

UV ile Işınlanmış Seryum Katkılı $Sr_3Y_2(BO_3)_4$ Fosforunun Termoluminesans Cevabı

Sibel UYSAL SATILMIŞ¹

Arzu EGE^{1*}

ÖZET: Bu çalışmada UV radyasyonu ile ışınlanmış seryum nadir toprak iyonu katkıli stronsiyum itriyum borat ($Sr_3Y_2(BO_3)_4:Ce$) fosforunun termoluminesans özellikleri incelenmiştir. $Sr_3Y_2(BO_3)_4:Ce$ fosforu katı-hal reaksiyon metodu ile sentezlenmiş ve X-ışını kırınımı (XRD) ve termoluminesans (TL) teknikleri kullanılarak karakterize edilmiştir. Termoluminesans ölçümleri 254, 302 ve 365 nm dalga boyuna sahip UV radyasyonu ile ışınlanmış fosfor için gerçekleştirilmiştir. Doz cevabı ve sönümleme özellikleri, 254 nm dalga boyuna sahip UV radyasyonu ile ışınlanmış $Sr_3Y_2(BO_3)_4: Ce$ fosforu için araştırılmıştır. Şu anki bilgimize göre bu fosforun termoluminesans özellikleri üzerine herhangi bir çalışma bulunmamaktadır.

Anahtar kelimeler: Stronsiyum itriyum borat, termoluminesans, UV

Thermoluminescence Response of UV Irradiated Cerium Doped $Sr_3Y_2(BO_3)_4$ Phosphor

ABSTRACT: The thermoluminescence (TL) properties of cerium rare earth ion doped strontium yttrium borate ($Sr_3Y_2(BO_3)_4: Ce$) phosphor irradiated with UV radiation were investigated in the present study. $Sr_3Y_2(BO_3)_4: Ce$ phosphor was synthesized by the solid-state reaction method and characterized by using X-ray diffraction (XRD) and thermoluminescence techniques. Thermoluminescence measurements were carried out for the phosphor irradiated with UV radiation having 254, 302 and 365 nm wavelength. The dose response and fading properties were examined for the $Sr_3Y_2(BO_3)_4: Ce$ phosphor irradiated with UV radiation having 254 nm wavelength. As far as we know there is no earlier work on thermoluminescence properties of these phosphors in literature.

Keywords: Strontium yttrium borate, thermoluminescence, UV

¹ Sibel UYSAL SATILMIŞ (Orcid ID: 0000-0002-8312-5161), Arzu EGE (Orcid ID: 0000-0003-2766-1004), Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 45140, Manisa, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Arzu EGE, e-mail: arzu_aegean@hotmail.com

Geliş tarihi / Received: 25.06.2018
Kabul tarihi / Accepted: 27.09.2018

GİRİŞ

Nadir toprak elementi (NTE) tabanlı inorganik fosforların oksitler, silikatlar, alüminatlar (garnetler), fosfatlar ve boratlar gibi birçok farklı türü bulunmaktadır. Borat tabanlı fosforlar, ışık yayan diyotların yanı sıra lüminesans tüpleri ve plazma görüntü panelleri gibi birçok farklı cihazda uygulama alanlarına sahiptir. Geniş bant aralığına sahip olma, kolay sentezlenebilme, düşük sentez sıcaklıkları, yüksek kimyasal ve fotolitik kararlılıkları ve düşük maliyetleri nedeniyle lüminesans özellik gösteren nadir toprak iyonları için ev sahibi örgü olarak oldukça ilgi çekicidirler (Zhang ve Li, 2004; Kwon ve ark., 2009; Qi ve ark., 2010; Rao ve ark., 2010; Kuo ve Chen, 2010). Bu özelliklerinden dolayı son yıllarda bu fosfor malzemeler üzerine yapılan çalışmaların sayısı oldukça artmıştır (Kim ve ark., 2000; Zhang ve Li, 2004; Shyichuk ve Lis, 2011; Li ve ark., 2013; Wu ve ark., 2017).

Modern optoelektronik cihazlar UV veya yakın UV-mavi radyasyonu görünür ışığa dönüştürmek için fosfor malzemelere ihtiyaç duyarlar (Kim ve ark., 2000; Ye ve ark., 2010). Bilindiği üzere, üç değerlikli nadir toprak iyonları ile katkılanmış lüminesans malzemeler, yüksek parlaklık, keskin emisyon pikleri, yüksek renk saflığı, düşük enerji tüketimi ve çevresel koruma gibi avantajları nedeniyle oldukça dikkat çekicidir (Wu ve ark., 2017). Nadir toprak iyonları, $4f \rightarrow 4f$ veya $5d \rightarrow 4f$ geçişlerine bağlı olarak geniş aralıktaki emisyon renkleri nedeniyle modern aydınlatma ve görüntüleme alanlarında yeri doldurulamaz duruma gelmiştir (Wu ve ark., 2017).

