

Sm³⁺ ve Dy³⁺ Katkılı Borosilikat Camlarının Fotolüminesans Özelliklerinin İncelenmesi

Sevim ALIŞIR, Berk GÜNAYDIN, Gülsüm GÜLER

¹ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Samsun.

e-posta: sevimh@omu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7296-8318>

e-posta: berkgunaydin208@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6840-770X>

e-posta: gulsumguler56@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1289-8087>

Geliş Tarihi: 27.08.2019 ; Kabul Tarihi: 12.09.2019

Öz

Anahtar kelimeler

“Sol Jel Yöntemi;
Borosilikatlı Camlar;
Fotolüminesans;
Termal Analiz”

Bu çalışmada, farklı oranlarda Sm³⁺ ve Dy³⁺ katkılu alüminyum oksit-borosilikat camları üretildi. Sol-jel tekniği ile oda koşullarında üretilen amorf ürünlerin XRD, TGA ve FTIR spektroskopisi ile karakterizasyonu yapıldı. Elde edilen ürünlerin 1000°C ye kadar termal kararlılık sergilediği belirlendi. Sm³⁺ ve Dy³⁺ katkılu camların, katı halde oda koşullarındaki fotolüminesans özellikleri araştırıldı. Çalışmamızda 349 nm ışınla uyarılan katı numunelerin görünür bölge (400-900 nm) ve yakın IR (900-1800 nm) bölgedeki durulma spektrumları incelendi. Görünür bölge durulma spektrumlarından eklenen Sm³⁺ ve Dy³⁺ oranı arttıkça camların lüminesans özelliğinin arttığı belirlendi. Yakın IR bölgede ise disprosyum oranı arttıkça 960 ve 1145 nm deki durulma piklerinin şiddetinin arttığı belirlendi.

Investigation of The Photoluminescence Properties of Aluminum oxide-Borosilicate Glasses Doped with Sm³⁺ and Dy³⁺

Abstract

Keywords

“Sol Gel Method;
Borosilicate Glasses;
Photoluminescence;
Thermal Analysis”

In this study, aluminum oxide-borosilicate glasses doped with different ratios of Sm³⁺ and Dy³⁺ have been produced by sol-gel technique in room conditions. The glasses were characterized by X-ray diffraction (XRD), TGA and FT-IR spectroscopy. Powder XRD analyses show that the synthesized glass samples are in amorphous form. It was determined that the products obtained had thermal stability up to 1000°C. The solid-state emissions spectrums of Sm³⁺ and Dy³⁺ doped glasses excited at 349 nm have been examined in the visible (400-900 nm) and near IR (900-1800 nm) region at room temperature. In order to see the changes in emission spectrum of the glasses, we also measured the photoluminescence spectrum of non-doped aluminum oxide-borosilicate glass. In the visible region, it was determined that the luminescence intensity of the glasses enhanced as the Sm³⁺ ve Dy³⁺ ratio increased. In the emission spectra of Dy³⁺ doped glasses, it was observed that the intensity of peaks in the NIR region (at 960 and 1145 nm) increased with increasing dysprosium ratio.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Günümüzde termal şok dayanımı çok yüksek olan borosilikat camlarının, ısıya ve kimyasal reaksiyonlara karşı oldukça kararlı olması

nedeniyle birçok sektörde kullanıldığını görülmektedir. Özellikle radyasyon soğurucu cam malzeme olarak kullanılan toksik kurşunlu camların yerine, transparanlıkları daha iyi olan yüksek atom numarasına sahip ağır metal oksit

katkılı borosilikat camların geçebileceğini gösteren önemli çalışmalar yapılmaktadır. Bunun dışında lantan serisinden iyonlarla katkılandırılan alüminyum oksit borosilikat camlarının fotoluminesans özellik sergilemelerinden dolayı katı durum lazerleri için uygun olacağı farklı çalışmalarda ortaya konulmuştur.

