi.....	41
Şekil 6.4	EDFA'nın kazanç ve gürültüsünün pompa lazer gücüne göre değişimi.....	42

Şekil 6.5	EDFA'nın kazanç ve gürültüsünün katkılanmış fiberin uzunluğuna göre değişimi.....	43
Şekil 6.6	EDFA'nın kazanç ve gürültüsünün işaret kaynağının dalgaboyuna göre değişimi.....	43
Şekil 6.7	Tasarlanan YDFA düzeneği.....	45
Şekil 6.8	Tasarlanan YDFA düzeneğindeki enerji soğurma ve emisyon spektrumu..	46
Şekil 6.9	YDFA'nın kazanç ve gürültüsünün girişteki işaret kaynağının gücüne göre değişimi.....	46
Şekil 6.10	YDFA'nın kazanç ve gürültüsünün pompa lazer gücüne göre değişimi	47
Şekil 6.11	YDFA'nın kazanç ve gürültüsünün katkılanmış fiberin uzunluğuna göre değişimi.....	48
Şekil 6.12	YDFA'nın kazanç ve gürültüsünün işaret kaynağının dalgaboyuna göre değişimi.....	50
Şekil 6.13	Tasarlanan SOA düzeneği.....	51
Şekil 6.14	SOA'nın kazanç ve gürültüsünün girişteki işaret kaynağının gücüne göre değişimi.....	52
Şekil 6.15	SOA'nın kazanç ve gürültüsünün enjeksiyon akımına göre değişimi	52
Şekil 6.16	SOA'nın kazanç ve gürültüsünün işaret kaynağının dalgaboyuna göre değişimi.....	53
Şekil 6.17	SOA'nın kazanç ve gürültüsünün band aralığına göre değişimi	54
Şekil 6.18	Tasarlanan Raman fiber kuvvetlendirici düzeneği	56
Şekil 6.19	Raman fiber kuvvetlendiricinin kazanç ve gürültüsünün girişteki işaret kaynağının gücüne göre değişimi	57
Şekil 6.20	Raman fiber kuvvetlendiricinin kazanç ve gürültüsünün pompa lazer gücüne göre değişimi.....	57
Şekil 6.21	Raman fiber kuvvetlendiricinin kazanç ve gürültüsünün pompa lazerin dalgaboyuna göre değişimi	58
Şekil 6.22	Geri yönde pompalanan Raman fiber kuvvetlendiricinin kazanç ve gürültüsünün fiber uzunluğuna göre değişimi	59
Şekil 6.23	İleri yönde pompalanan Raman fiber kuvvetlendiricinin kazanç ve gürültüsünün fiber uzunluğuna göre değişimi	60
Şekil 6.24	Çift yönde pompalanan Raman fiber kuvvetlendirici tasarımı	61
Şekil 6.25	Çift yönde pompalanan Raman fiber kuvvetlendiricinin kazanç ve gürültüsünün fiber uzunluğuna göre değişimi	62
Şekil 6.26	Geri yönde pompalanan Raman fiber kuvvetlendiricinin kazanç ve gürültüsünün girişteki işaret kaynağı ve pompa lazerin dalgaboyu farkına göre değişimi.....	62
Şekil 6.27	İleri yönde pompalanan Raman fiber kuvvetlendiricinin kazanç ve gürültüsünün girişteki işaret kaynağı ve pompa lazerin dalgaboyu farkına göre değişimi.....	63
Şekil 7.1	Hibrid kuvvetlendirici düzeneği	66
Şekil 7.2	Raman fiber kuvvetlendirici çıkışındaki kazanç ve gürültü faktörü	66
Şekil 7.3	Raman fiber kuvvetlendirici çıkışındaki işaretin gücü	67
Şekil 7.4	Raman fiber kuvvetlendirici çıkışındaki işaretin gücünün dalgaboyuna göre değişim spektrumu	67
Şekil 7.5	EDFA'nın çıkışındaki kazanç ve gürültü faktörü	68
Şekil 7.6	Hibrid fiber kuvvetlendirici çıkışındaki işaretin gücü	68
Şekil 7.7	Hibrid fiber kuvvetlendirici çıkışındaki işaretin gücünün dalgaboyuna göre değişim spektrumu	69
Şekil 7.8	Hibrid fiber kuvvetlendiricinin toplam kazancı ve gürültü faktörü	69

OPTİK KUVVETLENDİRİCİLERİN ANALİZİ VE UYGULAMALARI

Tolga KÜÇÜKARSLAN

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. N. Özlem ÜNVERDİ

Fiber optik haberleşme sistemlerinde, optik sinyalin uzun mesafeler boyunca kayıpsız ve en az gürültü ile iletilmesi büyük önem taşımaktadır. Optik kuvvetlendiriciler, sinyali yüksek kazanç ve düşük gürültü ile kuvvetlendirerek optik sinyalin uzun mesafeler boyunca iletilmesini sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında, erbiyum katkılı fiber optik kuvvetlendiriciler, iterbiyum katkılı fiber optik kuvvetlendiriciler, yarıiletken optik kuvvetlendiriciler ve Raman fiber kuvvetlendiriciler incelenmiş ve literatür taraması ile elde edilen bilgiler sonucunda OptiSystem 7.0 simülasyon programı kullanılarak bu kuvvetlendiricilerin tasarımları yapılmıştır. Sistem tasarım parametreleri belirli değerler aralığında değiştirilerek yapılan simülasyonlar sonucu kuvvetlendiricilerin optimum çalışma koşulları belirlenerek performansları değerlendirilmiş ve kuvvetlendiricilerin performansları karşılaştırılmıştır. Simülasyonlardan elde edilen sonuçlar kullanılarak optik sinyalin uzun mesafeye iletebilmesi amacıyla iki katlı bir hibrid optik kuvvetlendirici tasarımı yapılmıştır.

Çalışmanın Birinci Bölümü'nde, optik kuvvetlendiriciler ve kullanım alanları tanıtıldıktan sonra İkinci Bölüm'de, erbiyum katkılı fiber optik kuvvetlendiricilerin (EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier) yapısı ve çalışma prensibi açıklanmıştır. Üçüncü Bölüm'de, iterbiyum katkılı fiber optik kuvvetlendiricilerin (YDFA, Ytterbium Doped Fiber Amplifier) yapısı ve çalışma prensibi anlatılmış, Dördüncü Bölüm'de, yarıiletken optik kuvvetlendiricilerin (SOA, Semiconductor Optical Amplifiers) modellenmesi ve çalışma mekanizması açıklanmış ve Beşinci Bölüm'de, Raman fiber

kuvvetlendirici yapısı ve çalışma şekli anlatılmıştır. Altıncı Bölüm’de, OptiSystem 7.0 simülasyon programı ile bu kuvvetlendiricilerin tasarımı yapılmış ve tasarım parametrelerinin kuvvetlendiricilerin performansı üzerindeki etkileri incelenerek kuvvetlendiricilerin optimum çalışma koşulları belirlenmiştir. Elde edilen bu verilerden yola çıkılarak Yedinci Bölüm’de, optik sinyalin uzun mesafelere iletilmesi amacıyla Raman ve EDFA’nın kullanıldığı iki katlı hibrid bir optik kuvvetlendirici tasarlanmış ve hibrid optik kuvvetlendirici çıkışındaki kazanç ve güç değerleri incelenmiştir. Tüm simülasyon sonuçları ve elde edilen veriler, Sekizinci Bölüm’de yorumlanarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İletişim teknolojileri, optik haberleşme, EDFA, YDFA, SOA, Raman, erbiyum, iterbiyum, yarıiletken, fiber optik kuvvetlendirici, optimizasyon

ABSTRACT

ANALYSIS AND APPLICATIONS OF THE OPTICAL AMPLIFIERS

Tolga KÜÇÜKARSLAN

Department of Electronics and Communications Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. N. Özlem ÜNVERDİ

It is very important to transmit optical signal over the optical communication systems with very low losses and noise. The optical amplifiers can transmit optical signals along long distances while amplifying them with high gain and low noise.

In this thesis, erbium doped fiber amplifiers, ytterbium doped fiber amplifiers, semiconductor optical amplifiers and Raman fiber amplifiers are investigated and the design of these amplifiers are simulated in Optisystem 7.0 simulation program by considering the results of litterateur researches. The optimum operating conditions of the amplifiers are determined and amplifier performances are obtained in the optimum operating conditions by changing system design parameters at specific intervals; the performance of the amplifiers are compared based on their the simulation results. A two stage hybrid optical amplifier is designed to transmit optical signal along the very long distances by considering simulation results.

After the optical amplifiers and their usage in optical networks are introduced in the First Section of this study, the material structure and operating method of erbium doped fiber amplifiers (EDFA) are explained. The material structure and operating method of ytterbium doped fiber amplifiers (YDFA) are explained in the Third section, modeling of semiconductor optical amplifiers (SOA) are achieved and working process of SOAs are explained in the Fourth Section and in the Fifth Section, the material structure and operating method of Raman fiber amplifiers are explained. In the Sixth Section, the amplifiers are designed by using OptiSystem 7.0 simulation program and the optimum

operating conditions of amplifiers are achieved after the effects of design parameters on amplifier performance are examined. In the Seventh Section, a two stage hybrid optical amplifier, which is built by cascading a Raman fiber amplifier and an EDFA, is designed to transmit the optical signal over long distances based on the results that are achieved in the previous section and gain and power measurements in the output of the hybrid optical amplifier are examined. As a conclusion, all the simulation data and results are evaluated in the Eighth Section.

Key words: Communication technologies, optical communications, EDFA, YDFA, SOA, Raman, erbium, ytterbium, semiconductor, fiber optical amplifier, optimization

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Uzun mesafelerde yüksek kazanç ve düşük gürültü ile iletişim imkânı sağlayan fiber optik haberleşme sistemlerinin önemi giderek artmakta ve optik iletişim ağı dünya genelinde hızla genişlemektedir. Günümüzde fiber optik ağların uzun mesafe haberleşme sistemleri, kıtalararası haberleşme sistemleri ve deniz altı haberleşme sistemleri gibi alanlarda kullanımı oldukça yaygındır. Bu uzun mesafeli optik ağlarda optik kuvvetlendiricilerin çok önemli yeri vardır.

Optik kuvvetlendiriciler henüz icat edilmemişken, uzun mesafeli fiber optik ağlar boyunca zayıflayan sinyal, elektronik tekrarlayıcılar tarafından kuvvetlendiriliyordu. Optik işaret elektrikselleştirilip kuvvetlendirildikten sonra tekrar optik forma dönüştürülmekteydi. Bu tekrarlayıcılar, elektronik devre bileşenlerinin hızı ve kapasitesiyle sınırlı oldukları için, optik ağların iletim hızını ve band genişliğini de sınırlamaktaydı. Optik kuvvetlendiriciler ise optik işareti elektrikselleştirilip dönüştürmeden kuvvetlendirebilmektedir. Bu nedenle, iletim hızında ve band genişliğinde herhangi bir azalmaya neden olmamaktadır. Optik kuvvetlendiriciler toprak katkılı fiber optik kuvvetlendiriciler, yarıiletken optik kuvvetlendiriciler ve Raman fiber kuvvetlendiriciler olarak çeşitlenmektedir.

1980'lerde optik fiberlerin toprak elementleriyle katkılanmasıyla optik kuvvetlendiriciler geliştirilmeye başlanmıştır. Erbiyum, iterbiyum ve thulium gibi birçok toprak elementi, geniş çalışma band genişliğine sahip fiber kuvvetlendiricilerin yapımında kullanılmaktadır. Kuvvetlendiricilerin çalışma dalgaboyu ve kazanç band

genişliği gibi karakteristikleri, fiberden çok katkı elementleri tarafından belirlenmektedir. Erbiyum ve iterbiyum en çok kullanılan toprak katkı elementleridir.

Erbium katkılı fiber optik kuvvetlendiriciler (EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier), EDFA'lar, optik haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılmakta ve özellikle deniz altı fiber optik haberleşme sistemlerinde ve dalgaboyu bölmeli çoğullama (WDM, Wavelength Division Multiplexed) sistemlerinde önemli yer tutmaktadır.

İterbiyum katkılı fiber optik kuvvetlendiriciler (YDFA, Ytterbium Doped Fiber Amplifier), özel frekanslarda güç kuvvetlendirme ve uzay lazer haberleşmesi gibi uygulamalarda kullanılmaktadır.

Diğer bir optik kuvvetlendirici olan yarıiletken optik kuvvetlendiriciler (SOA, Semiconductor Optical Amplifiers) ise optik entegre devrelerinde optik sinyal işleme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. SOA'lar üzerine araştırmalar, 1962'de yarıiletken lazerlerin keşfinden sonra başlamıştır. Bununla birlikte 1980'lerden sonra SOA'lar, optik uygulamalarda kullanılmaya başlanmış ve ilk ticari aygıt 1987 yılında piyasaya çıkmıştır. SOA'lar, hem ön kuvvetlendirici olarak hem de istenilen sinyalin iletim fiberi içine sürülmesinde bir itici olarak kullanılabilir. SOA'lar lineer olmayan optik çevrim aynası, saat düzeltme devreleri, darbe-gecikme ayırıştırıcısı ve lojik element yapılarında da kullanılmaktadır.

Raman fiber kuvvetlendiricilerine yönelik çalışmalar ise 1970'lerde başlamıştır; ancak söz konusu olan yıllarda Raman fiber kuvvetlendiriciler için gerekli olan yüksek güçlü pompa lazerlerin olmaması ve 1980'li yıllarda EDFA kuvvetlendiricilere olan ilgi nedeniyle, Raman fiber kuvvetlendiriciler geri planda kalmıştır. Ancak 1990'lı yıllardan sonra yüksek güçlü pompa lazerlerinin geliştirilmesiyle birlikte, Raman fiber kuvvetlendiriciler üzerine olan çalışmalar hız kazanmıştır.

Raman fiber kuvvetlendiriciler, bütün optik haberleşme frekanslarında çalışabilme özelliğine sahiptir. Bunun nedeni, kuvvetlendirmenin sadece pompa ile sinyalin frekans farkına bağlı olmasıdır. Raman fiber kuvvetlendiriciler, fiberin tüm noktalarında kuvvetlendirme yapabilme özellikleri nedeniyle dağınık kuvvetlendiriciler olarak kullanılabilirler. Pompa ve sinyal arasındaki frekans farkına dayanan Raman kazancı, haberleşme spektrumunun her noktasında Raman kuvvetlendirmesine olanak vermektedir.

Optik fiber kuvvetlendiriciler, WDM sistemlerinin işaretlerinin uzun mesafeler boyunca verimli bir şekilde iletimini sağlayan çok önemli optik bileşenlerdir. Birçok alternatif teknoloji olmasına karşın 1990'ların başında EDFA'lar bu alandaki yarışı kazanmış ve uzun mesafe optik haberleşme sistemlerinde standart bir bileşen olarak yerini almıştı; ancak düşük maliyetli, yüksek güçlü ve 1450 nm dalgaboyu civarında çalışabilen yarıiletken lazerlerin üretilmeye başlanmasıyla birlikte Raman fiber kuvvetlendiriciler modern optik haberleşme sistemlerinin kurulmasında çok önemli bir yer kazanmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, optik kuvvetlendiricilerin çalışma prensibi ve kullanım alanlarından yararlanılarak EDFA, YDFA, SOA ve Raman fiber kuvvetlendirici sistemlerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda OptiSystem 7.0 simülasyon programında bu kuvvetlendiricilerin tasarımının yapılması ve tasarlanan sistemlerde yapılan simülasyon sonuçlarından yola çıkılarak optik sinyali uzak mesafelere iletebilmek amacıyla hibrid bir fiber kuvvetlendirici tasarlanması amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

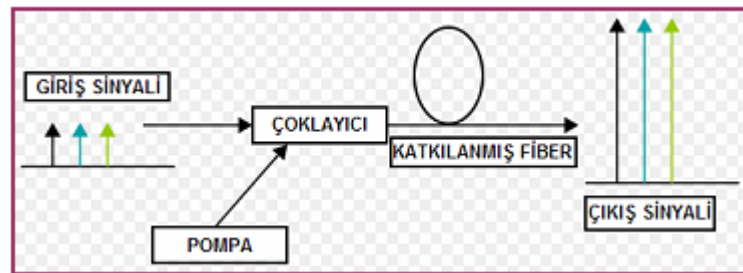
Haberleşme alt yapısında genişçe yer tutan fiber optik haberleşme sistemlerinde optik sinyalin uzun mesafeler boyunca iletilmesi amacıyla fiber optik kuvvetlendiricilerin kullanımı çok büyük önem kazanmıştır. Uzun mesafeli fiber optik ağlarda optik sinyalin yüksek kazanç ve düşük kayıpla iletilmesini sağlayan optik kuvvetlendiriciler fiber optik haberleşmede genişçe yer edinmekte ve üzerinde birçok çalışma ve araştırma yapılmaya devam eden bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Mevcut kaynaklardan edinilen bilgiler ve literatür taramasından yola çıkılarak tasarlanan EDFA, YDFA, SOA ve Raman fiber kuvvetlendirici sistemlerinden elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak tasarlanan Hibrid fiber kuvvetlendirici ile optik sinyalin daha az maliyetli bir sistem ile daha uzak mesafeye yüksek kazanç ve düşük gürültü ile iletilmesi amaç edinilmiştir.

ERBİYUM KATKILI FİBER OPTİK KUVVETLENDİRİCİ

Optik kuvvetlendiricilerde, görünür ışıktan kızılötesine kadar olan geniş bir spektrumda sinyalin kuvvetlendirilmesinin sağlanması amacıyla farklı elementler katkı maddesi olarak kullanılır. Erbiyum, katkı maddesi olarak en çok kullanılan elementler arasında yer alır. Çalışma dalgaboyu ve kazanç spektrumu gibi kuvvetlendirici karakteristiklerinin belirlenmesinde, optik fiberden daha çok katkı maddeleri rol oynar. Bu bölümde, EDFA'nın (Erbium Katkılı Fiber Optik Kuvvetlendirici, Erbium Doped Fiber Amplifier) modellenmesi detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

2.1 EDFA'nın Modellenmesi

EDFA optik kuvvetlendirici sistemleri, bilgi taşıyan bir optik sinyal kaynağı, pompa lazer ve katkılanmış fiberden oluşur. Şekil 2.1'de katkılanmış fiber optik kuvvetlendirici modeli görülmektedir. Pompa sinyali, yoğunluk evriminin başlatılması için kullanılır. Erbiyum katkılı sistemlerde, erbiyum iyonları, uyarılarak bir üst enerji seviyesine geçerler. Yoğunluk evrimine uğramış iyonların ışık emisyonu(salımı) yapmasının sonucu olarak kuvvetlendirme işlemi gerçekleşir. Geri beslemesi olmayan bir lazer mekanizması ile gelen sinyalin dalgaboyuna bağlı olarak optik bir kazanç sağlanır [1].

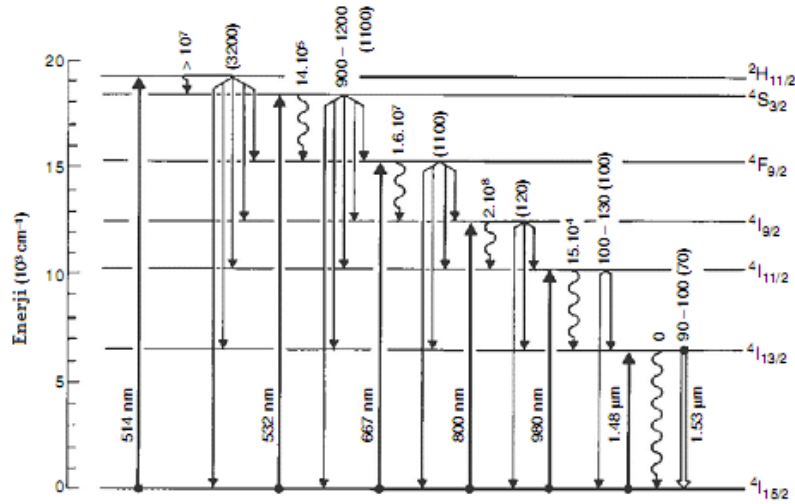


Şekil 2.1 Katkılanmış fiber optik kuvvetlendirici modeli [1]

EDFA modellenmesi yapılırken, çalışma prensibi, kazanç hesaplamaları ve eşdeğer denklemleri göz önüne alınmıştır.

2.1.1 EDFA'nın Çalışma Prensibi

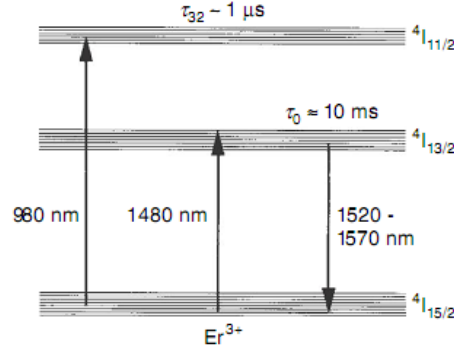
EDFA'nın çalışma dalgaboyu, 1.55 μm ve civarındır. Bu nedenle, telekomünikasyon uygulamaları için tercih sebebidir. EDFA'nın özelliklerinin anlaşılabilmesi için erbiyum-cam enerji spektroskopisinin incelenmesi gerekir. Enerji seviyeleri ve bunlara bağlı geçişler Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Genel olarak enerji seviyeleri, $^{2S+1}L_J$ ifadesiyle belirtilir. Burada, S, elektronların toplam dönme sayısını, L, orbitalin açısal momentumunu ve J ise dönme-orbit kuplajından kaynaklanan momentumu ifade eder.



Şekil 2.2 Erbiyum-cam enerji spektroskopisi [2]

Şekil 2.2'den yola çıkılarak, en düşük enerji seviyeleri olan $^4I_{13/2}$ ve $^4I_{15/2}$ arasında optik kazancın sağlanması amacıyla birkaç değişik dalgaboyundaki pompa lazeri kullanılabilir. Yaygın olarak kullanılan dalgaboyu 980 nm'dir.

Bir kuvvetlendiricinin performansı, ışımsal olan ve ışımsal olmayan enerji yayılımlarına bağlıdır. $^4I_{13/2}$ ve $^4I_{15/2}$ enerji seviyelerinden olan yayılımlar, 10 ms civarındaki süresiyle tamamen ışımsaldır. 980 nm dalgaboyunda pompa lazeri kullanıldığında, Şekil 2.2'de ifade edilen enerji diyagramı, Şekil 2.3'teki gibi üç seviyeli enerji sistemi ile ifade edilebilir. Bununla birlikte, 1480 nm dalgaboyunda pompa lazeri kullanıldığında, EDFA, 2 seviyeli enerji sistemi modeliyle ifade edilebilir [2].



Şekil 2.3 980 nm dalgaboyunda pompalanan EDFA'daki erbiyum iyonlarının basitleştirilmiş üç seviyeli enerji modeli [2]

Pompa lazer gücü 1 W'tan daha az olduğu zaman, atomlar daha kısa ömre sahiptir ve pompa seviyesinde normalde daha az atom bulunur. Bu şarta uyan her durumda iki seviyeli enerji modeli yaklaşımı kullanılabilir. Pratikte kullanılan toplam pompa lazer gücü 1 W'ın altındadır ve iki seviyeli enerji modeli EDFA'nın yapısını açıklamak için yeterlidir [2].

2.2. EDFA'nın Optik Kazancı ve Eşdeğer Denklemleri

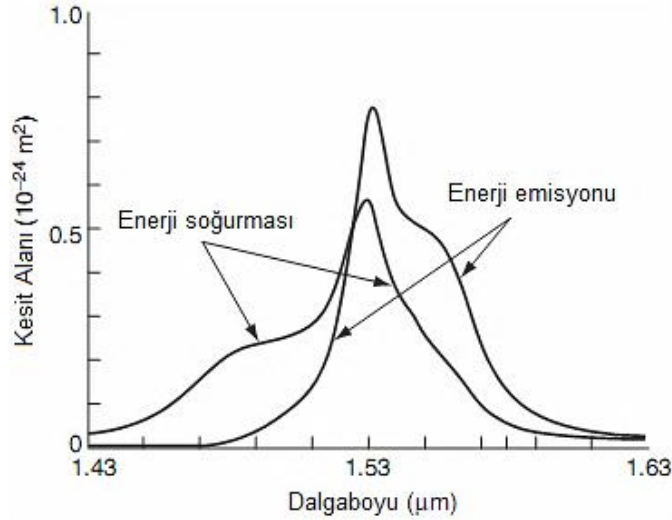
EDFA'lar, erbiyum iyonlarının yoğunluk evirtimine uğraması sonucu optik sinyali kuvvetlendirmektedir. Yoğunluk evirtimine uğrayan iyonlar, ışık yayar ve kuvvetlendirme işlemi gerçekleşmiş olur. Dolayısıyla kuvvetlendirme işlemi, enerji seviyelerindeki iyon yoğunluklarıyla ilişkilidir.

2.2.1 Kuvvetlendirici Kazancı ve Band Genişliği

Tüm katkılanmış fiber kuvvetlendiriciler, gelen ışığı uyarılmış emisyon ile kuvvetlendirirler. Var olan huzmeyi kuvvetlendiren enerji pompa lazerinden sağlanır. Pompa lazerden gelen enerjinin katkı iyonları tarafından soğurulmasıyla bu iyonlar uyarılmış hale gelirler. Böylece depolanan enerji sinyal huzmesine transfer edilerek kuvvetlendirme işlemi gerçekleştirilmiş olur. İki enerji seviyesi arasındaki emisyon ve soğurma, aradaki ilişkiyi sağlayan emisyon ve soğurma kesitleri $\sigma_{21}(\omega)$ ve $\sigma_{12}(\omega)$ ile karakterize edilir. İki parametre arasında

$$\sigma_{21}(\omega) = \sigma_{12}(\omega) \exp\left(\frac{\varepsilon(T) - \hbar\omega}{k_B T}\right) \quad (2.1)$$

ilişkisi vardır. Bu eşitlikte, k_B Boltzmann sabitini, T Kelvin cinsinden mutlak sıcaklığı ve $\varepsilon(T)$ ise T sıcaklığındaki bir iyonu uyarılmış duruma getirmek için gereken uyarılma enerjisini ifade eder. Şekil 2.4, $T = 295$ K'deki (oda sıcaklığı) ek olarak alüminyum ile katkılanmış fiber çekirdeğe sahip EDFA'nın $\sigma_{21}(\omega)$ ve $\sigma_{12}(\omega)$ spektrumunu göstermektedir.



Şekil 2.4 T=295 K'deki erbium katkılı aluminosilikate(aluminosilikat) fiberin soğurma ve emisyon kesit alan spektrumu

Emisyon ve soğurma parametreleri, kazanç katsayısı denilen, (2.2) eşitliği ile ifade edilen önemli bir kuvvetlendirici parametresinin hesaplanması için kullanılır:

$$g(\omega) = \sigma_{21}(\omega)N_2 - \sigma_{12}(\omega)N_1. \quad (2.2)$$

Burada, N_1 ve N_2 alt ve üst seviyelerin atom yoğunluklarını ifade eder. Emisyon ve soğurma parametrelerinin $\sigma(\omega)$ ile ifade edildiği, aynı şekle farklı tepe değerlerine sahip olduğu varsayılırsa, kazanç katsayısı,

$$g(\omega) = \sigma(\omega)(N_2 - N_1) \quad (2.3)$$

dir. Bu eşitlik, kazanç ortamının iki veya üç seviyeli sistem olarak modellenip modellenmediğine bakılmaksızın geçerlidir [2].

Fiber kuvvetlendiricideki kazanç katsayısı $g(\omega)$ giriş ucuna olan uzaklığı ifade eden z 'ye ve geçen zamanı ifade eden t 'ye bağlıdır. Bu katsayının hesaplanabilmesi için atomik yoğunluklardan oluşan bir dizi oran eşitliklerinin çözülmesi gereklidir. Bunun sonucunda ortaya çıkan ifade enerji seviyelerine dayalı olacaktır. Bu konuda,

$$g(z, \omega) = \frac{g_0(z)}{1 + (\omega - \omega_a)^2 T^2 + P(z) / P_s} \quad (2.4)$$

eşitliği, birçok pratik uygulamalar için kullanılan çok iyi bir varsayımdır. Burada, $g_0(z)$, uzaklığındaki maksimum kazanç değerini, ω_a atomik geçiş frekansını ve $P(z)$ kuvvetlendirilen sürekli sinyalin optik gücünü ifade eder. Doyma gücü P_s 'nin hesaplanması için doyma yoğunluğu I_s parametresi kullanılır. Doyma yoğunluğu $I_s = (\hbar / \mu)^2 \Gamma_1 \Gamma_2$ şeklinde ifade edilir ve dipol moment d 'ye, azalma faktörü olan Γ_1 ve Γ_2 'ye bağlıdır. Doyma yoğunluğu, doyma gücü P_s 'nin hesaplanması için kullanılır. Popülasyon geçiş zamanı $T_1 = 1/\Gamma_1$ ve dipol geçiş zamanı $T_2 = 1/\Gamma_2$ olarak ifade edilir. Popülasyon geçiş zamanı T_1 katkılamaaya bağlı olarak 0.1 μs ile 10 ms arasında değişir. EDFA için bu süre yaklaşık olarak 10 ms'dir. Dipol geçiş zamanı T_2 bütün fiber kuvvetlendiriciler için daha kısadır ve yaklaşık 0.1 ps civarındadır [2].