Son zamanlarda, nadir toprak (RE) aktivatörleri için ev sahibi malzeme olarak (Y, Gd)BO₃, Sr₃(BO₃)₂, Ba₂Ca(BO₃)₂, Sr₂Mg(BO₃)₂ ve LiSr₄(BO₃)₃ gibi çeşitli borat bileşikleri araştırılmıştır (Zhang ve Li, 2004; Chang ve Chen, 2007; Song ve ark., 2010; Zhang ve Seo, 2011; Wang ve ark., 2012, Wu ve ark., 2017). Bu fosforların lüminesansı genellikle nadir

toprak iyonlarından kaynaklanmaktadır ve bu fosforların ev sahipleri nadir toprak katkısını sınırlayan alkali ve toprak alkali metal iyonlarından oluşmuştur. Sr₃Y₂(BO₃)₄ malzemesi nadir toprak elementleri için yüksek çözünürlüklü, geniş bant aralıklı, kolay sentezlenebilen, yüksek kararlılığa sahip ve düşük maliyetli en iyi lazer ev sahibi malzemelerden biri olarak çalışılmıştır (Zhang ve ark., 2004; Wei ve ark., 2008; Wei ve ark., 2009; Zhang ve Wang, 2010). Bununla birlikte, çalışmada sentezlenen seryum katkılı stronsiyum itriyum borat (Sr₃Y₂(BO₃)₄:Ce) fosforuyla ilgili olarak sadece bileşiğin sentezi ve özellikleri ile ilgili birkaç çalışma vardır (Shyichuk ve Lis, 2011; Zhang ve ark., 2013; Zhang ve Wang, 2010).

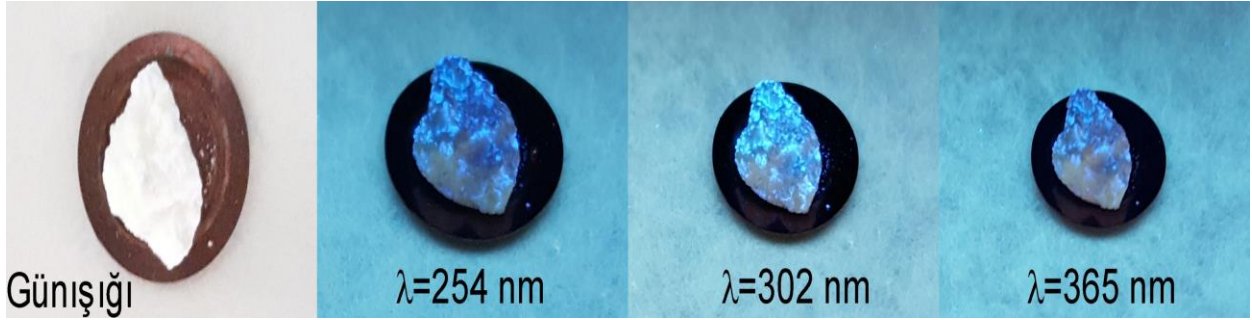
Bu çalışmanın amacı Sr₃Y₂(BO₃)₄ ev sahibi malzemeye seryum katkılanması ile elde edilen fosfor malzemenin, termolüminesans yöntemiyle UV radyasyon doz ölçümünde kullanılabilirliğinin incelenmesidir. Çalışmada katıhal sentez yöntemiyle hazırlanan seryum katkılı stronsiyum itriyum borat (Sr₃Y₂(BO₃)₄:Ce) fosforlarının 254, 302 ve 365 nm dalga boylu UV radyasyonuna maruz bırakılmalarının ardından TL ışımaya eğrileri kaydedilmiştir. Ayrıca bu fosfor malzemenin en iyi yanıt verdiği 254 nm dalga boylu UV radyasyonu için fosforun doz cevabı ve sönümlenme özelliklerinin belirlenmesine yönelik araştırmalar yapılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Seryum katkılı stronsiyum itriyum borat fosforu katı-hal sentez yöntemi ile sentezlenmiştir. Sentez aşamasında başlangıç malzemeleri olarak uygun stokiometrik oranlardaki yüksek saflıkta SrCO₃ (Sigma-Aldrich>%99,9), H₃BO₃ (Sigma-Aldrich, ≥%99,5) ve Y₂O₃ (Sigma-Aldrich>%99,999) ve % 1 mol Ce₂O₃ nadir toprak oksiti kullanılmıştır. Yüksek sıcaklıkta bir miktar boronun buharlaşmasını telafi etmek için H₃BO₃ örneğinin miktarı hesaplanan orandan

