

n-InSe KRİSTALLARINDA ELEKTROLÜMINESSENSİYANIN PARLAQLIQ XARAKTERİSTİKALARINA LANTANİD AŞQARLARININ TƏSİRİ

Ə.Ş. ABDİNOV¹, R.F. BABAYEVA², S.İ. ƏMİROVA¹, N.Ə. RƏHİMOVA¹,
E.A. RƏSULOV¹

¹Bakı Dövlət Universiteti,

Azərbaycan Respublikası, AZ 1145, Bakı ş., Z. Xəlilov k., 23

²Azərbaycan Dövlət İqtisad Universiteti,

Azərbaycan Respublikası, AZ 1001, Bakı ş., İstiqlaliyyət k., 6

Tel: +00994 12 5397373,

abdinov-axmed@yandex.ru, babaeva-rena@yandex.ru

n-InSe kristallarında elektrolüminessensiya şüalanmasının parlaqlığının temperaturdan, elektrik sahəsindən və cərəyan şiddətindən asılılığına qadolinium və erbium aşqarlarının təsiri tədqiq edilmiş, aparılan statistik təhlil əsasında əldə olunmuş nəticələrin keyfiyyətcə izahı verilmişdir.

Açar sözlər: Şüalanma, injeksiya, şüalanmanın spektri, elektrolüminessensiyanın temperatur sönməsi, fotokeçiricilik, rekombinasiya mərkəzləri, tutma mərkəzləri.

PACS: 71.20. Nr, 72.20-i

1. GİRİŞ.

Optoelektronikanın inkişafı yeni texnologiyaların işlənməsi ilə yanaşı, həm də yüksək fətohəssaslığa və elektrolüminessensiya xassəsinə malik yarımkeçirici materialların yaradılmasını, onların fiziki xassələrinin ətraflı tədqiqini tələb edir. Bu məqsəd üçün müxtəlif profilli tədqiqatçıların və konstruktorların diqqətini cəlb edən materiallardan biri də laylı quruluşlu indium selen (*n*-InSe) kristallarıdır [1]. İndiyədək indium selen kristallarının elektrolüminessensiya xassələrinin öyrənilməsinə dair müxtəlif tədqiqatlar [2-4] aparılmış və aşkar edilmişdir ki, aşağı temperaturda oblastında bu kristallarda $0.90 \leq \lambda \leq 1.15$ mkm oblastında spektrinin əsas maksimumu $\lambda \leq 0.965$ mkm-ya təsadüf edən elektrolüminessensiya şüalanması baş verir. Bununla belə, müxtəlif amillərin, o cümlədən aşqarlanmanın həmin yarımkeçiricinin monokristallarında elektrolüminessensiya şüalanmasının parlaqlıq xarakteristikalarına təsiri hələ də qaneedici səviyyədə öyrənilməmişdir.

Təqdim olunan işdə atom sıra nömrələri və uyğun olaraq, ion radiusları və fiziki xassələri nəzərə çarpacaq qədər fərqlənən bəzi lantanid (qadolinium və erbium) [5] aşqarlarının *n*-InSe kristallarında elektrolüminessensiya şüalanmasının spektrindəki əsas maksimuma uyğun şüalanma zolağının parlaqlıq xarakteristikalarına təsiri, daha doğrusu, şüalanma parlaqlığının temperaturdan, nümunədəki gərginlik düşgüsündən və cərəyan şiddətinin qiymətindən asılılığı tədqiq edilmişdir.

2. NÜMUNƏLƏR VƏ EKSPERİMENTİN ŞƏRAİTİ.

Həm aşqarlanmamış, həm də qadolinium (Gd) və erbiumla (Er) zəif ($N \leq 10^{-1}$ at.% miqdarda) aşqarlanmış *n*-InSe kristallarında eksperimental yolla elektrolüminessensiya şüalanmasının parlaqlığının (B_λ) temperaturdan (T), nümunədəki gərginlik düşgüsündən (U) və nümunədən axan cərəyanın şiddətindən (i)

asılılığı ölçülmüşdür.

