

**KAZANCI DÜZLEŞTİRİLMİŞ GENİŞ BANDLI  
FİBER YÜKSELTEÇLERİN TASARIMI**

**Murat YÜCEL**

**DOKTORA TEZİ  
ELEKTRONİK BİLGİSAYAR EĞİTİMİ  
ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ**

**Kasım 2008  
ANKARA**

Murat YÜCEL tarafından hazırlanan KAZANCI DÜZLEŞTİRİLMİŞ GENİŞ BANDLI FİBER YÜKSELTEÇLERİN TASARIMI adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. H. Haldun GÖKTAŞ  
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Elektronik Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : Prof. Dr. N. Fatma GÜLER

Üye : Doç. Dr. V. Fatih ÇELEBİ

Üye : Doç. Dr. Ahmet ALTUNCU

Üye : Yrd. Doç. Dr. H. Haldun GÖKTAŞ

Üye : Yrd. Doç. Dr. M. Rahmi CANAL

Tarih : 11/11/2008

Bu tez, Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Murat YÜCEL

**KAZANCI DÜZLEŞTİRİLMİŞ GENİŞ BANDLI  
FİBER YÜKSELTEÇLERİN TASARIMI  
(Doktora Tezi)**

**Murat YÜCEL**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ  
Kasım 2008**

**ÖZET**

Bu tez çalışmasında kazancı düzleştirilmiş çok geniş bantlı optik yükselteç sisteminin tasarım ve benzetimi yapılarak, C band erbiyum katkılı fiber yükselteç (EKFY) deneysel olarak incelenmiştir. S, C ve L band sinyaller bağımsız olarak yükseltilmiş ve birleştirilerek kazancı düzleştirilmiş çok geniş bantlı optik yükselteç sistemi oluşturulmuştur. C ve L band yükseltmesi için EKFY, S band yükseltmesi için fiber Raman yükselteç (FRY) kullanılmıştır. C band ve L band EKFY'nin kazanç düzleştirme işlemi için, erbiyum katkılı fiberlerin (EKF) arasına pasif optik filtre yerleştirilmiştir. Böylece, yüksek kazançlı sinyaller kırılmış ve çıkışta düz bir kazanç spektrumu elde edilmiştir. S band FRY'nin kazanç düzleştirme işleminde ise FRY altı pompa kaynağı ile pompalanmış ve düz bir kazanç spektrumu elde edilmiştir. OptiAmplifier 4.0 yazılımı kullanılarak farklı konfigürasyonlardaki yükselteçlerin benzetimleri yapılmıştır. Benzetim sonuçlarında, 24 dB'lik bir kazanç, C ve L band için 0,1 dB, S band için ise 0,3 dB'lik kazanç değişimi ve 120 nm band genişliği elde edilmiştir. Son olarak, pompa gücü, giriş sinyal gücü ve sıcaklığın C band EKFY'nin kazancı üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

**Bilim Kodu : 704.3.013**  
**Anahtar Kelimeler : EKFY, FRY, geniş band, kazanç düzleştirme**  
**Sayfa Adedi : 114**  
**Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. H. Haldun GÖKTAŞ**

**DESIGN OF GAIN FLATTENED WIDE BAND FIBER AMPLIFIERS****(Ph.D. Thesis)****Murat YÜCEL****GAZI UNIVERSITY****INFORMATICS INSTITUTE****November 2008****ABSTRACT**

**In this thesis, design and simulation of ultra wide band gain flattened optical amplifier system is performed and C band erbium doped fiber amplifier (EDFA) is experimentally examined. S, C, and L band signals are independently amplified and is combined to get ultra wide band gain flattened optical amplifiers. EDFA is used for C and L band amplification, fiber Raman amplifier (FRA) is used for S band amplification. For the gain flattening process of L band and C band EDFA, passive optical filters are inserted subsequent sections between erbium doped fibers (EDF). Thus, the signals experienced a high gain are clipped and a flat gain spectrum is obtained at the output. For the gain flattening process in S band FRA, FRA has been pumped using six pump sources and could therefore be a flat gain spectrum obtained. The simulation of the amplifiers with different configuration is simulated using OptiAmplifier 4.0 software. Simulation results show that a gain of 24 dB, 0,1 dB gain deviation for C and L bands, 0,3 dB gain deviation for S band, and a total bandwidth of 120 nm are achieved. Finally, the gain of a C band EDFA is experimentally examined as a function of the pump power, input signal power, and the temperature.**

**Science Code : 704.3.013**  
**Key Words : EDFA, FRA, wide band, gain flattening**  
**Page Number : 114**  
**Adviser : Assist. Prof. Dr. H. Haldun GÖKTAŞ**

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren çok değerli hocam Yrd. Doç. Dr. H. Haldun GÖKTAŞ'a, tez izleme komitesinde katkı ve önerileriyle beni yönlendiren değerli hocalarım Prof. Dr. Nihal Fatma GÜLER ve Doç. Dr. V. Fatih ÇELEBİ'ye, deneysel çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Ahmet ALTUNCU'ya, bölümde görevli tüm çalışma arkadaşlarıma, maddi ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli eşim İlknur BAL YÜCEL'e ve doğduktan sonra bana şans getiren çocuklarım İlkçe ve Yağız'a teşekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ .....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Optik Yükselteçlerin Tarihsel Gelişimi .....	1
2. OPTİK YÜKSELTEÇLERE GENEL BİR BAKIŞ.....	6
2.1. Yarıiletken Optik Yükselteçler .....	7
2.2. Fiber Yükselteçler .....	9
2.2.1. Fiber Brillouin yükselteçler .....	10
2.2.2. Nadir toprak elementleri ile katkılandırılmış yükselteçler.....	12
2.3. Optik Yükselteçlerin Karşılaştırılması.....	14
3. SİSTEMDE KULLANILAN OPTİK YÜKSELTEÇLER.....	15
3.1. Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçler .....	15
3.1.1. EKFY'nin atomik oran denklemleri.....	16
3.1.2. Stark alt seviyeli lazer sistemlerinde atomik oran denklemleri .....	19
3.1.3. Yayınım Denklemleri.....	23

3.1.4. Yükseltmiş kendiliğinden yayılım .....	25
3.1.4. Pompalama, sinyal ve YKY için genel oran denklemleri .....	26
3.2. Fiber Raman Yükselteçler .....	37
3.2.1. Raman saçılması .....	41
3.2.2. Raman yükseltmesi ve fiberlerde uyarılmış saçılma .....	44
4. SİSTEMİN TASARIMI VE BENZETİMİ .....	48
4.1. Giriş .....	48
4.2. Kazancı Düzleştirilmiş S Band Optik Yükselteç Tasarımı ve Benzetimi .....	49
4.2.1. S band için kazanç düzleştirme işlemi .....	52
4.3. Kazancı Düzleştirilmiş C Band Optik Yükselteç Tasarımı ve Benzetimi .....	55
4.3.1. C band için kazanç düzleştirme işlemi .....	58
4.4. Kazancı Düzleştirilmiş L Band Optik Yükselteç Tasarımı ve Benzetimi .....	63
4.4.1. L Band için kazanç düzleştirme işlemi .....	65
4.5. S, C, L Band Optik Yükselteç Sisteminin Tasarımı ve Benzetimi .....	71
5. C BAND EKFY’NİN DENEYSEL KARAKTERİZASYONU .....	74
5.1. Benzetim Düzenegi ve Pratik Uygulamanın Tasarlanması .....	74
5.2. Deneysel Düzenek .....	76
5.3. Sinyal Gücünün Kazanç Spektrumuna Etkileri .....	78
5.4. Pompa Gücünün Kazanç Spektrumuna Etkileri .....	83
5.5. Sıcaklık Değişiminin Kazanç Spektrumuna Etkileri .....	84
6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	88
KAYNAKLAR .....	92



EKLER.....	104
EK-1 Optik Spektrum Analizörünün Hesaplama ve Ölçüm Yöntemleri.....	105
EK-2 OSA'nın Gürültü Ölçme Yöntemleri .....	109
ÖZGEÇMİŞ .....	113

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Fiber yükselteçler ve YOY'ların ana özellikleri.....	9
Çizelge 3.1. Çeşitli tipteki fiberlerin etkin alanları.....	41
Çizelge 4.1. Sistemde kullanılan pompa kaynaklarının dalga boyu ve güç değerleri .....	53
Çizelge 4.2. Tek modlu fiber parametreleri .....	53
Çizelge 4.3. Tek ve altı pompa kaynağı kullanılarak elde edilen kazanç değerleri .....	54
Çizelge 4.4. C band EKF parametreleri .....	60
Çizelge 4.5. L band EKF parametreleri .....	65
Çizelge 4.6. L band konfigürasyonları için kazanç değerleri .....	69
Çizelge 4.7. L band konfigürasyonları için gürültü değerleri .....	70
Çizelge 5.1. Benzetimde kullanılan parametreler .....	74
Çizelge 5.2. EMP980 C band EKF parametreleri .....	75
Çizelge 5.3. C band EKFY için sıcaklığa bağımlı kazanç karakteristiklerinin karşılaştırılması .....	87

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. TMF'nin zayıflama eğrisi .....	6
Şekil 2.2. YOY'un şematik diyagramı .....	7
Şekil 2.3. İki seviyeli lazer sisteminde kendiliğinden ve uyarılmış yayılım .....	8
Şekil 2.4. Tipik sinyal gücüne karşılık YOY kazancı .....	8
Şekil 2.5. YOY'ların kullanıldığı alanlar .....	9
Şekil 2.6. Germanyum dioksit katkılı ve farklı yapıya sahip üç fiber için $\lambda_p = 1,525 \mu\text{m}$ 'de ölçülmüş Brillouin kazanç spektrumu: (a) silika özlü fiber; (b) basılmış kılıflı fiber; (c) dispersiyon kaymalı fiber. ....	12
Şekil 2.7. Silika fiberin zayıflama karakteristiği ve bazı nadir toprak iyonlarının yayılım bandları.....	13
Şekil 2.8. Geniş band fiber haberleşmesinde fiber kayıp eğrisine karşılık optik yüksekteçlerin yeri .....	13
Şekil 3.1. Erbiyum katkılı fiberin kazanç spektrumu .....	15
Şekil 3.2. EKFY'nin temel yapısı .....	16
Şekil 3.3. Temel üç seviyeli lazer sistemi enerji seviye diyagramı.....	17
Şekil 3.4. Stark aralıklı iki seviyeli lazer sisteminin enerji seviye diyagramı. $A_{nr}^{\pm}$ sembolleri bitişik Stark alt seviyeleri arasındaki termalizasyon oranlarını gösterir. ....	20
Şekil 3.5. Silika için ölçülen Raman kazanç spektrumu .....	38
Şekil 3.6. Geniş bantlı FRY konfigürasyonları (a) FRY temel yapısı, (b) Raman kazanç spektrumu, (c) Çoklu dalga boyu ile pompalama .....	40
Şekil 3.7. Stokes ve Anti-Stokes Raman saçılmaları. ....	42
Şekil 3.8. Raman Stokes saçılmasının kuantum teorisinin enerji seviyeleri diyagramı.....	43

Şekil 3.9. Fiberde yükseltilmiş kendiliğinden saçılma kısa parçalara bölünerek hesaplanır. Raman Stokes frekansında toplam gürültü gücü her bir parçanın kendiliğinden saçılma yükseltmesinin toplamıdır.....	45
Şekil 4.1. Silika katkılı EKFY'nin dalga boyuna bağlı kazanç spektrumu.....	48
Şekil 4.2. S band FRY düzeneği.....	49
Şekil 4.3. S band giriş sinyalleri.....	50
Şekil 4.4. S band pompa sinyali .....	50
Şekil 4.5. S band çıkış sinyalleri .....	51
Şekil 4.6. S band kazanç spektrumu.....	52
Şekil 4.7. Kazancı düzleştirilmiş S band FRY'nin yapısı .....	53
Şekil 4.8. Her bir pompa kaynağının ve tüm sistemin çıkış kazanç spektrumu.....	54
Şekil 4.9. Yakınlaştırılmış S band çıkış kazanç spektrumu .....	55
Şekil 4.10. C band EKFY düzeneği .....	56
Şekil 4.11. C band giriş sinyalleri .....	56
Şekil 4.12. C band pompa sinyalleri.....	57
Şekil 4.13. C band çıkış sinyalleri.....	57
Şekil 4.14. Kazanç düzleştirici filtre ile iki aşamalı EKFY'nin kazanç optimizasyonu düzeneği.....	58
Şekil 4.15. Filtresiz iki aşamalı EKFY'de giriş sinyaline karşılık çıkış sinyali.....	61
Şekil 4.16. Kazancı düzleştirici filtre kullanılan iki aşamalı EKFY'nin çıkış sinyalleri.....	61
Şekil 4.17. Optimize edilen filtrenin iletim spektrumu .....	62
Şekil 4.18. İki aşamalı EKFY'de filtrenin kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlardaki kazanç spektrumu .....	62
Şekil 4.19. L band EKFY düzeneği.....	63
Şekil 4.20. L band giriş sinyalleri.....	63

Şekil 4.21. L band pompa sinyali .....	64
Şekil 4.22. L band çıkış sinyalleri .....	64
Şekil 4.23. L band EKFY için kazanç düzleştirme konfigürasyonları (a) İki aşamalı, (b) İki aşamalı kazanç düzleştirici filtreli, (c) Çift geçişli .....	66
Şekil 4.24. Kazanç düzleştirici filtre iletim spektrumu .....	67
Şekil 4.25. Dört ayrı L band EKFY konfigürasyonunun kazanç spektrumları .....	68
Şekil 4.26. Dört ayrı L band EKFY konfigürasyonunun gürültü faktörleri .....	70
Şekil 4.27. Kazancı düzleştirilmiş çok geniş bantlı hibrid optik yükselteç sistemi .	71
Şekil 4.28. Geniş band optik yükseltecin çıkış sinyal kazanç spektrumu .....	73
Şekil 5.1. C band EKFY benzetim düzeneği.....	74
Şekil 5.2. Çeşitli fiber boylarına karşılık kazanç spektrumu.....	75
Şekil 5.3. Çeşitli fiber boylarına karşılık gürültü spektrumu .....	76
Şekil 5.4. C band EKFY düzeneği şematik gösterimi .....	76
Şekil 5.5. 1530 nm -20 dBm giriş sinyali için çıkış spektrumu .....	78
Şekil 5.6. Çeşitli giriş sinyal güçleri için dalga boyu değişimine karşılık kazanç spektrumu.....	79
Şekil 5.7. -20 dBm giriş sinyali için deneysel ve benzetim kazanç sonuç eğrileri .....	79
Şekil 5.8. Çeşitli giriş sinyal güçleri için dalga boyu değişimine karşılık gürültü faktörü spektrumu.....	80
Şekil 5.9. -20 dBm giriş sinyali için deneysel ve benzetim gürültü faktörü spektrumu.....	81
Şekil 5.10. Giriş sinyal gücündeki değişime karşılık kazanç spektrumu .....	82
Şekil 5.11. 1550 nm sinyal dalga boyu için giriş sinyal gücü değişimine karşılık deneysel ve benzetim kazanç spektrumları .....	82
Şekil 5.12. EKFY kazancının pompa gücüyle değişimi.....	83

Şekil 5.13. 1550 nm sinyal dalga boyu için pompa gücü değişimine karşılık deneysel ve benzetim kazanç spektrumları .....	84
Şekil 5.14. Sıcaklığa bağımlı kazanç spektrumu şematik ölçüm düzeneği.....	85
Şekil 5.15. Çeşitli sıcaklıklar için kazanç spektrumları (a) -10 dBm, (b) -40 dBm'lik sinyal güçleri için.....	86
Şekil 5.16. C band EKFY'nin sinyal güçlerine göre sıcaklık katsayıları.....	87

**RESİMLERİN LİSTESİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 5.1. C band EKFY deney düzeneği.....	77
Resim 5.2. Sıcaklığa bağımlı kazanç spektrumu pratik ölçüm düzeneği.....	85

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
$A$	Kendiliğinden yayınım oranı
$A_{\text{eff}}$	Etkin alan
$A_{32}^{\text{nr}}$	Seviye 3'den 2'ye ışımasız kendiliğinden düşme oranı
$A_{32}^{\text{r}}$	Seviye 3'den 2'ye ışımalı kendiliğinden düşme oranı
$A_{31}^{\text{r}}$	Seviye 3'den 1'e ışımalı kendiliğinden düşme oranı
$A_{21}$	Seviye 2'den 1'e kendiliğinden düşme oranı
$A_{32}$	Seviye 3'den 1'e kendiliğinden düşme oranı
$A_{\text{nr}}^{\pm}$	Stark alt seviyeleri termalizasyon oranları
$\alpha'_{\text{p}}$	Pompalama dalga boyundaki temel kayıp katsayısı
$\alpha'_{\text{s}}$	Sinyal dalga boyundaki temel kayıp katsayısı
$\alpha(\nu)$	Zayıflama katsayısı
$c$	Işık hızı
$\delta\nu$	Band genişliği
$\Delta E$	İki seviye arasındaki enerji farkı
$\xi(\mathbf{r}, \mathbf{q})$	Normalize kazanç yoğunluğu katsayısı
$\eta$	Yayınım ve soğurum kesitleri arasındaki oran
$f_{\text{YKY}}^{\pm}$	Normalize edilmiş YKY yoğunluk profili
$G$	Kazanç
$\Delta G$	Kazanç değişimi



$G_{\text{mak.}}$	Maksimum kazanç
$G_{\text{min.}}$	Minimum kazanç
$g_B$	Brillouin kazancı
$g(v)$	Normalize çizgi fonksiyonu
$g_R$	Raman kazanç katsayısı
$g_R(\zeta, v)$	$\zeta$ ve $v$ frekansları arasındaki Raman kazanç katsayısı
$\Gamma(q)$	Örtüşme-tersleme faktörü
$\gamma(v)$	Geri yönde Rayleigh saçılma katsayısı
$h$	Planck sabiti
$\hbar\omega_p$	Pompalama foton enerjisi
$\hbar\omega_s$	Sinyal foton enerjisi
$I_p$	Pompa yoğunluğu
$I_s$	Sinyal yoğunluğu
$I_{YKY}^{\pm}$	İleri (+) ve geri (-) optik yayılım yoğunlukları
$I_s(\mathbf{r}, z)$	Oransal ışık sinyali
$I_{\text{sat}}$	Doyum ışık şiddeti
$\mathbf{J}$	Toplam orbital momentumu
$\mathbf{k}_A$	Akustik dalga vektörü
$k_B$	Boltzmann sabiti
$k_p$	Pompalama ışınının dalga vektörü
$k_s$	Sinyal ışınının dalga vektörü
$K_p^{a,e}$	Pompa soğurumu ve uyarılmış yayılım oranları
$L_{\text{eff}}$	Gerçek uzunluk
$L\text{Cal}_{\text{BPF}}$	Optik band geçiren filtrenin kalibrasyon faktörü
$L(\lambda_s)$	Uygunlaştırılmış Gauss eğrisi fonksiyonu
$\lambda_p$	Pompa dalga boyu
$\lambda_s$	Sinyal dalga boyu

$\lambda_k$	Merkez dalga boyu
$\lambda_{sv}$	Vakumun optik çıkış sinyalinin dalga boyu
$M_{12}$	Yarı kararlı seviyede uyarılmış soğurum oranı
$M_{21}$	Yarı kararlı seviyede uyarılmış yayınım oranı
$M_{1r}$	Toprak ve r seviyeleri arasındaki matris elemanı
$M_{2r}$	r ve uyarılmış seviye arasındaki matris elemanı
$N_1$	1. Enerji seviyesi atom yoğunluğu
$N_2$	2. Enerji seviyesi atom yoğunluğu
$N_3$	3. Enerji seviyesi atom yoğunluğu
$N_{n,m}$	Her bir alt seviyenin popülasyonu
$N_0$	Rastgele foton sayısı
$N_\Omega$	Popülasyon faktörü
$n$	Ortam kırılma indisi
$\bar{n}$	Temel fiber modunun etkin indeksi
$nr$	Işımasız yayınım
$\Omega$	Stokes kayması
$\Delta\Omega$	Yoğun açı yakalaması
$\rho$	Lazer iyon yoğunluğu
$P_{nm}$	Boltzmann dağılımıdır
$P_s^{int}$	Sinyal ışınının gerçek doyum gücü
$P_s$	Sinyal gücü
$P_p$	Pompa gücü
$P_o$	Eşdeğer giriş gürültüsü
$P_{sat}(v_s)$	$v_s$ frekansındaki doyum gücü
$P_k^\pm$	$\lambda_k$ dalga boyunda normalize veya +YKY gücü
$P_{0k}$	$\lambda_k$ 'da doyumda normalize giriş gürültü gücü
$P_{YKY}$	YKY gücü

$P_{\text{corr}}(\lambda)$	İnterpolasyon yönteminde düzeltilmiş spektrum
$P_{\text{inloss}}$	Giriş kaybının doğrusal değeri
$P_{\text{outloss}}$	Çıkış kaybının doğrusal değeri
$P_{\text{sp-YKY}}$	Uygunlaştırma ile hesaplanmış YKY
$P_{\text{olloss}}$	Polarizasyon kaybının doğrusal değeri
$P_{\text{sp-in}}(\lambda)$	Analizör tarafından ölçülen optik giriş seviyesi
$P_{\text{sp-out}}(\lambda)$	Analizör tarafından ölçülen optik çıkış seviyesi
$\bar{\psi}_s(\mathbf{r})$	Mod zarfı
$\psi_p(\mathbf{r})$	Pompalama mod zarfı
$q$	Normalize pompa gücü
$\mathbf{r}$	Işımalı yayınım
$R$	Pompalama oranı
$R_{13}$	Seviye 1'den 3'e pompalama oranı
$R_{31}$	Seviye 3'den 1'e pompalama oranı
$\rho_0$	Tepe katkı yoğunluğu
$\sigma_p^a$	Pompa ışınının uyarılmış soğurum kesiti
$\sigma_p^e$	Pompa ışınının uyarılmış yayınım kesiti
$\sigma_s^a$	Sinyal ışınının uyarılmış soğurum kesiti
$\sigma_s^e$	Sinyal ışınının uyarılmış yayınım kesiti
$\theta$	Dalga vektörleri arasındaki açı
$T$	Sıcaklık
$T_B$	Akustik foton ömrü
$\tau$	Foton ömrü
$W$	Uyarılmış yayınım oranı
$W_{12}$	Seviye 1'den 2'ye uyarılmış soğurum oranı
$W_{21}$	Seviye 2'den 1'ye uyarılmış yayınım oranı
$w$	Mod alan yarıçapı
$\omega_p$	Pompalama frekansı

$\omega_s$	Sinyal frekansı
$v_A$	Akustik hız
$v_B$	Brillouin kayması
$v_s$	Sinyal frekansı
$v_p$	Pompa frekansı
$v_k$	Merkez frekansı
$\Delta v_B$	Brillouin kazanç band genişliği
$\Delta V$	Toplam spektral genişlik
$z$	Fiber boyu
$z_{eff}$	Etkin fiber boyu

### Kısaltmalar

### Açıklama

<b>ALK</b>	Ayarlanabilir lazer kaynağı
<b>dB</b>	Desibel
<b>dBm</b>	1 mW'la ilgili desibel
<b>Dy<sup>3+</sup></b>	Disprosyum
<b>DBÇ</b>	Dalga boyu bölmeli çoğullama
<b>DSF</b>	Dispersiyon kaydırmalı fiber
<b>DKF</b>	Dispersiyon kompanzasyonlu fiber
<b>Er<sup>3+</sup></b>	Erbiyum
<b>EKF</b>	Erbiyum katkılı fiber
<b>EKFY</b>	Erbiyum katkılı fiber yükselteç
<b>Ghz</b>	Gigahertz
<b>GB-EKFY</b>	Geniş band erbiyum katkılı fiber yükselteç
<b>Ho<sup>3+</sup></b>	Holmiyum
<b>FBY</b>	Fiber Brillouin yükselteç
<b>FRY</b>	Fiber Raman yükselteç
<b>YKY</b>	Yükseltilmiş kendiliğinden yayınım

<b>KK-TKFY</b>	Kazancı kaydırılmış tulyum katkılı fiber yükselteç
<b>Km</b>	Kilometre
<b>MHz</b>	Megahertz
<b>mW</b>	Miliwatt
<b><math>\mu\text{m}</math></b>	Mikrometre
<b><math>\text{Nd}^{3+}</math></b>	Neodmiyum
<b>NF</b>	Gürültü faktörü
<b>Nm</b>	Nanometre
<b>NTKFY</b>	Nadir toprak elementi ile katkılandırılmış fiber yükselteç
<b><math>\text{OH}^-</math></b>	Hidroksil
<b>OSA</b>	Optik spektrum analizör
<b><math>\text{Pr}^{3+}</math></b>	Praseodimyum
<b>URS</b>	Uyarılmış Raman saçılması
<b>UBS</b>	Uyarılmış Brillouin saçılması
<b>SDDSF</b>	Sıfıra dönüşsüz dispersiyon kaydırmalı fiber
<b>THz</b>	Terahertz
<b><math>\text{Tm}^{3+}</math></b>	Tulyum
<b>TKFY</b>	Tulyum katkılı fiber yükselteç
<b>TMF</b>	Tek modlu fiber
<b><math>\text{Yb}^{3+}</math></b>	İterbiyum
<b>YOY</b>	Yarı iletken optik yükselteç

## 1. GİRİŞ

Optik fiberlerde zayıflama ve dispersiyon olmak üzere iki temel sınırlayıcı etmen vardır. Zayıflama, sinyal gücünü ve dolayısıyla iletim mesafesini azaltmaktadır. Dispersiyon ise sinyal darbe genişliğini arttırmakta ve bunun sonucu olarak sinyaller arası etkileşim oluşmakta ve bit hata oranı yükselmektedir. Kullanılan fiber boyu arttıkça zayıflama ve dispersiyon da artmakta ve buda fiber optik linkte optik sinyalin yükseltilmesi ihtiyacını doğurmaktadır. Fakat sinyalin yükseltilmesi için klasik yöntemle foton-elektron dönüşümü, elektriksel yükseltme, yeniden zamanlama, darbenin şekillendirilmesi ve elektron-foton dönüşümü yapılarak yeniden iletilmesi gerekmektedir [1]. Ancak ışığı optik ortamda yükseltme arayışları optik yükselteçlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Optik yükselteçler uyarılmış yayılım veya nonlineer etki temeli ile telekomünikasyonda önemli rol oynamaktadırlar. Çünkü optik yükselteçler elektriksel tekrarlayıcı ihtiyacını yok etmekte ve çok yüksek band genişliği sağlamaktadırlar [2].

Optik fiber iletişiminin başarısı, uzun mesafelere erişim ve yüksek veri hızlarına çıkabilmesinden doğmaktadır. Uzun mesafelere erişim; günümüzde üretilen fiber optik kabloların çok düşük zayıflamaya (örneğin 0,3 dB/km) sahip olması ve zayıflama, sinyalin iletim hızından bağımsız olduğu için mümkündür. Sonuçta fiber boyunca bir işaret ilerliyor iken bozulma yalnızca lineer zayıflama şeklindedir ve zayıflamayı dengeleyecek bir optik yükselteç ihtiyacı vardır.

### 1.1. Optik Yükselteçlerin Tarihsel Gelişimi

Optik yükseltmenin temeli olan uyarılmış yayılım 1916'da Albert Einstein'dan sonra uzun zaman fazla ilgi görmemiştir. Rus mühendis Valentin A. Fabrikant bir optik yükselteç yapmayı önermiş fakat bu önerisini gerçekleştirememiştir. En önemli gelişme 1954'de Charles Townes'in uyarılmış yayılım kullanarak mikrodalga osilasyonu ile maser ışınını üretmesi olmuştur.

Townes ve Arthur Schawlow (ve ayrı olarak Gordon Gould) lazeri önermişler, birkaç yıl sonra Theodore Maiman 1960'da ilk lazeri yapmıştır. Gould "Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation (Radyasyonun uyarılmış yayını ile ışık yükseltmesi) kelimelerinden lazer kelimesini türetmiş fakat osilasyon vurgusu eksik kalmıştır [3].

Fiber optik haberleşmenin hızla gelişmesi sonucu fiber zayıflaması karmaşık ve pahalı elektriksel dönüştürücüler ve tekrarlayıcılar yardımı ile giderilmiş, bu nedenle optik yükselteç arayışlarına girilmiştir.

Optik yükselteç tasarımı için ilk yaklaşım, yarı iletkenlerin yüksek kazançları olduğundan, ışık kaynağı gibi kullanılan yarı iletken lazerlerden bir yükselteç geliştirmek olmuştur. Aynı zamanda uyarılmış Raman saçılması (URS) incelenmiştir. Ancak yarı iletken optik yükselteçler (YOY) ve FRY'lerin her ikisinde de önemli teknik problemlerle karşılaşmıştır [3].

En iyi geliştirilen katı hal lazer katkısı neodmiyum ile başlamıştır. Kayıpların artması nedeniyle düşük katkılı nadir toprak elementleri kullanılmaya başlanmıştır. Koestner ve Snitzer, 1964'de neodmiyum nadir toprak iyonu ile katkılanmış fiber fikrini ortaya atmışlardır [4]. Gelecek adımda fiber lazerler geliştirilmiştir. İlk olarak Snitzer bir flaş lambası ile lazerini pompalamış ve Charles Burrus Bell laboratuvarlarında neodmiyum katkılı çok modlu fiber lazeri bir lazer diyotla pompalamayı başarmıştır [3]. Payne'nin grubu tek modlu fiber için daha yüksek pompalama gücü üretmiştir [2]. Gelişme devam ederek galyum-alüminyum arsenik lazerden 1 mW'dan az güç elde edilmiştir.

Payne'nin grubu önce neodmiyum, tulyum, iterbiyum ve sonra 1985'te erbiyum ile çalışmıştır [2]. Southampton grubu 1986'da üç metre EKF ile tepe kazancı 1536 nm'de 26 dB olan ilk yükselteçlerini yapmış ve pompalamayı 514,5 nm kilit modlu argon lazerle gerçekleştirmiştir [2, 5-6].

British Telecom, erbiyum fiber lazeri ilk olarak 808 nm boya lazeri ile pompalamış fakat bu pompalama bandlarında uyarılmış seviye soğurumu oluşmuştur. Buna neden olmayan bir dalga boyu 980 nm'dir. Bu arada sürpriz olarak 1480 nm pompalama bandı bulunmuş, Bell laboratuvarında 1480 nm'de pompalama yapılarak 37 dB kazanç elde edilmiştir [3].

Japon araştırmacılar bir YOY geliştirmişler, bununla beraber 1989'da Masataka Nakazawa, NTT İletim Sistemlerinde 1480 nm'de 40 mW gücünde pompa diyotu ile erbiyum katkılı fiberi pompalamış ve 46,5 dB kazanç elde etmiştir [7].

İlk nesil EKFY'ler geleneksel band adı verilen C bandında tasarlanmıştır. %68 civarında ters birikme sağlayan bir EKF boyu ve alümino silikat katkısı kullanılarak geniş ve düz bir kazanç spektrumu elde edilirken, 1990'larda bu fikir yeniden düzenlenerek %35'lik bir ters birikme ile 1570 ve 1610 nm arasında, 40 nm band genişliğinde kazanç elde edilmiştir [8]. Uzun dalga boyunda düşük gürültü ile 1570-1610 nm bandında çalışan L band EKFY'ler 1992'de tanımlanmıştır [9]. 1997'de başlayan L band EKFY uygulamaları ile DBÇ iletim sistemlerinde kapasiteyi arttıracak şekilde, hat yükselteci olarak C banda paralel L band yükselteçler tasarlanmıştır [10-12]. C band EKFY ile karşılaştırıldığında L band EKFY düşük kazanç katsayısı ve güç dönüşüm verimliliği gösterir [13]. Bunun ana nedeni 1530-1560 nm bandındaki yüksek kazanç ve fiber sonunda yüksek miktarda üretilen YKY'dir. L band EKFY'de kazanç artırmanın iki metodu vardır. İlk metot ile YKY kaybını azaltmak için bir YKY kaynağı geri besleme reflektörü ile kullanılarak kazanç ve çıkış gücü artırılabilir. Bu metotla 1588 nm için kazançta 6 dB yükselme elde edilmiştir [14]. YKY kaynağı girişten verildiğinde oldukça verimlidir. YKY geri beslemesi çıkışta ise daha düşük verime sahiptir. İkinci teknik ile 1550 nm bandındaki istenmeyen YKY gücü, iki aşamalı L band yükseltecin pompa kullanılmayan EKF kısmına, ikinci bir pompa kaynağı olarak bağlanır. Prensipte olarak iki kazanç artırma konfigürasyonu temelli bu teknikte iki olası durum vardır: a) ilk aşama dış bir pompa kullanılmadan ikinci aşamada oluşan ve geri yönde yayılan YKY, ilk aşamanın ters birikmesini sağlamak için kullanılabilir, b) ikinci aşamada pompa kullanılmaz ve ilk aşamada oluşan ve ileri yönde yayılan YKY



kazanç arttırmak için kullanılır [15]. Pompalanmamış EKF için YKY'nin pompa kaynağı olarak kullanılması 1 dB'den az gürültü faktörü ile güç dönüşüm verimliliğini %11,7'den %25,7'ye çıkararak önemli bir katkı yapmıştır. Ayrıca ikinci metot herhangi bir ek optik malzeme gerektirmez [15].

Bu çalışmaların yanı sıra EKFY, tek geçişli çalışmadan daha düşük pompa gücü ve daha kısa fiber boyu kullanılarak daha yüksek kazanç elde edilen çift geçişli ve üçlü geçişli konfigürasyonlar da çalıştırılmış [16-43], uzun mesafeli fiber optik iletişimin ana problemlerinden birisi olan çıkış kazancını düzleştirmek için kazanç düzleştirici konfigürasyonlar kullanılmış [44-57] ve ayrıca artan pompa gücüne karşılık kazanç stabilizasyonu için kazanç kenetleyiciler incelenmiştir [58-60].

Son yıllarda optik band genişliğini arttırmak için S bandında ve U bandının ortalarında çalışabilen tulyum katkılı fiber yükselteçler (TKFY) çekici hale gelmiştir. Fakat yaygın olarak kullanıldığı bölge S band bölgesi olan 1460–1530 nm bölgesidir [61-62]. TKFY'ler çeşitli pompa konfigürasyonların da ve metotlarda çalıştırılabilir. Fakat pratik olmayan pompa kaynağı (1050 nm) ve düşük optik-optik dönüşüm verimliliği (%4) TKFY'nin çözümlenmesi gereken dezavantajlarıdır [63-64].

Hızla büyüyen internet kapasitesi ile EFKY tabanlı DBÇ iletim sistemlerinde C ve L bandlarının tamamı kullanılmaktadır. Hızla büyüyen haberleşme trafiği ve yüksek güçlü kompakt yarıiletken lazer diyot pompaların geliştirilmesi FRY araştırmalarını arttırmıştır. FRY'ler EKFY'lere göre esnek merkez dalga boyu ve geniş yükseltme bandı avantajlarına sahiptir [65-66]. EKFY'de olduğu gibi kazancı yükseltmek için çift geçişli sistemler [67], düz kazanç elde etmek için kazanç düzleştirici konfigürasyonlar kullanılmıştır [68].

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

İnternetin çok hızlı gelişmesiyle 2001 yılında bilim adamları her biri 10 Gbit/s hızda 100 dalga boyunu toplam 1 Tbit/s hıza ulaştırmışlardır. Ocak 2003'de toplam transatlantik iletim kapasitesi 2700 Gbit/s ve toplam potansiyel kapasite 12300 Gbit/s'ye yükselmiştir [69]. 2006 yılında NTT firması 14 Tbit/s'lik çok büyük kapasiteli optik iletimi 160 km uzunluğunda optik fiberde başarıyla gerçekleştirmiştir [3]. Gasulla and J. Capmany 2008'de çok modlu fiber ile bir kanalda 20 Gbit/s iletim kapasitesine ulaşmışlardır [70].

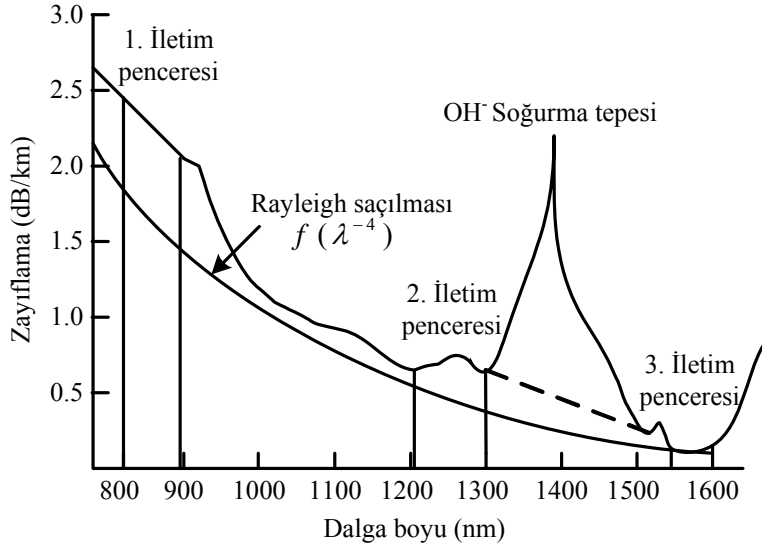
Bu temel gelişmelerin ardından optik yükselteçler günümüzde daha da gelişerek haberleşme sistemlerinin vazgeçilmezi olmuştur.

Bu tez çalışmasında, günümüzde hızla artan kapasite ihtiyacı için çok geniş bantlı bir optik yükselteç sistemi tasarlanırken, aynı zamanda uzun mesafe optik iletişimde her bir kanalın sinyal kazançları arasındaki farklardan dolayı, düşük kazançlı sinyallerin kaybolmasını önlemek için kazanç düzleştirme işlemi de yapılmıştır. Ayrıca C band EKFY'nin deneysel karakterizasyonu yapılmıştır.

Bu tez çalışmasının 2. bölümünde optik yükselteçler genel olarak incelenmiş, 3. ve 4. bölümlerde sırasıyla EKFY ve FRY'ler hakkında bilgi verilerek teorik analizleri yapılmıştır. 5. bölümde kazancı düzleştirilmiş geniş bantlı fiber yükselteç sistemi tasarlanarak benzetimleri yapılmış, 6. bölümde C band EKFY'nin deneysel karakterizasyonu yapılmış ve son bölümde yapılan çalışmanın sonuçları değerlendirilmiştir.

## 2. OPTİK YÜKSELTEÇLERE GENEL BİR BAKIŞ

Tek modlu fiberin (TMF) dalga boyuna bağlı zayıflama eğrisi Şekil 2.1’de görülmektedir. Tarihsel süreç boyunca optik haberleşmede kullanılan TMF’nin 3 iletim penceresi vardır. Optik yükselteçler bu iletim bölgelerinde çalıştırılarak kullanılırlar. Fakat daha çok, fiber zayıflamasının düşük olduğu 1300 nm ve 1550 nm civarında yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Şekil 2.1’deki hidroksil (OH<sup>-</sup>) soğurum tepesinin kaynağı imalat sürecinde camın içinde sıkışıp kalan su molekülleridir. Bunu azaltmak için atmosferik kimyasal buhar çökeltme metodu kullanılarak OH<sup>-</sup> iyonları dehidrasyon ile kaldırılır. Bu tür fiberlere de düşük OH<sup>-</sup>’li fiberler denilir. Bu işlemin ardından 1383 nm’de minimum zayıflama sadece 0,420 dB/km’dir [71].



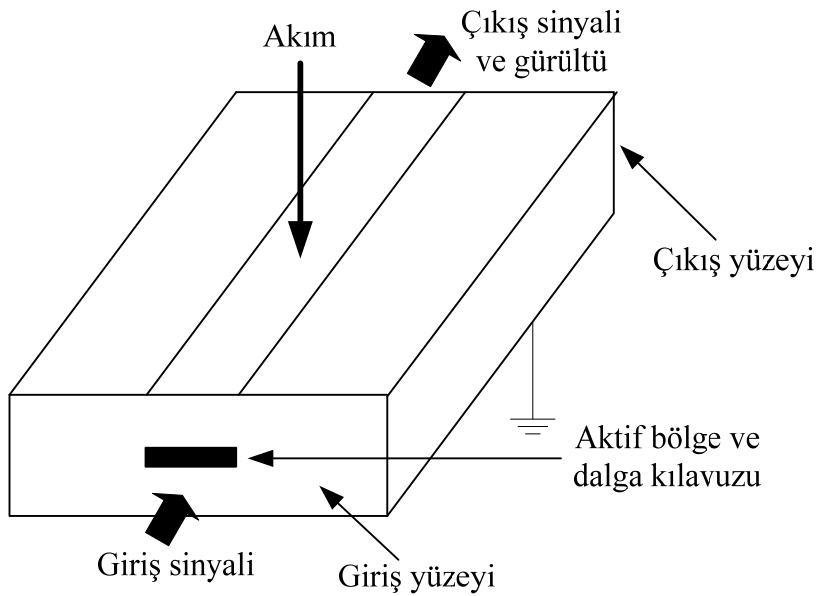
Şekil 2.1. TMF’nin zayıflama eğrisi

Optik yükselteçlerin bir lazerden farkı optik yükselteçlerde geri beslemenin olmayışındır. Bunun yerine pompa denilen bir foton pompalayıcı lazer ile taşıyıcı sinyal uyarılarak iletim hattı boyunca zayıflayan sinyal yükseltilir. Yani yükseltme işlemi fiber boyunca ilerlerken optik ortamda yapılır. Bu sayede dönüşüm işlemine gerek kalmaz ve istenilen sayıda farklı dalga boylarında sinyaller iletilebilir [72].

Geniş bantlı iletim uygulamalarında, optik yükselteçlerin iki farklı türü kullanılır: Bunlar YOY ve fiber yükselteçlerdir. Her ikisi de lazer prensiplerine göre çalışır yani bir kazanç ortamı ters birikmeye ulaşıncaya kadar pompalanır. Bu, fotonların uyarılmış yayılım ile çoğalarak yeni sinyal fotonları oluşturmasını sağlar ve yükseltme sağlanır. Fiber yükselteçler, nadir toprak elementi ile katkılandırılmış fiber yükselteçler (NTKFY), FRY'ler ve fiber Brillouin yükselteçlerdir (FBY) [73].