(2.4) eşitliğindeki P / P_s ifadesi, fiber boyunca işaret sinyalinin gücü arttıkça kazancı azaltmaktadır. Bu duruma kazanç doyması denir. Eğer bir kuvvetlendiricide bütün z değerleri için $P(z) / P_s \ll 1$ ise, kuvvetlendirici kazancı doyuma erişmez. Doyuma erişmeyen kuvvetlendiricinin kazanç katsayısı,

$$g(z, \omega) = \frac{g_0(z)}{1 + (\omega - \omega_a)^2 T^2} \quad (2.5)$$

eşitliği ile ifade edilir. İşaret frekansı ω , atomik geçiş frekansı ω_a 'ya eşit olduğunda, $g(z, \omega)$ kazanç katsayısı maksimum değerine ulaşır. İşaret frekansı ω_a 'dan uzaklaştıkça kazanç azalır. Efektif 3 dB kazanç band genişliği, kazancın $g_0/2$ 'yi aştığı frekans aralığında tanımlanır. Bu kazanç band genişliği $\Delta\omega_g$ ile ifade edilir ve kazanç spektrumunun yarı maksimum noktasındaki tam band genişliğini (FWHM, Full Width at Half Maximum) bulmak için kullanılır. Söz konusu olan band genişliği,

$$\Delta\nu_g = \frac{\Delta\omega_g}{2\pi} = \frac{1}{\pi T_2} \quad (2.6)$$

eşitliği ile belirlenir. Kazanç spektrumunun band genişliği ile kuvvetlendirici band genişliği arasında yapılan ayırım önemlidir. Kuvvetlendiricinin toplam kazancı göz önüne alındığında bu ayırım daha açık ortaya çıkmaktadır. Kuvvetlendiricinin toplam kazancı,

$$G = P_{out} / P_{in} \quad (2.7)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada, P_{in} , kuvvetlendirici girişindeki besleme gücü, P_{out} ise kuvvetlendirici çıkışındaki işaretin gücüdür. $P(0) = P_{in}$ ve $P(L) = P_{out}$ olduğunda, kuvvetlendiricinin sürekli dalgalar için kazancı ise,

$$G(\omega) = \exp \left(\int_0^L g(z, \omega) dz \right) \quad (2.8)$$

eşitliği ile belirlenir. Burada, L , kuvvetlendirici uzunluğunu temsil eder. $G(\omega)$ ve $g(\omega)$ 'nin band genişlikleri birbirinden farklıdır. Kuvvetlendirici band genişliği, $G(\omega)$ 'nin yarı maksimum noktasındaki tam band genişliği olarak tanımlanır ve $\Delta\nu_g$ ile ilişkili olarak

$$\Delta\nu_A = \Delta\nu_g \left(\frac{\ln 2}{g(\omega_a)L - \ln 2} \right)^{1/2} \quad (2.9)$$

eşitliği ile bulunur. Kazancın doyuma ulaşmasının nedeni, kazanç katsayısının güç ile bağlantılı olmasından kaynaklanmaktadır. P ile P_s 'nin değerleri birbirleriyle karşılaştırılabilir olduğunda, g kazanç faktörü azalır. Buna bağlı olarak kuvvetlendirme faktörü G 'nin de azalması beklenir. Daha basite indirgemek için işaret frekansının atomik geçiş frekansına ($\omega = \omega_a$) eşit olduğu durum göz önüne alındığında,

$$\frac{dP}{dz} = \frac{g_0(z)P}{1 + P / P_s} \quad (2.10)$$

olur. $P(0) = P_{in}$ koşulu için, (2.10) eşitliğinin L üzerinden integrali alınır,

$$G = \exp \left[\int_0^L g_0(z) dz - (G-1)P_{in} / P_s \right] \quad (2.11)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlik ile kuvvetlendirici uzunluğu boyunca doyma faktörü, kazanç katsayısı ve kazanç faktörüne bağlı olarak kuvvetlendirici kazancı belirlenir.

2.2.2 EDFA Eşdeğer Denklemleri

EDFA, bir ucundan ışık ile pompalanmaya başlandığında, fiber kayıpları ve katkı maddelerinin gücü soğurması nedeniyle pompa lazer gücünde meydana gelen sürekli

kayıp, atomik yoğunluğun EDFA uzunluğu boyunca uniform olmayan bir şekilde dağılmasına neden olur. Pompa lazer gücünün ve atomik yoğunlukların buna benzer eksensel değişimleri önemlidir. Bu nedenle, atomik yoğunluklar, N_1 , N_2 ve N_3 ; z ve t 'ye bağlı olarak değişmektedir [2].

Üç seviyeli eşdeğer denklem modelinde, erbiyum iyonlarının herhangi bir enerji seviyesinde olması veya olmamasını da göz önünde bulundurarak atomik eşdeğer denklemleri,

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -R_{13}N_1 - W_{12}N_1 + W_{21}N_2 + \frac{N_2}{T_1} + R_{31}N_3 + \frac{N_3}{T_1'} \quad (2.12a)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = W_{12}N_1 - W_{21}N_2 + R_{32}N_3 - \frac{N_2}{T_1} \quad (2.12b)$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial t} = R_{13}N_1 - R_{32}N_3 - R_{31}N_3 - \frac{N_3}{T_1'} \quad (2.12c)$$

eşitlikleri ile belirlenir. Bu eşitliklerde T_1 ve T_1' , ikinci ve üçüncü seviyelerin iyon geçiş zamanlarıdır. W_{ab} işaret sinyali için ilgili a seviyesinden b seviyesine geçiş oranıdır. R_{ab} ise pompa sinyali için ilgili a seviyesinden b seviyesine geçiş oranıdır [2].

Erbiyum iyonlarının üçüncü seviyeden ikinci seviyeye geçişi, üçüncü seviyeden birinci seviyeye geçişinden daha fazla olması nedeniyle $R_{32} \gg R_{31}$ 'dir. Diğer yandan üçüncü seviyeden birinci seviyeye kendiliğinden geçiş oranı R_{32} 'den daha zayıftır ($R_{32} \gg 1/T_1'$). Bu sadeleştirmelerle (2.12c) eşitliği,

$$\frac{\partial N_3}{\partial t} \approx R_{13}N_1 - R_{32}N_3 \quad (2.13)$$

eşitliği olarak yazılır.

Zamana bağımlılığın kaybolduğu durağan durumda, $R_{32} \gg R_{13}$ olarak kabul edildiğinde, üçüncü enerji seviyesindeki iyon popülasyonu,

$$R_{32}N_3 \approx (R_{13} / R_{32})N_1 \approx 0 \quad (2.14)$$

dır. Bu sonuç, (2.12a) ve (2.12b) eşitliklerinde kullanılırsa, birinci ve ikinci seviyelerin enerji yoğunlukları,

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -R_{13}N_1 - W_{12}N_1 + W_{21}N_2 + \frac{N_2}{T_1} \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = R_{13}N_1 + W_{12}N_1 - W_{21}N_2 - \frac{N_2}{T_1} = -\frac{\partial N_1}{\partial t} \quad (2.16)$$

eşitlikleri ile belirlenir. (2.15) ve (2.16) eşitlikleri, N_1 ve N_2 arasında $N_1 + N_2 = \rho_0$ şeklinde bir bağıntı olduğunu gösterir. Burada ρ_0 , toplam katkı yoğunluğunu belirtir. Bu bağıntı, fiziksel olarak pompalama ve kuvvetlendirilmiş emisyon işlemi boyunca toplam atomik popülasyonu ifade etmektedir. (2.15) ve (2.16) eşitliklerindeki W ve R geçiş parametreleri,

$$W_{12} = \frac{\Gamma_s \sigma_{12} P_s}{A_c h \nu_s} \quad (2.17a)$$

$$W_{21} = \frac{\Gamma_s \sigma_{21} P_s}{A_c h \nu_s} \quad (2.17b)$$

$$R_{13} = \frac{\Gamma_p \sigma_{12} P_p}{A_c h \nu_p} \quad (2.17c)$$

denklem serisi ile elde edilir. Burada, P_s ve P_p sırasıyla işaret ve pompa lazer güçleri, A_c fiber çekirdeğinin kesit alanı, Γ_s ve Γ_p mod örtüşme faktörü, ν_s ve ν_p ise işaret ve pompa dalgalarının frekanslarıdır [2].

Pratik uygulamalarda 0.1 km'den küçük uzunluğa sahip kuvvetlendiricilerde, pompa ve işaret sinyalinin güçleri hesaplanırken pompa ve sinyal çalışma dalgaboyunda fiber uzunluğu boyunca kayıplar ihmal edilebilir. Bunun sonucu olarak pompa ve işaret sinyalinin güçleri,

$$\frac{\partial P_p}{\partial z} = -R_{13} A_c h \nu_p N_1 \quad (2.18a)$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial z} = (W_{21}N_2 - W_{12}N_1) A_c h \nu_s \quad (2.18b)$$

eşitlikleri ile belirlenir.

(2.18) eşitliği, (2.16) eşitliğinde kullanılır, $\rho = \int_0^L N_2 A_C dz$ cinsinden yazılır ve fiber uzunluğu L üzerinden integrali alınırsa,

$$\frac{\partial P}{\partial t} = P_s^{in}(t)[1 - \exp(B_s \rho - C_s)] + P_p^{in}(t)[1 - \exp(B_p \rho - C_p)] - \frac{\rho}{T_1} \quad (2.19)$$

eşitliğine ulaşılır. Buradaki B ve C katsayıları,

$$B_p = \Gamma_p \sigma_{13} / (A_C h \nu_p) \quad (2.20a)$$

$$B_s = \Gamma_s (\sigma_{12} + \sigma_{13}) / (A_C h \nu_s) \quad (2.20b)$$

$$C_p = \Gamma_p \sigma_{13} \rho L \quad (2.20c)$$

$$C_s = \Gamma_s \sigma_{12} \rho L \quad (2.20d)$$

eşitlikleri ile belirlenir. (2.19) eşitliğindeki P_s^{in} ve P_p^{in} , EDFA'nın girişindeki sinyal ve pompa lazerin gücünü ifade eder. Katsayılar, EDFA'nın girişindeki sinyal ve pompa lazerin gücü cinsinden (2.19) eşitliğiyle elde edilen EDFA kazancının zaman ile değişimini ifade etmek için kullanılabilir [2].

2.3 Sürekli Dalga Koşulunda Kuvvetlendirme

Sürekli dalga durumundaki kuvvetlendirmenin anlaşılabilmesi için EDFA'nın durağan koşullar altında incelemesi gerekir. Bu durumda, (2.16) eşitliğinin zamana bağımlılığı kaybolur. $N_1 = \rho_0 - N_2$ eşitliği kullanıldığında uyarılmış durumdaki yoğunluk,

$$N_2 = \left(\frac{P_p / P_p^{sat} + P_s / P_s^{sat}}{1 + P_s / P_s^{sat} + P_s / \bar{P}_s^{sat} + P_p / P_p^{sat}} \right) \rho_0 \quad (2.21)$$

olur. Buradaki üç doyma gücü olan P_p^{sat} , P_s^{sat} ve $\bar{P}_s^{sat}$,

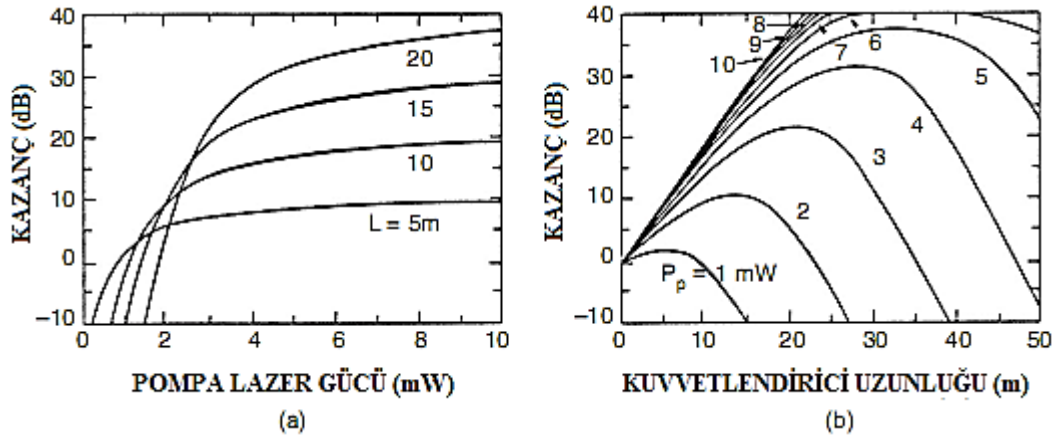
$$P_p^{sat} = \frac{A h c}{\Gamma_p \sigma_{13} \lambda_p T_1} \quad (2.22a)$$

$$P_s^{sat} = \frac{A h c}{\Gamma_s \sigma_{12} \lambda_s T_1} \quad (2.22b)$$

$$\bar{P}_s^{sat} = \frac{Ahc}{\Gamma_s \sigma_{21} \lambda_s T_1} \quad (2.22c)$$

olarak bulunur.

Bu model bazı sadeleştirmeler yapılarak daha anlaşılabilir hale getirilebilir. İlk olarak, emisyon ve soğurma kesit alanları arasındaki fark ihmal edilmeli ve $\sigma_{12}(\omega) = \sigma_{21}(\omega)$ olarak kabul edilmelidir. Böylece $P_s^{sat} = \bar{P}_s^{sat}$ olur. İkinci adımda, uzunluğu 1 km altındaki kuvvetlendiriciler için kayıp faktörleri α_p ve α_s sıfır olarak kabul edilir. Bu sadeleştirmeler yapıldıktan sonra elde edilen sonuçlar, Şekil 2.5'te görülmektedir. Şekilde 1.55 μm dalgaboyunda çalışan EDFA'nın küçük işaret koşulları altında pompa lazer gücünün (a) ve fiber uzunluğunun (b) bir fonksiyonu olarak kuvvetlendirme faktörü ifade edilmektedir.



Şekil 2.5 1.48 μm dalgaboyunda pompalanan EDFA için (a) pompa lazer gücüne göre ve (b) kuvvetlendirici uzunluğuna göre 1.55 μm 'deki küçük işaretli sinyal kazancı [2]

Şekil 2.5'te görüldüğü gibi, L uzunluğunda bir kuvvetlendirici için kuvvetlendirme faktörü pompa lazer gücüne bağlı olarak eksponansiyel olarak artar. Pompa lazer gücü belli bir değeri geçtiği zaman kuvvetlendirici faktöründeki artış hızı azalır (a). Belirli bir pompa lazer gücü için kuvvetlendirici kazancı optimum kuvvetlendirici uzunluğu L 'de maksimum değerine ulaşır. Fiber uzunluğu L 'yi geçtiğinde ise kazanç keskin bir şekilde düşer (b). Bunun nedeni, kuvvetlendiricinin son kısmının pompalanamaması ve kuvvetlendirilmiş sinyali soğurmasıdır. Bu nedenle, optimum fiber uzunluğu değeri L ve pompa lazer gücü P_p uygun olarak seçilmelidir [2].

EDFA'nın kazancını etkileyen bir başka faktör ise *kuvvetlendirilmiş kendiliğinden emisyon* (ASE, Amplified Spontaneous Emission) etkisidir. Bütün uyarılmış iyonlar

kendiliğinden üst seviyeden başlayarak toprak seviyesine doğru fotonu yayar. Bu olay ile kendiliğinden yayılan foton, fiber boyunca kuvvetlendirilebilir ve uyarılan iyonlardan daha fazla fotonun yayılımı sağlanır. Herhangi bir frekansta meydana gelen bu parazitik işlem kuvvetlendiricinin kazancını düşürür. Sinyal fotonları ile uyarılan bu fotonlar ortamdan çıkar. Bu işlem, literatürde, kuvvetlendirilmiş kendiliğinden emisyon olarak isimlendirilir. Kuvvetlendiriciden elde edilebilecek toplam kazanç miktarını sınırlamaktadır. ASE etkisi ile kuvvetlendirici çıkışında oluşan gürültü gücü,

$$P_{ASE} = 2n_{sp}(G-1)h\nu B_0 \quad (2.23)$$

eşitliği ile belirlenir. Burada, n_{sp} iyon yoğunluk evirtim parametresi, G kuvvetlendirici kazancı, h Planck sabiti, ν yoğunluk evirtiminin optik frekansı ve B_0 kuvvetlendirilmiş kendiliğinden emisyonun olduğu band genişliğidir [3].

İTERBİYUM KATKILI FİBER OPTİK KUVVETLENDİRİCİ

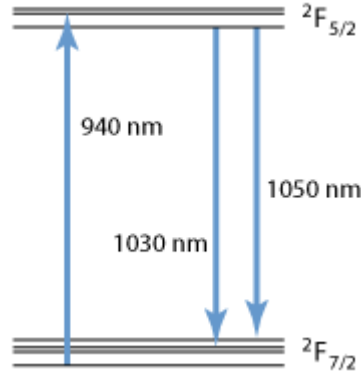
Optik kuvvetlendiricilerde yaygın olarak kullanılan diğer bir katkı elementi de iterbiyumdur. YDFA (İterbiyum Katkılı Fiber Optik Kuvvetlendirici, Ytterbium Doped Fiber Amplifier), kuvvetlendirici modeli ve kuvvetlendirme şekli göz önünde bulundurulduğunda, EDFA'ya benzer nitelikler taşımaktadır. Bu bölümde YDFA'nın EDFA'dan farklı özellikleri açıklanmış ve YDFA modellenmiştir.

3.1 YDFA'nın Modellenmesi

Tıpkı EDFA sistemleri gibi, YDFA'lar da, bilgi taşıyan bir optik sinyal kaynağı, pompa lazer ve katkılanmış fiberden oluşur. Şekil 2.1'deki katkılanmış fiber optik kuvvetlendirici şeması YDFA'lar için de geçerlidir. Aradaki fark ise katkı maddesi olarak erbiyum yerine iterbiyumun kullanılmasıdır. Pompa ışaretiyle başlatılan yoğunluk evirtimi ile iterbiyum iyonları bir üst enerji seviyesine geçerler. Bir üst enerji seviyesindeki iterbiyum iyonlarının ışık emisyonu yaparak enerji yayması sonucu optik sinyal kuvvetlendirilmiş olur. Bu bölümde, YDFA modellenmiş ve EDFA'dan ayrılan özellikleri değerlendirilmiştir.

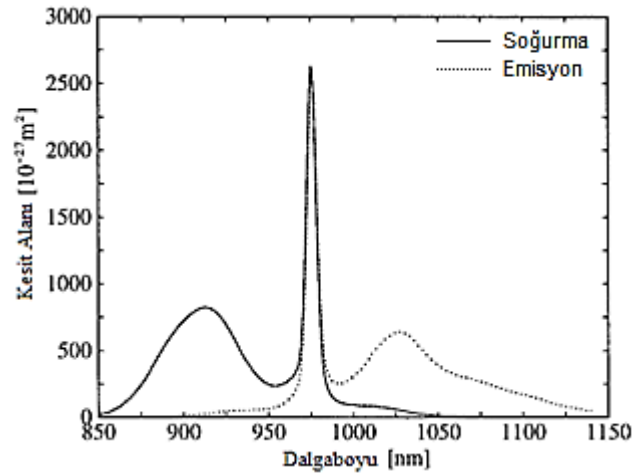
3.1.1 YDFA'nın Çalışma Prensibi

İterbiyum iyonlarının spektroskopik özellikleri diğer toprak katkı iyonlarla karşılaştırıldığında daha basittir. Bütün optik dalga boyları için sadece iki önemli enerji seviyesi bulunmaktadır. Bunlar, $^2F_{7/2}$ toprak seviyesi ve $^2F_{5/2}$ uyarılmış seviyedir. Şekil 3.1'de Yb^{+3} iyonunun enerji seviyeleri ve bu seviyeler arası geçişler gösterilmiştir [4].



Şekil 3.1 Yb⁺³ iyonunun enerji seviyeleri ve bu seviyeler arası geçişler [4]

YDFA'lar ile 1000-1100 nm dalgaboyu bandında yüksek kazanç sağlanır. Şekil 3.2, Yb katkılı bir germanyum oksit fiberin emisyon ve soğurma kesit alanlarını göstermektedir. Yaklaşık 975 nm dalgaboyu civarında, emisyon ve soğurma kesit alanlarının birbirine eşit olduğu görülmektedir. Bu noktadan sonra soğurma kesit alanı hızla düşmekte, emisyon kesit alanı ise bir süre düşükten tekrar artarak 1030 nm civarında maksimum değerine ulaşmaktadır. Bu bölgede iterbiyum, iyonlarının yaydığı enerji, soğurduğu enerjiden daha fazladır ve 975 nm ile pompalama yapıldığında kazanç, 1030 nm civarında maksimum değerine ulaşır [1].



Şekil 3.2 YDFA'nın emisyon ve soğurma kesit alanları

Uyarılmış durumdaki iterbiyum iyonlarının ömürleri, yaklaşık olarak 1-2 ms civarındadır. Bunun nedeni direkt olarak ışık yayılımının azalmasına bağlanmamalıdır; çünkü diğer iyonların ışık yayılımının zayıflamasından etkilenmediğinden sönmölen iyonlardan kaynaklanan çok zayıf ışık yayılımını göz ardı etmek çok kolaydır. Bununla

beraber bu etki kendini sönümlenmeyen iyonlardan kaynaklanan soğurma ile aynı spektral şekle sahip doyumsuz bir kayıp içerisinde gösterir.

YDFA sistemlerinde, pompa dalgaboyu olarak 910 nm kullanılmakla birlikte daha verimli pompalama yapıldığı için 975 nm dalgaboyu tercih edilir. 975 nm ve civarında kuvvetlendirilmiş kendiliğinden emisyonundan dolayı (ASE, Amplified Spontaneous Emission) iterbiyum iyonlarının yalnızca yaklaşık olarak yarısının yoğunluk evirtimi gerçekleştirilebilir [4].

3.2 YDFA'nın Kazanç ve Eşdeğer Denklemleri

YDFA'nın nümerik modellenmesi EDFA ile aynıdır. Bu nedenle, YDFA'nın nümerik modelinden kısaca bahsedilecektir.

Alt ve üst enerji seviyelerindeki Yb iyon yoğunluklarını ifade eden eşdeğer denklemler,

$$\frac{dn_2}{dt} = (R_{12} + W_{12})n_1 - (R_{21} + W_{21} + A_{21})n_2 \quad (3.1a)$$

$$\frac{dn_1}{dt} = -(R_{12} + W_{12})n_1 + (R_{21} + W_{21} + A_{21})n_2 \quad (3.1b)$$

formundadır. (3.1a) ve (3.1b) eşitliklerinden yola çıkılarak durağan durumdaki iyon yoğunlukları hesaplanabilir. Zamana bağımlılığın ortadan kalktığı durağan haldeki iyon yoğunlukları,

$$n_2 = \frac{R_{12} + W_{12}}{R_{12} + R_{21} + W_{12} + W_{21} + A_{21}} \quad (3.2a)$$

$$n_1 = 1 - n_2 \quad (3.2b)$$

ile hesaplanabilir. EDFA'da da belirtilen W_{ab} , işaret sinyali için ilgili a seviyesinden b seviyesine geçiş oranı ve R_{ab} , pompa sinyali için ilgili a seviyesinden b seviyesine geçiş oranı ise,

$$R_{12} = \sigma_{12}^{(p)} I_p / h\nu_p \quad (3.3a)$$

$$R_{21} = \sigma_{21}^{(p)} I_p / h\nu_p \quad (3.3b)$$

$$W_{12} = \sigma_{12}^{(s)} I_s / h\nu_s \quad (3.3c)$$

$$W_{21} = \sigma_{21}^{(s)} I_s / h\nu_s \quad (3.3d)$$

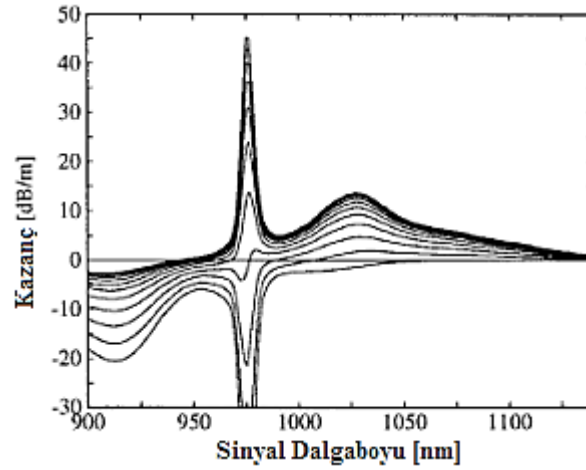
eşitlikleri ile bulunur. Eşitliklerde, $\sigma_{12}^{(p)}$ ve $\sigma_{21}^{(p)}$ efektif pompa soğurma ve emisyon kesit alanını, $\sigma_{12}^{(s)}$ ve $\sigma_{21}^{(s)}$ sinyal dalgaboyuna ilişkin değerleri, I_p ve I_s W/m² cinsinden pompa ve sinyal yoğunluklarını, ν_s ve ν_p ise sinyal ve pompa dalgalarının frekanslarını ifade etmektedir [5].

Pompa ve sinyal gücü için fiber boyunca bir z noktasında kazanç ve kayıp,

$$\frac{dP_p}{dz} = \eta_p (\sigma_{21}^{(p)} n_2 - \sigma_{12}^{(p)} n_1) N_{tot} P_p \quad (3.4a)$$

$$\frac{dP_s}{dz} = \eta_s (\sigma_{21}^{(s)} n_2 - \sigma_{12}^{(s)} n_1) N_{tot} P_s \quad (3.4b)$$

eşitlikleri ile belirlenir. N_{tot} ifadesi, Yb⁺³ iyonlarının toplam yoğunluğunu m⁻³ cinsinden ifade etmektedir. P_p ve P_s ise sırasıyla pompa ve sinyal güçleridir. Bu iki eşitlik, sinyal ve pompa dalgalarının aynı yönde yayılım yapması durumu için geçerlidir. Sinyalin fiberin bir ucundan, pompanın diğer ucundan yayılım yaptığı durumda (3.4b) eşitliği eksi ile çarpılmalıdır.



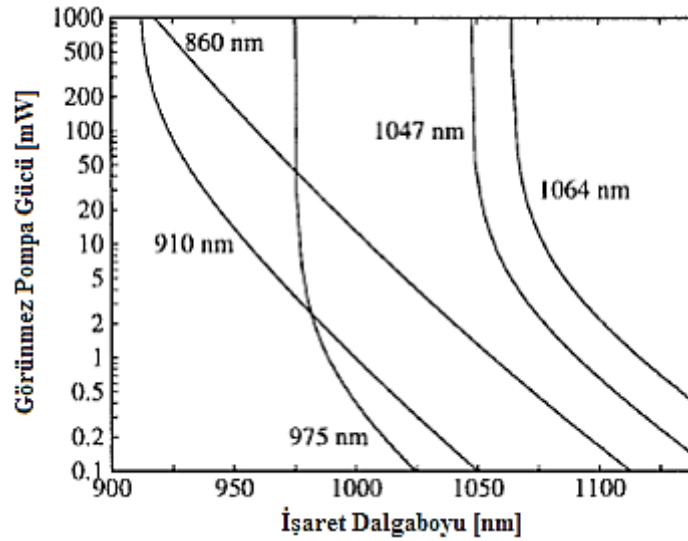
Şekil 3.3 İterbiyum katkılı germanosilicate(germanosilikat) fiber için 910 nm dalgaboyunda, 0 ile 30 mW arasında 3 mW aralıklarla değişen pompa lazer gücüne karşılık hesaplanan kazanç spektrumu [5]

Şekil 3.3, iyonların neredeyse tamamının evirtime uğradığı 910 nm dalgaboyundaki pompa lazerin farklı güçlerine karşılık gelen kazanç değerlerini göstermektedir. 975 nm civarındaki kısa dalgaboylarında, üç seviyeli davranış gözlenmektedir. Bu dalgaboyu

için pompa gücü olmaksızın kuvvetli bir soğurma mevcuttur. Bu nedenle, pompalanmayan bir kısımda oluşabilecek kaybın engellenebilmesi için fiber uzunluğu dikkatli bir şekilde iyileştirilmelidir. Diğer yandan 1100 nm civarındaki daha uzun dalgaboyları için kazanç yüksek enerji seviyesindeki yoğunlukla orantılıdır ve pompalanmayan bir fiberdeki yeniden soğurma çok zayıftır [5]. Bir kuvvetlendiriciden iyi verim, artık pompa gücünün daha yüksek verim sağlamak için son uçtan yansıtıldığı durumlar hariç diğer uçtaki artık pompa gücü bu noktadaki işaret sinyali dalgası için görünmez olduğunda, yani sıfır kazanç durumunda elde edilir. Sinyal dalgaboyuna karşılık gelen görünmez pompa gücü,

$$P_{trans} = \frac{A_c h \nu_p}{\eta_p (\sigma_{21}^{(s)} \sigma_{12}^{(p)} / \sigma_{12}^{(s)} - \sigma_{21}^{(p)}) \tau} \quad (3.5)$$

ile belirlenir. Burada, A_c çekirdek alanını ifade etmektedir. Şekil 3.4'te pompa lazerlere karşılık gelen görünmez pompa gücünün işaretin dalgaboyuna göre değişimi görülmektedir [5].



