

ÇİFT GEÇİŞLİ L BAND ERBİYUM KATKILI FİBER YÜKSELTECİN SICAKLIK BAĞIMLILIĞININ İNCELENMESİ

Murat YÜCEL^{*,1}, H. Haldun GÖKTAŞ²

¹ Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fak., Elektrik-Elektronik Müh. Böl., Teknikokullar/Ankara

² Yıldırım Beyazıt Üniv., Müh ve Doğa Bil. Fak., Elektronik ve Haberleşme Müh. Böl, Ankara

muyucel@gazi.edu.tr, haldungoktas@gmail.com

(Geliş/Received: 01.06.2011; Kabul/Accepted: 20.03.2012)

ÖZET

Bu çalışmada, tek geçişli (SP) ve çift geçişli (DP) L band erbiyum katkıli fiber yükseltecin (L-EDFA) sıcaklığa bağımlı kazanç değişimi incelenmiştir. Bu amaçla L-EDFA, 0 °C ile 60 °C arasındaki sıcaklık aralığında, -20 dBm güçteki giriş sinyalleri ve 980 nm pompa lazerleri ile iki yönlü pompalanarak deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlar DP L-EDFA kazancının SP L-EDFA kazancından daha yüksek olduğunu göstermektedir. Ancak sonuçlar aynı zamanda DP L-EDFA'nın sıcaklık bağımlılığının SP L-EDFA'dan daha yüksek olduğunu da göstermektedir. Sonuç olarak, DP L-EDFA'nın 1568 nm - 1588 nm aralığında sıcaklıktan bağımsız olarak çalıştırılabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: L band, EDFA, sıcaklık bağımlılığı, tek geçiş, çift geçiş.

EXAMINATION OF TEMPERATURE DEPENDENCE OF DOUBLE PASS L BAND ERBIUM DOPED FIBER AMPLIFIER

ABSTRACT

In this study, temperature dependent gain variation of single pass (SP) and double pass (DP) L band erbium doped fiber amplifiers (L-EDFA) has been examined. To do this L-EDFA is experimentally investigated by pumping bi-directionally using 980 nm pump lasers and input signals at -20 dBm powers in the temperature range between 0 °C and 60 °C. Experimental results show that, the gain of DP L-EDFA is higher than that of SP L-EDFA gain. However, the results also show that, temperature dependence of DP L-EDFA is higher than that of SP EDFA. Finally, it is observed that DP L-EDFA can be operated temperature independent in range between 1568 nm and 1588 nm.

Key Words: L band, EDFA, temperature dependence, single pass, double pass.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

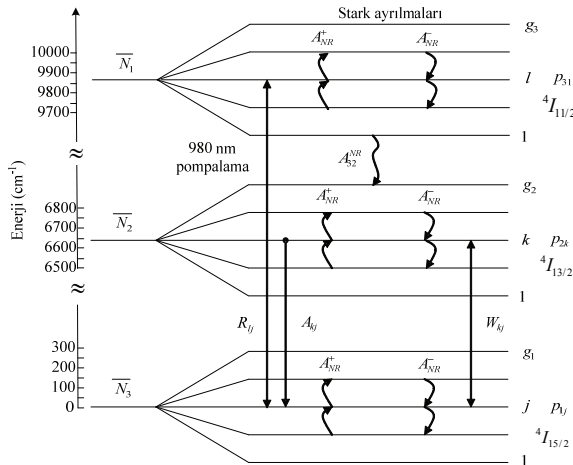
Erbiyum katkıli fiber yükselteçler ilk olarak geleneksel band olarak adlandırılan C bandında (1530-1560 nm) kullanılmaya başlanmış, ancak hızla artan kapasite ihtiyaçlarını karşılamak için S (1470-1520 nm) ve L bandında da (1570-1610 nm) kullanılmaya başlanmıştır [1-2]. Uzun mesafeli haberleşme sistemleri için sinyal kazancının artırılması ve iletim bandı boyunca değişmeyen düz bir kazanç spektrumunun olması temel iki konu olarak ortaya çıkmıştır. C ve L bandında EDFA kazancını arttırmak için birçok farklı konfigürasyon geliştirilmiştir. Bu konfigürasyonlarda, bir erbiyum

