

# QADOLINIUMLA AŞQARLANMIŞ İNDIUM MONOSELENİDİ KRİSTALLARINDA İNJEKSİYA CƏRƏYANLARI

Ə.Ş. ABDİNOV

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

R.F. BABAYEVA

Azərbaycan Dövlət İqtisad Universiteti, Azərbaycan Respublikası, AZ 1001, Bakı ş., İstiqlaliyyət k., 6

Tel: +00 994 12 5397373,

[abdinov-axmed@yandex.ru](mailto:abdinov-axmed@yandex.ru), [babaeva-rena@yandex.ru](mailto:babaeva-rena@yandex.ru)

Təmiz və  $10^{-5}$ - $10^{-1}$  at.% miqdarında qadoliniumla aşqarlanmış  $n$ -InSe monokristallarında müxtəlif temperaturalarda statik volt-ampere xarakteristika və müxtəlif elektrik sahələrində cərəyan sıxlığının temperaturdan asılılığı tədqiq edilmişdir. Aşkar olunmuşdur ki, temperaturun və xarici gərginliyin geniş diapazonda dəyişdiyi şəraitdə hər iki qrup kristallarda cərəyanın axması həcmi yüklə məhdudlanmış cərəyanlar rejimində baş verir. Bununla belə, böyük temperatur və çox zəif ( $N \leq 10^{-3}$  at.%) aşqarlanmalarda alınmış təcrübə nəticələri heç də həmin cərəyanlar üçün Lampert nəzəriyyəsi əsasında izah oluna bilmir. Göstərilmişdir ki, bu uyğunsuzluğun başlıca səbəbi həmin kristalların qismən nizamsız olması ilə bağlıdır.

**Açar sözlər:** monokristal, aşqar, injeksiya cərəyanı, qismən nizamsızlıq.

**PACS:** 72.40+W.

## 1. GİRİŞ.

İndium monoselenidi (InSe) kristallarının laylı quruluşa malik olması, onun külçələrinin asanlıqla bir neçə nanometrdən bir neçə millimetərə qədər qalınlıqlı laylara ayrılma bilməsi, qoparılmış layların atomar səviyyədə hamar və yüksək kimyəvi davamlı səthə malik olması [1-3] bu kristalların ultranazik təbəqəli elektronika üçün perspektivli material olmasına dəlalət edir [4-7]. Sözsüz ki, InSe-nin bu keyfiyyəti həmin yarımkeçiricidə digər fiziki hadisələrlə yanaşı, injeksiya cərəyanlarının da ətraflı tədqiq olunması zərurətini yaradır.

Həm bu səbəbdən, həm də qismən nizamsız kristal yarımkeçiricilərin maraqlı və yararlı bir timsalı kimi həmin tip yarımkeçiricilərdə də injeksiya cərəyanlarının spesifik xüsusiyyətlərinin aşkar edilməsi, mexanizminin aydınlaşdırılması bərdə əlavə məlumatlar əldə etmək məqsədi ilə biz qadoliniumla (Gd) aşqarlanmış  $n$ -InSe kristallarında monopolyar injeksiya rejimində həcmi yüklərlə məhdudlanmış cərəyanları (HYMC) [8] tədqiq etmişik.

## 2. NÜMUNƏLƏR VƏ EKSPERİMENTİN ŞƏRAİTİ

Ölçmələrdə istifadə etdiyimiz nümunələr, şəkli dəyişdirilmiş Bricmen üsulu [9] ilə alınmış [10]-da təsvir olunan texnologiya əsasında alınmış  $N=0$ ;  $10^{-5}$ ;  $10^{-4}$ ;  $10^{-3}$ ;  $5 \cdot 10^{-3}$ ;  $10^{-2}$ ;  $10^{-1}$  at.% miqdarında Gd-la aşqarlanmış  $n$ -InSe kristallarından ( $n$ -InSe<Gd>) kəsilmişdir. Düzbucaqlı lövhə şəklində olan sendviç quruluşlu həmin nümunələrin «C» oxu (laylara perpendikulyar) istiqamətində qalınlığı  $d \approx 0.20 \div 0.30$  mm, «C» müstəvisi üzrə eninə ölçüləri isə  $5.0 \times 5.0$  mm<sup>2</sup> aralığında dəyişən bu nümunələrin 77K-də Gd aşqarlarının miqdarından asılı olaraq qaranlıq xüsusi müqavimətləri  $N$ -dən qeyri-monoton asılı olmaqla  $\rho_0 \approx 10^3 \div 10^6$  Om-sm aralığında qiymətlər alır. Cərəyan kontaktları materialı olaraq metal indium (In), qalay (Sn), gümüş pastası və akvadaqdan istifadə edilmişdir. Ölçmələr temperaturun  $77 \leq T \leq 350$  K intervalında, elektrik sahəsinin  $E \leq 2 \cdot 10^3$  V/sm-ə qədər olan qiymətlərində aparılmışdır. Təcrübə olaraq, müxtəlif xarici şəraitlərdə statik volt-

ampere xarakteristikalar (VAX) (şəkil 1), cərəyanın sıxlığının temperaturdan (şəkil 2) və nümunənin qalınlığından (şəkil 3) asılılığı ölçülmüşdür.