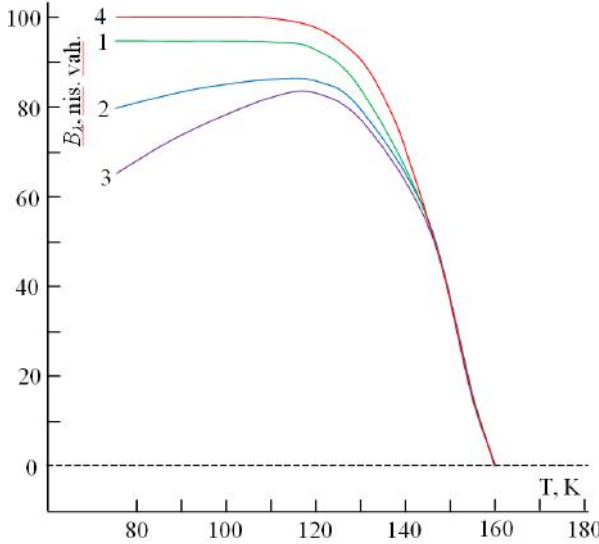
Aparılan təcrübə ölçmələrdə istifadə olunan InSe birləşməsinin külçələri həmin birləşmənin stexiometrik nisbətdə götürülmüş tərkib komponentlərinin vakuullaşdırılmış kvarts ampulalarda müəyyən temperatur və zaman rejimlərində birgə əridilməsi üsulu ilə sintez edilmişdir. Bu külçələrin aşqarlanması isə indium selen qarışığına sintez prosesindən əvvəl müvafiq miqdarda lantanid daxil etməklə həyata keçirilmişdir. Aşqarlanmamış və aşqarlanmış InSe birləşməsi külçələrinin alınması üçün təmizlik dərəcəsi 99.999 % olan dənəvər selen (Se), metal indium (In), xırdalanmış metal Gd və Er-dan istifadə edilmişdir. İndium selen monokristalları isə şəkli dəyişdirilmiş Bricmen üsulu ilə gəyərdirilmişdir. Aşkar edilmişdir ki, lantanidlərlə aşqarlanmış indium selen kristalları da aşqarlanmamış kristallar kimi, külçə boyunca yönəlmiş və bir-birindən asanlıqla ayrılabilən, bir neçə λ qalınlığa malik təbii laylardan ibarətdir. Lantanidlərlə aşqarlanmış indium selen kristallarının külçələrinin də ayrı-ayrı laylarının səthi atomar səviyyədə hamar, ətraf mühitin və kimyəvi reaktivlərin təsirinə qarşı yüksək dərəcədə dayanıqlıdır. Holl əmsalının işarəsinə əsasən həm aşqarlanmamış, həm də lantanidlərlə aşqarlanmış indium selen kristallarının təcrübə ölçmələrinin həyata keçirildiyi şəraitdə *n*-tip keçiriciliyə malik olduğu müəyyən edilmişdir.

Lantanidlərlə aşqarlanmış *n*-InSe kristallarında 300K-də qaranlıqdakı xüsusi müqavimət $\rho \approx 10^2 \div 10^6 \text{ Om} \cdot \text{sm}$, sərbəst elektronların konsentrasiyası və yüklüklüyü isə uyğun olaraq $n \approx 10^{14} \div 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ və $\mu_0 \approx 300 \div 800 \text{ sm}^2 \text{ V} \cdot \text{san}$ - dir. Həmin kristallar soyudulduqda isə bu kəmiyyətlərin qiymətləri dəyişərək, 77 K-də $\rho_{10} \geq 10^4 \div 10^8 \text{ Om} \cdot \text{sm}$; $n_0 \leq 10^{13} \div 10^{14} \text{ sm}^{-3}$; $\mu_0 \leq 30 \div 40 \text{ sm}^2 \text{ V} \cdot \text{san}$ olur.

