

Yeşil Lazer Uygulaması İçin Gadolinyum Borogermanat Camlarındaki Tb³⁺ İyonlarının Lüminesans Özelliklerinin İncelenmesi*

Melis GÖKÇE¹

ÖZET: 30B₂O₃-40GeO₂-(30-x)Gd₂O₃-xTb₂O₃ (x=1,2,3,5 ve 7 % mol) kompozisyonuna sahip cam sistemleri eritme tavlama yöntemi ile sentezlenmiştir. Hazırlanan camların optik ve lüminesans özellikleri soğurma, fotolüminesans ve bozunma zamanı ölçümleri ile incelenmiştir. Tb³⁺ katkılı borogermanat camlarının 378 nm uyarma altında elde edilen fotolüminesans spektrumları yeşil bölgede şiddetli yayınlanma (⁵D₄→⁷F_J, J = 3,4,5 ve 6) ve mavi bölgede zayıf yayınlanma (⁵D₃→⁷F_J, J = 3,4 ve 5) piklerinden oluşmaktadır. Bunların arasında en şiddetli ⁵D₄→⁷F₅ (541 nm) geçişi yeşil yayınlanma göstermektedir. x=5 katkı miktarından sonra konsantrasyon baskılanması gözlenmiştir. ⁵D₄→⁷F₅ ve ⁵D₃→⁷F₄ yayınlanma piklerinin alanlarının oranı olan yeşil-mavi değerleri (G/B) Tb³⁺ iyon konsantrasyonunun fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Tb³⁺ iyonunun ⁵D₄→⁷F₅ geçişinin bozunma zamanı 1.801 ms olarak bulunmuştur. Hazırlanan camların elde edilen renk koordinatları CIE diyagramının yeşil bölgesinde yer almaktadır.

Anahtar Kelimeler: Borogermanat, cam, lüminesans, terbiyum



Investigation of Luminescence Properties of Tb³⁺ Ions In Gadolinium Borogermanate Glasses For Green Laser Application

ABSTRACT: Tb³⁺ doped borogermanate glasses with 30B₂O₃-40GeO₂-(30-x)Gd₂O₃-xTb₂O₃ (x=1,2,3,5 and 7 mol%) composition have been prepared by conventional melt quenching technique. The optical and luminescence properties of prepared glasses were characterized by absorption, photoluminescence and decay time measurements. The photoluminescence spectra of Tb³⁺ doped borogermanate glasses exhibit intense emission in green region (⁵D₄→⁷F_J, J = 3,4,5 and 6) and weak emission in blue region (⁵D₃→⁷F_J, J = 3,4 and 5) under 378 nm excitation. Among them ⁵D₄→⁷F₅ transition (541 nm) gives the most intense green emission. Concentration quenching is observed beyond the doping level of x=5. The ratios of integrated emission intensities of ⁵D₄→⁷F₅ to ⁴D₃→⁷F₄ transitions called as green to blue ratio (G/B) have been evaluated as a function of Tb³⁺ ion concentration. Decay time of ⁵D₄→⁷F₅ transition of Tb³⁺ ions was found to be 1.801 ms. The color coordinates of the prepared glasses are located at the green region of the CIE diagram.

Keywords: Borogermanate, glass, luminescence, terbium

¹ Melis GÖKÇE (0000-0001-7741-7961), Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Aydın, Türkiye
Sorumlu yazar/Corresponding Author: Melis GÖKÇE, mgokce@adu.edu.tr

* Bu çalışma 06-09 Eylül 2016 tarihinde Muğla-Türkiye’de düzenlenen 32. Uluslararası Fizik Kongresi’nde sunulmuş ve kongre özet kitabında yayınlanmıştır.