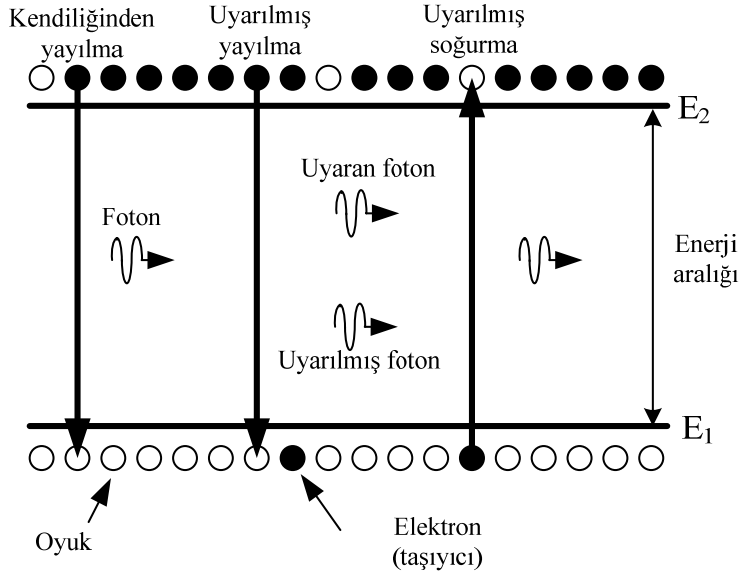
### 2.1. Yarıiletken Optik Yükselteçler

YOY yüksek hızlı anahtarlama yeteneği, yüksek sönüm oranı ve yüksek birleştirme potansiyeli sağlar. Ayrıca tüm optik dalga boyu dönüşümü, tekrarlama, dalga boyu seçme, güçlendirme, hat yükseltmesi ve optik ön yükseltme yapar.



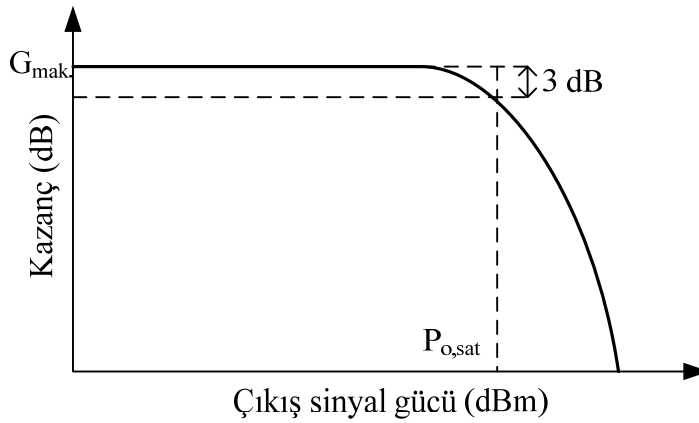
Şekil 2.2. YOY'un şematik diyagramı

Bir YOY'un şematik diyagramı Şekil 2.2'de görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere cihaz bir elektrik akımı ile sürülmektedir. Giriş sinyalinde uyarılmış yayılım yolu ile aktif bölgede kazanç sağlanmaktadır (Şekil 2.3). Çıkış sinyalinin yanı sıra çıkışta bir gürültüde oluşmaktadır. Yükseltmiş kendiliğinden yayılım (YKY) olarak adlandıracağımız bu gürültü yükseltme işlemi sırasında oluşmaktadır [1].



Şekil 2.3. İki seviyeli lazer sisteminde kendiliğinden ve uyarılmış yayılım

Bir YOY'un kazancı çıkış sinyal gücü ve yükseltme işlemi sırasında oluşan iç gürültüden etkilenir. Çıkış sinyal gücündeki artmaya karşılık kazanç düşer (Şekil 2.4). Bu kazanç doyumu önemli sinyal bozulmalarına neden olur [1].



Şekil 2.4. Tipik sinyal gücüne karşılık YOY kazancı

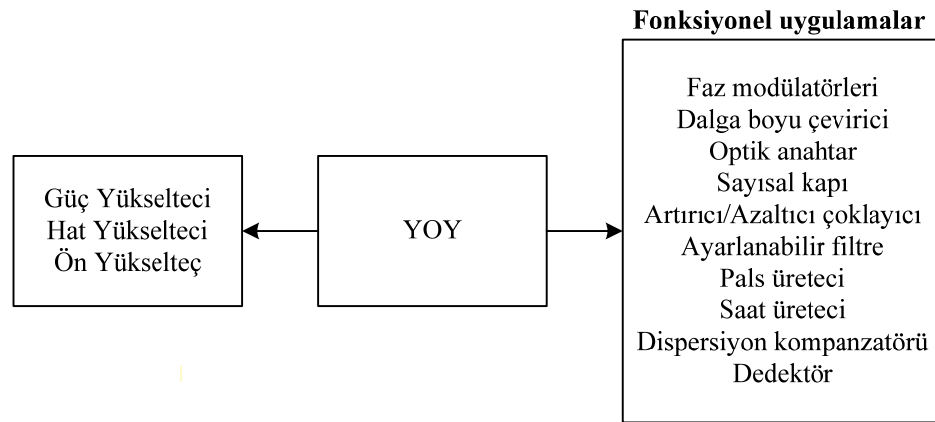
YOY'lar zayıf kazanç, gürültü ve doğrusal olmayan özelliklere sahiptir. YOY teknolojisi hızla ilerlemektedir. YOY'lar tek parça birleşime uygun (böylece fiyat avantajı sağlar) ve fiber optik yükselteçlerin yapamayacağı optik sinyal işleme içeren geniş uygulama alanları sunmaktadır. Gelecekte optik haberleşme ağlarının

gelişimiyle YOY'ların daha fazla yaygınlaşması beklenmektedir [74]. Çizelge 2.1'de fiber yükselteçler ile YOY'un ana özellikleri karşılaştırılmıştır [1].

Çizelge 2.1. Fiber yükselteçler ve YOY'ların ana özellikleri

Özellik	Fiber yükselteç	YOY
Tipik maksimum kazanç (dB)	30-50	30
Tipik ek kaybı (dB)	0,1-2	6-10
Polarizasyon duyarlılığı	Düşük	Yüksek
Pompa kaynağı	Optik	Elektriksel
3 dB kazanç band genişliği (nm)	30	30-50
Lineer olmayan etkiler	İhmal edilebilir	Var
Doyum çıkış gücü (dBm)	10-15	5-20
Tipik gürültü faktörü	3-5 dB	7-12 dBm
Fotonik devrelere uygunluğu	Yok	Var
Fonksiyonel devre olabilirliği	Yok	var

Şekil 2.5'de YOY'ların kullanıldığı alanlar gösterilmiştir [1]



Şekil 2.5. YOY'ların kullanıldığı alanlar

## 2.2. Fiber Yükselteçler

Bu tez çalışmasında, fiber yükselteçlerden FRY ve nadir toprak katkılı fiber yükselteçlerden EKFY kullanılmıştır ve bu iki optik yükselteç bölüm 3'te detaylı olarak incelenmiştir. Bu bölümde FBY ve NTKFY'lerden genel olarak bahsedilmiştir.

### 2.2.1. Fiber Brillouin yükselteçler

FBY'lerin çalışma prensibi aslında, optik kazanç sağlama hariç FRY'lerle benzer olup URS yerine uyarılmış Brillouin saçılması (UBS) kullanmasıdır. Bu nedenle fiber Brillouin yükselteç aynı zamanda optik olarak pompalanır ve pompalama gücünün bir kısmını UBS aracılığı ile sinyal dalga boyuna transfer eder. Fiziksel olarak, kalıcı enerji akustik bir fotonu uyarmada kullanıldığında, her bir pompalama foton enerjisi  $\hbar\omega_p$ , bir sinyal fotonunun yarattığı enerjiden  $\hbar\omega_s$  daha fazla enerji kullanır. Klasik olarak, ses hızındaki bir ortamda akustik dalga hareketinden dolayı pompalama ışını saçılır. UBS ve URS arasındaki biçimsel benzerliğe rağmen, fiber Brillouin yükselteçlerin çalışmasını oldukça etkileyerek, UBS'yi URS'den ayıran üç önemli yanı vardır: 1) Sinyal ışını pompalama ışınına zıt yönde yayıldığında sadece yükseltme meydana gelir (geri pompalama konfigürasyonu); 2) URS ve pompalama frekansına bağlı olarak karşılaştırılırsa, UBS'de Stokes kayması binde birden daha küçüktür ( $\sim 10$  GHz). 3) Brillouin kazanç spektrumu son derece dar bir band genişliğine sahiptir  $< 100$  MHz.  $v_A/c$  oranının oldukça küçük bir değeri bu farkların merkezini oluşturur, burada  $v_A$  silika içindeki akustik hız ve  $c$  ışık hızıdır. Fiber Sahip oldukları dar band genişliği nedeniyle FBY'lerin, optik sistemlerde güç yükselteci, ön yükselteç veya hat yükselteci olarak kullanımı çok yaygın değildir. Bu nedenle benzer özelliklerle, karışık ve çok kanallı haberleşme sistemlerinin bazı yeni uygulamaları için kullanılmıştır.

UBS, akustik bir dalganın pompalama ışınıyla saçılması gibi gösterilebilir, Stokes kayması  $\Omega = \omega_p - \omega_s$  akustik frekansa karşılık gelir ve dispersiyon bağıntısına uygun olmalıdır;

$$\Omega = |k_A|v_A = 2v_A|k_p|\sin(\theta/2) \quad (2.1)$$

burada dizideki akustik dalga vektörü  $k_A = k_p - k_s$  faz-uyum şartlarına uyar,  $k_p$  ve  $k_s$  sırasıyla pompa ve sinyal ışınlarının dalga vektörleridir ve  $\theta$  aralarındaki açıdır.

Eş. 2.1’de elde edilir, pratik durumda  $k_p \approx k_s$  kullanılır. Eş. 2.1’de görülen  $\Omega$  sıfıra eşitlendiğinde ileri yönde ( $\theta = 0$ ) ve maksimum değerinde geri yöndedir ( $\theta = \pi$ ). TMF’lerde ışık sadece ileri ve geri yönlerde ilerler. Bu sebepten UBS sadece  $\Omega_B = 2v_A |k_p|$ ’de bir frekans kayması ile geri yönde meydana gelir.  $k_p = 2\pi\bar{n}/\lambda_p$  kullanılarak Brillouin kayması;

$$v_B = \Omega_B / 2\pi = 2\bar{n}v_A / \lambda_p \quad (2.2)$$

bulunur ve burada  $\lambda_p$  pompalama dalga boyu,  $\bar{n}$  ise temel fiber modunun etkin indeksidir. Şayet silika fiber için tipik değerler olan  $v_A = 5,96$  km/s ve  $\bar{n} = 1,45$  değerlerini kullanırsak,  $\lambda_p = 1,55$   $\mu\text{m}$ ’de  $v_B = 11,1$  GHz’dir. Eş. 2.2 ’deki  $v_B$  skalası pompa dalga boyu ile değiştirilebilir. UBS kazanç spektrumu akustik dalganın düşüş zamanı veya aynı şekilde akustik fotonun ömrü ( $T_B$ ) tarafından belirlenir. Akustik dalgaları  $\exp(-t/T_B)$  sönümünde farz edersek, Brillouin kazancını bir Lorentzian spektral profili verir [75];

$$g_B(\Omega) = \frac{g_B(\Omega_B)}{1 + (\Omega - \Omega_B)^2 T_B^2} \quad (2.3)$$

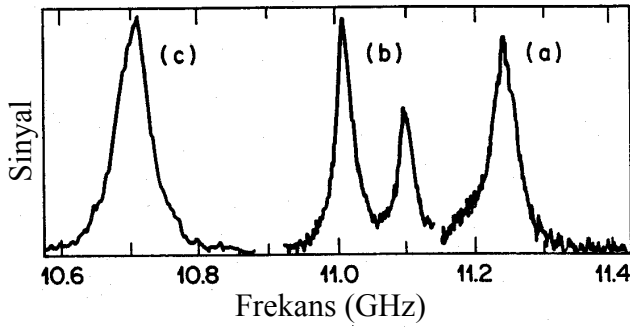
Brillouin kazanç spektrumu iki seviyeli lazer sistemine benzer. Tipik olarak  $T_B \approx 10$  ns ve  $\Delta v_B < 100$  MHz’dir. Şekil 2.6’da TMF’de üç farklı tür için  $\lambda_p = 1,525$   $\mu\text{m}$ ’de ölçülmüş Brillouin kazanç spektrumu görülmektedir. Brillouin kayması  $v_B$  ve kazanç band genişliği  $\Delta v_B$ ’nin ( $\Delta v_B = (\pi T_B)^{-1}$ ) her ikisi de fiberden fibere değişirler çünkü fiber özü içinde katkı bulunur ve ışık doğal kılavuzlanır.

Şekil 2.6’daki (a) fiber etiketinde neredeyse katkısız silika özü vardır (germanyum dioksit yoğunluğu mol başına  $\sim 0,3\%$ ). Ölçülen Brillouin kayması denklem Eş. 2.2 ile mutabakatla  $v_B = 11,25$  GHz’dir. Brillouin kayması (b) ve (c) fiberleri için fiber özündeki germanyum dioksit yoğunluğuna bağlı olarak tersine azalır. (b) fiberindeki



çift tepeli yapı, öz içinde homojen olmayan bir germanyum dioksit dağılımının sonucudur. Farklı bir uygulamada, fiberin öz ve yelek bölgesinde akustik hızların farklı olması sonucunda üç tepeli bir Brillouin kazanç spektrumu elde edilmiştir [76].

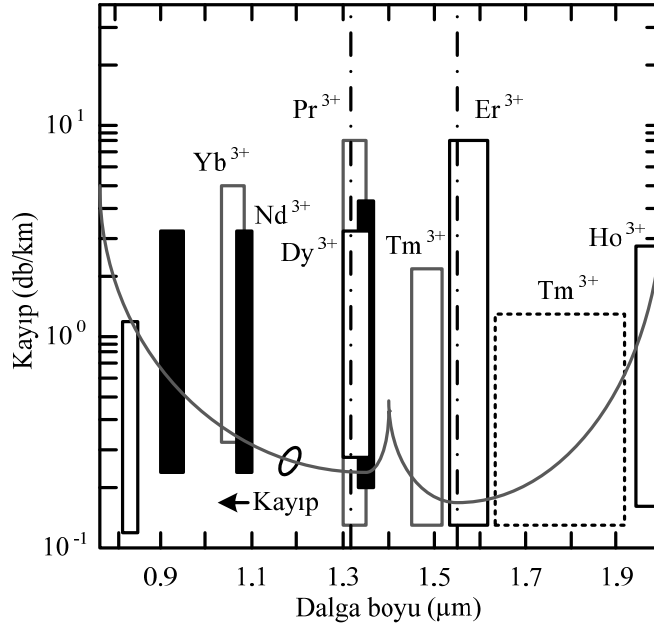
Şekil 2.6'daki kazanç band genişliği hacimli silika için beklenenden daha geniştir ( $\lambda_p = 1,525 \mu\text{m}$ 'de  $\Delta\nu_B \approx 17 \text{ MHz}$ ). Bu değer, optik fiberlerin akustik modlarının doğal kılavuzlanmasından dolayı bir parça artar. Bu nedenle, fiber uzunluğu boyunca öz kesit alanındaki homojen olmayan dağılım azaltılabilirse band genişliği çok daha fazla artar. Çünkü her bir fibere özgü homojen olmama özelliği vardır, Brillouin kazanç band genişliği genel olarak farklı fiberlerde farklıdır ve 100 MHz'in üzerindedir. Tipik olarak 1,55  $\mu\text{m}$  civarındaki  $\lambda_p$  'de 30-100 MHz değerlerindedir.



Şekil 2.6. Germanyum dioksit katkı ve farklı yapıya sahip üç fiber için  $\lambda_p = 1,525 \mu\text{m}$ 'de ölçülmüş Brillouin kazanç spektrumu: (a) silika özlü fiber; (b) basılmış kılıflı fiber; (c) dispersiyon kaymalı fiber [75].

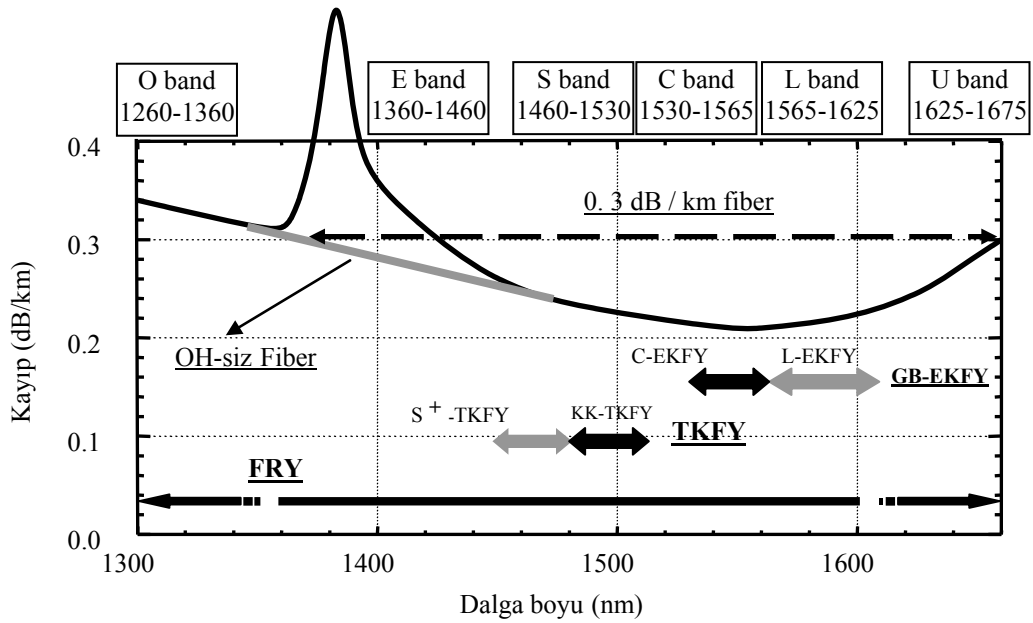
### 2.2.2. Nadir toprak elementleri ile katkılandırılmış yükselteçler

NTKFY, neodmiyum ( $\text{Nd}^{3+}$ ), erbiyum ( $\text{Er}^{3+}$ ), praseodimyum ( $\text{Pr}^{3+}$ ), iterbiyum ( $\text{Yb}^{3+}$ ), tulyum ( $\text{Tm}^{3+}$ ), holmiyum ( $\text{Ho}^{3+}$ ), disprosyum ( $\text{Dy}^{3+}$ ) katkı fiber yükselteçlerdir [76]. Farklı katkı malzemeleri kullanılarak pompalama ve sinyal dalga boyu, kazanç ve gürültü parametreleri değiştirilmekte ve uygulama alanına göre fiber yükselteç çeşitliliği sağlanmaktadır. Şekil 2.7'de silika fiberin zayıflama eğrisi ve bazı nadir toprak iyonlarının çalışma bandları görülmektedir.



Şekil 2.7. Silika fiberin zayıflama karakteristiği ve bazı nadir toprak iyonlarının yayılım bandları [77].

Şekil 2.8'de ise geniş band fiber optik haberleşmede çeşitli dalga boylarında kullanılan optik yükselteçler görülmektedir. Şekilde görülen GB-EKFY geniş band da çalışan EKFY'yi (C+L band), KK-TKFY ise kazancı kaydırılmış tulyum katkıli fiber yükselteci göstermektedir.



Şekil 2.8. Geniş band fiber haberleşmesinde fiber kayıp eğrisine karşılık optik yükselteçlerin yeri

### 2.3. Optik Yükselteçlerin Karşılaştırılması

YOY'lar küçük boyut ile yüksek kazanç (30 dB üzerinde), geniş band genişliği (40 nm üzerinde) ve çok düşük akım harcaması sağlarlar. YOY'ların dezavantajı, geri dönüş zamanında düşük kazançtan dolayı doyum bölgesinde komşu darbeler arasında girişim meydana gelmesi ve bunun maksimum bit oranını sınırlamasından dolayı giriş sinyali gücünün kabul edilebilir şekilde azalmasıdır. 100 Gbps'in üzerinde erbiyum yükselteçler ile önemli olmayan bozulma gözlemlenirken YOY'lar 25 Gbps çıkış sinyalinde önemli seviyede gürültülü darbe örneği üretirler [78]. Ek olarak YOY'ların dezavantajı YOY ile optik fiber arasındaki yüksek kuplaj kaybıdır. Kayıplar fiberden fibere kazanç ve etkin gürültü faktörü ile azaltılır. Kayıplar 10 dB'ye kadar ulaşabilir [79].

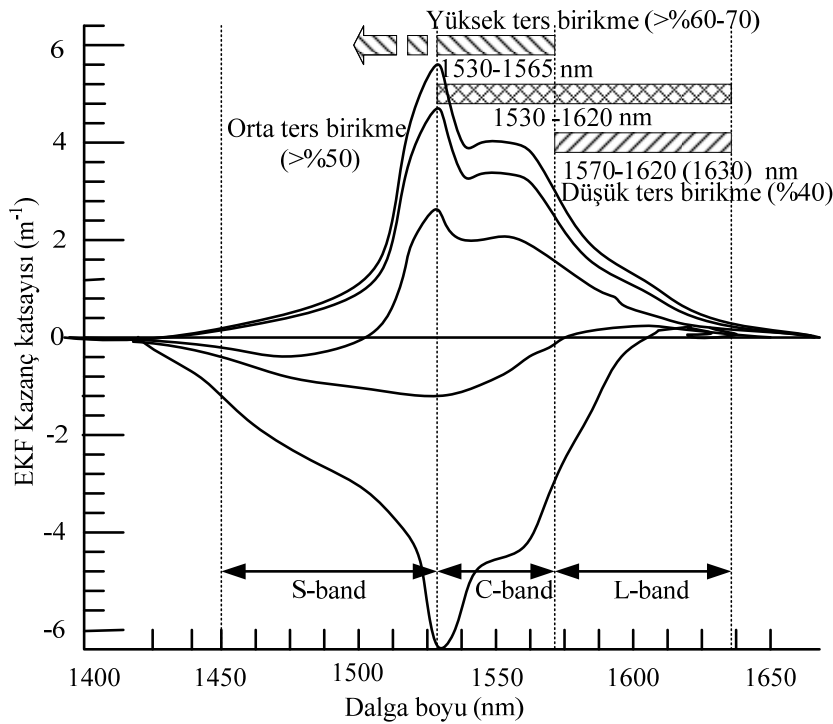
FRY ve EKFY'lerin her ikisi de fiberde optik sinyali yükseltirken pompalama kaynağından sinyale enerji transfer ederler. FRY'lerde, fiber içindeki enerji transferinin etkisi uyarılmış Raman saçılması olarak bilinir. FRY'ler düşük gürültü faktörü, düşük bağlantı kaybı, yüksek kazanç, yüksek çıkış gücü ve yüksek band genişliğine (95 nm civarı) sahiptir. FRY'lerin başlıca dezavantajı verimlerinin düşük olmasıdır [80].

EKFY'ler, çok düşük ek kaybı, yüksek kazanç (40 dB üzerinde), yüksek band genişliği (60 nm civarı), çok düşük çevrim kaybı ve yüksek verime sahiptir. İlave olarak, erbiyum yükselteçler ön, hat ve son yükselteç olarak kullanılabilir gibi telekomünikasyonda dağıtılmış yükselteç olarak kullanılabilir [72, 79].

### 3. SİSTEMDE KULLANILAN OPTİK YÜKSELTEÇLER

#### 3.1. Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçler

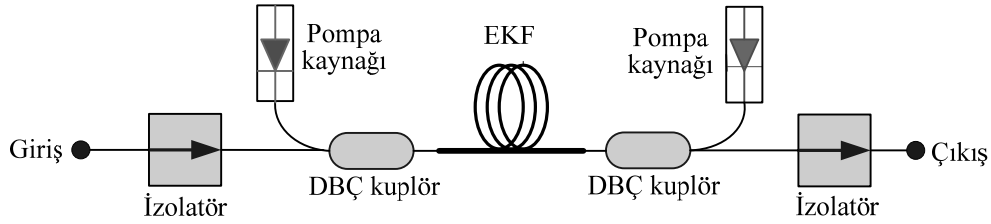
Orta ve uzun mesafe optik iletimde genellikle optik fiberin zayıflamasının minimum olduğu 1550 nm civarındaki dalga boylarına sahip sinyaller kullanılır. EKFY,  $\text{Er}^{3+}$  aktif iyonunu ve çoğunlukla 1550 nm sinyal yükseltmesinde kullanılır. Yüksek kazanç ve düşük gürültü özelliklerine sahip EKFY S band (1460-1530 nm) içerisindeki 1490-1520 nm bölgesinde, C band (1530-1565 nm) içerisindeki 1530-1565 nm bölgesinde, L band (1565-1625 nm) içerisindeki 1570-1600 nm bölgesinde kullanılabilir. Erbiyum katkılı fiberin kazanç spektrumu Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1. Erbiyum katkılı fiberin kazanç spektrumu [81].

EKFY’yi çekici yapan nedenlerden biri, tasarımdaki sadeliğidir. İletim hattında bir pompalama kaynağı, pompa ve optik sinyallerini birleştirip EKFY’ye aktaran dalga boyu bölme çoğullayıcı, sinyal geri dönüş kayıplarını engellemek için kullanılan optik izolatörler EKFY’nin temel yapısını oluşturmaktadır. İzolatörler olmazsa,

sistemin ideal olmayan eklerden, çoğullayıcılardan, birleştiricilerden v.s. kaynaklanan yansımalar EKFY’de yükseltilebilir. Bunun en kötü sonucu kararsızlığa ve gürültü faktörünün yükselmesine sebep olmasıdır. EKFY’nin temel yapısı Şekil 3.2’de görülmektedir.

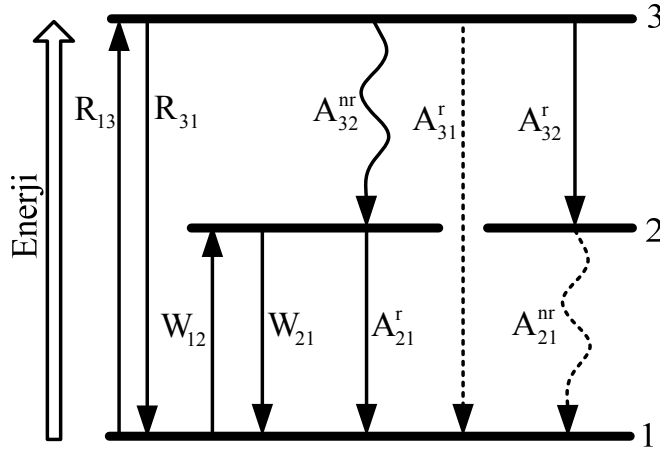


Şekil 3.2. EKFY'nin temel yapısı

Pompa ve optik sinyali EKF'ye aktaran dalga boyu bölmeli çoğullama (DBÇ) oldukça küçük kayıplara sahiptir (0,2 dB'nin altında). Katkılı fiberin temel malzemesi silika olup öz bölgesindeki erbiyum ve olası diğer katkı malzemeler ile standart telekomünikasyon fiberlerinden farklıdır. EKF'ler referans alındığında iki avantaja sahiptir. Ürün, düşük maliyetli yüksek kaliteli fiber üretiminin yerleşik düzenini kullanır ve katkılı fiber ile bunun kullanıldığı iletim ortamı olan standart fiberler arasındaki benzerlik, az kayıplı eklerle (kaynak bağlantılarıyla) basit birleştirme olanağını sağlar [72, 81].

### 3.1.1. EKFY'nin atomik oran denklemleri

Şekil 3.3'de görülen üç seviyeli lazer sisteminin enerji seviyeleri, 1. seviye toprak seviyesi, 2. seviye uzun ömürlü bir  $\tau$  tarafından karakterize edilen yarı kararlı seviye ve 3. seviye pompalama seviyesidir. Bu analizde üç seviyeli sistemde toprak seviyesinden 3 nolu seviyeye lazer geçişi dikkate alınmıştır. Bu durum pratikte 980 nm'lik pompalama dalga boyunun kullanılmasına karşılık gelir.



Şekil 3.3. Temel üç seviyeli lazer sistemi enerji seviye diyagramı [82].

Şekil 3.3’de, 1. ve 2. seviyeler arası lazer geçişi olmaktadır.  $R$ ,  $W$  ve  $A$  sırasıyla pompalama oranı, uyarılmış yayınım oranı ve kendiliğinden yayınım oranı,  $r$  ve  $nr$  üst sembolleri ise sırasıyla ışıklı ve ışısız yayınımı göstermektedir.

1. seviye’den 3. seviyeye pompalama oranı  $R_{13}$  ve 3. seviye ile 1. seviye arasındaki pompalama oranı  $R_{31}$ ’dir. 3. seviyeye karşılık gelen uyarılmış durumda düşmenin iki olasılığı vardır; ışıklı oran ( $A_3^r = A_{32}^r + A_{31}^r$ ), ışısız oran ( $A_{32}^{nr}$ ). Seviye 3’ten kendiliğinden düşmede varsayılan ışısız düşmedir ( $A_{32}^{nr} \gg A_3^r$ ). 1. ve 2. seviye arasındaki uyarılmış soğurum ve yayınım oranları sırasıyla  $W_{12}$  ve  $W_{21}$ ’dir. Kendiliğinden ışıklı ve ışısız uyarılmış durumda 2. seviyeden düşmeye neden olur.  $A_2 = A_{21}^r + A_{21}^{nr}$  ile  $A_{21}^r = 1/\tau$ , burada  $\tau$  flüoresan ömrü olarak tanımlanır. Varsayılan kendiliğinden düşme aslında ışımadır ( $A_{21}^r \gg A_{21}^{nr}$ ). Aşağıdaki gibi seviye 2 ve seviye 3’de kendiliğinden düşme sadece  $A_{21}$  ve  $A_{32}$  gibi görülmektedir.  $\rho$  lazer iyon yoğunluğu ve  $N_1$ ,  $N_2$  ve  $N_3$  sırasıyla 1, 2 ve 3 enerji durumlarındaki atomların oransal yoğunlukları veya popülasyonlarıdır.  $N_1 + N_2 + N_3 = \rho$

Bunlara karşılık gelen atomik oran denklemleri yazılabilir:

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

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

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

Sistemde popülasyonların zamanla değişmediği kararlı durumları göz önüne alınmıştır. Bu durumda  $dN_i/dt = 0$  ( $i=1,2,3$ ).  $a = R_{31} + A_{32}$  ve  $b = W_{21} + A_{21}$  olur. Eş. 3.2 ve 3.3'den aşağıdaki denklemler elde edilir [82]:

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

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

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

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

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

halini alır. Eş. 3.6 ve 3.7'de  $A_{21}$ ,  $A_{32}$  terimleri ile  $a$  ve  $b$  tanımlarını yerine koyulursa:

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

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

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

$$N_1 = \rho \frac{1 + W_{21}\tau}{1 + R\tau + W_{12}\tau + W_{21}\tau} \quad (3.10)$$

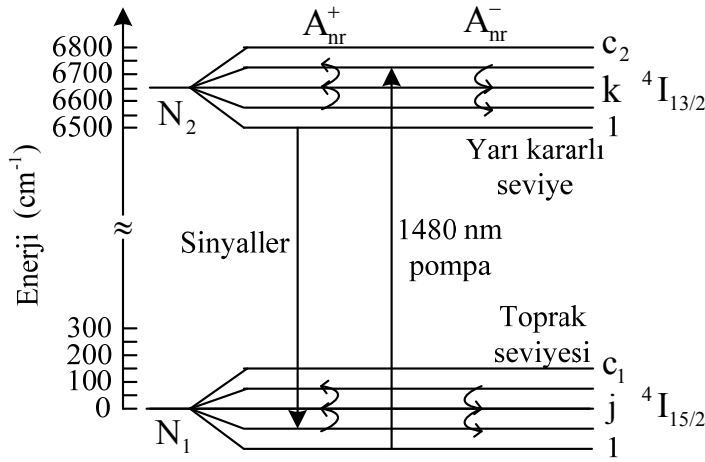
$$N_2 = \rho \frac{R\tau + W_{12}\tau}{1 + R\tau + W_{12}\tau + W_{21}\tau}$$

bulunur. Bu sonuçla  $N_3 = \rho - N_1 - N_2 = 0$  olur. Hakim ışımasız düşme karşısında ( $A_{32}$ ) pompalama seviyesindeki popülasyon ihmal edilebilir ve  $A_{32}$ 'den yarı kararlı seviyeye düşer [82]. 3 seviyeli model 980 nm'lik pompalamaya karşı gelir. 1480 nm'lik pompa kullanıldığında ise direk yarı kararlı seviyeye pompalandığından 3 seviyeli analize gerek yoktur ve ifadeler 2 seviyeye indirgenerek kullanılabilir.

### 3.1.2. Stark alt seviyeli lazer sistemlerinde atomik oran denklemleri

EKFY 1480 nm'de pompalandığı zaman, en basit analizinde iki seviyeli yükseltme sisteminin enerji seviyeleri dikkate alınır. Çünkü Stark ayrılmaları 1480 nm'de pompalanan  $Er^{3+}$ 'un direk olarak toprak seviyesinden yarı kararlı seviyeye pompalanmasına izin verir.





Şekil 3.4. Stark aralıklı iki seviyeli lazer sisteminin enerji seviye diyagramı.  $A_{nr}^{\pm}$  sembolleri bitişik Stark alt seviyeleri arasındaki termalizasyon oranlarını gösterir.

Alçak ve yüksek seviyelerin tümünün enerji değerleri, olası geçişlerin bağlı şiddetleri ile homojen ve homojen olmayan spektral kesite bağlıdır. Her bir seviyedeki elemanın sayısından dolayı kesit sadece deneysel olarak ölçülerek bulunabilir. İki seviyeli yaklaşımı kullanan geleneksel Einstein analizi, Fuchtbauer-Ladenburg ilişkisini verir:

$$\sigma_i(\nu) = \frac{(\lambda/n)^2 g_i(\nu)}{8\pi\tau} \quad (3.11)$$

Burada  $g_i(\nu)$  çizgi fonksiyonu olup  $\nu$  frekansında soğurum ve yayınım spektrumlarının normalize değeridir. İki seviyeli sistem modelinde soğurum ve yayınım kesitleri eşit olmalıdır. EKFY için bu durum geçerli değildir. Çünkü alt ve üst lazer seviyelerinde birkaç Stark alt seviyesi vardır (Şekil 3.4).

İki seviyenin bağlı popülasyonu Boltzmann teorisinden 2 alt indisi üst seviyeyi göstermek kaydı ile  $T$  sıcaklığında ayrılmış enerji  $\Delta E$  aşağıda verilmiştir:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) \quad (3.12)$$

burada  $k_B$  Boltzmann sabitidir.

Einstein analizine alternatif olarak McCumber teorisi vardır [83]. Bu teori herhangi bir frekansta iki kesitin oranını veren uyarılmış enerjinin sıcaklığa bağımlılığı kavramını kullanır. Enerji seviyeleri hakkında bazı varsayımlar ile bu metot tahminde bulunabilir. Yayınım ömrü ve soğurum kesitinden yayınım kesitine doğruluğu yüksektir [84, 85]. Bununla beraber önceki bir kesiti tahmin edemez. Çünkü EKFY'nın sıcaklığa bağımlılığının genel bir kuralı yoktur [86, 87].

Cam içerisinde meydana gelen kalıcı elektrik alan kristal veya ligand (molekül bağlantılı) alan olarak isimlendirilir. Ligand alanı Stark etkisini indüklemekte ve sonuçta alt enerji seviyelerine ayrılmaktadır. Her bir enerji seviyesi 1 ve 2 olarak adlandırılmıştır ve burada toplam orbital momentumu  $J$ ;  $c = J + 1/2$  enerji alt seviyelerinin her bir çok katman içerisindeki ayrılmaları,  $c$  ise toplam enerji çakışıklığını göstermektedir. Maksimum Stark ayrılması gerçekten, ana enerji seviyesi ile 1 ve 2 seviyeleri arasındaki enerji ayrılmasının büyük bölümünde görülmektedir [82].

Termalizasyon etkisi ile çok katman içindeki sabit popülasyon dağılımı devam eder. Şekil 3.4'de Stark çok katmanı ile enerji seviyelerinin şematik diyagramı görülmektedir. Seviye 1 ve 2'deki her bir çok katmana karşılık gelen toplam popülasyon yoğunlukları  $N_1$  ve  $N_2$ , bozulmalar ise  $c$  ile gösterilmiştir.  $k$  indisi 2 çok katmanının enerji alt seviyesi ( $k = 1, \dots, c$ ) olup her bir alt seviyenin popülasyonu  $N_{n,m}$ 'dir. Alt indisteki  $n$  lazer seviyesini,  $m$  ise çok katmanı göstermektedir.

Fonon veya titreşim kuantumu niceliğinin oluşması veya soğurumu ile iyonların uyarılmaları veya uyarılmamalarına karşılık, ışımsız oranlar  $A_{nr}^+$  ve  $A_{nr}^-$  ile her bir çok katman da termalizasyon işlemi meydana gelir. Genel ısı denge durumu:

$$A_{nr}^- N_{nm} = A_{nr}^+ N_{n,m-1} \quad (3.13)$$

ile verilir.  $(n, m)$  ve  $(n, m-1)$  alt seviyeleri arasındaki enerji farkı  $\Delta E_m = E_m - E_{m-1}$ 'dir ve  $N_{nm}/N_{n,m-1} = A_{nr}^+/A_{nr}^- = \exp(-\Delta E_m/k_B T)$  bağıntısını elde ederiz. Eş. 3.13 yeniden hesaplanırsa iyi bilinen şu bağıntıyı verir:

$$N_{nm} = \frac{\exp[-(E_m - E_{m-1})/k_B T]}{\sum_{m=1}^{c_m} \exp[-(E_m - E_1)/k_B T]} \overline{N_n} \equiv p_{nm} \overline{N_n} \quad (3.14)$$

burada  $p_{nm}$  Boltzmann dağılımıdır.

Şekil 3.4'de seviye 1 toprak seviyesi ve seviye 2 yarı kararlı seviyedir. Geçiş ömrü  $\tau = 1/\gamma$ ,  $K_p^{a,e}$  pompa soğurumu ve uyarılmış yayılım oranlarını,  $M_{12,21}$  ise yarı kararlı seviyedeki iki çok katman ( $N_{21}, N_{22}$   $Er^{3+}$  popülasyonunu gösterir) arasında ki uyarılmış soğurum ve yayılım oranlarını göstermektedir. Sistemde birçok alt seviye vardır. Burada bu alt seviyelerden ilk ikisi arasındaki ilişki incelenecektir. Eş. 3.12 yeniden yazılırsa;

$$\beta = \frac{N_{22}}{N_{21}} = \frac{A_{nr}^+}{A_{nr}^-} = \exp\left(-\frac{\Delta E_2}{k_B T}\right) \quad (3.15)$$

olur.  $E_{22}$  ve  $E_{21}$ 'i sırasıyla yarı kararlı seviyedeki alt seviyelerin üst ve alt seviyesi olarak tanımlarsak  $\Delta E_2 = E_{22} - E_{21}$  olur [88]. Bu iki alt seviyenin oran denklemleri yazılacak olursa,

$$\frac{dN_{22}}{dt} = K_p^a N_1 - K_p^e N_{22} + A_{nr}^- N_{21} - A_{nr}^+ N_{22} \quad (3.16)$$

$$\frac{dN_{21}}{dt} = M_{12} N_1 - M_{21} N_{21} - N_{21} / \tau - A_{nr}^- N_{21} + A_{nr}^+ N_{22} \quad (3.17)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = K_p^e N_{22} - K_p^a N_1 + M_{21} N_{21} - M_{12} N_1 + N_{21} / \tau \quad (3.18)$$

Böylece sabit şartlarda aşağıdaki denklemi elde ederiz:

$$N_{22} = \tau \left[ (\sigma_p^a N_1 - \beta \sigma_p^e N_{21}) \frac{I_p}{h\nu_p} + (\sigma_p^a N_1 - \sigma_p^e N_{21}) \frac{(I_s + I_{YKY}^\pm)}{h\nu_s} \right] \quad (3.19)$$

veya

$$\frac{N_{22}}{N} = \frac{\frac{I_p}{b_p^a} + \frac{(I_s + I_{YKY}^\pm)}{b_s^a}}{(1 + \beta) \frac{I_p}{b_p^a} + \beta \frac{I_p}{b_p^e} + (1 + \beta + \eta) \frac{(I_s + I_{YKY}^\pm)}{b_s^a} + 1} \quad (3.20)$$

Burada popülasyonun zamana göre değişimi  $dN_i/dt = 0$  ( $i = 1, 2$ ). Son iki denklemde  $b_p^{a,e} = h\nu_p / \tau\sigma_p^{a,e}$ ,  $b_s^{a,e} = h\nu_s / \tau\sigma_s^{a,e}$ ,  $\nu_p$  ve  $\nu_s$  pompalama ve sinyal frekansları, sırasıyla  $\sigma_p^{a,e}$  pompa ışınının uyarılmış soğurum ve yayınım kesitleri iken,  $\sigma_s^{a,e}$  sinyal ışınının uyarılmış soğurum ve yayınım kesitleri,  $I_p$  ve  $I_s$  pompa ve sinyal yoğunlukları ve  $I_{YKY}^\pm$  ileri (+) ve geri (-) optik yayınım yoğunlukları,  $\eta$  sinyal yayınım ve soğurum kesitleri arasındaki oran ve toplam  $Er^{3+}$  iyon dağılımı  $N$ ,  $N = N_1 + N_{21} + N_{22}$  veya  $\beta$  terimleri ile  $N = N_1 + (1 + \beta)N_{21}$  'dir.