## 3. TƏCRÜBİ NƏTİCƏLƏR VƏ ONLARIN MÜZAKİRƏSİ

Həyata keçirilən ölçmələr zamanı aşkar edilmişdir ki, temperaturun  $T \leq 120$  K qiymətlərində təmiz (xüsusi olaraq aşqarlanmamış)  $n$ -InSe kristallarından hazırlanmış nümunələrdə qaranlıqda statik VAX kiçik gərginliklərdə eksponensial qanuna tabe olur. Sonra isə nümunəyə tətbiq olunan gərginliyin artırılması ilə VAX-da bir-birini ardıcıl əvəz edən  $r=1$ ,  $r=2$ ,  $r>2$  və yenidən  $r=2$  üst göstəricisinə malik üstlü ( $i \sim U^r$ ) qanunla dəyişən hissələr müşahidə edilir (şəkil 1).

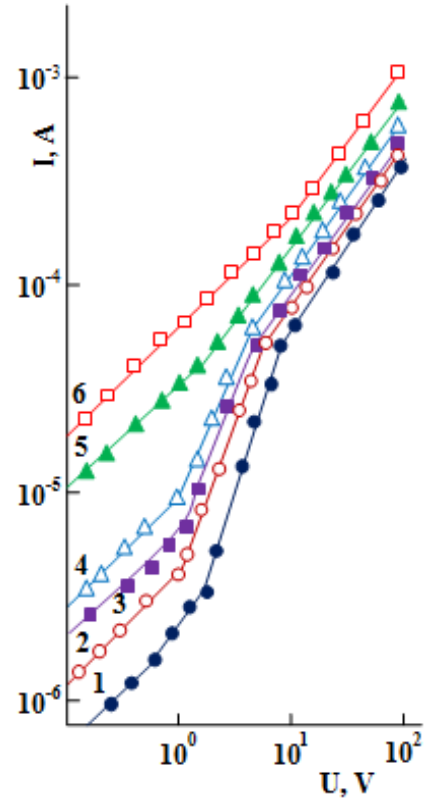
Hər iki qrup kristalların tədqiq olunan nümunələrində qaranlıqdakı cərəyanın sıxlığının temperaturdan asılılığı da maraqlı xüsusiyyətlərə malikdir (şəkil 2). Belə ki, gərginliyin çox kiçik (qaranlıqdakı VAX-ın eksponensial hissəsinə uyğun olan) qiymətlərində  $j=f(10^3/T, K)$  qrafikləri müxtəlif meyilli ardıcıl iki düz xəttəndən ibarətdir, yəni cərəyanın sıxlığı aktivləşmə xarakterlidir və bu hissələrə uyğun aktivləşmə enerjisi  $\varepsilon_{\alpha 1} \leq 0.07$  eV;  $\varepsilon_{\alpha 2} \approx (0.25 \div 0.30)$  eV tərtibindədir. Nümunəyə tətbiq olunmuş xarici gərginliyin qiyməti artırıldıqca  $j(10^3/T, K)$  asılılığının qrafiki öz şəklini tədricən dəyişərək, nəhayət, müxtəlif gərginliklərdə eyni  $\varepsilon_{\alpha} \approx (0.20 \div 0.25)$  eV aktivləşmə enerjisində malik, yəni eyni bir meyilli, təqribən paralel xətlərdən ibarət olur. Xarici gərginliyin sonrakı artırılmasında isə  $\varepsilon_{\alpha}$ -nın qiyməti yalnız müxtəlif nümunələr üçün çox cüzi fərqlənir, tətbiq edilən xarici gərginlikdən isə asılı olmur.

Aşkar olunmuşdur ki, tədqiq etdiyimiz nümunələri məxsusi udma oblastından olan işıqla işıqlandırdıqda aşağı temperaturalarda VAX-ın başlanğıc hissəsində qaranlıqda müşahidə olunan eksponensial hissə aradan qalxır, VAX-ın xətti qanuna tabe olduğu gərginlik diapazonu daha böyük gərginliklərə tərəf genişlənir, sərt qalxan hissəsi isə işığın intensivliyi artırıldıqca tədricən yox olur. Son nəticədə, tədqiq edilən nümunələrin məxsusi udma oblas-

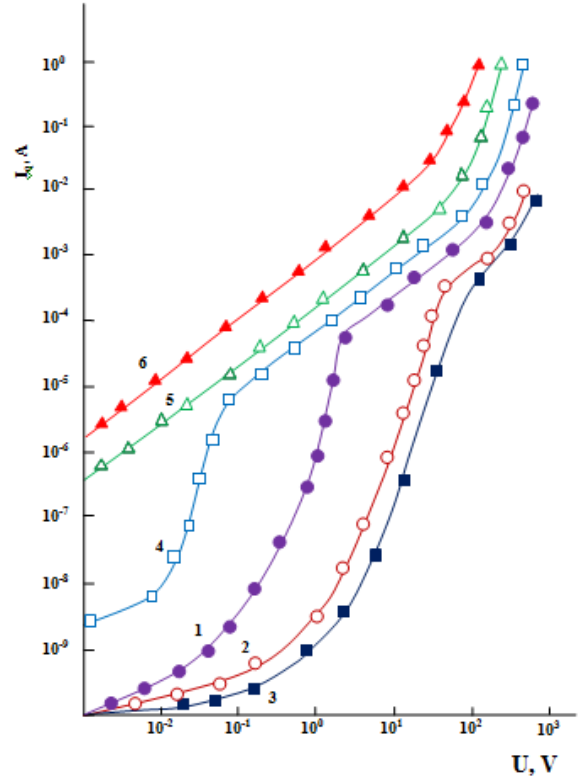
tından olan işığın təsiri altındakı VAX-ı yalnız başlanğıc xətti və onun ardınca gələn və çeviricilik effektinin [11] baş verdiyi xarici gərginliyə qədər davam edən kvadratik hissədən ibarət olur. Tədqiq olunan nümunələrə məxsusi udma oblastından olan işıqla təsir etdikdə, hətta kiçik, daha doğrusu VAX-ın başlanğıcındakı eksponensial hissəyə uyğun xarici gərginliklərdə də  $j(10^3/T, K)$  asılılığında kiçik aktivləşmə enerjisi ilə xarakterizə olunan birinci hissə aradan qalxır və  $j(10^3/T, K)$  asılılığı yalnız meyli  $\varepsilon_{a2}$ -yə uyğun gələn bir düz xəttədən ibarət olur.