Dayıoğlu'ın (2017) yaptığı çalışmada, çinko borosilikat camlarına nadir toprak elementlerinin ve geçiş metallerinin ilavesi ile fosforesans özelliğın kazandırılması amaçlanmıştır. Belirlenen 55ZnO-25B₂O₃-20SiO₂ cam bileşimini değiştirmeden yapı içerisinde düşük miktarlarda katkı olarak Tb, Sm, ve Mn elementleri eklenmiştir. Katkı elementinin belirli konsantrasyonlarındaki ışımaya şiddetini ve sönümlenme süresini geliştirmek amacıyla cam bileşimine ikincil katkı elementi olarak nadir toprak elementleri ilave edilmiştir. Elde edilen numunelerden en iyi ışımaya şiddetine ve sönümlenme süresine sahip olan camlarda, ısıl işlemin ve yapıya ilave edilen borik asidin fosforesans özelliklere etkisi incelenmiştir. Borcam olarak bilinen sodyum borat camlarına fosforesans özellik kazandırmak amacıyla, ana matriste çinko oksitin yerine sodyum oksit ilave edilerek fosforesans özelliklerdeki değişimin gözlenmiştir. Sm₂O₃'in katkı elementi olarak kullanıldığı 55ZnO-25B₂O₃-20SiO₂-xSm₂O₃ cam bileşiminde, optimum ışımaya şiddeti % 0.4 mol Sm₂O₃ konsantrasyonuna sahip numunede gözlenmiştir. Fakat Sm³⁺ katkı camlar fosforesans özelliğe sahip olmalarına rağmen UV ışık uzaklaştırıldıktan sonra ışımaya gözle görülemeyecek kadar düşük ve kalıcılıklarının olmadığı tespit edilmiştir (Dayıoğlu 2017).

Doğru'nun (2018) yaptığı çalışmada, bir geçiş metali olan krom oksit (Cr₂O₃) tozlarını farklı oranlarda (ağırlıkça % 0–5) borosilikat (BS) cam tozuna ilave ederek, radyasyon zırhlaması amacıyla kullanılabilir fiziksel ve mekanik özellikleri yüksek camlar üretmek amaçlanmıştır. Bu amaç için, BS cam tozu içerisinde farklı oranlarında Cr₂O₃ ilave ederek, presleme ile pellet şeklinde örnekler üretilmiş ve ardından örnekler 1330 °C'de 10 saat süreyle fırında bir grafit kalıp

içerisinde ergitme ve sentezleme işlemleri yapılmıştır. Üretilen cam örneklerin XRD analizleri yapılmış, Arşimed prensibiyle yoğunlukları ölçülmüş, tahribatsız ultrasonik ölçüm yöntemi ile elastisite modülü, poisson oranı, kesme modülü, hacim modülü gibi özellikleri belirlenmiş ve microsertlik (Vickers) sertlik ölçüm yöntemi kullanılarak sertlik, gevreklik indeksi ve kırılma tokluğu gibi mekanik özellikleri ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda, BS cam örneklerin yoğunluk, sertlik, elastisite modülü, kesme modülü ve hacim modülü değerlerinin Cr₂O₃ miktarının artışı ile birlikte doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir (Doğru 2018).

Albaşkara (2017) yaptığı yüksek lisans tez çalışması kapsamında, BS camlara nadir toprak metal oksit bileşikleri CeO₂ ve Er₂O₃ farklı oranlarda katılarak, radyasyon zırhlamaya yönelik camlar üretmiş ve bu camların mekanik özellikleri incelemiştir. BS cam tozuna {(100-x)B₂O₃-SiO₂-Na₂O-Al₂O₃} farklı oranlarda {x=0.5, 1, 3, 5, 10 ve 20 oranlarında} CeO₂ ve Er₂O₃ katkı yapılarak manuel hidrolik pres yardımıyla pellet şeklinde preslenmiştir ve ardından numuneler cam kompozisyonuna bağlı olarak fırında 1400-1450 °C sıcaklık aralığında 1 saat süreyle ergitilmiştir. Ardından camsı yapı oluşturmak için numuneler açık havada hızlı bir şekilde soğutulmuştur. Camlaşan CeO₂ ve Er₂O₃ katkı BS numunelerin sertlikleri, mikrosertlik (Vickers) yöntemiyle ölçülerek kırılma tokluğu ve gevreklik davranışları değerlendirilmiştir. CeO₂ ve Er₂O₃ katkı BS numunelerin sertliklerinin %0–10 katkı aralığında arttığı ve %20 katkı miktarında ise azaldığı bulunmuştur. CeO₂ ve Er₂O₃ katkı miktarı arttıkça BS camların köprülü oksijen sayısının ve atomik paketlenme yoğunluğunun arttığı bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar CeO₂ ve Er₂O₃ katkı BS cam numunelerin mekanik özellikler bakımından iyi özellikler gösterdiğini ortaya koymuştur. Dolayısıyla bu camların radyasyon zırhlamasında kullanılabilmesi için mekanik yönden herhangi bir engelin söz konusu olmadığını ispatlamıştır (Albaşkara 2017).