GİRİŞ

Lüminesans malzemeler katıhal aydınlatma ve ekran teknolojilerinde önemli bir rol oynamaktadır. Diğer malzemelere kıyasla camlar, maliyetlerinin düşük olması, kolay şekillendirilebilmeleri, yüksek konsantrasyonlarda nadir toprak (NT) iyonu katkısının yapılabilmesi, yüksek geçirgenliğe ve daha homojen lüminesansa sahip olmaları gibi çeşitli avantajlara sahiptir. NT iyonları içinde, Tb^{+3} , ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$ geçişinden kaynaklanan yeşil yayınlanması (yaklaşık 540 nm) nedeni ile ilgi çekmektedir. Tb^{+3} iyonunun optik ve lüminesans özellikleri silikat (Sun et al., 2010; Zu et al., 2011), borat (Loos et al., 2017), bizmutborat (Chen et al., 2017), silikoborat (Kesavulu et al., 2017) ve borogermanat (Sun et al., 2013a; Sun et al., 2015a; Sun et al., 2015b; Struebing et al., 2016) gibi cam sistemlerinde çalışılmıştır. Bununla birlikte Gd^{+3} iyonunun yapıya katılması i) Gd^{+3} iyonundan aktivatör iyonuna enerji transferinin gerçekleşmesi, ii) yayınlanma ışık veriminin artması, iii) cam yoğunluğunun artması gibi dikkate değer yararlar sağlamaktadır (Tang et al., 2015; Onderisinova et al., 2015; Gökçe et al., 2017). NT iyonu katkılı malzemelerin lüminesans özelliklerinin hem ana malzemeye hem de aktivatör konsantrasyonuna bağlı olması nedeni ile (Jamalaiah et al., 2009) optik cihaz performansının artırılmasında kompozisyonun optimizasyonu kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmada, farklı konsantrasyonlarda Tb^{+3} iyonu katkılanmış borogermanat cam sistemleri sentezlenmiş ve bu camlar soğurma, fotolüminesans (PL), lüminesans bozunma zamanı ve kromatiklik ölçümleri yardımıyla incelenmiştir. Yeşil lazer uygulaması açısından B_2O_3 - GeO_2 - Gd_2O_3 cam sisteminde Tb^{+3} iyonu için yeşil-mavi (G/B) oranları, dallanma oranları ve 5D_4 seviyesinin deneysel lüminesans bozunma zamanı araştırılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

$30B_2O_3$ - $40GeO_2$ -($30-x$) Gd_2O_3 - xTb_4O_7 (% mol, $x=1, 2, 3, 5, 7$; BGG-xTb olarak adlandırılmıştır) kompozisyonuna sahip cam örnekleri eritme tavlama yöntemi ile sentezlenmiştir. H_3BO_3 (99.99%, Alfa Aesar), GeO_2 (>99.99%, Aldrich), Gd_2O_3 (99.9%, Aldrich) ve Tb_4O_7 (99.99%, Aldrich) oksit

tozlarının toplamı 10 g olacak şekilde tartıldıktan sonra homojen bir karışım elde etmek amacıyla agat havanda öğütülmüştür. Alümina krozeeye alınan karışım $1350^\circ C$ de 2-3 saat eritilerek önceden ısıtılmış paslanmaz çelik kalıba dökülmüştür. Malzemede oluşabilecek iç stresin azaltılması ve malzemenin kırılmasını önlemek için $550^\circ C$ de 4-6 saat tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Sentezlenen camlar optik ölçümler için yaklaşık 2.5 mm kalınlıkta olacak şekilde parlatılmıştır.

Camların yoğunlukları Archimedes prensibine göre ölçülmüştür. Bu ölçümde, örneklerin içine daldırıldığı sıvı olarak saf su kullanılmıştır. X-ışını toz kırınımı (XRD) ölçümleri Rigaku-Rint 2200/PC (Ultima 3) difraktometresi ile 10 - 90° aralığında alınmıştır. Fourier dönüşümlü kızıl ötesi (FT-IR) analizleri Perkin-Elmer Spectrum BX-II FT-IR spektrometresi (400 - 4000 cm^{-1}), soğurma ve geçirgenlik spektrumları Perkin-Elmer Lambda 25 UV-Vis spektrometresi (300 - 700 nm) ve fotolüminesans uyarma ve yayınlanma spektrumları ise FluoroMax-4 (Horiba Jobin Yvon) spektrofotometresi kullanılarak elde edilmiştir. Bozunma zamanı ölçümleri Zaman Korelasyonlu Tek Foton Sayımı (TCSPC) sistemi (Edinburgh Instruments) ile uyarma kaynağı olarak mikro saniye flaş lamba kullanılarak yapılmıştır. Tüm ölçümler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapısal Analiz