Gd-la aşqarlanmış  $n$ -InSe kristallarından hazırlanmış bərabər qalınlıqlı nümunələrdə eyni temperaturda statik VAX-ın forması, onun bir üstlü hissədən digərinə keçid nöqtələrinə uyğun gərginliyin qiyməti (şəkil 1, b), kiçik aktivləşmə enerjisinə malik hissədən ( $\varepsilon_{a1}$ ) böyük aktivləşmə enerjisinə ( $\varepsilon_{a2}$ ) malik hissəyə keçid nöqtəsinə uyğun gələn cərəyan sıxlığının qiyməti və temperatur (şəkil 2) Gd aşqarının miqdarından asılı olaraq fərqlənir. Gd aşqarının miqdarı artdıqda, əvvəlcə ( $\sim 10^{-3}$  at. %-ə qədər) aşağı temperaturlarda statik VAX-ın başlanğıc hissəsindəki eksponensial hissə daha da kəskinləşir və onun davam etdiyi xarici gərginlik diapazonunun yuxarı sərhədi gərginliyin daha böyük qiymətlərinə doğru sürüşür. Bundan başqa, Gd aşqarının belə kiçik miqdarlarında  $N$  artdıqca, statik VAX-ın xətti hissədən birinci kvadratik hissəyə ( $U_{1-2}$ ) və sərt yüksələn hissədən ikinci kvadratik hissəyə ( $U_{r-2}$ ) keçid nöqtələrinə uyğun gərginliklərin qiyməti böyüyür (şəkil 1, b). Bu zaman ikinci kvadratik hissədə gərginliyin hətta çox kiçik böyüməsi də nümunədən axan cərəyanın qiymətinin əhəmiyyətli dərəcədə artımını yaradır. Gd aşqarının kiçik miqdarlarında  $N$ -nin qiyməti böyüdükcə tədqiq olunan nümunələrdə cərəyanın sıxlığının temperaturdan asılılığı qrafikləri də dəyişikliyə uğrayır (şəkil 2). Belə ki, həmin qrafiklər yenə də müxtəlif aktivləşmə enerjisində malik iki düz xəttli hissədən ibarət olsalar da,  $N=10^{-5}$  at. % qiymətində aşağı temperaturda intervalı təmiz kristallardakı ilə müqayisədə nəzərəcarpacaq dərəcədə genişlənir – onun yuxarı sərhədi ( $T_S$ ) daha yüksək temperaturlara tərəf sürüşür. Gd aşqarının kiçik miqdarlarında  $N$ -nin artırılması  $\varepsilon_{a1}$ -in və  $T_S$ -in daha da böyümələrinə səbəb olur.  $N>10^{-3}$  at. % qiymətlərində isə  $j(10^3/T, K)$  asılılığının yüksək temperaturda uyğun ikinci hissəsinin meyli dəyişir, aşağı temperaturda uyğun birinci hissəsi isə tədricən aradan qalxır.  $N$ -in  $\sim 10^{-1}$  at. % qiymətində  $j(10^3/T, K)$  asılılığı təmiz  $n$ -InSe kristallarında kiçik böyük gərginliklər və ya məxsusi udma oblastından olan işıqla işıqlandırılma hallarına uyğun gəlir.

Təcrübi ölçmələrdə aldığımız nəticələrə əsasən qurduğumuz qrafiklərin mövcud nəzəriyyələr [8, 12] əsasında təhlili imkan verir deyək ki, ölçmələr apardığımız şəraitdə tədqiq etdiyimiz nümunələrdən yükdaşınma prosesi monopolyar injeksiya rejimində HYMC-la təyin olunur. Bu fikrin doğruluğunu yəqinləşdirmək üçün VAX-ın  $i \sim U^2$  hissələrində tədqiq etdiyimiz nümunələrdə qaranlıq cərəyanın sıxlığının ( $j$ ) həmin nümunələrin qalınlığından ( $d$ ) asılılığının qrafiklərini qurmuşuq və bu asılılığın kifayət qədər dəqiqliklə  $j \sim d^{-3}$  qanununa tabe olduğu aşkar edilib (şəkil 3).