### 3.1.3. Yayınım Denklemleri

Sinyal, pompa ve YKY güçlerinin yayınımları için farksal denklemler sırasıyla:

$$\frac{dP_s}{dz} = 2\pi \int_0^\infty I_s [\sigma_s^e N_{21}(r) - \sigma_s^a N_1(r)] r dr \quad (3.21)$$

$$\frac{dP_p}{dz} = \pm 2\pi \int_0^\infty I_p [\beta \sigma_p^e N_{21}(r) - \sigma_p^a N_1(r)] r dr \quad (3.22)$$

$$\frac{dP_{YKY}^{\pm}}{dz} = \pm 2h\nu_s \int_0^{\infty} 2\pi\sigma_s^e N_{21} f_{YKY}^{\pm}(r) r dr \pm 2\pi \int_0^{\infty} [\sigma_s^e N_{21}(r) - \sigma_s^a N_1(r)] P_{YKY}^{\pm} f_{YKY}^{\pm} r dr \quad (3.23)$$

dir. Burada  $f_{YKY}^{\pm}$  normalize edilmiş YKY yoğunluk profili,  $P_{YKY}^{\pm}$  z yönünde Yükseltilmiş kendiliğinden yayınım gücü ve YKY spektrumu ileri yönde olduğu kadar geri yönde de tanımlanmalıdır.

$$P_{YKY}^{\pm} = P_{YKY}^{+} + P_{YKY}^{-} \quad (3.24)$$

Pompa, sinyal ve YKY daha pratik alınırsa  $f_p(r) \approx f_s(r) \approx f_{YKY}^{+}(r) = f(r)$  varsayılmış ve aynı yönde + z yönünde yayıldığı varsayılmıştır [84, 89, 90].

Çıkış sinyal gücü  $z = L$  alınırsa yükselteç kazancı ve boyu arasındaki ilişki;

$$\frac{P_s(L)}{P_s(0)} = \exp(-\alpha_s L) \exp\left(\frac{h\nu_s}{P_s^{int}} \left[ \frac{P_p(0) - P_p(L)}{h\nu_p} + \frac{(P_s(0) + P_{YKY}^{+}(0)) - (P_s(L) + P_{YKY}^{+}(L))}{h\nu_s} \right]\right) \quad (3.25)$$

olarak elde edilir. Burada  $P_s^{int}$  sinyal ışınının gerçek doyum gücüdür ve denklemi aşağıda görülmektedir:

$$P_s^{int} = \frac{h\nu_s (A_{eff} - 2\tau\sigma_s^e\Gamma)}{\tau\sigma_s^a\Gamma(1 + \beta + \eta)} \quad (3.26)$$

Burada  $\eta = \sigma_s^e / \sigma_s^a$  verimi göstermektedir. Maksimum kazanç için  $dP_s / dP_p = 0$  'dır. Şayet maksimum kazanç  $G = P_s(L) / P_s(0)$  olarak tanımlanırsa aşağıdaki denklemden çözülebilir:

$$\frac{\nu_p}{\nu_s} \frac{P_s(0)}{P_p(L)} (G - 1) + \frac{\sigma_p^a}{\sigma_s^a} \ln(G) = \frac{P_p(0)}{P_p(L)} - 1 - \ln\left(\frac{P_p(0)}{P_p(L)}\right) \quad (3.27)$$

### 3.1.4. Yükseltilmiş kendiliğinden yayınım

Optik yükselteçlerde gürültü oluşumu aslında lazer iyonlarının kendiliğinden uyarımının bir etkisidir. Bazı iyonlar belirli bir süre sonunda toprak seviyesine geri dönerken bu arada bir foton yayarlar. Bu foton karakteristiği, gelen sinyalle uyumlu değildir ve uyarılmış yayınımda oluşan fotona zıttır. Böylece kendiliğinden oluşan fotonlar toplanarak fiber yükselteci tarafından çoğaltırlar ve sinyal ışığına gürültü sinyali eklenmiş olur. Bu temel gürültüye YKY denir.

Sonsuz küçük  $dV$  hacimli bir lazer ortamında  $+z$  yönünde kendiliğinden üretilen ve fibere aktarılan  $\nu$  ve  $\nu + \delta\nu$  arasındaki frekanslarda rastgele kutuplanmış fotonların sayısı [85]:

$$dn(\nu) = A_{21}g(\nu)\delta\nu\frac{\Delta\Omega}{4\pi}dV\int_s N_2(r,\theta)\overline{\psi}_s(r,\theta)rdrd\theta \quad (3.28)$$

ile verilir. Burada  $g(\nu)$  çizgi fonksiyonu [91, 92]  $A_{21} = 1/\tau$  kendiliğinden düşme oranı,  $\Delta\Omega/4\pi$  fiber tarafından kendiliğinden ışığın yakalama oranı ve integral terimi de kılavuzlanmış mod ve uyarılmış iyonların yoğunluk dağılımları arasındaki örtüşmeyi (overlap integrali) göstermektedir. Çizgi fonksiyonu  $g(\nu) = 8\pi n^2 \tau \sigma_e(\nu)/\lambda_s^2$  ile tanımlanır, burada  $n$  ortam kırılma indisidir [91]. Yoğun açılı yakalaması  $\Delta\Omega$  ile tanımlanabilir, kılavuzlanmış lazer boşluklarında, ışın enerjisini yüzeyinde soğuran moda karşılık gelir.  $\Delta\Omega = \lambda_s^2/n^2 \pi \omega_s^2$  ve  $dV = \pi \omega_s^2$  ile tanımlanır. Birim frekans başına kendiliğinden yayınım gücü  $dP_{KY} = h\nu dn(\nu)$ 'dir. Bu tanımlamalarla  $\delta\nu$  band genişliğinde kendiliğinden yayınım oranı,

$$\frac{dP_{KY}}{dz} = 2P_0\sigma_e(\nu)\int_s N_2(r,\theta)\overline{\psi}_s(r,\theta)rdrd\theta \quad (3.29)$$

dir. Burada  $P_0 = h\nu\delta\nu$ ,  $\delta\nu$  band genişliğinde, kendiliğinden yayılmış bir foton gürültüsünün gücüdür.  $P_0$  terimi eşdeğer giriş gürültüsü olarak ta kullanılır. Eş.

3.28'deki 2 faktörü fiberin her iki kutuplu modlarında meydana gelen kendiliğinden yayınımları göstermektedir.  $\lambda_s$  dalga boyunda ve  $\delta\nu$  band genişliğindeki toplam sinyal gücünün ifadesi:

$$\frac{dP_s(\lambda_s)}{dz} = \sigma_a(\lambda_s) 2\pi \int_s \{ \eta(\lambda_s) N_2(r) [P_s(\lambda_s) + 2P_0] - N_1(r) P_s(\lambda_s) \} \overline{\psi}_s(r) r dr \quad (3.30)$$

dir. Yukarıdaki denklem, kendiliğinden oluşan gürültünün yükseltilmesi ve sinyalin yükseltilmesi olaylarının her ikisini de tanımlar. Şayet uyarılmış durumdaki  $N_2$  popülasyonu sıfırdan farklı ise, Eş. 3.29'un sağ tarafındaki sabit  $2P_0$  terimi fiber boyunca optik gürültünün oluşmasına neden olur, fiberin girişinde optik sinyal olup olmadığını,  $\delta\nu$  band genişliğindeki kılavuzlanmış toplam YKY'yi gösterir. YKY negatif z yönünde oluşur ve sinyalin tersi yönünde yayılır.

#### 3.1.4. Pompalama, sinyal ve YKY için genel oran denklemleri

Bir önceki bölümde YKY'yi de kapsayan sinyal ve pompalama denklemleri için oran denklemleri elde edilmiştir. Bu denklemler  $N_1$  ve  $N_2$  atomik popülasyonlarının fonksiyonlarını ifade eder. Bu bölümde ise sinyal ve pompalama yoğunluk dağılımları ve doyum güçleri incelenmiştir.

Kararlı durum atomik popülasyonları  $N_1$  ve  $N_2$ 'yi veren Eş. 3.10'da,  $R = R_{13}$  pompalama oranı, seviye 1 ve 2 arasındaki  $W_{12,21}$  uyarılmış yayınım oranı, seviye 1 ve 3 arasındaki pompalama soğurumu oranları gösterilmiştir.

$W_{21}$  yayınım oranı,  $r$  fiber koordinatı ve öz eksen uzunluğu,  $I_s(r, z)$  oransal sinyal yoğunluğu alınarak [82],

$$W_{21}(r, z) = \frac{\lambda_s^2}{8\pi n^2 h \nu_s \tau} I_s(r, z) g(\nu_s) \quad (3.31)$$

ile verilir. Burada  $v_s = c/\lambda_s$  'dir. Yeni mod zarfı  $\bar{\psi}_s(\mathbf{r})$  ile tanımlanır, birim tepe değeri,

$$\psi_s(\mathbf{r}) = \pi\omega_s^2 \bar{\psi}_s(\mathbf{r}) \quad (3.32)$$

Eş. 3.32 ve  $g(v_s) = 8\pi n^2 \tau \sigma_e(v_s)/\lambda_s^2$  ifadelerinin her ikisi de yerine konulursa, çizgi fonksiyonu için Eş. 3.31'den aşağıdaki ifadeler elde edilir:

$$W_{21}(\mathbf{r}, z) \tau = \frac{\sigma_e(v_s) \tau}{h\nu_s} I_s(\mathbf{r}, z) = \frac{\sigma_e(v_s) \tau}{h\nu_s \pi\omega_s^2} P_s(z) \psi_s(\mathbf{r}) \quad (3.33)$$

Soğurum oranı aşağıdaki gibi tanımlanır,

$$W_{12}(\mathbf{r}, z) \tau = \frac{\sigma_a(v_s) \tau}{h\nu_s \pi\omega_s^2} P_s(z) \psi_s(\mathbf{r}) \quad (3.34)$$

burada  $\sigma_a(v_s) Er^{3+}$  camda  $v_s$  geçiş bölümündeki soğurumdur. Eş. 3.33 ve 3.34'den  $W_{21} = (\sigma_e/\sigma_a) W_{12} = \eta W_{12}$ , temel çok seviyeli sistemlerinin alışılan  $W_{21} = (g_1/g_2) W_{12}$  bağıntısı ile birebir uygulanabilir. Eş. 3.33 ve 3.34 tanımları Stark aralıklı lazer sistemlerinin soğurum ve yayınım oranları için değiştirilebilir.  $Er^{3+}$  cam için yoğunluk matris modeli tanımlanmıştır [82].

$R(\mathbf{r}, z)$  pompalama oranı için  $W_{12}$  'ye benzer olarak tanımlanır:

$$R(\mathbf{r}, z) \tau = \frac{\sigma_a(v_p) \tau}{h\nu_p \pi\omega_p^2} P_p(z) \psi_p(\mathbf{r}) \quad (3.35)$$

burada  $\sigma_a(v_p)$ ;  $v_p$  geçiş bölümünde pompalama soğurumu ve  $P_p(z)$ ,  $\psi_p(\mathbf{r})$  zarfının pompalama modu içine kuplaj edilmiş  $v_p$  gücü ve yarıçap  $\omega_p$  'dir.

Temel lazer sistemleri için doyum yoğunluğu:



$$I'_{\text{sat}}(\nu) = \frac{4\pi n^2 h\nu}{\lambda^2 g(\nu)} = \frac{h\nu}{\sigma_e(\nu)\tau} \quad (3.36)$$

olup, Eş. 3.33 ve 3.34'de yayınım ve soğurum oranları  $W_{21} = I_s / (\tau I'_{\text{sat}})$  ve  $W_{12} = I_s / (\eta \tau I'_{\text{sat}})$  olarak yazılabilir. 3.36'de yerine yazılırsa  $I_{\text{sat}}$  farklı doyum yoğunluğu,

$$I_{\text{sat}}(\nu) = \frac{h\nu}{[\sigma_a(\nu) + \sigma_e(\nu)]\tau} = \frac{h\nu}{\sigma_a(\nu)[1 + \eta(\nu)]\tau} = \frac{\eta(\nu)}{1 + \eta(\nu)} I'_{\text{sat}}(\nu) \quad (3.37)$$

$\nu_s$  sinyali frekansına karşılık doyum gücü:

$$P_{\text{sat}}(\nu_s) = \frac{h\nu_s \pi \omega_s^2}{[\sigma_a(\nu_s) + \sigma_e(\nu_s)]\tau} = \frac{h\nu_s \pi \omega_s^2}{\sigma_a(\nu_s)[1 + \eta(\nu_s)]\tau} \quad (3.38)$$

$\nu_p$  pompalama frekansı içinde benzer tanımlama yapılabilir. Bu tanımlamalarla pompalama, soğurum ve yayınım oranları,

$$W_{12}\tau = \frac{1}{1 + \eta_s} \frac{P_s(z)}{P_{\text{sat}}(\nu_s)} \psi_s(r) \quad (3.39)$$

$$W_{21}\tau = \frac{\eta_s}{1 + \eta_s} \frac{P_s(z)}{P_{\text{sat}}(\nu_s)} \psi_s(r) \quad (3.40)$$

$$R\tau = \frac{P_p(z)}{P_{\text{sat}}(\nu_p)} \psi_p(r) \quad (3.41)$$

$\eta_s = \eta(\lambda_s)$ 'dir. Eş. 3.41'de R pompalama oranı için  $\eta(\lambda_p) = 0$  veya  $\sigma_e(\lambda_p) = 0$  olduğu varsayılacaktır. Lazer sisteminde seviye 3'e pompalamada aslında ışımaz bozulma olur. Şayet sistemde seviye 2'ye pompalanıyorsa sinyal bandı içindeki

pompalama dalga boyu düşer.  $R = 0$  ve Eş. 3.39 ve 3.40'daki oranlar tanımlanırsa pompalama ve sinyal katkısı açıkça yazılabilir.

Eş. 3.39-3.41 kullanılarak Eş. 3.10'daki  $N_{1,2}$  kararlı durum popülasyonlarının ifadelerini optik güçlerin fonksiyonlarını ve tersleme mod profili kesin olarak yazılırsa,

$$N_1(r, z) = \rho(r) \frac{1 + \frac{\eta_s}{1 + \eta_s} \frac{P_s(z)}{P_{\text{sat}}(v_s)} \psi_s(r)}{1 + \frac{P_p(z)}{P_{\text{sat}}(v_p)} \psi_p(r) + \frac{P_s(z)}{P_{\text{sat}}(v_s)} \psi_s(r)} \quad (3.42)$$

$$N_1(r, z) = \rho(r) \frac{\frac{P_p(z)}{P_{\text{sat}}(v_p)} \psi_p(r) + \frac{1}{1 + \eta_s} \frac{P_s(z)}{P_{\text{sat}}(v_s)} \psi_s(r)}{1 + \frac{P_p(z)}{P_{\text{sat}}(v_p)} \psi_p(r) + \frac{P_s(z)}{P_{\text{sat}}(v_s)} \psi_s(r)} \quad (3.43)$$

elde edilir. Yukarıdaki gösterimi basitleştirilerek tüm normalize optik güçler ile bunlara karşılık gelen doyum güçleri yazılabilir [82]:

$$p = \frac{P_s(z)}{P_{\text{sat}}(v_s)} \quad (3.44)$$

$$q = \frac{P_p(z)}{P_{\text{sat}}(v_p)}$$

$$p_o = \frac{P_o(z)}{P_{\text{sat}}(v_s)} = \frac{\sigma_a(v_s)(1 + \eta_s)}{\pi\omega_s^2} \delta v \tau \quad (3.45)$$

Optik güçlerle onların doyum güçlerinin normalize değerlerini ayrı ayrı göstermek için  $(p, q, p_o)$  harfleri kullanılmıştır.  $q$  daima aşağıda gösterildiği gibi normalize pompalama gücüdür.

Üç seviyeli pompalama şeması için pompalama ve sinyal oranları Eş. 3.42-3.45 kompanzasyonu ile aşağıdaki biçimi alır:

$$\frac{dq}{dz} = -q\rho_o\sigma_a(v_p)\frac{2}{\omega_p^2}\int_s\frac{\rho(r)}{\rho_o}\psi_p(r)\left\{\frac{1+\frac{\eta_s}{1+\eta_s}p\psi_s(r)}{1+q\psi_p(r)+p\psi_s(r)}\right\} \quad (3.46)$$

$$\frac{dp}{dz} = \rho_o\sigma_a(v_s)\frac{2}{\omega_s^2}\int_s\frac{\rho(r)}{\rho_o}\psi_s(r)\times\left\{\frac{\eta_s\left[q\psi_p(r)+\frac{1}{1+\eta_s}p\psi_s(r)\right][p+2p_o]-\left[1+\frac{\eta_s}{1+\eta_s}p\psi_s(r)\right]p}{1+q\psi_p(r)+p\psi_s(r)}\right\} \quad (3.47)$$

İki seviyeli pompalama şeması için aşağıdaki denklemler elde edilir:

$$\frac{dq}{dz} = -q\rho_o\sigma_a(v_p)\frac{2}{\omega_p^2}\int_s\frac{\rho(r)}{\rho_o}\psi_p(r)\left\{\frac{\frac{\eta_s-\eta_p}{1+\eta_s}p\psi_s(r)+1}{1+q\psi_p(r)+p\psi_s(r)}\right\} \quad (3.48)$$

$$\frac{dp}{dz} = \rho_o\sigma_a(v_s)\frac{2}{\omega_s^2}\int_s\frac{\rho(r)}{\rho_o}\psi_s(r)\times\left\{\frac{\eta_s\left[\frac{1}{1+\eta_p}q\psi_p(r)+\frac{1}{1+\eta_s}p\psi_s(r)\right][p+2p_o]-\left[1-\frac{\eta_p}{1+\eta_p}q\psi_p(r)+\frac{\eta_s}{1+\eta_s}p\psi_s(r)\right]p}{1+q\psi_p(r)+p\psi_s(r)}\right\}rdr \quad (3.49)$$

İki seviyeli sistemde sinyal bandı içinde pompa olması durumunda Eş. 3.47'de  $q = 0$  ve  $p$  yerine  $p'$  koyulursa, kalan sinyal gücü  $p'$  olarak adlandırılabilir. Sırasıyla  $v_p$  ve  $v_s$ , pompa ve sinyal frekansını gösterir. Böylece, yalnızca  $v_s$  sinyal denklemini elde edilir. Eş. 3.47'de  $p'$  oransal güç terimi iki bileşenine ayrılırsa Eş. 3.49'da  $p\psi_s(r) + q\psi_p(r)$ ,  $p'\psi_s(r)$  olur.

$v_p$  pompalaması için, benzer şekilde Eş. 3.49 kullanılır, fakat alt indisler  $p, s$  değiştirilir ve gürültü terimi  $p_o$  sıfır alınır.  $v_p$  kendiliğinden yayınım oluşumu yükseltme olmayana kadar ihmal edilebilir. Yayınım ve soğurum oranları Eş. 3.10'daki atomik nüfuslar için yeniden yazılırsa benzer denklemler türetilir [82].

Eş. 3.46-3.49'daki denklemlere  $\rho_o$  parametresi eklenerek  $Er^{3+}$  yoğunluğunun tepe değeri gösterilebilir. Bu tanımla  $\rho(r)/\rho_o$  terimi normalize dağıtılmış  $Er^{3+}$  yoğunluğunu ve  $\rho_o\sigma_a(v_{p,s})$  terimleri soğurum katsayılarını göstermektedir. İki seviyeli pompalama şeması için genellikle koşulan şart  $\eta_s > \eta_p$ 'dir. Eş. 3.48'in sağ tarafındaki katsayı negatiftir. Bu üç seviyeli durumda pompa gücünün fiber boyunca soğurulduğu anlamına gelir. Eş. 3.48 ve 3.49'da iki seviyeli pompalama şeması için  $\eta_p$  sıfıra ayarlandığı zaman değer gözlemlenir, buradaki denklemlerde beklenen katsayı üç seviyeli pompalama sistemi için Eş. 3.46 ve 3.47'nin tam olarak azalmasıdır. Böylece 3.48 ve 3.49 denklemlerindeki oran iki ve üç seviyeli pompalama şemalarının her ikisinde  $\eta_p = 0$  iken kullanılabilir.

Kompleks oran denklemlerine fiziksel yorum verirsek, ilk varsayım  $q = 0$  iken pompalamanın kapalı olması ve sinyalde YKY oluşturan  $p$ 'nin ihmal edilmesidir. Eş. 3.49'dan aşağıdaki biçim elde edilir:

$$\frac{dp}{dz} = -p\rho_o\sigma_a(v_s)\frac{2}{\omega_s^2}\int_s\frac{\rho(r)}{\rho_o}\frac{\psi_s(r)}{1+p\psi_s(r)}rdr \quad (3.50)$$

Bu son sonuç göstermektedir ki, katkılı fiberde pompalama olmadığı zaman, sinyal soğurulmaktadır. Giriş sinyal gücü  $P_s(0)$ , doyum gücünden  $P_{sat}(v_s)$  çok yüksektir,  $p(0) = P_s(0)/P_{sat}(v_s) \gg 1$ . Eş. 3.50'deki soğurum katsayısı yok olur, bu da fiberin saydamlaştırıldığı anlamına gelir. Bu usulle seviye popülasyonlarının eşitleme işlemi  $\eta_s N_2 = N_1$ 'e uygun olarak elde edilir. Bu, Eş. 3.10'da  $\tau W_{2,21} \gg 1$  ve  $R = 0$  limitleri ile  $\eta_s W_{12} = W_{21}$  bağıntısı kullanılarak elde edilir.

Şayet pompalama açıksa, giriş sinyal gücü fiber z koordinatında düşük tutularak  $p \ll q$  ve YKY ihmal edilerek Eş. 3.49'dan aşağıdaki denklemler elde edilir:

$$\frac{dp}{dz} = p\rho_o\sigma_a(v_s)\frac{2}{\omega_s^2}\int_s\frac{\rho(r)}{\rho_o}\psi_s(r)\frac{\eta_s - \eta_p q\psi_p(r) - 1}{1 + \eta_p q\psi_p(r)}rdr \equiv p\rho_o\sigma_a(v_s)\Gamma(q) \quad (3.51)$$

$$\Gamma(q) = 2\pi\int_s\xi(r,q)rdr \quad (3.52)$$

$$\xi(r,q) = \frac{\rho(r)}{\rho_o}\psi_s(r)\frac{Uq\psi_p(r) - 1}{1 + q\psi_p(r)} \quad (3.53)$$

$$U = \frac{\eta_s - \eta_p}{1 + \eta_p} \quad (3.54)$$

Yukarıdaki  $\xi(r,q)$  fonksiyonu normalize kazanç yoğunluğu katsayısı olarak gösterilmiştir.  $\Gamma(q)$  yüzey integrali özdeki ortalama ters birikmeyi göstermektedir ve sinyal modu ile katkılı dağılım arasında var olan sonlu örtüşme hesaplanabilir. Bu parametre  $\Gamma(q)$  terslemenin derecesini ve örtüşme faktörünü de gösterir, teorik olarak değeri +1 ile -1 arasındadır. Bu nedenle örtüşme-tersleme faktörü olarak adlandırılır. Eş. 3.51'deki  $g(\lambda_s) = \rho_o\sigma_a(\lambda_s)\Gamma(q)$  niceliği, sinyal modu için tüm kazanç katsayısını gösterir.

Bu durumda düzenli katkı dağılımı fiber yeleği içinde genişler ve pompalama gücü oldukça yükselir ( $q \gg 1$ ), Eş. 3.52 ve 3.53'de  $\Gamma(q)$ ,  $\Gamma(q \gg 1) = U$ 'nun maksimum değerini alır, eş zamanlı sinyal modu elde etme ve lazer ortamı arasında tam örtüşme oluşması ile maksimum tersleme olasılığı anlamına gelir. Pompalama olmadığında  $q = 0$ 'dır ve kılıfta hala düzenli katkı dağılımı genişler,  $\Gamma(0) = -1$  olarak daima aynı tarzda katkılı pompalama olmayan fiber elde edilir.

Pratikte  $\Gamma(q)$  maksimum değer alırken genellikle çok yüksek pompalama gücü  $U$ 'dan çok düşüktür ve fiber kılıfı genellikle katkısızdır.

Terslenmiş ortam ve sinyal modu arasındaki sınırlı örtüşmenin etkisi düzenli gösterilebilir ve örneğin mod içinde toplam pompalama gücü başlarken hayali örtüşme olabilir [82].

Daha genel bir ifadeyle, fiber z yönünde meydana gelen pozitif net kazanç denklemi Eş. 3.51'de görülmektedir. Şayet  $\Gamma(q)$ 'nin öz üzerinde integrali alınırsa  $\xi(r, q)$  fonksiyonu pozitifdir. Fakat belirli bölgelerde ortalanan fiber özü civarında integrallenen  $\xi(r, q)$  pozitif iken integralin pozitifte olması için yeterli koşul yoktur. Bu şart  $Uq\psi_p(r) - 1 > 0$  eşitliğinde, şayet (1)  $U$  pozitif veya  $\eta_s > \lambda_p$  ve (2)  $q\psi_p(r) > 1/U$  ise olur. Eş. 3.39 ve 3.40'da ilk önemli şart:

$$\eta_s = \frac{W_{21}(\lambda_s)}{W_{12}(\lambda_s)} > \frac{W_{21}(\lambda_p)}{W_{12}(\lambda_p)} = \eta_p \quad (3.55)$$

dir. Yukarıdaki bağıntı sadece kesit alanlarının oranını kapsar ve bu nedenle en temel ifadedir. Bu göstermektedir ki, sinyal dalga boyunda uyarılmış yayılım oranı uyarılmış soğurum oranından daha büyük değilse, pompalama dalga boyunda pozitif bir sinyal kazancı asla elde edilemez.  $Er^{3+}$  üç seviyeli pompalama sistemi için  $\eta_p = 0$ 'dır ve Eş. 3.55 şartını daima doğrular. İki seviyeli pompalama şeması ile bu

şart aynı zamanda daha uzun dalga boylarındaki sinyal ve  $\lambda_p = 1480 \text{ nm}$  yakınında pompalandığında da doğrulanır.

Açıkçası, ikinci şart  $q\psi_p(r) > 1/U$ ,  $\psi_p(r)$  mod zarfı mesafe ile azaldığından, fiber öz ekseninden herhangi bir  $r$  mesafesinde başarılmaz. Bu yüzden, şayet  $\text{Er}^{3+}$  katkı yoğunluğunun dağılımı  $\rho(r) \rho_o$ , pompalama mod zarfı  $\psi_p(r)$  ile ilgili sonlu boyutu,  $\xi(r, q)$  fonksiyonu pompalama modunun son bölümünde sıfırdır ve katkılı özün merkezi civarında maksimumdur. Bu olgu maksimum sinyal kazancının fiber özünün merkezi yakınlarında elde edilebileceğini gösterir. Bu nedenle  $\text{Er}^{3+}$  katkısının dağılımı ideal olarak fiber özünün merkezi yakınlarında hapsedilir.

Pompa fiber boyunca soğurulduğundan,  $\Gamma(q) > 0$  şartı pozitif kazanç katsayısına karşılık gelir ve herhangi bir uzunluğun üzerinde gerçekleşemez. İlk olarak  $L_o$  uzunluğunda olan fiber giriş ve sonunda kazanç katsayısını pozitif varsayarsak, burada örtüşme-tersleme faktörü kesinlikle sıfır olur. Bu noktada sinyal yükseltilmez ve azalır ve  $\Gamma(q)$  negatife döndüğünde yeniden soğurulur.  $L_o$  uzunluğu maksimum sinyal kazancının elde edilebileceği uzunluktur ve optimum uzunluk olarak gösterilir. Giriş güç şartları, pompalama ve sinyal dalga boyları ve fiber dalga kılavuzu parametreleri optimum uzunluğa bağlıdır.

YKY gücü  $\nu_s$  tek frekansında varsayılırsa, sinyalle özdeş ve spektral olarak sınırlı dar bir  $\delta\nu$  band genişliğinde olacaktır. Bu gerçek,  $\text{Er}^{3+}$  kazanç spektrumunun tümünde YKY oluşturur.

Sinyal dalga boyunun daha genel durumu için, soğurum ve uyarılmış yayınım oranları Eş. 3.39 ve 3.40'dan yeniden yazılırsa:

$$W_{12,21}(z, \nu) = \int_{\Delta\nu} \sigma_{a,e}(\nu) n_s(z, \nu) \bar{\psi}_s(r, \nu) d\nu \quad (3.56)$$

burada  $n_s(z, \nu)$   $\nu$  frekansında sinyal foton yoğunluğu ve  $z$  koordinatıdır. Şayet uzay zaman süreklisi bileşenlerine ayrılırsa  $k$  dar genişliği  $\delta\nu \ll \Delta\nu$  ayrık frekans boşluklarına ayarlanır.  $\nu_k$  merkez frekansı, optik güç  $P(z, \nu_k) = n_s(z, \nu_k) h\nu_k \delta\nu$  ve Eş. 3.56'daki integral yaklaşık olarak toplam ayrıklığı verir ve aşağıdaki tanımlama elde edilir:

$$W_{12}(z, r, \nu) = \frac{1}{\tau} \sum_k \frac{P_s(z, \nu_k)}{(1 + \eta_k) P_{\text{sat}}(\nu_k)} \psi_k(r) \quad (3.57)$$

$$W_{21}(z, r, \nu) = \frac{1}{\tau} \sum_k \frac{\eta_k P_s(z, \nu_k)}{(1 + \eta_k) P_{\text{sat}}(\nu_k)} \psi_k(r) \quad (3.58)$$

$\psi_{sk}(r) = \psi_s(r, \nu_k)$  ve  $\eta(\nu_k)$ 'dir. Pompalama aynı zamanda uzay zaman süreklisi biçiminde ise, Eş. 3.41'de tanımlanan  $R$  pompalama oranı için benzer tanımlamalar dikkate alınır. Basit olarak, pompalama monokromatik olarak farz edilir ve  $\nu_p$  tek frekansı ile gösterilir. Mod zarfındaki  $\lambda_p$ ;  $\psi_p(r)$  ile tanımlanır.

Son olarak YKY'nin iki olası yayılım yönü hesaba katılırsa +YKY sinyal denklemlerindeki  $2k$  toplam sayıyı verir. Fiber içinde her iki yönde pompalama olabileceğinden (ileri, geri ve iki yönlü pompalama), daha genel olarak iki pompa kullanılan denklem dikkate alınmıştır.

$q^\pm$  normalize pompalama gücü ve  $p_k^\pm$ ,  $\lambda_k$  dalga boyunda normalize veya +YKY gücü, sırasıyla fiber  $z$  koordinatında (+) ve (-) yönde yayınımlardır. Böylece  $q^+$ ,  $p_k^+$  ileri yönde güç hareketini ve  $q^-$ ,  $p_k^-$  ise geri yöndeki güç hareketini gösterir.

$p_{0k}$ ,  $\lambda_k$ 'da doyum gücünde normalize edilmiş giriş gürültü gücüne eşdeğerdir,  $p_{0k} = P_0/P_{\text{sat}}(\lambda_k) = h\nu\delta\nu/P_{\text{sat}}(\lambda_k)$ , burada  $P_{\text{sat}}(\lambda_k)$  Eş. 3.38'de verilmiştir.



Üç seviyeli pompalama şeması için, Eş. 3.46 ve 3.47'den:

$$-\frac{dq^{\pm}}{dz} = \pm \rho_0 \sigma_a (\lambda_p) \int_S 2\pi r dr \frac{\rho(r)}{\rho_0} \psi_p(r) \times \left\{ \frac{1 + \sum_j \frac{\eta_j}{1 + \eta_j} (p_j^+ + p_j^-) \psi_{sj}(r)}{1 + (q^+ + q^-) \psi_p(r) + \sum_j (p_j^+ + p_j^-) \psi_{sj}(r)} \right\} q^{\pm} \quad (3.59)$$

$$\frac{dp_k^{\pm}}{dz} = \pm \rho_0 \sigma_a (\lambda_k) \int_S 2\pi r dr \frac{\rho(r)}{\rho_0} \psi_{sk}(r) \times \left\{ \frac{\eta_k \left[ \frac{(q^+ + q^-) \psi_p(r)}{1 + \eta_p} + \sum_j \frac{(p_j^+ + p_j^-)}{1 + \eta_j} \psi_{sj}(r) \right] [p_k + 2p_{0k}] - \left[ 1 + \frac{\eta_p (q^+ + q^-) \psi_p(r)}{1 + \eta_p} + \sum_j \frac{\eta_j (p_j^+ + p_j^-)}{1 + \eta_j} \psi_{sj}(r) \right] p_k}{1 + (q^+ + q^-) \psi_p(r) + \sum_j (p_j^+ + p_j^-) \psi_{sj}(r)} \right\} \quad (3.60)$$

İki seviyeli pompalama şeması için, sinyal ve pompalamanın her ikisinin her bir yayılım yönü yalnız bir denklemlerle tanımlanır ve Eş. 3.49 genelleştirilerek aşağıdaki ifade elde edilir:

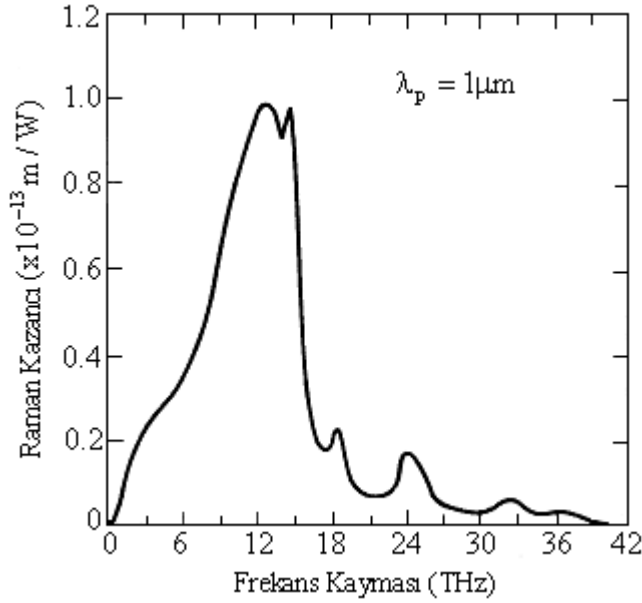
$$\frac{dp_k^{\pm}}{dz} = \pm \rho_0 \sigma_a (\lambda_k) \int_S 2\pi r dr \frac{\rho(r)}{\rho_0} \psi_{sk}(r) \times \left\{ \frac{\eta_k \left[ \sum_j \frac{(p_j^+ + p_j^-)}{1 + \eta_j} \psi_{sj}(r) \right] [p_k + 2p_{0k}] - \left[ 1 + \sum_j \frac{\eta_j (p_j^+ + p_j^-)}{1 + \eta_j} \psi_{sj}(r) \right] p_k}{1 + \sum_j (p_j^+ + p_j^-) \psi_{sj}(r)} \right\} \quad (3.61)$$

Eş. 3.59-3.61'deki genel oran denklemleri üç ana varsayımla ifade edilebilir. 1) Temel fiber modunda pompalama, sinyal ve YKY yayını, 2) Ortam kazancının homojen genişlemesi ve 3) YKY'nin her iki kutupta oluşması [82].

Diğer önemli varsayım fiber arka plan kaybının ihmal edilmesinin yaptığı etkidir. Fiber yükselteç uzunluğu genellikle kısadır (1 ile 100 metre arasında yüksek Er katkı yoğunluğunda). Böylece erbiyum katkısından dolayı yayılım ve soğurum katsayısı ile kıyaslandığında, kayıp katsayısı sinyal dalga boyu ve pompalamanın her ikisi içinde ihmal edilebilir. Bu nedenle kayıp katsayıları içeren iki durum gösterilebilir; kaybın standart tek modlu fiberden çok daha yüksek olduğu durum (çeşitli katkılardan dolayı) ve fiber uzunluğunun gelişigüzel çok uzun olduğu durum (genellikle bir kilometreden onlarca kilometreye kadar olan durum). Bu durum Eş. 3.59'un  $\pm(-\alpha'_p q^\pm)$  sağ tarafında ve Eş. 3.60-3.61'in sağ tarafındaki  $\pm(-\alpha'_s p_k^\pm)$  terimi ile gösterilmiştir. Burada  $\alpha'_p$  ve  $\alpha'_s$  sinyal dalga boyu ve pompalama için kayıp katsayılarını gösterir.

### 3.2. Fiber Raman Yükselteçler

FRY'ler iletim hatlarını tıpkı bir Raman kazanç ortamı olarak kullanırlar. Özellikle; çok kanallı iletişim sinyallerinin yükseltilmesinde, daha az tekrarlayıcı iletimlerde fiber kayıplarının karşılanması için optik kazançların gerektiği, DBÇ sistemlerinde kullanılırlar. FRY optik fiber içerisindeki optik sinyalleri yükseltirler. Bu yükseltme, gücün ışın pompasından sinyale, ışık ile camın titreşimsel durumu arasındaki Raman etkileşimi aracılığıyla iletilmesi esasına dayanır [93]. Şekil 3.5'de görülen Raman kazanç spektrumunda kazanç tepe noktalarında 13,2 THz (  $440\text{cm}^{-1}$ ) civarında Stokes kayması görülmektedir. Bu baskın tepenin maksimum kazanç band genişliği 6 THz civarında olup bu değer oldukça yüksektir.



Şekil 3.5. Silika için ölçülen Raman kazanç spektrumu [75]

Nadir toprak elementleri ile yapılan fiber yükselteçler ile karşılaştırıldıklarında FRY'ların iki temel avantajı vardır:

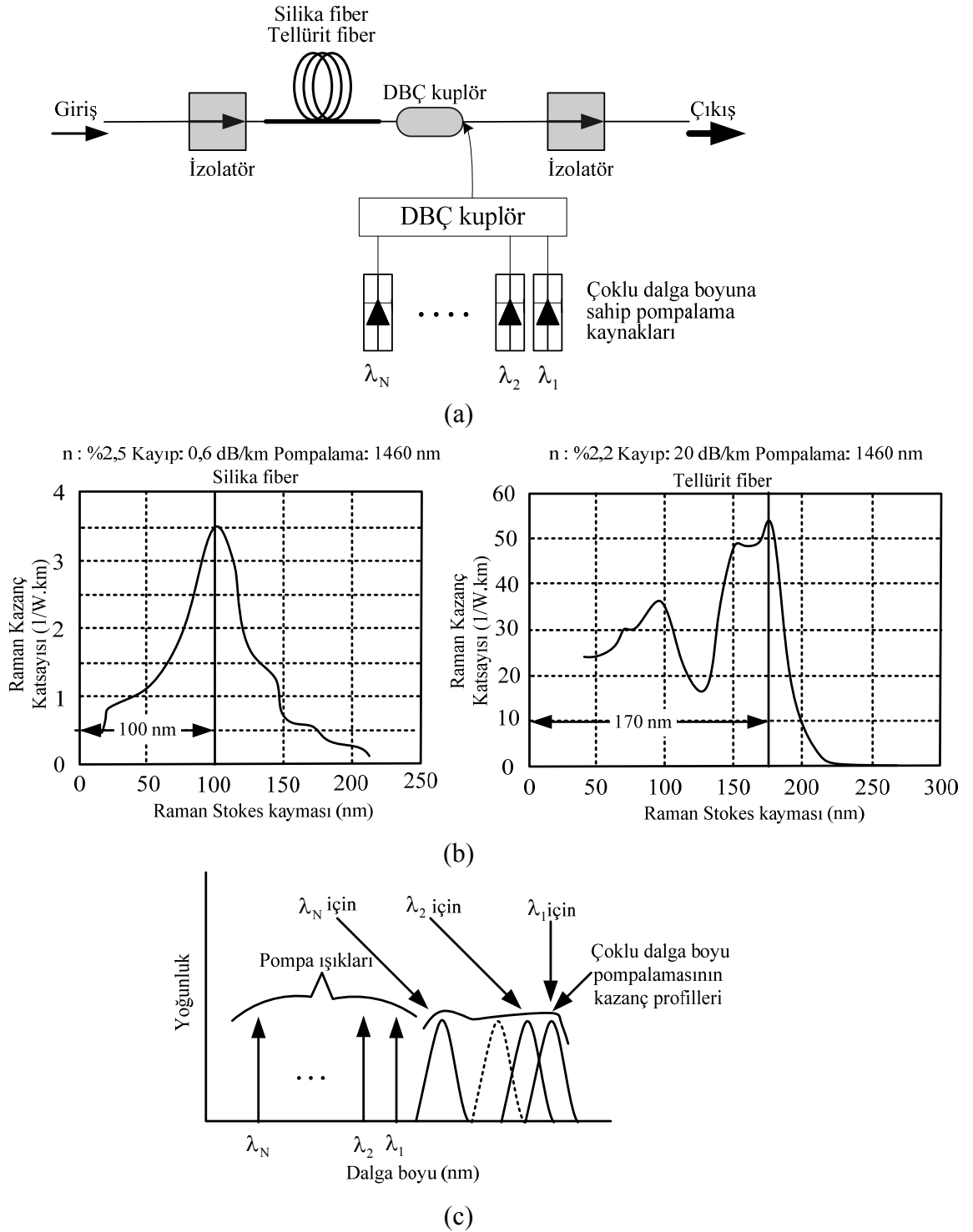
- İletilen veri sinyallerine orta seviyede Raman yükseltmesi sağlayan optik fiber kullanılabilir (dağıtılmış yükseltme).
- Sinyalden daha düşük pompa dalga boyları kullanılarak sinyal yükseltilebilir (1500 nm bölgesi için 100–170 nm daha düşük dalga boyları).

İletim fiberinin nonlineer özelliğinden dolayı sinyaldeki bozulma için dağıtılmış yükseltme özellikle etkilidir. Bu problem 40 Gbit/s gibi yüksek hızlı haberleşme sistemlerinde ve yüksek sinyal gürültü oranı gerektiren uygulamalarda ortaya çıkar. FRY sadece dağıtılmış yükseltmede değil aynı zamanda nadir toprak elementleri kullanılan yükselteçlerin kullanıldığı ayrık yükseltmede de kullanılır. Amaç yükseltme bandını genişletmek ve çalışma verimini yükseltmektir. FRY'de tellürit katkılı fiber kullanılarak daha yüksek bir çalışma verimi ve silika fiber kullanılan geleneksel FRY'den daha iyi bir band genişliği karakteristiği elde edilebilir.

