

ERBİYUM KATKILI FİBER OPTİK YUKSELTEÇLERİN (EDFA) MODELLEMESİ VE BİLGİSAYARLI KAZANÇ SİMÜLASYONU

Murat ARI
Çankırı Meslek Yüksekokulu
Ankara Üniversitesi
18200 Çankırı
E-mail: cmeslek@turnet.net.tr

Ahmet ALTUNCU
Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü
Dumlupınar Üniversitesi / Kütahya
E.mail: aaltuncu@ges.net.tr

Cem NAKİBOĞLU
Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü
Gazi Üniversitesi / Ankara
E-mail: cemnak@mikasa.mmf.gazi.edu.tr

ABSTARCT

Attenuation in optical fibers is a fundamental limitation in realising long distance optical communication and distribution networks. However recent advances in fiber optics, has enabled the direct optical amplification of signals through the optical amplifiers exhibiting high gain, low noise, large band width and large output power characteristics. The most well established technology in this case is erbium doped fiber amplifiers (EDFA). The EDFA's are operated in the 1,55/Jtn wavelength region in which the loss of silica fibers is minimum.

in this study, firstly, the rate and propagation equations of a forward pump EDFA are evaluated as functions of pump and signals input powers, fiber length and Er^{3} density. Then a computer program has been written to simulate the EDFA characteristics. by solving the rate and propagation equations, numerically. The simulation results show how the gain of an EDFA varies as functions of pump and signal input powers, fiber length and Er^{3*} density and thus, the optimum fiber length for the maximum EDFA gain can be easily determined.*

1. GİRİŞ

Optik fiberlerde zayıflama (attenuation), uzak mesafe fiber optik haberleşme sistemlerinin gerçekleştirilmesinde karşılaşılan temel problemlerden birisidir. Bununla birlikte fiber optik teknolojisinde kaydedilen son gelişmeler, yüksek kazanç, düşük gürültü, yüksek band genişliği ve yüksek çıkış gücü karakteristiklerine sahip optik amplifikatörler yoluyla doğrudan optik olarak amplifikasyonuna izin vermiştir. Sinyalin silika fiberlerin yer kürede az rastlanan elementlerle (rare-earth element) katkılanması yoluyla gerçekleştirilen fiber optik lazerler ve amplifikatörler bu tür teknolojilerin en popüler olanıdır ve bu nedenle kısa bir zamanda ticari amaçlı kullanıma girmiştir.

Bir katkılı fiberde amplifikasyon fikri ilk defa 1964'de Koester ve Snitzer tarafından teklif edilmesine rağmen [1] pratikte kullanımı ancak 1986'dan sonra yani düşük kayıplı rare-earth katkılı fiberlerin fabrikasyonu ve karakterizasyonu gerçekleştirildikten sonra mümkün olmuştur [2]. Erbiyum (Er^{3+}), Holmiyum (Ho^{3+}), Neodmiyum (Nd^{3+}), Prasedmiyum (Pr^{3+}), Samariyum (Sa^{3+}), Tuliyum (Tm^{3+}) ve Yiterbiyum (Yb^{3+}) gibi bir çok rare-earth iyonlar kullanılarak, görülebilir ışıktan (Visible) kızılötesi ışık (infrared) bölgesine (3 mm' ye kadar) geniş bir spektrumu kapsayan farklı dalga boylarında çalışan fiber amplifikatörlerle yapılabilir. Bununla birlikte yukarıda verilen elementler arasında Erbiyum katkılı fiber amplifikatörler (EDFA) en büyük ilgiyi toplamayı başarmıştır. Bunun nedeni ise, bu amplifikatörlerin silika fiberlerde optik fiber zayıflamasının minimum olduğu 1550 nm dalda boyu civarında geniş bir aralıkta çalışması ve dolayısıyla 1550 nm penceresinde (3. Pencere) çalışan fiber optik haberleşme sistemleri için ideal olmasıdır[3]. Yakın zamanda yapılan çalışmalar prensip olarak erbiyum katkılı fiberi 980 nm ve 1480 nm' de pompalamanın (pumping) en verimli çalışan ve uyarılmış seviye absorblamasından (excited state absorption) bağımsız yöntemler olduğunu ortaya koymuştur [4].