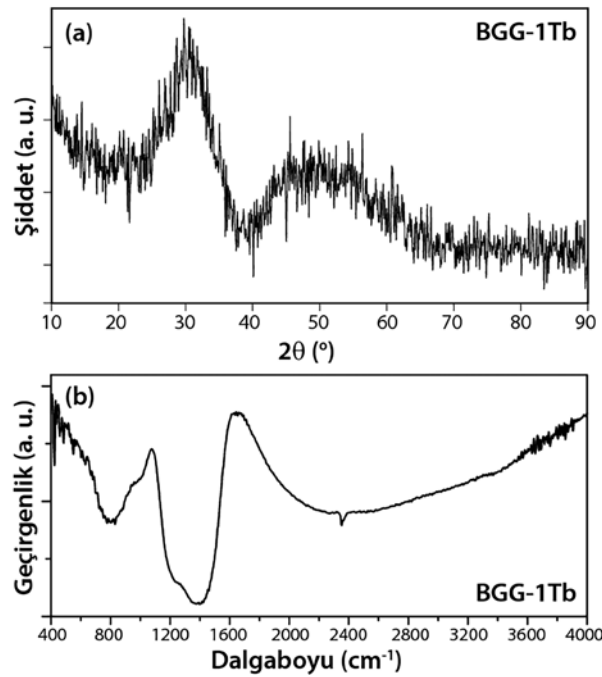
Sentezlenen BGG-xTb camlarının molekül ağırlığı (M), kalınlık (t), yoğunluk (ρ), kırılma indisi (n), molar hacim (V_M), paketleme yoğunluğu (PD) ve NT iyon konsantrasyonu (N) gibi çeşitli fiziksel özellikleri hesaplanmış (Hoaksey et al., 1978; Bhatia et al., 2015) ve Çizelge 1'de listelenmiştir. Ayrıca, camların kırılma indisleri Gladstone-Dale ilişkisi (McCloy, 2011) kullanılarak belirlenmiştir. BGG-xTb camlarının yoğunluk ve molar hacim değerleri Tb^{+3} iyonu konsantrasyonu ile birlikte artış göstermiştir. Tb^{+3} ve Gd^{+3} gibi ağır elementlerin yapıda mevcut olması yoğunluğun 5 g/cm^3 değerinin üzerine çıkmasına yol açmıştır. Tb^{+3} iyon konsantrasyonunun artması ile yapının kompaktlığının arttığı söylenebilir (Kesavulu et al., 2017).

Çizelge 1. Tb⁺³ katkılı borogermanat camlarının hesaplanan fiziksel nicelikleri

	BGG-1Tb	BGG-2Tb	BGG-3Tb	BGG-5Tb	BGG-7Tb
M (g mol⁻¹)	175.343	179.195	183.047	190.751	198.455
t (mm)	2.355	2.547	2.289	2.433	2.277
ρ (g cm⁻³)	4.925	4.858	4.915	4.946	5.032
n	1.713	1.700	1.705	1.704	1.711
V_M (cm³ mol⁻¹)	35.602	36.886	37.242	38.566	39.438
PD (x10²² iyon cm⁻³)	1.691	1.632	1.617	1.561	1.526
N (x10²⁰ iyon cm⁻³)	1.691	3.265	4.850	7.807	10.688

Şekil 1(a)'da BGG-1Tb camının x-ışını kırınım deseni gösterilmektedir. Kırınım deseninde kristal fazı gösteren herhangi bir pik bulunmamakta ve düşük

açılarda geniş yayılmış saçılmalar görülmektedir. Bu sonuçlar uzun menzilli düzensiz yapıların karakteristiği olup elde edilen camın amorf yapısını doğrulamaktadır.



Şekil 1. BGG-1Tb camının (a) XRD deseni ve (b) IR spektrumu

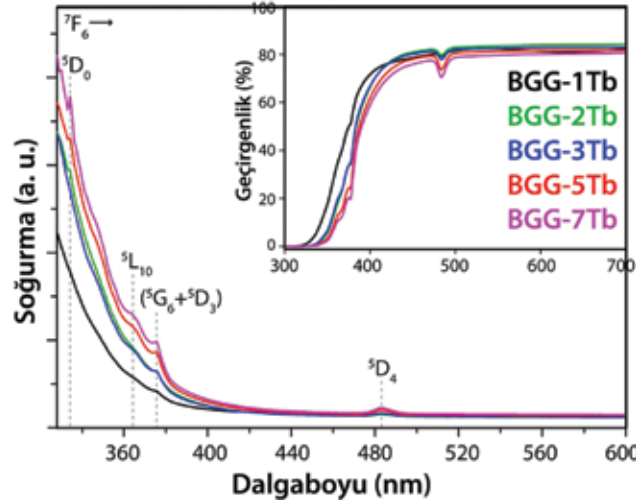
BGG-1Tb camının 400-4000 cm⁻¹ bölgesinde alınan FT-IR geçirgenlik spektrumu Şekil 1(b)'de verilmiştir. Borogermanat tabanlı camların FT-IR spektrumları incelendiğinde üç ana bölgede titreşim meydana getirdikleri görülmektedir. İlk bölge 400-800 cm⁻¹ arasında olan bölgedir ve bu bölgede B-O-B ve Ge-O-Ge bağlarının eğilme ve gerilme titreşimleri bulunmaktadır (Sundari et al., 2010; Zhang et al., 2012a). 800-1200 cm⁻¹ arasında yer alan ikinci