FRY, ışık sinyallerini fiberden geçerken yoğun olarak uyarıldığında nonlineer bir optik etki olan URS ile yükseltir. Raman kazanç spektrumu fiberde kullanılan malzemeye bağlıdır. Şekil 3.6.b’de silika fiberin bir tipi olan dispersiyon kompanzasyonlu fiber ile 1500 nm bandında 100 nm civarında Raman kayması görülmektedir ve maksimum değer yarisında band genişliği 30 nm civarındır. Buna karşılık tellürit fiberin spektrumunda iki tepe vardır ve kazanç katsayısı silika fiberin 16 katı ve Raman kayması 170 nm’dir (silika fiberin 100 nm) [75].

Bundan başka geniş band yükseltmesinde FRY çeşitli dalga boylarında çoklu pompa kullanır. Bu durumda çeşitli dalga boylarındaki pompa sinyalleri birleşerek Raman kazanç spektrumunda üst üste biner. Böylece geniş bandda çalışma elde edilir. Ek olarak her bir dalga boyunun pompa yoğunluğu ayarlanarak düz bir kazanç elde edilebilir. Çoklu pompalama ile başarılan kazanç band genişliğinin limiti Raman kayması ile belirlenir. Silika fiber kullanılan bir FRY’nın maksimum kazancı 100 nm civarı iken tellürit fiber aslında daha yüksek Raman kaymasından dolayı daha geniş band yükseltmesi yapar (160 nm civarı). Ancak tellürit fiber daha düşük verimliliğe sahiptir [93].

Geniş band tellürit fiber Raman yükseltmesi verimli bir şekilde S band nadir toprak elementi katkılı fiber yükseltmesine birleştirilebilir. C ve L bandında nadir toprak elementli fiber yükseltmesi, 1300 nm bandında  $Pr^{3+}$  katkılı fiber yükseltmesi, 1650 nm TKFY ve silika Raman fiber yükseltmesi kullanılarak 1300-1650 nm arasında geniş band yükseltmesi sağlanabilir [81, 94].



Şekil 3.6. Geniş bantlı FRY konfigürasyonları (a) FRY temel yapısı, (b) Raman kazanç spektrumu, (c) Çoklu dalga boyu ile pompalama

Sürekli dalga durumu için pompa ve sinyal arasındaki etkileşim için aşağıdaki iki denklemi yazılabilir [93]:

$$\frac{\partial P_s}{\partial z} = \frac{gR}{A_{\text{eff}}} P_p P_s - \alpha_s P_s \quad (3.62)$$

$$\frac{\partial P_p}{\partial z} = \frac{\omega_p}{\omega_s} \cdot \frac{gR}{A_{\text{eff}}} P_p P_s - \alpha_p P_p \quad (3.63)$$

Burada  $\alpha_s$  ve  $\alpha_p$  sinyal ve pompa dalga boyunda fiber kaybı için dikkate alınan soğurum katsayılarıdır. Basit olarak çözmek için ikinci denklemin sağ tarafı ihmal edilebilir. Bu yapıldıktan sonra sinyal gücü aşağıda görülmektedir:

$$P_s(z) = P_s(0) e^{((gR/A_{\text{eff}})P_p z_{\text{eff}} - \alpha_s z)} \quad (3.64)$$

Burada  $z_{\text{eff}} = (1 - e^{-\alpha_p z}) / \alpha_p$  etkin fiber boyu,  $gR / A_{\text{eff}}$  Raman kazanç verimliliği ki burada  $gR$  Raman kazanç katsayısı,  $A_{\text{eff}}$  pompanın etkin öz alanı,  $P_p(z)$  pompa gücü ve  $P_s(0)$  sinyal gücüdür. Bir fiberde  $A_{\text{eff}}$  değeri ne kadar düşüğe Raman kazancı o kadar yüksek olur. Bununla ilgili olarak çeşitli tipteki fiberlerin etkin alanları Çizelge 3.1'de görülmektedir [93].

Çizelge 3.1. Çeşitli tipteki fiberlerin etkin alanları.

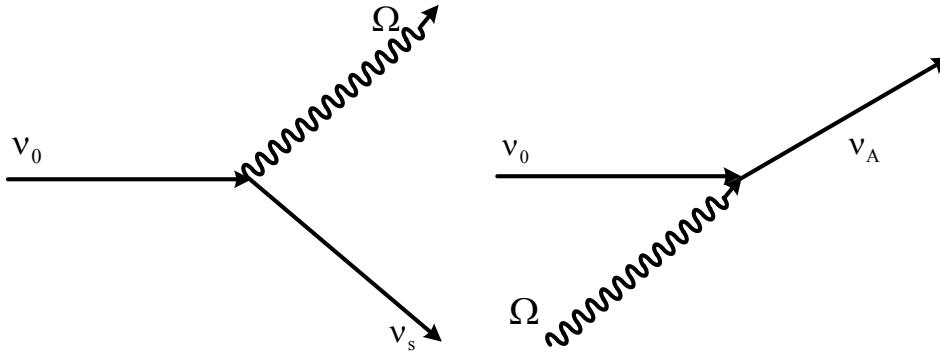
Fiber Tipi	Etkin Alan ( $\mu\text{m}^2$ ) (~1550 nm)
TMF	72–80
SDDSF	55–82
DSF	45–50
DKF	20–35

### 3.2.1. Raman saçılması

Temelde, Raman saçılmaları kendiliğinden Raman saçılması ve uyarılmış Raman saçılması olmak üzere 2 kategoriye ayrılabilir.

### Kendiliğinden Raman Saçılması

Raman etkisi her ne kadar tesadüfi olarak bulunmuşsa da çok hızlı bir şekilde gelişmiştir. Şekil 3.7’de şematik olarak görülmektedir.  $\nu_0$  frekansındaki rastgele foton,  $\Omega$  titreşimsel enerjideki bir kuantum molekülünü uyarır ve  $\nu_s = \nu_0 - \Omega$  frekansından aşağı saçılan bir foton üretir. Şayet molekül halen titreşimsel enerjiye sahipse rastgele foton titreşimsel enerjinin bir kuantumunu soğurarak  $\nu_s = \nu_0 + \Omega$  frekansında yukarı kaydırılmış bir foton üretir. Aşağı ve yukarı kaydırma frekanslarının her ikisi de Stokes ve Anti-Stokes spektral hatları olarak adlandırılır.

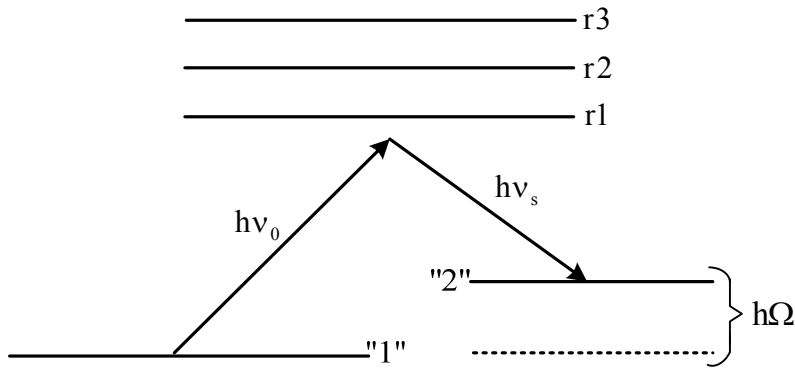


Şekil 3.7. Stokes ve Anti-Stokes Raman saçılmaları.

Saçılma işlemi, enerji seviyelerine bağlı olarak bir molekülün ilk olarak  $\nu_0$  frekansındaki bir fotonun soğurulması ile “1” titreşimsel durumundan “2” titreşimsel durumuna uyarılması ve  $\nu_s$  frekansındaki bir fotonun yayılımı olarak tanımlanır. Bu işlem Şekil 3.8’de görülmektedir. Şekildeki r enerji seviyeleri rastgele fotondan daha yüksek enerjideki molekülün elektronik durumlarıdır. Molekülün titreşimsel “1” seviyesinden uyarımın bir kuantumuna uyarımı için geçiş oranı  $W_s$ ,

$$W_s = \alpha \left[ \sum_r \left( \frac{M_{2r} M_{1r}}{\nu_{r1} - \nu_0} + \frac{M_{2r} M_{1r}}{\nu_{r1} - \nu_s} \right) E_0 \right]^2 \quad (3.65)$$

dir. Burada  $M_{1r}$  toprak seviyesi ve elektronik r seviyeleri arasındaki matris elemanı ve  $M_{2r}$  elektronik seviye ve uyarılmış seviye "2" arasındaki matris elemanıdır. Elektronik durumların enerji seviyeleri  $h\nu_1, h\nu_2, \dots, E_0$   $\nu_0$ 'da rastgele oluşan alanın genliği ve  $h$  Planck sabitidir.



Şekil 3.8. Raman Stokes saçılmasının kuantum teorisinin enerji seviyeleri diyagramı

Eş. 3.33 ilk başta hareketsiz olan bir molekülün uyarılmasının bir kuantumunu tanımlar. Genellikle moleküller termal dengede olup Bose-Einstein termal popülasyon faktörü  $N_\Omega$  ile geçiş oranı artar. Popülasyon faktörü Eş. 3.34'den bulunur, burada  $\Omega$  titreşimsel frekans,  $T$  Kelvin cinsinden sıcaklıktır.

$$N_\Omega = \frac{1}{e^{h\Omega/k_B T} - 1} \quad (3.66)$$

Titreşimlerin termal uyarılması anti-Stokes saçılmasını üretebilir. Stokes saçılması için geçiş oranı  $(1 + N_\Omega)$  ve anti-Stokes saçılması için  $N_\Omega$  ile orantılı olacaktır.

$$W_s \propto N_0(1 + N_\Omega) \text{ Stokes} \quad (3.67.a)$$

$$W_A \propto N_0 N_\Omega \text{ anti-Stokes} \quad (3.67.b)$$



$N_0$  rasgele foton sayısı yani  $|E_0|^2$  ile orantılıdır. Stokes yoğunluklarının anti-Stokes oranı  $\exp(-h\Omega/k_B T)$  'dir.

### Uyarılmış Raman Saçılması

Uyarılmış Raman saçılması, Hellwarth, titreşimsel modun popülasyon faktöründe olduğu gibi, Stokes saçılması için geçiş oranının aynı zamanda Stokes foton sayısına bağlı olduğunu göstermiştir [95]. Çünkü Stokes geçiş oranı Stokes foton sayısının (Eş. 3.35.a) birim zaman başına oransal değişimidir.

$$\frac{dN_s}{dt} = SN_0(1 + N_\Omega + N_s) \quad (3.68)$$

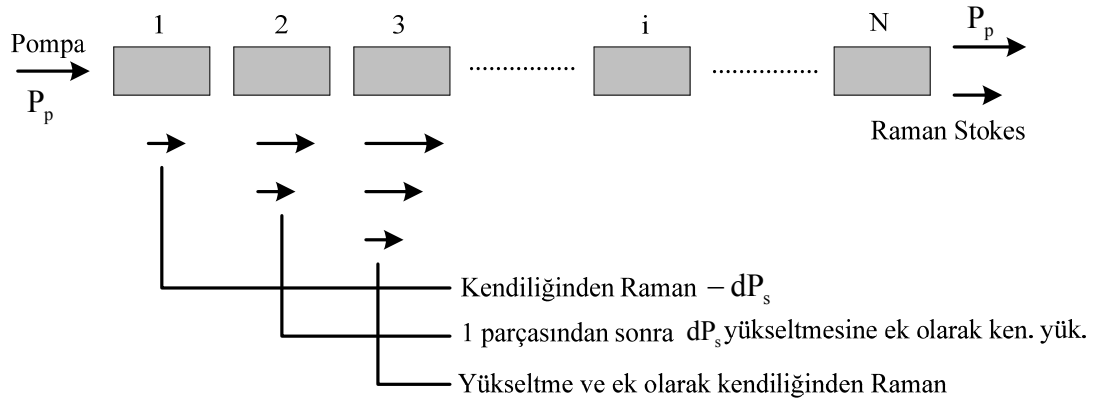
Burada S sabit bir orandır.  $N_s$  faktörünün içeriği lazer oyuğundaki Stokes dalga yükseltmesini gösterir. Stokes fotonlarının üretimi Stokes foton sayısını artırır. Eş. 3.36'daki yükseltme  $c/n_s$  Stokes frekansındaki ışığın hızı tarafından S sabiti ile bölünerek birim boy başına kazanca dönüştürülebilir.

$$\frac{dN_s}{dz} = GN_s, \quad G = \frac{n_s SN_0}{c} \quad (3.69)$$

Burada  $n_s$ ,  $\nu_s$  frekansındaki kırılma indisidir. Birim uzunluk başına kazanç, lazer oyuk kayıplarını aştığında Stokes dalga boyunda lazer olayı gerçekleşecektir [93].

### **3.2.2. Raman yükseltmesi ve fiberlerde uyarılmış saçılma**

Tek yönlü geçişlerin olduğu yapılarda kendiliğinden saçılmış Stokes ışığı yükselttilerek uyarılmış bir Raman çıkışı sağlar. Şekil 3.9'da görülen ve bir fiberde uyarılmış Raman eşiği veya kritik gücü ilk olarak R. G. Smith tarafından hesaplanmıştır [96].



Şekil 3.9. Fiberde yükseltilmiş kendiliğinden saçılma kısa parçalara bölünerek hesaplanır. Raman Stokes frekansında toplam gürültü gücü her bir parçanın kendiliğinden saçılma yükseltmesinin toplamıdır.

Fiberde  $dz$  uzunluğu parçalara ayrılmıştır. Her bir parçanın Stokes gücü kendiliğinden saçılma ile artar ve önceki tüm parçalarda Stokes gücü yükselir. Stokes frekansında giriş yoktur. Tüm Stokes çıkışları yükseltilmiş kendiliğinden yayınımdandır.

$$dN_s = dzG(1 + N_s)P_0 / A_{\text{eff}} \quad (3.70)$$

$N_s$  birim frekans band genişliği başına fiberdeki Stokes foton sayısı,  $G$  kazanç katsayısı,  $P_0$  pompa gücü,  $A_{\text{eff}}$  etkin alandır. Başlıca özellikleri göstermek için kayıp ve termal etki ihmal edilmiştir. Buda  $L$  etkin uzunluğun yerine konularak yapılabilir. Bu dağılım 13 THz civarındaki Raman kazanç eğrisinin küçük tepesinde oluşur.  $L$  uzunluğunda bütünleşerek net Stokes çıkışını verir:

$$N_s(L) = \left[ 1 - e^{-GP_0L/A_{\text{eff}}} \right] e^{GP_0L/A_{\text{eff}}} \quad (3.71)$$

Parantez içindeki ifade etkin giriş gücü  $N_s$  (gürültü) 'dür ki epeyce geniş yükseltme oluşur. Böylece fiber boyunca kendiliğinden saçılma olayı ile Stokes frekansında durum başına bir fotonun etkin girişi azalır [93].

Toplam Stokes gücü tüm frekansların üzerinde birleştikten sonra Stokes gücü pompa gücüne eşit olan bir eşik veya kritik güç tanımlanır. Kritik güç için şart aşağıdaki şekilde oluşur:

$$\frac{GP_0(\text{kritik})L}{A_{\text{eff}}} \approx 16 \quad (3.72)$$

Burada ilk dikkati çeken husus Raman kazancı ve FRY uygulamaları için birleşmiş gürültüdür. Şayet bir Stokes sinyal girişi  $N_s(0)$  sinyali yükseltiyorsa yükseltilmiş gürültü aşağıdaki gibi olacaktır:

$$N_s(L) = [N_s(0) + N_s(\text{gürültü})] e^{GP_0L/A_{\text{eff}}} \quad (3.73)$$

$\Delta\nu$  band genişliği frekansı üzerindeki güç:

$$P_s = h\nu_s \Delta\nu N_s \quad (3.74)$$

Böylece Eş. 3.41 aşağıdaki şekilde olur:

$$P_s(L) = [P_s(0) + h\nu_s \Delta\nu N_s(\text{gürültü})] e^{GP_0L/A_{\text{eff}}} \quad (3.75)$$

Eş. 3.43'e pompa ve sinyal dalga boyundaki kayıplar eklenirse:

$$P_s(L) = [P_s(0) + P_s(\text{gürültü})] e^{GP_0L_{\text{eff}} / A_{\text{eff}}} e^{-\alpha_s L} \quad (3.76)$$

oluşur. Burada  $\alpha_s$ ,  $\alpha_p$  sinyal ve pompa dalga boylarındaki kayıp katsayılarıdır.

Etkin uzunluk:

$$L_{\text{eff}} = \frac{1 - e^{-\alpha_p L}}{\alpha_p} \quad (3.77)$$

ile bulunur. Geniş  $\alpha_p L$  etkin uzunluğu dikkate alınırsa  $1/\alpha_p$  soğurum uzunluğunda oluşur. Kısa fiberler için  $L_{\text{eff}}$  gerçek uzunluktur [93].

Tüm bu denklemlere ek olarak FRY'yi analiz etmek için doğruluğu daha yüksek olan matematiksel modele ihtiyaç vardır. Eş. 3.46'da  $\nu$  tüm frekansları için eş zamanlı olarak ileri yönde yayılan gücün ifadesi görülmektedir (bu tanım geri yönde yayınım için de yazılabilir):

$$\begin{aligned} \frac{dP_f(z, \nu)}{dz} = & -\alpha(\nu)P_f(z, \nu) + \gamma(\nu)P_b(z, \nu) \\ & + \int_{\zeta > \nu} \left\{ \frac{g_R}{A_{\text{eff}}}(\zeta, \nu)[P_f(z, \zeta) + P_b(z, \zeta)] \left[ P_f(z, \nu) + 2h\nu \left( 1 + \frac{1}{e^{h(\zeta-\nu)/kT} - 1} \right) \right] \right\} d\zeta \\ & - \int_{\zeta < \nu} \left\{ \frac{g_R}{A_{\text{eff}}}(\zeta, \nu)[P_f(z, \zeta) + P_b(z, \zeta)] \left[ P_f(z, \nu) + 2h\nu \left( 1 + \frac{1}{e^{h(\nu-\zeta)/kT} - 1} \right) \right] \right\} d\zeta \end{aligned} \quad (3.78)$$

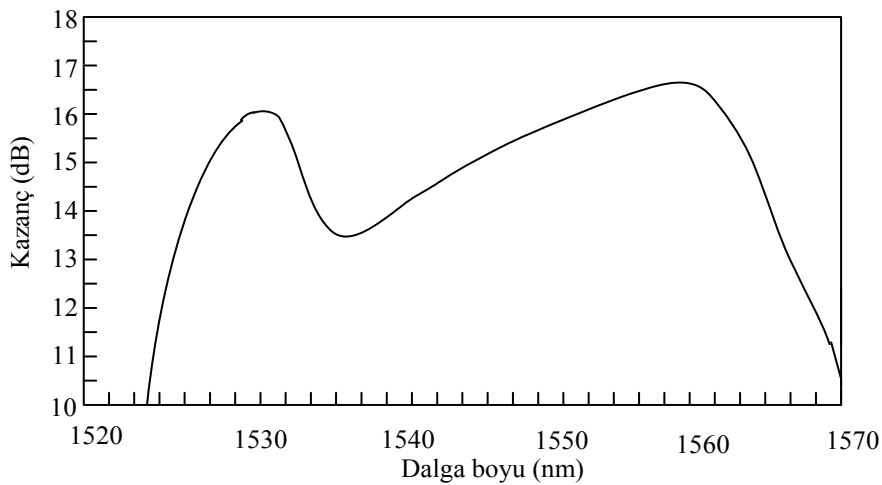
Bu denklemde  $P_f(z, \nu)$ ,  $P_b(z, \nu)$  z mesafesi ve  $\nu$  frekansında ileri ve geri güçlerdir.  $\alpha(\nu)$  zayıflama katsayısı,  $\gamma(\nu)$  geri yönde Rayleigh saçılma katsayısı,  $g_R(\zeta, \nu)$   $\zeta$  ve  $\nu$  frekansları arasındaki Raman kazanç katsayısıdır. Bu model fiber kaybı, Rayleigh geri saçılması, pompadan pompaya, pompadan sinyale, sinyalden sinyale Raman etkileşimlerini, Raman enerji transferinden dolayı pompa zayıflamalarını, YKY ve sıcaklığa bağımlılık gibi çeşitli etkileri içermektedir. Gürültü terimi iki faktör içerir. Bunlar YKY ve termal gürültüdür [97, 98].

## 4. SİSTEMİN TASARIMI VE BENZETİMİ

### 4.1. Giriş

DBÇ sistemleri, yüksek hızlı ve yüksek kapasiteli optik iletişim sistemleri için kullanışlı sistemlerdir. DBÇ teknolojisini destekleyen anahtar cihazlar ışığın kendi ortamında yükseltilmesini sağlayan optik yükselteçlerdir [99, 100]. Bununla beraber optik yükselteçlerin düz olmayan kazanç spektrumları DBÇ sistemlerinin kapasitelerini sınırlamaktadır [101]. Aynı fiberden daha fazla kanal iletmek için düz kazanç ve daha geniş band genişliği gerekmektedir [102]. Geniş band optik yükselteçler, 1480-1620 nm aralığındaki optik haberleşmede daha düz kazanç band genişliği için araştırılmaktadır [103].

EKFY'nin kazanç spektrumu, enerji seviyelerinin yapısından dolayı oluşan asimetrik ikiz tepeye sahip olup kazanç spektrumu düz değildir (Şekil 4.1). Aynı durum FRY'ler içinde geçerlidir. Bu yüzden, yükseltilecek sinyallerin güçleri arasındaki farklılıklar oluşur. Uzun mesafeli optik iletim sistemlerinde optik sinyaller çok sayıda yükselteç ile yükseltilirken, optik sinyal güçleri arasında farklılıklar giderek artar ve düşük güçlü sinyaller alıcıya ulaşamaz. Bu da iletim mesafesini kısaltır ve iletilen sinyal sayısını azaltır. Bunu engellemek için iletim bandı boyunca EKFY kazancının düzeltilmesi gerekir [104].



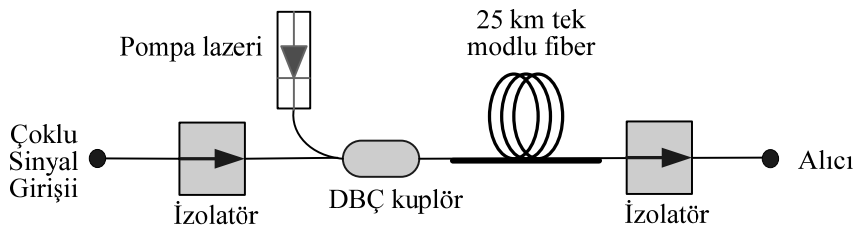
Şekil 4.1. Silika katkılı EKFY'nin dalga boyuna bağlı kazanç spektrumu

Fiber optik haberleşmede S, C ve L band yükseltmesi ve bu bandlarda kazanç düzleştirme işlemi için çeşitli yöntemler kullanılır. EKFY tüm bandlar için kullanılabilir. Fakat S bandının tamamında yeterli yükseltmeyi sağlayamaz. Tüm bandlar için FRY'ler de kullanılabilceği gibi, S ve L band için tulyum katkılı fiber yükselteçler de kullanılabilir [61-64].

Kazanç band genişliğini büyütmek ve düzleştirmek için çeşitli yaklaşımlar vardır. Yaklaşımlardan birisi erbiyum katkılı silika cam fibere yeni malzemeler eklemektir [105-107] ( $Al_2O_3$  ve  $P_2O_5$  gibi malzemeler). Flüorür tabanlı EKFY'ler DBÇ uygulamalarında silika tabanlı EKFY'lerden çok daha iyi karakteristiğe sahiptirler [105]. Başka bir yaklaşım ise Mach-Zender optik filtresi, akusto-optik filtre veya uzun periyotlu fiber-ızgara filtreleri gibi kazanç eşitleyici optik filtrelerin kullanılmasıdır [97, 101, 104, 108]. Bu metotta EKFY kazancının yüksek olduğu dalga boylarında filtre ile kayıp oluşturularak toplam kazanç düzleştirilir. Optik kazanç düzleştirici filtre olarak adlandırılan bu filtreler düşük maliyete ve yüksek kararlılığa sahiptir.

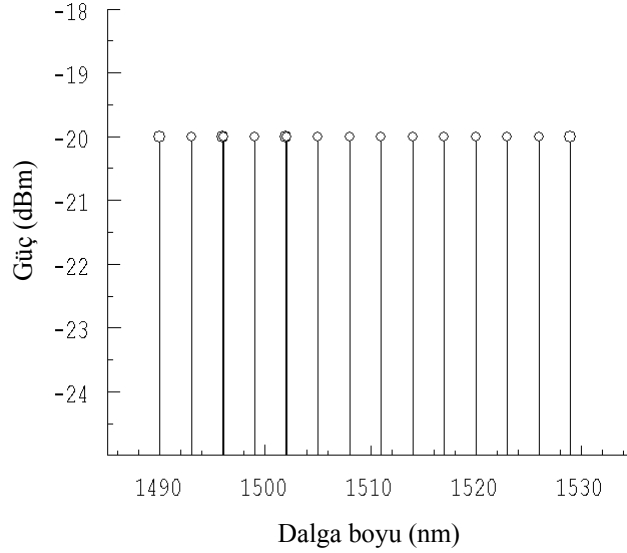
#### 4.2. Kazancı Düzleştirilmiş S Band Optik Yükselteç Tasarımı ve Benzetimi

S bandında optik yükselteç olarak FRY'ler kullanılmıştır. S bandında çalışabilecek bir FRY tasarlanırken S band sinyallerin yaklaşık olarak 100 nm altında dalga boyuna sahip bir veya daha fazla pompa kaynağı ve istenilen kazançta uygun pompa gücü seçilir. Bu tez çalışmasında S bandında FRY kullanılarak S bandının 1490–1529 nm bölgesinde çalışabilen bir yükselteç tasarlanmıştır.



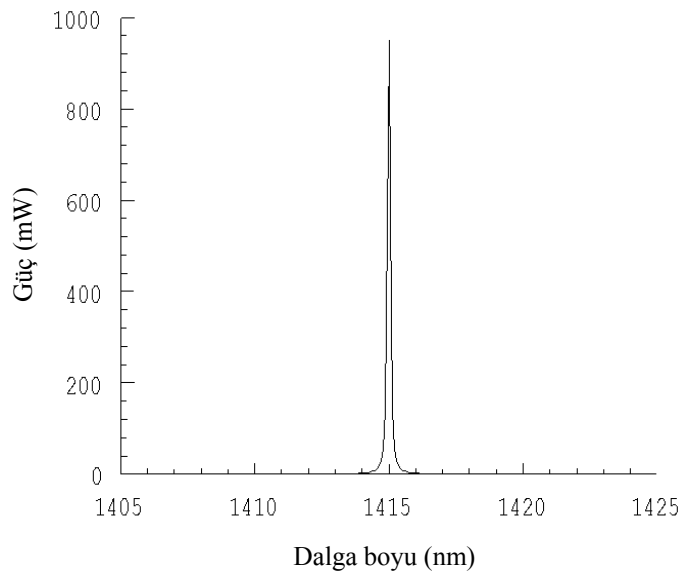
Şekil 4.2. S band FRY düzeneği

Şekil 4.2'deki düzenekte 25 km uzunluğa ve 0,22 dB/km zayıflamaya sahip tek modlu fiber kullanılarak OptiAmplifier 4.0 programında benzetimi yapılmıştır.



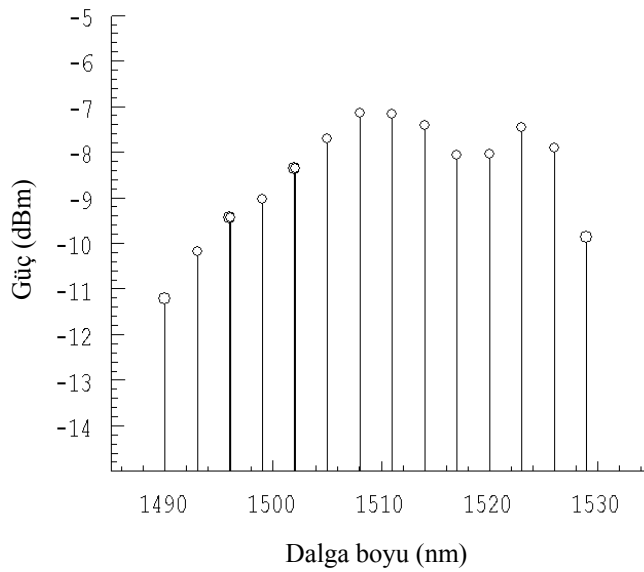
Şekil 4.3. S band giriş sinyalleri

Şekil 4.3'de tasarlanan S band FRY'ye uygulanan giriş sinyalleri görülmektedir. Giriş sinyali olarak 1490–1529 nm dalga boyları arasında 3 nm'lik aralıklarla dizilmiş -20 dBm gücteki 14 farklı sinyal uygulanmıştır.



Şekil 4.4. S band pompa sinyali

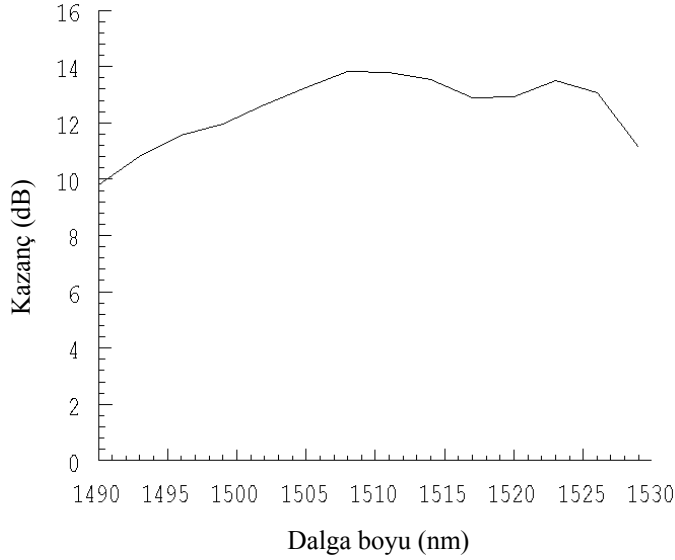
Şekil 4.4’de tasarlanan sisteme uygulanan pompa sinyali görülmektedir. Pompa kaynağı olarak 1415 nm dalga boyunda 950 mW güçte tek pompa kaynağı kullanılmıştır. Pompa kaynağı 1490 nm ve 1529 nm’nin orta değeri olan 1510 nm’den yaklaşık olarak 100 nm düşük dalga boyunda seçilmiştir. 1415 nm dalga boyunda uygulanan pompa sinyali fiber içinde ilerlerken meydana gelen Raman saçılmasından dolayı oluşan Raman Stokes kayması 1490-1529 nm arası sinyalleri yükseltmektedir.



Şekil 4.5. S band çıkış sinyalleri

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da sırasıyla S band çıkış sinyalleri ve kazanç spektrumu görülmektedir. Bu şekiller incelendiğinde, 10-13 dB arasında değişen bir kazanç spektrumu elde edilmiştir. Bu kazanç spektrumu tek modlu fiberin uzunluğuna, pompa kaynağı ve giriş sinyallerinin dalga boyu ve gücüne, pompa kaynağının yönüne bağlı olarak değiştirilebilir [109].





Şekil 4.6. S band kazanç spektrumu

#### 4.2.1. S band için kazanç düzleştirme işlemi

Fiber Raman yükseltecin kazancını düzleştirmek için geniş ölçüde çalışmalar yapılmış ve çeşitli teknikler önerilmiştir [97]. Yapılan bir çalışmada, 12 pompa lazeri kullanılarak 100 nm'nin üzerinde 1 dB kazanç değişimine sahip 6,5 dB ortalama kazanç elde edilirken [68], diğer bir çalışmada uzun periyotlu fiber ızgara kullanılarak 1,6 dB kazanç değişimi ve 13 dB kazanç elde edilmiştir [110].

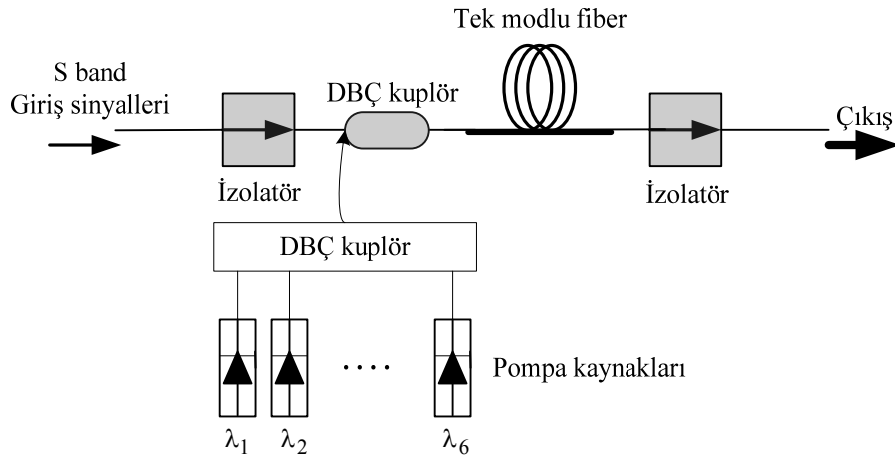
FRY'lerde çoklu pompa kullanılmasının birkaç nedeni vardır; birincisi, pompa sayısı düştükçe kazancın düşmesini engellemek için yüksek pompa gücü gerekmektedir fakat 300 mW'ın üzerindeki yüksek güçlü pompa lazeri bulmak oldukça zor ve pahalıdır. İkinci neden, arıza durumlarında tek lazere göre fazla sayıda pompa ile pompalanan yükselteçler daha iyi korunacaktır. Üçüncü neden, çoklu pompa kullanılarak yüksek kayıplı kazanç düzleştirici filtreler gerek kalmadan çok düz bir kazanç spektrumu elde edilebilir.

Tasarlanan sistemin girişine uygulanan S band sinyaller (1490–1530 nm) dikkate alındığında, Raman kazanç spektrumunda tepe kazanç dalga boyu, yaklaşık olarak pompa dalga boyunun 100 nm üstünde meydana geldiğinden, pompa dalga boyları 1390 ile 1430 nm arasında veya bu sınır değerlere yakın seçilmiştir. Pompa

kaynaklarının güçleri oluşturdukları çıkış spektrumuna ve sistemin istenilen çıkış kazancına göre belirlenmiştir. Pompa kaynaklarının sayısı artırılarak çıkış sinyal kazanç spektrumu daha da düzleştirilebilmektedir. Bu kazanç düzleştirme tasarımında 6 pompa kaynağı kullanılmıştır. Kullanılan pompa kaynaklarının dalga boyu ve güç değerleri Çizelge 4.1’de görülmektedir.

Çizelge 4.1. Sistemde kullanılan pompa kaynaklarının dalga boyu ve güç değerleri

Değerler	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	Tek pompa ile
Pompa dalga boyu (nm)	1382	1385	1390	1397	1420	1430	1415
Pompa gücü (mW)	300	300	150	220	232	225	950



Şekil 4.7. Kazancı düzleştirilmiş S band FRY'nin yapısı

Tek pompalı ve çok pompalı kazancı düzleştirilmiş S band FRY'lerin yapısı sırasıyla Şekil 4.2 ve Şekil 4.7’de görülmektedir. Bu çoklu pompa düzeninde kullanılan tek modlu fiberin parametreleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

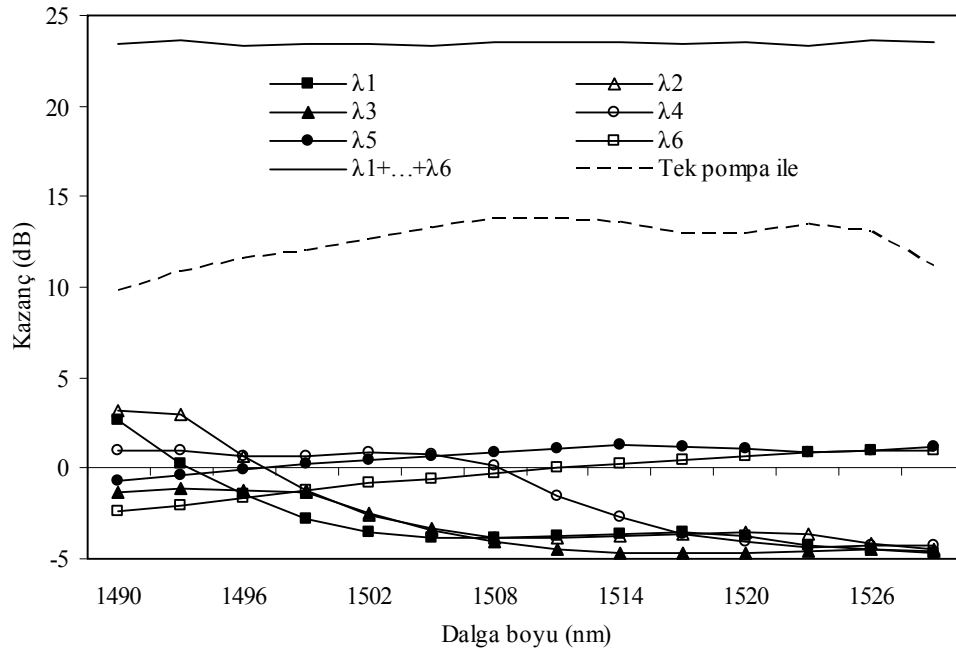
Çizelge 4.2. Tek modlu fiber parametreleri

Fiber parametreleri	Değerler
Tepe Raman kazanç katsayısı	$9,83 \times 10^{-14}$ m/W
Etkin alan	80 $\mu$ m
Fiber boyu	25 km
Fiber zayıflaması	0,22 dB/km
Sıcaklık	300 K

Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'deki değerler kullanılarak OptiAmplifier 4.0 yazılımı ile sistemin benzetimi yapılmıştır. Çizelge 4.3'de ise tek ve altı pompa kaynağının kullanıldığı durumlarda sistem çıkışlarında elde edilen kazanç değerleri ve bu kazanç değerleri arasındaki farklar görülmektedir.

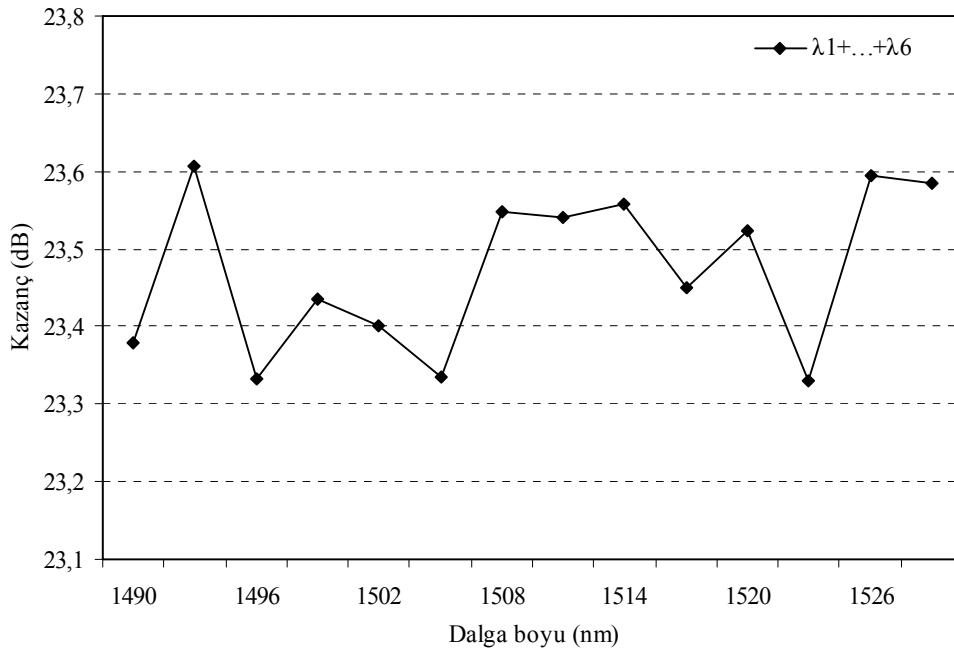
Çizelge 4.3. Tek ve altı pompa kaynağı kullanılarak elde edilen kazanç değerleri

$\lambda_s$ (nm)	Altı pompa ile kazanç (dB) ( $\lambda_1+\dots+\lambda_6$ )	Tek pompa ile kazanç(dB)
1490	23,38	9,81
1493	23,60	10,82
1496	23,33	11,55
1499	23,44	11,96
1502	23,40	12,62
1505	23,33	13,27
1508	23,55	13,81
1511	23,54	13,81
1514	23,56	13,54
1517	23,45	12,90
1520	23,52	12,94
1523	23,33	13,51
1526	23,60	13,06
1529	23,58	11,14
<b>Fark (dB)</b>	<b>0,28</b>	<b>4,00</b>



Şekil 4.8. Her bir pompa kaynağının ve tüm sistemin çıkış kazanç spektrumu

Şekil 4.8’de her bir pompa kaynağının çıkış kazanç spektrumu ve tüm pompa kaynaklarının birlikte kullanılması ile elde edilen düzleştirilmiş kazanç spektrumu görülmektedir. Grafikte görülen  $\lambda$  simgelerinin alt indisleri pompa kaynağının numarasını göstermektedir. Örneğin;  $\lambda_1$  ilk pompa kaynağını ve  $\lambda_6$  ise altıncı pompa kaynağını göstermektedir.

