

NADİR TORPAQ METALLARI (Dy, Eu, Ce) İONLARI İLƏ LEGİRLƏNMİŞ SİNK TELLURİDİNİN LÜMİNESSENSİYASI

Səadət MƏMMƏDOVA^{1*}, Kazım ƏLİYEV¹, Aytən SULTANOVA¹, Güntəkin ŞÜKÜROVA¹, Sevdə İSMAYİLOVA¹, Əhməd ƏHMƏDOV¹

¹ Bakı Dövlət Universiteti, Bakı, Azərbaycan,

*Yazışılan müəllif: mamedova-2014-mail.r@mail.ru

NƏŞR TARİXİ:

Qəbul edilmə tarixi:
06.06.2026

Nəşr edilmə tarixi:
25.06.2026

AÇAR SÖZLƏR:

Sink telluridi, nadir torpaq metalları, lüminessensiya, europium, disprosium, serium, nazik təbəqələr.

XÜLASƏ

Bu işdə Dy³⁺, Eu³⁺ və Ce³⁺ nadir torpaq metalları ionları ilə legirlənmiş sink telluridinin (ZnTe) nazik təbəqələrinin lüminessent xassələri tədqiq edilmişdir. Təbəqələr monokristallik silisium altlıqlar üzərində vakuum maqnetron püskürtmə üsulu ilə, legirləyici qatqların konsentrasiyası 5 at.%-ə qədər olmaqla alınmışdır. Tədqiqatın əsas məqsədi nadir torpaq ionlarının ZnTe təbəqələrinin struktur və optik-lüminessent xüsusiyyətlərinə təsirinin müəyyən edilməsi olmuşdur. Nümunələrin kristal quruluşu və faza tərkibi rentgenfəz analiz üsulu ilə, səthin morfologiyası və element tərkibi isə enerji dispersiyalı analizlə birlikdə rastrov elektron mikroskopiyası vasitəsilə öyrənilmişdir. Lüminessensiya spektrləri 77 K temperaturda, 338 nm dalğa uzunluqlu azot lazeri ilə həyəcanlandırılaraq 400–870 nm spektral diapazonda qeydə alınmışdır. Müəyyən edilmişdir ki, alınmış təbəqələr polikristallik quruluşa malikdir və sfalerit və vürsit modifikasiyalarında ZnTe fazalarını ehtiva edir. Lüminessensiya spektrlərində Eu³⁺ və Dy³⁺ ionlarının xarakterik zolaqdaxili f–f keçidləri üstünlük təşkil edir. Lüminessensiyanın maksimal intensivliyi yalnız europium ilə legirlənmiş təbəqələrdə müşahidə olunur ki, bu da Eu³⁺ ionlarının elektron konfigurasiyasının xüsusiyyətləri ilə əlaqədardır. Bir neçə nadir torpaq elementi ilə birgə legirləmə zamanı şüalanma intensivliyinin azalması, konsentrasiya sönməsi effekti ilə bağlıdır. Alınmış nəticələr nadir torpaq metalları ilə legirlənmiş ZnTe təbəqələrinin günəş elementləri üçün lüminessent işıqkeçirici örtüklər kimi tətbiq perspektivliyini göstərir.

GİRİŞ

Nadir torpaq metalları ionları ilə legirlənmiş yarımkeçirici əsaslı lüminessent materiallar, lüminessent cihazlarda, informasiya göstərmə qurğularında və günəş energetikasında tətbiq imkanları ilə əlaqədar böyük maraq doğurur (Bünzli J.C.G., Eliseeva S.V., 2013, Mammadova S.O., Aliyev K.A., Shukurova G. M., Jafarova E. K., 2025).

Fotopreobrazovçuların yüksək faydalı iş əmsalı (FİƏ) dəyərlərinə çatdıqda, aktual problem hələ də fotonların udulması nəticəsində baş verən günəş enerjisi itkisi olaraq qalır (Green M.A. 2006, Mammadova S.O., Aliyev K.A., Sultanova A.N., Shukurova G.M., Ismailova S.B., 2026). Bu fotonlar yarımkeçiricinin qadağan zonası genişliyindən yüksək enerji daşıyır və elektron-qatlaq cütlərinin yaranmasında iştirak etmir.

Bu problemin mümkün həll yollarından biri nadir torpaq metalları ionlarının fotolüminessensiya effektindən istifadə etməkdir ki, bu da düşən şüalanmanın spektral tərkibini çevirməyə və onu fotoelementin spektral həssaslıq maksimumu ilə uyğunlaşdırmağa imkan verir.