ağırlıkça %5 fazla olarak ilave edilmiştir. Ham maddelerin tartımı ve karıştırma işlemi azot atmosferi altında yapılmıştır. Hazırlanan ham karışım platin kroze kullanılarak $1350^{\circ}C$ ' de indirgenmiş bir atmosfer altında (%15 H_2 ve %85 N_2) iki saat sinterlenmiş ve ardından fırında yaklaşık olarak 24 saat boyunca soğumaya bırakılmıştır. Toz numunelerin faz saflığı ve faz yapısı $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ Cu K_{α} spektrumlu X-ışını

difraktometresi (Philips X'Pert Pro) ile karakterize edilmiştir. Sentez aşamasından sonra elde edilen fosfor örneğinin gün ışığı ve 254, 302 ve 365 nm UV radyasyonu altındaki görüntüleri Şekil 1'de verilmiştir. UV radyasyonu altındaki parıltılamaları bu örneğin fosfor uygulamalarında umut verici olduğunu göstermiştir.



Şekil 1. Ce^{+3} ile katkılanmış $Sr_3Y_2(BO_3)_4$ örneğinin gün ışığı, 254 nm, 302 nm ve 365 nm dalgaboylu UV radyasyonu altındaki görüntüleri

Sentezlenen örneğin TL ışımaya eğrilerinin ölçülebilmesi için 254, 302 ve 365 nm dalga boyuna sahip Philips TL 01 UVB ışık kaynağı ile ışınlamaları yapılmıştır. Işınlama işleminden sonra Harshaw TLD okuyucu kullanılarak azot atmosferi altında $2^{\circ}C.s^{-1}$ lineer ısıtma hızıyla $50^{\circ}C$ ile $400^{\circ}C$ 'lik sıcaklık aralığında fosforun ışımaya eğrileri kaydedilmiştir. Sentezlenen malzemenin en iyi yanıt verdiği 254 nm UV ışık kaynağı ile TL doz cevabı ölçümleri için malzeme 1, 5, 10 ve 20 dakikalık sürelerde ışınlanarak ışımaya eğrileri alınmıştır. Elde edilen ışımaya eğrilerinin altında kalan alandan yararlanarak doz cevap eğrisi belirlenmiştir. Sönümlenme ölçümleri için $Sr_3Y_2(BO_3)_4:Ce^{+3}$ fosforu 5 dakika 254 nm UV radyasyonuna maruz bırakıldıktan sonra beklemeden ve aynı süre ışınlamanın ardından 10, 20, 40 ve 60 dakika karanlıkta bekledikten sonra alınan ışımaya eğrileri TLD okuyucu ile ayrı ayrı kaydedilmiştir.

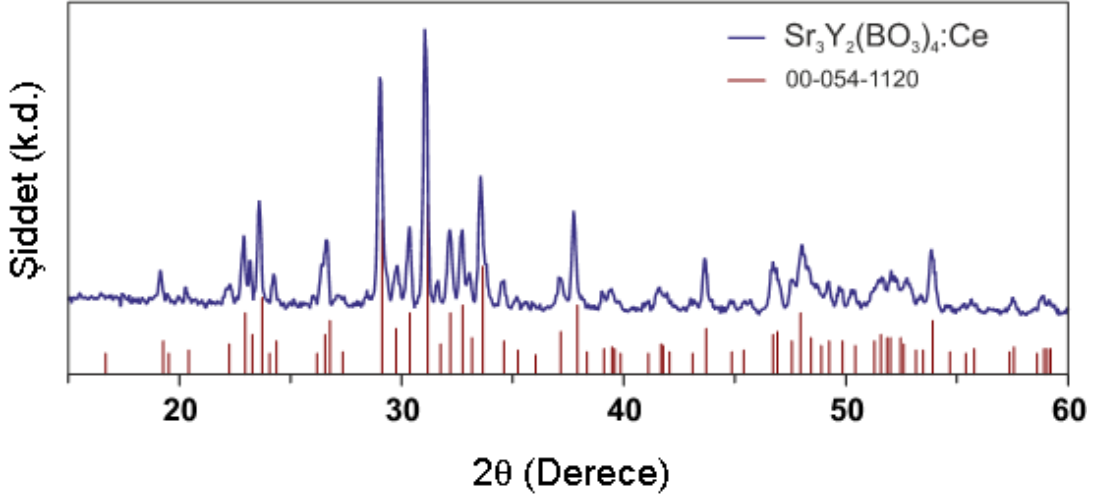
BULGULAR VE TARTIŞMA

Seryum katkılı stronsiyum itriyum borat ($Sr_3Y_2(BO_3)_4:Ce^{+3}$) fosforu geleneksel katihal sentez yöntemiyle elde edilmiştir. Fosforun ölçülen X ışını kırınımı (XRD) desenleri incelendiğinde ev sahibi $Sr_3Y_2(BO_3)_4$ malzemesinin ortorombik yapıya sahip olduğu referans kırınım deseni ile karşılaştırılarak belirlenmiştir (Şekil 2).