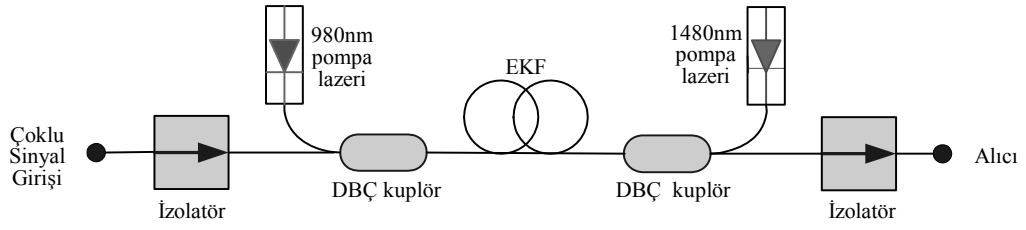


Şekil 4.9. Yakınlaştırılmış S band çıkış kazanç spektrumu

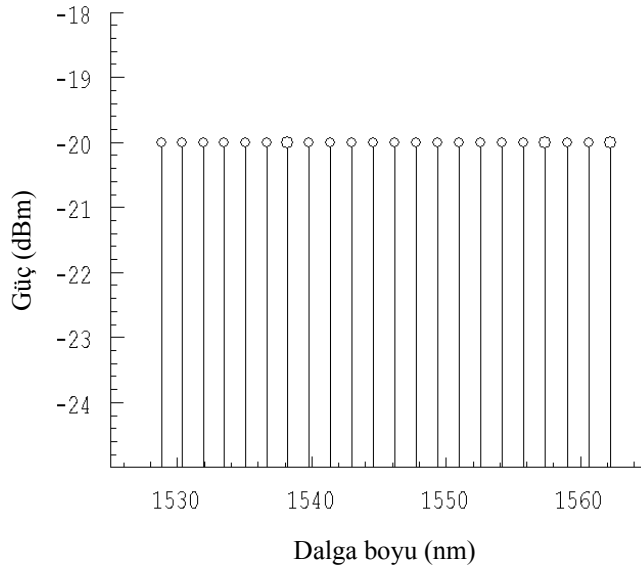
Şekil 4.9’da sistemin 6 pompa kaynağı kullanılarak düzleştirilmiş çıkış kazanç spektrumunun yakınlaştırılmış grafiği görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere yaklaşık 23,5 dB etrafında değişen kazanç spektrumunun değişim aralığı sadece 0,28 dB’dir [111]. Tasarımda band genişliği düşük olduğu (40 nm) için Raman diyafoni etkisi ihmal edilmiştir. Daha geniş band kullanımında (>100 nm) Raman diyafoni etkisi ihmal edilemez [112].

### 4.3. Kazancı Düzleştirilmiş C Band Optik Yükselteç Tasarımı ve Benzetimi

Şekil 4.10’da 9 m’lik EKF kullanılarak oluşturulmuş bir C band EKFY düzeneği görülmektedir.

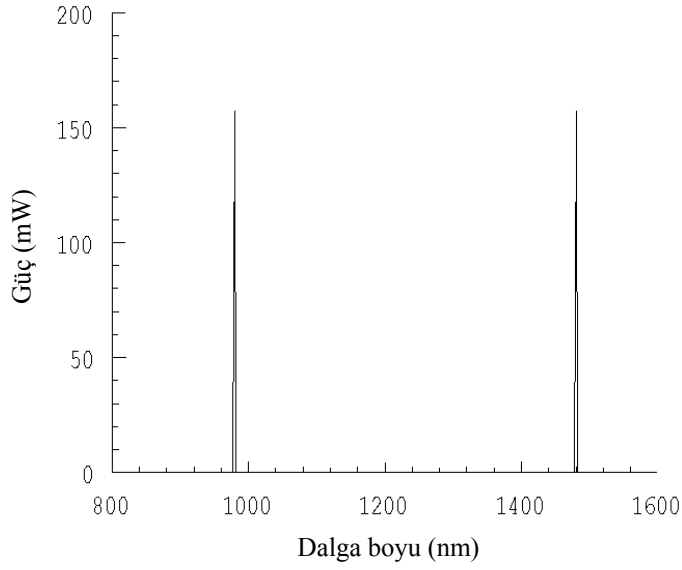


Şekil 4.10. C band EKFY düzeneği



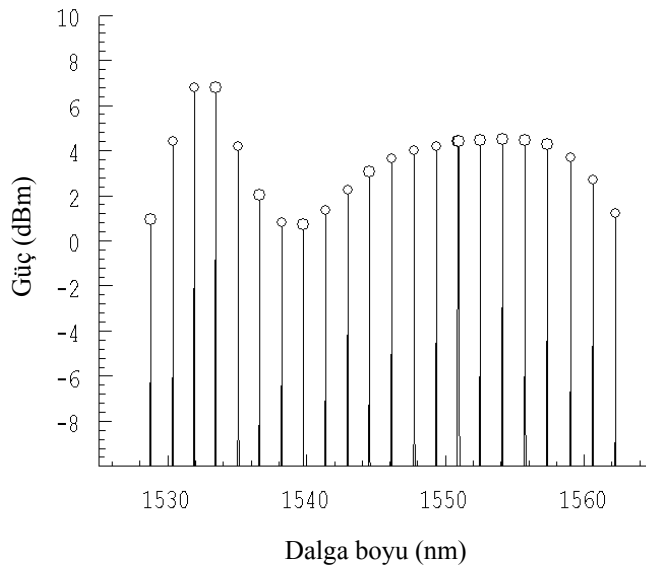
Şekil 4.11. C band giriş sinyalleri

Şekil 4.11’de tasarlanan C band EKFY’nin girişine uygulanan giriş sinyalleri görülmektedir. Giriş sinyali olarak -20 dBm güçte, 1528,79 nm ile 1562,25 nm aralığında kanallar arası 100 GHz’lik (Uluslararası Telekom Birliği standartlarına göre) bir kanal mesafesi bırakılarak çoklu sinyaller uygulanmıştır.



Şekil 4.12. C band pompa sinyalleri

Şekil 4.12’de sistemde kullanılan pompa kaynakları görülmektedir. EKFY’de 980 nm dalga boyunda ileri yönde yapılan pompalama yüksek bir ters birikme ve düşük gürültü faktörü, 1480 nm dalga boyunda geri yönde yapılan pompalama ise daha yüksek bir kazanç sağlar. Bu nedenle, ileri yönde 980 nm, geri yönde 1480 nm dalga boyunda ve 125 mW gücünde pompa lazerleri kullanılmıştır.

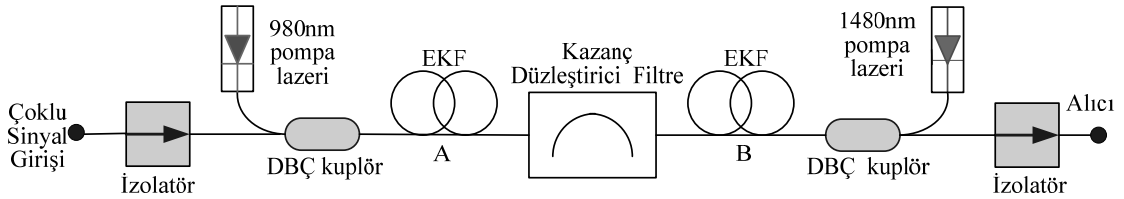


Şekil 4.13. C band çıkış sinyalleri

Şekil 4.13’de C band çıkış sinyalleri görülmektedir. 21-27 dB arasında değişen bir kazancın elde edildiği görülmektedir.

#### 4.3.1. C band için kazanç düzleştirme işlemi

İki aşamalı yükselteç ve kazanç düzleştirici filtre kullanılarak EKFY kazancı eşitlenebilir. İki aşamalı EKFY yüksek sinyal kazancı, düşük gürültü ve yüksek doyum gücüne sahiptir. İki aşamalı EKFY’nin en büyük avantajı, aşamalar arasında konulan bir band geçiren filtre veya bir izolatörle 1530 nm’de tepe değerine ulaşan YKY’yi bastırması ve ikinci aşamadan birinci aşamaya giren geri yönlü YKY’yi sınırlamasıdır. Sonuçta geliştirilmiş bir kazanç ve gürültü performansı elde edilir [113].



Şekil 4.14. Kazanç düzleştirici filtre ile iki aşamalı EKFY’nin kazanç optimizasyonu düzeni

Şekil 4.14’de görüldüğü gibi kazanç düzleştirici filtre, gürültüyü azaltmak için iki aşamalı yükseltecin arasına yerleştirilir. Gürültüyü minimuma indirmek için ilk aşama da 980 nm pompa lazeri kullanılırken araya konulan filtreden ve ek kaybindan dolayı ilk aşamanın sinyal kazancında azalma oluşur. Bu durum doyumda çalışan ikinci aşama ile telafi edilir. Bu düzenekte dikkat edilmesi gereken en önemli hususlar; her bir aşamadaki EKF uzunluklarının optimize edilmesi ve kullanılacak filtrenin türüdür. Bu çalışmada filtre olarak band geçiren pasif optik filtre kullanılmıştır.

EKFY’lerde  $\lambda_s$  dalga boyundaki sinyal kazancı aşağıdaki şekilde ifade edilir [82]:

$$G(\lambda_s) = \exp\left\{\rho_0 \Gamma_s (\sigma_e^s \hat{N}_2 - \sigma_a^s \hat{N}_1)\right\} = \exp\left\{\rho_0 \Gamma_s (\sigma_e^s + \sigma_a^s \hat{N}_2 - \sigma_a^s)\right\} \quad (4.1)$$

burada  $\Gamma_s$   $\lambda_s$  dalga boyunda örtüşme faktörü,  $\rho_0$  tepe katkı yoğunluğu (erbiyum için),  $\sigma_e^s$   $\lambda_s$  dalga boyunda yayınım kesit alanı,  $\sigma_a^s$   $\lambda_s$  dalga boyunda soğurum kesit alanı,  $\hat{N}_1$ ,  $\hat{N}_2$  ortalama fiber boyunda ve  $Er^{3+}$  yoğunluklu normalize edilmiş atom sayıları olup [82],

$$\hat{N}_{1,2} = \frac{1}{\rho_0 L} \int_0^L N_{1,2}(z) dz \quad (4.2)$$

ile verilir.  $\lambda_s$  'nin dB olarak kazancı  $g(\lambda_s) = 10 \log_{10} G(\lambda_s)$  olur. Eş. 4.1'e göre  $\hat{N}_2$  'nin üst seviye popülasyonundaki herhangi bir değişim  $dg(\lambda_s)/d\hat{N}_2$  diferansiyel kazanç değişimine karşılık gelir [82],

$$\frac{dg(\lambda_s)}{d\hat{N}_2} = 10 \log_{10}(e) \rho_0 \Gamma_s (\sigma_e^s + \sigma_a^s) \quad (4.3)$$

olarak bulunur. Burada  $e = \exp(1)$ 'dir. İki sinyal dalga boyu dikkate alındığında aralarındaki ilişki aşağıdaki şekildedir:

$$\frac{dg(\lambda_{s1})}{dg(\lambda_{s2})} = \frac{\sigma_e^{s1} + \sigma_a^{s1}}{\sigma_e^{s2} + \sigma_a^{s2}} \equiv R(\lambda_{s1}, \lambda_{s2}) \quad (4.4)$$

A ve B bölümlerinden oluşan iki aşamalı EKFY'de iki sinyal için aşağıdaki eşitlik yazılabilir [82]:

$$dg(\lambda_{s1}) = dg_A(\lambda_{s1}) + dg_B(\lambda_{s1}) \quad (4.5)$$

$$dg(\lambda_{s2}) = R_A(\lambda_{s2}, \lambda_{s1}) dg_A(\lambda_{s1}) + R_B(\lambda_{s2}, \lambda_{s1}) dg_B(\lambda_{s1}) \quad (4.6)$$

burada A ve B parametreleri sırasıyla birinci ve ikinci EKFY bölümlerini göstermektedir [82].



Şekil 4.14’de görülen düzeneğin benzetimi ve kazanç düzleştirici filtre optimizasyonu OptiAmplifier 4.0 yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Bu uygulamada C band optik yükselteç tasarımında kullanılan malzemeler aynı özellikte seçilirken (Şekil 4.10), filtresiz düzenekteki 9 m’lik EKF boyu bu düzenekte iki aşamalı olarak yapılandırılmış olup, iki aşamalı EKF’nin A kısmının boyu 4 m, B kısmının boyu ise 5 m olarak belirlenmiştir. Ayrıca bu iki EKF arasında pasif optik filtre eklenmiştir. Kullanılan EKF’nin parametreleri Çizelge 4.4’de görülmektedir.

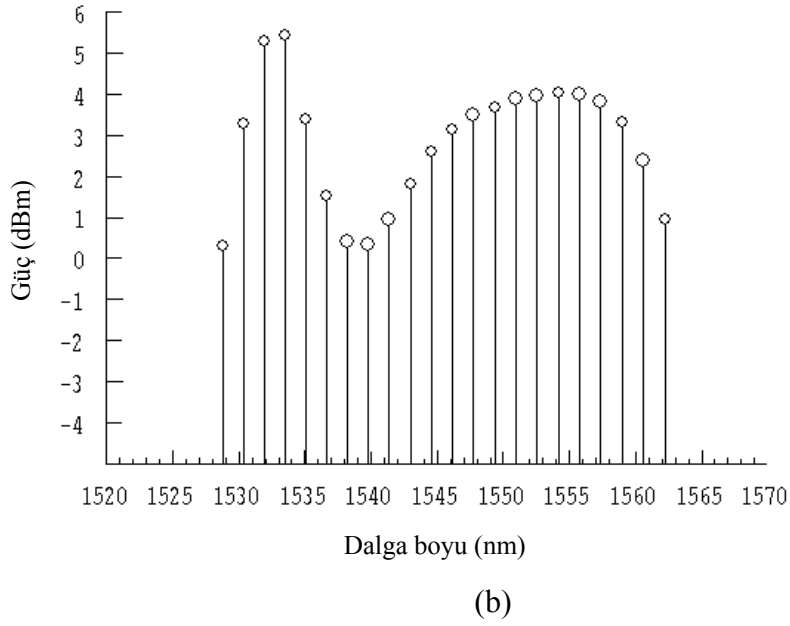
Çizelge 4.4. C band EKF parametreleri

EKF parametreleri	Değerler
İyon yoğunluğu	$1,4 \times 10^{25}/\text{m}^3$
Öz yarıçapı	$1 \mu\text{m}$
İyon ömrü	10 ms
Erbium yarıçapı	$1 \mu\text{m}$
Nümerik açıklığı	0,31

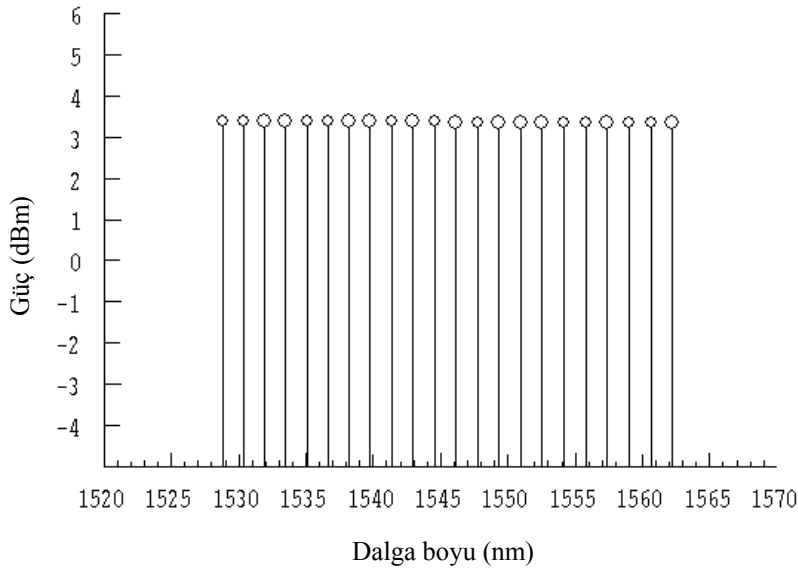
Benzetimde Giles metodu [114] ve  $LP_{01}$  geometrik modeli kullanılmıştır. Şekil 4.14 kurularak benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 4.15’de filtre kullanılmayan durumda giriş sinyaline karşılık çıkış sinyali görülmektedir. Şekil 4.15.b’de görüldüğü gibi çok kanallı sinyallerin güçleri çıkışta farklılık göstermektedir.



(a)



Şekil 4.15. Filtresiz iki aşamalı EKFY'de giriş sinyaline karşılık çıkış sinyali  
(a) Giriş sinyali, (b) Çıkış sinyali

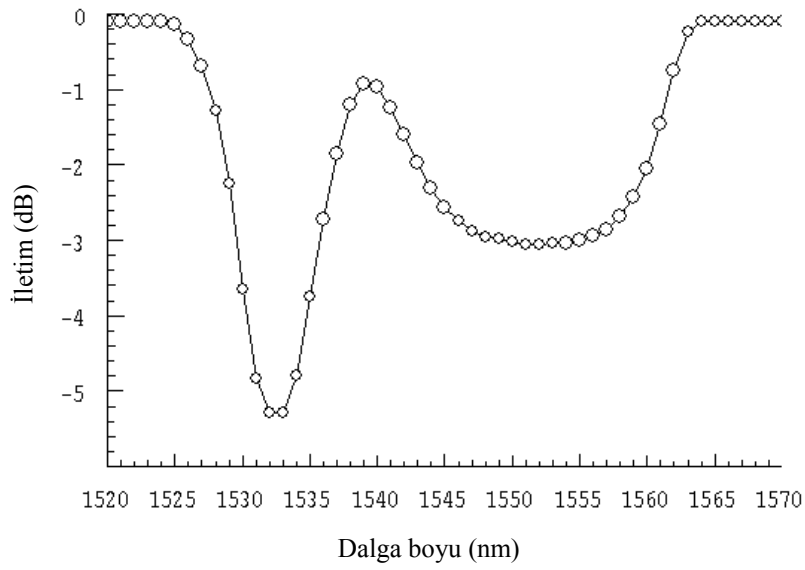


Şekil 4.16. Kazancı düzleştirici filtre kullanılan iki aşamalı EKFY'nin çıkış sinyalleri

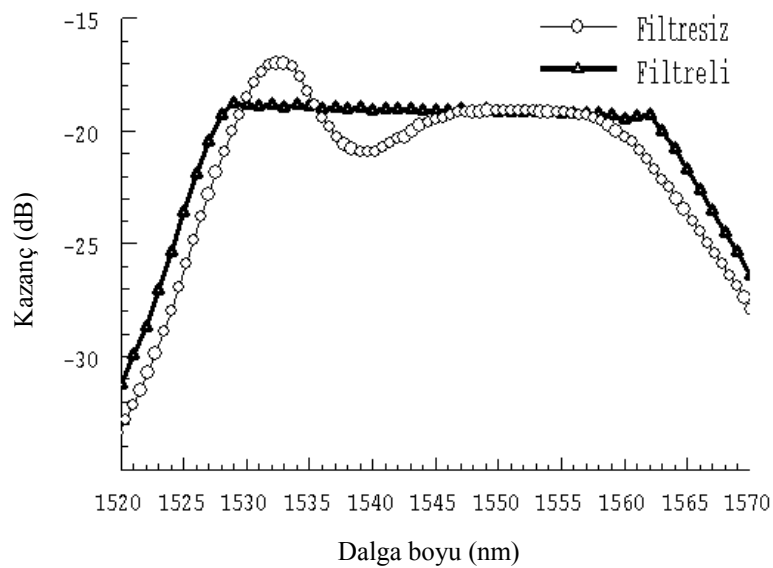
Sinyallerin güçleri arasındaki bu farkı yok edip eşitlemek için A ve B EKF'lerinin arasına filtre konularak Şekil 4.15.a'daki giriş sinyalleri uygulandığında Şekil 4.16'daki kazancı düzleştirilmiş çıkış sinyalleri elde edilir. A ve B EKF'leri arasına konulan kazanç düzleştirici filtrenin iletim spektrumu Şekil 4.17'de görülmektedir.

İletim spektrumu, OptiAmplifier 4.0 programı ile optimize edilen filtre modülünün, beyaz ışık kaynağının arkasına bağlanıp bir izolatörden geçirilmesi suretiyle elde edilmiştir. Şekil 4.17’de de görüldüğü gibi filtre zayıflatıcı bir etki göstermektedir.

Şekil 4.18’de ise kazanç düzleştirici filtrenin kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlardaki kazanç spektrumu görülmektedir. Filtre kullanılan durumda spektrumun düzleştiği açık olarak görülmektedir [115].



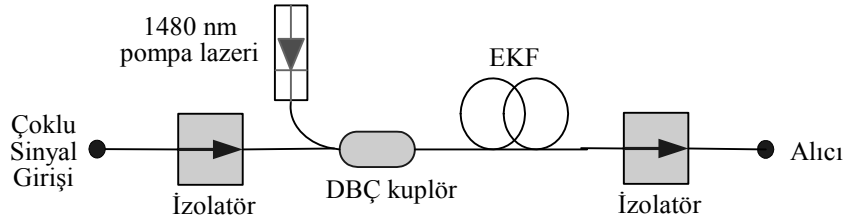
Şekil 4.17. Optimize edilen filtrenin iletim spektrumu



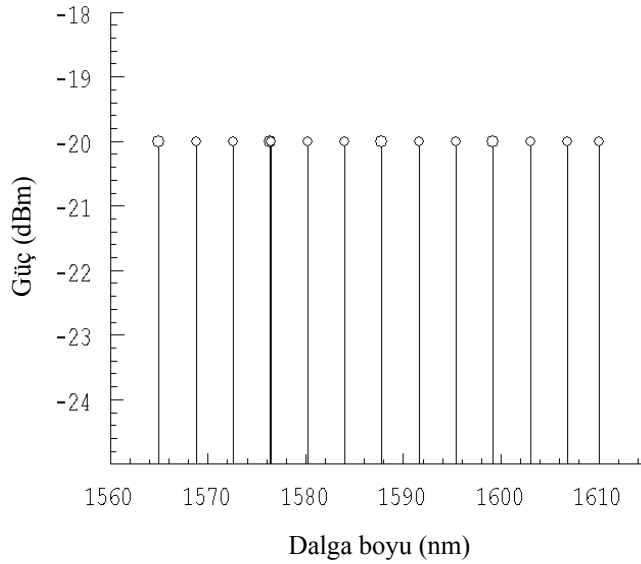
Şekil 4.18. İki aşamalı EKFY’de filtrenin kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlardaki kazanç spektrumu

#### 4.4. Kazancı Düzleştirilmiş L Band Optik Yükselteç Tasarımı ve Benzetimi

Şekil 4.19’da 50 m’lik EKF kullanılarak oluşturulmuş basit bir L band EKFY düzeneği görülmektedir.

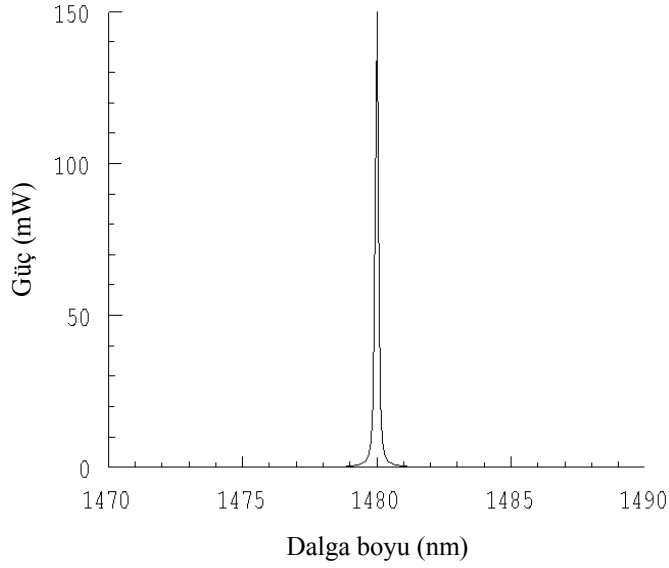


Şekil 4.19. L band EKFY düzeneği



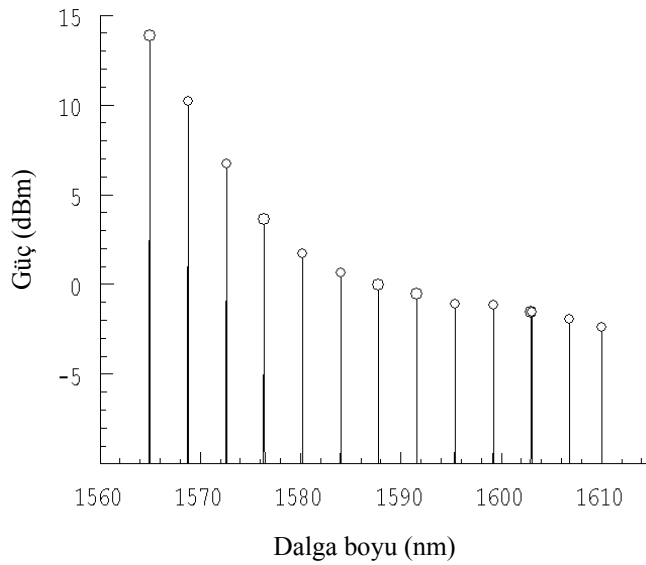
Şekil 4.20. L band giriş sinyalleri

Şekil 4.20’de tasarlanan L band EKFY’nin girişine uygulanan giriş sinyalleri görülmektedir. Giriş sinyali olarak 1565–1610 nm dalga boyları arasında 3,8 nm’lik aralıklarla -20 dBm güçteki 13 sinyal uygulanmıştır.



Şekil 4.21. L band pompa sinyali

Şekil 4.21’de sistemde kullanılan pompa sinyali görülmektedir. Pompa lazeri 1480 nm dalga boyunda ve 150 mW gücünde seçilmiştir.



Şekil 4.22. L band çıkış sinyalleri

Şekil 4.22’de L band çıkış sinyalleri görülmektedir. Giriş ve çıkış sinyalleri karşılaştırıldığında, 18 ile 34 dB arasında değişen bir kazancın elde edildiği görülmektedir.

#### 4.4.1. L Band için kazanç düzleştirme işlemi

Yapılan çeşitli çalışmalarda erbiyum katkısının yanında bizmut, tellürit, fosfor/alüminyum ve pek çok katkı malzemesi kullanılarak [116-118], L band EKFY'ler çeşitli konfigürasyonlarda çalıştırılarak [30-44], kazanç düzleştirici filtreler ve fiber ızgaralar kullanılarak çıkış sinyal spektrumu düzleştirilmeye çalışılmıştır [116-122]. Bu bölümde tek aşamalı, iki aşamalı, iki aşamalı kazanç düzleştirici filtreli ve çift geçişli L band EKFY konfigürasyonlarının çıkış sinyal kazançları ve gürültü faktörleri incelenmiştir.

Şekil 4.23'de a, b ve c şekillerinde sırası ile iki aşamalı, iki aşamalı kazanç düzleştirici filtreli ve çift geçişli L band EKFY konfigürasyonları görülmektedir. Giriş sinyali olarak tüm konfigürasyonlara 1565–1610 nm dalga boyları arasında 3,8 nm'lik aralıklarla -20 dBm güçteki 13 sinyal uygulanmıştır. Ayrıca tüm konfigürasyonlarda Çizelge 4.5'deki EKF parametreleri kullanılmıştır. Konfigürasyonlar Optiamplifier 4.0 programı kullanılarak analiz edilmiştir [123, 124].

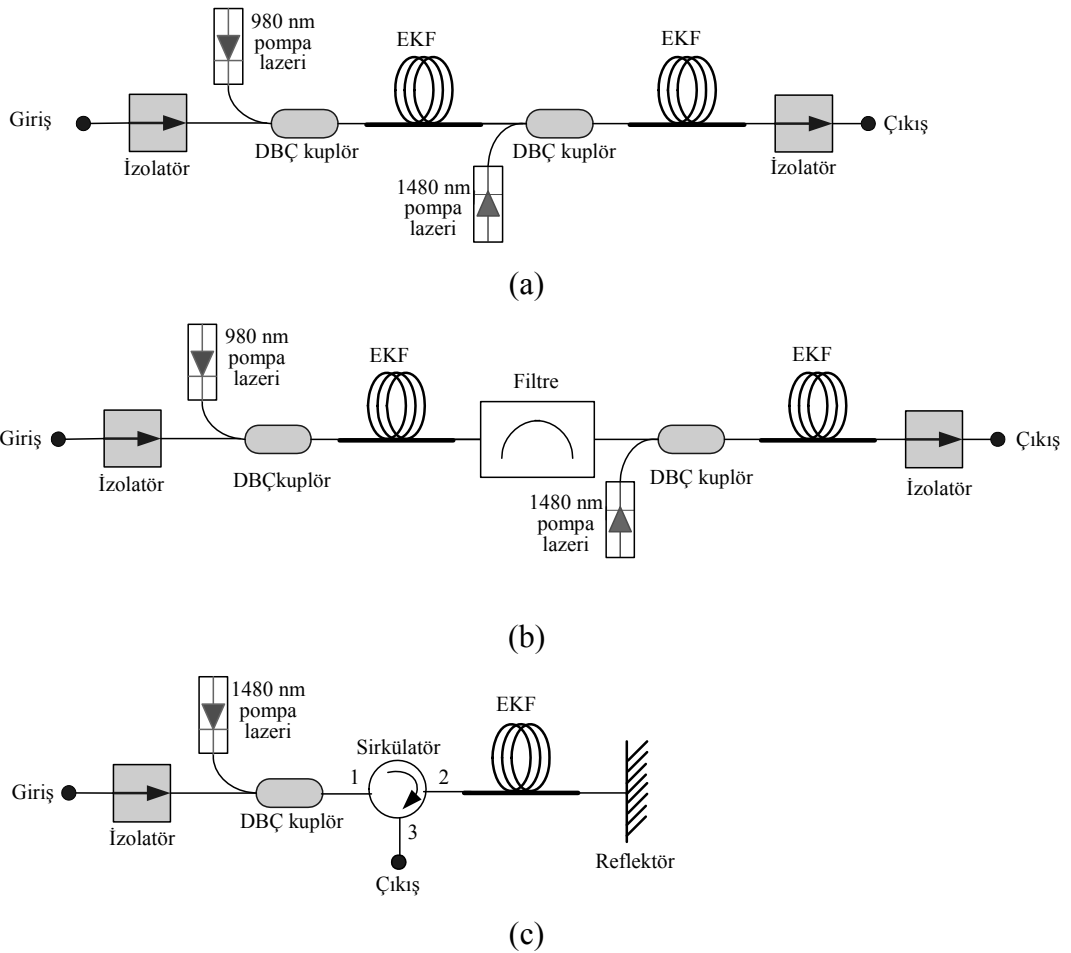
Çizelge 4.5. L band EKF parametreleri

Parametreler	Değerler
1300 nm kaybı	4 dB/km
İyon ömrü	10 ms
Öz yarıçapı	1,45 $\mu\text{m}$
Erbiyum yarıçapı	1 $\mu\text{m}$
Er <sup>3+</sup> yoğunluğu	$9 \times 10^{24}$ iyon/m <sup>3</sup>
Nümerik açıklık	0,24

1480 nm'de pompalama için L bandı EKFY'nin kazanç band genişliğindeki artışa karşın, gürültü performansı ve dolayısıyla kullanılabilir band genişliği 980 nm'de daha yüksektir. Yüksek gürültü performansı ile birlikte, yüksek kazanç ve band genişliği elde etmek için L band EKFY çift yönlü 980-980 nm veya 980-1480 nm konfigürasyonlarından biriyle pompalanmalıdır [125].

İki aşamalı konfigürasyonda ilk aşama için 980 nm dalga boyu ve 50 mW güçte,

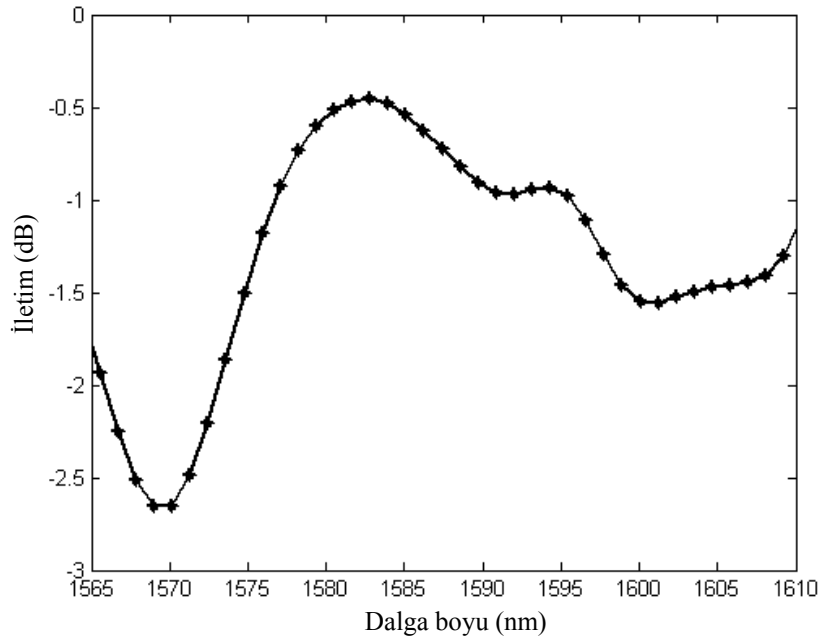
ikinci aşama için 1480 nm dalga boyu ve 50 mW güçte pompa lazerleri kullanılırken, ilk aşama EKF boyu 31 m ve ikinci aşama EKF boyu 77 m'dir. Kazanç düzleştirici filtrenin kullanıldığı iki aşamalı konfigürasyon, filtresiz iki aşamalı konfigürasyon ile aynı olup sadece iki aşama arasına pasif optik filtre yerleştirilmiştir. Çift geçişli konfigürasyonda 1480 nm 100 mW güçteki pompa lazeri ile 65 m boyunda EKF kullanılmıştır. Sistemde kullanılan sirkülatör 1550 nm'de 1,2 dB, 1480 nm'de 1,5 dB ve 980 nm'de 40 dB ek kaybına sahiptir.



Şekil 4.23. L band EKFY için kazanç düzleştirme konfigürasyonları (a) İki aşamalı, (b) İki aşamalı kazanç düzleştirici filtrelili, (c) Çift geçişli

Tüm konfigürasyonlarda pompa dalga boyu, pompa gücü ve EKF boyu parametreleri değiştirilerek çıkış kazanç spektrumu düzleştirilmeye çalışılmıştır. Tek aşamalı konfigürasyon (Şekil 4.19) en basit L band EKFY olup bu konfigürasyonda daha

yüksek kazanç elde etmek için 1480 nm dalga boyunda ve 125 mW güçte pompa lazeri seçilirken 100 m boyunda EKF kullanılmıştır. İki aşamalı konfigürasyonda tek aşamalı konfigürasyondan farklı olarak iki adet EKF ve iki adet pompa lazeri kullanılmıştır. Gürültü karakteristiğini iyileştirmek için ilk aşamada 980 nm dalga boyunda pompa kaynağı seçilirken, daha yüksek kazanç için ikinci aşama pompa lazeri 1480 nm dalga boyunda seçilmiştir. 1565–1610 nm sinyal dalga boyları arasındaki düşük dalga boylarını yükseltmek için ilk aşamadaki EKF boyu kısa, 1565–1610 nm sinyal dalga boyları arasındaki yüksek dalga boylarının genliğini yükseltmek için ikinci aşamadaki EKF boyu daha uzun seçilmiştir. Burada her bir dalga boyu arasındaki kazanç farkının ( $\Delta G = G_{\text{mak.}} - G_{\text{min.}}$ ) minimum olduğu EKF boyları optimum olarak kabul edilmiştir. Daha sonra iki aşamalı konfigürasyonda, iki aşama arasına pasif optik filtre yerleştirilerek her bir dalga boyundaki kazanç dalgalanmaları kırılmış ve çıkış kazanç spektrumu düzleştirilmeye çalışılmıştır. Kullanılan filtrenin iletim spektrumu Şekil 4.24’de görülmektedir. İletim spektrumu C bandında olduğu gibi, OptiAmplifier 4.0 programı ile optimize edilen filtre modülünün, beyaz ışık kaynağının arkasına bağlanıp bir izolatörden geçirilmesi suretiyle elde edilmiştir.



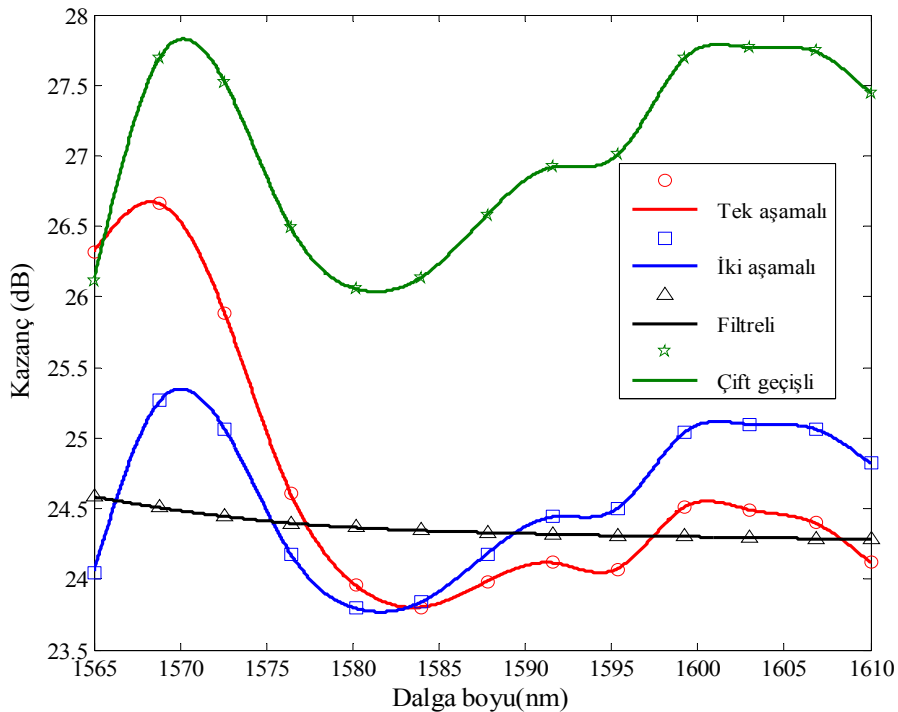
Şekil 4.24. Kazanç düzleştirici filtre iletim spektrumu



Şekilden de görüleceği üzere pasif optik filtre yüksek genlikli dalga boylarının kazancını kırpmakta ve sistemin çıkış kazanç spektrumunu düzleştirmektedir.

Son olarak reflektör ve sirkülatörlü bir çift geçişli konfigürasyon kullanılmıştır. Bu yapıda ilk olarak pompa lazeri ile pompalanan L band sinyaller sirkülatörün 1 nolu portundan 2 nolu portuna geçerek EKF'de yükseltilmekte, reflektörden geri yansıtılarak EKF'de yeniden yükseltilmektedir. Daha sonra sirkülatörün 2 nolu portundan 3 nolu portuna gelerek çıkışa ulaşmaktadır.

Bu konfigürasyonda sinyaller EKF'den iki kez geçtiğinden çift geçişli olarak adlandırılmakta ve bu nedenle daha yüksek sinyal kazancı elde edilmektedir. Ancak YKY EKF'ye yeniden girdiği için sinyalle birlikte yükseleceğinden diğer konfigürasyonlara göre gürültü faktörü daha yüksek olmaktadır. Fakat yüksek çift kırınımlı fiber döngü aynaları kullanılarak YKY bastırılıp gürültü faktörü iyileştirilebilmektedir [126].

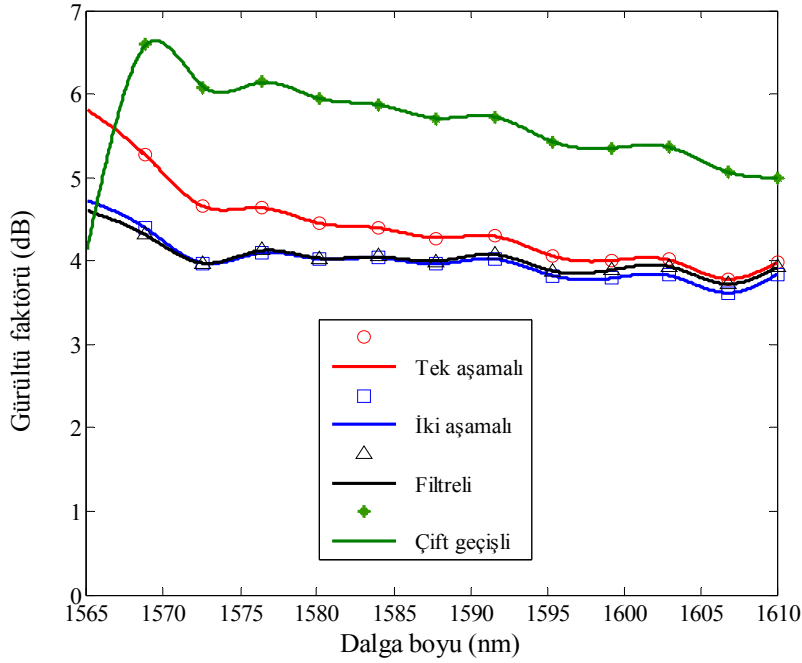


Şekil 4.25. Dört ayrı L band EKFY konfigürasyonunun kazanç spektrumları

Çizelge 4.6. L band konfigürasyonları için kazanç değerleri

Dalga boyu	Kazanç (dB)			
	Tek Aşamalı	İki aşamalı	İki aşamalı Filtreli	Çift geçişli
1565,0	26,32	24,05	24,58	26,11
1568,8	26,66	25,26	24,50	27,69
1572,6	25,88	25,06	24,44	27,51
1576,4	24,60	24,17	24,40	26,49
1580,2	23,95	23,79	24,36	26,06
1584,0	23,80	23,83	24,34	26,14
1587,8	23,98	24,18	24,33	26,58
1591,6	24,12	24,44	24,32	26,92
1595,4	24,07	24,50	24,31	27,01
1599,2	24,51	25,04	24,30	27,69
1603,0	24,49	25,09	24,29	27,76
1606,8	24,40	25,06	24,28	27,74
1610,0	24,11	24,82	24,28	27,44
<b>Fark (<math>\Delta G</math>) (dB)</b>	<b>2,86</b>	<b>1,47</b>	<b>0,30</b>	<b>1,70</b>

Şekil 4.25’de dört ayrı L band konfigürasyonunun çıkış sinyal kazanç spektrumları ve Çizelge 4.6’da nümerik değerleri görülmektedir. Tek aşamalı sistem 23,80-26,66 dB, iki aşamalı sistem 23,79-25,26 dB, iki aşamalı kazanç düzleştirici filtreli sistem 24,28-24,58 dB ve son olarak çift geçişli sistem 26,06-27,76 dB arasında değişen kazançlara sahiptir. Her bir konfigürasyonun sinyal dalga boyları arasındaki kazanç farkları incelenecek olursa; tek aşamalı sistemde  $\Delta G=2,86$  dB, iki aşamalı sistemde  $\Delta G=1,47$  dB, iki aşamalı filtreli sistemde  $\Delta G=0,3$  dB ve son olarak çift geçişli sistemde  $\Delta G=1,70$  dB’dir.



