



Lüminesans özellik gösteren hekzagonal bor nitrür üretiminin araştırılması

Janserın Özkurt^{1,*}, Nuran Ay¹

¹Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, 26555, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

İlk gönderi 10 Nisan 2023
Kabul 30 Nisan 2023
Online 30 Eylül 2023

Araştırma Makalesi

DOI: 10.30728/boron.1266900

Anahtar kelimeler:

Disprozyum
Evropiyum
Hekzagonal bor nitrür
Karakterizasyon
Lüminesans

ÖZET

Lüminesans özellik gösteren hekzagonal bor nitrür (hBN) borik asit, melamin, Eu^{+3} ve Dy^{+3} 'ün 1200°C 'de 1 saat ısıl işlemi ile sentezlendi. Bor nitrür UV ışık ile uyarıldığında Eu^{+3} ve Dy^{+3} iyonlarının varlıkları maviden kırmızıya emisyon göstermiştir. Farklı $[\text{Dy}^{+3}/\text{Eu}^{+3}]$ oranları kullanılarak enerji verimliliği en yüksek olan formülasyon belirlenmiştir. Yüksek enerji verimliliğine ($\sim 0,83$) sahip emisyon $[\text{Dy}^{+3}/\text{Eu}^{+3}]=0,5$ oranında görülmüştür. Ayrıca Dy^{+3} iyonlarının miktarının artmasıyla ışıldama yoğunluğunun azaldığı görülmüştür. Işıldama göstermeyen disprozyum borat (DyBO_3) fazının oluşumu lüminesans özelliği olumsuz etkilemiştir.

Investigation of hexagonal boron nitride production with luminescent properties

ARTICLE INFO

Article History:

Received April 10, 2023
Accepted April 30, 2023
Available online September 30, 2023

Research Article

DOI: 10.30728/boron.1266900

Keywords:

Dysprosium
Europium
Hexagonal boron nitride
Characterization
Luminescence

ABSTRACT

Hexagonal boron nitride (hBN) with luminescent properties was synthesized by heat treatment of boric acid, melamine, Eu^{3+} and Dy^{3+} at 1200°C for 1 hour. When boron nitride was excited with UV light, the presence of Eu^{3+} and Dy^{3+} ions showed emission from blue to red. The formulation with the highest energy efficiency was determined by using different $[\text{Dy}^{3+}/\text{Eu}^{3+}]$ ratios. Emission with high energy efficiency (~ 0.83) was observed at a rate of $[\text{Dy}^{3+}/\text{Eu}^{3+}]=0.5$. In addition, it was observed that the luminescence intensity decreased with the increase of the amount of Dy^{3+} ions. The formation of the non-emitting dysprosium borate (DyBO_3) phase effected the luminescence property negatively.

1. Giriş (Introduction)

Lüminesans malzemeler elektromanyetik ışımaya uyarılma veya uyarılma üzerine optik ışımaya gösteren kimyasal bileşikler olarak tanımlanabilir ve optoelektronik cihazlarda, boyalarda, trafik işaretlerinde, tekstil endüstrisi gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Nitrür yarı iletkenlerinde doping aktivatör iyonları iyi görünür ışık emisyonuna sahip olduğu için renk dönüştürme fosforları olarak kullanılmaktadır. Nadir toprak elementlerinin (RE) nitrür yarı iletkenlerine katılanmasıyla ana malzemenin bant aralığının genişlemesiyle fosforesans özelliğinin iyileşmesi görülmüştür ve buna bağlı olarak geniş bant

aralıkları, mükemmel kimyasal kararlılıkları ve yüksek verimlilik gibi özellikleriyle nitrür seramikler (hBN, AlN, GaN) ilgi çekmektedir [1]. İkili nitrür seramikler yarı iletkenler, lüminesans aktivatörleri için ana malzeme olarak nadiren kullanılırken, RE iyonlarıyla katkılı olduklarında GaN, AlN ve Si_3N_4 'ten görünür emisyonlar elde edilmiştir [2-4]. hBN yüksek elektrik direnci, termal iletkenliği, yüksek erime noktası ve geniş bant aralığı enerjisiyle hem teorik hem deneysel olarak araştırılmıştır [5-8]. Geniş bant aralığı 4,4-6 eV aralığında değişmektedir ve bu bant aralığı ile ultraviyole lazerli malzeme olarak kullanılabilirdiği belirtilmektedir [8]. Sahteciliği tespit teknolojilerinde

*Corresponding author: janserinokurt@ogr.eskisehir.edu.tr

fosforlar, organik boyalar, kuantum noktaları gibi malzemeler endüstriyel ürünleri veya belgeleri korumak için kullanımları yaygın hale gelmiştir [9-11]. Bor nitrür (BN) yüksek oksidasyon direnci ve yaklaşık 1000°C'ye kadar olan sıcaklıklarda kararlıdır. Bu özellikleriyle yüksek sıcaklıktaki bileşenler için hBN bazlı inorganik fosforlar kullanılabilirliği ortaya çıkmıştır [12].

Son zamanlarda farklı RE katkılı BN'ler sentezlenmiştir ve ultraviyole (UV) ışıkla uyarıldığında farklı renklerde ışık emisyonları görülmüştür [13-17]. Literatürde farklı üretim yöntemleri ve farklı RE başlangıç bileşikleri kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. Jung ve ark. Disprozyum (Dy^{+3}) ve seryum (Ce^{+3}) ile [13] ve Ce^{+3} ve teberyum (Tb^{+3}) kullanılarak nanofosforlar elde etmişlerdir [14]. Bir başka çalışmada sadece Ce^{+3} ile farklı oranlarda Ce^{+3} iyonlarının lüminesans özelliğe etkisi incelenmiştir ve 0,5 Ce^{+3} oranında en iyi lüminesans özelliği gösterdiği belirtilmiştir [15]. Wu ve ark. ise %1 Ce^{+3} ilavesinin en yüksek fosforesans özellik sergilediğini ifade etmiştir [16]. Chen ve ark. ise BN nanotüplere evropiyum (Eu^{+2}) ekleyerek nano boyutlu ışık kaynağı üretmeyi amaçlamışlardır [17].