bölgede yaklaşık olarak 1010 cm⁻¹ deki titreşimler BO₄ biriminin B-O bağ gerilmesinden kaynaklanmaktadır (Sigaev et al., 2010). Son olarak üçüncü bölge 1200-1600 cm⁻¹ merkezlenmiştir ve burada bulunan yaklaşık olarak 1384 cm⁻¹ titreşimleri BO₃ üçlü biriminin B-O bağ gerilmesinin asimetrik gerilme rahatlamasından kaynaklanmaktadır (Sundari et al., 2010). Ayrıca 2350 cm⁻¹ deki titreşimler ise hidrojen bağlanmalarından meydana gelmektedir (Singh et al., 2012).

Soğurma ve Geçirgenlik Ölçümleri

Şekil 2’de Tb³⁺ katkı borogermanat camlarının soğurma ve geçirgenlik spektrumları verilmiştir. BGG-xTb camlarının soğurma spektrumunda yaklaşık olarak 338, 368, 378 ve 484 nm’de yer alan soğurma bandları Tb³⁺ iyonlarının 4f-4f geçişleriyle ilişkilidir. Bu bandlar sırasıyla ⁷F₆ seviyesinden ⁵D₀, ⁵L₁₀, ⁵G₆+⁵D₃ ve ⁵D₄

seviyelerine olan optik geçişlere karşılık gelmektedir (Chen et al., 2005; Sun et al., 2013a). Şekil 2’nin içerisinde ayrıca gösterilen geçirgenlik spektrumunda BGG-xTb camlarının geçirgenlik değerlerinin 410-700 nm aralığında %82’ye kadar çıktığı görülmektedir. Spektrumdaki soğurma pikleri Tb³⁺ konsantrasyonunun artmasıyla daha belirgin hale gelmiştir (Ding et al., 2001).

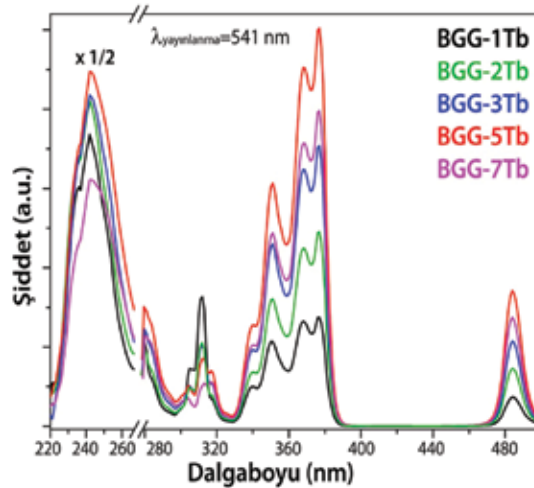


Şekil 2. BGG-xTb camlarının soğurma ve geçirgenlik spektrumları

Uyarma ve Yayınlanma Ölçümleri

BGG-xTb camlarının uyarma spektrumundan (Şekil 3) görüldüğü üzere 220-300 nm aralığında geniş bir band ve 300-500 nm aralığında Tb³⁺ iyonlarının 4f⁸-4f⁸ geçişlerini içeren pikler yer almaktadır. 220-300 nm’deki geniş band Tb³⁺ iyonlarının 4f⁸-4f⁷5d izinli geçişleri olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte Gd³⁺ iyonunun 278 nm uyarma piki Tb³⁺’ün 4f⁸-4f⁷5d geniş bandının üzerinde yer almakta olup bu durum Gd³⁺’ten