Lüminessent işıqkeçirici örtüklərin yaradılması üçün perspektivli materiallar arasında (Zhang Y., Li J., Wang X., 2018, Mammadova S.O., Aliyev K.A., Sultanova A. N., Jafarova Y.K., Sultanova S.Q., 2026) xüsusilə maraq doğuran material sink telluridi (ZnTe)-dir. ZnTe görünən spektral diapazonda yüksək şəffaflığa, optimal qırılma əmsalına malikdir, həmçinin günəş batareyalarının işləmə şəraitində yüksək kimyəvi, radiasiya və termal dayanıqlığı ilə seçilir.

Bu işin məqsədi Dy³⁺, Eu³⁺ və Ce³⁺ ionları ilə legirləmənin sink telluridi nazik təbəqələrinin lüminessent xassələrinə təsirini öyrənməkdir (Li, X., et al., 2021).

MATERIALLAR VƏ METODLAR

Tədqiqat obyekti nadir torpaq metalları Dy^{3+} , Eu^{3+} və Ce^{3+} ionları ilə legirlənmiş sink telluridi (ZnTe) əsaslı optik örtüklər olmuşdur. Legirləyici qatqıların konsentrasiyası 5 at.%-ə qədər olub, təbəqələr monokristallik silisium altlıqlar üzərinə tətbiq edilmişdir.

ZnTe:RE təbəqələri vakum maqnetron püskürtmə üsulu ilə kompozit hədəflərdən (Zn–Te, Zn–Te–Eu, Zn–Te–Eu–Dy, Zn–Te–Eu–Dy–Ce) argon–oksigen qaz qarışığında hazırlanmışdır. Təbəqələrin qalınlığı maqnetron boşalması cərəyanı və çöküntü müddəti ilə tənzimlənmiş və 400 nm-ə qədər olmuşdur.

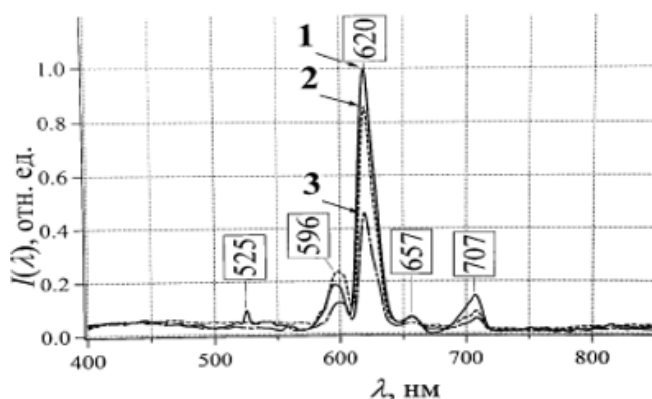
Təbəqələrin kristal quruluşu rentgenfaz analiz (RFA) üsulu ilə D8 Avance difraktometrində (Bruker) öyrənilmişdir. Səthin morfologiyası və element tərkibi isə enerji dispersiyalı analiz ilə təchiz olunmuş rastrov elektron mikroskop JEOL JSM-6510LV vasitəsilə araşdırılmışdır.

Lüminessensiya 77 K temperaturda, 338 nm dalğa uzunluqlu azot lazeri LGI-21 ilə həyəcanlandırılmışdır. Lüminessensiya spektrlərinin 400–870 nm diapazonunda qeydiyyatı, R928B fotoelektron artırıcısı (Hamamatsu) ilə təchiz edilmiş MDR-23 difraksion monoxromator vasitəsilə həyata keçirilmişdir.

NƏTİCƏLƏRİN MÜZAKİRƏSİ

Rastrov elektron mikroskopiya (REM) məlumatlarına görə, əldə edilmiş sink telluridi təbəqələri sintezdən dərhal sonra homogen və hamar səthə malikdir. Səth üzrə qalınlıq qeyri-homogenliyi 1–2%-dən çox olmayıb ki, bu da çöküntü prosesinin sabitliyini göstərir.

Rentgenfaz analiz nəticələri göstərmişdir ki, tədqiq olunan örtüklər polikristallik quruluşa malikdir və ZnTe fazalarını sfalerit və vürsit modifikasiyalarında ehtiva edir. Legirlənmiş nümunələrdə oksid fazalarının əmələ gəlməsinin əlamətləri aşkar edilməmişdir ki, bu da nadir torpaq metalları ionlarının ZnTe kristal şəbəkəsinə uğurla daxil olduğunu göstərir.



Şəkil 1. Europium (1), europium və disprosium (2), europium, disprosium və cerium (3) ilə legirlənmiş sink telluridi təbəqələrinin lüminessensiya spektrləri.