Eu^{+3} kullanılarak yapılmış herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu nedenle Eu^{+3} ve Dy^{+3} birlikte etkisini incelenmek üzere bu çalışma planlanmıştır. Bu çalışmada, Eu^{+3} sabit tutularak Dy^{+3} miktarı artırılıp nano hBN sentezlenmiş ve karakterize edilmiştir.

2. Malzemeler ve Yöntemler (Materials and Methods)

Deneysel çalışmalarda borik asit (H_3BO_3), melamin ($C_3H_6N_6$), disprozyum oksit (Dy_2O_3) ve evropiyum oksit (Eu_2O_3) kullanılmıştır. hBN oluşturabilmek için borik asit ve melamin su içinde 7:1 mmol borik asit:melamin olacak şekilde çözündürülmüştür. Eu_2O_3 ve Dy_2O_3 nitrik asit içerisinde çözündürülerek $Eu(NO_3)_3$ ve $Dy(NO_3)_3$ üretilmiştir. Eu^{+3} sabit miktarda tutularak farklı oranlarda Dy^{+3} çözeltiye eklenerek mekanik karıştırma işlemi yapılmış ve 80°C etüvde kurutulmuştur. Numuneler kurutulduktan sonra tüp fırın içerisinde azot atmosferinde 1200°C'de 1 saat ısıtma işlemi tabii tutulmuştur. Tablo 1'de numunelerin Dy^{+3}/Eu^{+3} oranları ve numune kodları verilmiştir.

Tablo 1. Numunelerin katkı malzeme oranları (Dopant ratios of samples).

Numune kodu	$[Dy^{3+}]/[Eu^{3+}]$
T0	-
T1	0,0
T2	0,1
T3	0,2
T4	0,5
T5	1,0
T6	2,0

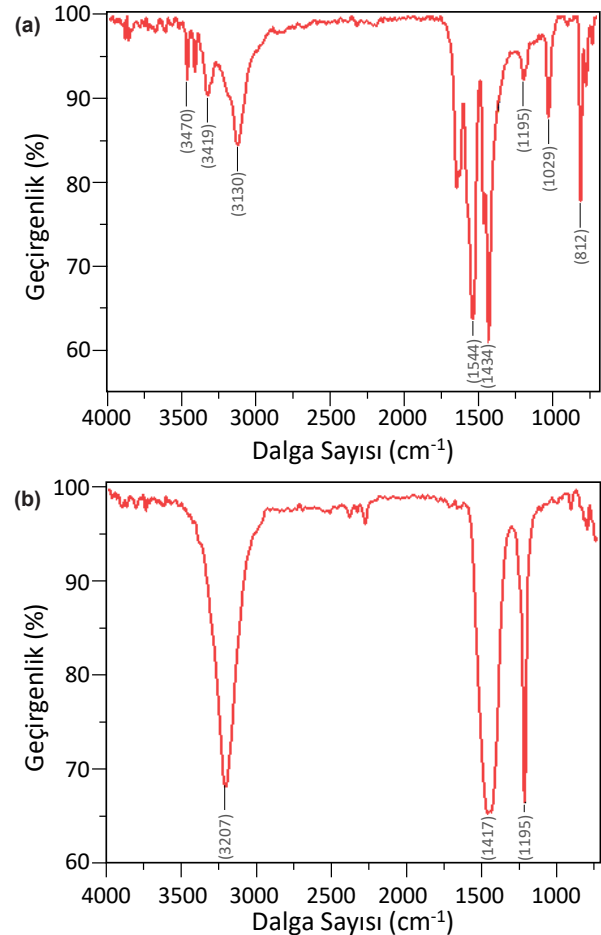
Numunelerin karakterizasyonları için termogravimetrik analiz cihazı (TA Instruments SDT-Q600 Simultaneous

TGA / DTA), Rigaku Miniflex 600 X-ışını Kırınım Cihazı (20 KV, 15 mA), Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR Bruker Tensor 27) ve floresans spektrometre (Perkin Elmer LS55) kullanılmıştır.

3. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

3.1. Hammaddelerin Analizi (Raw Materials Analysis)

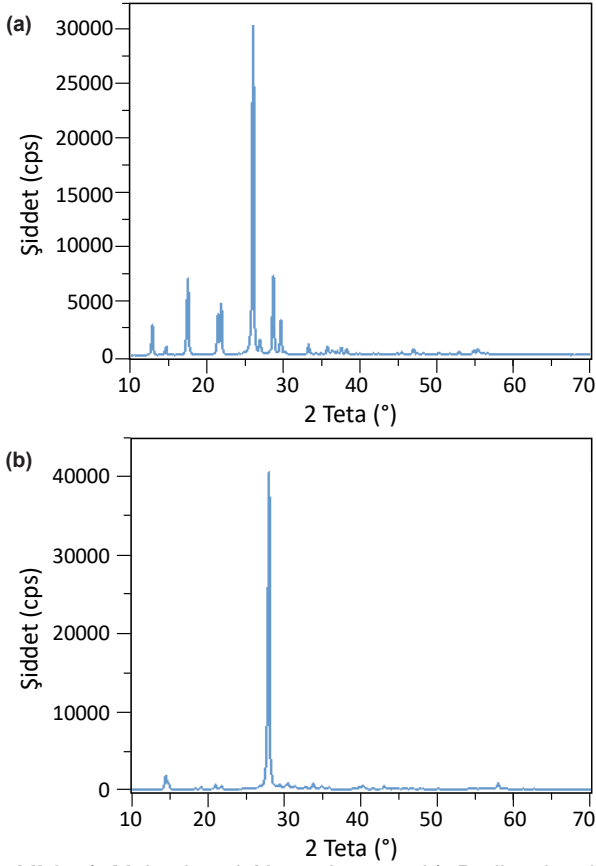
Melamin ve borik asitin FTIR, XRD, ısı analizleri yapılmış ve optik mikroskop ile mikro yapısı incelenmiştir. Melaminin FTIR analizi sonucu Şekil 1'dedir. 3000-3650 cm^{-1} pik N-H esneme titreşimlerine, 1100-1650 cm^{-1} bandı C-N, C=N ile ilgili esneme titreşimlerine karşılık gelir ve genellikle bu aromatik halkaların iskelet esneme titreşimleriyle ilişkilendirilir. Yaklaşık 812 cm^{-1} bu halkaların düzlem dışı bükülme pikidir. [18-22]. Borik asitin FTIR analizi sonucu Şekil 1b'de verilmiştir. 3207 cm^{-1} O-H, yaklaşık 1434 cm^{-1} 'deki BO_3 yapısındaki B-O'nun asimetric gerilmesinden oluşur. 1195 pik yapıdaki B-OH düzlemindeki atom titreşimlerinin bükülmesinden kaynaklanır [23,24].