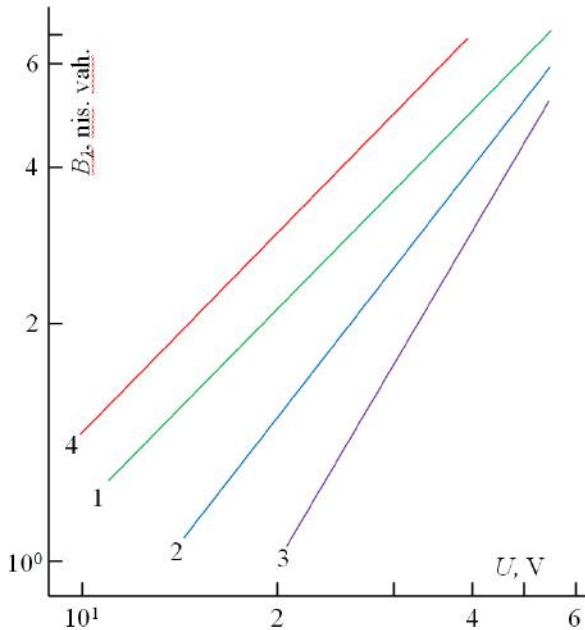
Rentgenoqrafik və termografik analizlər vasitəsi ilə alınmış külçələrin kristal quruluşu, faza və kimyəvi tərkibi yoxlanılmışdır. Müəyyən edilmişdir ki, onların hamısı birfəzalıdır, yüksək dərəcədə monokristal quruluşa malikdir, difraksiya mənzərələrinin xətləri

(00l) isə tamamilə alçaq temperaturlu γ -InSe modifikasiyası kimi induksiyalanır [1]. Alınmış külçələrin difraktoqramlarında başqa tip xətlər müşahidə olunmur. Həmin difraktoqramlardan hesablanmış qəfəs parametrləri $a=4.04\text{Å}$, $c=16.900\text{Å}$ - dir.

3. TƏCRÜBİ NƏTİCƏLƏR VƏ ONLARIN MÜZAKİRƏSİ.



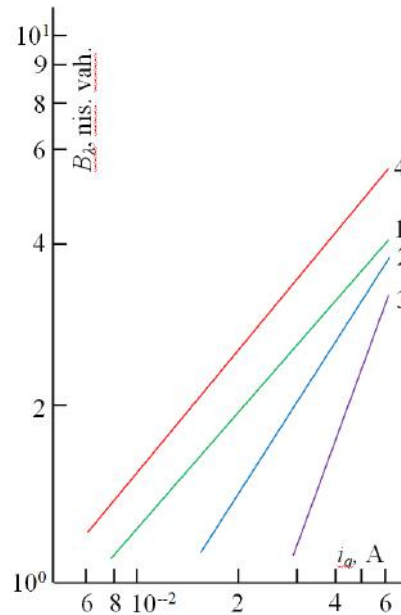
Şəkil 1. Aşqarlanmamış (1 və 2) və müxtəlif miqdarda Er-la aşqarlanmış (3 və 4) n -InSe kristallarında elektrolüminessensiya şüalanması parlaqlığının temperaturdan asılılığı. N , at.%.: 1, 2 - 0; 3 - 10^{-3} ; 4 - 10^{-1} ; $U=U_{min}$



Şəkil 2. Aşqarlanmamış (1 və 2) və müxtəlif miqdarda Er-la aşqarlanmış n -InSe kristallarında elektrolüminessensiya şüalanması parlaqlığının nümunədəki gərginlik düşgüsündən asılılığı: N , at.%.: 1 - 0; 2 - 10^{-5} ; 3 - 10^{-3} ; 4 - 10^{-1} ; $T=77\text{ K}$.