1480 nm' de çalışan bir yarı iletken lazerler pompalanan ilk yüksek verimli ve yüksek kazançlı EDFA 1988'de Nakazava tarafından gerçekleştirilmiştir[5] ve yine EDFA'nın yüksek bit oranlı ve uzak mesafe fiber optik haberleşme sistemlerinde kullanımı 1989'da başlamıştır. EDFA'nın diğer bir modeli DEDFA (Distributed-Erbium-Doped Fiber Amplifiers), çok düşük oranda Er^{3*} katkılanmış iletim fiberini içerir. Ve son yıllarda özellikle yüksek bit oranlı non-lineer soliton pulsların uzak mesafelere iletiminde kullanılmak üzere geliştirilmektedir [6]. Optimize edilmiş bir EDFA'mn tipik karakteristikleri

1,55µm bölgesinde yüksek kazanç (30-50 dB) ,yüksek çıkış gücü (+10-20 dBm) , yüksek kazanç verimi (6-10dB/mW), düşük gürültü (NF=3-5 dB), yüksek band genişliği (30 nm'den büyük) , düşük polarizasyon bağımlılığı, iletim fiberine düşük bağlantı kaybı (<0,5dB) ve basit yapısıdır.

Bu çalışmada önce tipik bir iletim yönünde (fonvard pumped EDFA) pompalanmış EDFA'yı karakterize eden oran ve yayılım denklemleri kullanılarak pompalama ve sinyal giriş güçleri fiber uzunluğu ve erbiyum yoğunluğunun fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Daha sonra EDFA tasarımında kullanılabilecek şekilde model denklemlerinin nümerik çözümlenmesini ve sonuçların grafiksel görüntülenmesini içeren Delphi programı yazılmıştır. Simülasyonla elde edilen grafikler EDFA kazancının, pompalama gücü, sinyal giriş gücü ve fiber uzunluğuna bağlı olarak nasıl değiştiğini göstermekte ve bu sayede maksimum kazanç için optimum fiber uzunluğu bulunabilmektedir.

3. MODELLEME

Bu model 1480 nm'de tek yönlü pompalanan (fonvard pumping) 1500-1600nm spektral aralığndaki Er³⁺ fiber optik amplifikatörler için hazırlanmıştır. Model, sinyal saturasyonunu Gausiycn Mod dağılınını ve temel fiber kayıplarını içerir. Buna karşılık ESA'yı (Excited State Absorption) ASE'yi (Amplified Spontaneous Emission), Stark-Splitting (bölünmesi) nedeni ile oluşan homojen olmayan spektral genişlemeyi, on-off anahtarlamadaki geçici rejimleri ve gürültüyü içermez.

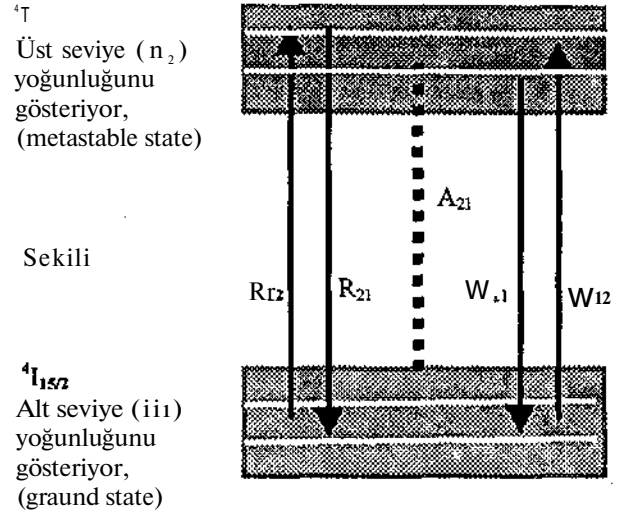
4. ORAN DENKLEMLERİ

EDFA'nın kazanç karakteristiklerinin elde edilmesi, erbiyum atomunun enerji seviyeleri arasındaki geçişleri tanımlayan oran denklemlerinin ve fiberdeki sinyal ve pompalama gücü ile ilgili yayılım denklemlerinin birlikte çözümünü gerektirir. Basitleştirilmiş analitik denklemler ASE ve ESA'yı ihmal ederek elde edilebilse de hassas sonuçlar çoğunlukla bu denklemlerin nümerik çözümlenmesini gerektirir.

Şekil 1, Er³⁺ iyonunun enerji seviye diyagramını ve oran denklemlerini veren popülasyon yoğunluklarına, yani her bir enerji seviyesindeki birim hacim elemanı başına erbiyum iyon sayısını göstermektedir.