Şekil 3.4 Çeşitli pompa dalgaboylarında, görünmez pompa gücünün işaret dalgaboyuna göre değişimi [5]

EDFA'da olduğu gibi YDFA'da da ASE problemi ortaya çıkmaktadır. Her yayılım yönü için, ASE'nin gelişimi birkaç dalgaboyu kanalında ayrı ayrı hesaplanmalıdır, çünkü ASE'nin spektral şekli dalgaboyu seçici kuvvetlendirme ve tekrar soğurmaya bağlı olarak değişmektedir. Genellikle kazanç tepe değeri yaklaşık 30-40 dB'ye ulaştığında, ASE gücünün kazanç üzerinde önemli etkileri oluşmaya başlar. Düşük

kazançlar için, ASE'nin seviye yoğunlukları üzerindeki etkisini göz ardı eden daha basit bir model kullanılabilir.

ASE etkisi, kuvvetlendiriciden elde edilebilecek kazancı düşürmektedir. Band genişliği ve maksimum elde edilebilecek kazanç değeri göz önüne alınarak verimli kuvvetlendiriciler tasarlanabilir. Bu tasarım yapılırken, pompa ve sinyal dalgaboyları ASE'nin kazanç etkisini minimum düzeyde tutabilecek şekilde seçilmelidir.

Pompa dalgaboyu 910 nm'de iken 975 nm dalgaboyunda kuvvetlendirme yapılırsa maksimum kazanç elde edilir. Bunun nedeni, 975 nm'nin, en yüksek emisyon kesit alanına sahip olması ve 910 nm pompanın neredeyse bütün Yb iyonlarını uyarılmış seviyeye geçirmesidir. Tepe değeri 45 dB'ye kadar ulaşır, ancak çok dar bir band genişliği olduğu için kullanışlı değildir.

Pompa dalgaboyu 910 nm iken 1030 nm'de kuvvetlendirme yapılırsa, % 97 iyon evirtimi olmasına rağmen 975 nm'deki ASE gücü sebebiyle düşük kazanç elde edilir. Fakat 975 nm pompalamada 1030 nm kuvvetlendirme yapılırsa kazanç daha fazla olur; çünkü 975 nm'deki soğurma kesit alanı çok fazladır. Üst seviye yoğunluğu yaklaşık olarak % 50'de sabit tutulur. Burada kazancı düşüren 1030 nm'deki ASE olur; bu seviyedeki ASE etkisi, 975 nm'deki ASE etkisine göre çok daha düşüktür.

YARIİLETKEN OPTİK KUVVETLENDİRİCİLER

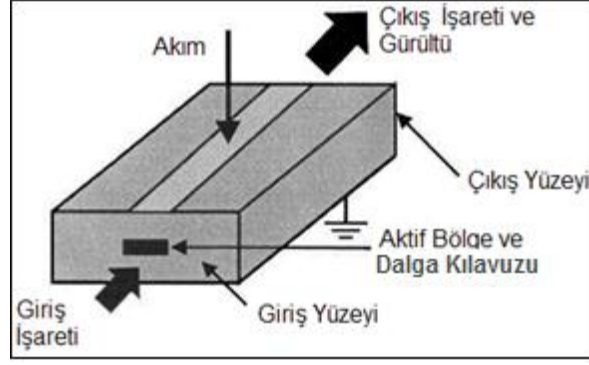
Yarıiletken optik kuvvetlendiricilerin (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) optik entegre devrelerde, optik sinyal işleme uygulamalarında kullanımı giderek artmaktadır. Yarıiletken optik kuvvetlendiricilerin yüksek kazanç katsayısına ve düşük doyma gücüne sahip olmasının sonucu olarak optik entegre devrelerde kullanımı yaygındır.

Periyodik tabloda genel olarak 3. ve 5. grup elementleri olan Galyum Arsenid (GaAs) ve İndiyum Fosfit (InP), SOA'ların elde edilmesinde kullanılır. Bu yarıiletkenler, yabancı maddelerle katkılanarak iletkenlik gibi özelliklerin değiştirilebilmesine imkân tanır ve SOA'nın elektriksel olarak pompalanabilmesi için gerekli olan p-n jonksiyonlarının düzenlenebilmesine izin verir.

Bu bölümde, SOA'ların modellenmesi incelenmiş, eşdeğer denklemleri ve kazanç hesaplamaları açıklanmıştır.

4.1 SOA'nın Modellenmesi

SOA, uygun koşullarda giriş işaretini kuvvetlendirebilen bir optoelektronik cihazdır. SOA'nın basit bir şematik diyagramı, Şekil 4.1'de görülmektedir. Burada, aktif bölge, giriş sinyalinin kuvvetlendirilmesini sağlar. Elektrik akımı kazancın oluşmasını sağlayacak enerji kaynağı olarak görev yapar. Gömülü dalga kılavuzu ise yayılan işaretin aktif bölgede tutulmasını sağlar [6].

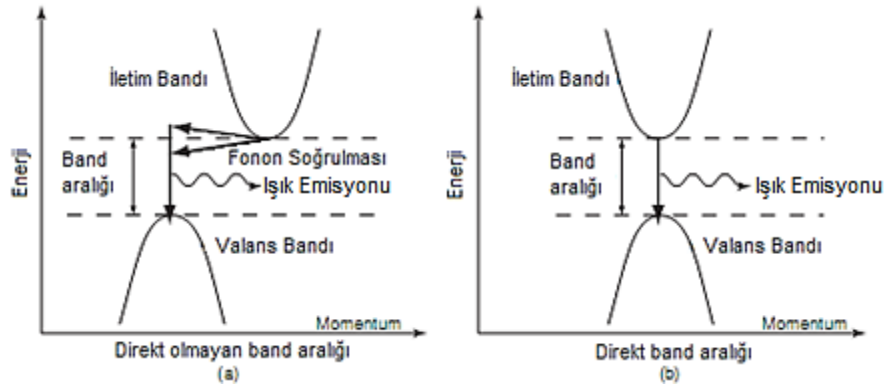


Şekil 4.1 SOA'nın şematik diyagramı [6]

Optik sınırlandırma zayıf olduğu için aktif bölgede sinyalin bir kısmı kayıplı olan kılıf bölgesine sızar. Çıkış işaretinde gürültü oluşur. Eklenen bu gürültü, kuvvetlendirme işleminden dolayı oluşmaktadır ve tam olarak önlenemez. Kuvvetlendirici yüzeyleri ise yansıtıcı olduğundan kazanç spektrumunda dalgalanmalara sebep olmaktadır [6].

4.1.1 SOA'nın Çalışma Prensibi

Optik uygulamalar açısından bir yarıiletkenin en önemli özelliği band aralığıdır. Şekil 4.2, yarıiletkenler için doğal yollarla gerçekleşen iki tip enerji band diyagramını göstermekte ve elektron enerjisini momentumunun bir fonksiyonu (veya dalga vektörü, $p = \hbar k$) olarak çizmektedir. Bütün yarıiletkenler valans bandını ve iletim bandını birbirinden ayıran bir band açıklığına sahiptir. Direkt olmayan band açıklığında, iletim bandındaki bir elektron, eğer enerjisi foton formundaysa, bu enerjinin bir kısmını yaymadan valans bandına geçemez, çünkü bu işlem boyunca toplam momentum korunamaz. Bu nedenle, silikon gibi direkt olmayan band açıklığına sahip maddelerde ışık emisyonu verimsiz bir işlemdir. Bunun nedeni, momentumun korunması için kristal titreşimlerinin veya fononların yardımı gerekli olmasıdır [2].



Şekil 4.2 Direkt olmayan (a) ve direkt band aralığının (b) şematik gösterimi [2]

Direkt band aralığına sahip olan yarı iletkenlerde ise iletim bandının minimum değeri Şekil 4.2(b)'de görüldüğü gibi valans bandının maksimum değeriyle mükemmel bir şekilde hizalanmıştır. Bunun sonucu olarak, ısınımsal geçişler herhangi bir fonon yardımı olmadan gerçekleşir. Bu nedenle optik kuvvetlendirme gereken bütün uygulamalarda direkt band açıklığına sahip yarıiletkenler tercih edilmektedir.

SOA'lar düşük akımlardaki elektriksel pompalama ile kazanç sağlar ve yapıldığı maddenin direkt band aralığından faydalanır. Elektriksel pompalama elektronları iletim bandına enjekte eder ve elektron-boşluk çifti belli bir değeri aştığında bir popülasyon evirtimi yaratır. Normal koşullar altında maksimum kazanç, band aralığı olan E_g 'ye yaklaşıldığında oluşur. SOA, dalgaboyu $\lambda = hc / E_g$ 'ye yakın olduğu zaman kuvvetlendirme sağlar. Kısacası, yarıiletken malzeme uygulamanın çalışma dalgaboyuyla eşleşecek biçimde seçilmelidir. SOA'ları oluşturan malzemelerin birleşimi üçlü veya dörtlü bileşikler oluşturacak şekilde değiştirilerek o malzeme için kuvvetlendirmenin en fazla gerçekleştiği band aralığı ve dalgaboyunu değiştirmek mümkündür.

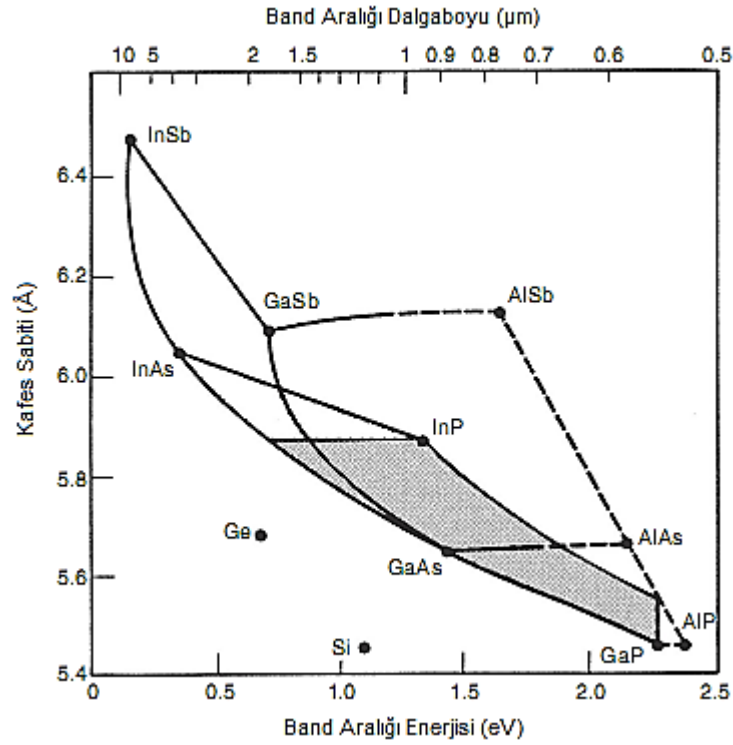
Şekil 4.3, birkaç üçlü ve dörtlü bileşik için band aralığı ve kafes sabiti arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Kesintisiz çizgi şeklinde olanlar tekli yarıiletkenleri ve onları birbirine birleştiren çizgiler ise üçlü bileşikleri ifade etmektedir. Kesikli çizgiler, ilgili üçlü bileşiğin, direk olmayan band aralığına sahip olduğunu ifade etmekte ve kapalı poligon şekli dörtlü bileşikleri göstermektedir [2].

800 nm civarında çalışan SOA'larda $Al_xGa_{1-x}As$ şeklindeki üçlü bileşikler kullanılır. Oluşan yarıiletken GaAs'ye yakın bir kafes sabitine sahiptir fakat daha yüksek band aralığı bulunmaktadır. Şekil 4.3'te GaAs ve AlAs moleküllerini birbirine bağlayan yatay çizgi, 0.45'e kadar olan x değerleri için direk band aralığına sahip üçlü bileşikleri ifade etmektedir. Band aralığı x 'e bağlıdır ve

$$E_g(x) = 1.424 + 1.247x, \quad 0 < x < 0.45 \quad (4.1)$$

eşitliği ile belirlenir. Burada, E_g , eV cinsinden ifade edilmektedir. SOA dalga kılavuzunda kılıf katmanı için seçilen x değeri çekirdek katmanı için seçilenden daha geniştir. $E_g \approx h\nu = hc / \lambda$ eşitliği kullanılarak, GaAs'den ($E_g = 1.424$ eV) yapılmış bir

çekirdek katmanı için dalgaboyu $\lambda \approx 0.87 \mu m$ olarak bulunur. Dalgaboyu $x=0.1$ olan aktif bir katman kullanılarak yaklaşık 0.8'e düşürülebilir.



Şekil 4.3 3. ve 5. grup yarıiletkenlerinden 9 grup halinde oluşturulan üçlü ve dörtlü bileşiklerin kafes sabiti ve band aralığı enerjisi [2]

Telekomünikasyon uygulamaları için 1.3 – 1.6 μm dalgaboyu aralığı önemlidir; çünkü bu aralıkta silika fiberdeki dispersiyon ve kayıplar 0.85 μm bölgesindeki kıyasla oldukça düşüktür. Bu dalgaboyu aralığında çalışan SOA'ların temel maddesi InP'dir.

SOA'lar, direkt band aralığına sahip bir maddenin, bu maddeden biraz daha büyük band aralığına sahip iki maddeden oluşan kılıf katmanları arasına yerleştirilmesiyle oluşur. Kılıf katmanları, i, iç katmanları temsil etmek üzere bir p-i-n jonksiyonu formunda şekillendirilir. Bu şekilde bir yapıya akım enjekte edildiğinde uyarılmış emisyon ile kuvvetlendirmenin olduğu kısım merkez katmandır [2].

4.2 SOA'nın Eşdeğer Denklemleri ve Optik Kazancı

Bir SOA'ya akım verildiğinde, yük taşıyıcılar (elektronlar ve boşluklar) aktif bölgeye girer ve uygulanan akımın artmasıyla yoğunluk değeri N artar. Optik bir sinyalin yokluğunda, elektron ve boşluk çiftlerinin fotonların oluşmasına neden olan ışımsal kombinasyonları *kendiliğinden emisyon* olarak adlandırılır. Bu işlemin sonucu olarak

SOA tarafından kuvvetlendirilmiş bir gürültü oluşur. Oluşan bu gürültü *kuvvetlendirilmiş kendiliğinden emisyon* (ASE, Amplified Spontaneous Emission) olarak adlandırılır ve kuvvetlendirici çıkış gücünü zayıflatır. Bunun yanı sıra SOA'nın bir ucundan uygun bir optik sinyal verildiğinde, uyarılmış emisyon tarafından eksponansiyel bir şekilde kuvvetlendirilir ve ASE tarafından bozulmuş bir kuvvetlendirilmiş çıkış huzmesi oluşur.

4.2.1 Taşıyıcı Yoğunluğu İçin Eşdeğer Denklemler

Fiber kuvvetlendiricilere benzer şekilde, SOA içerisinde ışığın enine dağılımı değişmez, çünkü ışık bir dalga kılavuzu modu formunda iletilir. Bu özellik, problemi tek boyuta indirgemektedir; N 'in uzaklığı belirten z ve zamanı belirten t ile nasıl değiştiğini dikkate almak yeterlidir. Eşdeğer denklem, taşıyıcıların olduğu z noktalarını içeren bütün mekanizmalar ve taşıyıcıların tekrar birleşip kaybolduğu bütün işlemler göz önünde bulundurularak

$$\frac{\partial}{\partial t} N(z, t) = \wp(z) - [AN(z, t) + BN^2(z, t) + CN^3(z, t)] - \frac{g(z, t)}{h\nu} |F(z, t)|^2 \quad (4.2)$$

eşitliği olarak yazılabilir. Burada, $F(z, t)$ optik alanı, $\wp(z)$ taşıyıcı enjeksiyon oranını ve $h\nu$ foton enerjisini ifade etmektedir. A ışımsal olmayan tekrar birleşme katsayısı, B kendiliğinden oluşan tekrar bileşme katsayısı ve C Auger tekrar birleşme katsayısıdır. Uyarılmış emisyon oranı kazanç katsayısı tarafından belirlenmektedir. Kazanç katsayısı,

$$g(z, t) = \Gamma a [N(z, t) - N_0] \quad (4.3)$$

eşitliği ile belirlenir. Burada, Γ sınırlama faktörü, a diferansiyel kazanç katsayısı ve N_0 saydamlığı sağlayan taşıyıcı yoğunluğudur. E_p enerjili bir darbe SOA'nın girişinden uygulanırsa,

$$E_p = A_m \int_{-\infty}^{+\infty} |F(0, t)|^2 dt \quad (4.4)$$

eşitliğindeki gibi normalize edilmiş olur. Burada A_m , SOA aktif bölgesinin efektif mod alanını ifade etmektedir.

(4.2) eşitliğinin ardındaki ana kabul, elektron ve boşluk yoğunluklarının birbirine eşit olmasıdır ve $N(z,t)$ olarak belirtilmektedir. Diğer bir kabul ise azınlıktaki taşıyıcıların dağılımının ihmal edilmesidir. Ayrıca optik kazancın darbe genişliğinin üzerinden frekansa bağıllığı ihmal edilmiş ve azınlık taşıyıcılarının yoğunluğundaki kazanç bağımlılığı da basit bir lineer ifade kullanılarak elde edilmiştir. Pratikte, (4.2) eşitliği, (4.5) olarak yazılabilmektedir:

$$\frac{\partial}{\partial t} N(z,t) = \phi(z) - \frac{N(z,t)}{\tau_e} - \frac{\Gamma a}{h\nu} [N(z,t) - N_0] |F(z,t)|^2. \quad (4.5)$$

Burada,

$$1/\tau_e = A + BN + CN^2 \quad (4.6)$$

dir. (4.5) eşitliğindeki τ_e , taşıyıcı ömrü olarak tanımlanır ve (4.6) eşitliği ile hesaplanır [2].

4.2.2 Kuvvetlendirici Kazancı ve Band Genişliği

Optik kazanç taşıyıcı yoğunluğunun lineer bir fonksiyonudur. Bunun yanı sıra optik kazanç frekansa da bağılıdır. Kazancın frekansa bağıllığı, kazanç spektrumunu belirtmektedir. Bir SOA'nın kazanç spektrumu, band genişliği verilen bir aktif ortamın madde bileşimi için sabit değildir ve bu aktif ortama giren akımla değişir. Normal çalışma koşullarında band genişliği 4 THz'den büyüktür. Kazanç spektrumunun şekli ve genişliği SOA'nın maddesel bileşimine de bağılıdır. Bu nedenle, maddesel bileşimin çeşitli varyasyonları ile kazanç spektrumunun band genişliği değiştirilebilir. Orta seviyede güç seviyelerinde, optik kazanç frekansa, enjeksiyon işaretine ve işaret gücüne bağlı olarak,

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_0)^2 T_2^2 + P/P_s} \quad (4.7)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada, g_0 kazancın tepe değerini, ω kuvvetlendirilen sinyalin frekansını, ω_0 kazanç tepe değerinin frekansını ve P kuvvetlendirilen işaretin optik gücünü gösterir. Doyma gücü P_s , malzeme parametrelerine bağlıdır ve tipik olarak SOA'lar için 10 mW'ın altındadır. T_2 parametresi ise atomik durumda dipol geçiş

zamanı olarak ifade edilir; taşıyıcıların band içerisindeki saçılma zamanlarına bağlıdır. Birçok yarıiletken için 100 fs'nin altındadır [2].

(4.3) eşitliğinde $N(z,t)$ çekilir ve (4.5) eşitliğinde yerine yazılırsa, SOA'nın kazanç dinamiklerini içeren bir oran denklemi olarak

$$\frac{\partial g}{\partial t} = \frac{g_0 - g}{\tau_e} - \frac{gP}{\tau_e P_s} \quad (4.8)$$

eşitliği yazılır. Kazancın tepe değeri olan g_0 ve doyma gücü P_s ise,

$$g_0 = \Gamma a(\phi \tau_e - N_0) \quad (4.9)$$

$$P_s = h\nu A_m / (a\tau_e) \quad (4.10)$$

eşitlikleri ile ifade edilir.

Sürekli bir işaretin L uzunluğuna sahip bir SOA boyunca kuvvetlendirildiği göz önüne alındığında, kuvvetlendirme işlemi,

$$\frac{dP}{dz} = g(z)P(z) \quad (4.11)$$

eşitliği ile belirlenir. (4.8) eşitliğindeki zamana bağımlılık kaldırılırsa, $g(z)$,

$$g(z) = \frac{g_0}{1 + P(z)/P_s} \quad (4.12)$$

eşitliği ile ifade edilir. (4.11) eşitliğinin kuvvetlendirici uzunluğu boyunca integrali alınırsa, kuvvetlendirme faktörü G ,

$$\ln G = g_0 L - (G - 1)P(0)/P_s \quad (4.13)$$

eşitliği ile hesaplanır.

(4.13) eşitliğindeki son terim kazancın doyuma gitmesinden kaynaklanmaktadır. Eğer kazancın doyuma gitmesi ihmal edilirse, doymamış kazanç, $G_0 = \exp(g_0 L)$ olarak yazılabilir. (4.13) eşitliğinde, G yerine G_0 yazılırsa, kazanç faktörü için yaklaşık çözüm,

$$\ln G \approx \ln G_0 - (G_0 - 1)P(0)/P_s \quad (4.14)$$

eşitliği ile bulunur [2].

Kuvvetlendirme faktörünün hesaplanması için bulunan (4.14) eşitliği, yaklaşık bir çözümdür. Giriş gücü, $P(0)/P_s \ll \ln G_0 / (G_0 - 1)$ koşulunu sağladığı zaman bu ifade geçerlidir.

RAMAN FİBER KUVVETLENDİRİCİLER

Bütün optik haberleşme frekanslarında çalışabilme özelliğine sahip olan Raman fiber kuvvetlendiriciler, fiberin tüm noktalarında kuvvetlendirme yapabilme özellikleri nedeniyle dağınık kuvvetlendiriciler olarak kullanılmaktadırlar. Kuvvetlendirme, sadece pompa ile sinyalin frekans farkına bağlı olup, EDFA’da olduğu gibi, katkı iyonlarının enerji seviyeleri arasındaki farka bağlı değildir. Ayrıca pompa ve sinyal arasında frekans farkına dayanan Raman kazancı haberleşme spektrumunun her noktasında Raman kuvvetlendirmesine olanak vermektedir. Bu nedenle, Raman kuvvetlendiriciler, C ve L bandındaki sinyallerin kuvvetlendirilmesi için esnek ve basit bir yöntem olarak görülmektedir.

Bu bölümde, Raman fiber kuvvetlendiricilerin modellenmesi anlatılmış, eşdeğer denklemleri ve kazanç hesaplamaları açıklanmıştır.

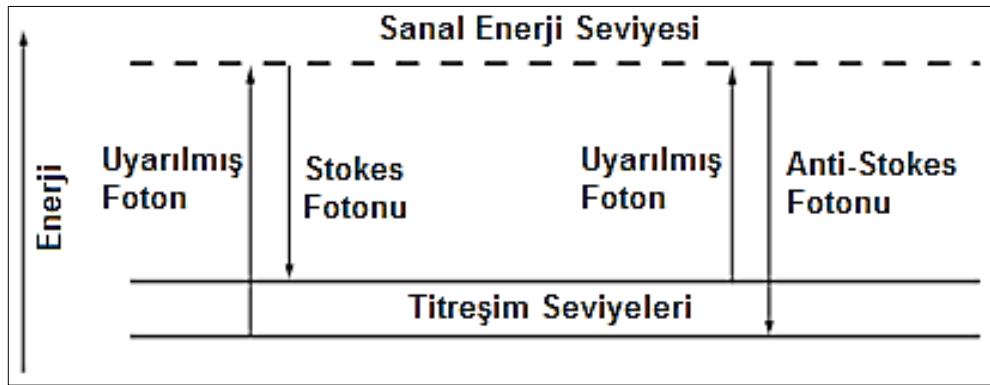
5.1 Raman Etkisi

Raman etkisi, 1928 yılında iki Hindistanlı bilim adamı C. V. Raman ve K. S. Krishnan tarafından keşfedilmiştir. Spontane Raman Saçılımı, moleküllerin titreşimleri sonucu oluşur ve gelen ışığın frekansını belli bir miktarda düşürür. Herhangi bir frekansta gerçekleşebilir. Bununla birlikte, Raman saçılımının oluşabilmesi için, gelen fotonun, molekülün titreşimsel enerji seviyelerinden biriyle etkileşime girebilmesi gerekmektedir. Bu şekilde etkileşime izin veren moleküller, Raman aktif moleküller olarak adlandırılır. Doğada birçok Raman aktif molekül bulunmaktadır. Optik haberleşmede fiber optik kabloların yapısını oluşturan silika ve silikon bu maddelerden ikisidir. Raman aktif maddelerde fotonlar spontane ve uyarılmış olarak saçılabilirler.

5.1.1 Spontane Raman Saçılımı

Spontane Raman saçılımı, molekül içerisine gelen fotonun soğurulmasıyla gerçekleşir. Fotonun soğrulması sonucu, molekül daha yüksek bir sanal enerji seviyesine geçer. Bu enerji seviyesinde çok kısa bir süre (<1 fs) kaldıktan sonra toprak seviyesindeki titreşim seviyelerine geçmek için foton yayar. Şekil 5.1 spontane Raman saçılımını şematik olarak anlatmaktadır [2].

Spontane Raman saçılımı sonucu molekül ilk titreşim seviyesine iner ve foton frekansı belli bir miktar azalır. Frekanstaki bu azalma Raman frekans kayması olarak adlandırılmaktadır. Uyarılmış fotonun frekansını artıran diğer titreşim seviyesindeki sonlanma ise küçük bir ihtimalle de olsa gerçekleşebilir. Şekil 5.1’de gösterildiği gibi, spontane Raman saçılımı sonucu Stokes ve Anti-Stokes olmak üzere iki ayrı toprak seviyesi oluşabilir.



Şekil 5.1 Sanal enerji bandı, Stokes ve Anti-Stokes saçılımının şematik gösterimi [2]

Var olan yayılmadan daha düşük frekanslı olan banda *Stokes bandı* denir. Stokes saçılımı sırasında uyarılmış fotonların enerjisi malzeme molekülleri tarafından soğrulur. Bu saçılım uyarılmış titreşim seviyesinde sonlanır. Depolanan enerji sıcaklık olarak harcanmış olur.

Var olan yayılmadan daha yüksek frekansa sahip olan titreşim bandı, *Anti-Stokes bandı* olarak adlandırılır. Anti-Stokes saçılımında fotonlar malzemenin moleküllerinden enerji alırlar. Bu saçılım, sadece gelen foton moleküle ulaşmadan önce molekül uyarılmış titreşim seviyesindeyse gerçekleşebilir. Saçılım sonrası molekül düşük enerji seviyesine geçer.

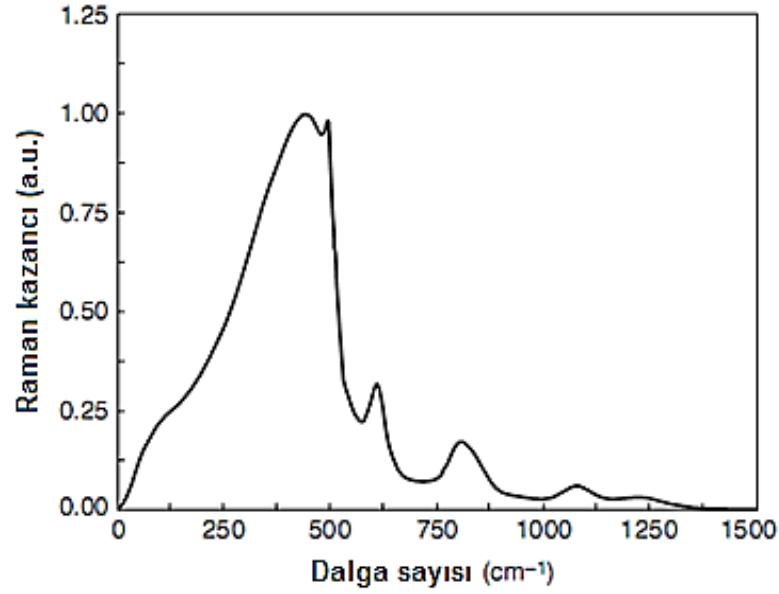
5.1.2 Uyarılmış Raman Saçılımı

Belli bir frekansta yoğun bir optik huzme ile pompalanan Raman aktif malzemeye Raman frekansından daha düşük frekanslı ikinci bir optik huzme uygulandığında, ikinci huzmenin varlığı, Raman aktif molekülden Stokes fotonlarının yayılımı kuvvetlendirir. Bu etkileşim, *uyarılmış Raman saçılması (SRS, Stimulated Raman Scattering)* olarak adlandırılır.