Şekil 1. a). Melamin FTIR grafiği, b). Borik asit FTIR grafiği (FTIR graph of melamine, b). FTIR graph of boric acid).

Faz analizi sonucunda tüm piklerin melamine ait olduğu belirlenmiştir (JCPDS Kart No: 391950) (Şekil 2) [25]. Borik asitin faz analizi yapılmış (Şekil 2b)

JCPDS Kart No: 231034 numarası ile belirlenen borik asite ait olduğu tespit edilmiştir [26,27].

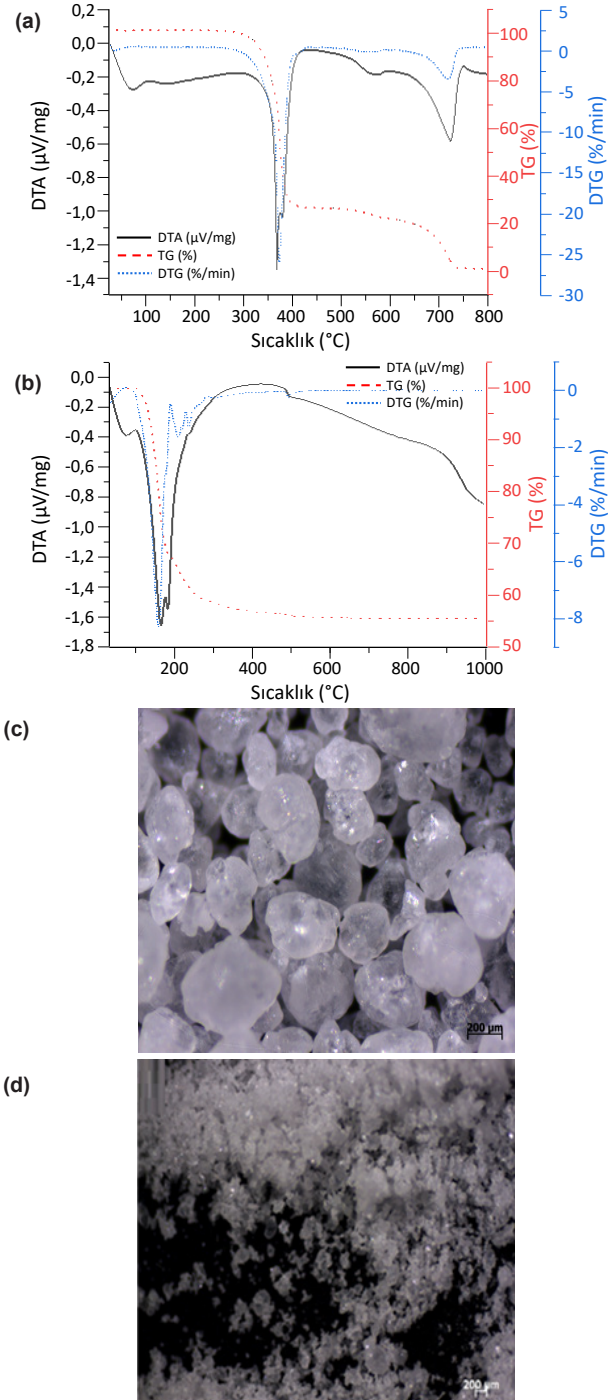


Şekil 2. a). Melamine ait X ışını kırınımı, b). Borik asite ait X ışını kırınımı (a). X-ray diffractogram of the boric acid, b) X-ray diffractogram of the melamine).

Melamin ısıl davranışı 47,523 mg numune platin pan içerisinde azot atmosferinde oda sıcaklığından 800°C'ye kadar 5°C/dk ısıtma hızıyla ölçülmüştür. 90°C'ye kadar olan kütle kaybı suyun buharlaşması sebebiyle olmaktadır. Yaklaşık 370°C'ye kadar kararlı olan melamin 370-400°C arasında bozulmaktadır [28-30] (Şekil 3). Borik asit ısıl davranışı 42,334 mg numune platin pan içerisinde azot atmosferinde oda sıcaklığından 1000°C'ye kadar 10°C/dk ısıtma hızı ile ölçülmüştür. 300°C'nin altında ağırlık kaybı oluşmaktadır. 500°C civarında sıvı hale dönüşmektedir [31-33]. Borik asit ve melaminin mikroyapısı optik mikroskop ile belirlenmiş Şekil 3b'de görülmektedir.