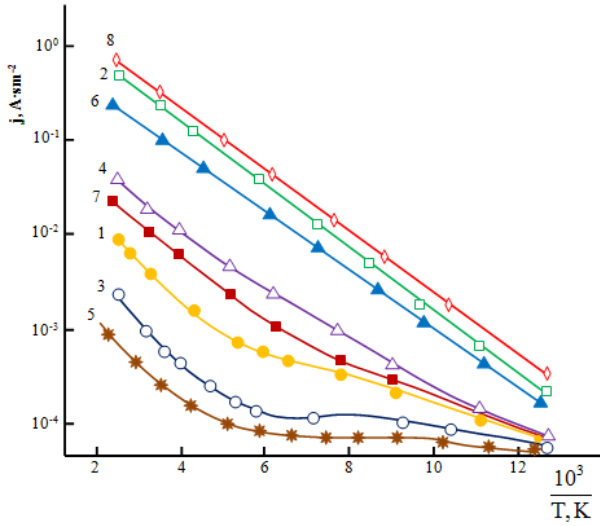


(a)



(b)

Şəkil 1. Təmiz (a) və Gd-la müxtəlif miqdarda aşqarlanmış (b)  $n$ -InSe kristallarının müxtəlif temperaturlarda statik volt-ampere xarakteristikaları.  
(a)  $T, K$ : 1- 77; 2- 130; 3- 180; 4- 230; 5- 300; 6- 350.  
(b)  $N, at. \%$ : 1, 6- 0; 2-  $10^{-5}$ ; 3-  $10^{-4}$ ; 4-  $10^{-3}$ ; 5-  $10^{-1}$ ;  
 $T=77 K$ .



Şəkil 2. Təmiz (1, 2) və Gd-la aşqarlanmış (3-10) *n*-InSe kristallarında qaranlıqdakı cərəyanın sıxlığının müxtəlif gərginliklərdə temperaturdan asılılığı. U, V: 1, 3, 5, 7-1,5; 2, 4, 6, 8-20; N, at.-%: 1, 2-0; 3, 4-10<sup>-5</sup>; 5, 6-10<sup>-3</sup>; 7, 8-10<sup>-1</sup>.

Mövcud nəzəri müddəalara əsasən [8, 12] deyirik ki, bu nəticə tədqiq etdiyimiz nümunələrdə ölçmələrin aparıldığı şəraitdə cərəyanaxma mexanizmi haqqında irəli sürdüyümüz fikrin doğruluğuna dəlalət edir. Digər tərəfdən,  $\theta = r-1$  kəmiyyətinin temperaturdan

$$\theta = \frac{T_t}{T} \quad (1)$$

şəklində asılı olması da, eyni qərara gəlməyə imkan verir [8]. Burada  $T_t$  - tədqiq edilən yarımkeçirici material üçün xarakterik temperatur adlanan sabit kəmiyyətdir və *n*-InSe kristalları üçün onun qiyməti ~800 K-dir [13]. Bu yanaşmalar həm də imkan verir deyək ki, tədqiq etdiyimiz Gd-la aşqarlanmış *n*-InSe kristallarında HYMC həmin kristalların qadağan olunmuş zonasında eksponensial qanunla paylanmış tutma mərkəzlərinin mövcudluğu şəraitində baş verir. Bundan əlavə, tədqiq edilən nümunələrin VAX-ında sərt yüksələn ( $i \sim U^r$ ,  $r > 2$ ) hissədən əvvəl «tələli» kvadratik oblastın [8] müşahidə olunması isə həmin tutma mərkəzlərinin, Fermi səviyyəsinin ( $F_0$ ) tarazlıq vəziyyətindən əhəmiyyətli dərəcədə yuxarıda yerləşdiyini ( $\frac{\varepsilon_i - F_0}{kT} \gg 1$ ), daha doğrusu, onların hamısının boş olduğunu göstərir.

Bu deyilənlərə istinad edərək, alınmış təcrübi nəticələrə əsasən

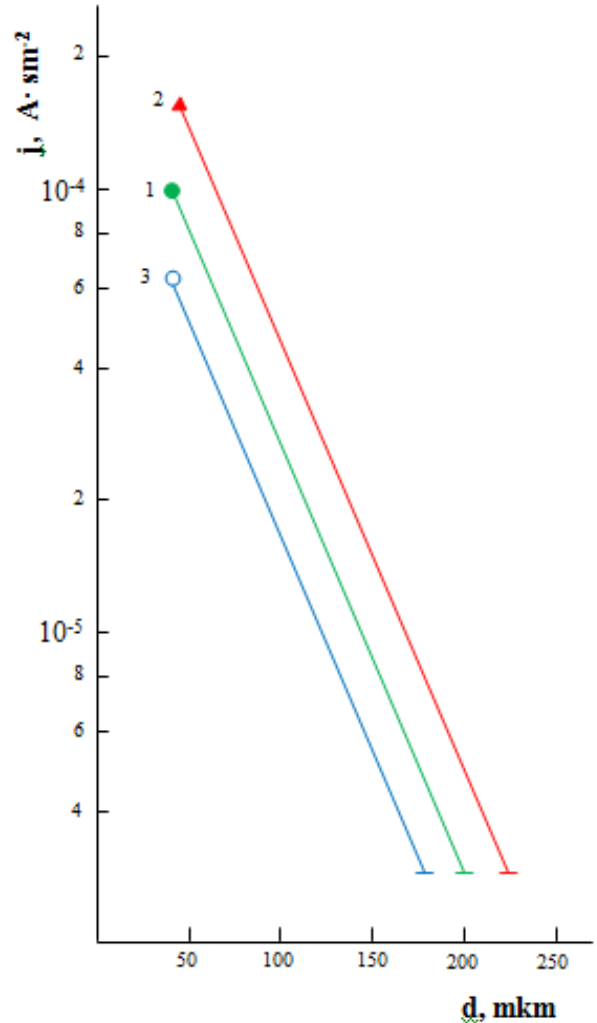
$$n_0 \approx \frac{\chi U_{1-2}}{ed^2} \quad (2)$$