Koseva ve arkadaşlarının (2018) yaptığı çalışmada, Li₂O-Al₂O₃-SiO₂-LiBO₂ silikat cam

seramik sistemine (19.6: 19.6: 39.1: 21.7 mol%), % 0.5 Tb³⁺ ve % 0.1 Eu³⁺ eklenmiş ve özellikleri araştırılmıştır. Ana-seramiklerin iki farklı sıcaklıkta (580 ve 630 ° C) ve üç farklı süre (2, 5 ve 24 saat) ısıtılmasından sonra cam-seramikler elde edilmiştir. İncelenen optik özellikleri sonucunda terbiyum katkılı cam seramiklerin mavi-yeşil, Europium katkılı cam seramiklerin ise turuncu-kırmızı bir fosfor olarak kullanılabilmesi ifade edilmiştir. Farklı ısıtma işlemleri kullanılarak farklı emisyon renkleri elde edilebileceğine değinilmiştir (Koseva *et al.* 2018)

Luo ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada CaO-Al₂O₃-B₂O₃-SiO₂ cam sistemine CaO içeriğinin mikroyapı, sinterleme ve diğer özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, uygun bir CaO ilavesinin yapıya daha mükemmel mekanik ve dielektrik özellik kazandırdığını göstermiştir (Luo *et al.* 2016).

Qiu arkadaşlarının yaptığı çalışmada Eu⁺² ve Eu⁺³ ün birlikte olduğu borosilikat cam sistemindeki fotolüminesans ve manyetik özelliklerdeki değişim incelenmiştir. Cam bileşiminin B₂O₃/BaO oranlarındaki değişimin Eu³⁺ iyonlarının stabilitesini belirgin bir şekilde değiştirdiği belirlenmiştir. Özellikle, hazırlanan borosilikat camlarının, Eu³⁺ iyonlarının geçişleri nedeniyle yaklaşık 592 ve 617 nm'de turuncu-kırmızı emisyonu verdiği belirlenmiştir. Bu dalga boyu AlInGaN çiplerinde ve YAG: Ce³⁺ dan yayılan dalga boyuna karşılık geldiği ifade edilmiştir (Qui *et al.* 2012).

Shaweta ve arkadaşlarının yaptığı çalışma, samaryum konsantrasyonunun, 20PbO-(10x)Al₂O₃-70B₂O₃-xSm₂O₃ (%x: 0.1, 0.5, 1.0 ve 2.0 mol) kurşun alüminyum borat camlarının fiziksel, yapısal ve spektroskopik özellikleri üzerindeki etkisini rapor etmiştir. Camlar geleneksel olarak eriyik söndürme tekniği ile imal edilmiş ve daha sonra XRD, FTIR, optik absorpsiyon ve floresans spektrumları ile karakterize edilmiştir. Hazırlanan camlarda kırmızımsı-turuncu spektral bölgede yayılan görünür ışın demetinin, lazerlerin geliştirilmesinde kullanılabilmesi ifade edilmiştir. Bununla birlikte % 1 mol Sm₂O₃ içeren camın

daha iyi ışımaya özellikleri gösterdiği bulunmuştur (Shaweta *et al.* 2017).

Costa ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ağırlıkça %1, 2, 5 ve 10 oranında Sm₂O₃, 5Na₂O-10Al₂O₃-85SiO₂ ve 10Al₂O₃-90SiO₂ bileşim sistemlerine katılmıştır. Numunelerin yayılım ve yayılım ömrü üzerine çalışma yapılmıştır. Sm²⁺ iyonlarının lüminesans özellikleri, Sm₂O₃ konsantrasyonuna ve cam matris kompozisyonuna bağlı olduğu belirlenmiştir (Costa *et al.* 2002).