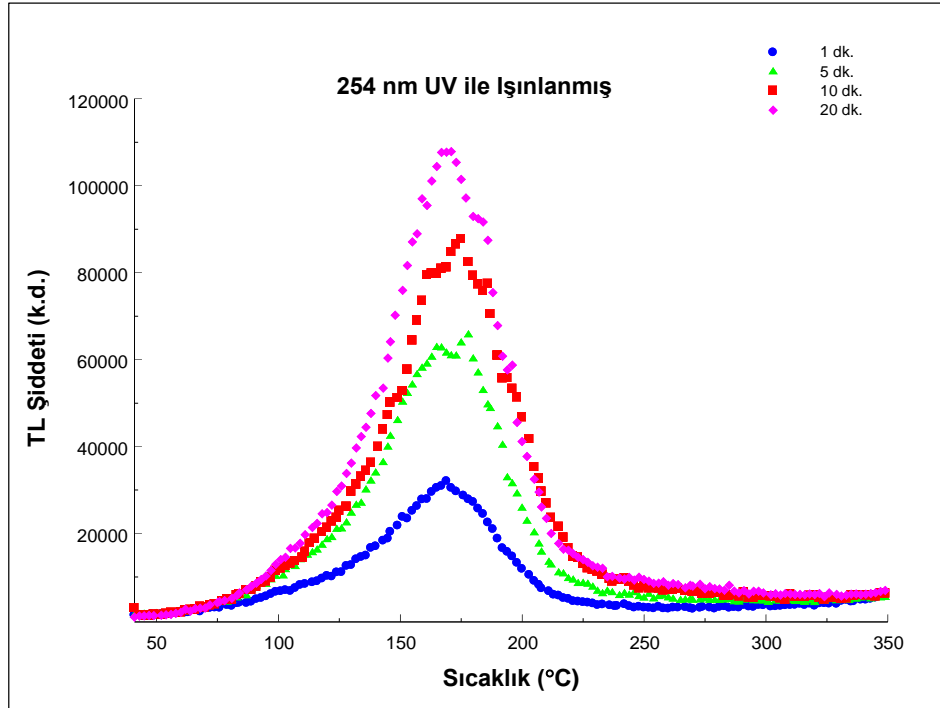
XRD desenlerinde başka faz yapılarına ait desenler görülmediğinden, biçimlenmenin tek fazlı olduğunu söylemek mümkündür. $Sr_3Y_2(BO_3)_4$ ev sahibi malzeme temel alınarak, XRD verileri yardımıyla kristal yapı parametreleri hesaplanmıştır. Ortorombik yapıdaki $Sr_3Y_2(BO_3)_4$ için hesaplanan örgü parametreleri $a \approx 8,6984 \text{ \AA}$, $b \approx 15,9700 \text{ \AA}$, $c \approx 7,3936 \text{ \AA}$, $\alpha = \gamma = \beta = 90^{\circ}$ dir. Elde edilen XRD deseni, hücre hacminin değişmediğini göstermektedir. XRD spektrumlarından da anlaşılacağı üzere %1 mol NTE (Ce^{+3}) katkılanmış örneklerin, $Sr_3Y_2(BO_3)_4$

kristalinin temel ortorombik yapısında bir değişikliğe sebep olmadığı görülmektedir. Tanımlama, uluslararası kırınım verileri merkezi

(ICDD) veri tabanı esas alınarak yapılmıştır (00-054-1120) (Rui ve Xiang, 2011).



Şekil 2. $Sr_3Y_2(BO_3)_4:Ce^{+3}$ fosforunun ve referans malzemenin XRD deseni



Şekil 3. Farklı sürelerde 254 nm UV ışınlamasına maruz bırakılan $Sr_3Y_2(BO_3)_4:Ce^{+3}$ fosforunun termolüminesans ışınma eğrileri