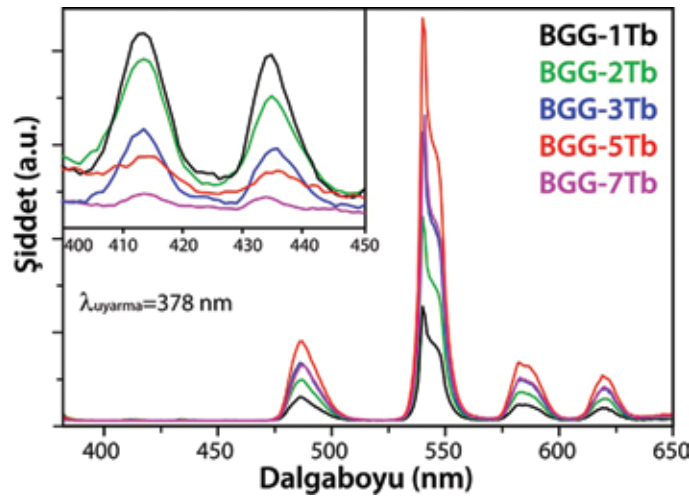
Tb³⁺’e enerji transferinin varlığını işaret etmektedir (Chen et al., 2005; Sun et al., 2013a). Spektrumda 243 (⁸S_{7/2}→⁶D_{7/2}), 278 (⁸S_{7/2}→⁶I_{7/2}), 305 (⁸S_{7/2}→⁶P_{5/2}) ve 311 (⁸S_{7/2}→⁶P_{7/2}) nm dalgaboylarında meydana gelen pikler Gd³⁺’ün uyarma pikleridir. Spektrumda 317, 339, 350, 368, 378 ve 484 nm’de gözlenen diğer bandlar ise sırasıyla Tb³⁺’ün ⁷F₆ seviyesinden ⁵H₇, ⁵L₇, ⁵L₉, ⁵L₁₀, ⁵G₆+⁵D₃ ve ⁵D₄ seviyelerine olan optik geçişler sonucu meydana gelmektedirler (Pisarski et al., 2014).



Şekil 3. BGG-xTb camlarının uyarma spektrumları (220-270 nm aralığındaki kısmın şiddeti yarı olacak şekilde çizilmiştir)

Tb⁺³ katkı borogermanat camlarının 378 nm uyarma altındaki yayınlanma spektrumu Şekil 4'te verilmiştir. Elde edilen yayınlanma spektrumları iki grup optik geçiş içerir. İlk grup 414, 436, 456 nm de yer alan mavi yayınlanma pikleridir ve sırasıyla ⁵D₃→⁷F₅, ⁷F₄, ⁷F₃ optik geçişleriyle ilişkilidir. İkinci grup 486, 541, 584 ve 620 nm deki yeşil yayınlanma pikleridir ve sırasıyla ⁵D₄→⁷F₆, ⁷F₅, ⁷F₄ ve ⁷F₃ optik geçişlerinden kaynaklanır (Sun et al., 2013b). Mavi yayınlanma bölgesi pik şiddetlerinin yeşil yayınlanma bölgesindekilerden daha düşük olması nedeni ile piklerin daha iyi görünmesi için 400-450 nm aralığı Şekil 4'te ayrıca verilmiştir.

Yayınlanma spektrumunda piklerin şiddetleri Tb⁺³ iyon konsantrasyonunun artması ile birlikte x=5 katkı miktarına kadar artmış bu değerden sonra şiddetin azalmasına neden olan konsantrasyon baskılanması gözlenmiştir. G/B değerleri optikçe aktif iyonun yerel çevresinin simetrisi hakkında bilgi vermektedir. Tb⁺³ için ⁵D₄→⁷F₅ geçişinin altta kalan alanının, ⁵D₃→⁷F₄ geçişinin altta kalan alanına oranından hesaplanan G/B değerleri x=1, 2, 3, 5 ve 7 katkı oranları için Çizelge 2'de listelenmiştir. Artan katkı miktarı ile G/B değerlerinin artması Tb⁺³ iyonlarının çevresinin daha asimetric hale geldiğini göstermektedir.



Şekil 4. BGG-xTb camlarının yayınlanma spektrumları

Yayınlanma geçişlerinin görelî alanlarından bulunan dallanma oranları (β) belirli bir geçişten uyarılmış yayınlanma elde edebilme olasılığını belirttiği için lazer malzeme yapımında büyük öneme sahiptir (Kesavulu et al., 2017). BGG-xTb camlarının yayınlanma spektrumundan ⁵D₄→⁷F_{6,5,4,3} seviyeleri için deneysel β değerleri bulunmuş ve Çizelge 2'de

gösterilmiştir. BGG-xTb camlarının ⁵D₄→⁷F₅ (543 nm) lazer geçişi için β değeri diğer geçişlerin değerlerinden büyüktür ve artan Tb⁺³ katkı miktarı ile arttığı bulunmuştur. Bununla birlikte β değerinin %50'den büyük olması BGG-xTb camlarının katıhal lazer uygulamaları için elverişli olduğunu belirtmektedir (Kesavulu et al., 2017).