Həm aşqarlanmamış, həm də Gd və Er-la zəif

($N \leq 10^{-1}$ at.% miqdarda) aşqarlanmış n -InSe monokristallarında eksperimental yolla elektrolüminessensiyanın spektral paylanmasının əsas maksimumuna (əsas şüalanma zolağına) uyğun şüalanma parlaqlığının (B_λ) temperaturdan (şəkil 1), nümunədəki gərginlik düşgüsündən (şəkil 2) və nümunədən axan cərəyan şiddətinin qiymətindən (şəkil 3) asılılığı ölçülmüşdür. Aşkar edilmişdir ki, tədqiq etdiyimiz nümunələrin hər birində elektrilüminessensiya şüalanması qaranlıq statik volt-ampere xarakteristikasının (VAX-in) xəttliliyinin pozulmağa başladığı gərginlikdən böyük olan (statik VAX-in superxətti hissəsinə və cərəyan kontaktlarından nümunəyə nəzərəcarpacaq səviyyədə injeksiyanın baş verməsinə uyğun gələn [2]) gərginliklərdə baş verir. Bu zaman həm tədqiq olunan nümunədən axan qaranlıq cərəyanı şiddətinin qiyməti (i_q), həm də elektrolüminessensiya şüalanmasının parlaqlığının qiyməti (B_λ) nümunədəki gərginlik düşgüsünün qiymətindən (U) asılı olaraq eyni bir superxətti üstlü qanunla ($k \geq 2$ olan $i_q B_\lambda \sim U^k$ qanunu ilə) artır.



Şəkil 3. Aşqarlanmamış (1 və 2) və müxtəlif miqdarda Er-la aşqarlanmış n -InSe kristallarında elektrolüminessensiya şüalanması parlaqlığının nümunədən axan cərəyanın şiddətindən asılılığı. N , at.%.: 1, 2 - 0; 3 - 10^{-3} ; 4 - 10^{-1} ; $T=77\text{ K}$.

Aşqarlanmamış nümunələrdə ilkin (77 K -dəki) qaranlıq xüsusi müqavimətin qiyməti (ρ_{lo}) artdıqca, elektrolüminessensiyanın müşahidə olunmağa başladığı elektrik sahəsi intensivliyinin qiyməti (E_i) böyüyür, şüalanma parlaqlığının qiyməti (B_λ) isə nəzərəcarpacaq dərəcədə kiçilir. Aşqarlanmış nümunələrdə elektrolüminessensiyanın parlaqlıq xarakteristikaları kristala daxil edilən aşqarın materialı ilə müqayisədə, onun miqdarından daha güclü şəkildə asılıdır. Təcrübədə müşahidə olunan $N \approx 10^{-1}$ at.%-da (N) asılılığı qeyri-monoton xarakterə malikdir. Belə ki, kristala daxil edilən aşqarın miqdarı $N \approx 10^{-5}$ at.%-dən $N \approx 10^{-1}$ at.%-ə qədər artdıqda, B_λ -nın qiyməti əvvəlcə azalır, $N \approx 10^{-3}$ at.% olduqda özünün minimum, sonra isə artaraq, $N \approx 10^{-1}$ at.%-da maksimum qiymətini alır. Çox aşağı temperaturlarda ($T \leq 110 \div 115\text{ K}$ temperatur

diapazonunda) elektrolüminessensiya şüalanmasının parlaqlığı aşqarlanmamış ən kiçik xüsusi müqavimətli və $N \geq 10^{-2} at. \%$ miqdarda aşqarlanmış krisallarda temperaturdan asılı deyil. Aşqarlanmamış böyük xüsusi müqavimətli və daxil edilən aşqarın miqdarı $N < 10^{-2} at. \%$ olan aşqarlanmış kristallarda isə həmin diapazonda temperatur yüksəldikcə, elektrolüminessensiya şüalanmasının parlaqlığı özünün $T \approx 77 K$ -dəki qiymətinə nəzərən $\sim 10 \div 15 \%$ artır. Temperaturun sonrakı yüksəlməsi ilə ($T \geq 125 \div 130 K$ olduqda) isə elektrolüminessensiya şüalanmasının parlaqlığı