Stokes alanının artma oranı, pompa ve Stokes alanının yoğunluklarına bağlıdır. Bu nedenle, SRS doğrusal olmayan bir işlemdir. SRS'in en çok öne çıkan özelliği, Raman ortamında, görünmez alanında kaldığı sürece, herhangi bir frekanstaki lazer ışığının pompalama için kullanılabilmesidir. Eğer Raman ortamı anti-Stokes frekansındaki bir harici huzmeye maruz kalırsa, fotonların anti-Stokes frekansında saçılımı uyarılır. Bununla beraber, bu işlem, SRS ile karşılaştırıldığında daha verimsizdir, çünkü anti-Stokes frekansında saçılma uyarılmış titreşim seviyesinde ne kadar molekül olduğuna bağlıdır.

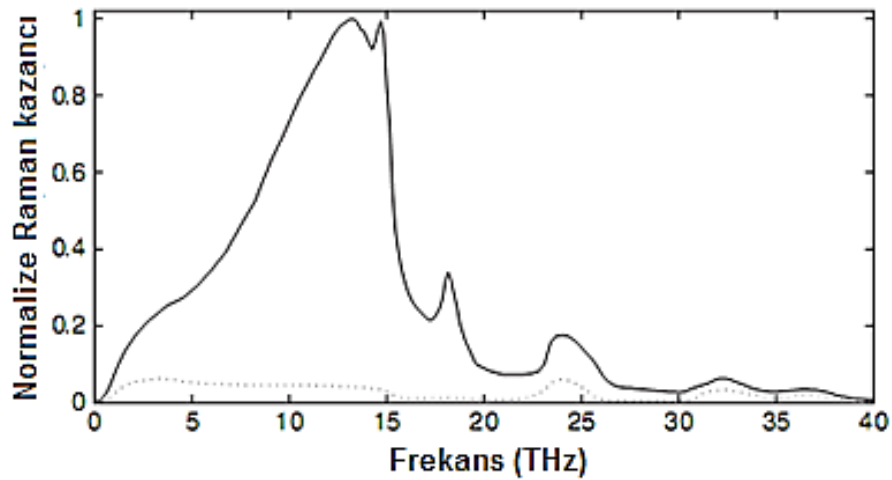
5.2 Optik Fiberlerde Raman Kazanç Spektrumu

Optik fiberlerin yapı taşlarını silika cam molekülleri oluşturmaktadır. Optik fiber boyunca rastgele dağılmış şekilde bulunan silika cam molekülleri, SRS ile Raman kuvvetlendirmesinin oluşmasında kullanılabilmektedirler. Silikadaki Raman etkisi SiO_4 tetrahedra moleküllerinin titreşimsel modlarından dolayı oluşmaktadır. Şekil 5.2, optik fiberde aynı polarizasyonla yayılan işaret ve pompa dalgalarından dolayı oluşan Raman kazancının spektrumunu göstermektedir. Şekilde 440 cm^{-1} veya 13.2 THz civarında tepe değerine sahip bir 40 THz'lik band genişliğinde Raman kazancı gösterilmektedir. Raman kazancı pompa lazerin ve işaret sinyalinin optik frekansları arasındaki farklılığa bağlı olmakla birlikte bu iki dalganın polarizasyonlarıyla da doğrudan ilişkilidir. İşaret sinyali ve pompa lazer dalgaları dik olarak polarize olduğunda, Raman kazancı, neredeyse sıfırdır [2].



Şekil 5.2 Aynı polarizasyona sahip pompa ve işaret sinyaline sahip silika fiberin Raman kazanç spektrumu [2]

Şekil 5.3'te aynı polarizasyona ve dik polarizasyona sahip pompa ve işaret sinyalinin Raman kazanç spektrumu karşılaştırılmıştır. Pompa ve işaret sinyali dik polarize olduğunda, Raman kazancının tepe noktasında 10 kattan daha fazla azaldığı görülmektedir. Bu nedenle Raman kuvvetlendirici tasarımında, pompa ve işaret sinyalinin polarizasyon seçimini kazanç üzerinde büyük etki göstermektedir [2].



Şekil 5.3 Pompa ve işaret sinyalleri aynı polarizasyona ve dik polarizasyona sahip olduğu durumdaki normalize Raman kazancı [2]

Raman kazanç katsayısı g_R , uyarılmış Raman saçılmasında pompa ve sinyalin birbirleriyle etkileşme gücünü ifade eden faktördür. Herhangi bir fiberde, belli bir

pompa dalgaboyu için Raman kazanç spektrumu sabittir. Ancak, g_R katsayısı farklı pompa dalgaboyları için sabit değildir ve pompa dalgaboyunun azalması ile birlikte g_R katsayısı da artmaktadır; g_R , A_{eff} (Fiberin Etkin Alanı $\approx 80 \mu m^2$) ve pompa dalgaboyu arasındaki ilişki,

$$g_R(\Delta\nu, \Lambda_{pompa}) = g_R(\Delta\nu, \lambda_{pompa}) \frac{\lambda_{sinyal}}{\Lambda_{sinyal}} \left[\frac{A_{eff-ps}(\Delta\nu, \lambda_{pompa})}{A_{eff-ps}(\Delta\nu, \Lambda_{pompa})} \right] \quad (5.1)$$

eşitliği ile belirlenir. Burada, $\Delta\nu$ pompa ve sinyalin frekans farkı, Λ_{pompa} , Λ_{sinyal} , λ_{pompa} ve λ_{sinyal} sırası ile yeni pompa ve yeni sinyal dalgaboyu, referans pompa ve referans sinyal dalgaboyu olmak üzere, pompa ve sinyalin birbirlerine göre etkin fiber alanı,

$$A_{eff-ps}(\Delta\nu, \lambda_{pompa}) = \frac{1}{2} [A_{eff}(\lambda_{pompa}) + A_{eff}(\lambda_{sinyal})] \quad (5.2)$$

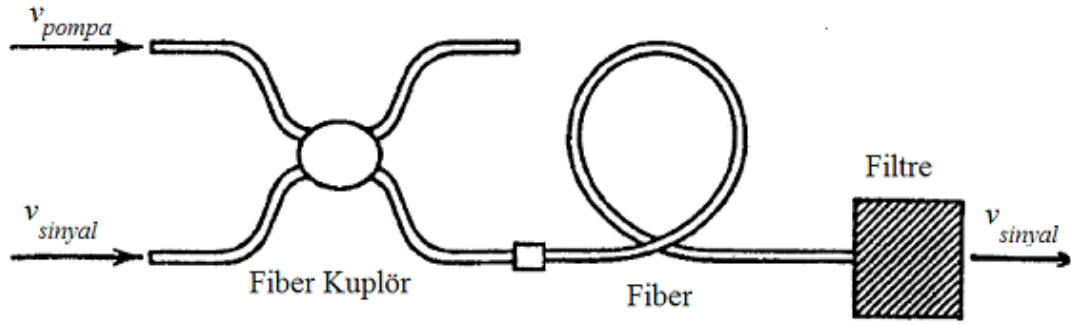
eşitliği ile belirlenir.

Raman kazanç spektrumu, yaklaşık olarak üçgen şeklindedir ve 13 THz ile 14 THz arasında en yüksek değerini almaktadır. Raman kazancı pompa ve işaret sinyali arasındaki frekans farkı ve bu iki sinyalin polarizasyonuna bağlı olmakla birlikte, pompalama yönüne bağlı değildir. Raman kuvvetlendirici, ileri veya geri yönde pompalanabilir.

5.3 Raman Fiber Kuvvetlendiricilerin Modellenmesi

Sinyal ve pompanın frekans farkı, Raman frekansı dolaylarında ise ($\Omega_{Raman} \approx 13.2 THz$) uyarılmış Stokes saçılımı sinyali kuvvetlendirmekte ve pompanın gücünü tüketmektedir. Bu durum, Raman kuvvetlendiricinin temelini oluşturmaktadır.

Şekil 5.4'de fiberin Raman kuvvetlendirici olarak nasıl kullanılacağı gösterilmektedir. Sırasıyla ν_p ve ν_s frekanslarındaki pompa ve sinyal ışınları fiber kuplör üzerinden fibere enjekte edilmektedir. İki ışın, beraber fiber içinde ilerlerken, enerji, pompa ışınından sinyal ışınına SRS etkileşimi nedeniyle transfer edilmektedir. Bu nedenle, pompa tüketilirken sinyaller kuvvetlendirilmektedir. Çıkış ucunda ise, istenilen sinyali filtrelemek için bir filtre kullanılmaktadır [7].



Şekil 5.4 İleri yönde pompalamalı Raman fiber kuvvetlendirici [7]

Her fiberin kendi kazanç Raman spektrumu vardır. Bu kazanç spektrumu, fiberin parametresi olup pompa ve sinyalin frekans farkına bağlıdır. Bir sinyali kuvvetlendirmek veya sinyal frekansında bir optik foton yaratmak için pompa ve sinyalin frekans farkının, yaratılması istenen fotonun frekansına eşit olması gerekmektedir. Frekans farkı, 13-14 THz veya 100 nm ise, kazanç faktörü maksimumdur. Bu durum, Raman kuvvetlendiricinin ne şekilde tasarlanacağı hakkında yol göstermektedir. Örneğin, 1530 nm'deki sinyalin kuvvetlendirilmesi için en iyi pompa dalgaboyu 1430 nm civarındadır.

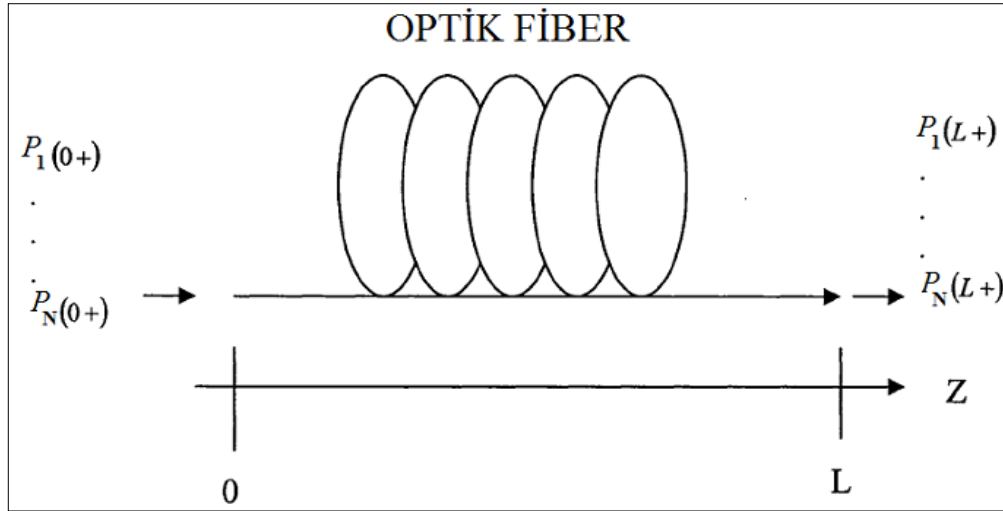
Raman kazancı pompa veya sinyalin ilerleme yönüne bağlı değildir. Raman fiber kuvvetlendiricilerde pompalama sinyal ile aynı yönde, ters yönde veya her iki yönde olabilir. Her düzeneğin kendine özgü avantajı vardır. İleri yönde pompalanan Raman kuvvetlendiricisinde pompa ve sinyal birlikte $z=0$ noktasından $z=L$ noktasına doğru hareket etmektedirler. Bu durumda, kuvvetlendirici, en iyi gürültü performansı sergilemektedir. Kısa mesafeli kuvvetlendiricilerde (<10 km), bu üç düzeneğin performansı arasında fark yoktur. Geri yönde pompalamalı Raman fiber kuvvetlendiricide, pompa ve sinyal farklı uçlardan fibere gönderilmektedir. Pompa ve sinyalin birbirine ters yönde hareket etmeleri, ileri yönde ve her iki yönde hareket etme durumuna göre daha yüksek kazanç performansı sergiler. İki yönde pompalamalı Raman kuvvetlendiricisinde pompa ve sinyal fibere her iki yönde gönderilmektedir. Çok uzun mesafeli Raman fiber kuvvetlendiricilerinde (>100 km) her iki yönde hareket düzeneği daha uygundur.

5.3.1 Raman Fiber Kuvvetlendiricilerin Çalışma Prensibi

Pompa ve sinyalin frekans farklılıklarına dayanan Raman kazancının bu özelliği, haberleşme spektrumunun her noktasında Raman kuvvetlendirmesini mümkün

kılmaktadır. Bu nedenle, sinyalin C ve L bandında esnek ve basit bir şekilde kuvvetlendirilebilmesi, Raman fiber kuvvetlendiricilerini önemli bir alternatif olarak ön plana çıkarmaktadır.

Şekil 5.5'te Raman fiber kuvvetlendirici şematik olarak gösterilmiştir. Bu kuvvetlendiricide, L fiber uzunluğunu, $\alpha(\nu)$ frekansa bağlı zayıflamayı, $g_R(\Delta\nu, \lambda_p)$ pompa ve Stokes ışınları arasındaki frekans farkı ve pompa dalgaboyuna bağlı Raman kazanç katsayısını, $\gamma(\nu)$ frekansa bağlı Rayleigh saçılım katsayısını, $A_{eff}(\nu)$ fiberin etkin alanını ve T fiberin mutlak sıcaklığını ifade etmektedir. Pozisyon referansı olarak kullanılan z , giriş ucunda sıfır, çıkış ucunda L değerini almaktadır. Sinyal veya pompa gücü P_i olmak üzere, ileriye doğru hareket P_i^+ , geriye doğru hareket P_i^- olarak gösterilmektedir. Bu durumda, $P_i(0+)$ giriş, $P_i(L+)$ ise çıkış güçlerini belirtmekte ve fiber çıkışından fiber girişine doğru hareket eden pompa gücü ise $P_i(L-)$ olarak ifade edilmektedir [7].



Şekil 5.5 Raman kuvvetlendiricisinin şematik olarak gösterimi [7]

Raman kuvvetlendiricisine ait genel model,

$$\pm \frac{dP_i}{dz} = -\alpha(\nu_i, T)P_i^\pm \dots \quad (5.3a)$$

$$+ \gamma(\nu_i)P_i^\mu \dots \quad (5.3b)$$

$$+ P_i^\pm \sum_j^{\nu_j > \nu_i} g_R(\nu_j, \nu_i) [P_j^+ + P_j^-] \dots \quad (5.3c)$$

$$+ 2 \sum_j^{\nu_j > \nu_i} [P_j^+ + P_j^-] h \nu_i \Delta \nu g_R(\nu_j, \nu_i) \times \left(1 + \frac{1}{e^{\frac{h(\nu_j - \nu_i)}{kT}} - 1} \right) \dots \quad (5.3d)$$

$$- P_i^\pm \sum_j^{\nu_j < \nu_i} \frac{V_j}{V_i} \frac{\nu_j}{\nu_i} g_R(\nu_i, \nu_j) [P_j^+ + P_j^-] \dots \quad (5.3e)$$

$$+ 2 \sum_j^{\nu_j < \nu_i} [P_j^+ + P_j^-] h \nu_i \Delta \nu \frac{\nu_j}{\nu_i} \frac{V_j}{V_i} g_R(\nu_i, \nu_j) \left(1 + \frac{1}{e^{\frac{h(\nu_i - \nu_j)}{kT}} - 1} \right) \quad (5.3f)$$

eşitliği ile gösterilir.

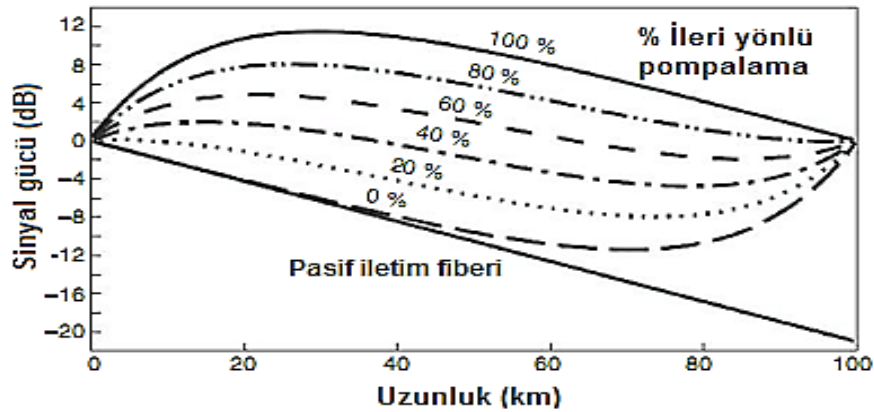
Burada, h Planck sabiti, k Boltzmann sabiti, ν_j ve ν_i frekanslar V_i ve V_j indislerin belirttiği frekanslardaki grup hızlarıdır. (5.3a) ifadesinde anlık fiber kaybı, (5.3b) ifadesinde anlık Rayleigh saçılımı, (5.3c) ifadesinde yüksek frekanslı olan dalgalar üzerinden kazanılan kazanç, (5.3d) ifadesinde düşük frekanslı olan dalgalara aktarılan güç, (5.2e) ve (5.2f) ifadelerinde ise sıra ile ASE ve anti-Stokes nedeniyle oluşan gürültüler ifade edilmiştir.

Raman kuvvetlendiriciler için, girişler sinyal veya pompa dalgalarıdır. ASE gürültüsü ise, sinyal ve pompa dalgalarının fiber içindeki hareketleri esnasında oluşmaktadır. Pompalar ilerleme esnasında enerjilerini sinyallere aktararak sinyallerin kuvvetlenmesini sağlamaktadırlar. Ancak, pompalar enerjilerini daha uzun dalgaboylu kanallara aktarırken (sinyallere ve ASE gürültüsüne) tüketmektedir. SRS nedeniyle oluşan sinyaller arasındaki girişim bir kazanç veya gürültü olarak nitelendirilebilir. Eğer Raman kuvvetlendirici birden fazla pompa içeriyorsa, kısa dalgaboylu pompalar, enerjilerinin bir kısmını daha uzun boylu pompa dalgalarına aktararak tüketirler. Birlikte ilerleme sırasında, ASE gürültüsü enerjisinin bir kısmını sinyallere aktarmaktadır. Ancak, alınan güç, bir gürültüden ibaret olup bir kazanç olarak nitelendirilemez. Aynı durum, anti-Stokes bileşeni için de geçerlidir ve anti-Stokes bileşeninden sinyallere aktarılan güç de bir gürültüden ibarettir [8]. Bu varsayımlara dayanılarak, ASE gürültü gücünü de içeren sinyal ve pompa hareket denklemleri ileri yönde (5.4) ve geri yönde (5.5) eşitliğiyle verilmiştir:

$$\begin{aligned}
\frac{dP_i^+(z_{k+1})}{dz} = & -\alpha(\nu_i)P_i^+(z_k) + \gamma(\nu_i)P_i^-(z_k) \dots \\
& + P_i^+(z_k) \sum_j^{\nu_j > \nu_i} g_R(\nu_j, \nu_i) [P_j^+(z_k) + P_j^-(z_k)] \dots \\
& + 2h\nu_i \Delta\nu \sum_j^{\nu_j > \nu_i} g_R(\nu_j, \nu_i) [P_j^+(z_k) + P_j^-(z_k)] \times \left(1 + \frac{1}{e^{\frac{h(\nu_j - \nu_i)}{kT}} - 1} \right) \dots \\
& - P_i^-(z_k) \sum_j^{\nu_j < \nu_i} \frac{V_j}{V_i} \frac{\nu_j}{\nu_i} g_R(\nu_j, \nu_i) [P_j^+(z_k) + P_j^-(z_k)] \dots \\
& + 2h\nu_i \Delta\nu \sum_j^{\nu_j < \nu_i} \frac{\nu_j}{\nu_i} \frac{V_j}{V_i} g_R(\nu_j, \nu_i) [P_j^+(z_k) + P_j^-(z_k)] \left(\frac{1}{e^{\frac{h(\nu_i - \nu_j)}{kT}} - 1} \right) \dots
\end{aligned} \tag{5.4}$$

$$\begin{aligned}
\frac{dP_i^-(z_k)}{dz} = & -\alpha(\nu_i)P_i^-(z_{k+1}) + \gamma(\nu_i)P_i^+(z_{k+1}) \dots \\
& + P_i^-(z_{k+1}) \sum_j^{\nu_j > \nu_i} g_R(\nu_j, \nu_i) [P_j^+(z_{k+1}) + P_j^-(z_{k+1})] \dots \\
& + 2h\nu_i \Delta\nu \sum_j^{\nu_j > \nu_i} g_R(\nu_j, \nu_i) [P_j^+(z_{k+1}) + P_j^-(z_{k+1})] \times \left(1 + \frac{1}{e^{\frac{h(\nu_j - \nu_i)}{kT}} - 1} \right) \dots \\
& - P_i^-(z_{k+1}) \sum_j^{\nu_j < \nu_i} \frac{V_j}{V_i} \frac{\nu_j}{\nu_i} g_R(\nu_j, \nu_i) [P_j^+(z_{k+1}) + P_j^-(z_{k+1})] \dots \\
& + 2h\nu_i \Delta\nu \sum_j^{\nu_j < \nu_i} \frac{\nu_j}{\nu_i} \frac{V_j}{V_i} g_R(\nu_j, \nu_i) [P_j^+(z_{k+1}) + P_j^-(z_{k+1})] \left(\frac{1}{e^{\frac{h(\nu_i - \nu_j)}{kT}} - 1} \right) \dots
\end{aligned} \tag{5.5}$$

(5.4) ve (5.5) eşitlikleri, işaret gücünün kuvvetlendirici uzunluğu boyunca ekponansiyel olarak arttığını işaret etmektedir.



Şekil 5.6 100 km uzunluğunda tek yönlü pompalanan bir Raman kuvvetlendirici boyunca işaret gücünün değişimi [2]

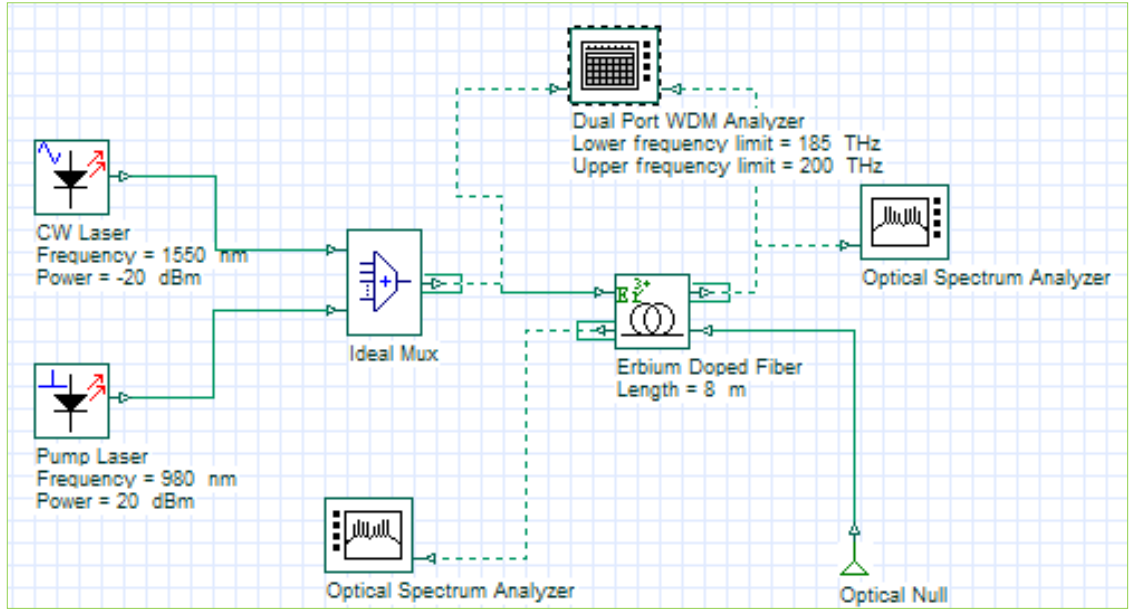
Şekil 5.6, 100 km uzunluğunda tek yönlü pompalanan bir Raman kuvvetlendirici boyunca işaret gücünün değişimini göstermektedir. Tek yönlü pompalama durumunda 1 mW'lık işaret sinyal gücü, fiberde kilometre başına 0.2 dB kayıp söz konusu olmasına karşın kuvvetlendirici çıkışında tekrar elde edilmiştir [2].

OPTİK KUVVETLENDİRİCİ TASARIMI VE SİMÜLASYONU

Bu bölümde, OptiSystem 7.0 simülasyon programı kullanılarak EDFA, YDFA, SOA ve Raman fiber kuvvetlendirici sistem tasarımları ve konuyla ilgili simülasyonlar yapılmıştır. Bu simülasyonlarda, sistemin kazanç ve gürültü performansını etkileyen tasarım parametreleri belli değerler arası değiştirilerek bu parametrelerin kazanç ve gürültüye etkileri incelenmiştir. Parametrelerin sistemin kazanç ve gürültüsüne etkileri gözlemlendikten sonra sistem tasarım parametrelerinin maksimum kazanç ve minimum gürültü sağladığı değerleri belirlenmiştir.

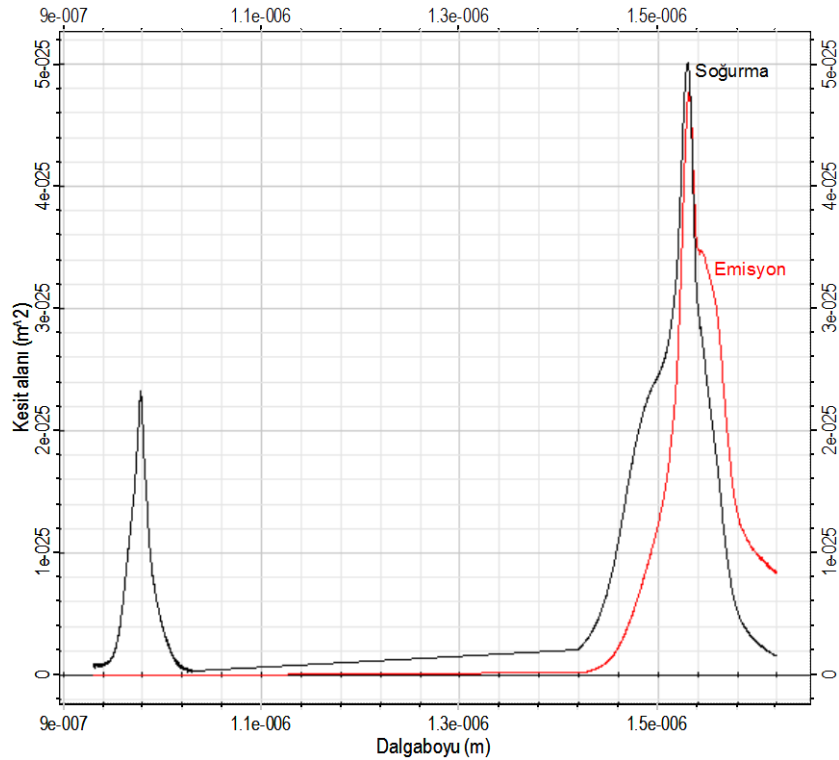
6.1 Erbiyum Katkılı Fiber Kuvvetlendirici Tasarımı ve Kazanç – Gürültü Analizi

OptiSystem 7.0 simülasyon programı kullanılarak Şekil 6.1’de yer alan EDFA tasarımı yapılmıştır. Bu tasarımda, 20 dBm gücünde ve 980 nm dalgaboyunda çalışan pompa lazer ve işaret kaynağı olarak sürekli işaretli (CW, Continuous Wave) lazer kullanılmıştır. Tasarlanan erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici düzeneğinde, işaret kaynağının dalgaboyu 1550 nm, gücü -20 dBm ve erbiyum katkılı fiberin uzunluğu ise 8 m olarak seçilmiştir. Aynı zamanda yapılacak olan simülasyonların sonuçlarının izlenmesi amacıyla, erbiyum katkılı fiberin giriş ve çıkışlarına iki kapılı WDM analizörü (Dual Port WDM Analyzer), erbiyum katkılı fiberin çıkışlarına ise optik spektrum analizörü (Optical Spectrum Analyzer) bağlanmıştır.