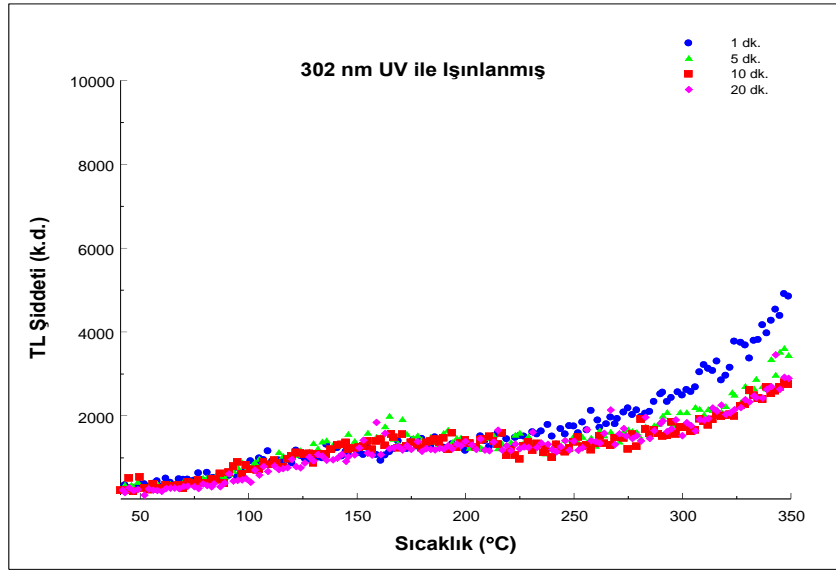
Sentezlenen fosfor malzemenin 254 nm dalga boylu UV radyasyonuna maruz bırakıldıktan sonra elde edilen termolüminesans ışınma eğrileri incelendiğinde yaklaşık 170°C de bir pike sahip olduğu gözlemlenmektedir (Şekil 3). Bununla birlikte 302 nm (Şekil 4) ve 365 nm (Şekil 5)

dalga boylu UV radyasyonu ile ışınlamaların ardında elde edilen ışınma eğrilerinin ise 75-250°C aralığında uzanan geniş bir bant şeklinde olduğu görülmektedir.

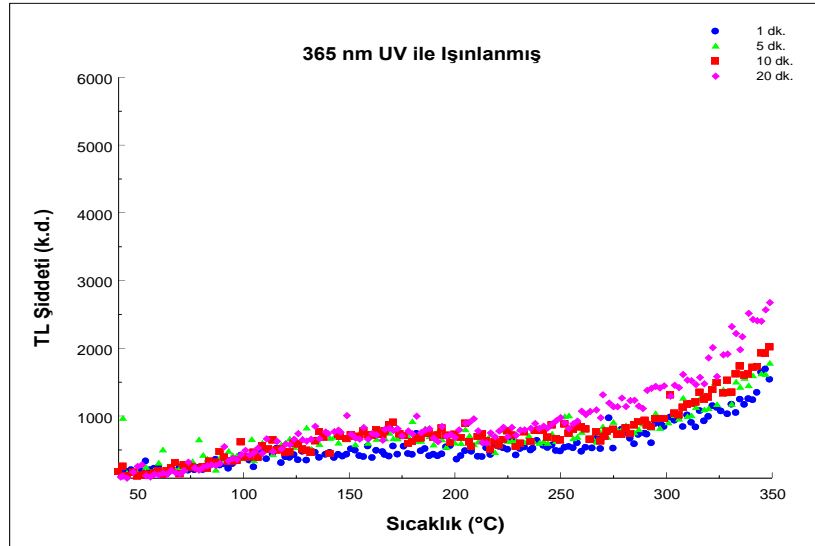
Bir dozimetrenin doz ölçümünde kullanılabilirliğinin incelenmesine yönelik

araştırmaların başında doz cevabının belirlenmesi gelir. Doz cevabının doğrusal ya da iyi bilinen bir fonksiyona sahip olması gerekmektedir. Doz cevabının incelenmesi amacıyla $Sr_3Y_2(BO_3)_4:Ce$ fosforu 1, 5, 10 ve 20 dakikalık sürelerde 254, 302 ve 365 nm dalga boylu UV radyasyonuna maruz bırakılmasının ardından ışımaya eğrileri ölçülmüştür (Şekil 3-5). 302 ve 365 nm ışınlanmasının ardından elde

edilen doz cevaplarında ışımaya eğrisindeki artışın net olarak gözlenmemesi bu dalga boyları için bu fosforun TL doz ölçümleri için uygun olamayacağını düşündürmüştür. Bu nedenle bundan sonraki aşamalarda sadece 254 nm UV radyasyonu ile ışınlanmış $Sr_3Y_2(BO_3)_4:Ce$ fosforunun termolüminesans cevaplarının incelemeleri ile ilgili çalışmalara devam edilmiştir.