3.2. Numunelerin Karakterizasyonu (Characterization of the Samples)

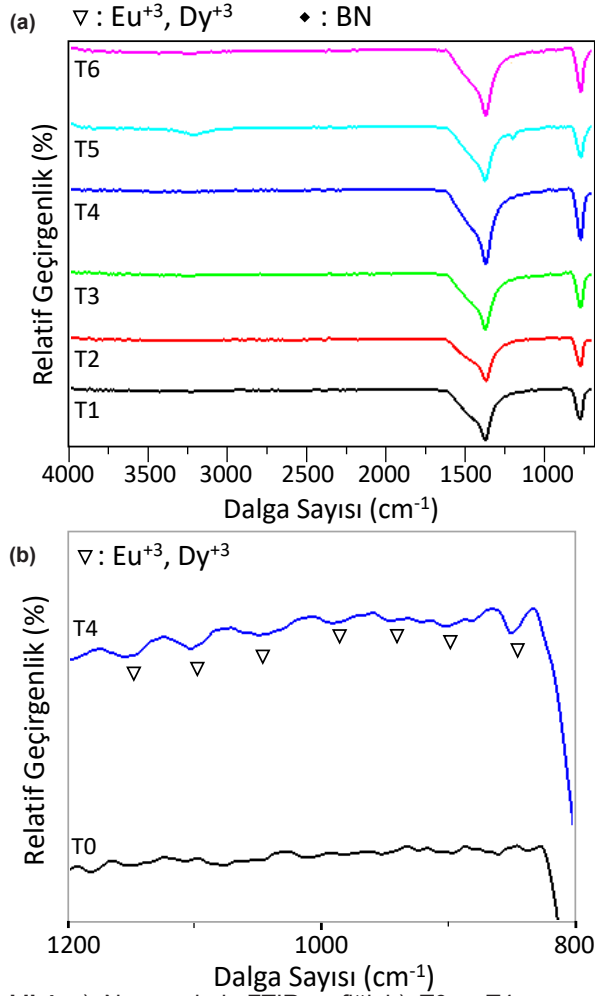
hBN'ye disprozium ve evropiyum katkılanmış 7 farklı numune (T0, T1, T2, T3, T4, T5 ve T6) üç tekrarlı olarak hazırlanmıştır. Her bir numunenin FTIR, XRD ve UV analizleri yapılmıştır. Tüm numunelerde BN pikleri tespit edilmiştir. BN karakteristik FTIR pikleri 1400-1350 cm^{-1} ve 800-750 cm^{-1} aralığındadır (Şekil 4) [34-37]. Literatürde yapılan çalışmalarda FTIR analizleri yapılmamış olup bu çalışmada FTIR analizi yapılmıştır. FTIR analizlerinde 1200-800



Şekil 3. a). Melamin ısıl analiz grafiği, b). Borik asit ısıl analiz grafiği, c) Borik asit optik mikroskop görüntüsü d) melamin optik mikroskop görüntüsü (a). Thermal analysis of the boric acid, b). Thermal analysis of the melamine, c).Optic microscope image of the boric acid d). Optic microscope image of the melamine).

cm^{-1} bölgesinde fark görüldüğü bunun Dy^{+3} ve Eu^{+3} iyonlarından kaynaklandığı tespit edilmiştir.

Numunelerin XRD analizleri incelendiğinde hBN piklerinden oluştuğu belirlenmiştir (JCPDS PDF No: 034-421). Evropiyum ve disprozium pikleri hBN piklerine oldukça yakın olduğu için keskin bir evropiyum ve disprozium pikleri gözlemlenmemiştir

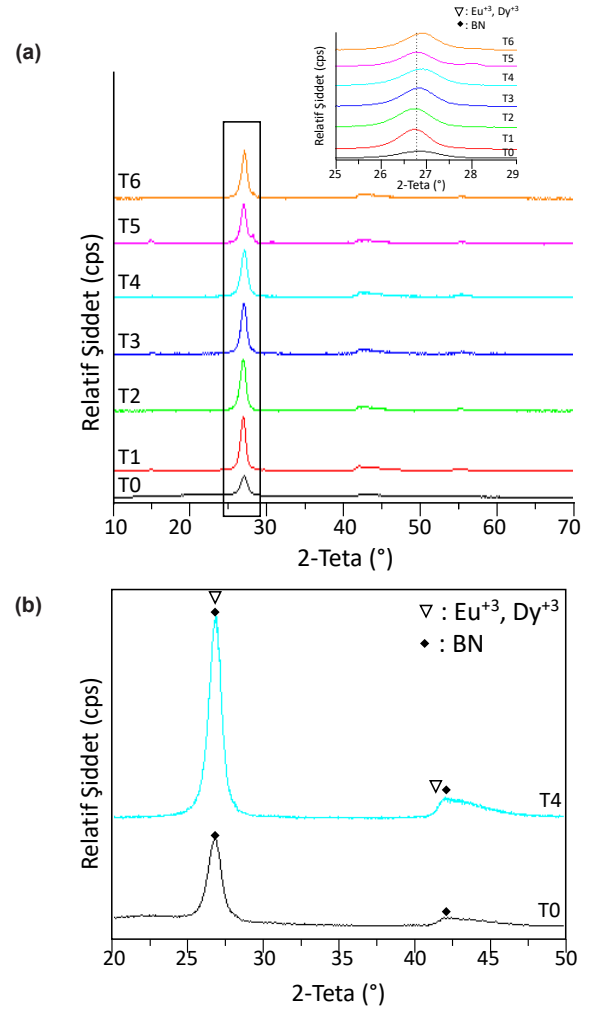


Şekil 4. a). Numunelerin FTIR grafiği, b). T0 ve T4 numunelerinin FTIR grafiği (a). FTIR graph of the samples, b). FTIR graph of the T0 and T4).

(Şekil 5). İncelenen literatür çalışmalarına göre katkı malzemelerinin borat (DyBO_3 , TbBO_3 vb.) oluşturduğu ifade edilmektedir [13,14]. Bu çalışmada Dy^{+3} miktarının artmasıyla birlikte DyBO_3 oluşumu tespit edilmiştir.