Man ve arkadaşlarının (2017) yaptığı çalışma ile; Eu³⁺/Dy³⁺ tek tek ve birlikte katılan, 6SrO-3Al₂O₃-91SiO₂ ve 12SrO-6Al₂O₃-82SiO₂ cam seramikleri sol-gel yöntemi ile başarılı bir şekilde sentezlenmiştir. Hazırlanan örnekler, X-ışını difraksiyonu, TEM, foto-ışıldama spektrumları ve X-ışını fotoelektron spektroskopisi ile karakterize edilmiştir. Tavlama sıcaklığının, katkı iyonların ve matris bileşiminin yapı ve fotolüminesans özelliklerine etkisi sistematik olarak incelenmiştir. Sonuç olarak Sr₂SiO₄ nanokristalleri silikat camlarında tavlama sıcaklığının artmasıyla, cam durumundan cam seramik durumuna dönüştüğü belirlenmiştir. Ayrıca bu durumda nadir toprak iyonlarının ışık verimliliğini artırdığı ortaya konulmuştur. Sonuç olarak fotolüminesans özelliğe eklenen iyonun, tavlama sıcaklığının ve matris bileşim oranının etkili olduğu belirlenmiştir. (Man *et al.* 2017).

Sun ve arkadaşları (2016), sol-jel yöntemiyle üretilen ve bileşimleri; 5MgO-5Ga₂O₃-90SiO₂ ve 10MgO-10Ga₂O₃-80SiO₂ olan 2 farklı cam numunelerine 0,5 mol oranında Erbiyum ve farklı mol oranlarında (0,5-2,5-5 molar) İterbiyum nadir toprak elementleri ilave ederek özelliklerini araştırmıştır. Diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC) ve termogravimetri (TG) ile bu camların termal davranışları incelemiş, XRD analizi ile kalsine edilmiş numunelerin kristalizasyonu ve faz tanımlaması yapılmıştır. Sonuç olarak Er³⁺ ve Yb³⁺ katkılı cam karşılaştırıldığında, cam seramiklerin NIR ve lüminesans yoğunluklarında önemli bir artış bulunmuştur. İncelenen bu cam seramiklerin, lazerler için ümit verici

uygulamalara sahip olduğu ifade edilmiştir (Sun et al. 2016).

Fneich ve arkadaşlarının (2018) çalışmasında sol jel yöntemi kullanılarak hazırlanan Eu³⁺ katkı silika camlarının, 900°C de tavlama işleminden önce ve sonra fotolüminesans özellikleri araştırılmıştır. Malzemedeki nadir toprak iyonlarının ışıltama özelliklerini geliştirmek için birçok çalışmada alüminyum kullanılmış olmasına rağmen bu çalışmada alternatif bir element olan magnezyum üzerinde yoğunlaşmıştır (Fneich et al. 2018).

Bu çalışmada amacımız, floresans özelliğe sahip, ısıl genleşme katsayısı düşük alüminyum oksit-borosilikat camı üretmektir. Sol-Jel yöntemi ile 70,5 SiO₂ – 20,5 B₂O₃ – 4,5 Al₂O₃ cam bileşimine, farklı oranlarında samaryum (III) ve disprosyum (III) nitrat eklenerek elde edilen ürünlerin fotolüminesans özellikleri incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Kullanılan tüm kimyasallar Aldrich ve Merck firmalarından temin edilmiştir. Hazırlanan numunelerin FT-IR analizleri, Perkin Elmer Spectrum TwoFT-IR spektrometresi marka cihazı ile 4000-600 cm⁻¹ aralığında oda sıcaklığında ATR tekniği kullanılarak yapıldı. 1000 °C'ye kadar statik hava atmosferindeki (10 °C/dak.) termal davranışları Shimadzu DTG-60 thermal analizler cihazı ile belirlendi. Ürünlerin toz kırınım desenleri Rigaku marka toz XRD cihazı ile 20-80° aralığında (2°/dak.) alındı. Fotolüminesans özellikleri ise Perkin Elmer LS55 cihazı ile belirlendi.

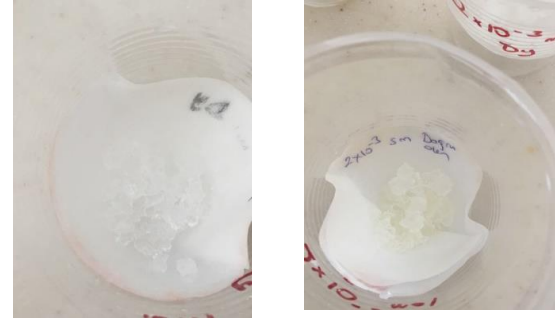
2.2. Metot

1. Adım: 10 mL tetraetil ortosilikat (TEOS) içerisine 3 mL Etanol ve 0,4 M'lık HNO₃ çözeltisinden 4 mL eklenerek manyetik karıştırıcıda 1 saat karıştırıldı.