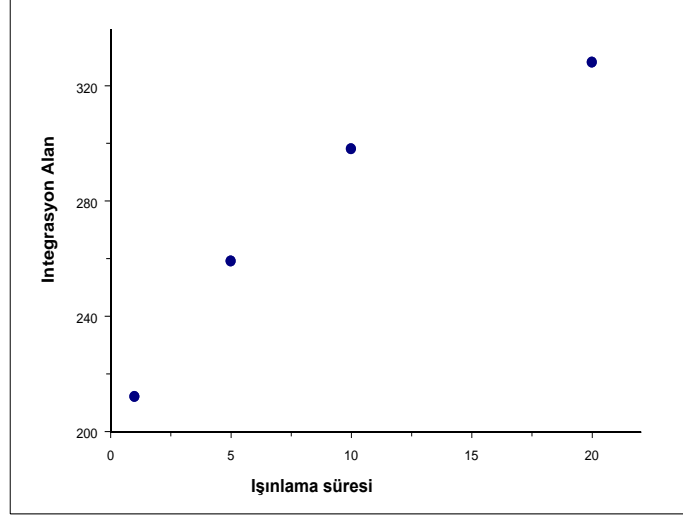
Şekil 4. Farklı sürelerde 302 nm UV ışınlanmasına maruz bırakılan $Sr_3Y_2(BO_3)_4:Ce^{+3}$ fosforunun termolüminesans ışımaya eğrileri



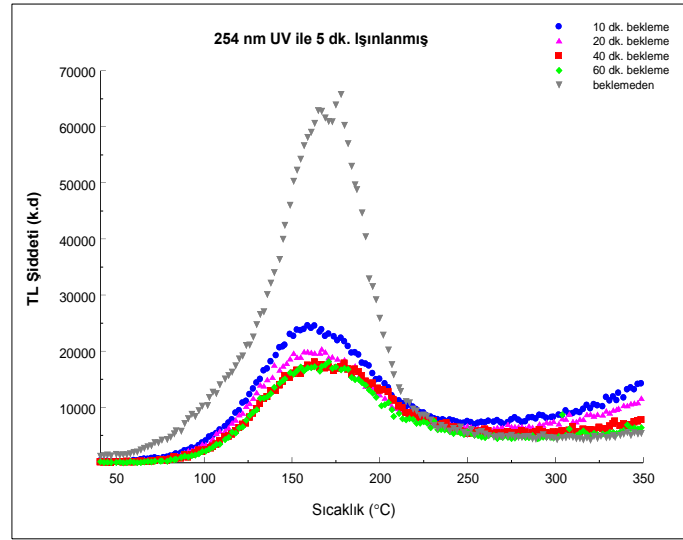
Şekil 5. Farklı sürelerde 365 nm UV ışınlanmasına maruz bırakılan $Sr_3Y_2(BO_3)_4:Ce^{+3}$ fosforunun termolüminesans ışımaya eğrileri

50-250°C aralığında alınan integrasyonlardan yararlanarak çizilen doz cevap eğrisinde yaklaşık 10 dakikalık dozlamaya kadar doz cevabında bir lineerlik gözlemlenirken, 10 dakikadan sonra lineer altı bir davranış sergilediği görülmüştür (Şekil 6). Bunun nedeni bu süreden sonra malzemenin doyuma ulaşması olarak

açıklanabilir. Şekil 3’de malzemenin artan radyasyon dozu ile ışımaya eğrisinin değişimi incelendiğinde pik yerinde belirgin bir değişimin gözlenmesi nedeniyle birinci derece kinetik mertebeye uygun olmadığı belirlenmiştir (Kafadar ve ark., 2009).



Şekil 6. 254 nm UV ışınlamasına maruz bırakılan $Sr_3Y_2(BO_3)_4:Ce^{+3}$ fosforunun termolüminesans doz cevap eğrisi



Şekil 7. $Sr_3Y_2(BO_3)_4:Ce$ fosforunun 254 nm dalga boyulu UV ışınlamasının ardından beklemeden ve farklı bekleme sürelerinin ardından kaydedilen termolüminesans ışımaya eğrileri

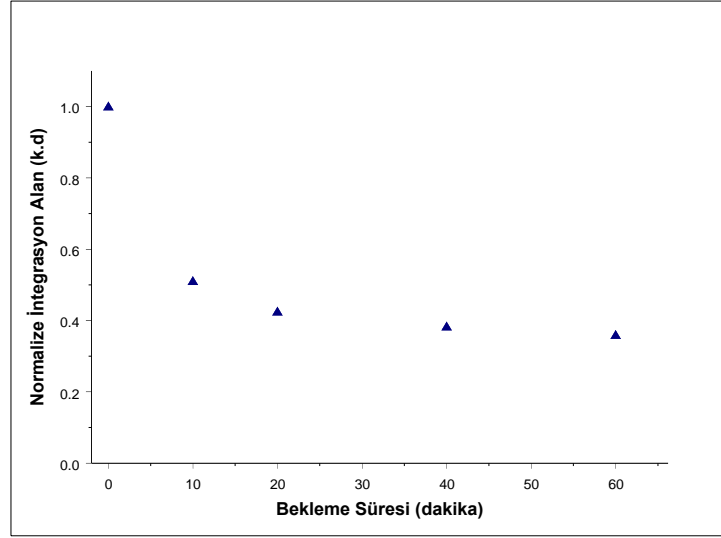
$Sr_3Y_2(BO_3)_4:Ce$ fosforunun ışınlanmanın ardından karanlık ortamda ve oda sıcaklığında, maruz kaldığı dozu ne kadar koruyabildiğinin belirlenmesiyle ilgili olarak sönmüleme ölçümleri yapılmıştır. Bu amaçla 254 nm UV