və VAX-ın ikinci kvadratik oblastında

$$\mu_n \approx \frac{jd^3}{\chi U^2} \quad (3)$$

ifadələrindən [8] tədqiq olunan nümunələrdə müxtəlif şə-

raitlərdə sərbəst yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının ( $n_0$ ) və yürüklüyünün ( $\mu_n$ ) qiymətlərini hesablamışıq. Bu ifadələrdəki  $\chi$  - baxılan yarımkeçiricinin dielektrik nüfuzludur və indium monoselenidi kristalları üçün onun qiyməti ~10-dur [14].



Şəkil 3. Təmiz (1) və müxtəlif miqdarda Gd-la aşqarlanmış *n*-InSe (2, 3) kristallarında qaranlıq statik VAX-ın birinci kvadratik ( $j \sim U^2$ ) hissəsində cərəyanın sıxlığının ( $j$ ) nümunənin qalınlığından ( $d$ ) asılılığı.  $T=77$  K; N, at.-%: 1-0; 2-10<sup>-1</sup>; 3-10<sup>-3</sup>.

Alınmış qiymətlər göstərir ki, təmiz kristallarda olduğu kimi, az miqdarda Gd-la aşqarlanmış *n*-InSe kristallarında da 77 K-də  $n_0$  və  $\mu_n$  çox kiçik qiymətlərə (uyğun olaraq ~10<sup>6</sup>-10<sup>7</sup> sm<sup>-3</sup> və ~0.1-10 sm<sup>2</sup>/V·s) malikdir. Lakin temperaturun ( $T$ ) və nümunəyə tətbiq olunan xarici elektrik sahəsinin ( $E$ ) yüksəlməsi ilə bu kəmiyyətlərin qiymətləri sürətlə artır. Təmiz kristallarda olduğu kimi, Gd-la aşqarlanmış *n*-InSe kristallarında da,  $n_0(T, E)$  və  $\mu_n(T, E)$  asılılıqlarının dikliyi çox böyükdür. Belə ki,  $E$ -nin sabit qiymətində temperaturun 77K-dən ~200 K-nə qədər yüksəlməsi ilə  $n_0 \approx 10^{10} \div 10^{11}$  sm<sup>-3</sup>-ə,  $\mu_n$  isə ~100-150 sm<sup>2</sup>/V·s-ə qədər, eləcə də  $T=77$ K-də,  $U \geq U_{2-r}$  olduqda  $E$ -nin 2-3 dəfə böyüməsi ilə  $\mu_n$  təqribən 5-10 dəfə yüksəlir. Eyni zamanda bu hesablamalar, Gd aşqarının kiçik miqdarlarında  $N$ -in böyüməsi ilə  $n_0$  və  $\mu_n$ -nin daha da kiçildiyini göstərir. Bu nəticə kvazinizamlı kristal yarımkeçiricilərdə

HYMC üçün Lampert nəzəriyyəsinin [11] müddəalarına uyğun gəlir.  $N$ -in böyük qiymətlərinə uyğun təcrübi nəticələrə əsasən aparılmış hesablamalar isə Gd-un miqdarının artması ilə  $n_0$  və  $\mu_n$ -in qiymətlərinin böyüdüyünü, həmin kəmiyyətlərin temperaturdan və elektrik sahəsindən asılılıqlarının isə zəiflədiyini göstərir. Belə ki,  $N \approx 10^{-1}$  at.% olduqda,  $77 \div 100$  K-də Gd-la aşqarlanmış  $n$ -InSe kristallarında, uyğun olaraq,  $n_0 \approx 10^9 \div 10^{10} \text{sm}^{-3}$ ;  $\mu_n \approx 600 \div 650 \text{sm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  qiymətlərinə çatır. Temperatur 300K-nə qədər yüksəldikdə isə bu kristallarda sərbəst yükdaşıyıcıların konsentrasiyası  $n_0 \approx 10^{12} \div 10^{13} \text{sm}^{-3}$ , yürüklüyü isə  $\mu_n \approx 900 \div 1200 \text{sm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  olur.

Ölçmələrdə aldığımız təcrübi nəticələrə əsasən  $n_0$  və  $\mu_n$ -dən əlavə, HYMC üçün Lampert nəzəriyyəsinin [8] uyğun

$$N_t = \frac{\chi U_{r-2}}{ed^2} \quad (4)$$

ifadəsindən istifadə etməklə həm müxtəlif temperaturlarda, həm də Gd aşqarının müxtəlif miqdarlarında tədqiq etdiyimiz nümunələrin qadağan olunmuş zonasındakı tutma mərkəzlərinin sıxlığını hesablamışıq. Bundan əlavə, yenə də həmin nəzəriyyənin