Şekil 4.26. Dört ayrı L band EKFY konfigürasyonunun gürültü faktörleri

Şekil 4.26'da dört ayrı L band konfigürasyonunun çıkış gürültü faktörleri Çizelge 4.7'de ise nümerik değerleri görülmektedir. Tek aşamalı sistem 3,77-5,81 dB, iki aşamalı sistem 3,61-4,72 dB, iki aşamalı kazanç düzleştirici filtreli sistem 3,71-4,60 dB ve son olarak çift geçişli sistem 4,12-6,59 dB arasında değişen gürültü faktörüne sahiptir.

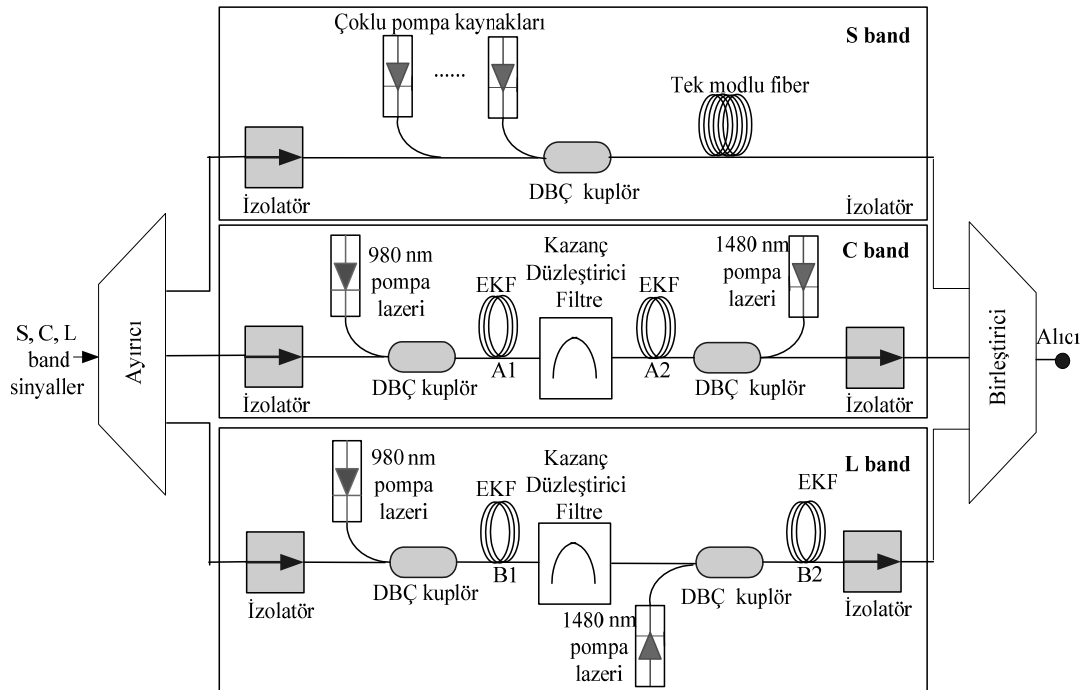
Çizelge 4.7. L band konfigürasyonları için gürültü değerleri

Dalga boyu	Gürültü Faktörü (dB)			
	Tek Aşamalı	İki aşamalı	İki aşamalı Filtreli	Çift geçişli
1565,0 nm	5,81	4,72	4,60	4,12
1568,8 nm	5,27	4,40	4,32	6,59
1572,6 nm	4,64	3,96	3,96	6,06
1576,4 nm	4,64	4,10	4,12	6,14
1580,2 nm	4,44	4,01	4,02	5,94
1584,0 nm	4,39	4,03	4,05	5,87
1587,8 nm	4,27	3,96	3,99	5,70
1591,6 nm	4,29	4,02	4,08	5,72
1595,4 nm	4,05	3,82	3,87	5,42
1599,2 nm	4,00	3,79	3,88	5,34
1603,0 nm	4,01	3,82	3,93	5,36
1606,8 nm	3,77	3,61	3,71	5,06
1610,0 nm	3,97	3,83	3,92	5,00

#### 4.5. S, C, L Band Optik Yükselteç Sisteminin Tasarımı ve Benzetimi

Şekil 4.27’de tasarlanan üç bandlı (S, C, L) optik yükselteç görülmektedir. Bu yükselteçte daha önceki bölümlerde ayrı ayrı analiz edilen üç band birleştirilerek tek bir optik yükselteç sistemine dönüştürülmüştür.

S band sinyaller için kesikli FRY kullanılmış olup, Şekil 4.27’de üst kolonda görülmektedir. C bandı için tasarlanan sistem Şekil 4.27’nin orta bölümü olup, pompa lazerleri sırasıyla 980 nm, 1480 nm dalga boyunda ve 157 mW gücünde seçilmiştir. İlk EKFY’de 980 nm dalga boyunda yapılan pompalamanın yüksek bir ters birikme sağlaması ve buna bağlı olarak da sinyal gürültü faktörünün azaltılması amaçlanırken, ikinci EKFY’de 1480 nm dalga boyunda yapılan pompalama ile yüksek kazanç sağlanmaktadır. C bandı için en uygun filtre pozisyonu tüm fiber boyunun %42’si civarında daha yüksek kazanç gösterdiği için iki aşamalı EKFY’nin A1 kısmının boyu 4 m, A2 kısmının boyu ise 5 m olarak seçilmiştir. Filtre, bu aralığa yerleştirildiğinde diğer konumlara göre 10 dB’ye varan kazanç gelişimi gözlenmiştir [127-128].



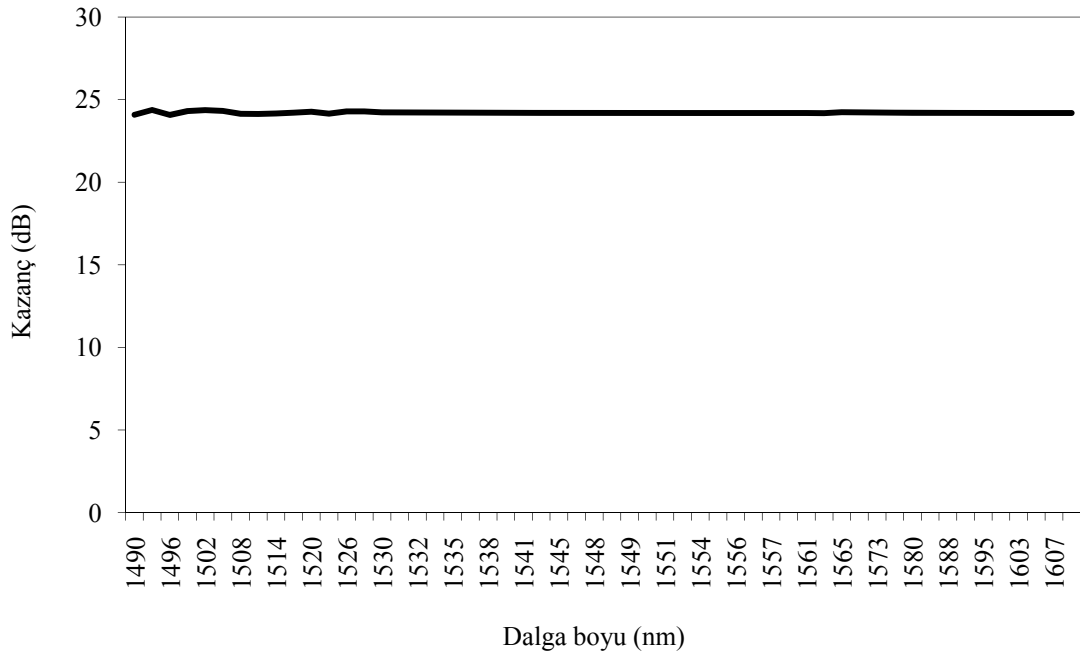
Şekil 4.27. Kazancı düzleştirilmiş çok geniş bandlı hibrid optik yükselteç sistemi

L band yükselteci olarak kullanılan düzenek Şekil 4.27'nin alt kısmında görülmektedir. L band EKFY'de gürültü ve kazanç özellikleri daha iyi olan iki aşamalı sistem kullanılırken çıkıştaki kazanç dalgalanmalarını minimuma indirmek için bu iki aşama arasına kazanç düzleştirici filtre kullanılmıştır. Ters birikme seviyesinin L band dalga boyunda daha düşük olması (%30–40) nedeniyle C band ile karşılaştırıldığında L band fiberin boyu daha uzundur. Fakat yine aynı özellikten dolayı dalga boyuna bağlı çıkış kazanç değerleri arasındaki dalgalanma C bandına göre daha düşüktür. Uygulanan L band sinyallerden düşük dalga boylarına sahip sinyaller için ilk aşamada daha kısa EKF ( $B1 = 31$  m), yüksek dalga boyuna sahip sinyaller için ise ikinci aşamada daha uzun EKF ( $B2 = 77$  m) kullanılmıştır.

Tüm sinyaller bir ayırıcıya uygulanıp burada S, C ve L band sinyaller ayrıldıktan sonra ayrı ayrı yükseltip kazançları düzleştirildikten sonra bir birleştirici aracılığıyla tekrar birleştirilerek alıcıya ulaştırılmıştır.

C ve L band EKFY sisteminin benzetimi yapılırken Giles ve Desurvire'nin kararlı durumlarda kullanılan iki seviyeli sistem modeli kullanılmıştır [114]. S band FRY sisteminin benzetiminde ise Namiki ve Emori'nin matematiksel FRY analizi kullanılmıştır [129].

Şekil 4.28'de görüleceği üzere 1490–1610 nm (120 nm band genişliği) aralığındaki giriş sinyalleri için çıkışta 24,07 ile 24,37 dB aralığında değişen bir kazanç spektrumu elde edilmiştir.



Şekil 4.28. Geniş band optik yükseltecin çıkış sinyal kazanç spektrumu

S band için 0,3 dB, C ve L band için ise 0,1 dB'lik kazanç dalgalanmaları elde edilmiştir ki bu değerler oldukça düşük değerlerdir. Tüm dalga boyları arasında ise 0,3 dB'lik kazanç değişimi elde edilmiştir [130].

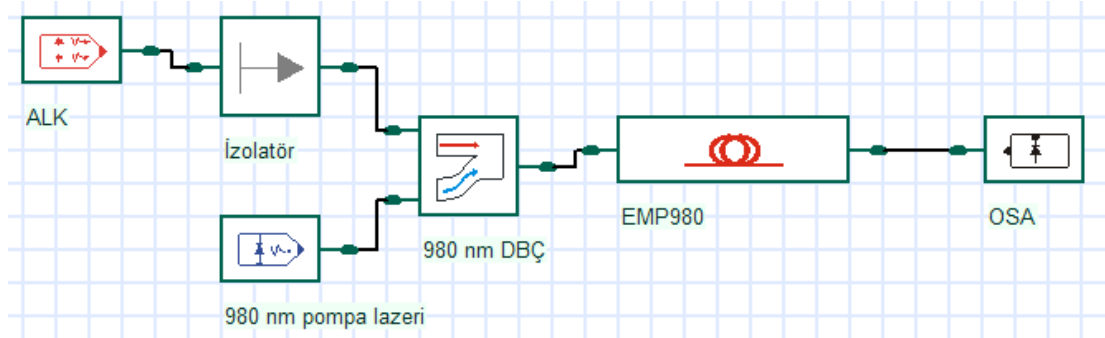
Şekil 4.27'deki konfigürasyonda FRY dağıtılmış yükselteç olarak kullanılırsa TMF birleştirici çıkışına alınarak bir fiber optik haberleşme linki oluşturulabilir. Fakat kazanç spektrumu iletim fiberindeki zayıflama ile düşerken, kazanç düzlüğü S bandından C ve L bandına aktarılan güç ve Raman diyafoni etkisi ile bozulacaktır.

## 5. C BAND EKFY'NİN DENEYSEL KARAKTERİZASYONU

### 5.1. Benzetim Düzeneği ve Pratik Uygulamanın Tasarlanması

Karakterizasyonu yapılan C band EKFY'nin benzetim düzeneği Şekil 5.1'de görülmektedir. 1530-1564 nm arasında ve -20 dBm güçteki C band sinyaller bir izolatörden geçirildikten sonra, DBÇ kuplör aracılığıyla 980 nm 100 mW'lık pompa sinyali ile birleştirilerek EMP980 EKF'sinde yükseltilmektedir. Benzetim OptiAmplifier 4.0 programı kullanılarak yapılmıştır. Benzetimde, deney düzeneğinde kullanılan tüm malzemeler için ek kaybı, izolasyon ve geri dönüş kaybı verileri girilmiştir (Çizelge 5.1). C band EKF olarak Coractive firmasının EMP980 C band EKF'si kullanılmıştır (Çizelge 5.2). Bu fiberin yayılım ve soğurum değerleri veri dosyası olarak hazırlanarak benzetimde kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalar öncesinde benzetim düzeneği kurularak çıkış kazancının istenilen seviyeye yakın olarak ayarlanması için en uygun EKF boyu belirlenmiştir.



Şekil 5.1. C band EKFY benzetim düzeneği [123]

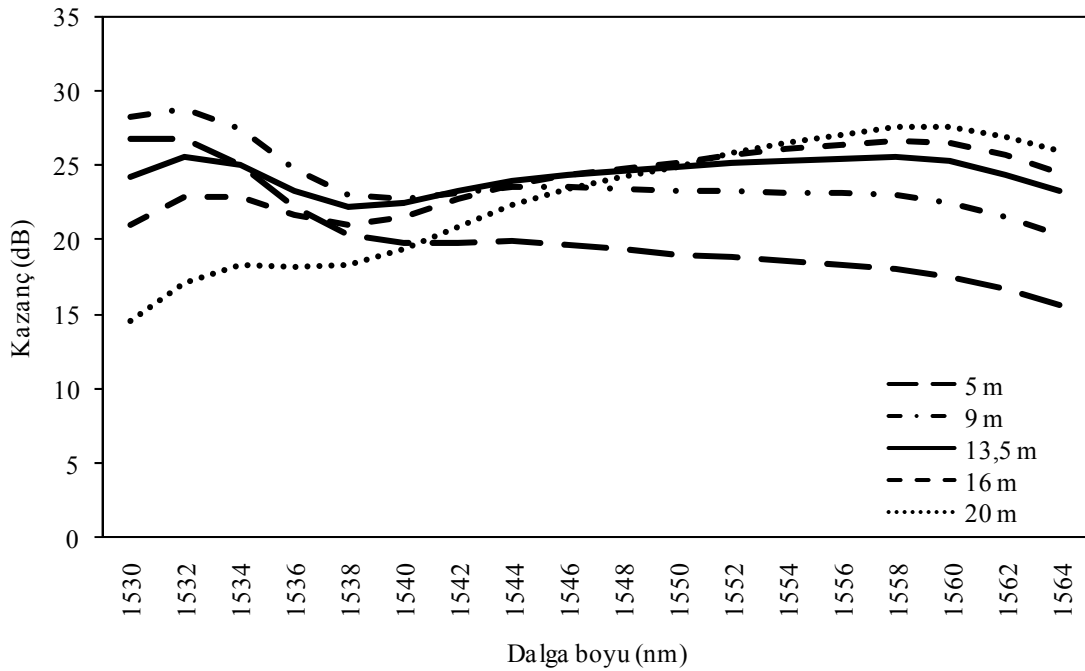
Çizelge 5.1. Benzetimde kullanılan parametreler

Malzeme	Ek kaybı (dB)	İzolasyon (dB)	Geri dönüş kaybı (dB)
İzolator	0,22	30,8	55
Pompa kuplörü	0,16	22,34	50

Çizelge 5.2. EMP980 C band EKF parametreleri

Parametreler	Değerler
Kesim Dalga boyu	891 nm
1300 nm kaybı	1,45 dB/km
İyon ömrü	10 ms
Öz yarıçapı	1,77 $\mu\text{m}$
Erbium yarıçapı	1,68 $\mu\text{m}$
Er <sup>3+</sup> konsantrasyonu	226,66 ppm
Nümerik açıklık	0,19

Benzetimde daha düşük gürültü faktörü elde etmek için 980 nm 100 mW'lık pompa lazeri kullanılırken, öncelikli olarak fiber boyunun tespiti yapılmıştır. Bunun için çeşitli EKF uzunlukları için kazanç ve kazanç değişimi değerlerine bakılarak en uygun fiber boyu seçilmiştir. Şekil 5.2'de çeşitli fiber boylarına karşılık elde edilen kazanç spektrumları görülmektedir.

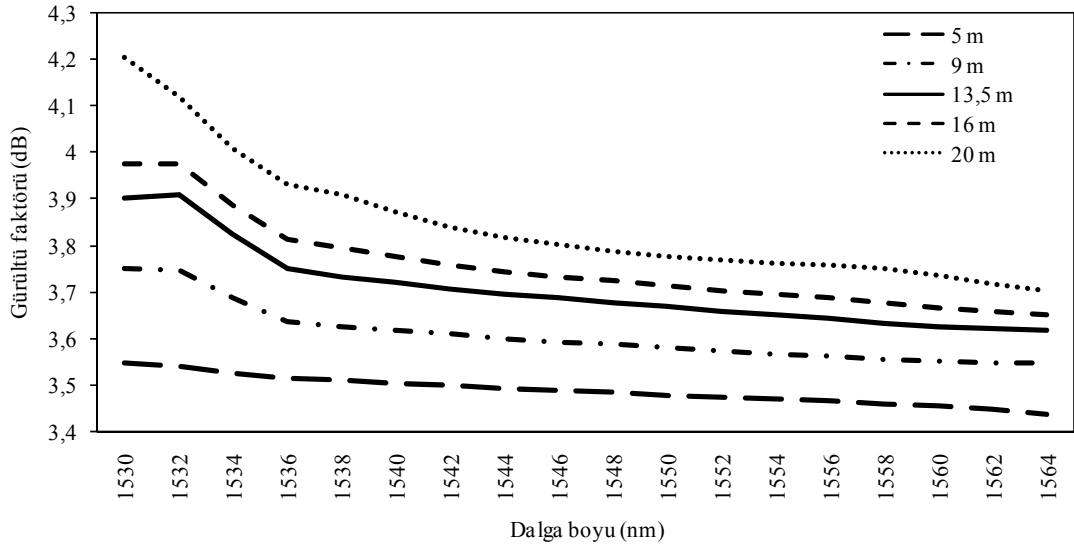


Şekil 5.2. Çeşitli fiber boylarına karşılık kazanç spektrumu

Şekil 5.2'de 13,5 m'lik EKF seçildiğinde C bandı boyunca kazanç değişiminin minimum ve kazancının da diğer EKF boylarına göre yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle deneysel çalışmada bu fiber boyu kullanılmıştır.



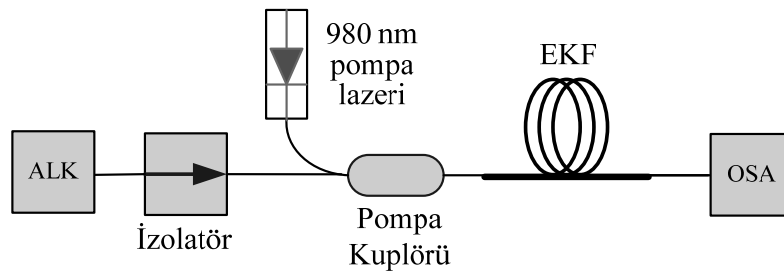
Ayrıca çeşitli EKF boyları için oluşan gürültü spektrumu Şekil 5.3’de görülmektedir. Gürültü faktörü değerlerine bakıldığında 5 m EKF boyu için en düşük gürültü elde edilmektedir. Fakat bu EKF boyu için kazanç düşük ve kazanç değişimi yüksek olduğu için tercih edilmemiştir.



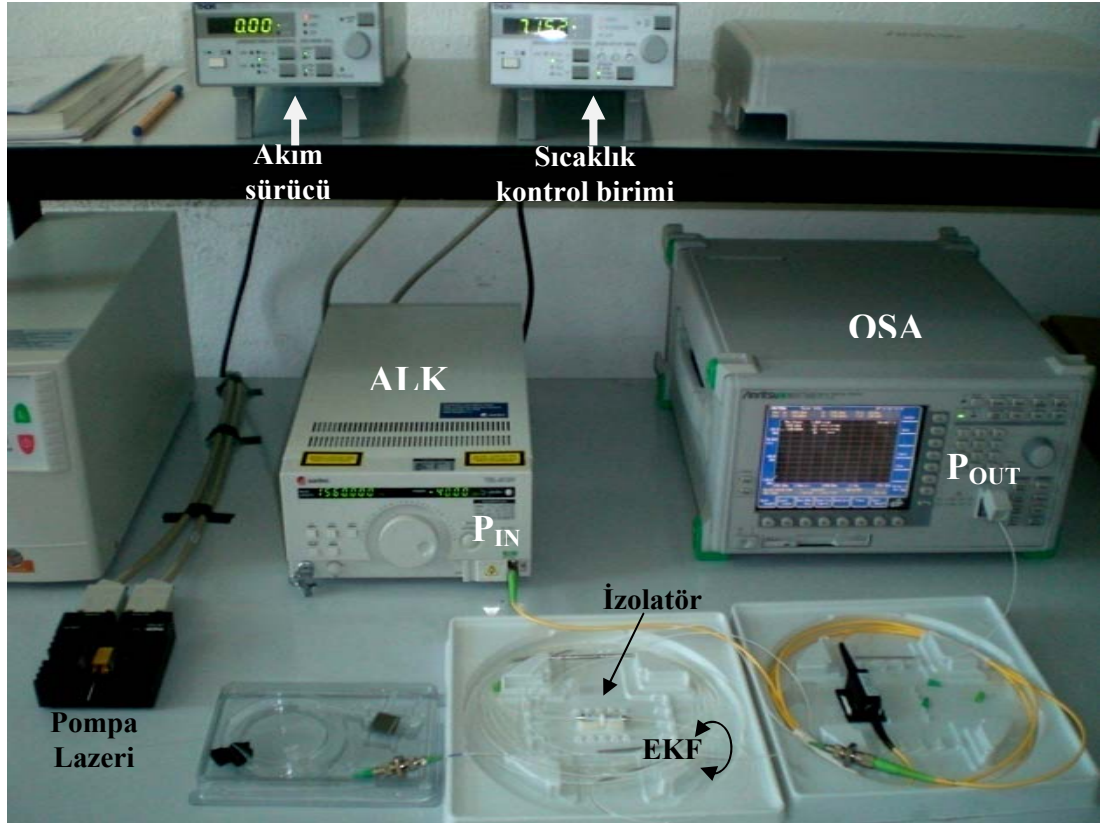
Şekil 5.3. Çeşitli fiber boylarına karşılık gürültü spektrumu

## 5.2. Deneysel Düzenek

Şekil 5.4’de kurulan deneysel düzeneğin şematik gösterimi, Resim 5.1’de ise pratik olarak kurulmuş deney düzeneği görülmektedir. Bu düzeneklerde ALK ayarlanabilir lazer kaynağının, OSA ise optik spektrum analizörünün kısaltmasıdır.



Şekil 5.4. C band EKFY düzenneği şematik gösterimi

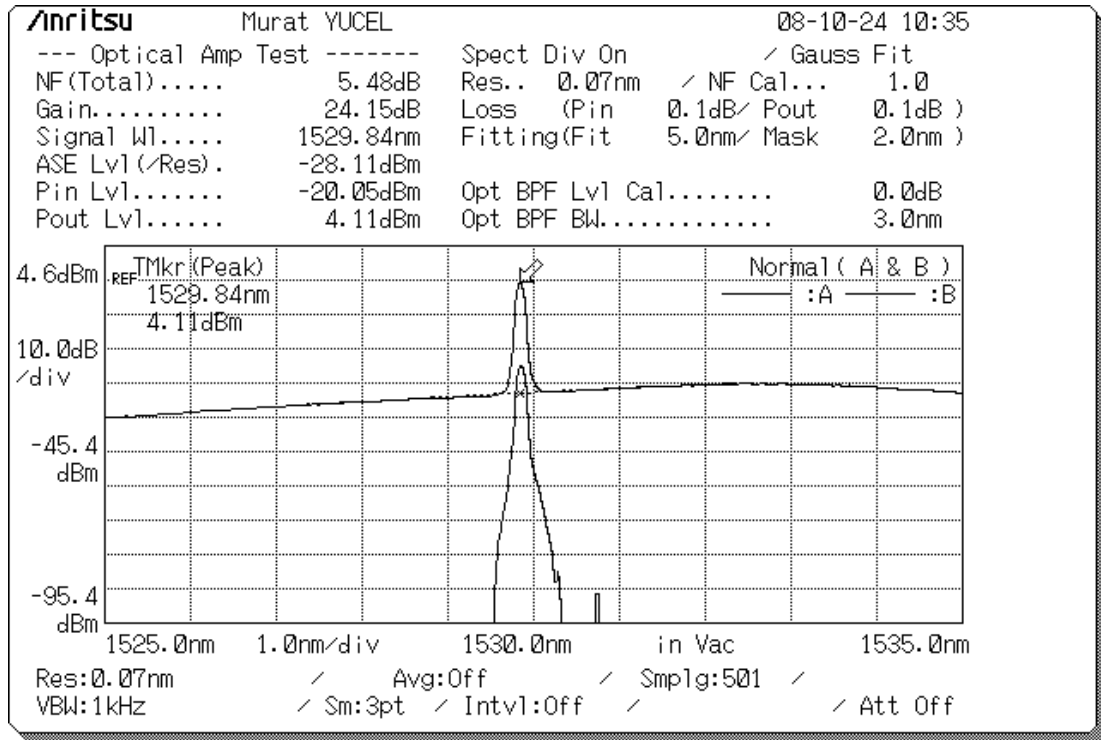


Resim 5.1. C band EKFY deney düzeneği

ALK ile -40 dBm, -30 dBm, -20 dBm ve -10 dBm için 1524-1570 nm arasında, 0 dBm için ise 1524-1576 nm arasında giriş sinyalleri uygulanmıştır.

Deney düzeneğinde OSA olarak Anritsu MS9710B ve ALK olarak Santec TLS210V kullanılmıştır. OSA'nın optik yükselteç test menüsünde, 0,07 nm çözünürlük ve spektrum bölmeli gürültü ölçme metodu ile kazanç ve gürültü değerleri ölçülmüştür.

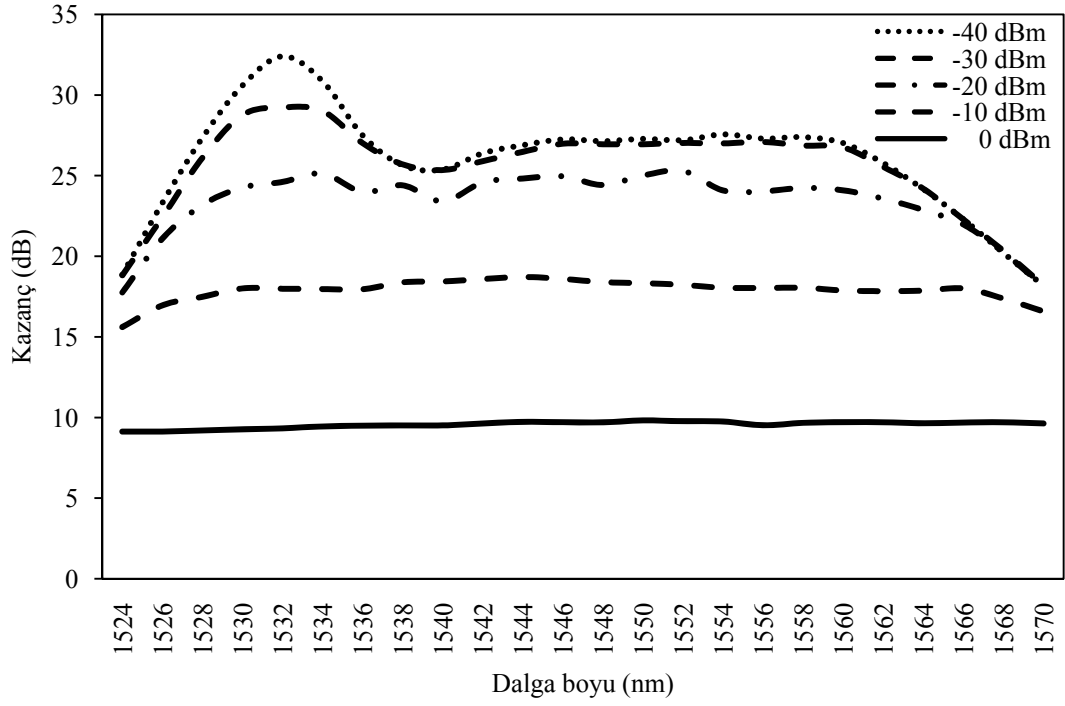
Şekil 5.5'de 1530 nm dalga boyunda -20 dBm güçteki giriş sinyali ve yükseltilmiş çıkış sinyali görülmektedir. Burada 5,48 dB gürültü faktörü ve 24,15 dB kazanç elde edilmiştir.



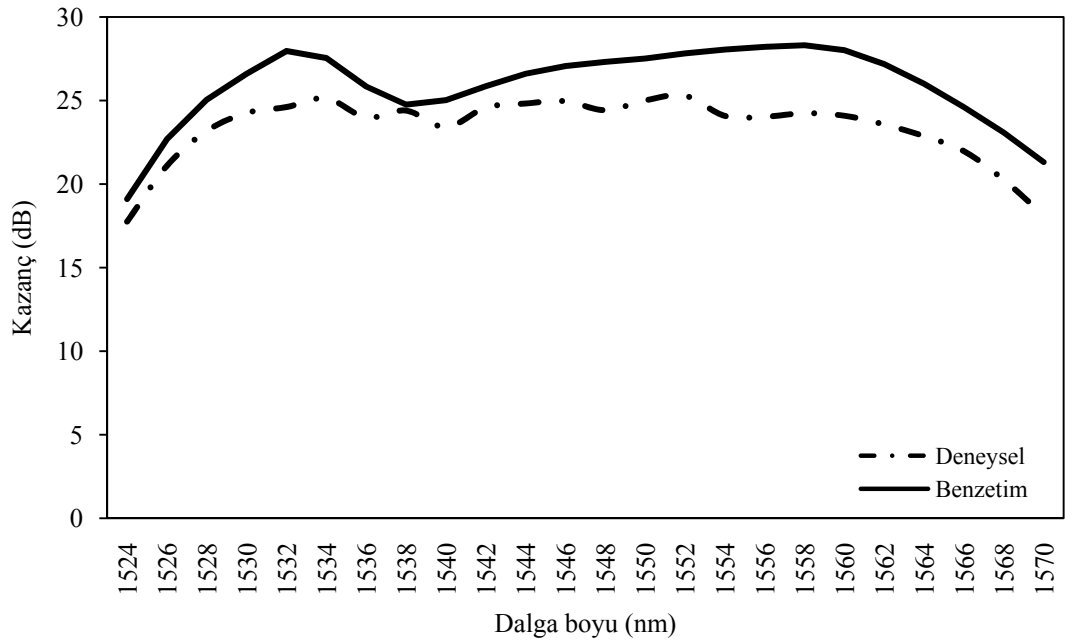
Şekil 5.5. 1530 nm -20 dBm giriş sinyali için çıkış spektrumu

### 5.3. Sinyal Gücünün Kazanç Spektrumuna Etkileri

Giriş sinyal gücü -40 dBm'den başlayarak 10'ar dB artırılarak 0 dBm'e kadar değiştirilmiş ve sistemin kazanç ve gürültü değerleri ölçülmüştür [131]. Şekil 5.6'da giriş sinyal gücü ve dalga boyu değişimine karşılık kazanç spektrumu görülmektedir.



Şekil 5.6. Çeşitli giriş sinyal güçleri için dalga boyu değişimine karşılık kazanç spektrumu



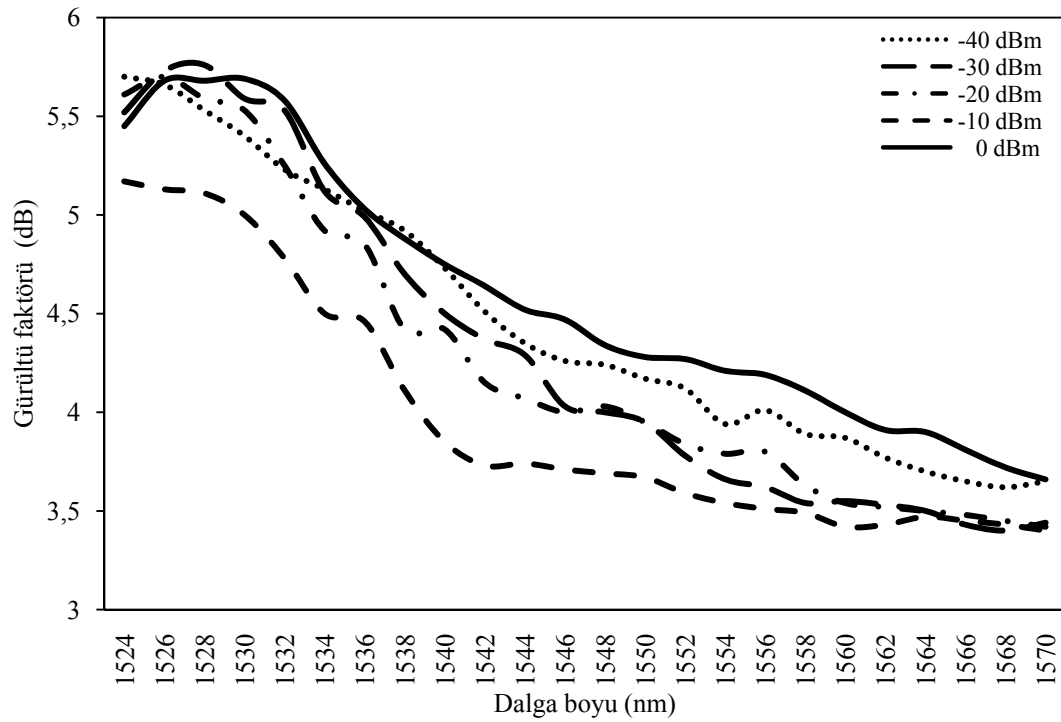
Şekil 5.7. -20 dBm giriş sinyali için deneysel ve benzetim kazanç sonuç eğrileri

Şekil 5.7'de -20 dBm giriş sinyal gücüne karşılık deneysel ve benzetimsel olarak elde edilen kazanç spektrumları görülmektedir. EKF'de yüksek verimlilik için düşük

öz çapı (3-5  $\mu\text{m}$ ) fakat yüksek nümerik açıklık (0,2-0,3) kullanılır. Ancak fiber öz çapının azalması ve nümerik açıklığın artması mod alan çapını düşürür. Bu da EKF (3-4,5  $\mu\text{m}$ ) ve standart fiberin mod alan çapı (10,5  $\mu\text{m}$ ) farkını büyüteceğinden büyük ek kayıplarına neden olur. Farklı mod alan çapına sahip iki fiber arasındaki gerçek kayıp hesaplanırsa [132-133]:

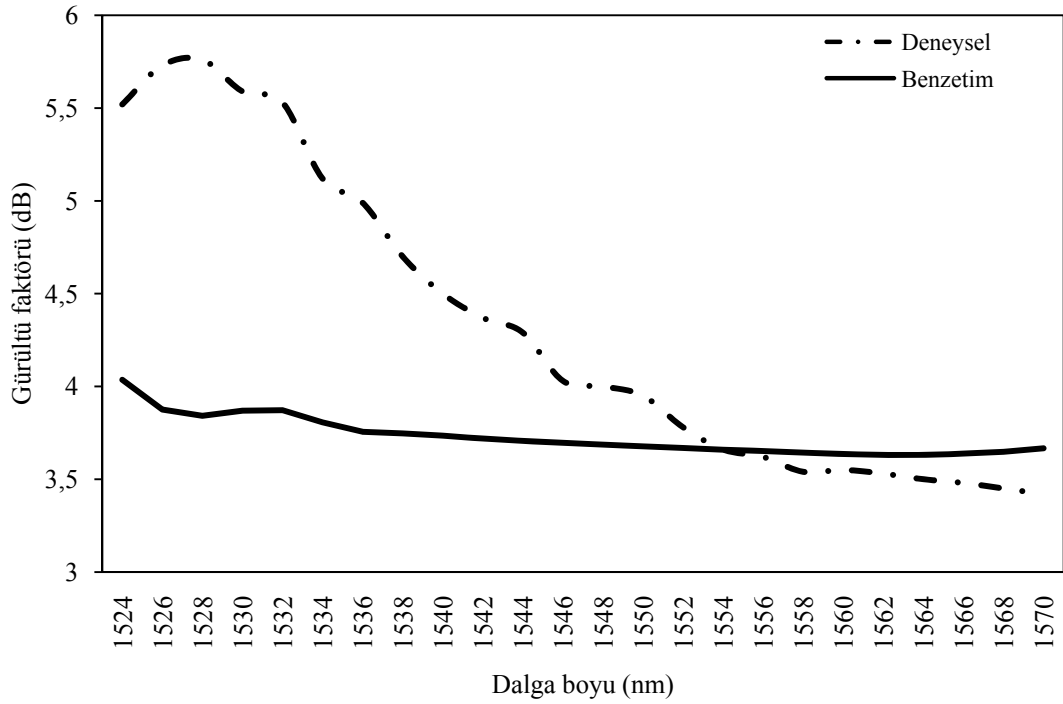
$$\text{Kayıp (dB)} = 20 \log \frac{w_1^2 + w_2^2}{2w_1w_2} \quad (5.1)$$

burada  $w_1$  ve  $w_2$  mekanik olarak bağlanan iki fiberin mod alan yarıçaplarıdır. Bu değerler hesaplandığında yaklaşık 3 dB kayıp bulunur. Buda deneysel ve benzetim sonuçları arasındaki 3 dB'lik farkı açıklamaktadır. Ayrıca benzetimde yüksek güçlerde yükseltecin doyum etkisi ihmal edildiğinden deneysel sonuçlarda farklılıklar oluşturmaktadır.



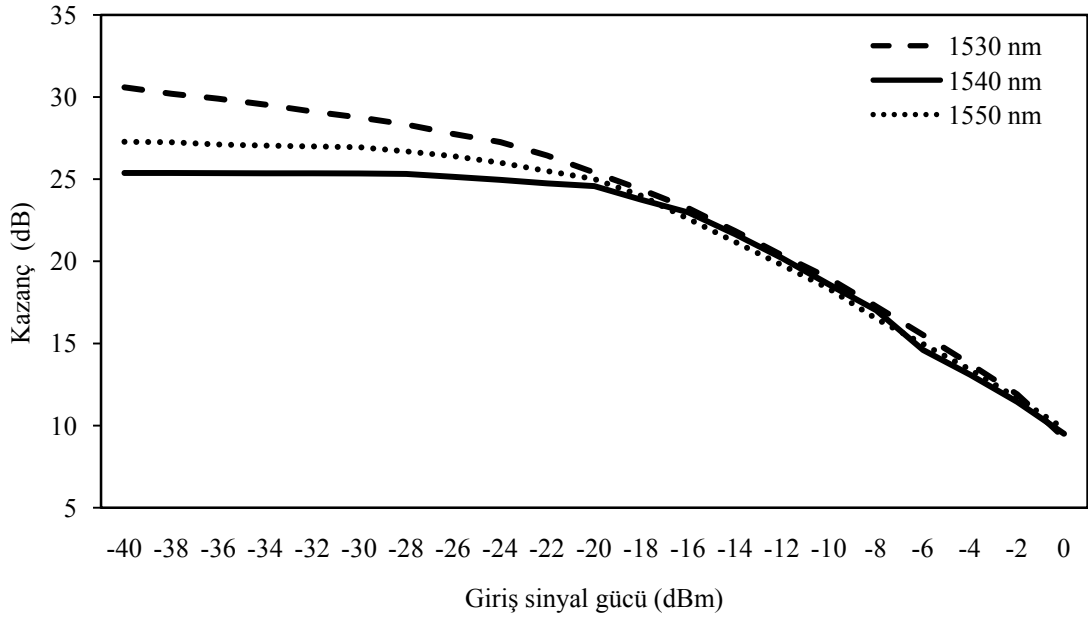
Şekil 5.8. Çeşitli giriş sinyal güçleri için dalga boyu değişimine karşılık gürültü faktörü spektrumu

Şekil 5.8’de ise giriş sinyal gücünde ve dalga boyundaki değişimin gürültü faktörüne etkisi görülmektedir. Gürültü değeri 1524 nm dalga boyunda yaklaşık 5,5 dB iken 1570 nm dalga boyunda 3,5 dB seviyesine düşmüştür.