2. Adım: 0,147 g α-Al₂O₃ 2 ml seyreltik HNO₃ çözeltisi eklenerek 5 mL suda çözeltisi hazırlandı.

3. Adım: α-Al₂O₃ yerine 0,817 g H₃BO₃ kullanarak çözelti hazırlandı. Son iki adımdaki çözeltiler TEOS üzerine eklendi. Yarım saat karıştırıldı. Lantan grubu eklenmemiş olan bu çözeltilerden yedi adet hazırlandı. Bir tanesi katkısız kalmak koşuluyla, diğerlerine sırasıyla 5x10⁻⁴, 10⁻³ ve 2x10⁻³ mol Dy(NO₃)₃ •H₂O ve Sm(NO₃)₃•6H₂O eklenerek altı farklı çözelti hazırlandı.

Son çözeltiler pet bardaklara boşaltıldı ve 3 gün sonra oda koşullarında katı numuneler elde edildi (Şekil 1). Saf su ile yıkandıktan sonra termal analizleri yapıldı. Uçucu bileşenleri giderilen numunelerin FTIR, XRD ve fotolüminesans analizleri yapıldı.

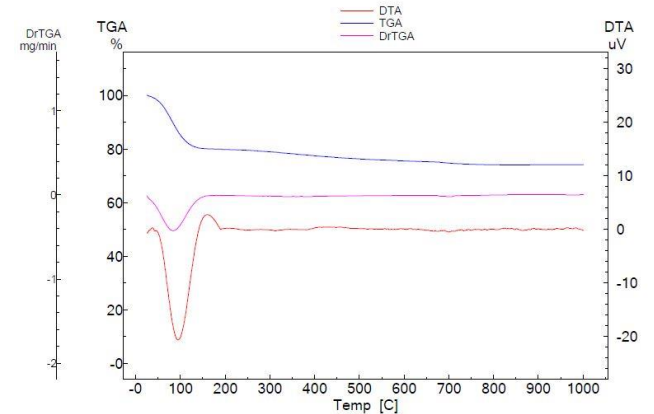


Şekil 1. Dy³⁺ ve Sm³⁺ katkı numuneler

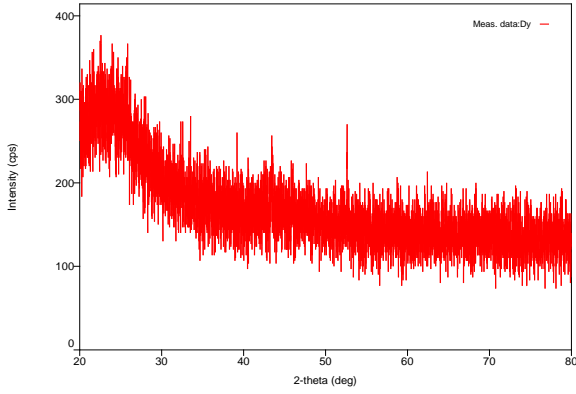
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Termal Analiz Sonuçları

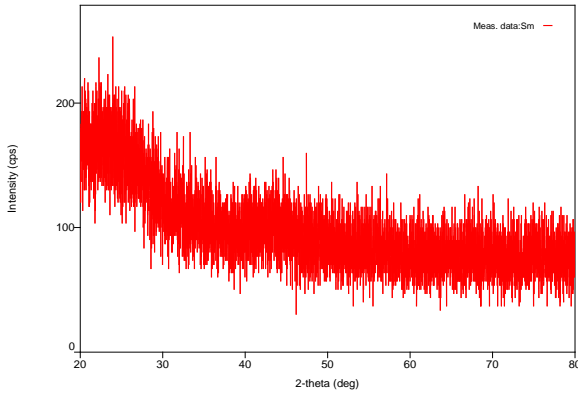
Hazırlanan numunelerin alınan termogramlarına örnek Şekil 2' de verilmiştir.