Şəkil 1-də Eu, Eu–Dy və Eu–Dy–Ce ilə legirlənmiş ZnTe təbəqələrinin lüminessensiya spektrləri göstərilmişdir. Cədvəl 1-də isə Eu^{3+} və Dy^{3+} ionlarının zolaq daxili f–f keçidləri ilə uyğun gələn müəyyən edilmiş optik keçidlər təqdim olunub.

Cədvəl 1. Kompozit hədəf Zn–Eu (nümunə 1), Zn–Eu–Dy (nümunə 2) və Zn–Eu–Dy–Ce (nümunə 3) əsasında püskürdürülmüş toz nümunələrinin elektron quruluşunda müşahidə olunan optik keçidlər.

Keçidlərin dalğa uzunluğu diapazonu, S (nm)	Nümunə №1 Eu	Nümunə №2 Eu–Dy	Nümunə №3 Eu–Dy–Ce
530–540	$^5D_1 \rightarrow ^7F_1$, Eu	-	-
600–610	$^5D_0 \rightarrow ^7F_1$, Eu	$^5D_0 \rightarrow ^7F_1$, Eu	$^5D_0 \rightarrow ^7F_1$, Eu

		${}^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{5/2}, Dy$	${}^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{3/2}, Dy$
615–625	${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2, Eu$	${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2, Eu$	${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2, Eu$
		${}^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{7/2}, Dy$	${}^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{7/2}, Dy$
650–660	${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_3, Eu$	${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_3, Eu$	${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_3, Eu$
		${}^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{9/2}, Dy$	${}^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{9/2}, Dy$
705–715	${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_4, Eu$	${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_4, Eu$	${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_4, Eu$

Sink telluridinin bir neçə nadir torpaq elementi ilə birgə legirlənməsi xüsusi maraq doğurur, çünki bu ionlar oxşar həyəcan enerjilərinə və tədqiq olunan spektral diapazonda oxşar udma və şüalanma sahələrinə malikdirlər (Li, X., et al.2021). Bu, nümunələrin spektrlərində intensiv lüminessensiya piklərinin mövcudluğu ilə təsdiqlənir.

Ən effektiv lüminessensiya aktivatoru europiumdur, bu da onun elektron konfigurasiyasının xüsusiyyətləri və f-səviyyələr arasında radiativ keçidlərin yüksək ehtimalı ilə əlaqədardır. Yalnız Eu^{3+} ilə legirlənmiş təbəqələr maksimal lüminessensiya intensivliyi nümayiş etdirir.

Europium və disprosium ilə birgə legirləmə zamanı şüalanma intensivliyində müəyyən azalma müşahidə olunur ki, bu da, görünür, ZnTe kristal şəbəkəsində nadir torpaq metalları ionları arasında qarşılıqlı təsir nəticəsində konsentrasiya sönməsi effektinə bağlıdır (Mammadova S.O., Aliyev K.A., Sultanova A. N., Jafarova Y.K., Sultanova S.Q.2026).

NƏTİCƏ

Aparılmış tədqiqatlar nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, sink telluridinin nadir torpaq metalları ionları ilə legirlənməsi onun lüminessensiya xassələrinə əhəmiyyətli təsir göstərir. Ən yüksək lüminessensiya intensivliyi yalnız europium ilə legirlənmiş ZnTe təbəqələrində əldə olunur. Alınmış nəticələr ZnTe:RE materiallarının günəş elementləri və digər optoelektron cihazlar üçün lüminessent işıqkeçirici örtüklər kimi perspektivli tətbiqini təsdiqləyir.

ƏDƏBİYYATLAR

- Bünzli J.-C.G., Eliseeva S.V. (2013). Lanthanide luminescence for functional materials and bio-sciences. Chemical Science, 4,1939–1949. <https://doi.org/10.1039/C3SC22266G>
- Green M.A. (2006). Luminescent layers for enhanced silicon solar cell performance. Solar Energy Materials & Solar Cells, 90, 1189–1207. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.07.001>
- Li, X., et al. (2021). Optical properties and luminescence of rare-earth-doped II–VI semiconductors. Journal of Alloys and Compounds, 853, 157274. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157274>
- Mammadova S. O., Aliyev K. A., Shukurova G. M., Jafarova E. K. (2025, April). Synthesis of the semiconductor compound $ZnNd_2MnS_5$. Scientific Achievements of Contemporary Society: Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference, London, United Kingdom. URL: <https://sci-conf.com.ua/ix-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-scientific-achievements-of-contemporary-society-4-6-04-2025-london-velikobritaniya-arhiv/>.
- Mammadova S.O., Aliyev K.A., Sultanova A. N., Jafarova Y.K., Sultanova S. Q. (2026) Study of phase equilibrium in the ZnTe– Cd_2Te_3 system. Universum: Химия и Биология. 3(141), 46-49 <https://doi.org/10.32743/UniChem.2026.141.3.22141>
- Mammadova S.O., Aliyev K.A., Sultanova A. N., Shukurova G. M., Ismailova S.B. (2026). Phase Equilibria and Thermodynamic Features of the ZnTe– Gd_2Te_3 System. International Scientific and Practical Journal “Endless Light in Science”, 2, 39–43. <https://doi.org/10.5281/zenodo.19027616>
- Zhang Y., Li J., Wang X. (2018) Photoluminescence properties of rare-earth-doped ZnTe thin films. Optical Materials, 79, 97–103. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.03.020>