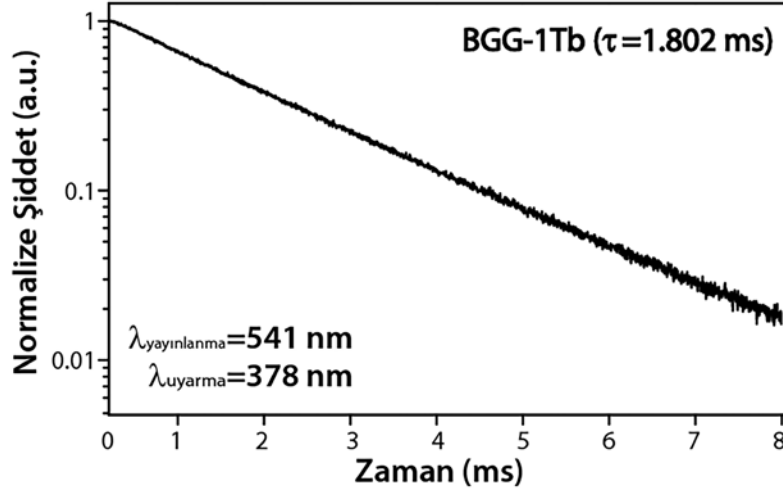
Çizelge 2. BGG-xTb camları için G/B değerleri ve ⁵D₄→⁷F_{6,5,4,3} yayınlanmalarının deneysel dallanma oranları (β , %)

Cam	G/B	β (⁷ F ₆)	β (⁷ F ₅)	β (⁷ F ₄)	β (⁷ F ₃)
BGG-1Tb	115	18.54	59.30	13.59	8.57
BGG-2Tb	255	18.60	59.39	13.51	8.50
BGG-3Tb	682	18.38	59.69	13.45	8.48
BGG-5Tb	1162	18.34	59.71	13.49	8.47
BGG-7Tb	233	17.58	60.15	13.64	8.63

Lüminesans Bozunma Zamanı Analizi

Tb³⁺ iyonlarının 541 nm (⁵D₄→⁷F₅) yayınlanmasının 378 nm uyarma dalgaboyu altında elde edilen lüminesans bozunma eğrisi Şekil 5'te verilmiştir. BGG-1Tb camının bozunma eğrisinin tek bileşenli üstel

fonksiyona fit edilmesi sonucunda lüminesans bozunma zamanı $\tau=1.802$ ms olarak bulunmuştur. Literatürde daha önce sentezlenen borogermanat camları için bozunma zamanları 1.78 (Sun et al., 2013a) ve 1.88 ms (Struebing et al., 2016) olarak verilmiştir.

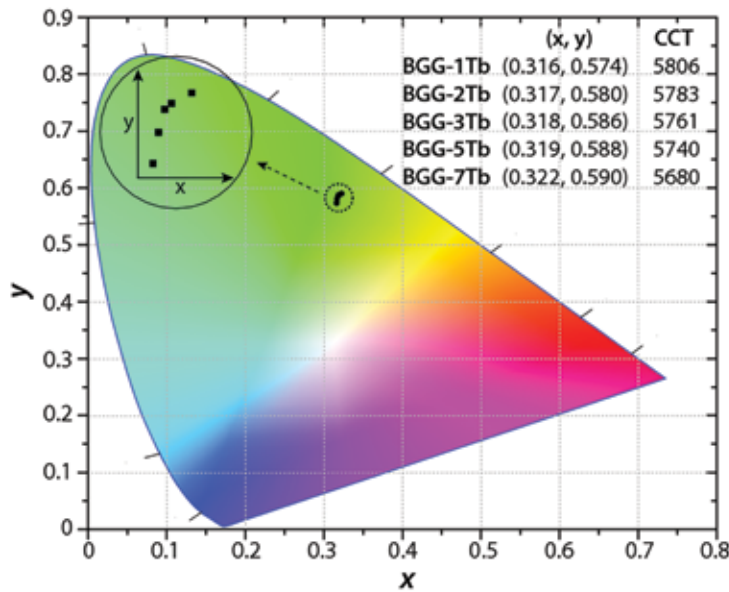


Şekil 5. BGG-1Tb camının lüminesans bozunma eğrisi

CIE Kromatiklik Koordinatları

BGG-xTb camlarının yayınlanma spektrumundan renk koordinatlarının elde edilmesi için 1931 CIE kromatiklik diyagramı kullanılmıştır. Şekil 6'da görüldüğü üzere CIE renk kromatiklik koordinatları (x,y) CIE kromatiklik diyagramının yeşil bölgesinde

yer almakta olup artan Tb³⁺ konsantrasyonu ile parlak yeşil bölgeye doğru kaymaktadır. BGG-xTb camlarının, McCamy bağıntısına göre hesaplanan (McCamy, 1992) ilişkili renk sıcaklıkları (CCT) 5806-5680 K aralığındadır. Bu, gün ışığı D55 (5500K) (Fuches et al., 2009) ile ticari beyaz ışık LED (6400) (Yang et al., 2007) değerleri arasında yer almaktadır.