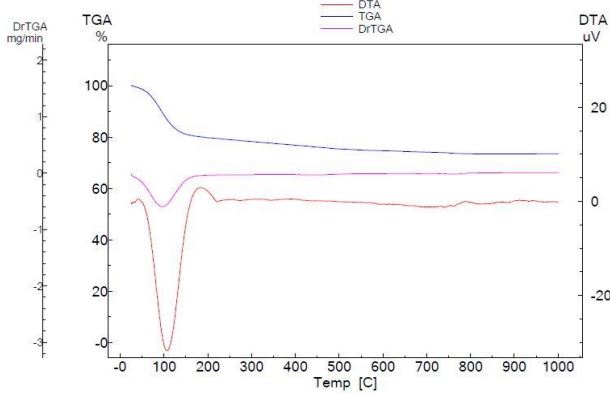
Şekil 2a. Dy³⁺ katkı cam numunesinin termogramları



Şekil 3a. Dy³⁺ Katkılı Numune



Şekil 3b. Sm³⁺ Katkılı Numune



Şekil 2b. Sm³⁺ katkılı cam numunesinin termogramları

Eğrilerden 200 °C'ye kadar, sol-jel reaksiyonu sonucunda oluşan etilalkol ve ortamda bulunan su moleküllerinden kaynaklanan, %20 civarında kütle kaybı olduğu belirlendi. Diğer analizler yapılmadan önce, bu uçucu kısmı yapıdan uzaklaştırmak için, katı numuneler 5 saat boyunca etüvde 200°C' de ısıtılma tabi tutuldu.

3.2. XRD Analizi Sonuçları

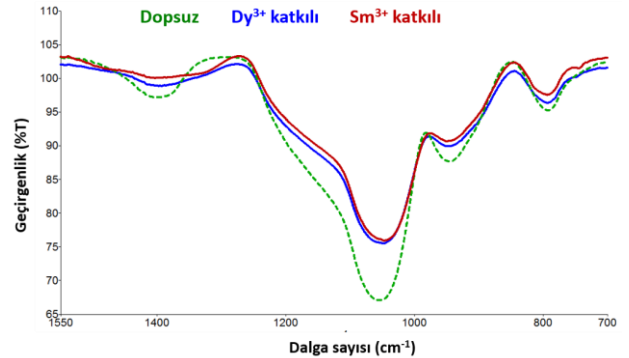
Katkısız borosilikat ve katkılı numunelerin kristallenme oranını belirlemek için Rigaku marka

toz XRD cihazı kullanıldı. Veriler 20°- 80° aralığında dakikada 2° tarama yapılarak toplandı. Şekil 3' te verilen XRD analizi sonucunda elde edilen eğrilerden, numunelerinin amorf yapıda olduğu belirlendi.

3.3. FTIR Analizi Sonuçları

Literatürde yer alan Shao ve arkadaşlarının (2015) yaptığı molibden ve ZrO₂ katkılı borosilikat cam sistemlerinin özellikleri araştırıldığı çalışmada, FT-IR analizi yapılmış buradaki pikler ayrıntılı olarak irdelenmiştir. (Shao *et al.* 2015)

1402 cm⁻¹'de gözlenen pikin trigonal BO₃ birimlerinin B-O bağının simetrik gerilme hareketinden kaynaklandığı belirtilmiştir. 1095 cm⁻¹'de gözlemlenen geniş bandın, Si-O-Si bağlarıyla birlikte BO₃ ve BO₄ gruplarının asimetrik gerilme titreşimine ait olacağı ifade edilmiştir. 925 cm⁻¹'deki bant, BO₄ ünitelerinin B-O titreşimine ve Si-O-B'in gerilmesi ile de ilişkilendirilebileceği rapor edilmiştir. Yaklaşık 795 cm⁻¹'deki bant, O-Si-O'nun simetrik gerilme titreşimine (B-O) bükülme titreşimine atfedilmiştir.