Şekil 6.1 Tasarlanan EDFA düzeneği

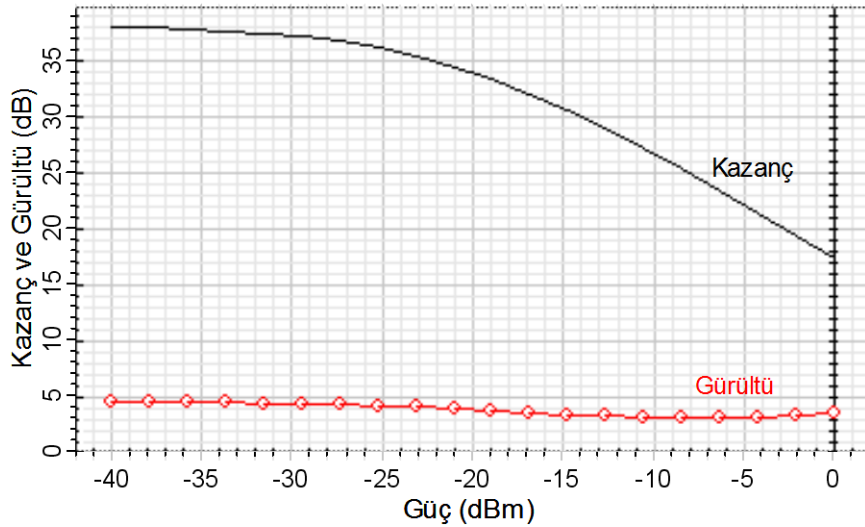
Tasarlanan kuvvetlendiricideki EDFA'nın dalgaboyuna göre enerji soğurma ve emisyon spektrumu Şekil 6.2'de görülmektedir. Pompalamanın yapıldığı 980 nm ve giriş işaretinin çalışma dalgaboyu olan 1550 nm civarında soğurma çok fazladır. Aynı zamanda 1550 nm civarında emisyon da maksimum değerine ulaşmaktadır.



Şekil 6.2 Tasarlanan EDFA düzeneğindeki enerji soğurma ve emisyon spektrumu

EDFA'nın kazanç ve gürültü analizi için tasarlanan kuvvetlendirici düzeneğinde, sistem tasarım parametrelerinden bazılarının değerleri değiştirilerek simülasyonlar yapılmış ve bu analizlerin, kazanç ve gürültü üzerine etkileri değerlendirilmiştir. Düzenekte, diğer bileşen değerleri sabit tutularak sırasıyla işaret kaynağının gücü, pompa lazerin gücü, katkılanmış fiberin uzunluğu ve işaret kaynağının dalgaboyu, belirlenen değerler aralığındaki 20 eşit iterasyonla değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, teorik bilgiler ışığında yorumlanarak analiz edilmiştir.

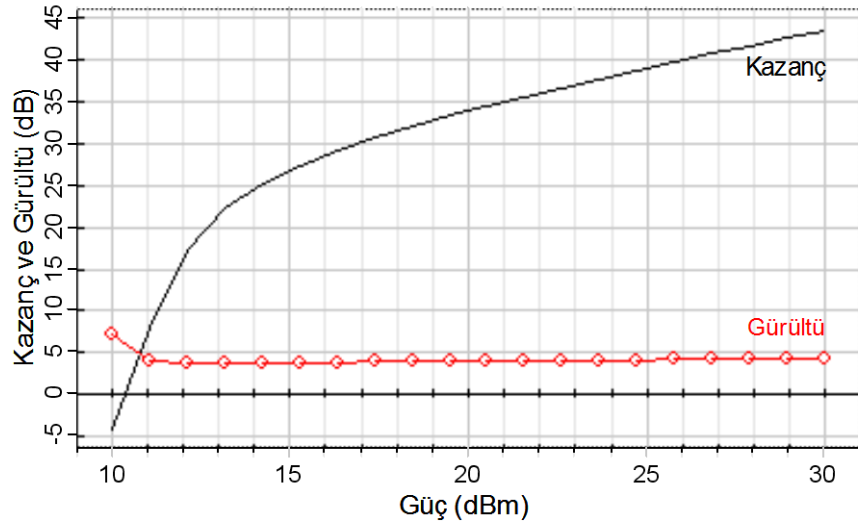
Erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici girişindeki işaretin gücü, -40 dBm ile 0 dBm aralığında artırılarak yapılan simülasyon ile kuvvetlendirici çıkışındaki kazanç ve gürültünün değişimi gözlenmiştir. Simülasyon sonucunda elde edilen kazanç ve gürültü değişimi Şekil 6.3'te verilmiştir. Kazancın doyuma ulaşmasından dolayı giriş işaret gücünün sürekli artmasıyla kazancın azaldığı ve 0 dBm giriş gücüne ulaşıldığında yaklaşık 18 dB'ye düştüğü görülmektedir. Diğer yandan gürültü yaklaşık 5 dB civarında değerlere sahipken, girişteki işaret gücünün -15 dBm'e ulaşmasıyla teorik gürültü sınırı olan 3 dB'ye yakın değerleri almış ve girişteki işaret gücü -5 dBm'e ulaşmıncaya kadar bu gürültü değerleri korunmuştur. Kazanç ve gürültü değerleri göz önüne alındığında, -15 dBm ile -5 dBm aralığındaki giriş gücünün bu sistem için en iyi kazanç – gürültü performansını verdiği izlenmektedir.



Şekil 6.3 EDFA'nın kazanç ve gürültüsünün girişteki işaret kaynağının gücüne göre değişimi

Pompa lazer gücünün erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici çıkışındaki kazanç ve gürültüye etkisinin analiz edilmesi için Şekil 6.1'deki kuvvetlendirici düzeneğindeki

pompa lazerin gücü 10 dBm ile 30 dBm aralığında artırılmıştır. Yapılan simülasyon sonucu, kazanç ve gürültünün güce göre değişimi Şekil 6.4'te yer almaktadır.



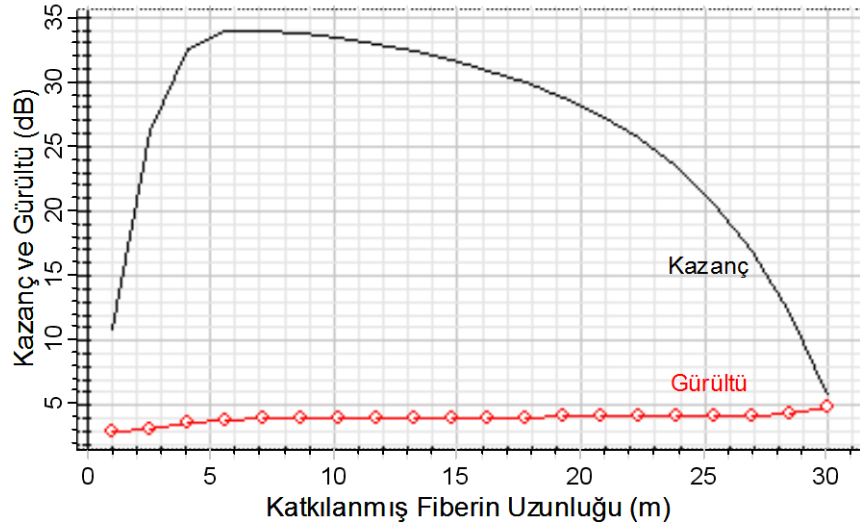
Şekil 6.4 EDFA'nın kazanç ve gürültüsünün pompa lazer gücüne göre değişimi

Pompa lazer gücünün 10 dBm ile 30 dBm aralığında artırılmasıyla birlikte, kuvvetlendiricideki erbiyum iyon evirtiminin artmasıyla kazanç sürekli artmaktadır. Pompa lazer gücü 10 dBm olduğunda, gürültü değerinin yaklaşık 7 dB olduğu görülmektedir. Pompa lazer gücünün artmasıyla gürültü de azalmakta ve pompa lazer gücünün 11 dB ile 20 dB olduğu aralıkta, gürültü teorik sınır olan 3 dB'ye en yakın değerleri almaktadır. Kazanç ve gürültü değerleri göz önüne alındığında, 15 dBm ile 30 dBm aralığındaki pompa lazer gücünün, bu sistem için en iyi kazanç – gürültü performansını verdiği izlenmektedir.

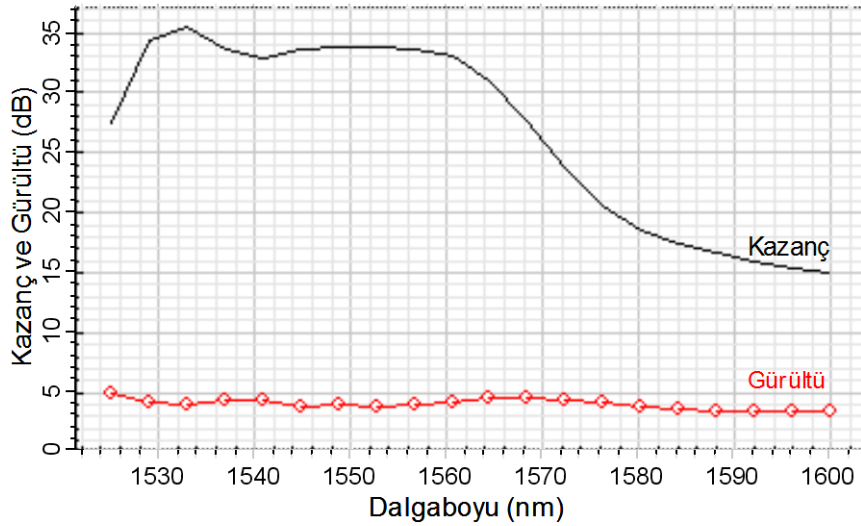
Katkılanmış fiberin uzunluğunun EDFA'nın kazanç ve gürültüsüne etkisinin incelenmesi amacıyla, EDFA düzeneğindeki katkılanmış fiberin boyu 0.1 m ile 30 m aralığında artırılmıştır. Bu değişimin, EDFA'nın kazanç ve gürültüsüne etkisi, Şekil 6.5'te görülmektedir.

Daha önce 2.3 Bölümü'nde, belirli bir pompa lazer gücü için kuvvetlendirici kazancının, optimum kuvvetlendirici uzunluğu L 'de maksimuma ulaştığı ve fiber uzunluğu L 'yi geçtiğinde ise kazancın keskin bir şekilde düştüğü açıklanmıştı. Yapılan simülasyon sonucunda elde edilen verilere göre tasarlanan EDFA sisteminde, katkılanmış fiber uzunluğunun değiştirilmesi ile kazanç, 6 m uzunluğa kadar hızla artmakta ve 6 m'de maksimum değere ulaşmaktadır; bu noktadan sonra yaklaşık olarak 9 m'ye kadar kazanç değeri aynı kalmakta ve daha sonra da hızla azalmaya

başlamaktadır. Bu durumda tasarlanan EDFA sistemi için optimum katkılanmış fiber uzunluğunun 6 m olduğu görülmektedir. Kazancın, 6 m uzunluktan sonra azalmaya başlamasının nedeni, kuvvetlendiricinin optimum uzaklığı olan 6 m uzunluğundan sonrasının pompalanamaması ve oluşan ASE etkisiyle kuvvetlendirilmiş sinyalin soğrulmasıdır. Sistemdeki gürültü, yaklaşık olarak 6 m fiber uzunluğu civarına kadar artarak 4 dB'ye ulaştıktan sonra 20 m uzunluğa kadar sabit kalmış ve bu uzunluktan sonra tekrar artmaya başlamıştır.



Şekil 6.5 EDFA'nın kazanç ve gürültüsünün katkılanmış fiberin uzunluğuna göre değişimi



Şekil 6.6 EDFA'nın kazanç ve gürültüsünün işaret kaynağının dalgaboyuna göre değişimi

EDFA'nın girişindeki işaretin çalışma dalgaboyunun kuvvetlendiricinin kazanç ve gürültüsü üzerine etkilerinin incelenmesi için işaret çalışma dalgaboyu 1525 nm ile 1600 nm aralığında artırılmıştır. Kuvvetlendiricinin farklı çalışma dalgaboylarına verdiği yanıtların izlendiği bu sistemde, kazanç ve gürültünün dalgaboyuna göre değişimi Şekil 6.6'da verilmiştir.

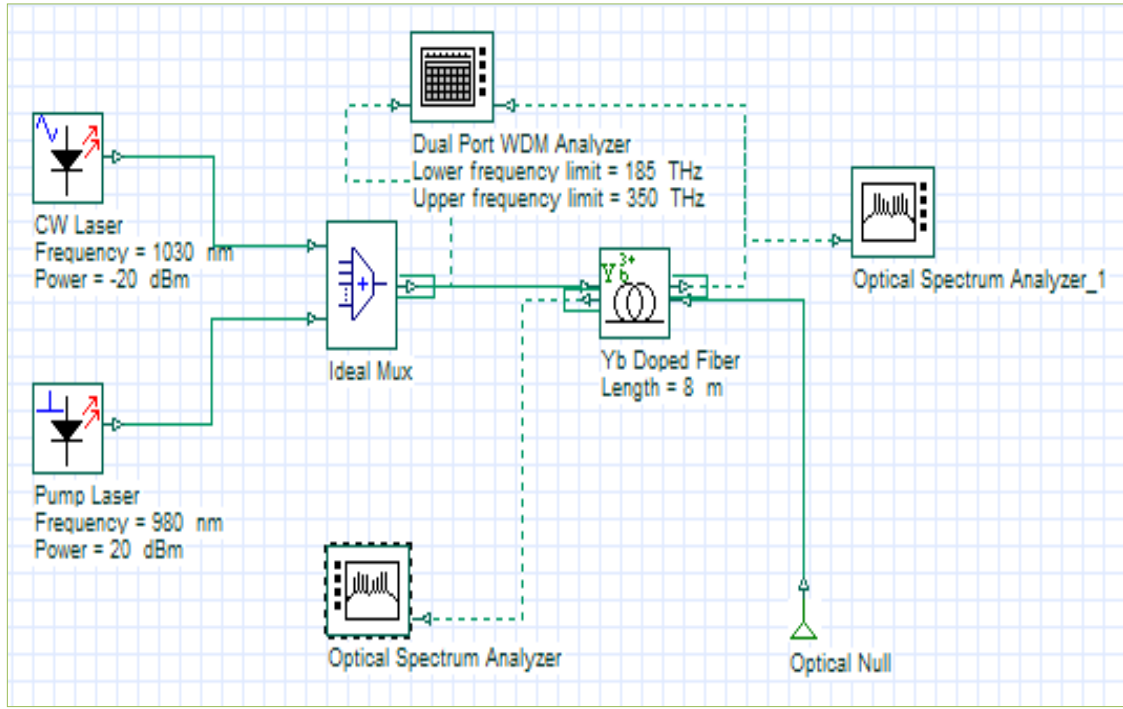
Pompa lazerin çalışma frekansı 980 nm'deyken, girişteki işaret kaynağının çalışma dalgaboyunun 1525 nm ile 1600 nm aralığında artırılmasıyla birlikte kazanç artarak 1533 nm dalgaboyu civarında yaklaşık 35 dB değer olarak maksimum değere ulaşmıştır. Bu noktada, kazanç her ne kadar maksimum değerine ulaşmış olsa da, çok dar bir band olduğundan pratik uygulamalarda kullanım için uygun değildir. 1550 nm ve civarında ise kazancın yaklaşık 34 dB değerine ulaştığı ve yaklaşık olarak 20 nm'lik bir band genişliği boyunca bu değerini koruduğu görülmektedir. EDFA'nın 1550 nm'deki bu performansı göz önüne alındığında, haberleşme uygulamaları için çok verimli olduğu görülmektedir. 1560 nm dalgaboyundan sonra ise kazanç sürekli azalmaktadır. Gürültü fonksiyonu ise başlangıçta 5 dB ile maksimum değerini alarak 1525 nm'de en kötü performansa ulaşmıştır. 1550 nm ve civarında ise gürültünün 4 dB civarında seyrettiği görülmektedir. Bu nokta, teorik gürültü sınırı olan 3 dB'ye yakındır. 1600 nm civarına yaklaşıldıkça gürültünün daha da düştüğü gözlenmektedir. Düşük kazancın yeterli olup daha iyi bir gürültü performansının gerektiği uygulamalarda, EDFA, 1600 nm bandında da çalıştırılabilmektedir.

6.2 İterbiyum Katkılı Fiber Kuvvetlendirici Tasarımı ve Kazanç – Gürültü Analizi

EDFA ve YDFA, çalışma yöntemi ve yapısal özellikleri bakımından birbirine çok benzemektedir. Bu nedenle, YDFA'nın analizinin yapılabilmesi için yapılan tasarımda, giriş işaretinin çalışma dalgaboyu dışında geri kalan tüm sistem elemanlarının değerleri, bir önceki uygulamada tasarlanan EDFA sistemindeki değerler ile aynı seçilmiştir. Böylece her iki kuvvetlendiricinin benzer çalışma şartlarına verdiği yanıtlar karşılaştırılabilecektir.

OptiSystem 7.0 simülasyon programı kullanılarak Şekil 6.7'de yer alan YDFA tasarımı yapılmıştır. Bu tasarımda, 20 dBm gücünde ve 980 nm dalgaboyunda çalışan pompa lazer ve işaret kaynağı olarak da sürekli işaretli lazer kullanılmıştır. Tasarlanan iterbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici düzeneğinde, işaret kaynağının dalgaboyu, 1030

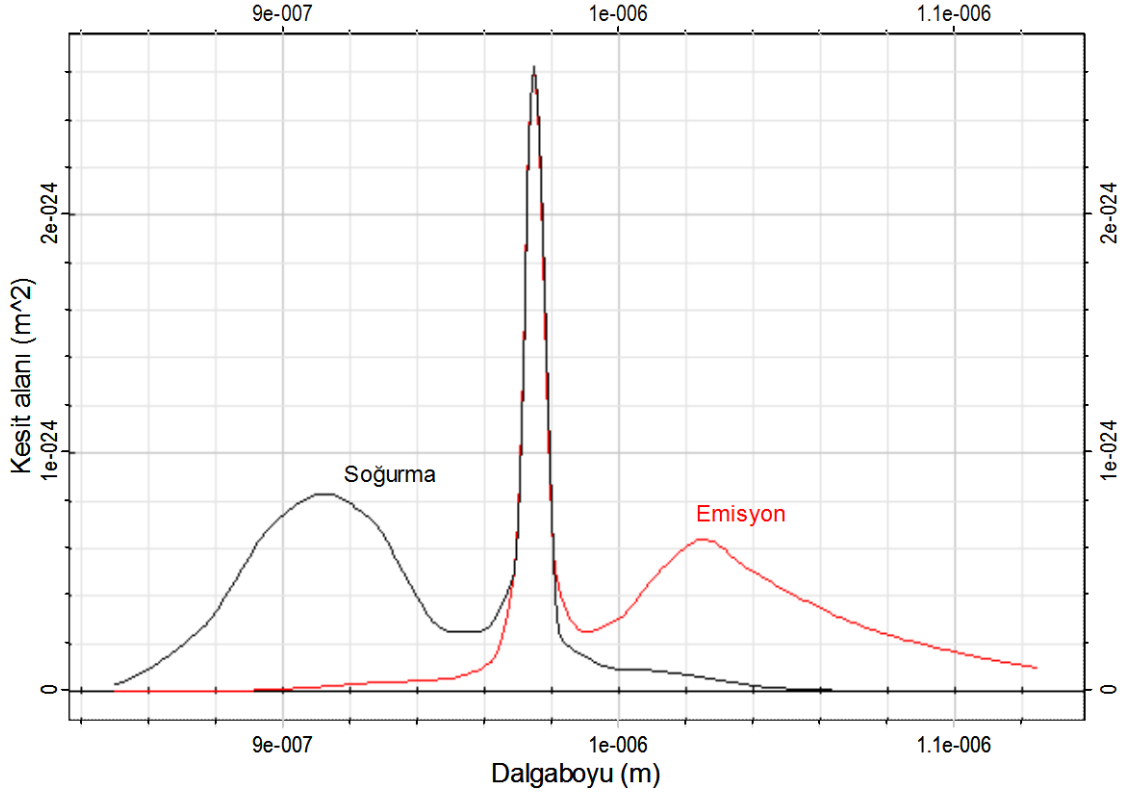
nm, gücü -20 dBm ve iterbiyum katkılı fiberin uzunluğu ise 8 m olarak seçilmiştir. Aynı zamanda yapılacak olan simülasyonların sonuçlarının izlenebilmesi amacıyla bir önceki tasarımdakine benzer şekilde iterbiyum katkılı fiberin giriş ve çıkışlarına iki kapılı WDM analizörü, iterbiyum katkılı fiberin çıkışlarına ise optik spektrum analizörü bağlanmıştır. Böylece EDFA'ya eşdeğer bir tasarım yapılarak sonuçlar gözlenecektir.



Şekil 6.7 Tasarlanan YDFA düzeneği

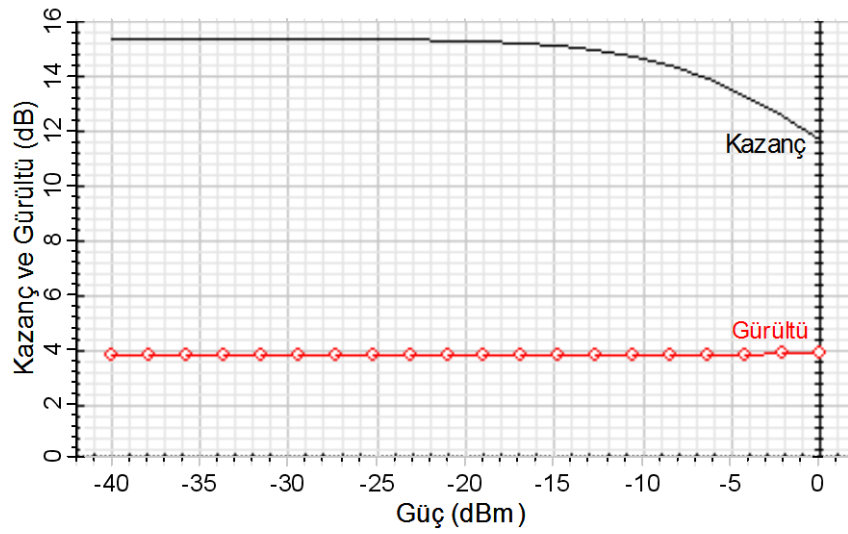
Şekil 6.7'deki YDFA'nın dalgaboyuna göre enerji soğurma ve emisyon spektrumu, Şekil 6.8'de görülmektedir. Dalgaboyu 910 nm ve 975 nm civarındayken soğurmanın en yüksek değerlerine ulaştığı izlenmektedir. Dalgaboyu 975 nm ve 1030 nm civarındayken ise enerji emisyonu en yüksek değerlerine ulaşmaktadır. Bu spektrum, giriş işaret kaynağı ve pompa lazerin çalışma dalgaboyunun belirlenmesinde yol göstermektedir.

Tasarlanan sistemde kazanç ve gürültü analizinin yapılabilmesi için diğer bileşen değerleri sabit tutularak sırasıyla işaret kaynağının gücü, pompa lazerin gücü, katkılanmış fiberin uzunluğu ve işaret kaynağının dalgaboyu, belirlenen değerler aralığındaki 20 eşit iterasyonla değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, teorik bilgiler ışığında yorumlanarak analiz edilmiş ve EDFA'da elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak iki tasarım arasındaki fark belirlenmiştir.



Şekil 6.8 Tasarlanan YDFA düzeneğindeki enerji soğurma ve emisyon spektrumu

İterbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici girişindeki işaretin gücü -40 dBm ile 0 dBm aralığında artırılarak yapılan simülasyon ile kuvvetlendirici çıkışındaki kazanç ve gürültünün değişimi izlenmiştir. Simülasyon sonucu elde edilen kazanç ve gürültünün güce göre değişimi Şekil 6.9’da verilmiştir.

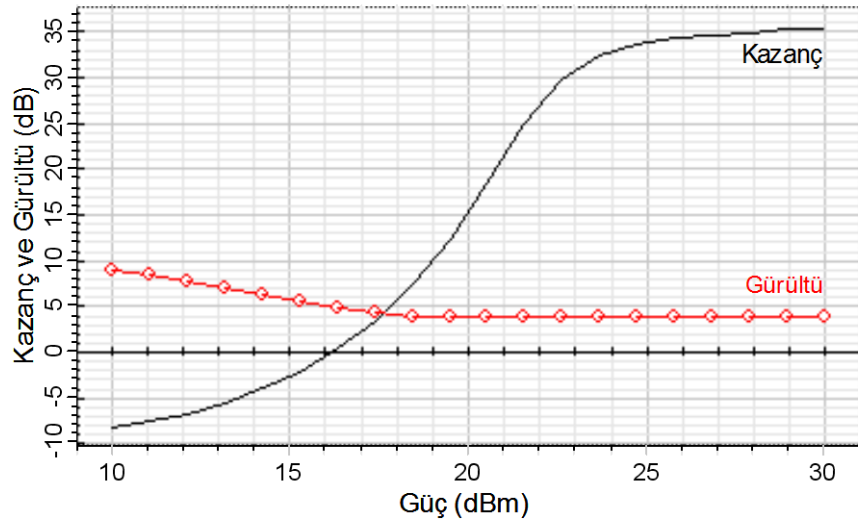


Şekil 6.9 YDFA’nın kazanç ve gürültüsünün girişteki işaret kaynağının gücüne göre değişimi

Kazancın doyuma ulaşmasından dolayı, giriş işaret gücünün sürekli artmasıyla kazancın azaldığı ve 0 dBm giriş gücüne ulaşıldığında 12 dB'ye düştüğü görülmektedir. Diğer yandan gürültü yaklaşık 4 dB'nin altında değerler almakta ve girişteki işaret gücünün yaklaşık -3 dBm olmasına kadar neredeyse sabit kalmaktadır. Girişteki işaret gücünün -3 dBm'e ulaşmasından sonra, gürültü 4 dB'yi az da olsa geçmektedir. Kazanç ve gürültü değerleri göz önüne alındığında, -40 dBm ile -10 dBm aralığındaki giriş gücünün bu sistem için en iyi kazanç – gürültü performansını verdiği izlenmektedir.

EDFA ile karşılaştırıldığında YDFA'nın aynı koşullar altında daha düşük kazanç değerlerine ulaştığı görülmektedir. Gürültü bakımından karşılaştırıldığında, her iki kuvvetlendiricinin birbirine çok yakın performansa sahip olduğu izlenmektedir.

Pompa lazer gücünün iterbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici çıkışındaki kazanç ve gürültüye etkisinin analiz edilmesi amacıyla, YDFA düzeneğindeki pompa lazerin gücü 10 dBm ile 30 dBm aralığında artırılmıştır. Yapılan simülasyonun sonucu olarak kazanç ve gürültünün güce göre değişimi Şekil 6.10'da yer almaktadır.



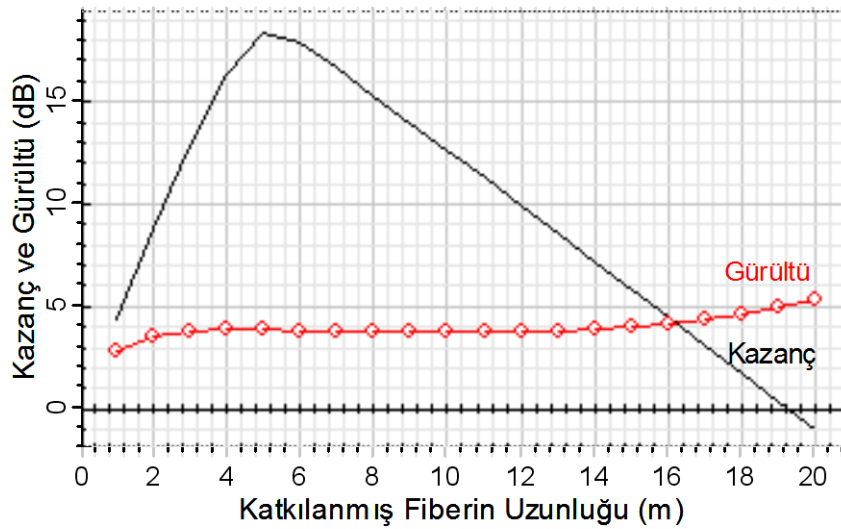
Şekil 6.10 YDFA'nın kazanç ve gürültüsünün pompa lazer gücüne göre değişimi

Pompa lazer gücünün 10 dBm ile 30 dBm aralığında artırılmasıyla birlikte, kuvvetlendiricideki iterbiyum iyon evirtiminin artmasıyla kazanç bir süre hızlı bir şekilde artmakta ve daha sonra ise bu artış yavaşlamaktadır. Pompa lazer gücü 10 dBm iken, YDFA'da iyon evirtimi için yeterli güç sağlanmadığından kazanç değeri -10 dB ve gürültü değeri ise yaklaşık 10 dB civarındadır. Bu sonuçlar benzer koşullar altında çalışan EDFA'dan elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında, YDFA'nın aynı pompa lazer gücünde daha kötü kazanç-gürültü performansına sahip olduğu görülür. Pompa

lazer gücünün artmasıyla gürültü de azalmakta ve pompa lazer gücünün 20 dB ile 30 dB olduğu aralıkta, gürültü teorik sınır olan 3 dB'ye en yakın değerleri almaktadır. Kazanç ve gürültü değerleri göz önüne alındığında, 25 dBm ile 30 dBm aralığındaki giriş gücünün bu sistem için en iyi kazanç – gürültü performansını verdiği izlenmektedir. Bu aralıkta YDFA 35 dB kazanç değerini alarak maksimum noktaya ulaşmış olur.