ABSTRACT

LUMINESCENCE OF ZINC TELLURIDE DOPED WITH RARE-EARTH METAL IONS (Dy, Eu, Ce)

Mammadova Saadat^{1*}, Aliyev Kazim², Sultanova Aytan³, Shukurova Guntekin⁴ Ismailova Sevd⁵, Ahmadov Ahmad⁶
Baku State University, Baku, Azerbaijan

In this work, the luminescent properties of zinc telluride (ZnTe) thin films doped with rare-earth metal ions (Dy^{3+} , Eu^{3+} , and Ce^{3+}) were investigated. The films were fabricated by vacuum magnetron sputtering on monocrystalline silicon substrates with dopant concentrations up to 5 at.%. The main objective of the study was to determine the influence of rare-earth dopants on the structural and optical-luminescent characteristics of ZnTe thin films. The crystalline structure and phase composition were analyzed using X-ray diffraction (XRD), while surface morphology and elemental composition were examined by scanning electron microscopy (SEM) combined with energy-dispersive spectroscopy (EDS). Luminescence spectra were recorded in the wavelength range of 400–870 nm at a temperature of 77 K under excitation by a nitrogen laser with a wavelength of 338 nm. The results showed that the deposited films possess a polycrystalline structure and contain ZnTe phases in sphalerite and wurtzite modifications. The luminescence spectra are dominated by characteristic intra-4f transitions of Eu^{3+} and Dy^{3+} ions. The highest luminescence intensity was observed in films doped solely with europium, which is attributed to the favorable electronic configuration of Eu^{3+} ions. In contrast, co-doping with multiple rare-earth ions leads to a decrease in luminescence intensity due to concentration quenching effects. The obtained results demonstrate the potential of rare-earth-doped ZnTe thin films for application as luminescent antireflection coatings in photovoltaic devices.

Keywords: *zinc telluride, rare-earth metals, luminescence, europium, dysprosium, cerium, thin films.*

РЕЗЮМЕ

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ТЕЛЛУРИДА ЦИНКА, ЛЕГИРОВАННОГО ИОНАМИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ (Dy, Eu, Ce).

**Маммадова Саадат^{1*}, Алиев Казим¹, Султанова Айтэн¹, Шукюрова Гюнтекин¹,
Исмаилова Севда¹, Ахмадов Ахмад¹**
Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджан¹

В данной работе исследованы люминесцентные свойства тонких плёнок теллурида цинка (ZnTe), легированных ионами редкоземельных металлов Dy^{3+} , Eu^{3+} и Ce^{3+} . Плёнки были получены методом вакуумного магнетронного распыления на подложках из монокристаллического кремния при концентрациях легирующих примесей до 5 ат.%. Основной целью исследования являлось определение влияния редкоземельных ионов на структурные и оптико-люминесцентные характеристики плёнок ZnTe. Кристаллическая структура и фазовый состав образцов исследовались методом рентгенофазового анализа, а морфология поверхности и элементный состав — с использованием растровой электронной микроскопии в сочетании с энергодисперсионным анализом. Спектры люминесценции регистрировались в спектральном диапазоне 400–870 нм при температуре 77 К при возбуждении азотным лазером с длиной волны 338 нм. Установлено, что полученные плёнки обладают поликристаллической структурой и содержат фазы ZnTe в модификациях сфалерита и вюрцита. В спектрах люминесценции преобладают характерные внутривозбужденные f–f переходы ионов Eu^{3+} и Dy^{3+} . Максимальная интенсивность люминесценции наблюдается в

плёнках, легированных исключительно европием, что обусловлено особенностями электронной конфигурации ионов Eu^{3+} . При совместном легировании несколькими редкоземельными элементами отмечается снижение интенсивности излучения, связанное с эффектом концентрационного тушения люминесценции. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения плёнок ZnTe , легированных редкоземельными металлами, в качестве люминесцентных просветляющих покрытий для солнечных элементов.

Ключевые слова: теллурид цинка, редкоземельные металлы, люминесценция, европий, диспрозий, церий, тонкие плёнки.