Numunelere farklı miktarda [$\text{Dy}^{+3}/\text{Eu}^{+3}$] katkılандığında hBN'nin grafeninkine benzer olan altıgen yapısını koruduğu belirlenmiştir [38,39]. [$\text{Dy}^{+3}/\text{Eu}^{+3}$] oranı arttıkça hBN'nin (002) pikinin $26,82^\circ$ 'deki pikin $26,98^\circ$ 'ye kaydığı ve pik şiddetinin 2118 cps'ten 5400 cps'e çıktığı bulunmuştur. Bunun sebebinin daha önce yapılan çalışmalarda belirtildiği gibi disprozyum iyonlarının B_3N_3 ara katman aralığının genişletmesiyle olduğu tespit edilmiştir [13,14]. Yarıçapı bor iyonlarından daha büyük katkı malzemeleri (Tb, Dy, Ce) düzlemler arası mesafenin artmasına sebep olduğu yapılan çalışmalarda sunulmuştur [13-15]. Bu çalışmada Dy^{+3} iyonlarının ($r_{\text{Dy}}:1.052\text{\AA}$, CN:6) yarıçapının bor iyonlarıyla ($r_{\text{B}}:0.41\text{\AA}$, CN:6) kıyaslandığında Dy^{+3} iyonunun yarıçapının daha büyük olması nedeniyle düzlemler arası mesafenin arttığı tespit edilmiştir [40].

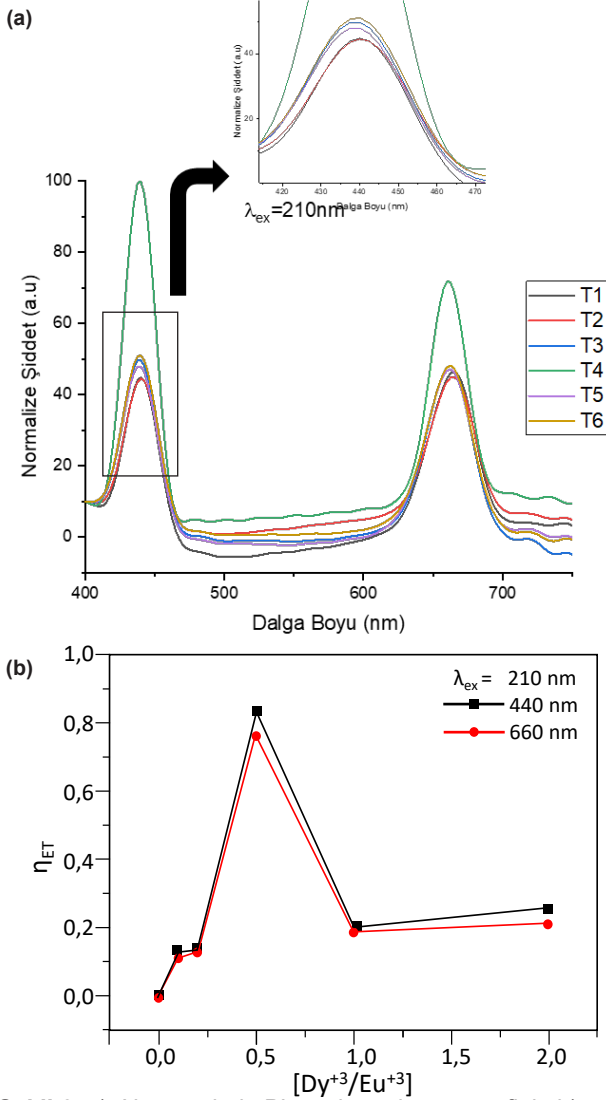
Eu^{+3} miktarı sabit tutularak farklı miktarlarda Dy^{+3} iyonlarıyla sentezlenen hekzagonal bor nitrürlerin (T1,



Şekil 5. a). Numunelerin X ışını kırınımı, b). T0 ve T4 X ışını kırınımı (a). X-ray diffractogram of the samples, b). X-ray diffractogram of the T0 and T4).

T2, T3, T4, T5 ve T6) PL (fotoluminesans) spektrumları Şekil 6'da gösterilmiştir.

Tüm numunelerde iki kuvvetli pik 440 ve 660 nm'de görülmektedir. Dy^{+3} oranına bağlı olarak farklı şiddetler ortaya çıkmıştır. [$\text{Dy}^{+3}/\text{Eu}^{+3}$] oranı 0,5 olduğunda en yüksek PL şiddeti tespit edilmiştir. Dy^{+3} miktarının artmasıyla absorpsiyon spektrumlarının şiddetinin arttığı tespit edilmiştir. T1 ve T2 aynı PL şiddet seviyesinde kalırken T3, T5, T6 ise yaklaşık olarak aynı PL şiddet seviyesindedir. Sadece Eu^{+2} eklenmesiyle 490 nm'de en kuvvetli PL piki oluşurken [17], bu çalışmada ise Eu^{+3} 440 nm'de kuvvetli PL pikinin oluşmasına neden olmuştur. Dy^{+3} ve Ce^{+3} katkılanarak yapılan çalışmada kuvvetli iki pik 480, 575 nm'de görülürken [13] bu çalışmada Eu^{+3} etkisiyle birinci pik daha düşük, ikinci pik ise daha yüksek nanometrelerde oluşmuştur. Dy^{+3} ve Eu^{+3} arasındaki enerji transferleri nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir. En şiddetli absorpsiyon spektrumu T4 numunesindedir ([$\text{Dy}^{+3}/\text{Eu}^{+3}$]=0,5). Sharma ve ark. yaptığı çalışmada aktivatör iyonlarının etrafındaki yerel simetri geçişlerinden kaynaklı 10 nm'den küçük nanofosforların bulk partiküllerle kıyaslandığında PL şiddetinin daha yoğun olduğunu tespit etmişlerdir