$$B_{\lambda} = B_{\lambda 0} e^{\frac{\Delta \varepsilon_{\lambda}}{kT}} \quad (1)$$

ifadəsinə tabe olan gedişlə azalır – elektrolüminessensiyanın temperatur sönməsi başlayır. Bu ifadəyə daxil olan B_{λ} və $B_{\lambda 0}$ kəmiyyətləri, uyğun olaraq, elektrolüminessensiya şüalanması parlaqlığının hər bir baxılan temperaturdakı və $T \approx 77 K$ -dəki qiymətləri, $\Delta \varepsilon_{\lambda}$ - isə şüalanmanın aktivləşmə enerjisidir. Tədqiq olunan nümunələrin hamısında temperaturun $\sim 160 K$ qiymətində elektrolüminessensiya şüalanmasının tam temperatur sönməsi baş verir və daha yüksək temperaturalarda ($T \geq 160 K$ olduqda) elektrolüminessensiya şüalanması müşahidə olunmur. Müxtəlif nümunələrdə alınmış təcrübi nəticələrin müqayisəsi göstərir ki, tədqiq olunan kristalların hamısında $\Delta \varepsilon_{\lambda}$ -in qiyməti eyni olub, ədədi qiymətcə aşqarlanmamış *n*-InSe kristallarında məxsusi fotokeçiriciliyin temperatur və infraqırmızı sönmələri üçün məsul olan *r*-asta rekombinasiya mərkəzlərinin ε_r -enerji dərinliyinə bərabərdir ($\Delta \varepsilon_{\lambda} \approx \varepsilon_r \approx \Delta \varepsilon_{\lambda} \approx \varepsilon_v + (0.44 \div 0.45) eV$). Müxtəlif başlanğıc xüsusi müqavimətli (ρ_{10} -in qiyməti fərqlənən) aşqarlanmamış, eləcə də müxtəlif lantanidlə (Gd və Er-la) və müxtəlif miqdarda aşqarlanmış nümunələrdə alınmış təcrübi nəticələrin müqayisəsi göstərir ki, aşqarlanmamış böyük başlanğıc xüsusi müqavimətli və daxil edilmiş aşqarın miqdarı $N < 10^{-2} at. \%$ olan aşqarlanmış kristallarda elektrolüminessensiya şüalanmasının parlaqlıq xarakteristikaları və parlaqlığın ədədi qiyməti müxtəlif nümunələr üçün fərqlənir. Aşqarlanmamış ən kiçik xüsusi müqavimətli və daxil edilən aşqarın miqdarı $N \geq 10^{-2} at. \%$ olan aşqarlanmış kristallarda isə müxtəlif nümunələr üçün elektrolüminessensiya şüalanmasının parlaqlıq xarakteristikaları və parlaqlığın ədədi qiyməti qanəedici şəkildə üst-üstə düşür. Bu uyğunlaşma erbiyumla aşqarlanmış kristallarda daha yüksək dərəcədədir.

Təcrübi ölçmələr zamanı əldə olunmuş nəticələrin statistik təhlili deməyə imkan verir ki, həm aşqarlanmamış, həm də lantanidlərlə aşqarlanmış *n*-InSe monokristallarında müşahidə olunan elektrolüminessensiya şüalanması, müəyyən şəraitdə cərəyan kontaktından tədqiq edilən nümunəyə injeksiya olunmuş qeyri-əsas yükdaşıyıcıların (deşiklərin) həmin kristalların qadağan olunmuş zonasında yerləşən *r*-rekombinasiya mərkəzləri vasitəsi ilə baş verən şüalanmalı rekombinasiyası hesabına yaranır. Bu zaman fəzaca bircins kristal yarımkeçirici materiallar üçün mövcud olan fiziki təsəvvürlər (nəzəriyyə) [6, 7] çərçivəsindən kənar çıxmaların müşahidə edilməsi isə *n*-InSe monokristallarının fəzaca qeyri-bircins olmasından, daha doğru-