$$\theta = 10^{13} \frac{d^3 j}{\chi \mu U} \quad (5)$$

ifadəsinə əsasən zəif elektrik sahəsində VAX-ın «tələli» kvadratik hissəsində müxtəlif temperaturalarda  $\mu$ -nün qiymətini nəzərə almaqla, onların tarazlıq halındakı  $n_0$  konsentrasiyasının, «tələ»lərdə tutulmuş yükdaşıyıcıların  $n$  konsentrasiyasına olan nisbətini göstərən  $\theta = \frac{n_0}{n}$  kəmiyyətini qiymətləndirmişik. Monopolyar injeksiya rejimində HYMC üçün Lampert nəzəriyyəsinin müddəalarına görə, bu kəmiyyətin temperaturdan asılılığına əsasən, daha doğrusu,  $\theta \left( \frac{10^3}{T, K} \right)$  asılılığını təsvir edən qrafik-

lərin meyindən, tədqiq etdiyimiz nümunələrin qadağan olunmuş zonasındakı tutma mərkəzlərinin enerji dərinliyini də təyin etmişik. (4) və (5) ifadələri əsasında apardığımız hesablamalarla müəyyənləşdirilmişdir ki, tədqiq etdiyimiz yarımkeçiricinin qadağan olunmuş zonasında iki qrup tutma mərkəzləri var. Bu səviyyələrin Gd-la aşqarlanmış  $n$ -InSe kristallarında enerji dərinlikləri  $\varepsilon_{i1} = \varepsilon_c - 0.20$  eV;  $\varepsilon_{i2} = \varepsilon_c - 0.45$  eV-dür və  $N$ -in kiçik qiymətlərində aşqarın miqdarından asılı deyil.  $N$ -nin böyük ( $N \approx 10^{-2} \div 10^{-1}$  at.%) qiymətlərində isə  $\varepsilon_{i1}$ -in təmiz kristallardakına nəzərən cüzi dəyişməsi (əksər hallarda kiçilməsi) hiss olunur. Qeyd etmək lazımdır ki,  $\varepsilon_{i1}$  və  $\varepsilon_{i2}$  üçün təyin etdiyimiz qiymətlər həmin nümunələrdə asılı olmayan digər ölçmələrdən (temperaturla stimullaşdırılmış cərəyan, induksiyalanmış aşqar fotokeçiricilik, fotoelektrik yorulma) tapılmış dayaz  $\alpha$ - və dərin  $\beta$ - tutma mərkəzlərinin enerji dərinliyinin qiymətləri ilə yaxşı uzlaşır. Bu tutma mərkəzlərinin sıxlığının ( $N_{i1}$  və  $N_{i2}$ ) qiymətləri isə Gd aşqarının miqdarından əhəmiyyətli dərəcədə asılıdır. Belə ki,  $N$ -in kiçik qiymətlərində hər iki səviyyənin

sıxlığı ( $N_{i1}$  və  $N_{i2}$ ) təmiz kristallardakı ilə müqayisədə artır. Bununla belə,  $N_{i1}$ -in artması kəskin xarakter daşıyır və  $N \approx 10^{-5} \div 10^{-4}$  at.% qiymətlərində  $N_{i1} \approx 10^{23} \text{sm}^{-3}$ -ə çatır. Bizim fikrimizcə,  $N_{i1}$  üçün belə, yəni həddən artıq böyük qiymət, heç də çox kiçik miqdarda ( $\sim 10^{-4}$  at.%-dən az) Gd-la aşqarlama nəticəsində dayaz  $\alpha$ -tutma mərkəzlərinin sıxlığının böyüməsinə deyil, başlıca olaraq, kristaldaxili vəziyyətin Lampert nəzəriyyəsinə tabe ola biləcək halından daha çox yayındığına dəlalət edir. Gd-un miqdarının sonrakı artmasında  $N_{i1}$ -in qiyməti əvvəlcə ( $N \leq 10^{-3}$  at.% olduqda) kəskin kiçilir ( $\sim 10^{18} \div 10^{19} \text{sm}^{-3}$  tərtibində olur), sonra isə ( $N$ -nin qiyməti  $10^{-3}$  at. %-dən  $10^{-1}$  at. %-ə qədər artdıqda) yenidən  $\sim 1 \div 2$  tərtib böyüyür ( $\sim 10^{19} \div 10^{20} \text{sm}^{-3}$  olur). Məsələn burasındadır ki, Gd aşqarının miqdarı  $10^{-5}$  at. %-dən  $\sim 10^{-1}$  at. %-ə qədər artdıqda  $N_{i1}$ -in qiymətinin kəskin kiçilməsi, adətən aşağı (VAX-ın başlanğıc hissəsindəki eksponensial hissənin, eləcə də sərbəst yükdaşıyıcıların yürüklüyünün temperaturlardan baş verir. Daha yüksək temperaturlarda isə təmiz kristallarda da  $N_{i1}$ -in Lampert nəzəriyyəsi əsasında tapılmış qiymətləri çox da böyük olmur ( $\sim 10^{17} \div 10^{18} \text{sm}^{-3}$  təşkil edir) və  $N$ -nin qiyməti  $10^{-5}$  at. %-dən  $10^{-1}$  at. %-ə qədər artdıqda  $\approx 10^{19} \div 10^{20} \text{sm}^{-3}$ -ə qədər yüksəlir.