katkıli fiber (EDF) kısmı kullanılan tek aşamalı sistemler çeşitli şekillerde pompalanmış, daha sonra iki veya daha fazla EDF kısmı olan yükselteçler geliştirilmiş, tek EDF kısmından yansıtıcılar yardımıyla iki kez sinyal geçirilerek oluşturulan çift geçişli sistemler geliştirilmiş ve son olarak birden fazla EDF kısmı ve yansıtıcılar kullanılarak üç ve daha fazla geçişli sistemler geliştirilerek EDFA kazancı artırılmıştır [3-21]. Tüm bu çalışmaların yanı sıra kazanç düzleştirme çalışmaları da yapılmıştır. EDFA'nın düz kazanç profili dalga boyu bölmeli çoğullama (WDM) uygulamaları için önemli bir ihtiyaç olup, bu amaçla iki aşamalı sistemler, kazanç düzleştirici filtreler, fiber ızgaralar kullanılmıştır [22-

28]. Fakat kazanç düzleştirme işlemleri sabit sıcaklıkta yapıldıkları için, sistemin çalıştığı ortam ile tasarım sıcaklığı arasında sıcaklık farkı oluştuğunda, ayarlanan düz kazanç spektrumunun bozulduğu görülmüştür [29]. Sıcaklık bağımlılığının EDFA kazancına etkisi vardır, ancak bu bağımlılığının kesin bir analitik çözümü yoktur. Bu konuda yapılan teorik, nümerik ve deneysel pek çok çalışma mevcuttur [30-43]. Bu çalışmalarda genellikle; tek aşamalı, iki aşamalı sistemlerde sıcaklığın sistem kazancına ve gürültüsüne olan etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada ise, tek ve çift geçişli sistemlerde sıcaklık bağımlılığı deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla ikinci bölümde 980 nm'de pompalanan EDFA'nın sıcaklığa bağımlı teorik analizi yapılmıştır. Üçüncü bölümde kullanılan materyal ve metotlar belirtilmiş, dördüncü bölümde deneysel sonuçlar irdelenmiş ve son bölümde sonuçlar yorumlanmıştır.

2. TEORİK ANALİZ (THEORETICAL ANALYSIS)

980 nm pompa lazeri ile pompalanan bir EDFA'daki kazanç ifadesi, kendi içerisinde de alt seviyeleri içeren, üç seviyeli bir enerji seviye sistemi ile modellenilebilir. EDFA'nın üç seviyeli sistem modelinde soğurma ve yayılma kesitleri eşit değildir. Çünkü, alt ve üst lazer seviyeleri kendi içerisinde birkaç Stark alt seviyesine ayrılır (Şekil 1) Şekil 1'de A_{NR}^{\pm} bitişik Stark alt seviyeleri arasındaki ışımaz oranları gösterir [37].



Şekil 1. Stark ayrılmalı üç seviyeli lazer sisteminin enerji seviye diyagramı.

EDF'nin soğurma ve yayılım kesitlerinin sıcaklığa bağımlı olması, EDFA parametrelerini sıcaklığa bağımlı kılar. Burada ana varsayım fiber sıcaklığı ile erbiyum alt seviyelerindeki foton dağılımının değişmesidir.

Şekil 1'de Stark aralıklı üç seviyeli lazer sisteminin enerji seviye diyagramı görülmektedir. Seviye 1, 2 ve 3'deki her bir manifoldda karşılık gelen toplam iyon yoğunlukları \bar{N}_1, \bar{N}_2 ve \bar{N}_3 , bozulmaları ise sırasıyla g_1, g_2 ve g_3 ile gösterilmiştir. Sırasıyla j, k, l indisleri

ise 1., 2. ve 3. manifoldlarının enerji alt seviyeleridir. $\bar{N}_1 + \bar{N}_2 + \bar{N}_3 = \rho$ 'dur. ($j=1, \dots, g_1, k=1, \dots, g_2, l=1, \dots, g_3$). Her bir alt seviyenin iyonu $N_{n,m}$ 'dir. ($n=1,2,3, m=j, k, l$)'dir.