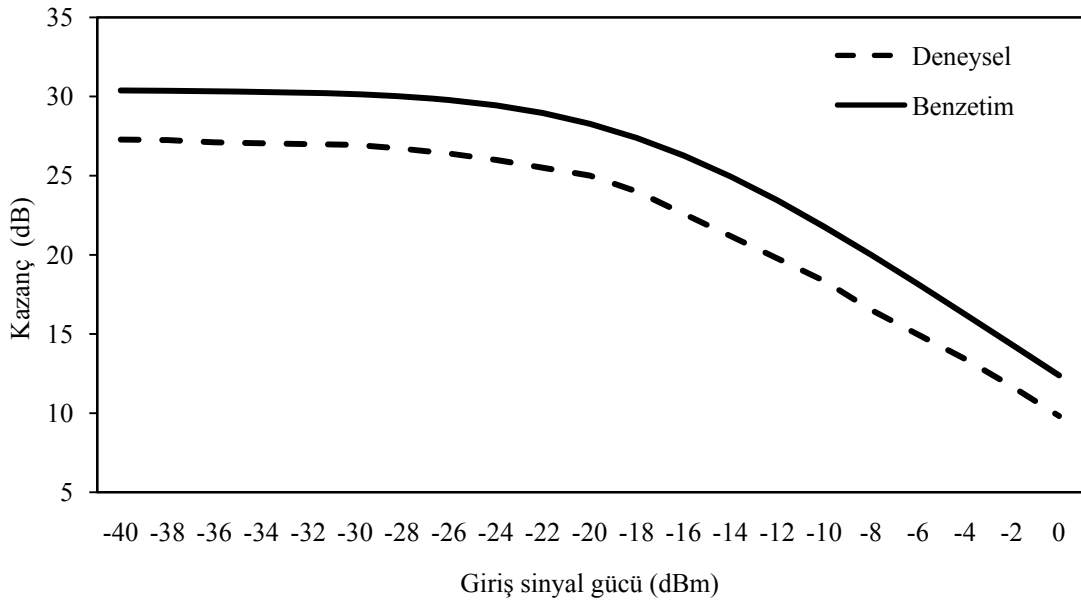


Şekil 5.9. -20 dBm giriş sinyali için deneysel ve benzetim gürültü faktörü spektrumu

Şekil 5.9’da -20 dBm giriş sinyal gücüne karşılık deneysel ve benzetimsel olarak elde edilen gürültü faktörü spektrumları görülmektedir.



Şekil 5.10. Giriş sinyal gücündeki değişime karşılık kazanç spektrumu



Şekil 5.11. 1550 nm sinyal dalga boyu için giriş sinyal gücü değişimine karşılık deneysel ve benzetim kazanç spektrumları

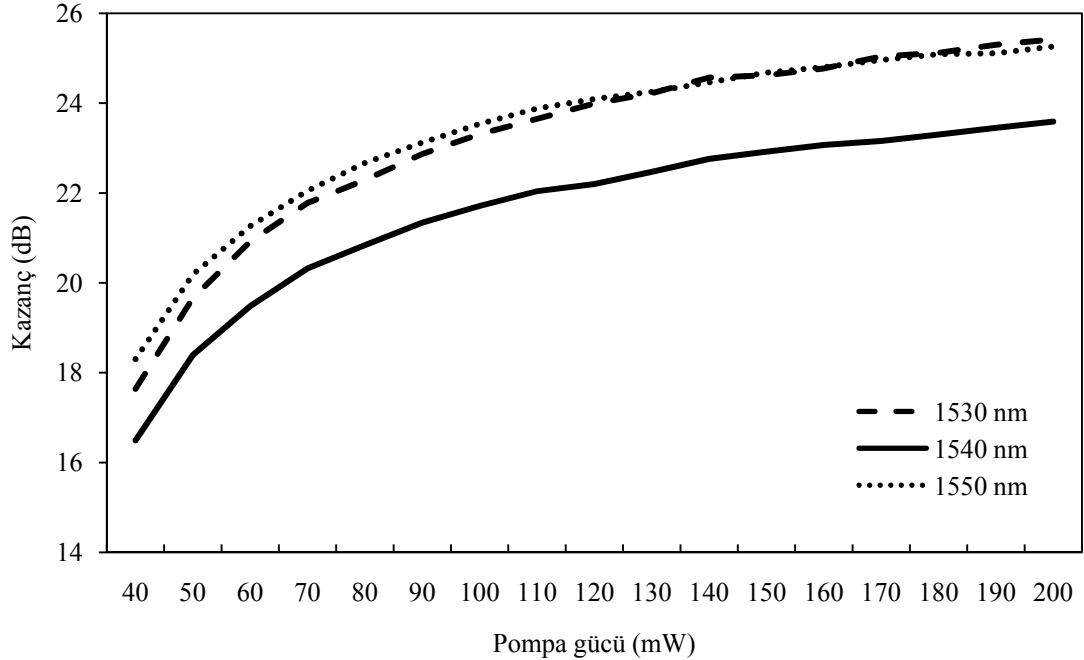
Şekil 5.10'da ALK'nın giriş sinyal gücü -40 ila 0 dBm arasında değiştirilerek 1530 nm, 1540 nm ve 1550 nm sinyal dalga boyları için kazanç spektrumu ölçülmüştür. Giriş sinyal gücü -40 dBm'den -20 dBm'e düşene kadar çıkış sinyal kazançlarında çok büyük bir değişim olmazken -20 dBm'in üstündeki güçlerde yükselteç doyuma

gideceğinden kazanç spektrumunda hızlı bir düşme görülmüştür. Bu nedenle EKFY yüksek kazanç gerektiren durumlarda -20 dBm giriş sinyal gücünde veya daha düşük güçlerde çalıştırılmaktadır.

Şekil 5.11’de 1550 nm sinyal dalga boyu için giriş sinyal gücü değişimine karşılık deneysel ve benzetim sonuçlarına göre kazanç spektrumları görülmektedir. Kazanç eğrileri eşdeğer olmakla beraber deneysel sonuçların benzetim sonuçlarına göre yaklaşık 3 dB daha düşük seviyede olduğu görülmektedir [132-133].

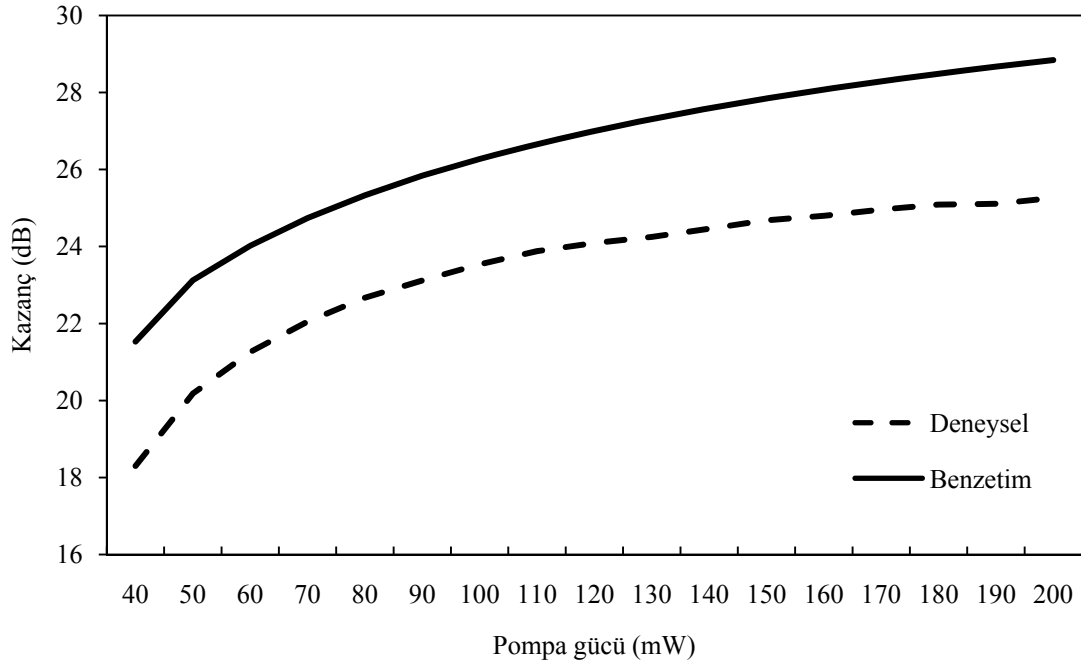
#### 5.4. Pompa Gücünün Kazanç Spektrumuna Etkileri

Şekil 5.12’de ise pompa gücündeki değişime karşılık çeşitli dalga boylarındaki sinyallerin çıkış kazanç spektrumları incelenmiştir. Pompa gücü arttırıldıkça kazanç yükselmektedir.



Şekil 5.12. EKFY kazancının pompa gücüyle değişimi





Şekil 5.13. 1550 nm sinyal dalga boyu için pompa gücü değişimine karşılık deneysel ve benzetim kazanç spektrumları

Şekil 5.13’de 1550 nm dalga boyunda ve -20 dBm güçteki giriş sinyali için pompa gücü 40-200 mW arası değiştirilerek deneysel ve benzetim kazanç spektrumları karşılaştırılmıştır. Deneysel ve benzetim sonuçları arasında 3 dB’lik fark olduğu görülmektedir [132-133].

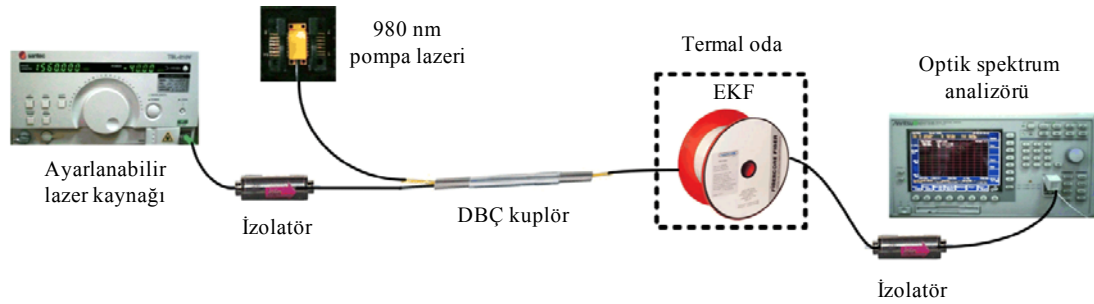
### 5.5. Sıcaklık Değişiminin Kazanç Spektrumuna Etkileri

EKFY’lerin sıcaklığa bağımlı karakteristikleri, optik fiber yükselteçlerin pratik uygulamalarında özellikle DBÇ uygulamaları için anahtar bir parametredir [84, 86, 87]. EKFY’lerin sıcaklığa bağımlılıklarının önceden tahmin edilmelerinin genel bir kuralı yoktur [86, 87].

Bugüne kadar teorik ve deneysel olarak EKFY’nin sıcaklığa bağımlı sinyal kazancı ve gürültü faktörü fiber boyu, pompa dalga boyu ve gücüne bağımlı olarak incelenmiştir [84, 134]. Bu çalışmada farklı olarak sinyal gücünün sıcaklık bağımlılığına etkileri incelenmiştir. Böylece ek pahalı malzemelere gerek kalmadan düşük sıcaklık katsayısına sahip basit bir yapı tasarlanmıştır. Çalışmada 980 nm

pompa lazeri kullanıldığı ve bu pompa dalga boyunda sıcaklığın gürültü faktörüne etkisi çok düşük olduğu için gürültü faktörü ölçülmemiştir [85].

C band EKF 0 ile 60 °C arasında sıcaklık ayarı yapılabilen bir ısıtıcı-soğutucuya yerleştirilmiştir. Her sıcaklık ölçüm işleminden önce 60 dakika beklenerek EKF'nin ısıl dağılımı sağlanmıştır. Deneyde diğer pasif optik malzemeler oda sıcaklığında tutulmuştur. Daha sonra sinyal gücü -40 ile 0 dBm arasında değiştirilerek kazanç değerleri ölçülmüştür. Bu ölçüm düzeneğinin şematik görünümü Şekil 5.14'de, pratik görünümü ise Resim 5.2'de görülmektedir.

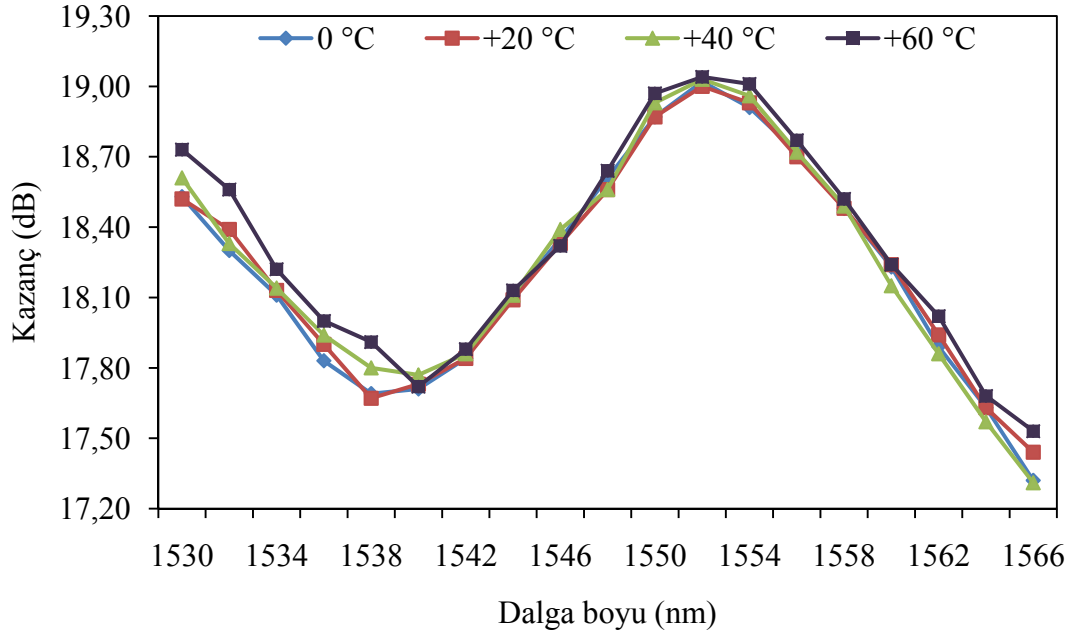


Şekil 5.14. Sıcaklığa bağımlı kazanç spektrumu şematik ölçüm düzeneği

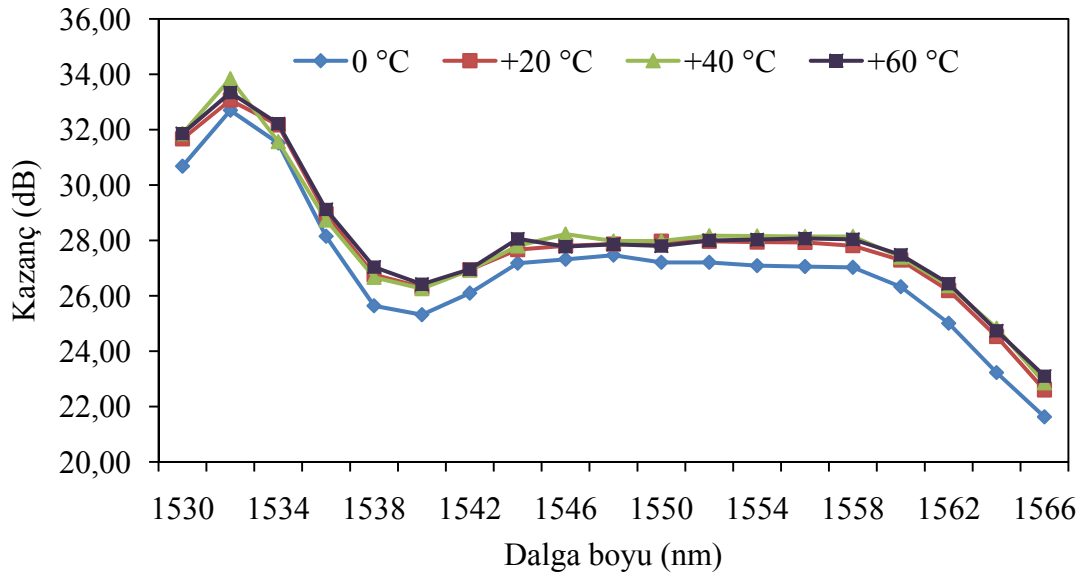


Resim 5.2. Sıcaklığa bağımlı kazanç spektrumu pratik ölçüm düzeneği

Şekil 5.15'de -10 dBm ve -40 dBm'lik giriş sinyal güçleri için 0 °C'den 60 °C'ye kadar 20 °C'lik aralıklarla arttırılan sıcaklıklardaki kazanç spektrumları görülmektedir. -10 dBm için 1,73 dB olan kazanç değişimi, -40 dBm'de 12,21 dB olarak ölçülmüştür.

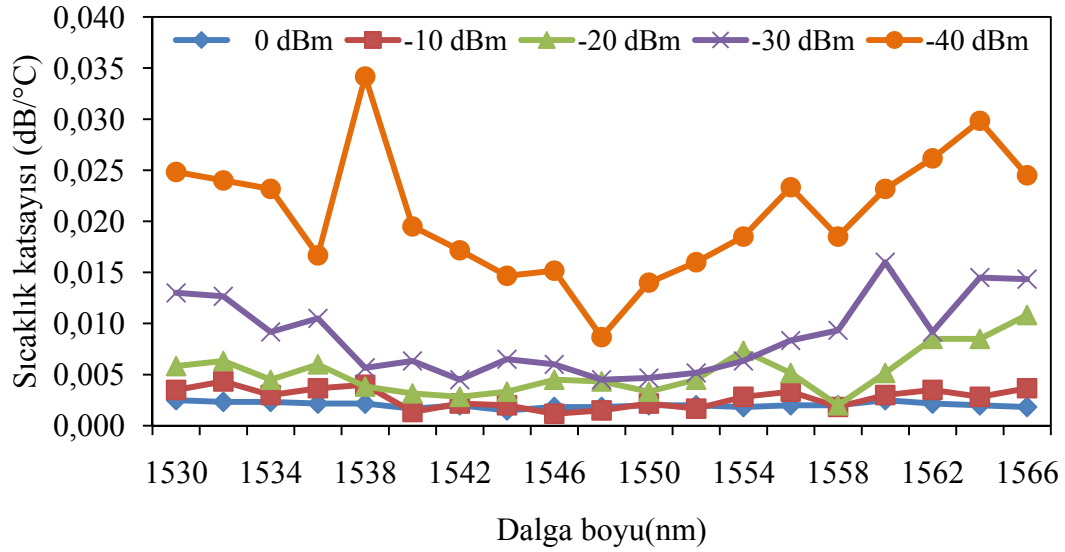


(a)



(b)

Şekil 5.15. Çeşitli sıcaklıklar için kazanç spektrumları (a) -10 dBm, (b) -40 dBm'lik sinyal güçleri için.



Şekil 5.16. C band EKFY'nin sinyal güçlerine göre sıcaklık katsayıları

Şekil 5.16'da EKFY'nin 0-60 °C aralığında 0-40 dBm'lik sinyal güçleri için C bandı boyunca değişen kazanç katsayısı grafiği görülmektedir. Giriş sinyal gücü azaldıkça sıcaklık katsayısı artmaktadır. Çizelge 5.3'de farklı çalışmalarda elde edilen sıcaklığa bağımlı C band EKFY'nin karakteristikleri görülmektedir.

Çizelge 5.3. C band EKFY için sıcaklığa bağımlı kazanç karakteristiklerinin karşılaştırılması

Pompa dalgaboyu	Sinyal aralığı	Sinyal gücü	Sıcaklık aralığı	Kazanç değişimi	Sıcaklık katsayısı	Kaynaklar
980 nm	1530-1562 nm	-20 dBm	-10°C-80°C	0,7 dB	0,0077 dB/°C	[134]
980 nm	1530-1566 nm	-10 dBm	0°C-60°C	0,162 dB	0,0027 dB/°C	Bu çalışma
980 nm	1530-1566 nm	-20 dBm	0°C-60°C	0,315 dB	0,0052 dB/°C	Bu çalışma
980 nm	1530-1566 nm	-30 dBm	0°C-60°C	0,526 dB	0,0087 dB/°C	Bu çalışma
980 nm	1530 nm	-38 dBm	-20°C-85°C	0,4 dB	0,004 dB/°C	[85]
980 nm	1530-1566 nm	-40 dBm	0°C-60°C	1,24 dB	0,0206 dB/°C	Bu çalışma
1480 nm	1530-1562 nm	-20 dBm	-10°C-80°C	2 dB	0,0222 dB/°C	[85]
1480 nm	1540-1554 nm	-19 dBm	-40°C-80°C	1,2 dB	0,01 dB/°C	[86]
1480 nm	1530 nm	-38 dBm	-20°C- 85°C	7 dB	0,07 dB/°C	[85]

Flood'un [134] çalışmasında -20 dBm'lik giriş sinyal gücü için ölçülen 0,0077 dB/°C'lik sıcaklık katsayısı bu çalışmada 0,0052 dB/°C olarak ölçülmüştür. Çizelge 5.3'deki diğer çalışmalar karşılaştırma amacıyla verilmiştir. Örneğin, 1480 nm pompa dalga boyu sıcaklık katsayısını arttırmaktadır. Ayrıca en düşük sıcaklık katsayısı -10 dBm sinyal gücünde elde edilmiştir.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

SiO<sub>2</sub> tabanlı haberleşme fiberlerinde fiber zayıflaması 1550 nm civarında minimumdur ve bu nedenle uzun mesafe fiber optik iletişim için bu dalga boyunun da içinde bulunduğu C bandı kullanılmaktadır. Fakat her geçen gün artan kapasite ihtiyaçları kullanılan iletişim penceresinin genişlemesini zorunlu kılmıştır. Bu nedenle C bandının (1530–1565 nm) yanı sıra, L bandı (1565–1625 nm) ve S bandı (1460–1530 nm) bölgesinde çalışabilen optik yükselteçlerin incelenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle bu tez çalışmasında, EKFY ve FRY'lerin yaygın olarak çalıştırılabilecekleri bandlar belirtilerek, temel iyonik oran denklemleri verilmiştir. Daha sonra sistem her bir band için ayrı ayrı tasarlanmıştır.

S bandında FRY ile tasarlanan yükselteç 1490–1529 nm aralığında 39 nm'lik bir band genişliği ve 10-13 dB arasında değişen bir kazanç spektrumu elde edilmiştir. Fakat çıkış sinyallerinden de görüleceği üzere her dalga boyunda farklı kazançlar elde edilmiştir (Şekil 4.5). Bu durumu gidermek için S bandının 1490–1530 nm bölgeleri arasında çalışan 40 nm band genişliğine sahip kazancı düzleştirilmiş FRY tasarımı yapılmıştır. Sistemde 1382 nm ile 1430 nm dalga boyları ve 150 ile 300 mW güçleri arasında 6 pompa kaynağı kullanılarak sistem çıkışında yaklaşık 24 dB düz bir kazanç elde edilirken bu kazanç spektrumunda 0,28 dB gibi çok düşük seviyede kazanç değişimi elde edilmiştir. Daha ucuz bir sistem tasarımı için daha az sayıda pompa kullanmak mümkündür. Bu durumda kazanç değişimi daha yüksek olacaktır. Tasarım, sistemin maliyeti, istenilen kazanç değeri ve en yüksek kazanç değişimi göz önüne alınıp gerekli pompa sayısı belirlenerek en uygun şekilde yapılabilir.

C bandında tasarlanan EKFY ile 1529–1563 nm aralığında 34 nm'lik bir band genişliği ve 24 dB'lik bir kazanç elde edilmiştir. Ayrıca C band çıkış sinyallerinin dalga boyuna bağlı olarak gösterdikleri kazanç farklılıkları için iki EKF'nin arasına pasif filtre kullanılarak kazanç spektrumu düzleştirilmiştir. Bu düzleştirme işleminde toplam EKF boyunun %44'ünden sonra pasif optik filtre konulmuştur [127-128].

L bandında EKFY ile tasarlanan yükselteç ile 1565–1610 nm aralığında 45 nm'lik bir band genişliği ve 24 dB'lik bir kazanç elde edilmiştir. Tek aşamalı, iki aşamalı, iki aşamalı filtreli ve çift geçişli L band EKFY'lerin kazanç ve gürültü spektrumları incelenmiştir. Çift geçişli sistem en yüksek kazanç spektrumuna sahipken, iki aşamalı kazanç düzleştirici filtreli sistem en düşük sinyal kazanç spektrumuna sahiptir. En yüksek  $\Delta G$  tek aşamalı sistemde iken en düşük  $\Delta G$  iki aşamalı filtreli sistemdedir. İki aşamalı konfigürasyon ile iki aşamalı filtreli konfigürasyonun gürültü faktörleri çok yakındır ve bu dört konfigürasyon içerisindeki en iyi gürültü faktörüne sahiptirler. Çift geçişli sistem ise bu dört konfigürasyon içerisinde en kötü gürültü faktörüne (5,2 dB) sahiptir [135].

Sonra ayrı ayrı analiz edilen bu üç band birleştirilerek kazancı düzleştirilmiş çok geniş bantlı hibrid yükselteç tasarlanmıştır. -20 dBm güçteki S, C ve L band giriş sinyalleri üç ayrı yükselteç ile yükseltilerek, C ve L bandı için kazanç düzleştirici filtre ve S bandı için çoklu pompalama tekniği ile kazançları düzleştirilmiştir. Çıkışta S, C ve L band sinyaller birleştirilerek 120 nm band genişliğine, 24 dB kazanç ve 0,3 dB kazanç dalgalanmasına sahip çok geniş bir çalışma spektrumu elde edilmiştir.

Daha sonra, C band EKFY'lerin band genişlikleri benzetim ortamında ve deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmaya geçilmeden önce EKF boyunu belirlemek için gerekli benzetimler yapılarak en uygun EKF boyu 13,5 m. olarak bulunmuştur. Bu boy değerinde EKFY en yüksek kazanç ve en düşük spektral kazanç değişimine sahiptir. Deneysel düzenek kurularak C bandı boyunca EKFY kazanç spektrumu çeşitli giriş sinyal güçleri için incelenmiştir. -40 dBm giriş sinyal gücü için maksimum çıkış kazancı elde edilirken kazanç değişimi de maksimumdur. Bu nedenle en uygun giriş gücü -10 dBm olarak belirlenmiştir. Çünkü bu değerde yeterli kazanç elde edilmiş ve 1530-1566 nm aralığında 0,88 dBm'lik gayet düz bir kazanç spektrumu elde edilmiştir. 0 dBm giriş sinyal gücü için bu band genişliği 52 nm'ye çıkmış, spektral kazanç değişimi 0,71 dB'ye düşmüştür.

Sonra, giriş sinyal gücü -40 dBm ile 0 dBm arasında 2 dBm aralıklarla değiştirilerek çeşitli dalga boyları için çıkış kazanç spektrumu incelenmiştir. -20 dBm'e kadar düz

olan kazanç spektrumu bu değerlerden sonra hızla düşmektedir. Bu da sistemin -20 dBm'den daha düşük giriş sinyal güçlerinde daha yüksek kazançla çalışacağını göstermektedir.

Daha sonra, pompa gücü 40 ile 200 mW arasında 10 mW'lık artışlarla değiştirilerek çeşitli dalga boyları için çıkış kazanç spektrumu incelenmiştir. Logaritmik bir yükselme görülmeyle beraber 100 mW'a kadar daha hızlı bir artış söz konusuken bu değerden sonra pompa gücünün kazanç değişimine etkisi daha düşüktür. Bu nedenle C bandında yüksek ters birikmeden dolayı daha düşük pompa gücü yeterlidir (50-100 mW arası).

Son olarak, C band EKF 0 ile 60 °C arasında sıcaklık ayarı yapılabilen bir ısıtıcı-soğutucuya yerleştirilerek, giriş sinyal gücü -40 dBm ile 0 dBm arasında değiştirilmiş ve sıcaklığa bağımlı kazanç ölçülmüştür. Düz kazanç gerektiren DBÇ uygulamalarında önemli problemlerden birisi sıcaklığa bağımlı kazanç değişimi olup bu çalışmada sinyal gücü seçimi ile bu problem minimize edilmiştir. En uygun sinyal gücü verilen sıcaklık katsayılarına bakılarak seçilebilir. Deneysel sonuçlar sıcaklık katsayısı ve kazanç değişiminin sinyal gücü azaldıkça arttığını göstermiştir [136].

Sistemin band genişliği ve kazancı daha farklı malzemelerle katkılandırılmış EKF'ler ve farklı nadir toprak elementi ile katkılandırılmış optik yükselteçler (tulyum, praseodmiyum v.b.) kullanılarak arttırılabilir.

FRY tasarımında ise pompa sayısı arttırılarak ve farklı malzeme tabanlı TMF'ler (tellürit v.b.) ile band genişliği, kazanç ve istenilen iletim bandındaki kazanç değişimi ayarlanabilir.

Standart kazanç düzleştirici filtrelerin spektrumları sabit olduğu için ayarlanabilir filtreler de kullanılabilmeyle beraber bu filtrelerin maliyeti standart kazanç düzleştirici filtrelere oranla 4-5 kat daha yüksektir. Fakat bu filtrelerin kazanç düzleştirme işlemi sırasında ayarlanabilir olmalarından dolayı tasarımcıya kolaylık sağlayacakları açıktır.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında, uzun mesafeli fiber haberleşme sistemleri için yüksek ve düz kazançlı, çok geniş bantlı bir optik yükselteç sistemi tasarlanmıştır. Bu tasarımda kullanılan EKF'ler, TMF'ler, pasif ve aktif optik malzemeler düşük maliyette seçilmiş ve sistem maliyeti azaltılmıştır. Ayrıca maliyeti azaltmak için farklı optik yükselteçlerde kullanılabilir.



## KAYNAKLAR

1. Connelly, M. J., "Semiconductor Optical Amplifiers", *Kluwer Academic Publishers*, Boston, 4-9 (2002).
2. Mears, R.J., Reekie, L., Jauncey, I.M., Payne, D.N., "Low-Noise Erbium-Doped Fibre Amplifier Operating at 1.54  $\mu\text{m}$ ", *Electronics Lett.*, 23(19):1026-1028 (1987).
3. Hecht, J., "The Evolution of Optical Amplifiers", *Optics & Photon. News*, 13(8):36-39 (2002).
4. Koestner, C.J., Snitzer, E.A., "Amplification in a fibre laser", *Applied Optics*, 3(10):1182-1187 (1964).
5. Mears, R. J., Reekie, L., Jauncie, I. M., Payne, D. N., "High-Gain Rare-Earth Doped Fiber Amplifier at 1,54  $\mu\text{m}$ ", *Optical Fiber Communication Conference*, Washington D.C., 167 (1987).
6. Desurvire, E., Simpson, J. R., Becker, P. C., "High-Gain Erbium-Doped Traveling-Wave Fiber Amplifier", *Optics Lett.*, 12(11):888-889 (1987).
7. Nakazawa, M., Kimura, Y., Suzuki, K., "Soliton Amplification and Transmission with  $\text{Er}^{3+}$ -Doped Fibre Repeater Pumped by GaInAsP Laser Diode", *Electron. Lett.*, 25(3):199-200 (1989).
8. Massicott, J., Armitage, J., Wyatt, R., Ainslie, B. J., Craig-Ryan, S., "High Gain, Broadband, 1,6  $\mu\text{m}$   $\text{Er}^{3+}$  Doped Silica Fibre Amplifier", *Electron. Lett.*, 26(20):1645-1646 (1990).
9. Massicott, J., Wyatt, R., Ainslie, B. J. , "Low Noise Operation of  $\text{Er}^{3+}$  Doped Silica Fibre Amplifier Around 1,6  $\mu\text{m}$ .", *Electron. Lett.*, 28 (20):1924-1925 (1992).
10. Yamada, M., Ono, H., Kanamori, T., Sudo, S., Ohishi, T., "Broadband and Gain-Flattened Amplifier Composed of a 1,55 $\mu\text{m}$ -Band and a 1,58 $\mu\text{m}$ -Band  $\text{Er}^{3+}$ -Doped Fibre Amplifier in a Parallel Configuration", *Electron. Lett.*, 33(8):710-711 (1997).
11. Jinno, M., Sakamoto, T., Kani, J., Aisawa, S., Oda, K., Fukui, M., Ono H., Oguchi, K. "First Demonstration of 1580 nm Wavelength Band WDM Transmission for Doubling Usable Bandwidth and Supressing FWM in DSF", *Electron. Lett.*, 33(10):882-883 (1997).
12. Sakamoto, T., Kani J., Jinno M., Aisawa S., Fukui M., Yamada M., Oguchi, K., "Wide Wavelength Band (1535-1560 nm and 1574-1600 nm), 28x10 Gbit/s

- WDM Transmission over 320km Dispersion-Shifted Fibre”, *Electron. Lett.*, 34(4):392–393 (1998).
13. Ono, H., Yamada, M., Shimizu, M., Ohishi, Y., “Comparison of Amplification Characteristics of 1,58 $\mu$ m and 1,55 $\mu$ m Band EDFAs”, *Electron. Lett.*, 34(15):1509–1510 (1998).
  14. Nilson, J., Yun, S.Y., Hwang, S.T., Kim, J.M., Kim, S.J., “Long-Wavelength Erbium-Doped Fiber Amplifiers Gain Enhanced by ASE End-Reflectors”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 10(11):1551–1553 (1998).
  15. Lee, J., Ryu, U.C., Ahn, S. J., Park, N., “Enhancement of Power Conversion Efficiency for an L-Band EDFA with a Secondary Pumping Effect in the Unpumped EDF Section”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 11(1):42–44 (1999).
  16. Bouzid, B., Abdullah, M.K., Mahdi, M.A., “High-Gain Erbium-Doped Fiber Amplifier Incorporating a Double-Pass Amplification Technique as a Preamplifier”, *Laser Physics*, 18(4):460-463 (2008).
  17. Liang, T.C., Hsu, S., “The L-band EDFA of High Clamped Gain and Low Noise Figure Implemented Using Fiber Bragg Grating and Double-Pass Method”, *Optics Comm.*, 281(5):1134-1139 (2008).
  18. Rosolem, J.B., Juriollo, A.A., Romero, M.A., “S-Band EDFA Using Standard Erbium-Doped Fibre”, *Electronics Lett.*, 43(22):1186-1188 (2007).
  19. Jamaludin, M.Z., Abdullah, M.K., Abdullah, F., Abas, A.F., MAhdi, M.A., Rahman, F., “A Hybrid High-Gain Double-Pass Erbium-Doped Fiber Amplifier with Dispersion Compensation Feedback Loop”, *Optics and Laser Technol.*, 40(2):270-272 (2008).
  20. Hossain, N., Naji, A.W., Mishra, V., Abbou, F.M., Hairul, A.A.R., Faidz, A.R., “Theoretical Analysis, Optimization, and Experimental Evaluation of Dual Function DP R-EDFA”, *Journal of Russian Laser Research*, 28(3):293-303 (2007).
  21. Hossain, N., Naji, A.W., Mishra, V., Abbou, F.M., Al-Mansoori, M.H., Mahdi, M.A., Faidz, A.R., “Modeling, Optimization, and Experimental Evaluation of Remotely Pumped Double-Pass EDFA”, *Microwave and Optical Technol. Lett.*, 49(9):2257-2261 (2007).
  22. Foroni, M., Poli, F., Cucinotta, A., Selleri, S., “All-Silica Double-Pass S-C-L Band EDFA”, *Electronics Lett.*, 43(6):21-22 (2007).
  23. Harun, S.W., Ahmad, H., “Gain and Noise Figure Improvements in Double-Pass S-Band EDFA”, *Optics and Laser Technol.*, 39(5):935-938 (2007).

24. Hung, C.M., Chen, N.K., Lai, Y.C., Sien, C., "Double-Pass High-Gain Low-Noise EDFA over S and C+L-Bands by Tunable Fundamental-Mode Leakage Loss", *Optics Express*, 15(4):1454-1460 (2007).
25. Harun, S.W., Dimiyati, K., Jayapalan, K.K., Ahmad, H., "An Overview on S-Band Erbium-Doped Fiber Amplifiers", *Laser Physics Lett.*, 4(1):10-15 (2007).
26. Naji, A.W., Abidin, M.S.Z., Al-Mansoori, M.H., Faidz, A.R., Mahdi, M.A., "Experimental Investigation of noise in Double-Pass Erbium-Doped Fiber Amplifiers", *Laser Physics Lett.*, 4(2):145-148 (2007).
27. Ahmad, H., Harun, S.W., "Double Pass S-Band EDFA", *Journal Of Nonlinear Optical Physis & Materials*, 15(3):303-307 (2006).
28. Chang, C.L., Wang, L., Chiang, Y.J., "A Dual Pumped Double-Pass L-Band EDFA with High Gain and Low Noise", *Optics Comm.*, 267(1):108-112 (2006).
29. Altuncu, A., "Band Selection in Broadband Loop ASE Source Using Seed Signal Injection" *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 18(9):1043-1045 (2006).
30. Harun, S.W., Samsuri, N.M., Ahmad, H., "Gain-Clamping Techniques in Two-Stage Double-Pass L-Band EDFA", *Pramana-Journal of Physics*, 66(3):539-545 (2006).
31. Yi, L.L., Zhan, L., Hu, W.S., Xia, Y.X., "Tunable Gain-Clamped Double-Pass Erbium-Doped Fiber Amplifier", *Optics Express*, 14(2):570-574 (2006).
32. Yi, L.L., Zhan, L., Taung, C.S., Luo, S.Y., Hu, W.S., Su, Y.K., Xia, Y.X., Leng, L.F., "Low Noise Figure All-Optical Gain-Clamped Parallel C+L Band Erbium-Doped Fiber Amplifier Using an Interleaver", *Optics Express*, 13(12):4519-4524 (2005).
33. Ji, J.H., Zhan, L., Yi, L.L., Tang, C.C., Ye, Q.H., Xia, Y.X., "Low Noise-Figure Gain-Clamped L-Band Double-Pass Erbium-Doped Fiber Ring Lasing Amplifier with an Intereaver", *Journal Of Lightwave Technol.*, 23(3):1375-1379 (2005).
34. Samsuri, N.M., Harun, S.W., Ahmad, H., "Comparison of Performances Between Partial Doublepass and full double-pass systems in Two-Stage L-Band EDFA", *Laser Physics Lett.*, 1(12):610-612 (2004).
35. Harun, S.W., Samsuri, N.M., Ahmad, H., "Gain Enhancement in Partial Double-Pass L-Band EDFA System Using a Band-Pass Filter", *Laser Physics Lett.*, 2(1):36-38 (2005).

36. Harun, S.W., Samsuri, N.M., Ahmad, H., "Gain Clamping in Double-Pass L-Band EDFA Using a Ring Resonator", *Microwave and Optical Technol. Lett.*, 43(6):484-486 (2004).
37. Harun, S.W., Ahmad, H., "Gain Clamped Two-Stage Double-Pass L-Band EDFA with a Single Fibre Bragg Grating", *Chinese Physics Lett.*, 21(10):1954-1957 (2004).
38. Naji, A.W., Abidin, M.S.Z., Kassir, A.M., Al-Mansoori, M.H., Abdullah, M.K., Mahdi, M.A., "Trade-Off between Single and Double Pass Amplification Schemes of 1480-nm Pumped EDFA", *Microwave and Optical Technol. Lett.*, 43(1):38-40 (2004).
39. Yi, L.L., Zhan, L., Ji, J.H., Ye, Q.H., Xia, Y.X., "Improvement of gain and noise figure in double-pass L-band EDFA by incorporating a fiber Bragg grating", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 16(4):1005-1007 (2004).
40. Harun, S.W., Ahmad, H., "Efficient and low-noise gain flattened double-pass L-band erbium-doped fiber amplifier", *Microwave and Optical Technol. Lett.*, 40(2):112-114 (2004).
41. Harun, S.W., Poopalan, P., Ahmad, H., "Double pass L-band erbium-doped fiber amplifier with enhanced gain characteristics", *Indian Journal of Physics*, 77B(4):435-437 (2003).
42. Harun, S.W., Ahmad, H., "A new gain-clamped L-band erbium-doped fiber amplifier with highly efficient gain", *Japanese Journal of Applied Physics Part 2-Lett.*, 42(8A):L930-L931 (2003).
43. Harun, S.W., Poopalan, P., Ahmad, H., "Gain enhancement in L-band EDFA through a double-pass technique", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 14(3):296-297 (2002).
44. Chen, S.P., Liu, Z.J., Li, Y.G., Lu, K. C., Zhou, S.H., "Resonantly pumped high power flat L-band erbium-doped superfluorescent fiber source", *Optics Express*, 16(1):207-212 (2008).
45. Harun, S.W., Rahman, E.A., Dimiyati, K., Ahmad, H., "An Efficient Gain-Flattened C-Band Erbium-Doped Fiber Amplifier", *Laser Physics Lett.*, 3(11):536-538 (2006).
46. Sohn, I.B., Song, J.W., "Gain Flattened And Improved Double-Pass Two-Stage EDFA Using Microbending Long-Period Fiber Gratings", *Optics Comm.*, 236(1):141-144 (2004).

47. Liang, T.C., Cheng, N.J., Hung, S.C., "Gain enhancement in L-Band Gain-Flattened EDFA Using a Reflective-Type Structure", *Microwave and Optical Technol. Lett.*, 37(5):393-395 (2003).
48. Masuda, H., Miyamoto, Y., "Low-Noise Extended L-Band Phosphorus Co-Doped Silicate EDFA Consisting of Novel Two-Stage Gain-Flattened Gain Blocks", *Electronics Lett.*, 44(18):1082-1083 (2008).
49. Pal, M., Bandyopadhyay, S., Biswas, P., Debroy, R., Paul, M. C., Sen, R., Dasgupta, K., Bhadra, S. K., "Study of Gain Flatness for Multi-Channel Amplification in Single Stage EDFA for WDM Applications", *Optical and Quantum Electronics*, 39(14):1231-1243 (2007).
50. Varshney, R.K., Nagaraju, B., Singh, A., Pal, B. P., Kar, A. K., "Design and Realization of an All-Fiber Broadband Tunable Gain Equalization Filter for DWDM Signals", *Optics Express*, 15(21):13519-13530 (2007).
51. Ni, N., Chan, C.C., Tan, K.M., Tjin, S.C., Dong, X. Y., "Broad-Band EDFA Gain Flattening by Using an Embedded Long-Period Fiber Grating Filter", *Optics Comm.*, 271(2):377-381 (2007).
52. Singh, S., Kaler, R.S., "Gain Flattening Approach to Physical EDFA for 16 x 40 Gb/s NRZ-DPSK WDM Optical Communication Systems", *Fiber And Integrated Optics*, 25(5):363-374 (2006).
53. Zhang, A.P., Chen, X.W., Yan, J.H., Guan, Z.G., He, S.L., Tam, H.Y., "Optimization and Fabrication of Stitched Long-Period Gratings for Gain Flattening of Ultrawide-Band EDFAs", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 17(12):2559-2561 (2005).
54. Kumar, N., Shenoy, M.R., Pal, B.P., "A Standard Fiber-Based Loop Mirror as a Gain-Flattening Filter for Erbium-Doped Fiber Amplifiers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 17(10):2056-2058 (2005).
55. Chung, K.W., Yin, S., "Design of a Phase-Shifted Long-Period Grating Using The Partial-Etching Technique", *Microwave and Optical Technol. Lett.*, 45(1):18-21 (2005).
56. Rao, Y.J., Hu, A.Z., Niu, Y.C., "A Novel Dynamic LPFG Gain Equalizer Written in a Bend-Insensitive Fiber", *Optics Comm.*, 244(2):137-140 (2005).
57. Zhang, A.P., Chen, X.W., Guan, Z.G., He, S.L., Tam, H.Y., Chung, W.H., "Optimization of Step-Changed Long-Period Gratings for Gain-Flattening of EDFAs", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 17(1):121-123 (2005).
58. Zirngibl, M., "Gain Control in Erbium-Doped Fibre Amplifiers by an All Optical Feed Back Loop", *Electron. Lett.*, 27(7):560-561 (1991).