Şekil 6. Tb³⁺-katkılı borogermanat camlarının 1931 CIE kromatiklik diyagramı, CIE renk koordinatları (x, y) ve ilişkili renk sıcaklıkları (CCT, K)

SONUÇ

Tb³⁺ katkılı borogermanat camları eritme tavlama yöntemi ile sentezlenmiş ve fiziksel, yapısal, optik ve lüminesans özellikleri araştırılmıştır. Hazırlanan camlar, Tb³⁺ ve Gd³⁺ gibi ağır elementleri içermesinden dolayı yoğunluk değerleri 5 g/cm³ değerinin üzerine çıkmıştır. Tb³⁺ iyonunun artması ile yapının kompaktlığının arttığı söylenebilir. Geçirgenlik ölçümleri BGG-xTb camlarının UV-Vis bölgede %82'lere ulaşan yüksek geçirgenlik değerlerine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. 378 nm uyarma altında elde edilen yayınlanma spektrumu mavi bölgede zayıf, yeşil bölgede şiddetli yayınlanma pikleri içerecek şekilde iki kısımdan oluşmaktadır. Bunların içinde en şiddetli olanı 541 nm'de yer alan yeşil yayınlanma pikidir. %5 mol Tb³⁺ iyon konsantrasyonundan sonra lüminesans baskılanması meydana gelmektedir.

G/B değerlerine göre artan katkı seviyeleri ile Tb³⁺ iyonunun çevresinin daha asimetrik hale geldiği söylenebilir. BGG-xTb camları için deneysel dallanma oranları %60 gibi yüksek bir değere sahip olup CCT değerleri 5806-5680K aralığında yer almaktadır. ⁵D₄ seviyesinin lüminesans bozunma eğrisi tek üstel fonksiyona fit edilmiş ve bozunma zamanı 1.802 ms olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, BGG-xTb camlarının yeşil renk görüntü aygıtlarında ve katıhal yeşil lazer uygulamalarında uygulama potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

TEŞEKKÜR

Bu araştırma TÜBİTAK tarafından 114M477 nolu ve Adnan Menderes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FEF-15037 nolu projeler ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- Bhatia B, Meena SL, Parihar V, Poonia M, 2015. Optical basicity and polarizability of Nd³⁺ doped bismuth borate glasses. *New Journal of Glass and Ceramics*, 5: 44–52.
- Chen G, Yang Y, Zhao D, Xia F, 2005. Composition Effects on Optical Properties of Tb³⁺ Doped Heavy Germanate Glasses. *Journal of The American Ceramic Society*, 88: 293–296.
- Chen Q, Chen Q, Wang H, Wang G, Yin S, 2017. Magneto optical properties of rare earth Tb₂O₃ doped PbO–Bi₂O₃–B₂O₃ glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 470: 99–107.
- Ding S, Zhang W, Xu B, Wang J, 2001. Spectra of Ce³⁺, Tb³⁺ and Gd³⁺ Ions in Ln(BO₃, PO₄)[Ln=La,Y]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 21: 275.
- Fuches EC, Sommer C, Wenzl FP, Bitschnau B, Paulitsch AH, Muhlanger A, Gatterer K, 2009. Polyspectral white light emission from Eu³⁺, Tb³⁺, Dy³⁺, Tm³⁺ co-doped GdAl₃(BO₃)₄ phosphors obtained by combustion synthesis. *Materials Science and Engineering: B*, 156: 73–78.
- Gökçe M, Şentürk U, Koçyiğit Uslu D, Burgaz G, Şahin Y, Gökçe AG, 2017. Investigation of europium concentration dependence on the luminescent properties of borogermanate glasses. *Journal of Luminescence*, 192: 263–268.
- Hoaksey A, Woods J, Taylor KNR, 1978. Luminescence of Tb³⁺ ions in silicate glasses. *Journal of Luminescence*, 17: 385–400.
- Jamalaiah BC, Suresh Kumar J, Mohan Babu A, Suhasini T, Rama Moorthy L, 2009. Photoluminescence properties of Sm³⁺ in LBTAf glasses. *Journal of Luminescence*, 129: 363–369.
- Kesavulu CR, Kim HJ, Lee SW, Kaewkhao J, Kaewnuam E, Wantana N, 2017. Luminescence properties and energy transfer from Gd³⁺ to Tb³⁺ ions in gadolinium calcium silicoborate glasses for green laser application. *Journal of Alloys and Compounds*, 704: 557–564.
- Loos S, Mungra M, Ahrens B, Leonard RL, vans A, Johnson JA, Steudel F, Schweizer S, 2017. Concentration-dependent luminescence and energy transfer in Tb³⁺/Eu³⁺ doped borate and fluorozirconate glasses. *Journal of Luminescence*, 187: 298–303.
- McCamy CS, 1992. Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates. *Color Research&Application*, 17: 142–144.
- McCloy JS, 2011. Methods for prediction of refractive index in glasses for the infrared. *Proceedings of SPIE*, 8016: 1–16.
- Onderisinoza Z, Kucera M, Hanus M, Nikl M, 2015. Temperature dependent nonradiative energy transfer from Gd³⁺ to Ce³⁺ ions in co-doped LuAG:Ce,Gd garnet scintillators. *Journal of Luminescence*, 167: 106–113.
- Pisarski WA, Zur L, Goryczka T, Sołtys M, Pisarska J, 2014. Structure and Spectroscopy of Rare Earth Doped Lead Phosphate Glasses. *Journal of Alloys and Compounds*, 587: 90–98.
- Sigaev VN, Lotarev SV, Orlova EV, Golubev NV, Koltashev VV, Plotnichenko VG, Komandin GA, 2010. Structure of Lanthanum–Borogermanate Glass with Stillwellite Composition According to Vibrational Spectroscopy Data. *Glass and Ceramics*, 67: 105–108.
- Singh GP, Kaur S, Kaur P, Singh, DP, 2012. Modification in Structural and Optical Properties of ZnO, CeO₂ Doped Al₂O₃–PbO–B₂O₃ Glasses. *Physica B*, 407: 1250–1255.
- Sun XY, Huang SM, Gu M, Gao QC, Gong XS, Ye ZP, 2010. Enhanced Tb³⁺ luminescence by non-radiative energy transfer from Gd³⁺ in silicate glass. *Physica B*, 405: 569–572.
- Sun XY, Yu XG, Wang WF, Li YN, Zhang ZJ, Zhao JT, 2013a. Luminescent properties of Tb³⁺-activated B₂O₃–GeO₂–Gd₂O₃ scintillating glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 379: 127–130.