su həmin kristallarda təsadüfi xarakterli böyükölçülü (makroskopik) defektlərin [8] mövcud olmasından [9] irəli gəlir [10]. $N > 10^{-2} at. \%$ miqdarda lantanid aşqarları daxil edilmiş *n*-InSe kristallarında alınmış təcrübi nəticələrin ən kiçik xüsusi müqavimətə malik aşqarlanmamış *n*-InSe kristallarında alınmış nəticələrə daha çox uyğun gəlməsi, eləcə də bu nümunələrdə elektrolüminessensiya şüalanmasının parlaqlıq xarakteristikalarının fəzaca bircins kristal yarımkeçiricilərdə elektrolüminessensiyaya dair mövcud nəzəriyyənin müddəalarına tabe olması isə həmin kristalların fəzaca bircinsliyi ilə bağlıdır. Belə ki, kristala daxil edilən lantanid aşqarlarının ionları nümunədəki təsadüfi xarakterli makroskopik defektlərin üzərində toplanaraq, onların fəza yüklər oblastını genişləndirir və nəhayət, *N*-in böyük ($N \geq 10^{-2} at. \%$) qiymətlərində qonşu defektlərin yaratdığı fəza yüklər oblastı bir-biri ilə qovuşaraq, tədqiq edilən nümunəni fəzaca bircinsli kristal yarımkeçirici halına gətirir [11]. Tədqiq olunan kristallarda elektrolüminessensiya şüalanmasının parlaqlıq xarakteristikalarının və parlaqlığın ədədi qiymətinin nümunəyə daxil edilən lantanid aşqarlarının $N > 10^{-2} at. \%$ miqdarında stabilləşməsi, eləcə də müxtəlif nümunələr üçün onların üst-üstə düşməsi həm də üç valentli lantanid ionlarının qəfəsdəki indium vakansiyalarına daxil olaraq, qonşu laylar arasında rabitəni gücləndirməsi və qəfəsin “sağlamlaşdırılması” hesabınadır. Erbiyum aşqarlarının ion radiusu qadolinium aşqarlarınınkindən kiçik olduğundan, onların həmin vakansiyalara daxil olması və kristal qəfəsi “sağlamlaşdırması” ehtimalı qadolinium ionlarınınkindən daha böyükdür.

4. YEKUN.

Beləliklə, demək olar ki:

- aşqarlanmamış böyük başlanğıc xüsusi müqavimətli və $N < 10^{-2} at. \%$ miqdarda lantanidlə aşqarlanmış *n*-InSe kristallarında aşağı temperaturalar oblastında elektrolüminessensiya şüalanmasının parlaqlığının temperaturdan asılı olaraq artması həmin kristalların fəzaca qeyri-bircinsliyi ilə əlaqədardır;

- qadolinium və erbiyumla aşqarlanmış *n*-InSe kristallarında da aşqarlanmamış kristallarda olduğu kimi, elektrolüminessensiya şüalanması tədqiq edilən nümunədəki gərginlik düşgüsünün müəyyən sərhəd qiymətdən böyük qiymətlərində cərəyan kontaktlarından nümunəyə injeksiya olunmuşdeşiklərin keçirici zonanın dibinə nəzərən $\sim 0.26 eV$ dərinlikdə yerləşmiş *r*-rekombinasiya mərkəzləri vasitəsi ilə rekombinasiyası hesabına baş verir;

- tədqiq olunan *n*-InSe monokristallarında $T \geq (120 \div 130) K$ -də elektrolüminessensiya şüalanmasının parlaqlığının temperaturun yüksəlməsi ilə eksponensial qanunla azalması elektrolüminessensiyanın temperatur sönməsi hesabınadır və bu hadisə həmin temperaturalarda kristaldakı *r*-rekombinasiya mərkəzlərinin termik boşalması nəticəsində baş verir;