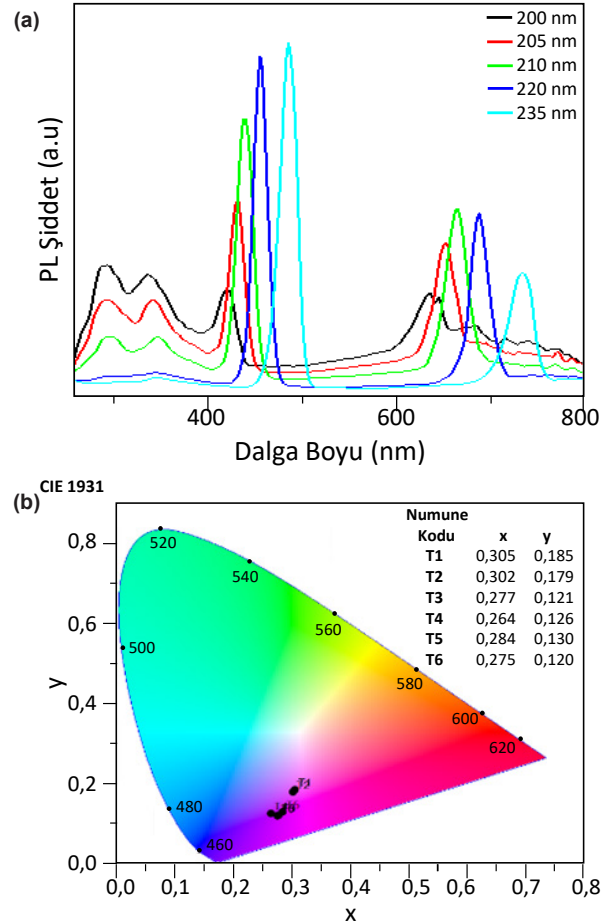
Şekil 6. a). Numunelerin PL spektrumlarının grafiği , b). Numunelerin enerji transfer (η_{ET}) grafiği (a). PL spectra of the samples , b). The efficiency of energy transfer (η_{ET}) graph of the samples).

[41]. Daha fazla Dy^{3+} iyonunun eklenmesi iyonların kümelenmesi ve yayılım göstermeyen $DyBO_3$ oluşumuyla lüminesans yoğunluğunun düşmesine sebep olmuştur. Enerji transferini incelemek için PL sonuçlarından yararlanılmıştır. Enerji transferinin (η_{ET}) verimliliği Eu^{3+} 'ün Dy^{3+} için iyi bir duyarlaştırıcı (sensitizer) olarak aktivitesi hakkında bilgi verir. η_{ET} emisyon yoğunluğundan yararlanarak Eş. 1 kullanılarak hesaplanmıştır. I ve I_0 , sırasıyla aktivatörün (Dy^{3+}) varlığında ve yokluğunda duyarlaştırıcının (Eu^{3+}) emisyon yoğunluklarıdır.

$$\eta_{ET} = 1 - \frac{I}{I_0} \quad (1)$$

hBN nanofosforlarında Eu^{3+} 'dan Dy^{3+} 'e enerji transferleri hesaplandığında verimliliği en yüksek olan numune T4'tü. En yüksek PL şiddetlerinin olduğu 440 ve 660 nm'de η_{ET} değerleri sırasıyla 0,83 ve 0,76 olarak hesaplanmıştır.

Numuneler farklı dalga boylarıyla uyarıldığında emisyon piklerinin dalga boyunun da arttığı görülmektedir (Şekil 7). Bu durumda daha düşük dalga boyuyla uyarılma ile yüksek enerji elde edilebilir. Numunelerde Dy^{3+} miktarının artmasıyla CIE renk koordinat sistemine göre (Şekil 7b) kırmızı bölgeden mavi bölgeye doğru kaymıştır.



Şekil 7. a). Farklı dalga boylarıyla uyarılmış T4 numunesinin PL grafiği , b). IE renk koordinat sisteminde numuneler (a). PL plot of T4 sample excited with different wavelengths, b). CIE color coordinate of the samples).

4. Sonuçlar (Conclusions)

Dy^{3+} ve Eu^{3+} iyonları katkılanarak, borik asit ve melamin karışımından hBN nanofosforları başarılı bir şekilde üretilmiştir. $[Dy^{3+}/Eu^{3+}]$ oranlarından faydalanarak maviden kırmızıya emisyon renkleri görülmüştür. Dy^{3+} oranlarının değiştirilmesiyle fosforesans özelliğinin T4 ($Dy^{3+}/Eu^{3+}=0,5$) fosforesans özelliğinin maksimum seviyede elde edildiği ve enerji verimliliği de iyileştirildiği tespit edilmiştir. $[Dy^{3+}/Eu^{3+}]$ oranının 0,5'ten az veya çok olması durumunda fosforesans özelliğinin düştüğü görülmüştür ve daha sonra yapılacak çalışmalar için kullanılacak oranının tespiti sağlanmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda genellikle tek bir dalga boyuyla numuneler uyarılmıştır. Farklı dalga boyları kullanılarak numuneler uyarıldığında emisyon piklerinin daha yüksek dalga boylarına doğru kaydığı

ve bununla birlikte düşük dalga boylarında daha yüksek enerjilere ulaştığı ölçülmüştür. Bu durum güneş panelleri, LED aydınlatmalar, lazerler, elektronik cihazlar ve optik hafızalar gibi farklı uygulama alanları için avantaj sağlayabilir. Çalışmaların sonucu dikkate alınarak üretilen malzemelerle uygulamalar yapılabilir. Literatürde Dy⁺³ ve Eu⁺³ birlikte kullanılarak herhangi bir çalışma yapılmamıştır.