radyasyonuna 5 dk bırakıldıktan sonra beklemeden ve aynı doza maruz bırakıldıktan sonra 10, 20, 40 ve 60 dakikalık bekleme sürelerinin ardından fosforun ışımaya eğrileri kaydedilmiştir (Şekil 7). İlk 10 dakikada ışımaya sinyalinin,

radasyona maruz kalmasının hemen ardından beklemeden yapılan ışımaya ölçümünün integrasyon alanına göre %50 azaldığı, 40 dakikalık beklemeden ardından ise ilk sinyale göre %60 azalarak ışımaya sinyalinin sabitlendiği belirlenmiştir (Şekil 8).

Elde edilen sönümle sonucuna göre fosforun 254 nm UV doz ölçümünde kullanılabilmeye

elverişli olabileceği düşünülmektedir. Seryum katkılı stronsiyum itriyum borat malzemesiyle çalışmaların malzemenin farklı radyasyon kaynaklarına maruz bırakılmasının ardından ışımaya ölçümlerinin değerlendirmesiyle devam etmesi planlanmaktadır. Ayrıca malzemenin radyolüminesans ve fotolüminesans ölçümlerinin yapılması hedeflenmektedir.



Şekil 8. $Sr_3Y_2(BO_3)_4:Ce$ fosforunun 254 nm dalga boyulu UV ışınlanmasının ardından beklemeden elde edilen ışımaya sinyale göre normalize edilmiş ışımaya cevapları

SONUÇ

Seryum katkılı stronsiyum itriyum borat fosforu geleneksel katı-hal sentez metoduyla sentezlenmiştir. Sentezlenen bu fosforun termolüminesans ışımaya ölçümleri UV ışınlanmasının ardından incelenmiştir. $Sr_3Y_2(BO_3)_4:Ce^{3+}$ fosforunun 302 ve 365 nm dalgaboyu ile ışınlanmasının ardından ölçülen termolüminesans ölçümlerinde fosforun bu dalga boylarına duyarlılıklarının çok fazla olmadığı gözlemlenmiştir. Fosforun 254 nm dalga boyu ile ışınlanmasının ardından elde edilen termolüminesans ışımaya ölçümlerine duyarlı olduğu ve 10 dakikalık ışınlamaya kadar doz cevabının lineer olduğu belirlenmiştir. 254 nm dalga boyuna sahip UV radyasyon ile ışınlanmasının ardından sönümleme özellikleri açısından 40 dakikalık beklemeden ardından ışımaya sinyalinin sabitlendiği görülmüştür.

Seryum katkılı $Sr_3Y_2(BO_3)_4$ fosforuyla ilgili olarak literatürde herhangi bir termolüminesans çalışmasına rastlanmaması bu çalışmanın yapılmasına motivasyon olmuştur.

KAYNAKLAR

- Chang CK, Chen TM, 2007. $Sr_3B_2O_6:Ce^{3+}, Eu^{2+}$: A potential single-phased white-emitting borate phosphor for ultraviolet light-emitting diodes. *Applied Physics Letters*, 91 (8): 081902.
- Kafadar VE, Yazıcı AN, Yıldırım RG, 2009. Determination of trapping parameters of dosimetric thermoluminescent glow peak of lithium triborate (LiB_3O_5) activated by aluminum. *Journal of Luminescence*, 129 (7): 710–714.
- Kim CH, Kwon IE, Park CH, Hwang YJ, Bae HS, Yu BY, Pyun CH, Hong G Y, 2000. Phosphors for plasma display panels. *Journal of Alloys and Compounds*, 311 (1): 33-39.

