

Yb³⁺ (İterbiyum) ile Hassaslaştırılmış Er³⁺ (Erbiyum)-Katkılı Fiber Kuvvetlendiricilerin Sıcaklık Bağımlı Modellenmesi

Cüneyt Berkdemir, Sedat Özsoy

Erciyes Üniversitesi

Fen-Edebiyat Fakültesi

Fizik Bölümü

38039 Kayseri

berkdemir@erciyes.edu.tr, ozsoys@erciyes.edu.tr

Özet: Farklı sıcaklık bölgelerinde çalışan erbiyum-iterbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici (EYKFK) 'ler için erbiyum ve iterbiyum iyonlarının enerji seviyeleri üzerine sıcaklığın etkisinin incelendiği bu çalışmada, sıcaklık faktörünün EYKFK'lerin performansını nasıl etkilediği teorik olarak modellenmiştir. Her iki elemente ait enerji seviyelerindeki sayıca doluluklar için, ışın içine sıcaklık faktörünü de ekleyerek "oran denklemleri" yeniden kurulup erbiyum ve iterbiyum konsantrasyonunun, fiber uzunluğunun ve düzgün dağılımlı yayılım profiline sahip pompa güçlerinin fonksiyonu olarak kazanç bağıntısı elde edilmiştir. Modelden yararlanılarak, 800-1100 nm dalgaboyu aralığında pompalanabilen EYKFK'lerin 0-50 °C sıcaklık bölgesindeki kazanç performansları değerlendirilmiştir.