Fonon veya titreşim quantumu niceliğinin oluşması veya soğurması ile iyonların uyarılmaları veya uyarılmamalarına karşılık, ışımaz oranlar A_{NR}^+ ve A_{NR}^- ile her bir manifoldda termalizasyon meydana gelir. Genel ısı denge durumunda:

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

ile verilir. (n, m) ve ($n, m-1$) alt seviyeleri arasındaki enerji farkı $\Delta E_m = E_m - E_{m-1}$ 'dir ve alt seviyelerin ikisi arasındaki ilişki:

$$\frac{N_{nm}}{N_{n,m-1}} = \frac{A_{NR}^+}{A_{NR}^-} = \exp\left(\frac{-\Delta E_m}{k_B T}\right) \quad (2)$$

Burada k_B Boltzmann sabitidir. Eş. 1 yeniden yazılırsa şu bağıntı elde edilir:

$$N_{nm} = \frac{\exp[-(E_m - E_{m-1})/k_B T]}{\sum_{m=1}^{g_n} \exp[-(E_m - E_1)/k_B T]} \bar{N}_n \equiv p_{nm} \bar{N}_n \quad (3)$$

burada p_{nm} Boltzmann dağılımıdır. Şekil 1'de üç seviyeli lazer sistemi ile ilgili diğer oranlar; R_{lj} pompalama oranı, W_{kj} uyarılmış yayılma oranı, A_{kj} kendiliğinden yayılma oranı ve A_{32}^{NR} ışımaz bozulma oranıdır. Isıl dengenin sonucunda her bir alt seviye çiftinin soğurma oranı uyarılmış yayılma oranına denktir, $R_{lj} = R_{jl}$ ve $W_{kj} = W_{jk}$ 'dir.

Bununla beraber her bir manifoldda karşılık gelen denklemler, $\sum_m N_{nm} = \sum_m p_{nm} \bar{N}_n = \bar{N}_n$ bağıntısı kullanılarak \bar{N}_1, \bar{N}_2 ve \bar{N}_3 ana seviyelerindeki iyonlar için oran denklemleri elde edilir [37]:

$$\frac{d\bar{N}_1}{dt} = -\sum_j \sum_l R_{lj} (N_{1j} - N_{3l}) + \sum_j \sum_k \{A_{kj} N_{2k} + W_{kj} (N_{2k} - N_{1j})\} \quad (4)$$

$$\frac{d\bar{N}_2}{dt} = A_{32}^{NR} N_{31} - \sum_j \sum_k \{A_{kj} N_{2k} + W_{kj} (N_{2k} - N_{1j})\} \quad (5)$$

$$\frac{d\bar{N}_3}{dt} = -A_{32}^{NR} N_{31} + \sum_j \sum_l R_{lj} (N_{1j} - N_{3l}) \quad (6)$$

Bu noktada temel üç seviyeli sisteme karşılık gelen tüm pompalama ($\mathfrak{R}_{13}, \mathfrak{R}_{31}$), uyarılmış ($\mathfrak{W}_{12}, \mathfrak{W}_{21}$) ve

kendiliğinden yayılma (A_{21}) denklemleri tanımlanabilir:

$$\mathfrak{R}_{13} = \sum_j \sum_l R_{lj} P_{1j} \quad (7)$$

$$\mathfrak{R}_{31} = \sum_j \sum_l R_{lj} P_{31} \quad (8)$$

$$\mathcal{W}_{12} = \sum_j \sum_k W_{kj} P_{1j} \quad (9)$$

$$\mathcal{W}_{21} = \sum_j \sum_k W_{kj} P_{2k} \quad (10)$$

$$\mathcal{A}_{21} = \sum_j \sum_k A_{kj} P_{2k} \quad (11)$$

Yukarıdaki tanımlar ile $A_{32}^{NR} P_{31} \equiv \mathcal{A}_{32}$ alınarak Eş. 4 ve 5'den:

$$\frac{d\bar{N}_1}{dt} = -\mathfrak{R}_{13}\bar{N}_1 + \mathfrak{R}_{31}\bar{N}_3 - \mathcal{W}_{21}\bar{N}_2 + \mathcal{W}_{12}\bar{N}_2 + \mathcal{A}_{21}\bar{N}_2 \quad (12)$$

$$\frac{d\bar{N}_2}{dt} = \mathcal{W}_{12}\bar{N}_1 - \mathcal{W}_{21}\bar{N}_2 - \mathcal{A}_{21}\bar{N}_2 + \mathcal{A}_{32}\bar{N}_3 \quad (13)$$

$$\frac{d\bar{N}_3}{dt} = \mathfrak{R}_{13}\bar{N}_1 - \mathfrak{R}_{31}\bar{N}_3 - \mathcal{A}_{32}\bar{N}_3 \quad (14)$$

elde edilir.