Gd aşqarlarının miqdarı  $\sim 10^{-3}$  at. %-ə qədər artdıqca sərbəst yükdaşıyıcıların yürüklüyünün və konsentrasiyasının nümunəyə tətbiq olunan xarici elektrik sahəsindən asılılığı güclənir. Sonra isə ( $N > 10^{-3}$  at.% qiymətlərində)  $N$  artdıqca bu asılılıq zəifləyir və nəhayət, aşqarın miqdarı  $\sim 10^{-1}$  at. %-ə çatdıqda tamamilə yox olur. Statik VAX-a, eləcə də monopolyar injeksiya rejimində HYMC nəzəriyyəsinə yayınma dərəcəsinə, bu nəzəriyyənin yaxşı ödənilməsi şəraitdə ayrı-ayrı fiziki parametrlərin ( $n_0$ ;  $\mu_n$ ;  $N_{i1}$  və  $N_{i2}$ ;  $\varepsilon_{i1}$  və  $\varepsilon_{i2}$ ) qiymətlərinə müxtəlif texnoloji amillərin və tədqiq etdiyimiz yarımkeçiricinin laylı quruluşunun təsiri də araşdırılmışdır. Müəyyənləşdirilmişdir ki [14], bəzi yarımkeçiricilərdə baş verə bilən və cərəyan kontaktlarının yaradılması zamanı kontakt materialının nümunə daxilinə müəyyən dərinliyə qədər diffuziyası nəticəsində kontaktlararası real məsafəni ( $d$ ) nümunənin həndəsi qalınlığına ( $d$ ) nəzərən kiçildən hadisə, «real kontakt» problemi, kristalın laylı quruluşlu olması hesabına HYMC nəzəriyyəsinin onlar üçün monolit nümunələrdəkindən fərqli xarakterə malik ola bilməsi ehtimalları baxılan şəraitdə özünü doğrultmur. Az miqdarda ( $\sim 10^{-5} - 10^{-1}$  at.%) Gd-la aşqarlanmış  $n$ -InSe kristallarında ölçmələr apardığımız xarici şəraitlərdə cərəyan kontaktlarından injeksiya olunmuş yükdaşıyıcıların tutma mərkəzlərində lokallaşması hesabına kvazi Fermi səviyyəsinin ( $\Delta F$ ) sürüşməsi də qiymətləndirmişdir. Məlum [11]

$$\Delta F = kT_i \ln \frac{U_M}{U_{1-2}} \quad (6)$$

ifadəsi (burada  $U_M$  - ölçmələr zamanı nümunəyə tətbiq olunan xarici gərginliyin maksimal qiyməti,  $k$  - Bolsman sabiti,  $T$  - mütləq temperaturdur) əsasında aparılan hesablamalar Gd aşqarlarının  $10^{-2} \div 10^{-1}$  at.% miqdarında  $77 \div 350$  K diapazonunda  $\Delta F$ -in qiymətinin  $\sim 0.17$  eV təşkil etdiyini göstərir. Bu isə o deməkdir ki, tədqiq etdiyimiz kristallarda monopolyar injeksiya şəraitində Lampertin

HYMC üçün nəzəriyyəsinin tətbiqi çərçivəsində alınmış nəticələri izah etmək üçün Fermi səviyyəsinin yalnız  $\sim 0.17$  eV ətrafındakı hissədə, tutma mərkəzlərinin eksponensial paylanması qəbul etmək düzgündür.

Alınmış təcrübə nəticələrinin müqayisəli təhlili imkan verir deyək ki, müxtəlif şəraitlərdə  $n$ -InSe<Gd> monokristallarında Lampert nəzəriyyəsinin statik VAX-a tətbiqi ilə alınmış nəticələrin aşqarın miqdarından asılılığının bəzi hallarda reallığa daha çox uyğun gəlməsi, bəzən isə ondan ciddi şəkildə yayınması da məhz  $N$ -dən asılı olaraqdır. Fərz etmək olar ki, Gd atomları kristalın laylarında həll olunaraq, əvvəla, qonşu laylar arasındakı əlaqəni gücləndirir və dielektrik nüfuzluğunun «C» oxuna nəzərən anizotropiyasını kiçildir. Digər tərəfdən, aşqarın böyük miqdarlarında kristalın qonşu layları arasında rabitənin güclənməsi onun nizamsızlıq dərəcəsini azaldır və onu kvazinizamly hala yaxınlaşdırır. Aşqarın miqdarı  $10^{-2}$ - $10^{-1}$ at.% olduqda, Lampertin HYMC nəzəriyyəsi əsasında tutma mərkəzlərinin sıxlığı və enerji dərinliyi, eləcə də sərbəst yükdaşıyıcıların konsentrasiyası və yürüklüyü üçün tapılmış qiymətlər reallığa daha çox uyğun gəlir.

## YEKUN

$n$ -InSe monokristallarında  $T \leq (100 \div 120)$ K temperatur və kiçik gərginliklər oblastında cərəyanın axmasında monopolyar injeksiya mühüm rol oynasa da, həmin cərəyanın xüsusiyyətlərinə həcmi yüklə yanaşı, bu kristalların qismən nizamsızlığı hesabına sərbəst enerji zonalarında yaranan dreyf çəpərlərinin də təsirini nəzərə almaq lazımdır. Bu amil, ilk növbədə müəyyən şəraitdə VAX-ın tədqiqindən alınmış nəticələrin kvazinizamly kristal yarımkeçiricilərdə həcmi yüklə məhdudlanmış cərəyanlar üçün olan Lampert nəzəriyyəsi əsasında alınan nəticələrdən əhəmiyyətli dərəcədə fərqlənməsinə səbəb olur. Qadoliniumla aşqarlanmış  $n$ -InSe monokristallarında aşqarlanma səviyyəsinin, daha doğrusu, kristala daxil edilən aşqarın miqdarının  $0 \div 10^{-1}$ at.% intervalında dəyişməsinin injeksiya cərəyanlarına təsiri isə həmin kristalların qismən nizamsızlıq dərəcəsini aşqarlama səviyyəsindən müvafiq şəkildəki asılılıqdan irəli gəlir. Qadoliniumla təqribən  $10^{-1}$ at.% miqdarında aşqarlanmış  $n$ -InSe monokristallarında temperaturun geniş diapozonunda digər elektron hadisələri kimi, injeksiya cərəyanları üçün də qadağan olunmuş zonasında iki qrup tutma səviyyələri olan kvazinizamly kristal yarımkeçirici modeli təmin olunur.