Üst seviye (n₂) popülasyonun zamana göre değişimi şöyle ifade edilir.

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



Burada:

$R_{12} > W_{12}$: Pump ve Sinyal absorblama oranı

$R_{21} > W_{21}$: Pump ve Sinyal uyarılmış emisyon (stimulated emission) oranı.

A_{21} : Kendiliğinden emisyon (spontaneous emission) oranı

Alt seviye (n₁) popülasyonunun zamana bağlı değişimleri birbirine eşittir. Ve üst seviye (n₂)

$$\frac{dn_1}{dt} = - \frac{dn_2}{dt} \quad (2)$$

Ve toplam iyonik popülasyon

$$n = n_1 + n_2 \quad (3)$$

şeklinde dir.

Kalıcı halde (steady state)

$$\frac{dn_j}{dt} = \frac{dn_2}{dt} = 0 \quad (4)$$

olmaktadır.

Alt ve üst seviyedeki iyonik popülasyonun toplam iyonik popülasyona oranı ise şöyle gösterilebilir (oran denklemleri)

$$\frac{n_1}{n} = \frac{(R_{21} + W_{21} + A_{21})}{(R_{21} + R_{12} + W_{21} + W_{12} + A_{21})} \quad (5)$$

$$\frac{n_2}{n} = \frac{(R_{12} + W_{12})}{(R_{21} + R_{12} + W_{21} + W_{12} + A_{21})} \quad (6)$$

Yukarıda kullanılan absorblanma ve emisyon oranları pump ve ışık şiddetine (gücüne) bağlı olup, tek modlu Er³⁺ katkılı aktif fiberdeki ışık şiddetinin dağılımı Gausiycn fonksiyonu ile

$$I_{p,s}(r,z) = \frac{P_{p,s}(z) \cdot \exp(-r^2/w_{ps}^2)}{n \cdot W_{ps}^2} \quad (7)$$

olarak verilir.

Burada;

$I_{p,s}(r,z)$ = Pump ve sinyal ışık şiddeti
 $P_{p,s}(z)$ = Pump ve sinyal gücü
 W_{pfs} = Pump ve sinyal için nokta büyüklüğü (Spot-size)
 r,z = Koordinatlar

Yukarıda verilen R, W

Absorblama ve emisyon yayılım oranları, pump ve sinyal güçleri cinsinden ifade edilerek daha anlamlı hale getirilebilir.

$$\text{Pump, } R_j = P_p a^{pj} \psi_p(r) / hv_p ; ij = 1,2... \quad (8)$$

$$\text{Sinyal, } W_s = P_s a^s \psi_s(r) / hv_s ; ij = 1,2... \quad (9)$$

Bu bağıntılardaki değişkenler şöyle açıklanabilir.

$P_{p,s}$: Pump ve sinyal gücü (watt)

O_{12} : Pump ve sinyal dalga boyundaki absorblama ve kesit alanı (m^2)

$hv_{p,s}$: Pump ve sinyal foton enerjisi (joule)

$$\psi_{p,s}(r,\theta) = \frac{\exp(-r^2/w_{p,s}^2)}{T_i \cdot w_{p,s}^2} \quad \begin{array}{l} \text{Pump ve sinyal için} \\ \text{normalize Gausiyen} \\ \text{alan fonksiyonu (l/m}^2\text{)} \end{array}$$

Verilen fiber için pump eşik gücü (quenching, threshold povver)

$$P_{qu} = hv_p n W_p^2 A_{21} / a^s_{12} \quad (10)$$

Sinyal saturasyon gücü :

$$P_{sat} = hv_s n W_s^2 A_{21} / a^s_{21} \quad (11)$$

şeklinde. Tipik olarak P_{qu} için 0,1mW ve P_{sat} 10 mW civarındadır. Yapacağımız analizde bu değerler kullanılmaktadır.