Kaynaklar (References)

- [1] Khan, S. A., Khan, N. Z., Hao, Z., Ji, W. W., Abadikhah, H., Hao, L., Xu, X. & Agathopoulos, S. (2018). Influence of substitution of Al-O for Si-N on improvement of photoluminescence properties and thermal stability of Ba₂Si₅N₈: Eu²⁺ red emitting phosphors. *Journal of Alloys and Compounds*, 730, 249-254. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.09.335>.
- [2] Li, Y. Q., Hirotsaki, N., Xie, R. J., Takeda, T., & Mitomo, M. (2010). Photoluminescence properties of rare earth doped α-Si₃N₄. *Journal of Luminescence*, 130(7), 1147-1153. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2010.02.012>.
- [3] Steckl, A. J., & Birkhahn, R. (1998). Visible emission from Er-doped GaN grown by solid source molecular beam epitaxy. *Applied Physics Letters*, 73(12), 1700-1702. <https://doi.org/10.1063/1.122250>.
- [4] Moon, S., Kim, J., Park, J., Im, S., Kim, J., Hwang, I., & Kim, J. K. (2023). Hexagonal boron nitride for next-generation photonics and electronics. *Advanced Materials*, 35(4), 2204161. <https://doi.org/10.1002/adma.202204161>.
- [5] Jiang, T., Jin, Z., Yang, J., & Qiao, G. (2009). Investigation on the preparation and machinability of the B₄C/BN nanocomposites by hot-pressing process. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(1), 561-571. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.02.026>.
- [6] Vel, L., Demazeau, G., & Etourneau, J. (1991). Cubic boron nitride: synthesis, physicochemical properties and applications. *Materials Science and Engineering: B*, 10(2), 149-164. [https://doi.org/10.1016/0921-5107\(91\)90121-B](https://doi.org/10.1016/0921-5107(91)90121-B).
- [7] Singla, P., Goel, N., & Singhal, S. (2015). Boron nitride nanomaterials with different morphologies: synthesis, characterization and efficient application in dye adsorption. *Ceramics International*, 41(9), 10565-10577. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.04.15>.
- [8] Ferreira, F., Chaves, A. J., Peres, N. M. R., & Ribeiro, R. M. (2019). Excitons in hexagonal boron nitride single-layer: a new platform for polaritonics in the ultraviolet. *Journal of the Optical Society of America B*, 36(3), 674-683. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.36.000674>.
- [9] Liang, L., Chen, C., Lv, Z., Xie, M., Yu, Y., Liang, C., Lou, Y., Li, C., & Shi, Z. (2019). Microwave-assisted synthesis of highly water-soluble LuVO₄:Eu nanoparticles as anti-counterfeit fluorescent ink. *Journal of Luminescence*, 206, 560-564. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.10.088>.
- [10] Antoniuk, M. A., Grzyb, J., & Nyk, M. (2019). Preserved two-photon optical properties of hydrophilic proteins-conjugated quantum dots. *Journal of Luminescence*, 209, 57-60. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.01.029>.
- [11] Yu, B., Liu, D., Wang, Y., Zhang, T., Zhang, Y. M., Li, M., & Zhang, S. X. A. (2019). A solid-state emissive and solvatochromic fluorophore and its application in high-contrast, fast, and repeatable thermochromic blends. *Dyes and Pigments*, 163, 412-419. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2018.12.008>.
- [12] Zabiliūtė-Karaliūnė, A., Aglinskaitė, J., & Vitta, P. (2021). The reduction of the thermal quenching effect in laser-excited phosphor converters using highly thermally conductive hBN particles. *Scientific Reports*, 11(1), 6755. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86249-4>.
- [13] Jung, J. Y., Shim, Y. S., Son, C. S., Kim, Y. K., & Hwang, D. (2021). Boron nitride nanoparticle phosphors for use in transparent films for deep-UV detection and white light-emitting diodes. *ACS Applied Nano Materials*, 4(4), 3529-3536. <https://doi.org/10.1021/acsanm.1c00013>.
- [14] Jung, J. Y., Song, B. K., & Kim, Y. K. (2019). Tunable color emission of transparent boron nitride nanophosphors towards anti-counterfeiting application. *Journal of Alloys and Compounds*, 791, 81-86. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.03.269>.
- [15] Jung, J. Y., Baek, Y. K., Lee, J. G., Kim, Y. D., Cho, S. H., & Kim, Y. K. (2018). The structure and luminescence of boron nitride doped with Ce ions. *Applied Physics A*, 124, 1-6. <https://doi.org/10.1007/s00339-018-2054-y>.
- [16] Wu, J., Yin, L., & Zhang, L. (2013). Tuning the electronic structure, bandgap energy and photoluminescence properties of hexagonal boron nitride nanosheets via a controllable Ce³⁺ ions doping. *RSC Advances*, 3(20), 7408-7418. <https://doi.org/10.1039/C3RA23132A>.
- [17] Chen, H., Chen, Y., Li, C. P., Zhang, H., Williams, J. S., Liu, Y., Liu, Z. & Ringer, S. P. (2007). Eu-doped boron nitride nanotubes as a nanometer-sized visible-light source. *Advanced Materials*, 19(14), 1845-1848. <https://doi.org/10.1002/adma.200700493>.
- [18] Li, Y., Shen, Y., Gong, C., Li, B., Huang, H., & Ji, K. (2018). Synthesis and characterization of boron nitride powder. *AIP Conference Proceedings*, 1971(1), 020007. <https://doi.org/10.1063/1.5041102>.
- [19] Hu, C., Xiao, Y., Zhao, Y., Chen, N., Zhang, Z., Cao, M., & Qu, L. (2013). Highly nitrogen-doped carbon capsules: scalable preparation and high-performance applications in fuel cells and lithium ion batteries. *Nanoscale*, 5(7), 2726-2733. <https://doi.org/10.1039/C3NR34002C>.
- [20] Zhao, Y. C., Yu, D. L., Zhou, H. W., Tian, Y. J., & Yanagisawa, O. (2005). Turbostratic carbon nitride prepared by pyrolysis of melamine. *Journal of Materials Science*, 40(9-10), 2645-2647. <https://doi.org/10.1007/s10853-005-2096-3>.
- [21] Torabi, O., Golabgir, M. H., Tajizadegan, H., & Jamshidi, A. (2016). Mechanochemical behavior of magnesium-boron oxide-melamine ternary system in the synthesis of h-BN nanopowder. *Ceramics International*, 42(5), 6450-6456. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.01.084>.
- [22] Rounaghi, S. A., Rashid, A. K., Eshghi, H., & Khaki, J. V. (2012). Formation of nanocrystalline h-AlN during mechanochemical decomposition of melamine in the presence of metallic aluminum. *Journal of Solid State Chemistry*, 190, 8-11. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2012.01.005>.