EDFA ile karşılaştırıldığında aynı pompa gücünde, YDFA'nın kazancı daha düşüktür. YDFA'lar için 3.2 Bölümü'nde de belirtildiği gibi, 975 nm dalgaboyunda pompalama ve 1030 nm dalgaboyunda kuvvetlendirme yapılırsa kazanç daha fazla olur, çünkü 975 nm'deki soğurma kesit alanı çok fazladır. Üst seviye yoğunluğu yaklaşık olarak % 50 de sabit tutulur. Burada kazancı düşüren 1030 nm'deki ASE olur ki, bu seviyedeki ASE değeri, 975 nm'dekine göre çok daha düşüktür. YDFA'da ASE değerinin daha etkin olması, kazancın EDFA'dan düşük olarak seyretmesinde etkindir. Diğer etken ise YDFA'nın iyon evirtimi için daha yüksek pompa gücüne ihtiyaç duymasıdır. Her iki düzeneğin grafiği karşılaştırıldığında, aynı kazanca EDFA çok daha düşük pompa lazer gücünde ulaşır. Bu da YDFA'nın iyon evirtimi için daha fazla pompa lazer gücüne ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.

İterbiyum katkılı fiberin uzunluğunun, YDFA'nın kazanç ve gürültüsü üzerindeki etkisinin incelenmesi için YDFA düzeneğindeki katkılanmış fiberin boyu 0.1 m ile 20 m aralığında artırılmıştır. Şekil 6.11, katkılanmış fiber uzunluğunun artırılmasının kuvvetlendiricinin kazanç ve gürültüsüne etkisini göstermektedir.



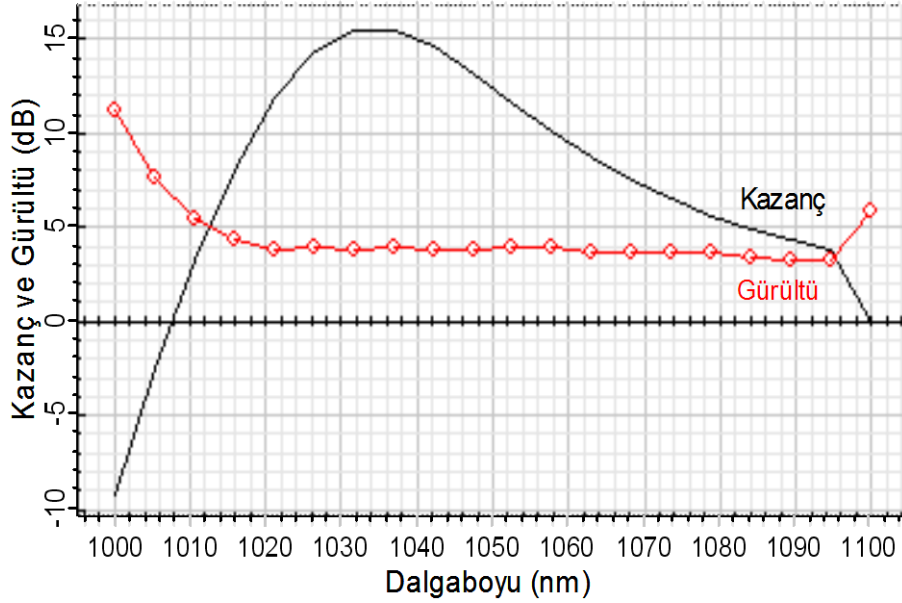
Şekil 6.11 YDFA'nın kazanç ve gürültüsünün katkılanmış fiberin uzunluğuna göre değişimi

YDFA sisteminde, katkılanmış fiber uzunluğunu değiştirilmesi ile kazanç 5 m uzunluğa kadar hızla artmakta ve 5 m'de maksimum değere ulaşmaktadır. İterbiyum katkılı fiberin uzunluğu 5 m'yi geçtiğinde ise kazanç değeri doğrusal olarak azalmaktadır. Tasarlanan bu sistem için optimum fiber uzunluğunun 5 m olduğu görülmektedir. Kazancın 5 m uzunluktan sonra azalmaya başlamasının nedeni ise, kuvvetlendiricinin optimum uzaklık olan 5 m uzunluğundan sonrasının pompalanamaması ve 1030 nm'de oluşan ASE etkisiyle kuvvetlendirilmiş sinyalin soğrulmasıdır. Sistemdeki gürültü yaklaşık 5 m fiber uzunluğu civarına kadar artarak yaklaşık 4 dB'ye ulaştıktan sonra yaklaşık 15 m uzunluğa kadar sabit kalmış ve bu uzunluktan sonra tekrar artmaya başlamıştır.

EDFA ile karşılaştırıldığında, benzer çalışma koşulları altında aynı katkılanmış fiber uzunluğunda EDFA'nın kazancının daha iyi olduğu görülmektedir. Bu durumun ortaya çıkmasına başta her iki sistemin soğurma ve emisyon spektrumları neden olmaktadır. Ortaya çıkan ASE etkisinin YDFA'da daha çok kendini göstermesi, kazancın hızlı bir şekilde düşmesine sebep olmaktadır. Bunun yanı sıra aynı pompa gücünde EDFA'nın iyon evirtim miktarının daha yüksek oranda olması da diğer bir etkidir.

YDFA'nın 975 nm ve 1030 nm çalışma dalgaboylarında çalıştırılabildiğinden, fakat 975 nm dalgaboyunda kuvvetlendirici cevabının çok dar bir bantta gerçekleştiği için pratikte kullanılamadığından 3.3 Bölümü'nde bahsedilmiştir. Bu nedenle, YDFA'nın girişindeki işaretin çalışma dalgaboyu, kuvvetlendiricinin kazanç ve gürültüsü üzerine etkilerinin incelenmesi amacıyla, 1000 nm ile 1100 nm aralığında artırılmıştır. Böylece kuvvetlendiricinin 1030 nm civarındaki performansı izlenmiştir. Kuvvetlendiricinin farklı çalışma dalgaboylarına verdiği yanıtların gözlendiği bu sistemde, kazanç ve gürültü değişimi Şekil 6.12'de verilmiştir.

Pompa lazerin çalışma frekansı 980 nm'deyken, girişteki işaret kaynağının çalışma dalgaboyunun 1000 nm ile 1100 nm aralığında artırılmasıyla birlikte kazanç artarak 1030 nm dalgaboyu civarında yaklaşık 15 dB değer alarak maksimum değere ulaşmakta ve 10 nm'lik bir band genişliği boyunca bu değerini korumaktadır. 1040 nm dalgaboyundan sonra ise kazanç sürekli azalmaktadır. Gürültü ise başlangıçta 11 dB ile maksimum değerini alarak 1000 nm'de en kötü performansa ulaşmıştır. 1030 nm ve civarında ise gürültünün 4 dB civarında seyrettiği görülmektedir. 1095 nm civarında kazancın azalmasının hızlandığı ve gürültünün hızla arttığı görülmektedir.

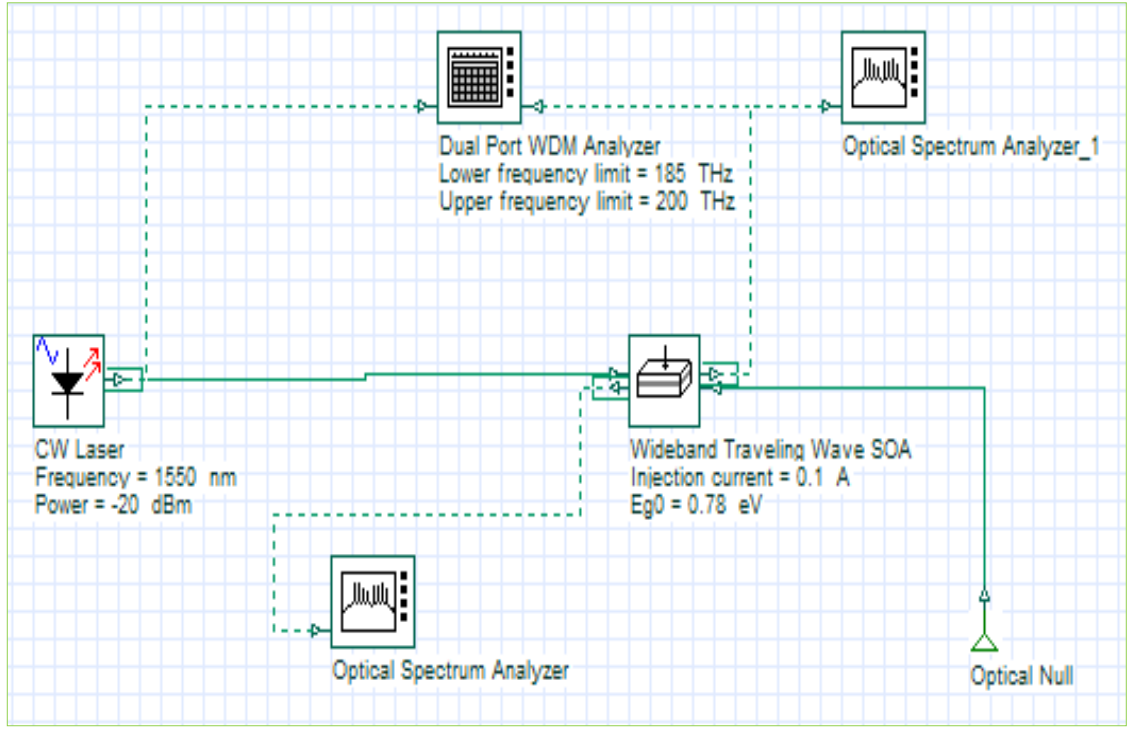


Şekil 6.12 YDFA'nın kazanç ve gürültüsünün işaret kaynağının dalgaboyuna göre değişimi

1550 nm'de çalışan EDFA ile 1030 nm'de çalışan YDFA, 980 nm'de çalışan pompa lazer ile pompalandığında, tüm durumlar göz önüne alındığında, EDFA'nın kazanç – gürültü performansının YDFA'dan daha iyi olduğu görülmektedir, çünkü EDFA'nın bu koşullar altında iyon evirtimi daha fazladır. Aynı zamanda üst seviyeye geçen iyonların ömürleri EDFA'da daha uzundur. Böylece daha güçlü kuvvetlendirme sağlanmaktadır. Diğer bir faktör olan ASE, her iki kuvvetlendiriciyi de etkilemekle birlikte, YDFA'da daha güçlü ortaya çıkmakta ve YDFA kazancının daha düşük olmasına neden olmaktadır. Tüm bu sonuçların 2. Bölüm ve 3. Bölüm'de verilen teorik bilgilerle uyumlu olduğu görülmektedir.

6.3 Yarıiletken Optik Kuvvetlendirici Tasarımı ve Kazanç – Gürültü Analizi

SOA'nın kazanç ve gürültü analizinin yapılması için OptiSystem 7.0 simülasyon programı ile Şekil 6.13'teki kuvvetlendirici düzeneği tasarlanmıştır. Bu düzenekte, 1550 nm çalışma dalgaboyunda ve -20 dBm gücünde sürekli bir giriş işaret kaynağı kullanılmıştır. Kazanç ve gürültü analizi yapılacak SOA için enjeksiyon akımı 0.1 A ve band aralığı, $E_g=0.78$ eV olarak seçilmiştir. Aynı zamanda, EDFA ve YDFA düzeneklerine benzer şekilde, yapılacak olan simülasyonların sonuçlarının gözlenebilmesi için SOA'nın giriş ve çıkışlarına iki kapılı WDM analizörü ve SOA'nın çıkışlarına ise optik spektrum analizörü bağlanmıştır.

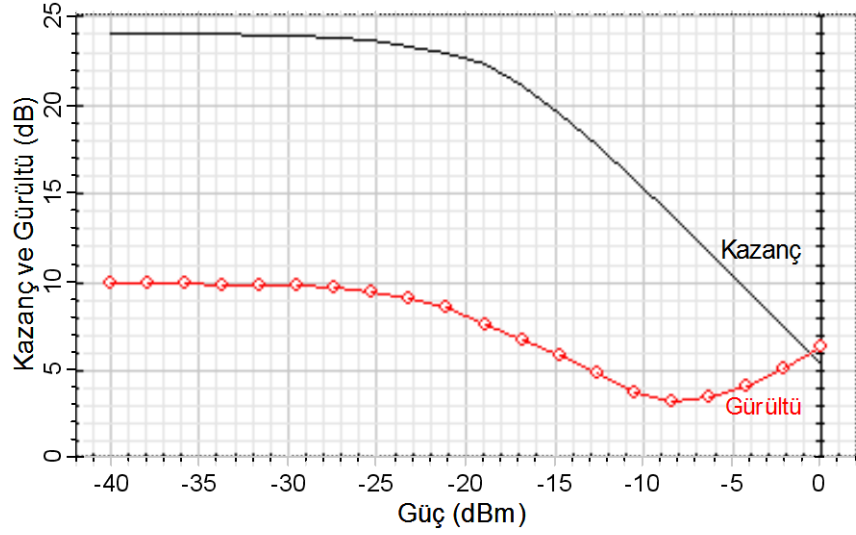


Şekil 6.13 Tasarlanan SOA düzeneği

SOA'nın kazanç ve gürültü analizi için tasarlanan kuvvetlendirici düzeneğinde, sistem tasarım parametrelerinden bazılarının değerleri değiştirilerek simülasyonlar yapılmış, bu parametrelerin kazanç ve gürültü üzerine etkileri değerlendirilmiştir. Düzenekte, diğer bileşen değerleri sabit tutularak sırasıyla işaret kaynağının gücü, işaret kaynağının dalga boyu ve enjeksiyon akımı belirlenen değerler aralığındaki 20 eşit iterasyonla değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, 4. Bölüm'de anlatılan teorik bilgiler ışığında yorumlanarak analiz edilmiştir.

Tasarlanan SOA düzeneğinde, işaret kaynağının gücünün -40 dBm ile 0 dBm arasında artırılmasıyla, kuvvetlendirici çıkışında izlenen kazanç ve gürültü değişimi Şekil 6.14'te görülmektedir.

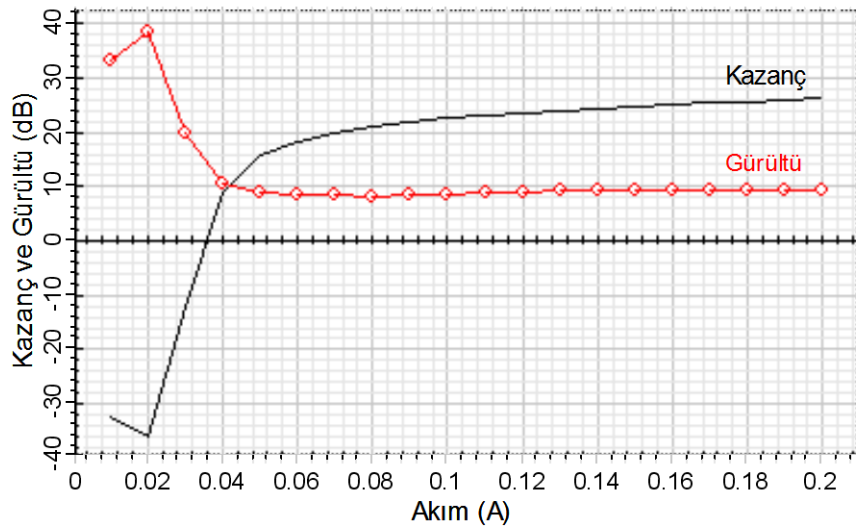
SOA tasarımında, girişteki işaret kaynağının gücünün -40 dBm ile 0 dBm arasında değiştirilmesiyle, kazanç, doyuma ulaştığı için bir süre sabit kalmakta ve daha sonra azalmaya başlamaktadır, gürültü ise bir süre sabit kalmaktadır. Giriş işaretinin gücü, yaklaşık olarak -8 dBm civarına ulaştığında ise gürültü en düşük değerini alarak 3 dB'ye düşmektedir. Bu noktadaki kazanç değeri ise 13 dB civarındadır. Daha sonra ise gürültü değeri tekrar yükselmeye başlamaktadır. Bu tasarım için kazanç ve gürültü değerleri göz önüne alındığında, giriş işaret gücünün -20 dBm ile -8 dBm olduğu aralıkta en iyi kazanç ve gürültü performansını gösterdiği söylenebilir.



Şekil 6.14 SOA'nın kazanç ve gürültüsünün girişteki işaret kaynağının gücüne göre değişimi

EDFA ve YDFA ile karşılaştırıldığında, benzer koşullar altında kazanç değerinin EDFA'dan küçük, ancak YDFA'dan daha yüksek olduğu görülmektedir. Gürültü fonksiyonları incelendiğinde ise SOA, EDFA ve YDFA'dan çok daha kötü bir gürültü performansı göstermektedir. SOA, çok dar bir band aralığında iyi bir kazanç ve gürültü performansına sahiptir ve bu özellik, SOA'yı kısıtlı uygulamalar için uygulanabilir kılmaktadır.

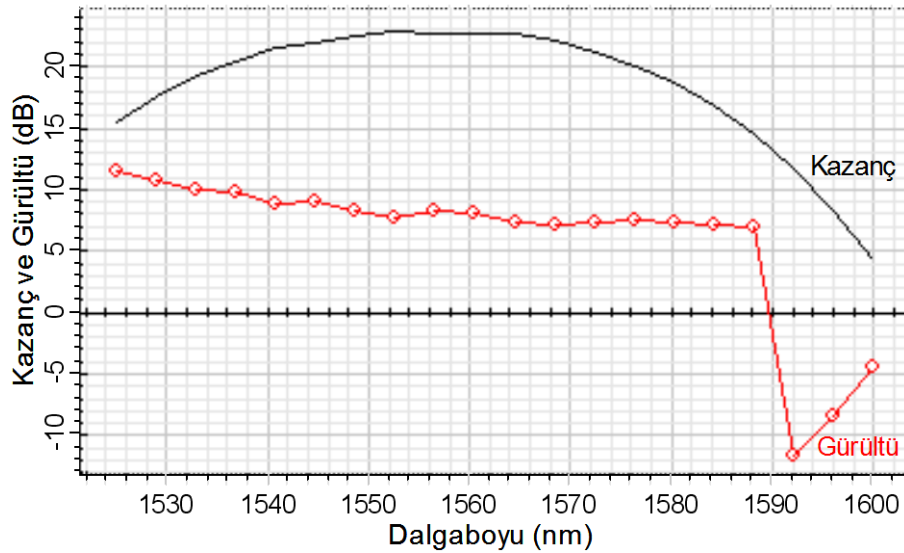
SOA'nın enjeksiyon akımı, 0 A ile 0.2 A aralığında artırılarak kuvvetlendirici çıkışındaki kazanç ve gürültü değişimi gözlenmiştir. Bu değişim, Şekil 6.15'te görülmektedir.



Şekil 6.15 SOA'nın kazanç ve gürültüsünün enjeksiyon akımına göre değişimi

4.1.1 Bölümü'nde, SOA'ların, düşük akımlardaki elektriksel pompalama ile kazanç sağladığı ve yapıldığı maddenin direkt band aralığından faydalandığı açıklanmıştır. Elektriksel pompalama, elektronları iletim bandına enjekte eder ve elektron-boşluk çifti belli bir değeri aştığında bir popülasyon evirtimi yaratır. Yapılan simülasyonda, kazanç 0.02 A'den sonra hızla artmakta, bu noktadan sonra popülasyon evirtimi başlamakta ve 0.06 A'den sonra kazancın artış hızı düşmektedir. Gürültünün değişiminin ise neredeyse kazanca simetrik olduğu ve 0.04 A'den sonra ortalama 9 dB'de seyrettiği görülmektedir. EDFA ve YDFA'daki pompa lazer gücüne benzer bir şekilde, SOA'nın enjeksiyon akımının artması kuvvetlendirici kazancını artırmaktadır.

SOA'nın girişindeki işaret kaynağının dalgaboyu, 1525 nm ile 1600 nm aralığında artırılarak kuvvetlendirici çıkışındaki kazanç ve gürültü değişimi incelenmiştir; bu değişim, Şekil 6.16'da yer almaktadır.



Şekil 6.16 SOA'nın kazanç ve gürültüsünün işaret kaynağının dalgaboyuna göre değişimi

SOA düzeneğinde, girişteki işaret kaynağının çalışma frekansının 1525 nm ile 1600 nm aralığında artırılmasıyla kazanç, artarak 1550 nm bandında 23 dB'ye ulaşmakta ve maksimum değerini almaktadır. Bu değer, yaklaşık 1570 nm'ye kadar olan 20 nm'lik bir band boyunca korunmakta ve daha sonra kazanç azalmaya başlamaktadır. Bununla birlikte, gürültü, 12 dB'den başlayarak genel olarak azalan bir davranış göstermektedir ve kazancın düzleştiği 1550 – 1570 nm bandında ortalama 7 dB değerini almaktadır. Gürültü, 1590 nm civarında minimum değeri almış ve daha sonra tekrar artmıştır.

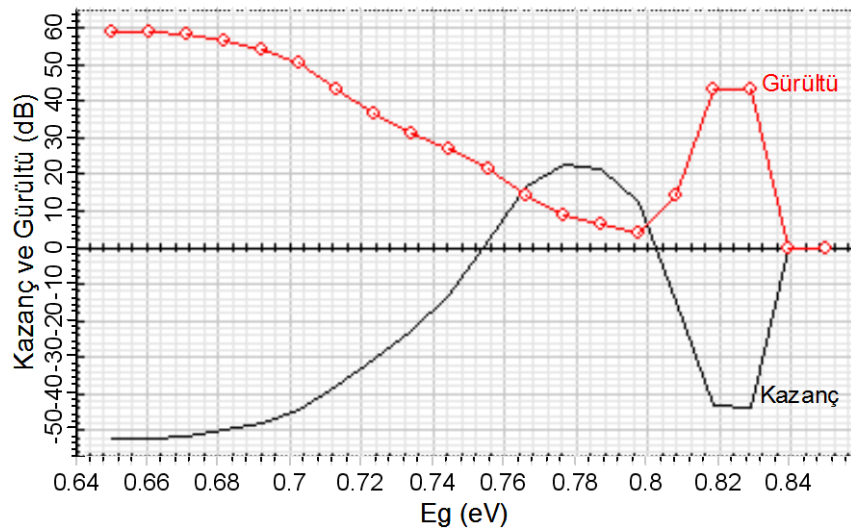
4.1.1 Bölümü'nde, normal koşullar altında maksimum kazancın, band aralığı olan E_g 'ye yaklaşıldığında oluştuğuna değinilmiştir. SOA, dalgaboyu,

$$\lambda = hc / E_g \quad (6.1)$$

civarında olduğunda kuvvetlendirme sağlar. Bu uygulama da kullanılan SOA'nın band genişliği yaklaşık 0.78 eV'tur. Bu değer, (6.1) eşitliğinde yerine yazıldığında dalgaboyu, yaklaşık olarak 1580 nm olarak bulunur. Yapılan uygulamada kullanılan dalgaboyu 1550 nm, hesaplama sonucunda çıkan 1580 nm'e yakın olduğundan, SOA'da 1550 – 1570 nm arası yüksek kuvvetlendirme sağlanmaktadır. Aynı çalışma dalgaboyunda benzer koşullarda simülasyonu yapılan EDFA ile karşılaştırıldığında ise, SOA'nın daha kötü bir kazanç ve gürültü performansına sahip olduğu görülmektedir.

Telekomünikasyon uygulamaları için 1.300 – 1.600 nm dalgaboyu aralığı önemlidir, çünkü bu aralıkta silika fiberdeki dispersiyon ve kayıplar, 850 nm bölgesindekine kıyasla oldukça düşüktür. Bu nedenle, tasarlanan SOA sisteminde giriş işaretinin dalgaboyu, 1550 nm olarak seçilmiştir. Böylece diğer kuvvetlendiricilerle performans karşılaştırması yapmanın kolaylaşması sağlanmıştır.

Giriş işaretinin çalışma frekansı, 1550 nm iken, SOA'nın band aralığı olan E_g 'nin değeri 0,65 eV ile 0,85 eV aralığında artırılarak bu değişimin, kuvvetlendirici kazanç ve gürültüsüne etkisi incelenmiştir. Kazanç ve gürültünün değişimi Şekil 6.17'de verilmiştir.



Şekil 6.17 SOA'nın kazanç ve gürültüsünün band aralığına göre değişimi

SOA'nın band aralığının 0,65 eV ile 0,85 eV arasında artırılması sonucu, kazanç ve gürültü fonksiyonlarının bir önceki simülasyonunun sonuçlarını destekler nitelikte olduğu görülmektedir. Başlangıçta, kazanç, neredeyse yokken gürültü, 60 dB civarında seyretmektedir. Band aralığı, 0,78 eV'ye yaklaştıkça, kazanç artmakta ve gürültü azalmaktadır. Band aralığı 0,78 eV olduğunda kazanç, 22 dB civarına ulaşarak maksimum değerini almakta ve gürültü de 8 dB civarına ulaşarak minimuma yakın bir seviyeye gelmektedir. 0,78 eV band aralığından sonra ise kazanç azalmakta ve gürültü tekrar artmaktadır. Kazanç ve gürültünün bu şekilde davranış göstermesinin nedeni, bir önceki uygulama da bahsedildiği gibi maksimum kazancın, band aralığı olan E_g 'ye yaklaşıldığında oluşmasıdır. Çalışma dalgaboyu 1550 nm olduğundan, kazancın 0.78 eV band aralığına doğru artması ve maksimum değerine ulaşması, beklenen bir davranıştır.

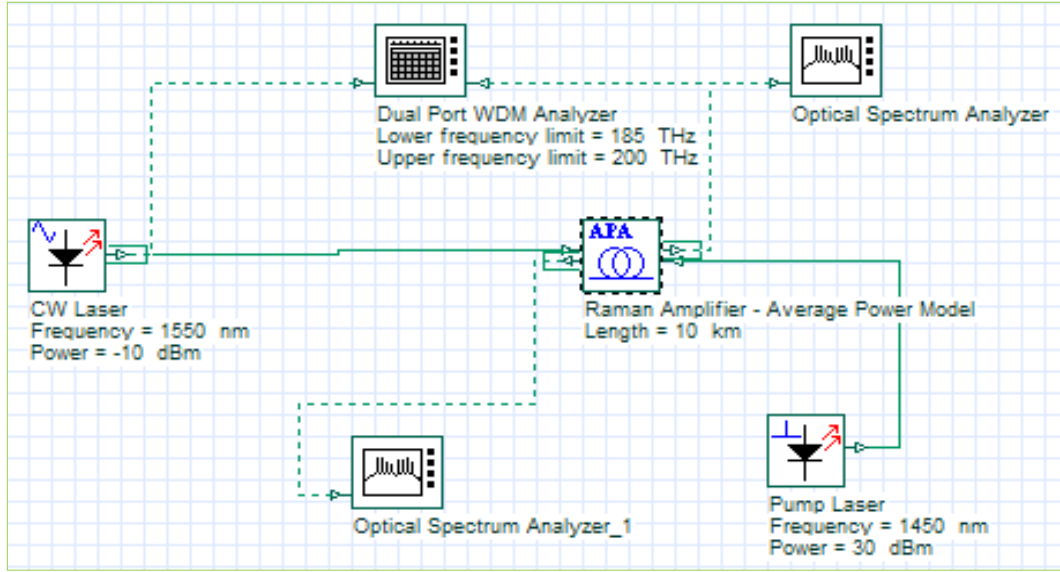
Daha önce yapılan EDFA ve YDFA uygulamaları göz önüne alındığında, SOA'nın, kazanç bakımından EDFA'dan daha düşük, YDFA'dan ise daha yüksek performansa sahip olduğu görülmektedir. Gürültü bakımından incelendiğinde ise, SOA diğer iki kuvvetlendiriciden de daha kötü performansa sahiptir.

SOA'nın yapılan tüm uygulamalarda yüksek gürültü değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Optik sınırlandırma zayıf olduğu için aktif bölgede sinyalin bir kısmının kayıplı olan kılıf bölgesine sızması bunun bir nedeni olarak gösterilebilir. Diğer bir neden de kuvvetlendiricide oluşan ASE'den dolayı oluşan gürültüdür. ASE gürültüsü de kuvvetlendirici çıkışındaki gücü zayıflatmaktadır.