4. YAYILMA (Propagation) DENKLEMLERİ

ASE'yi dikkate almadan elde edilen pump ve sinyal ışık şiddeti için yayılım denklemleri [4]

$$\frac{dI_p}{dz} = [CT^p_{21} n_2 - 0 \cdot 12 n_1] I_p - a I_p(z) \quad (12)$$

ve

$$\frac{dI_s}{dz} = [\sigma^p_{21} n_2 - a^s_{12} n_1] I_s - a I_s(z) \quad (13)$$

şeklinde. Gausiyen Mod dağılımı kullanılarak ve r, S koordinatında integral alınırsa z boyunca pump ve sinyal gücünün değişimini veren yayılım denklemleri;

İleri yönde yayılan pump için ;

$$\frac{dP_p}{dz} = 2 \int_0^a [\sigma^p_{21} n_2 - \sigma^p_{12} n_1] P_p M/p(r) r dr - a P_p \quad (14)$$

İleri yönde yayılan sinyal için;

$$\frac{dP_s}{dz} = 2 \int_0^a [\sigma^s_{21} n_2 - \sigma^s_{12} n_1] P_s v_s(r) r dr - c x_s P_s \quad (15)$$

Burada;

$a \cdot p$ = Pump ve sinyal dalga boyundaki temel fiber kaybı
 $i i^c n_2$ = Denklem 5 ve 6'da tanımlanan oran denklemleri

Verilen non-lineer adi diferansiyel denklemler aşağıda verilen sınır şartlarını kullanacak bir bilgisayar programı yardımıyla nümerik olarak çözülebilir.

Sınır şartları:

$$P_p(z=0) = P_{pump}(W)$$

$$P_s(z=0) = P_m(W)$$

5. NÜMERİK ÇÖZÜMLEME ve SİMÜLASYON

Bu çalışmada verilen non-lineer diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılan trapozidial (yamuk) yöntemi basit olmasına rağmen analitik çözümlere oldukça yakın değerlerde sonuçlar vermektedir.

Hesaplamalarda kullanılan veriler şunlardır :

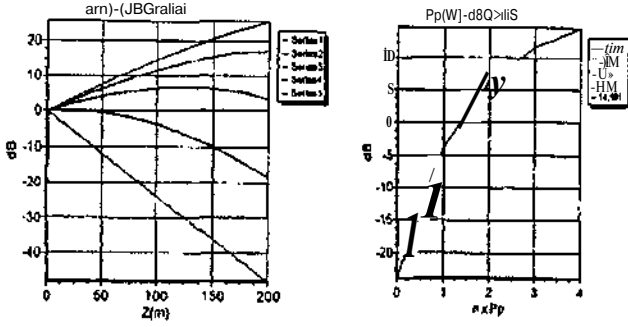
Pompa Dalgaboyu, λ	= 1480 nm
Sinyal Dalgaboyu, λ_s	= 1550 nm
LPO cut-off, λ_c	= 1400 nm
Pump V-Değeri, V_p	= 2,275
Sinyal V-Değeri, V_s	= 2,172
Pompa Absorblama Kesit Alanı, $\langle j_{12}^p \rangle$	= $0,75 \times 10^{-25} m^2$
Kayıp Katsayıları Op ($\sim 0,25$) = a_s ($\sim 0,20$ dB)	= 0
Sinyal Absorblama Kesit Alanı, O_{12}^s	= $2,4 \times 10^{-25} m^2$
Pompa için Uyarılmış Emisyon Kesit Alanı, a_{21}^p	= $0,19 \times 10^{-25} m^2$
Sinyal için Uyarılmış Emisyon Kesit Alanı, O_{21}^s	= $3,8 \times 10^{-25} m^2$
Fluoresan ömrü, T_f	= 9,8 msn

Şekil 2-a ve 2-b, 200m uzunluğundaki Er^{3+} katkılanan bir aktif fiberin ileri yönde pompalanmasıyla elde edilen bu kazanç değişimlerinin uzunluğu (2-a) ve pump giriş gücünün fonksiyonu olarak göstermektedir. Pump ve sinyal güçleri sırasıyla 0,4mw ve 1 μ w olup, fiber öz yarıçapı 2nm'dir. Şekil 3-a ve b'de ise 100m uzunluğundaki Er^{3+} katkılı bir aktif fiberin ileri yönde pompalanmasıyla elde edilen kazanç değişimlerini uzunluğun (3-a) ve pump giriş gücünün fonksiyonu olarak görülmektedir. Pump ve sinyal güçleri sırasıyla 0,6mw ve 1 μ w olup, fiber öz yarıçapı 5 μ m'dir. Grafiklerden anlaşılacağı gibi EDFA kazancı, uygulanan pompalama gücü ile artmakta ve belirli bir z uzaklıkta maksimum değerine ulaşmaktadır.