- Kuo TW, Chen TM, 2010. Synthesis and luminescence properties of Eu^{3+} , Ce^{3+} and Tb^{3+} -activated $\text{Sr}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$ under UV excitation. *Journal of Luminescence*, 130 (3): 483–487.
- Kwon KH, Im WB, Jang HS, Yoo HS, Jeon DY, 2009. Luminescence properties and energy transfer of site-sensitive $\text{Ca}_{6-x-y}\text{Mg}_x\text{-z}(\text{PO}_4)_4:\text{Eu}^{2+}$, Mn^{2+} phosphors and their application to near-UV led-based white LEDs. *Inorganic Chemistry*, 48 (24): 11525–11532.
- Li K, Chen DQ, Zhang R, Yu YL, Xu J, Wang YS, 2013. Enhanced luminescence in $\text{Ce}^{3+}/\text{Dy}^{3+}:\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ phosphors via energy transfer. *Materials Research Bulletin*, 48 (5): 1957-1960.
- Qi XD, Liu CM, Kuo CC, 2010. Pr doped LaTiNbO_6 as a single phosphor for white LEDs. *Journal of Alloys and Compounds*, 492 (1-2): L61–L63.
- Rao BV, Jang K, Lee HS, Yi SS, Jeong JH, 2010. Synthesis and photoluminescence characterization of RE^{3+} ($=\text{Eu}^{3+}$, Dy^{3+})-activated $\text{Ca}_3\text{La}(\text{VO}_4)_3$ phosphors for white light-emitting diodes. *Journal of Alloys and Compounds*, 496 (1-2): 251–255.
- Rui Z and Xiang W, 2011. Preparation and luminescent characteristics of $\text{Sr}_3\text{RE}_2(\text{BO}_3)_4:\text{Dy}^{3+}$ ($\text{RE} = \text{Y, La, Gd}$) phosphors for white LED. *Journal of Alloys and Compounds*, 509 (4): 1197–1200.
- Shyichuk AA, Lis S, 2011. Photoluminescence properties of nanosized strontium-yttrium borate phosphor $\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4:\text{Eu}^{3+}$ obtained by the sol-gel Pechini method. *Journal of Rare Earths*, 29 (12): 1161-1165.
- Song EH, Zhao WR, Zhang W, Ming HC, Yi YC, Zhou MK, 2010. Fluorescence emission spectrum and energy transfer in Eu and Mn co-doped $\text{Ba}_2\text{Ca}(\text{BO}_3)_2$ phosphors. *Journal of Luminescence*, 130 (12): 2495-2499.
- Wang Q, Deng DG, Hua YJ, Huang LH, Wang HP, Zhao SL, Jia GH, Li CX, Xu SQ, 2012. Potential tunable white-emitting phosphor $\text{LiSr}_4(\text{BO}_3)_3:\text{Ce}^{3+}$, Eu^{2+} for ultraviolet light-emitting diodes. *Journal of Luminescence*, 132 (2): 434-438.
- Wei Q, Li XZ, Wang GJ, Song MJ, Wang ZJ, Wang GF, Long XF, 2008. Growth and spectroscopic properties of Ho^{3+} doped $\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ crystal. *Optical Materials*, 30 (10): 1495-1498.
- Wei Q, Li XZ, Wang ZJ, Long XF, 2009. Growth and spectroscopic properties of Pr^{3+} doped $\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ crystal. *Materials Research Innovations*, 13 (1): 2-6.
- Wu X, Liang Y, Liu S, Zhu Y, Xu R, Tong M & Li, 2017. Investigation of the luminescence properties and thermal stability of dysprosium, terbium, and europium ions singly- and co-doped strontium yttrium borate phosphors. *Spectroscopy Letters*, 50 (1): 48–54.
- Ye S, Xiao F, Pan YX, Ma YY, Zhang QY, 2010. Phosphors in phosphor-converted white light-emitting diodes: Recent advances in materials, techniques and properties. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 71 (1): 1-34.
- Zhang XM, Seo HJ, 2011. Thermally stable luminescence and energy transfer in Ce^{3+} , Mn^{2+} doped $\text{Sr}_2\text{Mg}(\text{BO}_3)_2$ phosphor. *Optical Materials*, 33 (11): 1704-1709.
- Zhang Y, Li Y, 2004. Red photoluminescence and crystal structure of $\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$. *Journal of Alloys and Compounds*, 384 (1): 88–92.
- Zhang Y, Lin ZB, Hu ZS, Wang GF, 2004. Growth and spectroscopic properties of Nd^{3+} -doped $\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ crystal. *Journal of Solid State Chemistry*, 177 (9): 3183-3186.
- Zhang Y, Wang GF, 2010. Growth and optical properties of Yb^{3+} doped $\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ crystal. *Materials Research Innovations*. 14 (4): 277-279.
- Zhang Y, Lin Z, Wang, G, 2013. Synthesis, growth, structure and characterization of the new laser host crystal $\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$. *Laser Physics Letters*. 10 (7): 075806 (7pp).