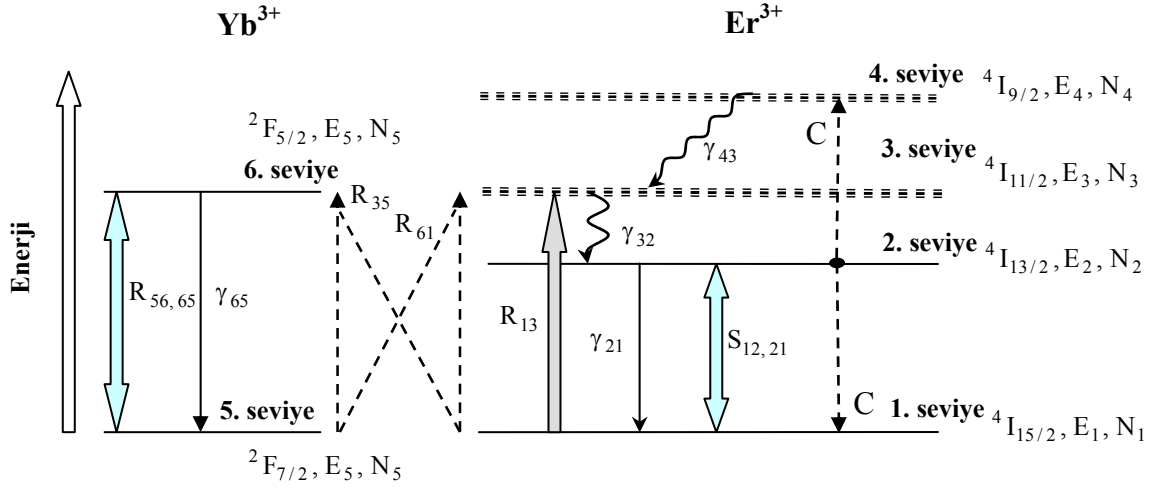
1. Giriş

İterbiyum ile hassaslaştırılmış Erbiyum-katkılı silisyumlu veya fosfatlı fiber kuvvetlendiriciler 35 yılı aşındır incelenmektedir. Bu elementlerle katılanmış fiber kuvvetlendiriciler yaklaşık 1550 nm dalgaboyunda çalışan optik haberleşme sistemleri için son derece etkin araçlardır [1]. Er/Yb-katkılı fiber kuvvetlendiriciler (EYKFK) ile ilgili yapılan deneysel çalışmalara ek olarak, pek çok teorik çalışma grubu kılavuzlanmış-dalgalı kuvvetlendiricilerin modellenmesi ile ilgilenmektedir. Bu gruplar, pompa dalgaboyunun ve yüksek yoğunluklar (sayıca erbiyum yoğunluğu $N_{Er} \sim 7 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ ve sayıca iterbiyum yoğunluğu $N_{Yb} \sim 1-3 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$) için fiber uzunluğunun fonksiyonu olarak kazanç hesabını yapmışlardır. Ayrıca, oran denklemlerini analitik olarak çözmüşler ve optik güçlerin yayılım bağıntıları içerisinde bu çözümleri kullanmışlardır [2]-[3]. Başka bir çalışma grubu, erbiyum ve iterbiyum konsantrasyonunun, fiber uzunluğunun ve düzgün dağılımlı yayılım profiline sahip pompa güçlerinin fonksiyonu olarak kazanç hesabını vermişlerdir [4]. Ancak tüm bu çalışmalarda, farklı sıcaklık bölgelerinde çalışan EYKFK'ler için erbiyum ve iterbiyum iyonlarının enerji seviyeleri üzerine sıcaklığın etkisinin ne olacağı tartışılmamıştır.

Bu çalışmada, yukarıda ifade edilen eksiklik üzerinde durulacak ve sıcaklık faktörünün EYKFK'lerin performansını nasıl etkilediği teorik olarak incelenmiştir. Her iki elemente ait enerji seviyelerindeki sayıca doluluklar için, ışın içine sıcaklık faktörünü de ekleyerek "oran denklemleri" yeniden kurulup kazanç bağıntısı elde edilmiştir. Bu amaçla, özellikle, 800-1100 nm dalgaboyu bölgesinde pompalanabilen EYKFK'lerin 0-50 °C sıcaklık bölgesindeki kazanç performansları nümerik olarak hesaplanmıştır.

2. Teorik Model

Yb³⁺ ile hassaslaştırılmış Er³⁺-katkılı fiber kuvvetlendiricilerde, Yb³⁺ iyonları tarafından pompa gücünün büyük bir kısmının soğurulduğu ve birbirine çok yakın Yb³⁺ - Er³⁺ iyonları arasındaki karşılıklı korelasyonun enerji aktarımından sorumlu olduğu çok iyi bilinmektedir. Yb³⁺'ün hassaslaştırıcı olarak katılanması daha yüksek konsantrasyonlarda Er³⁺ katkılanmayı sağlar ve böylece belirli bir pompa seviyesi için daha yüksek kazanç değerleri elde edilir. Böylesi yüksek kazanç değerlerinin farklı sıcaklık bölgelerinde çalışan EYKFK'lerde ne ölçüde değişeceği oran denklemlerinin çözümüne bağlıdır. Modelde dikkate alınan temel oran denklemlerinin hesabı, çok seviyeli Lazer sistemlerinin enerji seviyeleri arasındaki geçişlerde karşılaşılan duruma benzer olarak yapılacaktır. Şekil 1'de gösterildiği gibi, Erbiyum iyonları için $^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ uyarılmış durum bozunumunun çok kısa bir zaman aralığında meydana geldiğini düşüneceğiz, yani $\tau_{43} \cong 0$. Buna ek olarak, $^4I_{13/2}$ yarı-kararlı seviyeden hem $^4I_{15/2}$ taban duruma hem de $^4I_{9/2}$ uyarılmış duruma geçişler sırasında "ters dönüşüm" mekanizmasına üçüncü dereceden bir bağımlılık olduğu varsayımı kullanılacaktır.



Şekil 1. Yb³⁺ - Er³⁺ sistemleri için enerji seviye geçişleri

Bu kısa açıklamaları dikkate alarak, Er³⁺ için N₁, N₂, N₃, ve Yb³⁺ için N₅ ve N₆ doluluklarına karşılık gelen oran denklemleri;