Örnek 1 :

Veriler :

(Er³⁺) Katkılı Fiber Uzunluğu : 200
 Fiberin Yarıçapı : 7×10^{-6}
 Fiberin Erbium Yoğunluğu : 7.9×10^{23}
 Pump Gücü : 4×10^{-3}
 Sinyal Gücü : 1×10^{-3}

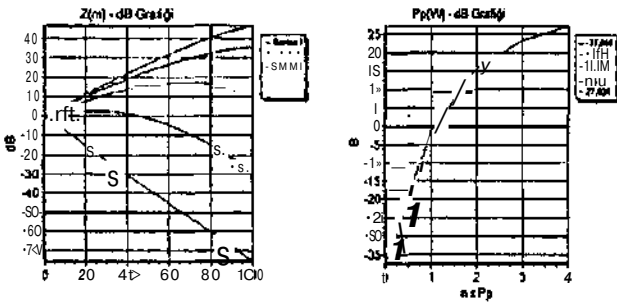


(a) (b)
 Şekil 2 . EDFA kazancının uzunlukla ve pump gücüyle değişimi

Örnek 2:

Veriler :

(Er³⁺) Katkılı Fiber Uzunluğu : 100
 Fiberin Yarıçapı : 5×10^{-6}
 Fiberin Erbium Yoğunluğu : 7.9×10^{23}
 Pump Gücü : 6×10^{-3}
 Sinyal Gücü : 1×10^{-3}



(a) (b)
 Şekil 3-. EDFA kazancının uzunlukla ve pump gücüyle değişimi

Her ne kadariyla pump ve sinyal dalga boyu için temel fiber kaybı sıfır kabul edilmişse de yüksek orandaki Er³⁺ katkılama kaybı uygulanan pump gücünü fiber boyunca önemli ölçüde zayıflatmakta, fiber uzunluğunun ikinci yansında ters birikim için (population inversion) yeterli olmadığından kazanç azalmaktadır. Buna göre verilen pump ve sinyal güçleri ve erbium yoğunluğu için , EDFA kazancının maksimum olduğu bir optimum aktif fiber uzunluğu vardır. Birinci tip fiber için bu değer maksimum uygulanan güç için 200m civarında ve elde edilen kazanç 25 dB civarındadır. İkinci tip fiber ISC benzer kazancı yaklaşık 50m uzunlukta vermektedir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada istenen kazanç karakteristiğine sahip bir erbium katkılı fiber optik müfrit/ikdö (EDFA) tasarımında kullanılabilecek bir 11100 ve programı.

EDFA'yı karaklırcız eden oran ve yayılım denklemlerini kullanarak gerçekleştirilmiştir.

Yazılan program başlangıç değerine ve Er³⁺ katkılı fiber parametrelerine bağlı olarak sinyal gücünün ve kazancın fiber boyunca ve pump gücüyle nasıl değiştiğini grafiksel olarak vermektedir. Ayrıca EDFA boyunca kazancın değişimini kullanarak maksimum kazanç için optimum fiber uzunluğu bulunabilmektedir.

9. KAYNAKÇA

- [1] CC. Kocsler, E. Şnitzer, "Amplification in a fiber laser" Applied Optics, Vol.3.No-10, page 1182-86, Ekim 1994
- [2] S.B. Poole, et.al. " Fabrication and characterication of low-loss optical fibers containing rare-earth ions", IEEE J.of Lightwvave Tech. Letters, LT-4, No:7, page 870-76, Temmuz 1986
- [3] Rj. Mears.et.al. "Low noise erbium doped fiber amplifier operating at 1,54/jm " Electronics letters, Vol.23, pp-1026-27, 1987
- [4] Emmanuel Desurvire, "Erbium-Doped Fiber Amplifiers Principles and Applications", J. Wiley-Interscience Publication, New York 1994
- [5] M. Nakazava, et.al., "Efficient Er³⁺ doped optical fiber amplifier pumped by a 1,48 mm InGalAr laser diode" Applied physics letters, Vol.24, No-4, pp-295-97, 1989
- [6] A.Altuncu , et.al. , "40 Gbit /sa errorfree tranmission över a 68 km distributed erbium doped fiber amplifier", Electronics letters, Vol.32, No.3, pp-233-34, 1996
- [7] P.Urguhart & T.J. Whitley, "Long Span Fiber Amplifiers", Applied Optics, V.29, No.24, pp-3503-3509, 1988
- [8] A.A.M.Saleh, et.al., "Modeling of Gain in Erbium-doped fiber amplifiers", IEEE Photonics Technology letters, Vol.2, No. 10, October 1990