6.4 Raman Fiber Kuvvetlendirici Tasarımı ve Kazanç – Gürültü Analizi

Raman fiber kuvvetlendiricinin kazanç ve gürültü analizinin yapılması amacıyla OptiSystem 7.0 simülasyon programında Şekil 6.18'deki kuvvetlendirici düzeneği tasarlanmıştır. Kazanç ve gürültü analizi yapılacak Raman kuvvetlendirici için bu düzende, 1550 nm çalışma dalgaboyunda ve -10 dBm gücünde sürekli bir giriş işaret kaynağı kullanılmıştır. Raman kuvvetlendirmesi oluşturulacak fiberin uzunluğu ise 10 km olarak seçilmiştir. 10 km uzunluğundaki bu fibere geri yönde pompalama uygulanmıştır. Bu amaçla kullanılan pompa lazerin çalışma dalgaboyu 1450 nm ve gücü ise 30 dBm olarak seçilmiştir. Aynı zamanda, EDFA ve YDFA düzeneklerine benzer şekilde, yapılacak olan simülasyonların sonuçlarının gözlenebilmesi için Raman fiber

kuvvetlendiricinin giriş ve çıkışlarına iki kapılı WDM analizörü, Raman kuvvetlendiricinin çıkışlarına ise optik spektrum analizörü bağlanmıştır.



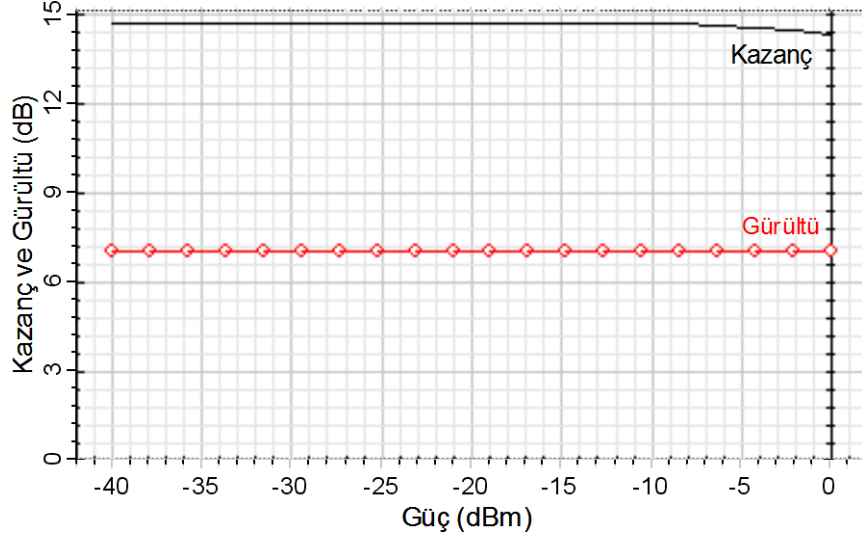
Şekil 6.18 Tasarlanan Raman fiber kuvvetlendirici düzeneği

Tasarlanan düzende, Raman fiber kuvvetlendiricinin, kazanç ve gürültü analizi için sistem tasarım parametrelerinden bazılarının değerleri değiştirilerek simülasyonlar yapılmış, bu parametrelerin kazanç ve gürültü üzerine etkileri değerlendirilmiştir. Düzende, diğer bileşen değerleri sabit tutularak sırasıyla işaret kaynağının gücü, pompa lazerin gücü, pompa lazerin frekansı, Raman kuvvetlendirmesinde kullanılan fiberin uzunluğu ve işaret kaynağı ile pompa lazerin çalışma frekansları belirlenen değerler aralığındaki 20 eşit iterasyonla değiştirilmiştir. 5. Bölüm’de anlatılan teorik bilgiler dikkate alınarak yapılan simülasyonlar ile ileri yönde ve geri yönde pompalama yapmanın Raman fiber kuvvetlendiricinin kazancı ve gürültüsü üzerine etkileri de incelenmiştir.

Raman fiber kuvvetlendirici girişindeki işaretin gücü -40 dBm ile 0 dBm aralığında artırılarak yapılan simülasyon ile kuvvetlendirici çıkışındaki kazanç ve gürültünün değişimi incelenmiştir. Simülasyon sonucu elde edilen kazanç ve gürültü değişimi, Şekil 6.19’da verilmiştir.

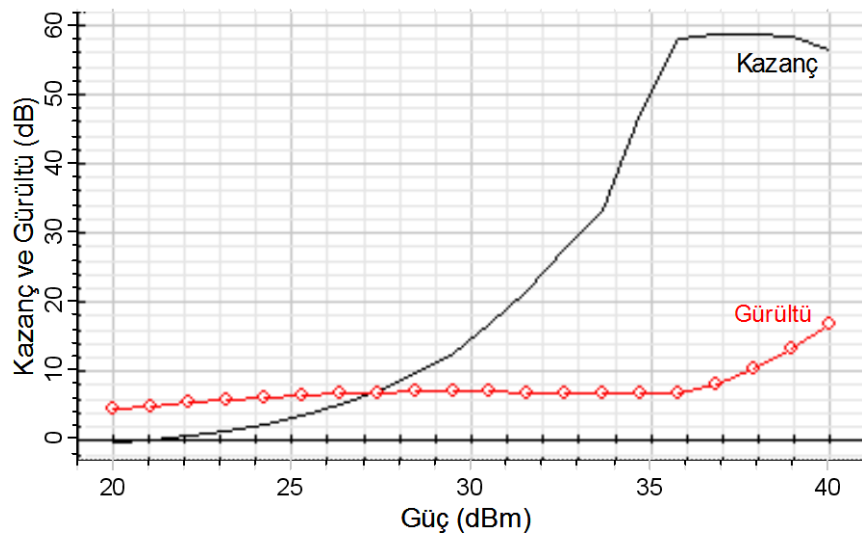
Raman fiber kuvvetlendirici girişindeki işaret kaynağının gücünün -40 dBm ile 0 dBm aralığında artırıldığında, kuvvetlendirici kazancı ortalama 14 dB civarında seyretmektedir. Gürültü ise sabit kalmakta ve yaklaşık 7.5 dB civarındadır. Bir süre sonra kazancın doyuma ulaşması nedeniyle küçük bir miktar azaldığı görülmektedir.

Pompa lazer gücü değişmediğinden kazançta herhangi bir artış söz konusu değildir. EDFA, YDFA ve SOA ile karşılaştırıldığında, çok uzun mesafede yüksek kazanç değerine ulaştığı söylenebilir.



Şekil 6.19 Raman fiber kuvvetlendiricinin kazanç ve gürültüsünün girişteki işaret kaynağının gücüne göre değişimi

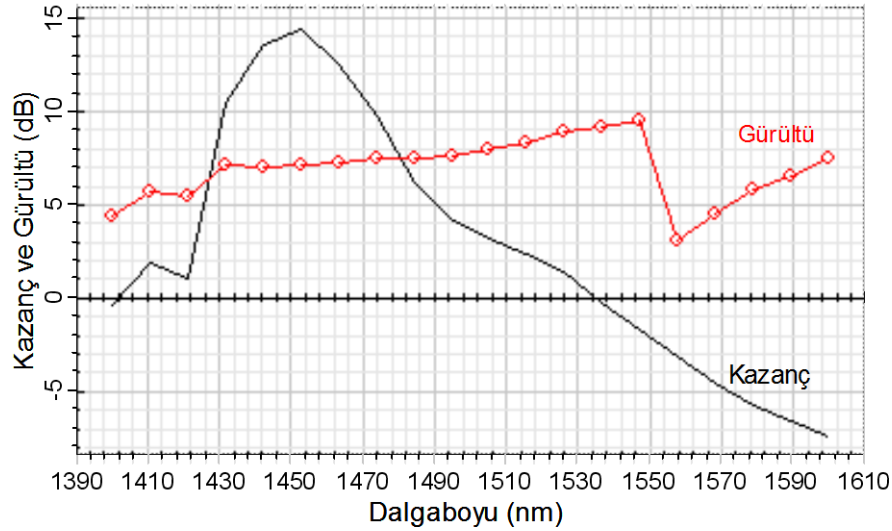
Raman etkisi uzun mesafelerde kendini gösterdiğinden, pompa gücü çok önemlidir. Pompa lazer gücünün Raman fiber kuvvetlendirici çıkışındaki kazanç ve gürültüye etkisinin incelenmesi için Raman fiber kuvvetlendirici düzeneğindeki pompa lazerin gücü 20 dBm ile 40 dBm aralığında artırılmıştır. Yapılan simülasyon sonucu, kazanç ve gürültünün değişimi Şekil 6.20’de görülmektedir.



Şekil 6.20 Raman fiber kuvvetlendiricinin kazanç ve gürültüsünün pompa lazer gücüne göre değişimi

5.3 Bölümü'nde de değinildiği gibi, kuvvetlendiricide kullanılan fiberin boyu 10 km'den küçükse, ileri yönde, geri yönde veya her iki yönde pompalamanın kazanca herhangi farklı bir etkisi yoktur. Bu uygulamada, geri yönde ve giriş işaret sinyaliyle aynı polarizasyonda pompalama yapılmaktadır. 10 km uzunluğunda Raman fiber kuvvetlendirici, geri yönde pompalanmaktadır. Pompa lazerin gücü, 20 dBm ile 40 dBm aralığında değiştirildiğinde, kazanç başlangıçta yaklaşık 0 dB civarındadır. Gürültü ise 5 dB civarında seyretmektedir. Bunun nedeni, 20 dBm pompa gücünün SRS etkisini başlatmak için yetersiz kalmasıdır. Bu nedenle, başlangıçta kendiliğinden oluşan Raman saçılımının etkisi görülmekte ve buna bağlı olarak ASE'den dolayı oluşan gürültü kendini göstermektedir. Pompa gücü arttıkça fiber içerisinde SRS etkisi oluşmakta ve kazanç artmaktadır. Pompa gücü yaklaşık 36 dBm değerine ulaştığında, kazanç yaklaşık 58 dB'dir ve bu maksimum seviyedir. Artan SRS etkisi aynı zamanda ASE gücünü de kuvvetlendirdiğinden gürültü de hızla artmaktadır. Gürültü artışı hız kazandıktan sonra kazancın artması durmakta ve kazanç 38 dBm pompa lazer gücünden sonra azalmaya başlamaktadır.

Raman kuvvetlendiricilerde kullanılan fiberin boyu EDFA, YDFA ve SOA'ya göre çok daha fazla olduğundan, bu uzunlukta SRS etkisini ortaya çıkartabilmek için çok daha güçlü pompa lazerlerin kullanılması gerekmektedir.



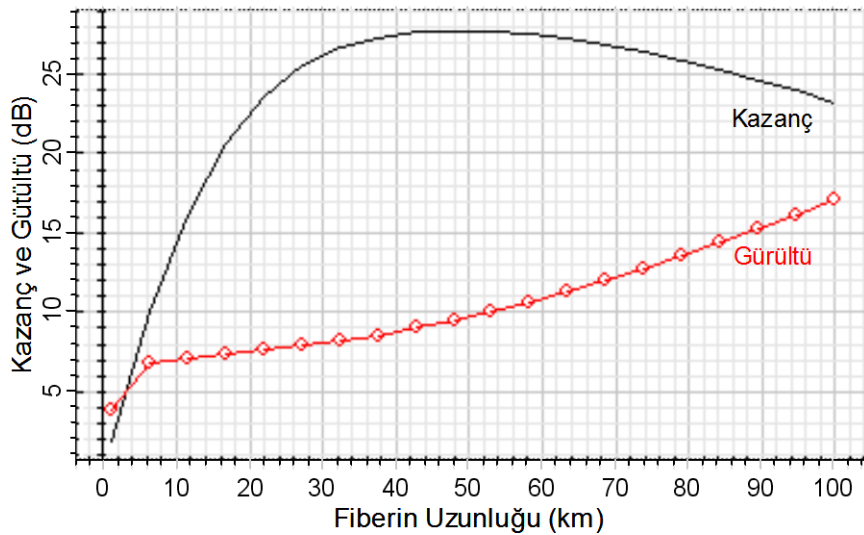
Şekil 6.21 Raman fiber kuvvetlendiricinin kazanç ve gürültüsünün pompa lazerin dalgaboyuna göre değişimi

Raman kuvvetlendiriciden maksimum kazanç elde edilebilmesi için, girişteki işaret kaynağının dalgaboyu, pompa lazerin dalgaboyundan 100 nm daha fazla olmalıdır.

Aynı zamanda giriş işareti ile pompa lazer aynı polarizasyonda olmalıdır. 1550 nm dalgaboyunda çalışan ve geri yönde aynı polarizasyonla pompalanan Raman fiber kuvvetlendiricide, pompa lazerin dalgaboyu 1400 nm ile 1500 nm aralığında artırılmıştır. Bunun sonucu olarak kuvvetlendirici çıkışındaki kazanç ve gürültü değişimi, Şekil 6.21'deki gibi olmuştur.

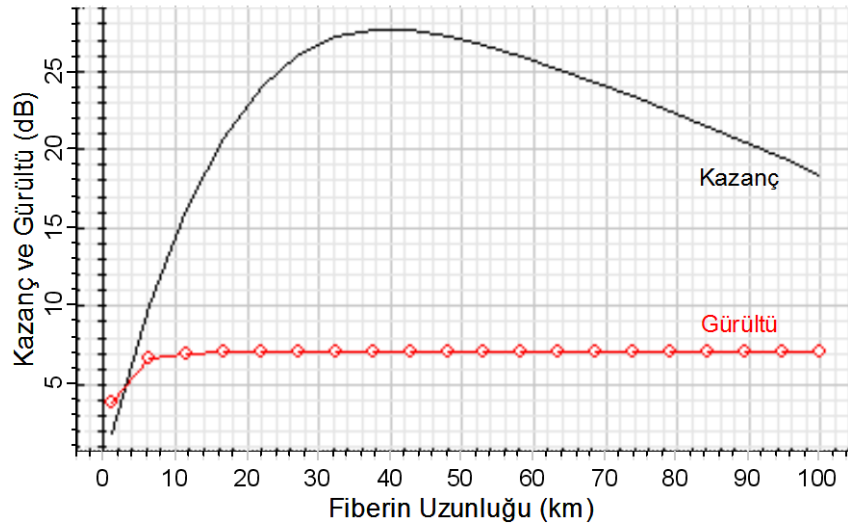
Pompa lazerin dalgaboyu 1400 nm ile 1500 nm aralığında artırıldığında kazanç artarak 1450 nm'de 14 dB'ye ulaşmakta ve daha sonra kazanç değeri azalmaktadır. Gürültü ise neredeyse sürekli artan bir davranış göstermekte ve 1450 nm'de 7 dB olmaktadır. 1560 nm civarında ise minimum değerini alarak tekrar yükselen bir davranış göstermektedir. 5.2 Bölümü'nde değinilen bilgiler göz önüne alındığında, aynı polarizasyona sahip giriş işareti ve pompa lazer arasındaki dalgaboyu farkı 100 nm olduğu zaman maksimum kazancın elde edileceği ispat edilmektedir. Pompa lazeriyle giriş işaret kaynağının dalgaboyu arasındaki fark 100 nm olduğunda, oluşan kuvvetlendirilmiş Stokes saçılımı nedeniyle kazanç maksimum olmaktadır. Aynı zamanda kısa dalgaboylu pompa sinyalleri, uzun dalgaboylu işaret sinyallerine güç aktarmaktadır. Bu aktarma, SRS etkisiyle kuvvetlendirmenin yanı sıra ASE gürültüsünü de meydana getirmektedir.

Geri yönde pompalanan Raman fiber kuvvetlendiricide kullanılan fiberin uzunluğu, 0.1 km ile 100 km aralığında artırılmış ve kuvvetlendirici çıkışındaki kazanç ve gürültü değişimi izlenmiştir. Bu değişim, Şekil 6.22'de görülmektedir.



Şekil 6.22 Geri yönde pompalanan Raman fiber kuvvetlendiricinin kazanç ve gürültüsünün fiber uzunluğuna göre değişimi

Fiber uzunluğunun 0.1 km ile 100 km aralığında değiştirilmesiyle kuvvetlendirici çıkışındaki kazanç 40 km uzunlukta yaklaşık olarak 29 dB ile maksimum değerine ulaşmaktadır. Fiberin 40 km ile 55 km uzunlukları arasında kazanç maksimum değerinde sabit kalmaktadır. Daha sonra ise artma hızından daha yavaş bir şekilde azalmaya başlamaktadır. Gürültü ise bütün fiber uzunluğu boyunca artan bir davranış sergilemektedir. Kazancın azalmaya başladığı noktadan itibaren gürültünün artışı hızlanmaktadır. Bu uygulamada, 100 km boyunca iyi kazanç değerleri elde edilmiş ve 100 km'ye ulaşıldığında bile kazanç sönümlenmemiştir. Bunun nedeni, yeterli pompa gücü ile geri pompalama yapılmış olmasıdır. Girişteki sinyal gücü ile kendiliğinden Raman saçılımı oluşmakta ve pompa gücünün ters yönde verilmesiyle fiberin geri kalan kısımlarında da SRS etkisi oluşturulmaktadır. Böylece çok uzun mesafelerde de kuvvetlendirme yapılabilmiştir. Aynı uygulama ileri yönde pompalandığında elde edilen kazanç ve gürültü performansı, Şekil 6.23'te yer almaktadır.



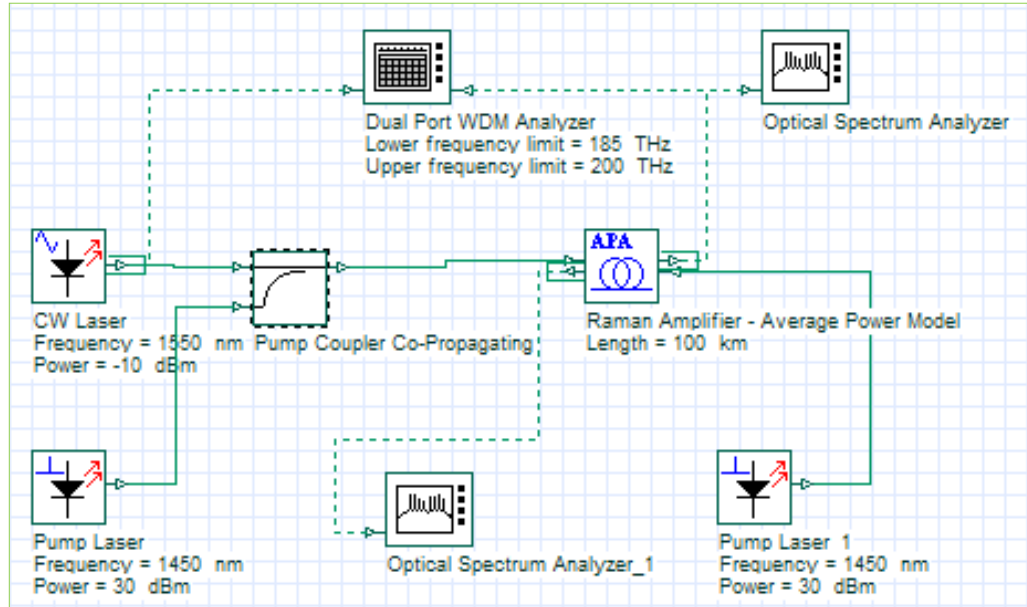
Şekil 6.23 İleri yönde pompalanan Raman fiber kuvvetlendiricinin kazanç ve gürültüsünün fiber uzunluğuna göre değişimi

Kuvvetlendirici ileri yönde pompalanırken, fiber uzunluğu 0.1 km ile 100 km aralığında değiştirilirken, fiber uzunluğunun 40 km olmasıyla kazanç maksimuma ulaşmış ve daha sonra tekrar azalmaya başlamıştır. Geri yönde pompalamayla karşılaştırıldığında, her iki sistemde de kazancın maksimum değeri aynıdır, ancak geri yönde pompalamada maksimum kazanç değeri yaklaşık 20 km boyunca aynı kalırken, ileri yönde pompalamanın uygulandığı sistemde sadece 5 km boyunca korunabilmiştir. Ayrıca ileri yönde pompalama yapıldığında, kazanç maksimum değerine ulaştıktan sonra geri yönde pompalanan sisteme göre daha yüksek hızla azalmaktadır. Gürültü performansına

bakıldığında ise, ileri yönde pompalanan sistemin daha düşük gürültüye sahip olduğu görülmektedir.

Elde edilen bu sonuçlardan uzun mesafede geri yönde pompalanan sistemin ileri yönde pompalanan sisteme göre daha iyi kazanç performansı gösterdiği ve ileri yönde pompalanan sistemin geri yönde pompalanan sisteme göre daha düşük gürültüye sahip olduğu belirlenmiştir.

Raman fiber kuvvetlendiricinin hem ileri, hem de geri yönde pompalanması amacıyla Şekil 6.24'teki düzenek kurulmuştur. Bu kuvvetlendirici tasarımında, bir önceki tasarımdan farklı olarak ileri yönde pompalamanın sağlanması için kuvvetlendirici girişinde optik kuplör kullanılmıştır. Kuvvetlendirici giriş ve çıkışında ise 1450 nm çalışma dalgaboyunda ve 30 dBm gücünde iki eşdeğer pompa lazer kullanılmıştır.

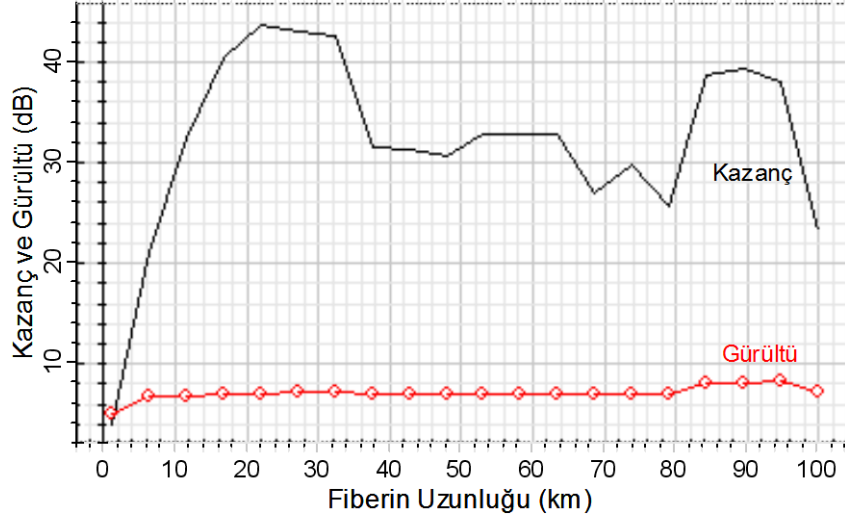


Şekil 6.24 Çift yönde pompalanan Raman fiber kuvvetlendirici tasarımı

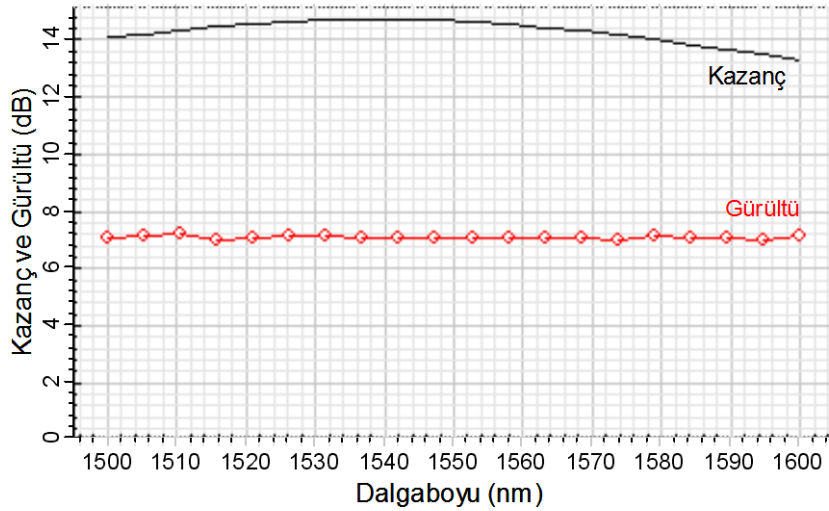
Şekil 6.24'teki tasarımda kullanılan fiberin uzunluğu 0.1 km ile 100 km aralığında artırılmış ve kuvvetlendirici çıkışındaki kazanç ve gürültü değişimi gözlenmiştir. Bu değişim Şekil 6.25'te görülmektedir.

Çift yönde pompalanan Raman fiber kuvvetlendiricinin kazancı 0.1 km ile 20 km arasında hızlı bir şekilde artmıştır. Daha sonra azalmaya başlamış ve 80 km uzaklığa kadar belirli bir aralıkta artıp azalmaya devam etmiştir. 80 km'den sonra ise tekrar hızla artmış ve sonra tekrar azalmıştır. Bu tasarımda kazancın maksimum değeri 21. km'de yaklaşık olarak 41 dB'dir. Kazancın, azaldığı yerlerde bile tek yönde pompalanan

fiberden ortalama olarak daha yüksek olduğu görülür. Bunun nedeni, her iki tarafta da pompalamanın etkisiyle etkin bir SRS etkisinin oluşması ve bir pompanın gücünün sönümlendiği yerde diğeri başladığı için fiberin diğeri ucuna doğru kazancın tekrar artmasıdır. Gürültü ise ortalama 8 dB civarında seyretmektedir. 100 km gibi yüksek uzaklıklarda çift yönde pompalamanın daha iyi kazanç performansı göstermesi, daha önce anlatılan teorik bilgileri doğrular niteliktedir.



şekil 6.25 çift yönde pompalanan Raman fiber kuvvetlendiricinin kazanç ve gürültüsünün fiber uzunluğuna göre değişimi

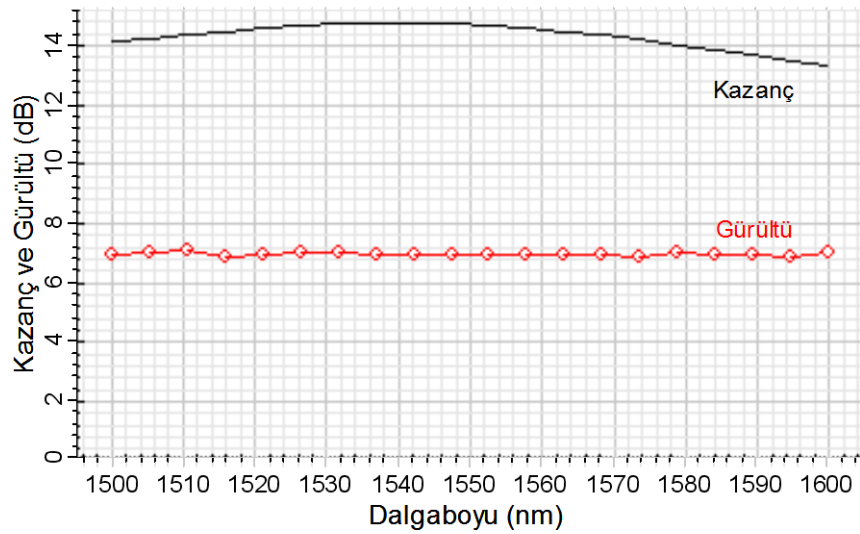


şekil 6.26 Geri yönde pompalanan Raman fiber kuvvetlendiricinin kazanç ve gürültüsünün girişteki işaret kaynağı ve pompa lazerin dalgaboyu farkına göre değişimi

5. Bölüm’de, Raman kuvvetlendiricilerde giriş işaret kaynağının çalışma dalgaboyuyla pompa lazerin çalışma dalgaboyu arasında 100 nm fark olduğuunda maksimum kazanca ulaşıldığı açıklanmıştı. Bunu göstermek amacıyla şekil 6.18’deki geri yönde

pompalanan 10 km uzunluğundaki Raman fiber kuvvetlendiricide, girişteki işaret kaynağının çalışma dalgaboyu 1500 nm ile 1600 nm aralığında artırılırken, aynı zamanda pompa lazerin dalgaboyu da 1400 nm ile 1500 nm aralığında artırılmıştır. Bunun sonucu olarak kuvvetlendirici çıkışındaki kazanç ve gürültünün değişimi Şekil 6.26’da verilmiştir.

Geri yönde pompalanan Raman fiber kuvvetlendiricide girişteki işaret kaynağının çalışma dalgaboyu 1500 nm ile 1600 nm aralığında artırılırken, aynı zamanda pompa lazerin dalgaboyu da 1400 nm ile 1500 nm aralığında artırıldığında, yani aradaki fark yaklaşık olarak sürekli 100 nm civarında tutulduğunda; kuvvetlendirici çıkışındaki kazancın 14 dB civarında olduğu görülür. Kazanç yaklaşık olarak sabit bir şekilde devam etmektedir. Aynı şekilde gürültü de 7 dB civarında sabit bir biçimde devam etmektedir. Bu sonuç, farklı frekanslarda aynı kazancın elde edilmek istendiği sistemlerde, pompa lazerin de 100 nm fark olacak şekilde değiştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Aynı uygulama, ileri yönde pompalama ile yapıldığında ise kazanç ve gürültünün değişimi Şekil 6.27’de görülmektedir.