- daxil edilən lantanid aşqarlarının miqdarı $N \approx 10^{-1} at. \%$ olduqda, elektrolüminessensiya şüalanmasının parlaqlıq xarakteristikalarının ən kiçik başlanğıc xüsusi müqavimətli aşqarlanmamış kristallardakına

uyğun gəlməsi, eləcə də, fəzaca bircins kristal yarımkeçiricilər üçün olan nəzəriyyəyə tabe olması və müxtəlif nümunələr üçün üst-üstə düşməsi daxil edilən aşqar ionlarının makroskopik defektlərin üzərində top-

lanması nəticəsində qonşu defektlərin fəza yüklər oblastının tədricən bir-biri ilə qovuşması və aşqar ionlarının bir qisminin indium vakansiyalarına daxil olması hesabınadır.

-
- [1] З.С. Медведева. Халькогениды элементов III Б подгруппы периодической системы. М.: Наука. 1968, -214 с.
- [2] Г.А. Ахундов, А.Ш. Абдинов, Н.М. Мехтиева, А.Г. Кязым-заде. Оптика и спектроскопия, 1975, т. 38, В. 5, с. 952-954.
- [3] Э.Ю. Салаев, С.Ю. Багиров. Электролюминесцентные и фотоэлектрические свойства монокристаллов GaSe и InSe. Докл. АН Аз. ССР, 1981, 37, № 9, с. 36-41.
- [4] N. Balakrishnan, Z.R. Kudrynskyi, M.W. Fay, G.W. Mudd, S.A. Svatek, O. Makarovsky, Z.D. Kovalyuk, L. Eaves, P.H. Beton, A. Patane. Advanced Optical Materials, 2014, 2 (11). pp. 1064-1069. ISSN 2195-1071.
- [5] Свойства элементов. Под редакцией М.Н.Дрица. Справочное издание. М.:Металлургия, 1985, 672 с.
- [6] Л.Е. Воробьев, С.Н. Данилов, Г.Г. Зегря, Д.А.Фирсов, В.А. Шалыгин, И.Н. Ясиевич, Е.В. Берегулин. Фотоэлектрические явления в полупроводниках и размерно-квантовых структурах, СП.: Наука. 2001, 248 с.
- [7] В.Л. Бонч-Бруевич, С. Г. Калашиников. Физика полупроводников. М.: Наука, 1990, 685 с.
- [8] А.Я. Шук. ЖЭТФ, 1972, т.15, с.408-410.
- [9] А.Ш. Абдинов, Р.Ф. Бабаева. Ж. «Неорганические материалы». 1995. т. 31. №7, с. 896-898.
- [10] А.Ш. Абдинов, Р.Ф. Бабаева. Прикладная физика, 2004, № 5, с. 74-78.
- [11] Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука, 1979, - 416 с.

A.Sh. Abdinov, R.F. Babayeva, S.I. Amirova, N.A. Rahimova, E.A. Rasulov.

INFLUENCE OF LANTHANIDE IMPURITIES ON THE CHARACTERISTICS OF THE BRIGHTNESS OF ELECTROLUMINESCENCE IN *n*-InSe CRYSTALS

The influence of gadolinium and erbium impurities on the dependence of the brightness of electroluminescence on temperature, electric field and current in *n*-InSe crystals is studied, and a qualitative explanation of the data obtained was given on the base of its statistical analysis.

А.Ш. Абдинов, Р.Ф. Бабаева, С.И. Амирова, Н.А. Рагимова, Э.А. Расулов

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ ЛАНТАНИДОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯРКОСТИ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В КРИСТАЛЛАХ *n*-InSe

Исследовано влияние примесей гадолиния и эрбия на зависимость яркости свечения электролюминесценции от температуры, напряженности электрического поля и силы тока в кристаллах *n*-InSe, предложено качественное объяснение полученных экспериментальных результатов на основе их статистического анализа.

Qəbul olunma tarixi: 04.01.2019