Stark ayrılmalı lazer sistemi, üç seviyeli lazer sistemine eşdeğerdir, fakat pompalama, uyarılmış ve kendiliğinden yayılma oranları Eş. 7-11'de tanımlandığı gibidir. Sistemin çözümü Eş. 12-14 ile yapılır.

Homojen olmayan genişlemenin etkisi ve Er^{3+} :cam içinde tek tek Stark geçişlerinin karakterizasyonu ve spektral çözümlemenin zorluğu, p_{nm} ve A_{kj} parametreleri hakkında belirsizlik oluşturmaktadır [37].

Oluşturulan EDFA modelinde kendiliğinden yükseltilmiş yayılma gücü P_{ASE}^{\pm} , çift geçişli sistem olduğu için ileri yönde olduğu kadar geri yönde de tanımlanmalıdır [37].

$$P_{ASE}^{\pm} = P_{ASE}^{+} + P_{ASE}^{-} \quad (15)$$

Çıkış sinyal gücünün giriş sinyal gücüne oranından, fiber boyuna bağlı olarak sinyalin ilk geçişinde elde edilen yükselteç kazancı bulunur:

$$G_{(ileri)} = \frac{P_{s(ileri)}(L)}{P_s(0)} = \exp(-\alpha_s L) \exp\left(\frac{h\nu_s}{P_s^{IS}} \left[\frac{P_p(0) - P_p(L)}{h\nu_p} + \frac{(P_s(0) + P_{ASE}^{\pm}(0)) - (P_{s(ileri)}(L) + P_{ASE}^{\pm}(L))}{h\nu_s} \right]\right) \quad (16)$$

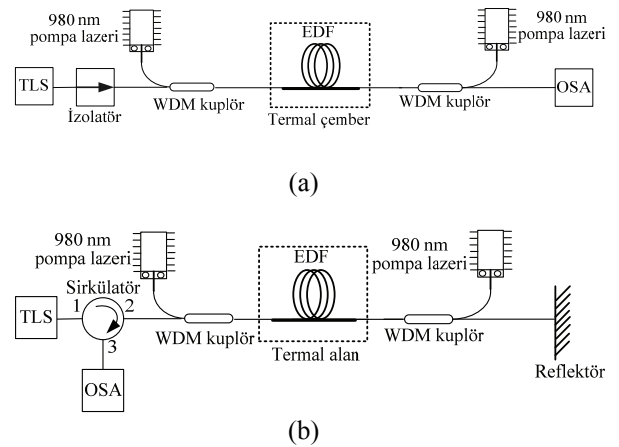
Burada $P_{s(ileri)}$, P_p sırasıyla ileri yöndeki sinyal ve pompa gücü, α_s sinyal ışının sabit soğurumu, h Planck sabiti, ν_s , ν_p sırasıyla sinyal ve pompa frekansları, P_s^{IS} sinyalin iç doyum gücü [40, 41], P_{ASE}^{\pm} çift yönlü oluşan ASE gücüdür. Geri yönde geçiş yapan sinyal gücü ise [44]:

$$P_{s(geri)} = G_{ileri} \cdot P_{s(ileri)} \cdot (1 - 0,01) \cdot R \quad (17)$$

olup, burada R reflektörün yansıma kaybıdır. Genelde %0 ile %10 arası değişmektedir [44].