- Sun XY, Jiang DG, Wang WF, Cao CY, Li YN, Zhen GT, Wang H, Yang XX, Chen HH, Zhang ZJ, Zhao JT, 2013b. Luminescence Properties of B_2O_3 - GeO_2 - Gd_2O_3 Scintillating Glass Doped with Rare-Earth and Transition-Metal Ions. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 716: 90–95.
- Sun XY, Yang QM, Gao P, Wu HS, Xie P, 2015a. Luminescence, energy transfer properties of Tb^{3+}/Gd^{3+} -coactivated oxyfluoride borogermanate scintillating glasses. *Journal of Luminescence*, 165: 40–45.
- Sun XY, Ye ZP, Zhang ZJ, Liu LW, Chen DP, Zhao JT, 2015b. Energy Transfer Study on Dense Eu^{3+}/Tb^{3+} -Coactivated Oxyfluoride Borogermanate Scintillating Glasses. *Journal of American Ceramic Society*, 98: 781–787.
- Sundari SS, Marimuthu K, Sivraman M, Surendra Babu S, 2010. Composition Dependent Structural and Optical Properties of Sm^{3+} Doped Sodium Borate and Sodium Fluoroborate Glasses. *Journal of Luminescence*, 130: 1313–1319.
- Struebing C, Lee G, Wagner B, Kang Z, 2016. Synthesis and luminescence properties of Tb doped $LaBGeO_5$ and $GdBGeO_5$ glass scintillators. *Journal of Alloys and Compounds*, 686: 9–14.
- Tang C, Liu S, Liu L, Chen DP, 2015. Luminescence properties of Gd^{3+} doped borosilicate scintillating glass. *Journal of Luminescence*, 160: 317–320.
- Yang CH, Pan YX, Zhang QY, 2007. Enhanced white light emission from Dy^{3+}/Ce^{3+} codoped $GdAl_3(BO_3)_4$ phosphors by combustion synthesis. *Materials Science and Engineering: B*, 137: 195–199.
- Zhang N, Sharafudeen KN, Dong G, Peng M, Qiu J, 2012. Mixed Network Effect of Broadband Near-Infrared Emission in Bi-Doped B_2O_3 - GeO_2 Glasses. *Journal of American Ceramic Society*, 95: 3842–3846.
- Zu C, Wang Y, Chen J, Han B, Tao H, 2011. Luminescent properties and applications of Tb^{3+} doped silicate glasses with industrial scales. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 357: 2435–2439.