59. Okamura, H., "Automatic Optical Loss Compensation with Erbium-Doped Fiber Amplifier", *IEEE J. Lightwave Technol.*, 10(8):1110-1116 (1992).
60. Takushima Y., Kikuchi, K., "Gain spectrum equalization of All-Optical Gain-Clamped Erbium-Doped Fiber Amplifier", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 11(2):176-178 (1999).
61. Peterka, P., Faure, B., Blanc, W., Karasek, M., Dussardier, B., "Theoretical Modelling of S-band Thulium-Doped Silica Fibre Amplifiers", *Optical and Quantum Electronics*, 36(3):201-212 (2004).
62. Jackson, S. D., King, T. A., "Theoretical Modeling of Tm-Doped Silica Fiber Lasers", *IEEE Journal of Lightwave Technol.*, 17(5):948-956 (1999).
63. Kasamatsu, T., Yano, Y., Ono, T., "Gain-Shifted Dual-Wavelength-Pumped Thulium-Doped Fiber Amplifier for WDM Signals in the 1,48-1,51 $\mu$ m Wavelength Region", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 13(1): 31–33 (2001).
64. Kasamatsu, T., Yano, Y., Ono, T., "Laser-Diode-Pumped Highly Efficient Gain Shifted Thulium-Doped Fiber Amplifier Operating in the 1480-1510 nm Band", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 13(5): 433–435 (2001).
65. Masuda, H., Kawai, S., Suzuki, K., Aida, K., "75-nm 3-dB Gain-Band Optical Amplification with Erbium-Doped Fluoride Fiber Amplifiers and Distributed Raman Amplifiers in 9x2.5-Gb/s WDM Transmission", *Proc. Eur. Conf. Optical Comm.*, Helsinki, 73–76 (1997).
66. Namiki, S., Emori, Y., "Ultrabroad-Band Raman Amplifiers Pumped and Gain Equalized by Wavelength-Division-Multiplexed High-Power Laser Diodes", *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 7(1):3–16 (2001).
67. Mahdi, M.A., Ali, M.I.M., Ahmad, A., "Influence of the Pumping Scheme in Double-Pass Discrete Raman-Fiber Amplifiers", *Laser Physics*, 18(6):807-809 (2008).
68. Emori, Y., Tanaka, K., Namiki, S., "100 nm Bandwidth Flat-Gain Raman Amplifiers Pumped and Gain-Equalized by 12-Wavelength-Channel WDM Laser Diode Unit", *Electron. Lett.*, 35(16):1355–1356 (1999).
69. Hecht, J., "City of Light: The Story of Fiber Optics", *Oxford University Press*, New York, 247 (1999).
70. Gasulla, I., Capmany, J., "1 Tb/s-km Multimode Fiber Link Combining WDM Transmission and Low-Linewidth Lasers", *Optics Express*, 16(11):8033-8038 (2008).

71. Paul, J., Shah, S., "A Case Step Study for Reducing Water Peak in Optical Fiber", *Sterlite Optical Technologies Ltd. White Papers*, 1-4 (2006).
72. Yücel, M. "Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteç Analizi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-35 (2003).
73. Ellrich, F., Zengerle, R., "Broadband Optical Fiber Amplifiers", *Symposium on Opto- & Microelectronic Devices and Circuits*, Stuttgart, 213-217 (2002).
74. Montgomery, J. D., Montgomery, S., Hailu, S., "Semiconductor Optical Amplifiers Expand Commercial Opportunities", *WDM Solutions Supplement to Laser Focus World*, 3(8):27-30 (2001).
75. Agrawal, G. P., "Fiber-Optic Communication Systems", *John Wiley & Sons, Inc*, New York, 351-362 (1992).
76. Barnard, C., Myslinski, P., Chrostowski, J., Kavehrad, M., "Analytical Model for Rare-Earth-Doped Fiber Amplifiers and Lasers", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 30(8):1817-1830 (1994).
77. Tanabe, S., "Rare-Earth-Doped Glasses For Fiber Amplifiers in Broadband Telecommunication", *Comptes Rendus Chimie*, 5(12):815-824 (2002).
78. Mukai, T., Inoue, K., Saito, T., "Homogenous Gain Saturation in 1,5 $\mu$ m Ingaasp Traveling-Wave Semiconductor Laser Amplifiers", *Applied Physics Lett.*, 51(6):381-383 (1987).
79. Digonnet, Michael J.F, "Rare Earth Doped Fiber Lasers and Amplifiers", *Stanford University/Marcel Dekker Press*, California, 531-550 (1993).
80. Edagawa, N., Mochizuki, K., Ryu, S., Wakabayashi, H., "Amplification Characteristics of Fiber Raman Amplifiers", *Electronic Information Communication Scientific Society Technical Study Reports*, 88(87):61-68 (1988).
81. Yamada, M., Shimizu, M., "Ultra-Wideband Amplification Technologies for Optical Fiber Amplifiers", *NTT Technical Review*, 1(3):80-84 (2003).
82. Desurvire, E., "Erbium-Doped Fiber Amplifiers Principles and Applications", *John Wiley*, New York, 5-25 (1994).
83. D.E. McCumber, "Theory of Phonon-Terminated Optical Masers", *Phys Rev.*, 134: A299-A305 (1964).
84. Yamada, M., Shimizu, M., Horiguchi, M., Okayasu, M., "Temperature Dependence of Signal Gain Er<sup>3+</sup> Doped Fiber Amplifiers", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 28(3):640-649 (1992).

85. Kagi, N., Oyobe, A., Nakamura, K., "Temperature Dependence of the Gain in Erbium Doped Fibers", *IEEE Journal of Lightwave Technol.*, 9(2):261-265 (1991).
86. Kemtchou, J., Duhamel, M., Lecoy, P., "Gain Temperature Dependence of Erbium-Doped Silica and Fluoride Fiber Amplifiers in Multichannel Wavelength-Multiplexed Transmission Systems", *IEEE Journal of Lightwave Technol.*, 15(11):2083-2090 (1997).
87. Bolshtyansky, M., Wysocki, P., Conti, N., "Model of Temperature Dependence for Gain Shape of Erbium-Doped Fiber Amplifier", *IEEE Journal of Lightwave Technol.*, 18(11):1533-1540 (2000).
88. Aozasa, S., Sakamoto, T., Ono, H., Mori, A., Yamada, M., "Wideband Rare-Earth-Doped Fiber Amplification Technologies – O and S Band Amplification Technologies", *NTT Technical Review*, 2(12):44-50 (2004).
89. Lin, M. C., Chi, S., "The Gain And Optimal Length in The Erbium-Doped Fiber Amplifiers with 1480 nm Pumping", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 4(4):354-356 (1992).
90. Kogelnick, H., Yariv, A., "Considerations of Noise and Schemes for Its Reduction in Laser Amplifiers", *Proceedings of The IEEE*, 52(2):165-172 (1964).
91. Yariv, A., "Quantum Electronics", *John Wiley*, New York, 171-174 (1975).
92. Saleh, B. E. A., Teich, M., C., "Fundamentals of Photonics", *John Wiley*, New York, 460-488 (1991).
93. Islam, M. N., "Raman Amplifiers for Telecommunications 1: Physical Principles", *Springer*, New York, 37-40 (2004).
94. Mori, A., Masuda, H., "Tellurite Fiber Raman Amplifiers", *NTT Technical Review*, 2(12):51-55 (2004).
95. Hellwarth, R.W., "Theory of Stimulated Raman Scattering", *Phys. Rev.*, 130(5):1850–1852 (1963).
96. Smith, R.G., "Optical Power Handling Capacity of Low Loss Optical Fibers as Determined by Stimulated Raman and Brillouin Scattering", *Applied Optics*, 11(11):2489-2494 (1972).
97. Cao, Y. "Design and Simulation of Gain-Flattened Ultra Wideband Fiber Amplifiers Covering S, C, and L Bands", PhD. Thesis, *The University of North Carolina*, Charlotte, 43-82 (2003).



98. Kidorf, H., Rottwitt, K., Nissov, M., Ma, M., Rabarijaona, E., "Pump Interactions in a 100 nm Bandwidth Raman Amplifier", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 11(5):530-532 (1999).
99. Singh, R., Sunanda, Sharma, E. K. "Gain Flattening by Long Period Gratings in Erbium Doped Fibers", *Optics Comm.*, 240:123-132 (2004).
100. Sohn, I.-B., Song, J.-W. "Gain Flattened and Improved Double-Pass Two-Stage EDFA Using Microbending Long-Period Fiber Gratings", *Optics Comm.* 236:141-144 (2004).
101. Dung, S., J.C. Chi, Wen, S. "Gain Flattening of Erbium-doped Fibre Amplifier Using Fibre Bragg Gratings", *Electronics Lett.*, 34(6):555-556 (1998).
102. Choi, H.B., Oh, J.M., Lee, D., Ahn, S.J., Park, B.S, Lee, S.B. "Simple and efficient L-Band Erbium-Doped Fiber Amplifiers for WDM Networks", *Optics Comm.*, 213:63-66 (2002).
103. Mahdi, M. A., Sheih, S. J. "Gain-Flattened Extended L-band EDFA with 43 nm Bandwidth Suitable for High Signal Powers", *Optics Comm.*, 234:229-233 (2004).
104. Mizuno, K., Nishi, Y., Mimura, Y., Lida, Y., Matsuura, H., Yoon, D., Aso, O., Yamamoto, T., Toratani, T., Ono, Y., Yo, A. "Development of Etalon-Type Gain-Flattening Filter", *Furukawa Review*, 19:53-58 (2000).
105. Bayart, D., Clesca, B., Hamon, L., Beylat, J.L., "Experimental Investigation of The Gain Flatness Characteristics for 1.55  $\mu\text{m}$  Erbium-Doped Fluoride Fiber Amplifiers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 6(5):613-615 (1994).
106. B.O. Guan, H.-Y. Tam, S.-Y. Liu, P.K.A. Wai, and N. Sugimoto, "Ultrawide-Band La-Codoped Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Based EDFA for L-Band DWDM Systems", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 15(11):1525-1527 (2003).
107. Yoshida, S., Kuwano, S., Iwashita, K. "Gain-Flattened EDFA with High Al Concentration for Multistage Repeated WDM Transmission Systems", *Electronics Lett.*, 31(20):1765-1767 (1995).
108. Vallon, S., Chevallier, P., Guiziou, L., Alibert, G., How Kee Chun, L. S., Boos, N. "40-Band Integrated Static Gain-Flattening Filter", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 15(4):554-556 (2003).
109. Yücel, M., Göktaş, H.H, "Fiber Raman Yükselteçlerde Pompalama Yönünün Kazanç Spektrumuna Etkisi Üzerine Bir Simülasyon", *G.Ü.T.E.F. Politeknik Dergisi*, 9(3):161-164 (2006).

110. Yong-Nan, L., Fu-Yun, L., Yu, F., Xin, Wei, W., Dai, W., “S-Band Gain-Flattened Double-Pass Discrete Fibre Raman Amplifiers Using Mechanically Induced Long-Period Fibre Gratings”, *Chinese Physics Lett.*, 23(4):842-844 (2006).
111. Yücel, M., Göktaş, H. H., “Kazancı Düzleştirilmiş S Band Fiber Raman Yükselteç Tasarımı”, *Karabük Üniv. Teknoloji Dergisi*, 10(4):301-305 (2007).
112. Korkmaz, V., Altuncu, A., “Dalgaboyu Bölmeli Çoğullamalı (WDM) Sistemlerde Uyarılmış Raman Diyafonisinin İletişim Performansına Etkisi”, *Elektrik - Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, (2002).
113. Giles, C. R., Di Giovanni, D. J. “Dynamic Gain Equalization in Two-Stage Fiber Amplifiers”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2(12):866-868 (1990).
114. Giles, C. R., Desurvire, E., “Modeling Erbium-Doped Fiber Amplifiers”, *IEEE Journal of Lightwave Technol.*, 9(2):271-283 (1991).
115. Göktaş, H. H., Yücel, M., “İki Aşamalı C Band Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçlerde (EKFY) Kazanç Düzleştirici Filtre Optimizasyonu”, *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(1):10-13 (2006).
116. Yamada, M., Mori, A., Kobayashi, K., Ono, H., Kanamori, T., Oikawa, K., Nishida, Y., Ohishi, Y., “Gain-Flattened Tellurite-Based EDFA with A Flat Amplification Bandwidth of 76 nm”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 10(9):1244-1246 (1998).
117. Tanaka, S., Imai, K., Yazaki, T., Tanaka, H., “Ultra-Wideband L-band EDFA Using Phosphorus Codoped Silica-Fiber”, *Optical Fiber Communication Conf.*, Anaheim, 458–459 (2002).
118. Ellison, A.J.G., Goforth, D.E., Samson, B.N., Minelly, J.D., Trentelman, J.P., McEnroe, D.L., Tyndell, B.P., “Extending the L-band to 1620 nm Using MCS Fiber”, *Optical Fiber Communication Conf.*, Anaheim, 1-3 (2001).
119. Liang, T. C., Chen, Y. K., Su, J. H., Tzeng, W. H., Hu, C., Lin, Y. T., Lai, Y.C., “Optimum Configuration and Design of 1480 nm Pumped L-band Gain-flattened EDFA Using Conventional Erbium-doped Fiber”, *Optics Comm.*, 183:51-63 (2000).
120. Liang, T. C., Cheng, N. J., Hung, S.C., “Gain Enhancement in L-band Gain-flattened EDFA Using A Reflective-type Structure”, *Microwave and Optical Technol. Lett.*, 37(5):393-395 (2003).
121. Chang, C. L., Wang, L., Chiang, Y. J., “A Dual Pumped Double-Pass L-Band EDFA with High Gain and Low Noise”, *Optics Comm.*, 267:108-112 (2006).

122. Harun, S. W., Samsuri, N. M., Ahmad, H., "Gain Control in Double-Pass L-band EDFA using a Ring Resonator and Two-Stage Configuration", *Optik*, 115(11):525-527 (2004).
123. Optiwave, C., "OptiAmplifier Version 4.0: Optical Fiber Amplifier and Laser Design Software Manual", *Optiwave Systems Inc.*, 9-50 (2002).
124. Yucel, M., Goktas, H. H., "Gain Flattening Configurations at the L Band Erbium Doped Fiber Amplifiers", *IEEE 15th Sig. Process. and Comm. App.*, Eskişehir, 1-4 (2007).
125. Başgümüş, A., Altuncu, A., "The effect of pump wavelength and fiber length to bandwidth in L band erbium doped fiber amplifier", *IEEE 13th Sig. Process. and Comm. App.*, Kayseri, 218-221 (2005).
126. Zhang, H., Yu, L., Liu, Y., Wang, C., Li, Y., Dou, Q., Liu, L., Yuan, S., Dong, X., "Noise figure improvement of a double-pass erbium-doped fiber amplifier by using a HiBi fiber loop mirror as ASE rejecter", *Optics Comm.*, 244:383-388 (2004).
127. Yu, A., O'Mahony, M. J., Siddiqui, A.S., "Analysis of Optical Gain Enhanced Erbium-Doped Fiber Amplifiers Using Optical Filters", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 5(7):773-775 (1993).
128. Xia, B., Chen, L.R., "Two Stage L-Band EDFA with Gain-Clamped Characteristics Using Partial Gain-Clamping", *Optics Comm.*, 206:301-308 (2002).
129. Namiki, S., Emori, Y., "Ultrabroad-Band Raman Amplifiers Pumped and Gain Equalized by Wavelength-Division-Multiplexed High-Power Laser Diodes", *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 7(1):3-16 (2001).
130. Yücel, M., Göktaş, H. H., "Kazancı Düzleştirilmiş Çok Geniş Bantlı Hibrid Optik Yükselteç Tasarımı", *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 22(4):863-868 (2007).
131. Yucel, M., Goktas, H. H., "C Band Erbium Doped Fiber Amplifier as a Flat Gain Optical Amplifier", *IEEE 16th Sig. Process. and Comm. App.*, Didim, 1-4 (2008).
132. Baraniecki, T.P., Kozak, M.M., Unrau, U.B., Pawlik, E.M., Abramski, K.M., "Comparison of Laboratory Measurements on an EDFA with Simulation Results Obtained Using EDFA-Design", *Transparent Optical Networks Proc.*, Cracow, 308-311 (2001).
133. Yablon, A.D., "Optical Fiber Fusion Splicing", *Springer-Verlag*, Berlin, 241-242 (2005).

134. Flood, F.A., "Comparison of Temperature Dependence in C-Band and L-Band EDFAs", *IEEE J. Lightwave Tech.*, 19(4):527-535 (2001).
135. Altuncu, A., Başgümüş, A., "Gain Enhancement in L Band Loop EDFA through C Band Signal Injection", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 17(7):1402-1404 (2005).
136. Yucel, M., Goktas, H.H., "Determination of Minimum Temperature Coefficient of C Band EDFA", *Journal of Applied Sciences*, 8(23):4464-4467 (2008).
137. Anritsu, C., "Anritsu MS9710B Optical Spectrum Analyzer Operation Manual", *Anritsu Corporation Press*, Japan, 78-81 (2003).

**EKLER**

## EK-1. Optik Spektrum Analizörünün Hesaplama ve Ölçüm Yöntemleri

Deneysel ölçümlerde Anritsu MS9710B OSA'sı kullanılmıştır. OSA kazanç ve gürültü ölçerken çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu bölümde deneylerde kullanılan OSA'nın bu ölçüm yöntemleri irdelenmiştir. Yükselteç kazancı aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır:

$$\text{Kazanç} = 10 \log (G) \quad (1.1)$$

burada,

$$G = \frac{P_{\text{out}}(\lambda_s) - P_{\text{YKY}}}{P_{\text{in}}(\lambda_s)} \quad (1.2)$$

Denklemden G doğrusal kazancı (dB),  $\lambda_s$  yükselteç sinyal dalga boyunu (nm),  $P_{\text{YKY}}$  YKY seviyesini (W),  $P_{\text{in}}(\lambda_s)$  giriş sinyal seviyesini (W),  $P_{\text{out}}(\lambda_s)$  çıkış sinyal seviyesini (W) göstermektedir.

Gürültü faktörü ise dB olarak aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır [137]:

$$\text{NF} = 10 \log \left( k \frac{P_{\text{YKY}}}{h \cdot \nu \cdot G \cdot \Delta \nu_s} \right) \quad (1.3)$$

burada, k düzeltme değeri olup gürültü faktörü kalibrasyonunda genellikle 1 alınır.

$$\nu_s = \frac{c}{\lambda_{\text{sv}} \cdot 10^{-9} - \frac{\text{Res}_{\text{real}} \cdot 10^{-9}}{2}} - \frac{c}{\lambda_{\text{sv}} \cdot 10^{-9} + \frac{\text{Res}_{\text{real}} \cdot 10^{-9}}{2}} \quad (1.4)$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda_{\text{sv}} \cdot 10^{-9}} \quad (1.5)$$

### EK-1.(Devam) Optik Spektrum Analizörünün Hesaplama ve Ölçüm Yöntemleri

Eş. 1.3-1.5’de NF gürültü faktörü (dB),  $\nu$  sinyal frekansı (Hz),  $h$  Planck sabiti ( $6,626 \cdot 10^{-34}$  J.S),  $\Delta\nu_s$   $P_{YKY}$  ölçümünde analizörün frekans bandı (Hz),  $c$  ışık hızı ( $2,9979 \cdot 10^8$  m/s),  $Re s_{real}$  gerçek çözünürlük (nm) ve  $\lambda_{sv}$  optik çıkış sinyalinin dalga boyudur (nm) [137].

Toplam gürültü faktörü ise aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$NF = 10 \log k \left( \frac{P_{YKY}}{h \cdot \nu \cdot G \cdot \Delta\nu_s} + \frac{P_{YKYT}^2}{2 \cdot h \cdot \nu \cdot G^2 \cdot P_{in}(\lambda_s) \cdot \Delta\nu_s} + \frac{1}{G} + \frac{P_{YKYT}}{G \cdot P_{in}(\lambda_s)} \right) \quad (1.6)$$

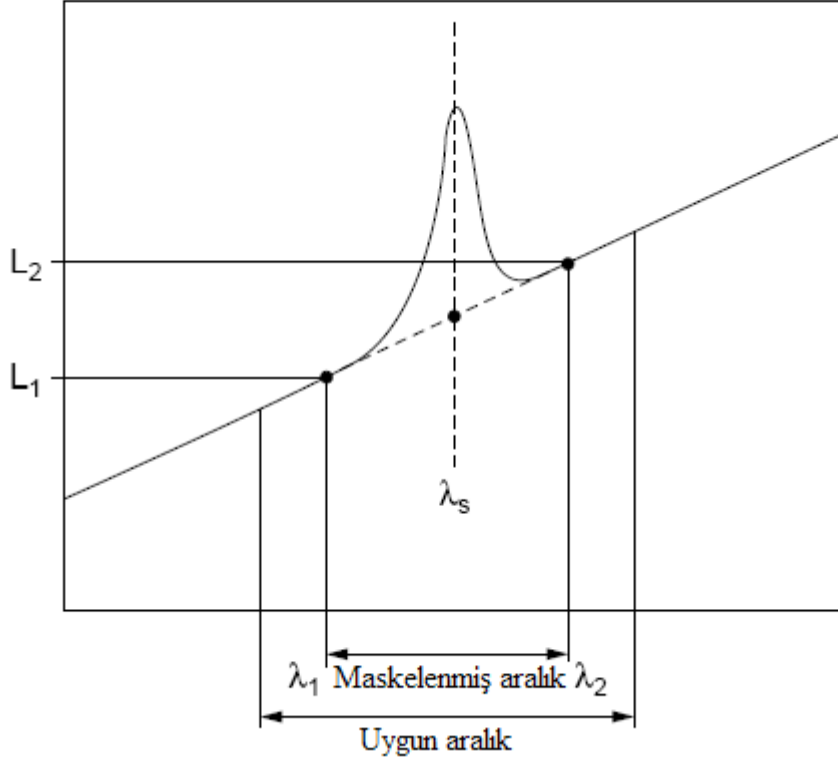
Eş. 1.6’da parantez içindeki ilk terim optik sinyal ve YKY çıkışı arasındaki vuruş gürültüsü, ikinci terim YKY’ler arası vuruş gürültüsü, üçüncü terim akış gürültüsü ve son terim YKY akış gürültüsüdür. Burada,

$$P_{YKY} = \frac{P_{YKY} \Delta\nu_a}{\Delta\nu_s} \quad (1.7)$$

Ortalama uygunlaştırma yaklaşımı ile YKY hesaplanabilir:

Yükseltmiş optik spektrumun (uygun aralıktan maskelenmiş aralık çıkarılarak veri elde edilir) yaklaşık verilerinin en içerideki iki noktasından birisi veri noktasının dalga boyu olarak ayarlanır ve optik sinyal dalga boyu içerisindeki daha kısa dalga boyuna ( $\lambda_1$ ) yakınlaştırılır ve doğrusal değeri  $L_1$ ’dir. Diğer nokta, optik sinyal dalga boyu içerisindeki daha uzun dalga boyuna ( $\lambda_1$ ) yakınlaştırılır ve doğrusal değeri  $L_2$ ’dir [137].

### EK-1.(Devam) Optik Spektrum Analizörünün Hesaplama ve Ölçüm Yöntemleri



Şekil 1.1. Ortalama uygunlaştırma yaklaşımı ile YKY hesabı

$$P_{YKY} = 10 \log (P_{YKY}) + L_{Cal_{BPF}} \quad (1.8)$$

burada,

$$P_{YKY} = \frac{1}{2} (L_2 - L_1) + L_1 \quad (1.9)$$

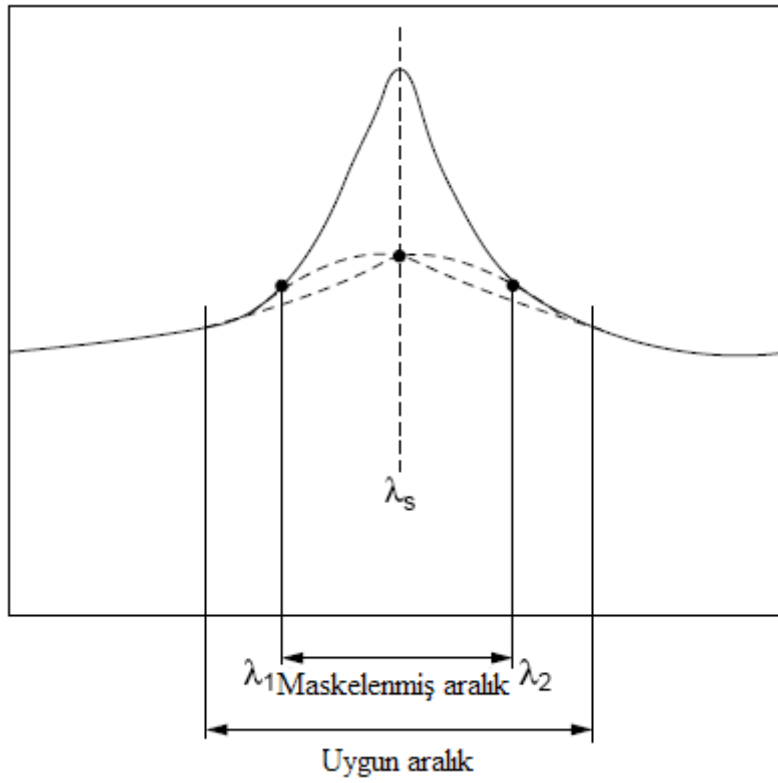
$L_{Cal_{BPF}}$  optik band geçiren filtrenin kalibrasyon faktörü ve  $P_{YKY}$  ölçülen spektrumdan bulunan YKY çıkışıdır.

Gauss uygunlaştırma yaklaşımı ile de YKY hesaplanabilir:



### EK-1.(Devam) Optik Spektrum Analizörünün Hesaplama ve Ölçüm Yöntemleri

Bu yöntemde,  $(\lambda_1, L_1)$  ve  $(\lambda_2, L_2)$  uygun en küçük kare yöntemi kullanılarak  $P_{YKY}(\lambda_s)$  hesaplamasında kullanılır.  $(\lambda_1, L_1)$  ve  $(\lambda_2, L_2)$  noktaları, maskelenmiş aralık bölgesinin son noktalarına tekabül eder.



Şekil 1.2. Gauss uygunlaştırma yaklaşımı ile de YKY hesabı

$$P_{YKY} = L(\lambda_s) = a\lambda^2 + b\lambda + c \quad (1.10)$$

Burada  $L(\lambda_s)$ ; uygunlaştırılmış Gauss eğrisi fonksiyonu, a, b ve c sabitlerdir.

## EK-2. OSA'nın Gürültü Ölçme Yöntemleri

### Spektrum bölmesiz yöntem

Bu yöntem optik yükseltecin kazanç ve gürültü ölçümünde kullanılan en basit yöntemdir. Bu nedenle doğruluğu en düşük yöntemdir. Yüksek doğruluk gerektiren gürültü ölçümlerinde polarizasyon sıfırlama, darbe ve DBÇ metotları kullanılmalıdır. Optik yükseltecin giriş ve çıkışından ölçülerek kazanç bulunur. YKY çıkışı ise ölçülen optik çıkış uygunlaştırılarak hesaplanır ve gürültü faktörü bulunur.

### Spektrum bölmeli yöntem (interpolasyon yöntemi)

Bu metot Spektrum bölmesiz yöntemden küçük bir değişim gösterir. Test ayarlarında çıkış band geçiren filtrenin kaybı hesaplanarak çıkış spektrumu ölçülür. Şayet filtre yoksa bir önceki yöntemle aynı sonucu verir. Düzeltilmiş spektrum optik giriş ve çıkıştan hesaplanır ve YKY uygunlaştırma ile bulunur. Bu düzeltilmiş spektrum ile kazanç ve gürültü faktörü bulunur. İnterpolasyon yönteminde düzeltilmiş spektrum  $P_{\text{corr}}(\lambda)$  aşağıdaki eşitlikten bulunur [137]:

$$P_{\text{corr}}(\lambda) = P_{\text{out}}(\lambda) \cdot P_{\text{outloss}} - \frac{G_1 \cdot P_{\text{in}}(\lambda) \cdot P_{\text{inloss}}}{L\text{Cal}_{\text{BPF}}} \quad (2.1)$$

$$G_1 = \frac{P_{\text{out}}(\lambda) \cdot P_{\text{outloss}}}{P_{\text{in}}(\lambda) \cdot P_{\text{inloss}}} \quad (2.2)$$

Bu eşitliklerde  $P_{\text{out}}(\lambda)$   $\lambda$  dalga boyundaki optik çıkışın seviyesi,  $P_{\text{in}}(\lambda)$   $\lambda$  dalga boyundaki optik girişin seviyesi,  $G_1$  doğrusal yükselteç kazancı,  $P_{\text{inloss}}$  giriş kaybının doğrusal değeri ve  $P_{\text{outloss}}$  çıkış kaybının doğrusal değeridir.

## EK-2. (Devam) OSA'nın Gürültü Ölçme Yöntemleri

### Polarizasyon sıfırlama yöntemi

Bu metotta, optik yükselteç polarizasyon yok edilerek değerlendirilir. Optik yükseltecin giriş ve çıkış sinyalinin her ikisi de ölçülür. Sinyal seviyesi minimum olduğunda polarizasyon denetleyici ve optik sensör kullanılarak optik sinyalin polarizasyon yönü ayarlanır. Bir kez daha sinyal seviyesi maksimum olduğunda polarizasyon yönü ayarlanır. Bu zamanda sinyal seviyesi  $P_{out}$ 'dur. Polarize edilmiş yükselteç çıkış spektrumundan YKY çıkış seviyesi eğri uygunlaştırma ve 3 dB düzeltme faktörü kullanılarak belirlenir.

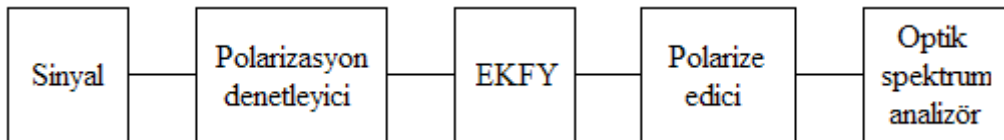
$$P_{YKY} = 2P_{sp-YKY} Pol_{loss} \quad (2.3)$$

$$P_{in}(\lambda) = P_{sp-in}(\lambda) P_{inloss} \quad (2.4)$$

$$P_{out}(\lambda) = P_{sp-out}(\lambda) P_{outloss} \quad (2.5)$$

burada  $P_{sp-YKY}$  uygunlaştırma ile hesaplanmış YKY,  $Pol_{loss}$  polarizasyon kaybının doğrusal değeri,  $P_{sp-in}(\lambda)$  analizör tarafından ölçülen optik giriş seviyesi ve  $P_{sp-out}(\lambda)$  ise analizör tarafından ölçülen optik çıkış seviyesidir.

Ölçülen bu YKY ve eğri uygunlaştırma ile sinyal ışığı dalga şeklindeki YKY seviyesi elde edilir ve kazanç ve gürültü faktörü hesaplanır. Aşağıda örnek ölçme devresi görülmektedir.

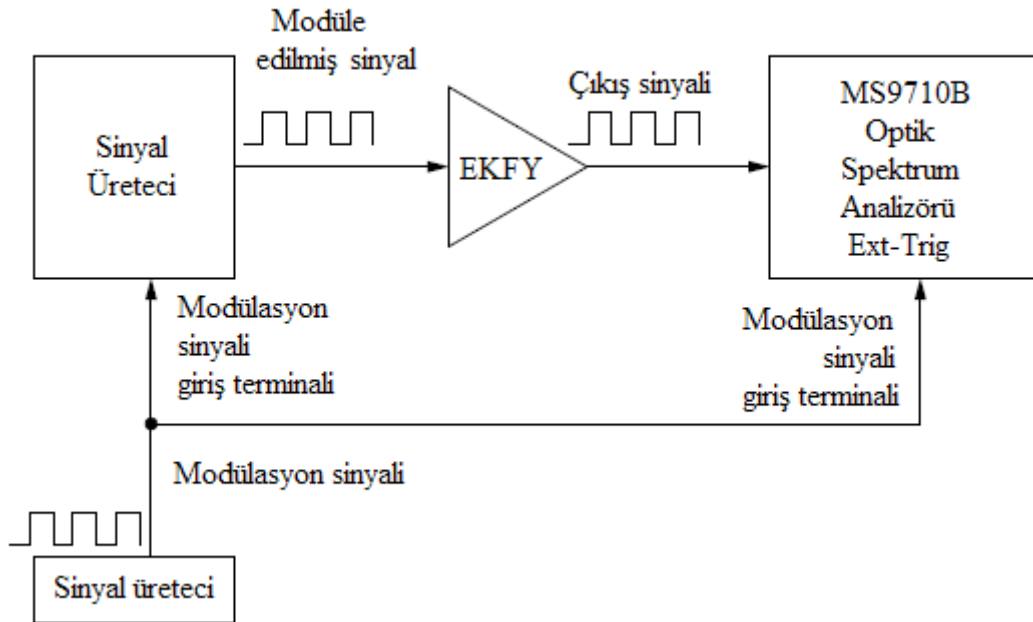


Şekil 2.1. Polarizasyon sıfırlama yöntemi için örnek ölçüm devresi

## EK-2. (Devam) OSA'nın Gürültü Ölçme Yöntemleri

### Darbe Yöntemi

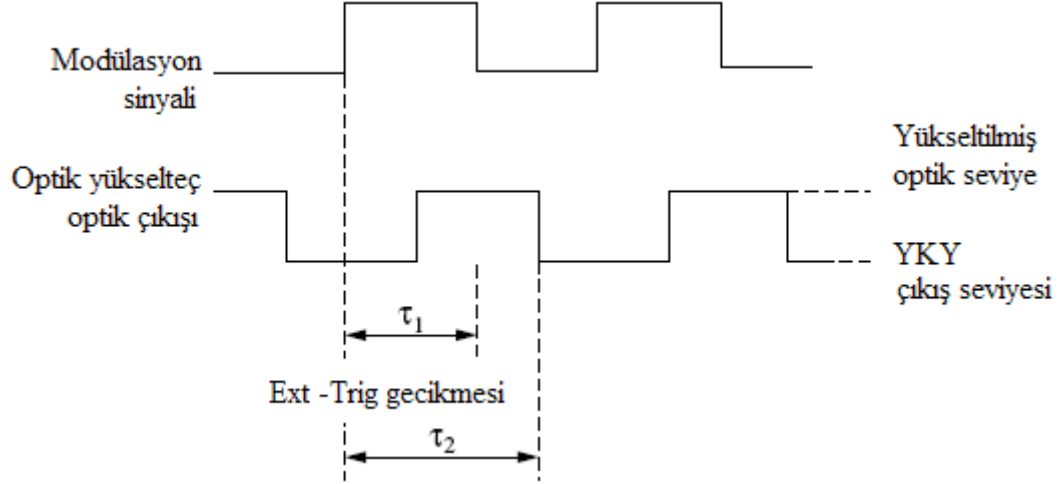
Bu metotta, YKY darbelenmiş optik sinyalden doğrulukla ölçülür. Aşağıda örnek ölçme şekli görülmektedir. Optik bir darbe ışığı (çoğunlukla modüle edilmiş) optik yükseltece girer. Örnekleme zamanını senkronize etmek için bu modüle edilmiş optik darbe kullanılır. Işık kaynağının modülasyon sinyali MS9710B OSA'nın Ext. Trig girişine verilir [137].



Şekil 2.2. Darbe metodu ile gürültü ölçme devresi

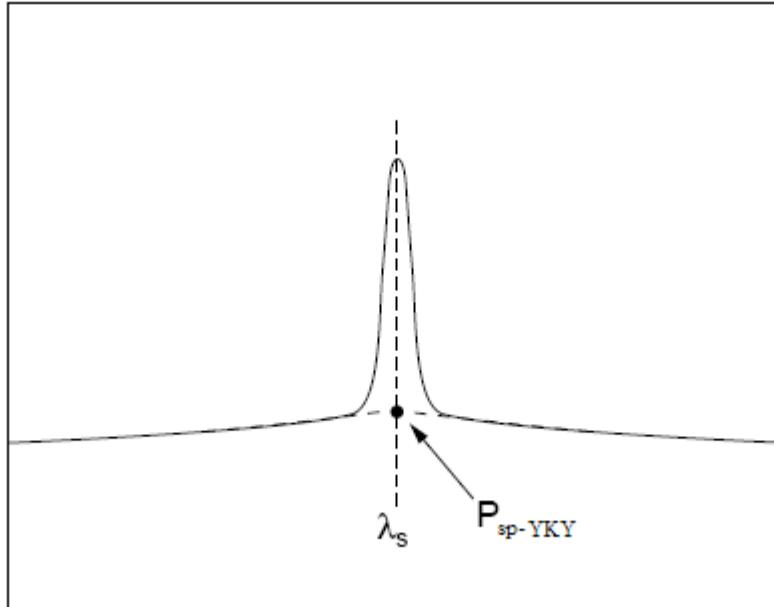
Ext-Trig sinyalinin yükselen kenarından  $\tau$  ms sonra ölçüm alınır. Bu  $\tau$  Ext-Trig gecikmesi olarak adlandırılır. Bu gecikme 0 ile 5 s arasında ayarlanabilir. İlk önce modüle edilmiş giriş sinyali daha sonra modüle edilmiş çıkış sinyali ölçülür.

## EK-2. (Devam) OSA'nın Gürültü Ölçme Yöntemleri



Şekil 2.3. Modülasyon ve modüle edilmiş çıkış sinyali

Yükseltilmiş optik seviyeyi ölçmek için Ext-Trig gecikmesi  $\tau_1$ 'e ayarlanmalıdır. Ext-Trig gecikmesi  $\tau_2$ 'ye ayarlandığı zaman YKY çıkış seviyesi ölçülebilir. Aşağıdaki şekilde uygunlaştırmayla hesaplanmış YKY görülmektedir [137].



Şekil 2.4. Uygunlaştırmayla hesaplanmış YKY

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YÜCEL, Murat  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 26.01.1979 Malatya  
 Medeni hali : Evli  
 Telefon : 0 (312) 202 85 69  
 Faks : 0 (312) 212 00 59  
 e-mail : [muyucel@gazi.edu.tr](mailto:muyucel@gazi.edu.tr)

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Elt.-Bil. Eğt.	2003
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Elektronik Öğr.	2000
Lise	Haydarpaşa E.M.L.	1996

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2000-2002	M. E. B.	Teknik Öğretmen
2002-	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

1. YÜCEL, M., GÖKTAŞ, H. H, "Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçlerde (EKFY) Pompalama Dalga boyu ve Yönünün EKFY Kazancına Etkisi", G.Ü.T.E.F. Politeknik Dergisi, 6 (4):627-635, 2003.
2. GÖKTAŞ, H. H., YÜCEL, M., "Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçlerde ASE'nin İncelenmesi", P.Ü. Müh. Bil. Dergisi, 10 (2):207-210, 2004.
3. YÜCEL, M., GÖKTAŞ, H. H, "Fiber Raman Yükselteçlerde Pompalama Yönünün Kazanç Spektrumuna Etkisi Üzerine Bir Simülasyon", G.Ü.T.E.F.

- Politeknik Dergisi, 9 (3):161-164, 2006.
4. GÖKTAŞ, H.H., YÜCEL, M., “İki Aşamalı C Band Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteçlerde (EKFY) Kazanç Düzleştirici Filtre Optimizasyonu”, Sakarya Üniv. Fen Bil. Enst. Dergisi, 10 (1):10-13, 2006.
  5. YÜCEL, M., GÖKTAŞ, H. H, "Kazancı Düzleştirilmiş S Band Fiber Raman Yükselteç Tasarımı", Karabük Üniv. Teknoloji Dergisi, 10 (4):301-305, 2007.
  6. YÜCEL, M., GÖKTAŞ, H. H., “Kazancı Düzleştirilmiş Çok Geniş Bantlı Hibrid Optik Yükselteç Tasarımı”, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi, 22 (4):863-868, 2007.
  7. YÜCEL, M., GÖKTAŞ, H. H, "L Band EKFY'lerin Sıcaklığa Bağımlı Fiber Boyu ve Kazancının Bulanık Mantık Kullanılarak İncelenmesi", Akademik Bilişim 2007, Dumlupınar Üniv., Kütahya, 31 Ocak- 2 Şubat 2007.
  8. YUCEL, M; GOKTAS, H. H., "Gain Flattening Configurations at the L Band Erbium Doped Fiber Amplifiers", IEEE 15th Sig. Process. and Comm. App. SIU 2007, 11-13 June 2007
  9. YUCEL, M; GOKTAS, H. H., " C Band Erbium Doped Fiber Amplifier as a Flat Gain Optical Amplifier", IEEE 16th Sig. Process. and Comm. App. SIU 2008, 20-22 April 2008
  10. GOKTAS, H.H., YUCEL, M., “A fuzzy logic based device for the determination of temperature dependence of EDFAs”, Microwave and Optical Technol. Lett., 50(9): 2331-2334, 2008.
  11. YUCEL, M., GOKTAS, H.H., “Determination of Minimum Temperature Coefficient of C Band EDFA”, Journal of Applied Sciences, 8(23)-4464-4467, 2008.

### **Hobiler**

Otomobil sporları, fotoğrafçılık.