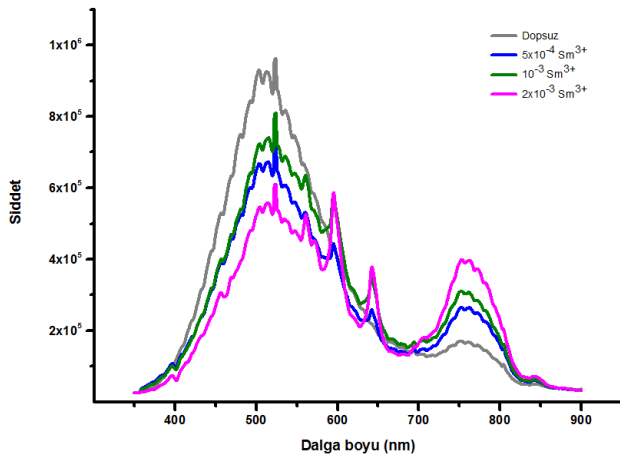
Şekil 4. Katkısız, Dy³⁺ve Sm³⁺ katkılı numunelerin FT-IR spektrumu

Bu çalışma kapsamında numunelerden elde edilen FT-IR spektrumları (Şekil 4) literatür (Shao *et al.* 2015) ile karşılaştırıldığında hemen hemen aynı dalga sayılarında pikler gözlemlendi. Sm³⁺ ile Dy³⁺ numunelerinin dalga sayıları birbirine çok yakın iken katkısız numunenin dalga sayısından daha düşük olduğu belirlendi. Buda eklenen iyonların cam ile kuvvetli etkileşime girdiğini ortaya koymaktadır.

3.4. Fotolüminesans Spektroskopisi Sonuçları

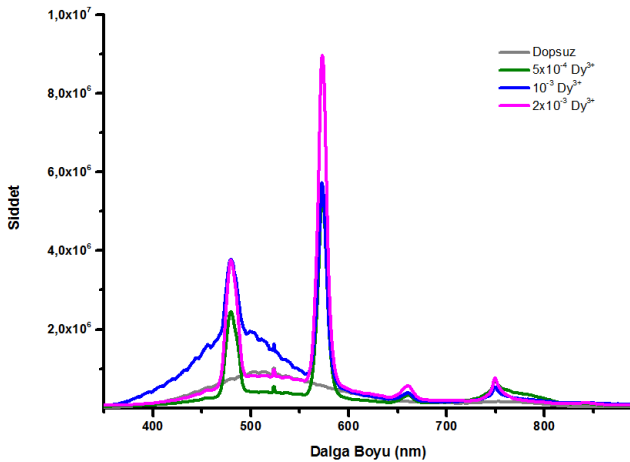
349 nm’de uyarılan numunelerin görünür ve yakın IR bölgedeki yayınım spektrumları incelendi.

Analiz sonucunda Sm³⁺ katkı alüminyum oksit borosilikat camların görünür bölge durulma spektrumlarında 585 (sarı), 630 (kırmızı) ve 760 (kırmızı) nm dalga boylarında yayınım olduğu görülmektedir (Şekil 5). Ayrıca artan Sm³⁺ katkısı ile pik şiddetinin arttığı belirlenmiştir. Sm³⁺ katkı alüminyum oksit borosilikat camların yakın IR bölgede durulma yapmadığı görüldü.



Şekil 5. Katkısız ve Sm³⁺ katkı alüminyum oksit borosilikat camların görünür bölgedeki yayınım spektrumları

Dy³⁺ katkı alüminyum oksit borosilikat camların görünür bölge durulma spektrumlarında 480 (mavi), 568 (sarı), 660 (kırmızı) ve 750 (kırmızı) nm dalga boylarında yayınım olduğu ve artan Dy³⁺ miktarı ile pik şiddetinin arttığı belirlendi (Şekil 6).

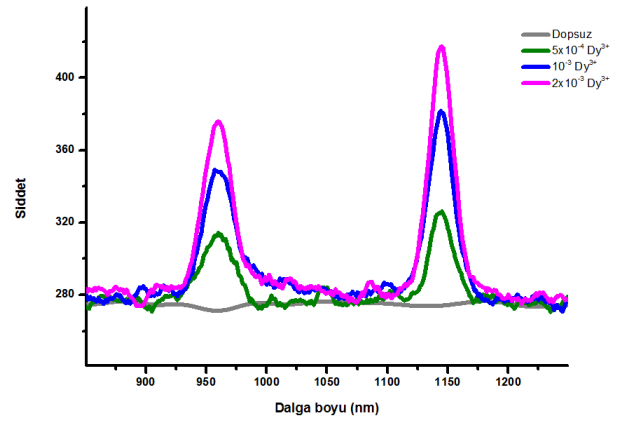


Şekil 6. Katkısız ve Dy³⁺ katkı alüminyum oksit borosilikat camların görünür bölgedeki yayınım spektrumları

Sm³⁺ katkı alüminyum oksit borosilikat camların yakın IR bölgede durulma yaptığı gözlemlendi (Şekil 7). Artan Dy³⁺ oranı ile 960 ve 1140 nm’deki piklerin şiddetinin arttığı belirlendi.