Şekil 6.27 İleri yönde pompalanan Raman fiber kuvvetlendiricinin kazanç ve gürültüsünün girişteki işaret kaynağı ve pompa lazerin dalgaboyu farkına göre değişimi

Şekil 6.27’de kazanç ve gürültü değişimine bakıldığında, değişimin Şekil 6.26’daki değişim ile aynı olduğu görülmektedir. Bu uygulama ile geri yönde ve ileri yönde pompalamanın, 10 km gibi Raman saçılması ile kuvvetlendirme için kısa sayılabilecek uzunluklarda, aynı kazanç ve gürültü performansını verdiği sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu sonuç, 5.3 Bölümü’nde verilen bilgileri destekler niteliktedir.

Raman kuvvetlendiriciler, EDFA, YDFA ve SOA'dan farklı olarak giriş işaret kaynağının ve pompa lazerin frekans farkına bağılı olarak kuvvetlendirme yapmaktadır. Diğer optik kuvvetlendiricilerin aksine kilometrelerce uzunluklarda kuvvetlendirme yapmakta, yüksek kazanç değerlerine ulaşmakta ve diğer optik kuvvetlendiricilere kıyasla daha güçlü pompa kaynağına ihtiyaç duymaktadır.

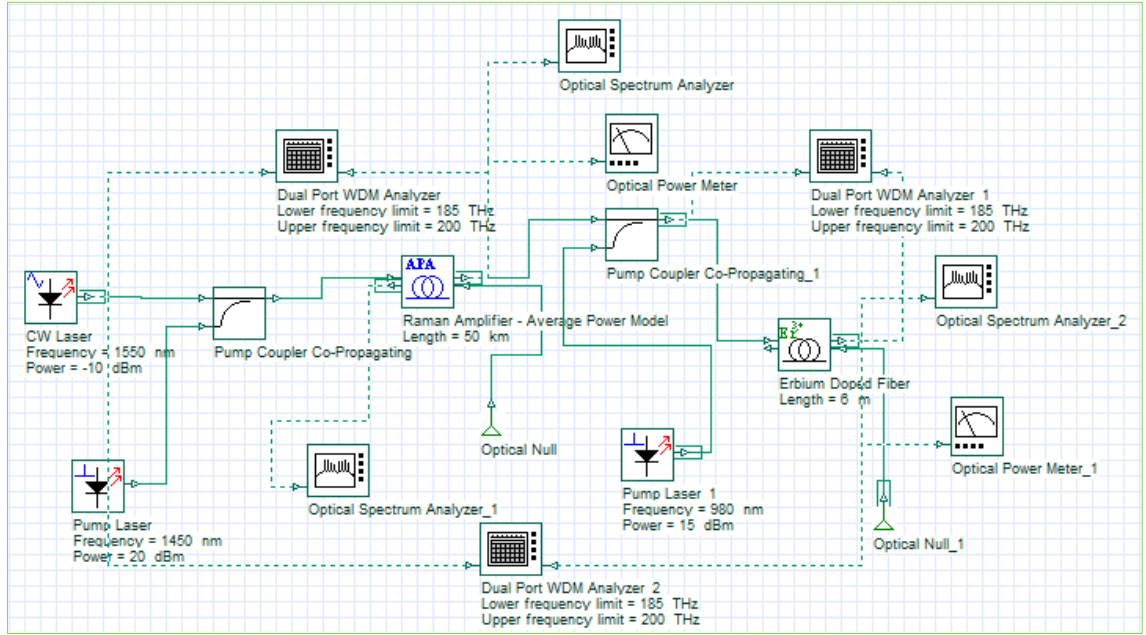
HİBRİD OPTİK KUVVETLENDİRİCİ TASARIMI

Bu bölümde, OptiSystem 7.0 simülasyon programı yardımıyla hibrid bir optik kuvvetlendirici sistemi tasarlanmıştır. Bu tasarımda, Raman fiber kuvvetlendiricinin sonuna EDFA eklenerek kuvvetlendirme yapılmıştır. Tasarımın amacı, uzun bir Raman fiber kuvvetlendirici boyunca düşük pompa ve giriş işaret gücü kullandıktan sonra, Raman fiber kuvvetlendiricinin çıkışında oluşan zayıf sinyali EDFA ile kuvvetlendirerek elde etmektir.

7.1 Hibrid Optik Kuvvetlendirici Düzeneği

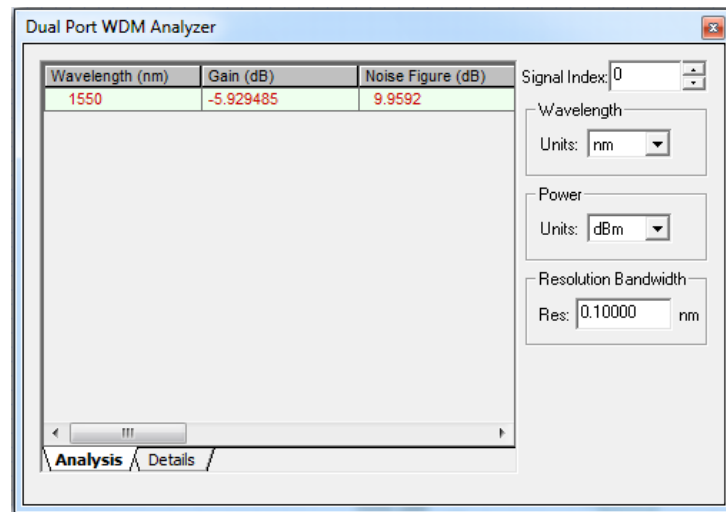
Hibrid optik kuvvetlendirici düzeneği tasarlanırken 6. Bölüm'deki kuvvetlendirici düzenekleri ve analizlerinden yararlanılmıştır. Yapılan tasarım ve analiz sonuçlarından yola çıkılarak uzun mesafade yüksek kazanç değerlerine ulaşan Raman kuvvetlendiricinin çıkışına YDFA ve SOA'ya göre benzer şartlarda en iyi kazanç değerlerine ulaştığı görülen EDFA eklenmiştir. Bu gözlemlere göre tasarlanan ve Şekil 7.1'de yer alan hibrid kuvvetlendirici düzeneğinde, 1550 nm çalışma dalgaboyunda ve -10 dBm gücünde sürekli bir giriş işaret kaynağı kullanılmıştır. Raman kuvvetlendirmesi oluşturulacak fiberin uzunluğu ise 50 km olarak seçilmiş ve fibere ileri yönde pompalama uygulanmıştır. İşaret ve pompa sinyalleri, bir kuplör yardımıyla Raman kuvvetlendirici girişine uygulanmıştır. Kullanılan pompa lazerin çalışma dalgaboyu 1450 nm ve gücü ise 20 dBm olarak seçilmiştir. Raman kuvvetlendirici çıkışına ise 6 m uzunluğunda EDFA eklenmiştir. Kuvvetlendirici çıkışındaki işaret ile pompa işareti bir kuplör kullanılarak EDFA'ya uygulanmıştır. EDFA'da kullanılan pompanın lazerin çalışma dalgaboyu 980 nm ve gücü ise 15 dBm olarak seçilmiştir. Yapılacak olan simülasyonun sonuçlarının izlenebilmesi amacıyla, Raman fiber

kuvvetlendirici ile EDFA'nın giriş ve çıkışlarına iki kapılı WDM analizörü, optik spektrum analizörü ve optik güç ölçer (Optical Power Meter) bağlanmıştır.



Şekil 7.1 Hibrid kuvvetlendirici düzeneği

Tasarlanan hibrid kuvvetlendirici Raman ve EDFA olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Hibrid kuvvetlendirici düzeneğinin girişinde olan 50 km'lik Raman fiber kuvvetlendiriciye 1550 nm'de çalışan -10 dBm'lik giriş sinyali ve 1450 nm'de çalışan 20 dBm'lik pompa lazeri uygulandığında, Raman fiber kuvvetlendirici çıkışındaki kazancın iki kapılı WDM analizörü ile -5.92 dB olarak ve gürültü faktörünün ise 9.95 dB olarak izlendiği Şekil 7.2'de görülmektedir.

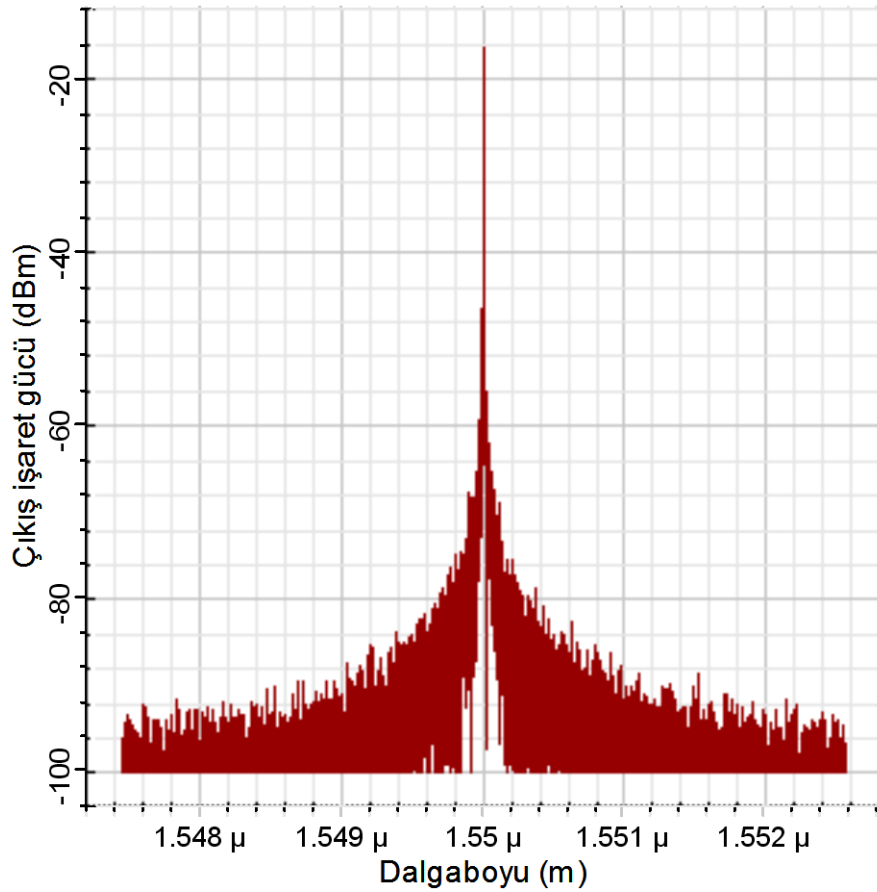


Şekil 7.2 Raman fiber kuvvetlendirici çıkışındaki kazanç ve gürültü faktörü

Şekil 7.3, Raman fiber kuvvetlendirici çıkışında optik güç ölçer ile gözlenen sinyal gücünü göstermektedir. -15.928 dBm olarak görülen bu işaret gücü, aynı zamanda EDFA'nın giriş işaret gücüdür. Şekil 7.4'te ise Raman fiber kuvvetlendirici çıkışındaki bu gücün dalgaboyuna göre değişim spektrumu, optik spektrum analizörü ile gözlenmiştir.



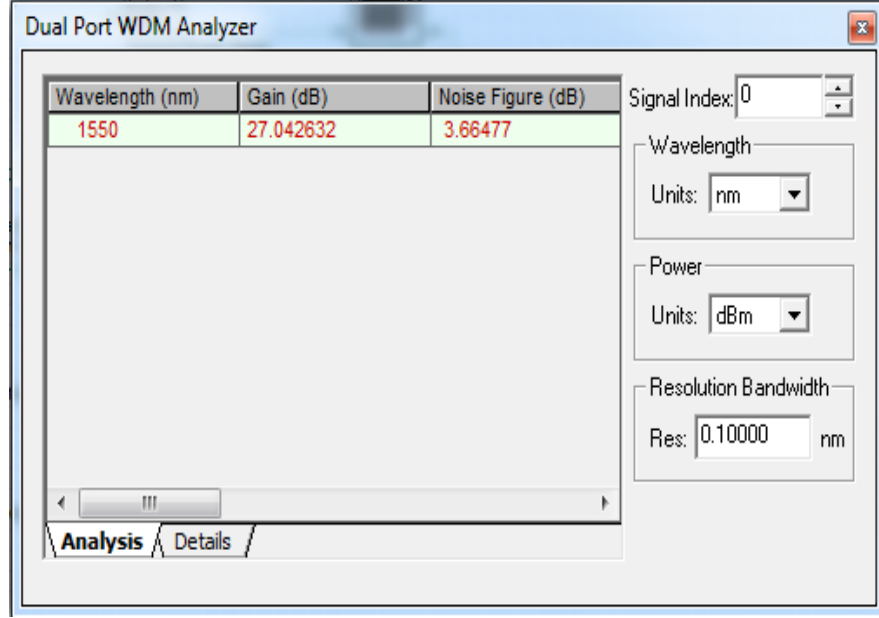
Şekil 7.3 Raman fiber kuvvetlendirici çıkışındaki işaretin gücü



Şekil 7.4 Raman fiber kuvvetlendirici çıkışındaki işaretin gücünün dalgaboyuna göre değişim spektrumu

Raman kuvvetlendiricinin çıkışındaki bu işaret 980 nm dalgaboyunda çalışan ve 15 dBm gücünde olan pompa lazer ile birlikte erbiyum katkılı fibere uygulanmıştır. Bunun

sonucu olarak, EDFA'nın çıkışında oluşan kazancın 27.04 dB ve gürültü faktörünün 3.66 dB olduğu görülmüştür. İki kapılı WDM analizörünün ölçüm sonuçları Şekil 7.5'te görülmektedir.



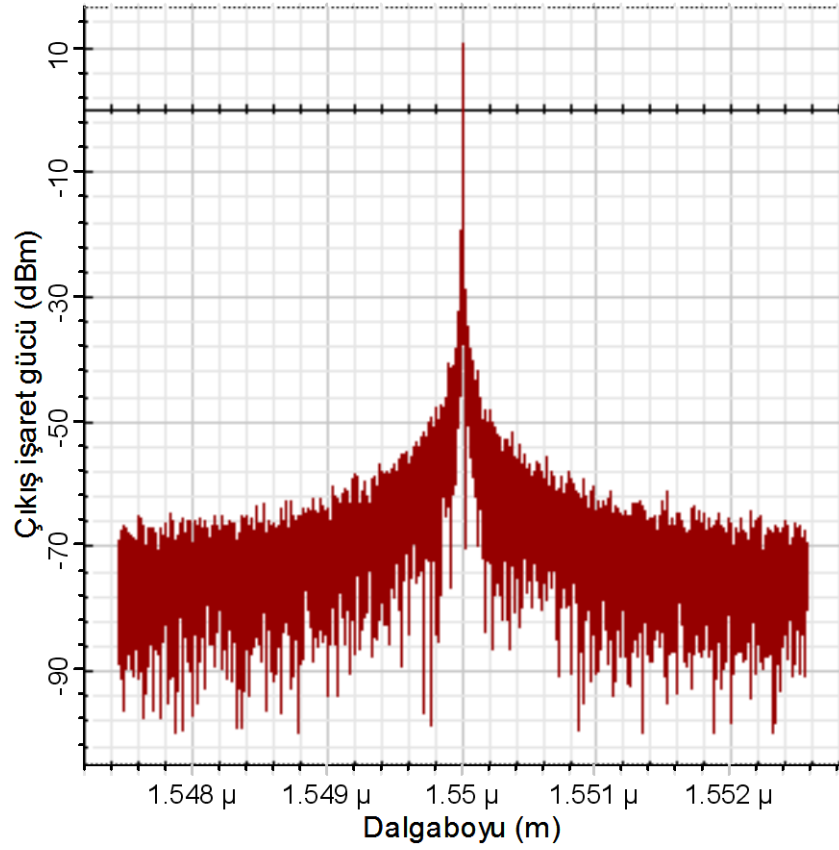
Şekil 7.5 EDFA'nın çıkışındaki kazanç ve gürültü faktörü

Şekil 7.6, hibrid fiber kuvvetlendiricinin ikinci ve son kısmı olan EDFA'nın çıkışında optik güç ölçer ile gözlenen sinyal gücünü göstermektedir. -11.113 dBm olarak izlenen bu işaret gücü, aynı zamanda hibrid fiber kuvvetlendiricinin çıkış gücüdür. Şekil 7.7'de ise hibrid fiber kuvvetlendirici çıkışındaki bu gücün dalgaboyuna göre değişim spektrumu, optik spektrum analizörü ile izlenmiştir.

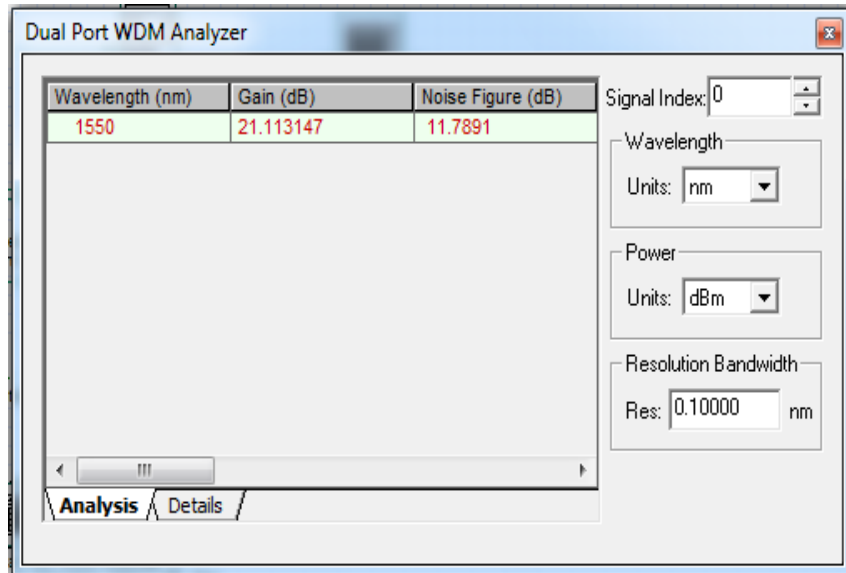


Şekil 7.6 Hibrid fiber kuvvetlendirici çıkışındaki işaretin gücü

Şekil 7.8'de, hibrid fiber kuvvetlendiricinin toplam kazancı ve gürültü faktörü yer almaktadır. Bu sonuç, bir ucu hibrid fiber kuvvetlendiricinin girişine, diğer ucu ise çıkışına bağlanan iki kapılı WDM analizörü ile gözlenmiştir.



Şekil 7.7 Hibrid fiber kuvvetlendirici çıkışındaki işaretin gücünün dalgaboyuna göre değişim spektrumu



Şekil 7.8 Hibrid fiber kuvvetlendiricinin toplam kazancı ve gürültü faktörü

Yapılan simülasyonlar sonucu, düşük güçlü pompa lazer ile pompalanmış 50 km'lik bir Raman fiber kuvvetlendiricinin çıkışındaki gücün zayıfladığı ve gürültünün arttığı görülmüştür. Zayıflayan sinyalin tekrar kuvvetlendirilmesi amacıyla Raman fiber

kuvvetlendirici sonuna 6 m uzunluğunda bir EDFA eklenerek 980 nm dalgaboyunda çalışan pompa lazer ile pompalanmıştır. Tasarlanan bu hibrid kuvvetlendirici düzeneği ile birinci kısımda Raman fiber kuvvetlendiricinin çıkışında zayıflayan sinyalin tekrar kuvvetlenmesi sağlanmış ve Şekil 7.8’de görüldüğü gibi 21.11 dB kazanç sağlanmıştır. Ancak Raman kuvvetlendirici çıkışındaki zayıflayan sinyalle birlikte gürültü de kuvvetlendirildiği için sistemin çıkışında 11.78 dB’lik bir gürültü faktörü oluşmuştur. Böylece 50 km mesafede, Raman ve EDFA bir arada kullanılarak tasarlanan hibrid fiber kuvvetlendirici ile giriş işareti iletilebilecek duruma gelmiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Optik haberleşme sistemlerinde sinyalin uzun mesafelere iletimi, fiber optik kuvvetlendiriciler yardımıyla gerçekleştirilmektedir. İletilen sinyalin kayıpsız ve mümkün olan en az gürültü ile iletilmesi önem taşımaktadır. Optik kuvvetlendiriciler, sinyalin yüksek kazanç ve düşük gürültü ile iletilmesi için optimize edilmiş optik sistem bileşenleridir.

Bu çalışmada, optik haberleşme sistemlerinde kullanımı yaygın olan erbiyum katkılı fiber optik kuvvetlendiriciler, iterbiyum katkılı fiber optik kuvvetlendiriciler, yarıiletken optik kuvvetlendiriciler ve Raman fiber kuvvetlendiriciler incelenmiş ve OptiSystem 7.0 simülasyon programı ile bu kuvvetlendiricilerin tasarımı yapılmıştır. Tasarım parametreleri, teorik bilgiler ışığında belirli aralıklarla değiştirilmiş ve kuvvetlendiriciler için optimum koşullar bulunarak literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Simülasyonlardan elde edilen sonuçlar ile fiber optik kuvvetlendiricilerin birbirlerine göre daha iyi performans gösterdiği durumlar değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler sonucu, optik sinyalin 50 km uzunluktaki bir mesafeye iletilebilmesi için iki optik kuvvetlendiricinin kullanıldığı hibrid bir fiber optik kuvvetlendirici tasarlanmıştır.

OptiSystem 7.0 simülasyon programında tasarlanan EDFA sisteminin tasarım parametreleri değiştirilerek yapılan simülasyonların sonucu olarak giriş işaret kaynağının dalga boyu 1550 nm, pompa lazerin dalga boyu 980 nm ve katkılanmış fiberin uzunluğu 6 m olduğunda, maksimum kazanç ve minimum gürültünün elde edildiği görülmüştür. Aynı zamanda giriş işaretinin gücünün sürekli artması kazancı doyuma götürmüş ve kazanç azalmıştır. Bunun yanında pompa gücünün sürekli

artırılması sonucu iyon evirtiminin artmasına bağlı olarak kazanç sürekli artmıştır. YDFA sisteminde ise aynı tasarım parametreleri değiştirildiğinde, giriş işaret kaynağının dalga boyu 1030 nm, pompa lazerin dalga boyu 980 nm ve katkılanmış fiberin uzunluğu 5 m olduğunda, maksimum kazanç ve minimum gürültünün elde edildiği görülmüştür. EDFA'ya benzer şekilde giriş işaretinin gücünün sürekli artması kazancı doyuma götürerek azaltmış ve pompa gücünün sürekli artırılması sonucu iyon evirtiminin artmasına bağlı olarak kazanç sürekli artmıştır.

SOA sistemindeki tasarım parametrelerinin belirli değerler arasında değiştirilmesi sonucunda, giriş işaret kaynağının dalga boyu 1550 nm ve band aralığı 0,78 eV olduğunda maksimum kazanç ve minimum gürültü elde edildiği görülmüştür. EDFA ve YDFA sistemlerindeki pompa lazere benzer şekilde, SOA'nın enjeksiyon akımının artırılması, kazancın artmasını ve gürültünün azalmasını sağlamaktadır. Aynı zamanda giriş işaretinin gücünün sürekli artırılması, kazancı ve gürültüyü azaltmıştır.

Çok uzak mesafelerde yüksek kazanç sağladığı görülen Raman sisteminde 1550 nm dalga boyunda çalışan giriş işaret kaynağı kullanılmış ve buna karşılık 1450 nm dalga boyunda çalışan pompa lazeri kullanıldığında, giriş işaretinin ve pompa lazerin çalışma dalga boyu arasındaki fark 100 nm olduğundan en yüksek kazancın elde edildiği görülmüştür. Bu koşullar altında, kuvvetlendiricinin, 50 km uzunluk civarında maksimum kazanca ulaştığı görülmüştür. Giriş işaretinin gücü artırıldığında, kazanç ve gürültünün neredeyse sabit kaldığı ve pompa lazer gücü artırıldığında ise, kazancın arttığı görülmüştür. Sisteme ileri, geri ve aynı anda hem ileri hem geri yönde pompalama uygulanmış ve tek yönde pompalama kullanıldığında geri yönde pompalamanın çok daha iyi performans gösterdiği, her iki yönde pompalama kullanıldığında ise maksimum kazanç ve gürültü performansı elde edildiği görülmüştür.

Hibrid kuvvetlendirici tasarımı ise iki kısımdan oluşmaktadır. Optik sinyalin 50 km uzağa iletilebilmesi için birinci kısımda -10 dBm gücünde ve 1550 nm dalga boyunda çalışan giriş işaretinin ucunda Raman fiber kuvvetlendirici kullanılmıştır. Hibrid kuvvetlendiricinin ikinci kısmında ise Raman fiber kuvvetlendiricinin çıkışına eklenen EDFA yer almaktadır. Giriş sinyali Raman kuvvetlendirici boyunca -5.92 dB kazanç ile iletildikten sonra EDFA ile tekrar kuvvetlendirilmiş ve hibrid kuvvetlendirici çıkışında 21.11 dB kazanç ile elde edilmiştir.

Uygulamalardan elde edilen sonuçlar, kısa fiber uzunluklarında EDFA'nın, YDFA ve SOA'ya göre daha iyi kazanç ve gürültü performansına sahip olduğunu göstermektedir. SOA, YDFA'ya göre daha iyi kazanç performansına sahip olmasına karşın, düşük gürültü performansı SOA'yı belirli tasarım parametreleri dışında kullanışsız kılmaktadır. YDFA ise kısa mesafede 1030 nm dalgaboyunda çalışarak optik sistemlerde kullanılmak üzere alternatif yaratmaktadır. Raman kuvvetlendiricilerin ise çok uzun optik fiberler boyunca yüksek kazanç ve düşük gürültü sağladığı görülmektedir. Bu nedenle, metreler mertebesinde uzunluğa sahip optik sistemlerde EDFA'nın kullanılması, kilometreler mertebesinde uzunluğa sahip optik sistemlerde ise Raman fiber kuvvetlendiricilerin kullanılması, yüksek kazanç ve düşük gürültü elde etmek açısından önemlidir.

Uzun mesafede çok fazla optik kuvvetlendirici kullanmadan düşük güçlü giriş işaret kaynağı ve pompa lazeri ile iletim yapılmak istenildiğinde ise hibrid kuvvetlendirici tasarımları öne çıkmaktadır. Hibrid kuvvetlendiricilerin ilk katında uzun mesafelerde yüksek kazançla sahip olan Raman fiber kuvvetlendiriciler, ikinci katında ise düşük gürültüye sahip EDFA'lar kullanılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Küçükarslan, T. ve Ünverdi, N. Ö., (2012). “Erbiyum ve İterbiyum Katkılı Optik Fiber Kuvvetlendiricilerin Kazanç Analizi”, 20. IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, 18-20 Nisan 2012, Muğla.
- [2] Premaratne, M. ve Agrawal, G. P., (2011). Light Propagation in Gain Media, Cambridge University Press, New York.
- [3] Becker, P. C., Olsson, N. A. ve Simpson, J. R., (1999). Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology, Academic Press, San Diego.
- [4] Paschotta, R. (ed.), Ytterbium-doped Gain Media,
http://www.rp-photonics.com/ytterbium_doped_gain_media.html, 20 Mart 2012.
- [5] Paschotta, R., Nilsson, J., Tropper, A. C. ve Hanna, D.C., (1997). “Ytterbium-Fiber Amplifiers”, IEEE Journal of Quantum Electronics, 33(7): 1049-1056.
- [6] Connely, M.J., (2002). Semiconductor Optical Amplifiers, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- [7] Gökhan, F. S., (2010). Optik Fiberli Brillouin ve Dağınık Raman Kuvvetlendiricilerinin Matlab Nümerik Çözümleri İle Performans Analizleri, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [8] Islam, M. N. (Ed), (2004). Raman Amplifiers for Telecommunications 1, Springer-Verlag, New York.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Tolga KÜÇÜKARSLAN
Doğum Tarihi ve Yeri : 28.10.1987 – İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : tolgakarslan@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2009
Lise	Fen Bilimleri	Eminönü Cibali Lisesi (YDA)	2005

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2010	AVEA İletişim Hizmetleri A.Ş.	Transmisyon Operasyon Mühendisi
2009	AVEA İletişim Hizmetleri A.Ş.	NOC Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Tolga Küçükarslan, N. Özlem Ünverdi, “Raman Fiber Kuvvetlendiricilerde Pompalamanın Kazanç Üzerindeki Etkisi”, 14. Ulusal Optik, Elektro - Optik ve Fotonik Toplantısı (FOTONİK 2012), 14 Eylül 2012, İstanbul.
2. Tolga Küçükarslan, N. Özlem Ünverdi, “Erbium ve İterbiyum Katkılı Optik Fiber Kuvvetlendiricilerin Kazanç Analizi”, 20. IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SİU 2012), 18-20 Nisan 2012, Ölüdeniz - Fethiye, Muğla.
3. Tolga Küçükarslan, Bekir Özmen, N. Özlem Ünverdi, “Ağ Omurgalarında RIP ve OSPF Uygulamaları”, 2. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu (MTS2), 127-134, 30 Nisan - 1 Mayıs 2009, Ankara.