3. MATERYAL ve METOT (MATERIAL AND METHOD)

Şekil 2.a'da SP L-EDFA, Şekil 2.b'de ise DP L-EDFA'nın deneysel düzeneği görülmektedir. Bu şekillerde TLS ayarlanabilir lazer kaynağını, OSA ise optik spektrum analizörünü göstermektedir. Şekil 2.a'da TLS aracılığıyla 1564 nm ile 1610 nm dalga boyuna ve -20 dBm güce sahip sinyaller, 100 mW güçteki 980 nm pompa lazerleri ile iki yönlü olarak pompalanarak, L band EDF'e uygulanmıştır. L band EDF sıcaklığı 0 °C ile 60 °C arasında değiştirilebilen termal bir alana konulmuştur. Sıcaklık etkisinin daha homojen olarak incelenebilmesi için, L band EDF en az 30 dakika termal alan içerisinde bekletilmiştir. EDF çıkışındaki sinyaller tek tek OSA kullanılarak ölçülmüştür. Şekil 2.b'de görülen DP L-EDFA'da ise aynı giriş sinyalleri TLS'den sirkülatöre uygulanmıştır. Sirkülatörün 1 nolu bacağından giren sinyaller 2 nolu bacağından çıkarak, iki yönlü pompalanmış L band EDF'e uygulanmıştır. L band EDF sıcaklığı (a) şeklinde olduğu gibi aynı termal alana konulmuştur. L band EDF'ten çıkan sinyaller reflektörden tamamen yansıyarak tekrar EDF'e girmiş ve sirkülatörün 2 nolu bacağından girerek 3 nolu bacağından OSA'ya gelerek ölçümler alınmıştır.



Şekil 2. (a) SP L-EDFA, (b) DP L-EDFA düzeneği

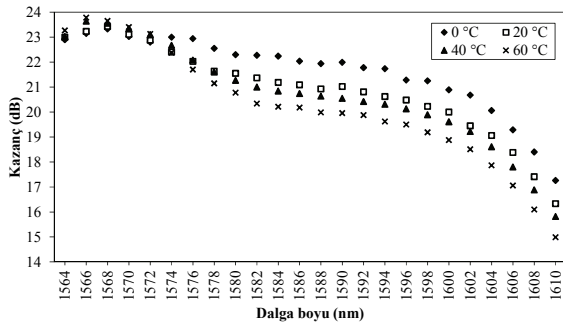
Deneysel düzeneklerde R37103 L band fiberi kullanılmıştır. Tablo 1’de bu fiberin parametreleri görülmektedir.

Tablo 1. R37103 L band fiber parametreleri

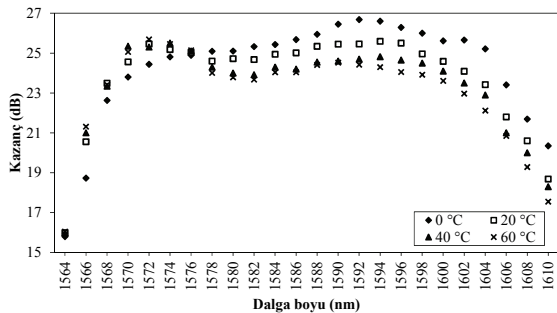
Parametreler	Değerler
1300 nm kaybı	4,7 dB/km
İyon ömrü	10 ms
Öz yarıçapı	1,55 μm
Erbiyum yarıçapı	1 μm
Er ³⁺ konsantrasyonu	400 ppm
Nümerik açıklık	0,24

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Şekil 3’de SP L-EDFA, Şekil 4’de ise DP L-EDFA düzeneklerinin, L bandı boyunca farklı sıcaklıklar için kazanç değişimleri görülmektedir. Şekil 3 ve 4 referans alınarak oluşturulan Tablo 2’de ise, SP L-EDFA ve DP L-EDFA’nın her bir sıcaklık değeri için elde edilen, tüm L bandı (1564-1610 nm) için kazanç değişimi ($\Delta G1$), düz kazanç bandı (1570-1600 nm) için kazanç değişimi ($\Delta G2$) ve ortalama kazanç değerleri (\bar{G}) verilmiştir.



Şekil 3. SP L-EDFA kazancının sıcaklığa bağlı değişimi



Şekil 4. DP L-EDFA kazancının sıcaklığa bağlı değişimi

SP L-EDFA konfigürasyonuna göre, en yüksek kazanç değerleri ve en düşük kazanç değişimi 0 °C’de elde edilmiştir. Sıcaklık arttıkça L bandı boyunca, elde edilen kazanç değerlerinde azalma, kazanç değişimi değerlerinde ise ($\Delta G1$ ve $\Delta G2$) yükselme görülmektedir. DP L-EDFA konfigürasyonu için aynı analiz yapılacak olursa, $\Delta G1$ için en az değişim