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{N_3}{\tau_{32}} - \frac{N_2}{\tau_{21}} - S_{12}N_2 + S_{21}N_1 - 2CN_2^3 \quad (1)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = -\frac{N_3}{\tau_{32}} + R_{13}N_1 - R_{35}N_3N_5 - R_{61}N_1N_6 + CN_2^3 \quad (2)$$

$$\frac{dN_6}{dt} = -\frac{N_6}{\tau_{65}} + R_{56}N_5 - R_{65}N_6 + R_{35}N_3N_5 - R_{61}N_1N_6 \quad (3)$$

olarak yazılabilir. Burada, S_{12,21}, 1. ve 2. seviyeler arasındaki, sırasıyla, zorlamalı soğurum ve yayınım hızlarını; R₁₃ ve R_{56,65}, sırasıyla, Er³⁺ için pompa soğurum ve Yb³⁺ için pompa soğurum ve yayınım hızlarını; γ_{ij}’ler uyarılmış seviyeden ilgili seviyeye ışımalı ve ışımasız geçiş olasılıklarını (γ_{ij}’lerin tersi yaşam süresi olarak bilinir); R_{61,35}, Yb-sisteminden Er-sistemine enerji aktarımından sorumlu korelasyon katsayısını ve son olarak C “ters dönüşüm” katsayısını temsil etmektedir. Yukarıdaki denklemlerde dN_i/dt = 0 (i = 1, 2, 3) kararlı durum şartını dikkate almamız gerekir. Bu durumda, Denklem (1)’deki, N₃/τ₃₂ yerine Denklem (2)’deki karşılığı yazılır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa, Er³⁺ için ikinci seviyedeki N₂ doluluğunun (C = 0 kabulü ile);

$$N_2 = N_{Er} \left(1 + \frac{\beta R_{13} + (\beta + \eta) S_{12} + \beta R_{61} N_6 + 1/\tau_{21}}{R_{13} + S_{12} + R_{61} N_6} \right)^{-1} \quad (4)$$

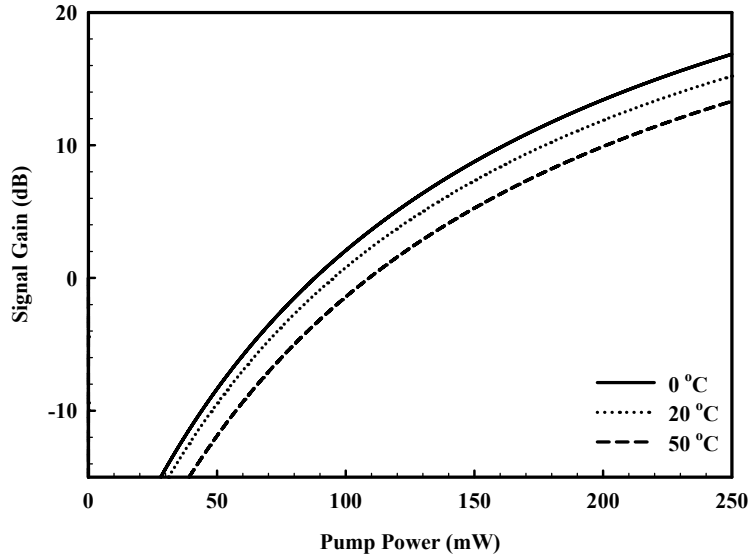
olduğu görülür. Benzer işlemlerle Yb³⁺ için altıncı seviyedeki N₆ doluluğunun (Erbiyum sisteminden İterbiyum sistemine enerjinin geri aktarımı durumunu ihmal ederek, R₃₅ = 0) hesabı da yapılabilir. Ayrıca, Erbiyum iyonunun iç elektrik alanından kaynaklanan Stark etkisi nedeni ile ikinci ve üçüncü seviyeler arasında N₃ = βN₂ bağıntısının geçerli olduğu kabul edilmiştir.

3. Nümerik Hesaplamalar ve Modelin Geçerliliği

Modele göre 0-50 °C aralığında sıcaklık faktörünün hesabı, Stark yarılmalı alt katmanların her birindeki doluluğu belirleyen “Boltzmann Dağılım Yasası” yardımı ile yapılmıştır. Modelin sıcaklığa bağımlılığını daha iyi görebilmek için İterbiyum-Erbiyumlu sistemin “**kazanç**” bağıntısının çıkartılması gerekmektedir. Bunun için yapılan inceleme, belirli bir fiber kuvvetlendirici uzunluğunda kazanç ve pompa gücü arasındaki ilişkinin, yani $G(\lambda_s) = \exp(\sigma_{12}(\eta N_2 - N_1)\Gamma_s \cdot L)$ ifadesinin hesaplanmasıdır:

$$\eta N_2 - N_1 = \frac{\tau_{21} \eta \left(\frac{\sigma_{13} \Gamma_p P_p}{h \nu_p A_p} + R_{61} N_6 \right) - 1}{(1 + \beta) \tau_{21} \frac{\sigma_{13} \Gamma_p P_p}{h \nu_p A_p} + (1 + \beta + \eta) \tau_{21} \frac{\sigma_{12} \Gamma_s P_s}{h \nu_s A_s} + (1 + \beta) \tau_{21} R_{61} N_6 + 1} \times N_{Er} \quad (5)$$

burada σ_{12} ve σ_{21} , sırasıyla, sinyal gücü için zorlamalı soğurum ve yayılım tesir kesitleri; σ_{13} , pompa gücü için zorlamalı soğurum tesir kesitleri; Γ_p ve Γ_s , pompa ve sinyal güçlerinin girişim faktörleri ve A_p ile A_s , etkin öz alanlardır. Denklem (5)'de yer alan η parametresi σ_{21}/σ_{12} olarak tanımlandı ve McCumber teorisinden yararlanılarak 0; 20 ve 50 °C sıcaklıklarında, sırasıyla, 1,401; 1,384 ve 1,334 olarak ve Boltzmann dağılımından yararlanılarak sıcaklık faktörü β , sırasıyla, 0,354; 0,380 ve 0,441 olarak hesaplandı. 10 mW'ın üzerindeki pompalama durumlarında N_6 doluluğunun limit değerinin $N_6 \cong 0,046 \times N_{Yb}$ olduğu dikkate alınmıştır. Şekil 2'de, 1 μ W'lık sinyal gücü için kazanç-pompa gücü ilişkisi verilmiştir. Nümerik hesaplamalarda kullanılan parametreler ve onların değerleri, ağırlıkça %1.65 Er₂O₃ ve %22 Yb₂O₃ bulunduran fosfat fibere aittir [5].



Şekil 2. Pompalama gücüne karşılık sinyal kazancının, 8 cm'lik fiber kuvvetlendirici için grafiği ($P_s = 1 \mu$ W).

4. Sonuçlar

EYKFK'ler için kazanç bağıntısının incelendiği bu çalışmada, sıcaklık faktörünün EYKFK'lerin performansını nasıl etkilediği teorik olarak modellendi. Her iki elemente ait enerji seviyelerindeki sayıca doluluklar için, ışın içine sıcaklık faktörünü de ekleyerek "oran denklemleri" yeniden kurulup erbiyum-iterbiyum kuvvetlendiriciler için kazanç bağıntısı elde edildi. Modelden yararlanılarak, 1530 nm sinyal dalga boyunda sinyal gücünün yayılımına ve 974 nm pompa dalgaboyunda pompa gücünün yayılımına izin veren EYKFK'lerin 0-50 °C sıcaklık değerlerindeki kazanç performansları nümerik olarak hesaplandı. Sonuç olarak, yapılan modellemede, sıcaklığın artması ile kuvvetlendiricinin kazanç performansının düştüğü ve sıcaklığın performansı belirleyen etkin bir parametre olduğu görülmüştür. Sonuçlar, literatürde yer alan deneysel çalışmalar ile uyumludur.

Kaynaklar

- [1]. Valley G. C., "Modeling Cladding-Pumped Er/Yb Fiber Amplifiers," Optical Fiber Techn, 7, s.21-44, 2001.
- [2]. Achtenhage M., *et al.*, "Gain and Noise in Ytterbium-Sensitized Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Measurement and Simulations," J. of Lightwave Techn. 19(10), s. 1521-1526, 2001.
- [3]. Hu Y., Jiang S., *et al.*, "Performance of High-Concentration Er³⁺/Yb³⁺-Codoped Phosphate Fiber amplifiers," IEEE Photon. Techn. Lett., 13(7), s.657-659, 2001.
- [4]. Xia G., Duan J., Zhao S., Dong S., "Light propagation in the multi-mode double-clad erbium:ytterbium co-doped fiber: theory and experiment," Optics and Laser Techn., 36, s.273-277, 2004.
- [5]. Shoostari A., Touam T., Najafi S. I., Naeini-S S., Hatami-H. H., "Yb³⁺ sensitized Er³⁺-doped waveguide amplifiers: a theoretical approach," Optical and Quantum Electronics, 30, s.249-264, 1998.