- [23] Zhang, W., Liu, T., & Xu, J. (2016). Preparation and characterization of 10 B boric acid with high purity for nuclear industry. *SpringerPlus*, 5, 1-10. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2310-6>.
- [24] Elbeyli, İ. Y. (2015). Production of crystalline boric acid and sodium citrate from borax decahydrate. *Hydrometallurgy*, 158, 19-26. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.09.022>.
- [25] Islam, M., Chakraborty, A. K., Gafur, M. A., & Rahman, M. (2019). Easy preparation of recyclable thermally stable visible-light-active graphitic-C₃N₄/TiO₂ nanocomposite photocatalyst for efficient decomposition of hazardous organic industrial pollutants in aqueous medium. *Research on Chemical Intermediates*, 45(4), 1753-1773. <https://doi.org/10.1007/s11164-018-3703-7>.
- [26] Töre, İ. (2015). Hexagonal boron nitride powder synthesis and sintering behaviours (Council of Higher Education Thesis Number: 198422) [Doctoral Dissertation, Anadolu University]. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=9FQtSikHPUTz3EQg-LiMOA&no=4PK1jqY5YTP6mTUGfuwp8A>.
- [27] Kirbaş, İ. (2021). Improving the structural and physical properties of boric acid-doped rigid polyurethane materials. *Composites and Advanced Materials*, 30, 26349833211010819. <https://doi.org/10.1177/26349833211010819>.
- [28] Liu, Y., Chen, Z., Zhang, J., Ai, S., & Tang, H. (2019). Ultralight and thermal insulation carbon foam/SiO₂ aerogel composites. *Journal of Porous Materials*, 26(5), 1305-1312. <https://doi.org/10.1007/s10934-019-00732-y>.
- [29] Suryanto, B. H., Fang, T., Cheong, S., Tilley, R. D., & Zhao, C. (2018). From the inside-out: leached metal impurities in multiwall carbon nanotubes for purification or electrocatalysis. *Journal of Materials Chemistry A*, 6(11), 4686-4694. <https://doi.org/10.1039/C7TA11257B>.
- [30] Wen, J., Xie, J., Chen, X., & Li, X. (2017). A review on g-C₃N₄-based photocatalysts. *Applied Surface Science*, 391, 72-123. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.07.030>.
- [31] Hernández, M. F., Suárez, G., Cipollone, M., Conconi, M. S., Aglietti, E. F., & Rendtorff, N. M. (2017). Formation, microstructure and properties of aluminum borate ceramics obtained from alumina and boric acid. *Ceramics International*, 43(2), 2188-2195. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.11.002>.
- [32] Hernández, M. F., Violini, M. A., Serra, M. F., Conconi, M. S., Suarez, G., & Rendtorff, N. M. (2020). Boric acid (H₃BO₃) as flux agent of clay-based ceramics, B₂O₃ effect in clay thermal behavior and resultant ceramics properties. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 139, 1717-1729. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08563-4>.
- [33] Huber, C., Setoodeh Jahromy, S., Jordan, C., Schreiner, M., Harasek, M., Werner, A., & Winter, F. (2019). Boric acid: a high potential candidate for thermochemical energy storage. *Energies*, 12(6), 1086. <https://doi.org/10.3390/en12061086>.
- [34] Kivanç, M., Barutca, B., Koparal, A. T., Göncü, Y., Bostancı, S. H., & Ay, N. (2018). Effects of hexagonal boron nitride nanoparticles on antimicrobial and antibiofilm activities, cell viability. *Materials Science and Engineering: C*, 91, 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.05.028>.
- [35] Singh, B., Kaur, G., Singh, P., Singh, K., Kumar, B., Vij, A., ... & Kumar, A. (2016). Nanostructured boron nitride with high water dispersibility for boron neutron capture therapy. *Scientific Reports*, 6(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/srep35535>.
- [36] Ansaloni, L. M. S., & de Sousa, E. M. B. (2013). Boron nitride nanostructured: Synthesis, characterization and potential use in cosmetics. *Materials Sciences and Applications*, 4(1), 22-28. <https://doi.org/10.4236/msa.2013.41004>.
- [37] Ryu, S., Oh, H., & Kim, J. (2019). Facile liquid-exfoliation process of boron nitride nanosheets for thermal conductive polyphthalamide composite. *Polymers*, 11(10), 1628. <https://doi.org/10.3390/polym11101628>.
- [38] Weng, Q., Wang, X., Wang, X., Bando, Y., & Golberg, D. (2016). Functionalized hexagonal boron nitride nanomaterials: emerging properties and applications. *Chemical Society Reviews*, 45(14), 3989-4012. <https://doi.org/10.1039/C5CS00869G>.
- [39] Wang, J., Ma, F., & Sun, M. (2017). Graphene, hexagonal boron nitride, and their heterostructures: Properties and applications. *RSC Advances*, 7(27), 16801-16822. <https://doi.org/10.1039/C7RA00260B>.
- [40] Shannon, R. D. (1976). Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta Crystallographica Section A: Foundations and Advances*, 32(5), 751-767. doi.org/10.1107/S0567739476001551.
- [41] Sharma, P. K., Dutta, R. K., & Pandey, A. C. (2012). Size-dependent emission efficiency and luminescence characteristics of YBO₃: Tb³⁺ nanocrystals under vacuum ultraviolet excitations. *Journal of Applied Physics*, 112(5), 054321. <https://doi.org/10.1063/1.4751335>.