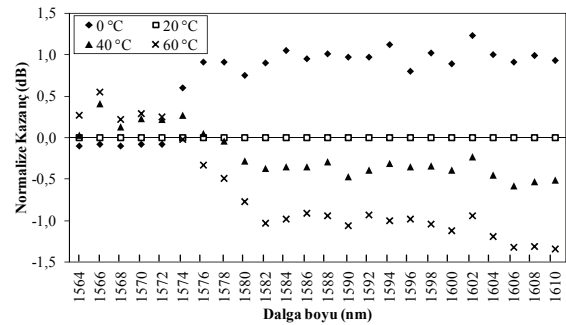
40 °C’de, $\Delta G2$ için en az değişim ise 20 °C’de görülmektedir. Sıcaklık arttırıldığında ise, SP L-EDFA’da olduğu gibi, L bandı boyunca elde edilen kazanç değerlerinde azalma görülmektedir.

Tablo 2. Her bir sıcaklık değerleri için SP L-EDFA ve DP L-EDFA düzeneklerinin karşılaştırılması

Düzenek	Parametreler	0 °C	20 °C	40 °C	60 °C
SP L-EDFA	$\Delta G1$ (dB)	6,07	7,10	7,82	8,79
	$\Delta G2$ (dB)	2,14	3,11	3,73	4,52
	\bar{G} (dB)	21,63	20,90	20,70	20,23
DP L-EDFA	$\Delta G1$ (dB)	10,88	9,59	9,52	9,64
	$\Delta G2$ (dB)	2,88	1,03	1,58	2,08
	\bar{G} (dB)	24,23	23,74	23,33	23,07

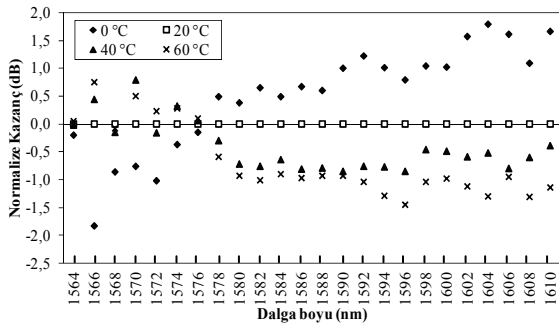
SP L-EDFA ile karşılaştırıldığında, DP L-EDFA konfigürasyonunda elde edilen değerler $\Delta G1$ için oldukça yüksek, $\Delta G2$ için oldukça düşüktür. Aynı zamanda DP L-EDFA konfigürasyonunda elde edilen kazanç değerleri SP L-EDFA konfigürasyonuna oranla yaklaşık 3 dB’lik bir artış gösterdiği görülmektedir.

Şekil 5 ve 6’da ise sırasıyla SP L-EDFA ve DP L-EDFA düzeneklerinin sıcaklığa bağlı kazançlarının, 20 °C’ye göre normalize edilmiş grafikleri görülmektedir. Bu şekiller yardımıyla herhangi bir dalga boyundaki sinyalin farklı sıcaklık değerlerine karşılık alacağı kazanç değerleri ve dolayısıyla sıcaklık değişiminin o sinyal üzerindeki etkisi rahatlıkla incelenebilir.



Şekil 5. Normalize edilmiş SP L-EDFA kazancının sıcaklığa bağlı değişimi

Şekil 5’de görüldüğü gibi, sıcaklık değişiminden en fazla etkilenen sinyal dalga boyu 1608 nm olup bu sinyal dalga boyu için kazanç değişimi 2,3 dB’dir. En düşük kazanç değişimi ise 0,32 dB olup, bu değişim 1568 nm dalga boyundaki sinyale aittir. Tüm L bandı içerisinde yaklaşık 1,5 dB’lik bir dalgalanma için, en düşük kazanç değişimi 1564-1580 nm dalga boyu bandındadır (16 nm’lik bir band genişliği) ve bu aralıktaki kazanç değişimi 0,32-1,52 dB arasındadır.