4. Sonuç

Sonuç olarak Sm³⁺ ve Dy³⁺ katkı alüminyum oksit borosilikat cam karşılaştırıldığında, numunelerin görünür ve yakın IR bölgede lüminesans yoğunluklarında önemli bir artış bulunmuştur. İncelenen Dy³⁺/Sm³⁺ katkı alüminyum oksit-borosilikat camları, katı lazer uygulamaları için ümit vericidir.



Şekil 7. Katkısız ve Dy³⁺ katkı alüminyum oksit borosilikat camların yakın IR bölgedeki yayınım spektrumları

Ayrıca hazırlanan Sm³⁺ ve Dy³⁺ katkı alüminyum oksit borosilikat camlarının termal genişleme katsayıları ve radyoaktivite çalışmaları yapılarak savunma sanayinde kullanıma potansiyelleri araştırılabilir.

5. Kaynaklar

- Albaşkara, M. 2017. “Er₂O₃ ve CeO₂ katkı borosilikat camların üretilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi” Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek lisans tezi.
- Costa, V. C., Shen, Y., Santos, A.M.M., Bray, K.L. 2002, “Luminescence measurements on Sm²⁺-doped sol-

- gel glasses” *Journal of Non-Crystalline Solids* **304**, 238-243.
- Dayıoğlu, S. 2017 “Çinko borosilikat camların fosforesans özelliklerinin nadir toprak ve geçiş elementlerinin katkısı ile geliştirilmesi” İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı. Yüksek lisans tezi.
- Doğru, K., 2018. “Krom oksit (Cr₂O₃) katkılı borosilikat camların üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi” Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek lisans tezi.
- Fneich, H., Gaumer, N., Chaussedent, S., Blanc, W., Mehdi, A. 2018 “Europium-Doped Sol-Gel SiO₂-Based Glasses: Effect of the Europium Source and Content, Magnesium Addition and Thermal Treatment on Their Photoluminescence Properties” *Molecules* **23**, 768.
- Koseva, I., Tzvetko, P., Ivanov, P., Yordanova, A., Nikolov, V. 2018. “Rare Earth doped silicate glass-ceramics for LED application” *Bulgarian Chemical Communications* **50**, 173-178.
- Li, B., Bian, H., Jing, K., 2019. “Effect of MnO addition on microstructures and properties of BaO-Al₂O₃-B₂O₃-SiO₂ glass-ceramics for LTCC application” *Materials Letters* **234**, 302–305.
- Luo, X., Ren, L., Xie, W., Qian, L., Wang, Y., 2016. “Microstructure, sintering and properties of CaO–Al₂O₃–B₂O₃–SiO₂ glass/Al₂O₃ composites with different CaO contents” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* **27**, 5446–5451.
- Man, X., Yu, L., Sun, J., Li, S., Zhong, J., 2017. “Synthesis and photoluminescent properties of Eu³⁺/Dy³⁺ doped SrO-Al₂O₃-SiO₂ glass-ceramics”, *Journal of Rare Earths* **35**, 446-452
- Qui, K., Tian, H., Song, J., Mao, Z., Wang, D., 2012. “Multi-wavelength excitable europium-doped borosilicate glasses for orange-red emission: composition-induced structure and valence variation” *Journal of Rare Earths* **30**, 408-412.
- Shao, G., Wu, X., Kong, Y., Cui, S., Shen, X., Jiao, C., 2015. “Thermal shock behavior and infrared radiation property of integrative insulations consisting of MoSi₂/borosilicate glass coating and fibrous ZrO₂ ceramic substrate” *Surface and Coatings Technology* **270**, 154-163.
- Shaweta, M., Simranpreet, K., Singh, D.P., Puneet, K., 2017 “Structural and luminescence properties of samarium doped lead alumino borate glasses” *Optical Materials* **73**, 223-233.
- Sun, J., Yu, L., Li, F., Wei, S., Li, S., 2016. “Up-conversion and near infrared luminescence in Er³⁺/Yb³⁺ co-doped glass-ceramic containing MgGa₂O₄ nano-crystals” *Journal of Luminescence* **170**, 444-450.