- [1] A. Politano, G. Chiarello, R. Samnakay, G. Liu, B. Gurbulak, S. Duman, A.A. Balandin, D.W. Boukhalov. NANOSCALE. 2016. t. 8, vol.16, p. 8474-8479.
- [2] T. Ohta, A. Klast, Y.A. Adams, Q. Yu, M.A. Olmstead, F.S. Ohuchi. Phys. Rev., 2004, B 69, 125322.
- [3] А.И. Дмитриев, В.В. Вишняк, Г.В. Лашкарев, В.Л. Карбовский, З.Д. Ковалюк, А.П. Бахтинов. ФТТ, 2011, т. 53, Вып.3, с. 579-589.
- [4] S.R. Tamalampudi, Y.Y. Lu, U.R. Kumar, R. Sankar, C.D. Liao, B.K. Moorthy, C.H. Cheng, F. Chou, Y.T. Chen. Nano letters, 2014, t.14, vol. 5, p. 2800-2806.
- [5] W. Feng, J.B. Wu, X.L. Li, W. Zheng, X. Zhou, K. Xiao, W.W. Cao, B. Yang, J.C. Idrobo, L. Basile. Journal of Materials Chemistry C, 2015, t. 3, vol. 27, p. 7022-7028.
- [6] A. Milutinovic, Z.Z. Lazarevic, M. Jakovljevic, B. Hadzic, M. Petrovic, M. Gilic, W.D. Dobrowolski, N.Z. Romcevic. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2016, t. 89, p.120-127.
- [7] A.A.A. Darwish, T.A. Hanafy, A.A. Attia, D.M. Habashy, M.Y. El-Bakry, M.M. El-Nahass. Superlattices and microstructures, 2015, t. 83, p.299-309.
- [8] М. Ламперт, П. Марк. Инжекционные токи в твердых телах. М. «Мир», 1973, 446 с.
- [9] Р.Ф. Мехтиев, Э.О. Османов, Ю.В. Рудь. Приборы и техника эксперимента, 1964, 2, с.174-176.
- [10] А.М. Гусейнов, Т.И. Садыхов. В сб.: Электрофизические свойства полупроводников и плазмы газового разряда. Баку, АГУ, 1989, с.42-44.
- [11] Ə.Ş. Abdinov, R.F. Babayeva. Bakı Universitetinin xəbərləri. 2009. №3, s.139-147.
- [12] Ф. Гутман, Л. Лайонс. Органические пролупроводники. М. «Мир», 1970, 696 с.
- [13] А.Ш.Абдинов, А.Г. Кязым-заде, Н.М. Мехтиев, М.Д. Хомутова, А.Г. Шарипов. ФТП, 1976, т.10, №1, с. 76-80.
- [14] А.Ш. Абдинов, Я.Г. Гасанов, Ф.И. Мамедов. ФТП, 1982, т. 16, № 6, с. 993-998.

**A.Sh. Abdinov, R.F. Babayeva**

### INJECTION CURRENTS IN INDIUM MONOSELENIDE CRYSTALS DOPED WITH GADOLINIUM

In pure and doped with  $10^{-5}$ - $10^{-1}$  at.% gadolinium  $n$ -InSe single crystals static current-voltage characteristics at various temperatures and the current density dependence at various electric fields have been investigated. It was found, that in a wide range of temperature and external voltage variations in both types of crystals a current flow takes place in a regime of space charge limited currents. At the same time, the experimental results obtained for high temperatures and weak doping ( $N \leq 10^{-3}$  at.%) not at all can be explained on the basis of the Lampert theory for these currents. It is shown, that the main reason for this discrepancy is due to the fact, that these crystals are partially disordered.

**А.Ш. Абдинов, Р.Ф. Бабаева**

**ИНЖЕКЦИОННЫЕ ТОКИ В КРИСТАЛЛАХ МОНОСЕЛЕНИДА ИНДИЯ, ЛЕГИРОВАННЫХ  
ГАДОЛИНИЕМ**

Исследованы статические вольт-амперные характеристики при различных температурах и зависимости плотности тока от температуры в различных электрических полях в чистых и легированных ( $10^{-5}$ - $10^{-1}$  ат.%) гадолинием монокристаллах *n*-InSe. Установлено, что при широком диапазоне изменения температуры и внешнего напряжения токопрохождение в обеих группах кристаллов происходит в режиме токов, ограниченных объемным зарядом (ТООЗ). При высоких температурах и малых содержаниях введенной примеси ( $N \leq 10^{-3}$  ат.%) полученные результаты не объясняются на основе лишь теории Ламперта для ТООЗ и необходимо учесть также роль частичной неупорядоченности рассмотренных кристаллов.

*Qəbul olunma tarixi: 14.09.2017*