Şekil 6. Normalize edilmiş DP L-EDFA kazançının sıcaklığa bağımlı değişimi

Şekil 6'da görüldüğü gibi, DP L-EDFA'da sıcaklık değişiminden en fazla etkilenen sinyal dalga boyu ise 1604 nm olup, bu sinyal dalga boyu için kazanç değişimi 3,09 dB'dir. En düşük kazanç değişimi ise 1576 nm dalga boyundaki sinyale ait olup, 0,25 dB'dir. L bandı içerisinde yaklaşık 1,5 dB'lik bir dalgalanma için, en düşük kazanç değişimi 1568-1588 nm dalga boyu bandındadır (20 nm'lik bir band genişliği) ve bu aralıktaki kazanç değişimi, 0,25-1,66 dB arasındadır. SP L-EDFA ile karşılaştırıldığında, DP L-EDFA'nın sıcaklıktan en az etkilenerek çalıştırılacağı band aralığının daha yüksek olduğu görülmektedir.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, C bandına oranla ters birikmesi daha düşük olan L bandında verimi arttırmak için iki yönlü olarak pompalanan SP L-EDFA düzeneğine ek olarak kazanç iyileştirmesi için DP L-EDFA düzeneği kullanılmış ve bu düzenekler için kullanılan L band EDF'i 0 °C ile 60 °C arasındaki sıcaklıklarda çalışırken, çıkış kazanç spektrumları oluşturulmuştur. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, tüm sıcaklık ve dalga boyu değerleri için en yüksek kazanç değerlerine DP L-EDFA'nın sahip olduğu görülmüştür. Daha sonra tüm L bandı ($\Delta G1$) ve düz kazanç bandı ($\Delta G2$) olarak ayrılan dalga boyu bandlarında sıcaklık değişimlerine karşılık kazanç değişimi incelenmiştir. Tablo 2'de ayrıntılı olarak görülmekle beraber, $\Delta G1$ ve $\Delta G2$ bandları için SP L-EDFA'nın 0 °C'de, DP L-EDFA'nın ise $\Delta G1$ bandı için 40 °C, $\Delta G2$ bandı için ise 20 °C'de en iyi sonuçları verdiği görülmüştür. Son olarak tüm band içerisindeki bir sinyalin sıcaklıktan ne kadar etkilendiğini belirlemek için normalizasyon işlemi yapılmıştır. Bu işlem sonucunda SP L-EDFA'da 0-60 °C arasında en fazla 2,3 dB'lik kazanç değişimi gözlemlenirken, DP L-EDFA'da bu değer 3,09 dB'ye çıkmıştır. Buna karşılık SP L-EDFA'da sıcaklıktan en az etkilenen çalışma bandı 16 nm iken bu değer DP L-EDFA'da 20 nm olarak bulunmuştur.

Sonuç olarak DP L-EDFA'nın sıcaklığa bağımlı kazanç spektrumu $\Delta G2$ bandı için SP L-EDFA'dan

daha iyidir. Ayrıca, DP L-EDFA'nın tüm L bandı boyunca aynı dalga boyuna sahip sinyaller için, daha yüksek bir kazanç değişimi gösterdiği ancak bu band daraltıldığında ise SP L-EDFA'ya göre daha iyi bir sıcaklık bağımlılığı gösterdiği belirlenmiştir.

6. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Yamada, M., "Overview of wideband optical fiber amplification technologies", **NTT Technical Review**, 2(12), 34, 2004.
2. Sakamoto, T., Mori, A., Masuda, H., Ono, H., "Wideband rare-earth-doped fiber amplification technologies – Gain bandwidth expansion in the C and L bands", **NTT Technical Review**, 2(12), 38, 2004.
3. Bouzid, B., Abdullah, M.K., Mahdi, M.A., "High-Gain Erbium-Doped Fiber Amplifier Incorporating a Double-Pass Amplification Technique as a Pre-amplifier", **Laser Physics**, 18(4), 460-463, 2008.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Altuncu, A., "Band Selection in Broadband Loop ASE Source Using Seed Signal Injection", **IEEE Photon. Technol. Lett.**, 18(9), 1043-1045, 2006.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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”, **J. of Lightwave Technol.**, 23(3), 1375-1379, 2005.
13. 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.
 14. 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.
 15. 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.
 16. 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.
 17. 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.
 18. 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.
 19. 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.
 20. 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.
 21. 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.
 22. Yucel, M., Goktas, H.H., “Design of gain flattened ultra-wide band hybrid optical amplifier”, **J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.**, 22, 863-868, 2007.
 23. Yucel, M., Goktas, H.H., “Gain flattening configurations at the L band erbium doped fiber amplifiers”, **IEEE 15th Signal Process. and Comm. App.**, 1-4, 2007.
 24. Goktas, H.H., Yucel, M., “Gain flattening filter optimization of the two stage C band erbium doped fiber amplifiers (EDFA)”, **J. Inst. Sci. Technol. Sakarya Univ.**, 10, 10-13, 2006.
 25. S., Dung, Chi, J.C., S., Wen, “Gain Flattening of Erbium-doped Fibre Amplifier Using Fibre Bragg Gratings”, **Electronics Letters**, 34(6), 555, 1998.
 26. 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.
 27. Mahdi, M. A., Sheih, S. J. “Gain-Flattened Extended L-band EDFA with 43nm Bandwidth Suitable for High Signal Powers”, **Optics Comm.**, 234, 229-233, 2004.
 28. 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.
 29. Yucel, M., Celebi, F. V., Goktas, H.H., “Temperature independent length optimization of L-band EDFAs providing flat gain”, **Optik**, 122 (10), 872-876 2011.
 30. Goktas, H.H., Yucel, M., “A fuzzy logic based device for the determination of temperature dependence of EDFAs”, **Microwave and Optical Technol. Lett.**, 50, 2331-2334, 2008.
 31. Wysocki, P., Conti, N., Holcomb, D., “Simple modeling approach for the temperature dependence of the gain of erbium-doped fiber amplifiers”, **SPIE Photonics East, Proc.: Optical Devices for Fiber Comm.**, 3847, 214, 1999.
 32. Bolshtyansky, M., Wysocki, P., Conti, N., “Model of temperature dependence for gain shape of erbium-doped fiber amplifier”, **J. of Lightwave Technol.**, 18 1533-1540, 2000.
 33. Lolivier, L., Grillet, A., Roy, F., Hamoir, D., “DGE-based variable gain EDFA improves both gain flatness and noise figure for a 70 °C temperature operating range”, **Optical Fiber Comm. Conf. OFC/NFOEC**, 4, 3, 2005.
 34. Nakaji, H., Ishizawa, Y., Ohmura, M., Shibata, T., Inoue, A., Shige- matsu, M., “A temperature-insensitive erbium-doped fiber amplifier for terrestrial wavelength-division-multiplexing systems”, **IEEE Photonics Technol. Lett.**, 15, 1522-1524, 2003.
 35. Lee, W.J., Min, B., Ahn, S., Park, N., “Simulation for the effect of cascaded gain-temperature dependence on 40 channel - 50 EDFA WDM link under temperature fluctuations”, **Lasers and Electro-Optics CLEO/Pacific Rim’99**, 3, 646-647, 1999.
 36. Im, Y.E., Oh, K., Chang, S.H., Kim, K., DiGiovanni, D.J., “Reduction of temperature-dependent gain in L-band EDFA using antimony-aluminum codoped silica EDF”, **IEEE Photonics Technol. Lett.**, 17, 1839-1841, 2005.
 37. Desurvire, E., “Erbium-Doped Fiber Amplifier: Principles and Applications”, **John Wiley and Sons. Inc.**, NewYork, 1994.
 38. McCumber, D.E., “Theory of phonon-terminated optical masers”, **Phys. Rev.**, 134, A299-A305, 1964.

39. Miniscalco, W.J., Quimby, R. S., “General procedure for the analysis of Er³⁺ cross sections”, **Opt. Lett.**,16, 258–260, 1991.
40. Berkdemir, C., Özsoy, S., “The temperature dependent performance analysis of EDFAs pumped at 1480nm: a more accurate propagation equation”, **Optics Express** 13, 5179–5185, 2005.
41. Lin, M.C., Chi, S., “The gain and optimal length in the erbium-doped fiber amplifiers with 1480 nm pumping”, **IEEE Photonics Technol. Lett.**, 4, 354–356, 1992.
42. Yucel, M., Goktas, H.H., Ozkaraca, O., “Temperature dependence of noise figure in the erbium doped fiber amplifier”, **J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.**, 25(3), 635–641, 2010.
43. Yucel, M., Goktas, H.H., “Determination of minimum temperature coefficient of C band EDFA”, **Journal of Applied Sciences**, 8(23), 4464-4467, 2008.
44. 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.

