

LANTANOİD AŞQARLARIN QURĞUŞUN HALKOGENİDLƏRİNDƏ
YÜKDAŞIYICILARIN SƏPİLMƏ MEXANİZMİNƏ TƏSİRİ

HÜMMƏT HƏSƏNOV

Milli Təhlükəsizlik Nazirliyinin Heydər Əliyev adına Akademiyası
h.hasanov@yahoo.com

Təqdim olunmuş işdə son on il ərzində qurğuşun halkogenidlərində lantanoidlərin yaratdığı aşqar səviyyələrlə bağlı olan problemlərə həsr olunmuş tədqiqatların nəticələrinin təhlili verilmişdir. Qurğuşun halkogenidlərində lantanoid aşqarların akseptor və donor xarakterlərinə malik olmaları faktı aydınlaşdırılmışdır. Müəyyən olunmuşdur ki, lantanoidlər qurğuşun halkogenidlərində kvazilokal, dərin və rezonans aşqar səviyyələri yaratmağa qadirdirlər. Aşqar halların güclü lokallaşması nəzərə alınaraq, yüngül və ağır dəşiklərin müxtəlif nisbətləri üçün, yüngül dəşiklərin samarium aşqarında səpilməsinin kəsiyi hesablanmışdır. $PbX-SmX$, $PbX-Ln_2X_3$ ($2d_e, X-S, Se, Te$, $Ln-Nd, Sm, Gd$) sistemi bərk məhlullarının elektrofiziki parametrlərinin formalaşmasında öz-özünə kompensasiya hadisəsinin rolu müəyyənləşdirilmişdir. Lantanoid aşqarların donor-akseptor təsir mexanizmini təsvir edən model təklif olunmuşdur.

Darzolaqlı yarımkəçiricilər qrupuna aid olan $A^{IV}B^{VI}$ birləşmələri unikal fiziki xassələrə və zəngin tətbiq perspektivlərinə malik olan materiallardır. Otaq temperaturunda işləyən yarımkəçirici lazerlər, termoelektrik çeviricilər, uzaq infraqırmızı və submillimetr diapazonlarında işləyən və yüksək həssaslığa malik olan qəbuledicilərin baza materialları məhz qurğuşun halkogenidləridir. Materialı praktiki cəhətdən perspektivli edən onun qeyri-trivial xassələrindəki bərk məhlullarda qiyməti tərkibdən asılı olaraq tənzim oluna bilən düz qadağan olunmuş zonaya, şüalandırıcı rekombinasiyanın yüksək effektivliyə, statik dielektrik nüfuzluluğunun 10^4 -ə çatan böyük qiymətlərinə, yükdaşıyıcıların $10^{-2}m_0$ tərtibində olan effektiv kütlənin kiçik qiymətlərə malik olması kimi xüsusiyyətlərdir. Nəticədə yüklü aşqarların Kulon potensialı tam ekranlaşdırılır və onun yükdaşıyıcıların yüyürlüklüyünə təsiri minimuma endirilir.

Strukturun yüksək defektliliyi $A^{IV}B^{VI}$ birləşmələrinin ən böyük nöqsanı hesab olunur. Standart sintez metodlarından istifadə etdikdə, birləşmədə vakansiya və düyünlərəarası atomların konsentrasiyası $10^{18} \div 10^{19} sm^{-3}$ -ə çatır. Yetişdirmə prosesində defektlərin əksəriyyəti elektrik cəhətdən aktiv olduqlarından, yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının azaldılması çətinləşir. Qurğuşun halkogenidlərinin III qrup (tallium, qallium, indium), nadir torpaq (lantan, qadolinium, neodim, samarium, itterbiyum) və keçid (xrom, molibden) elementləri ilə legirə edilməsi vasitəsilə Fermi səviyyəsini sabitləşdirmək olur. Bu halda Fermi səviyyəsi

yalnız bərk məhlulun tərkibindən asılı olur (O, aşqarların konsentrasiyası və qəfəs defektlərindən asılı olmur). Xüsusi halda, Fermi səviyyəsinin qadağan olunmuş zonada sabitləşməsi nəticəsində yarımizoləedici halın yaranması mümkündür.

Prinsip etibarilə klassik yarımkeçiricinin güclü aşqarlanması zonaların irimiqyaslı potensial relyefinin formalaşmasına və yükdaşıyıcılar üçün dreyf baryerinin yaranmasına gətirib çıxara bilər [3]. Fermi səviyyəsinin qurğusunun halkogenidlərindəki sabitləşməsi, güclü aşqarlanmaya və strukturun defektliliyinin yüksək olmasına baxmayaraq, birləşmələrdə mükəmməl elektrofiziki parametrlərin formalaşması kimi paradoksal nəticə yaradır [4]. Bu keyfiyyət kristallıq qəfəsə nəzərən elektroneytral olan aşqar mərkəzlərinin valentliyinin kristallıq qəfəsin güclü polyarlaşması nəticəsində dayanıqsız olması sayəsində yaranır [5]. Müxtəlif yüklü hallarda aşqar mərkəzlərinin miqdar balansını Fermi səviyyəsinin energetik spektrdə yalnız ərintinin tərkibindən asılı olan konkret yeri tutmasına imkan verir.

Qurğusunun halkogenidləri əsasında III qrup elementlərinin iştirakı ilə alınmış bərk məhlullarda ikinci mühüm hadisə aşağı temperaturlarda yarımkeçiricinin elektron sisteminin tarazlıqdan çıxarılması zamanı uzunmüddətli relaksasiya proseslərinin meydana çıxmasıdır [2]. Bu hadisələr qrupunun klassik nümunəsi ləngiyən fotokeçiricilikdir. Belə ki, müqavimətin qaranlıqda və infraqırmızı işıqda ölçülmüş temperatur asılılıqları $T < T_c$ temperaturlarında bir-birindən kəskin fərqlənir. Ərintinin tərkibi və aşqarlanma dərəcəsindən asılı olan fərq kəmiyyətin 6-8 tərtibinə bərabər olur. Samariumla aşqarlanmış nümunələr üçün $T_c = 80K$ alınmışdır. Fotocavabın güclü olması qeyri-əsas yükdaşıyıcıların yaşama müddətinin aşağı temperaturlarda 10^4 sən-yə qədər kəskin artması ilə əlaqədardır. Beləliklə, fətohəyəcanlanmış yükdaşıyıcıların, rekombinasiya etmədən, icazə verilmiş zonada toplanması ləngiyən fotokeçiriciliyin yaranmasına səbəb olur.

Qurğusunun halkogenidlərində samarium aşqarı

Aparılmış təhlillər qurğusunun halkogenidlərinin III qrupun müxtəlif elementləri ilə legirə olunması zamanı aşqar halların və enerjilərinin müxtəlifliyi barədə mülahizə yürütməyə imkan verir. Həqiqətən, hər ikisi lantanoid olmalarına baxmayaraq, qurğusunun halkogenidlərində qadoliniyum aşqarı donor, samarium aşqarı isə akseptor funksiyalarını yerinə yetirirlər.

Samariumla legirə olunmuş qurğusunun halkogenidlərində daşınma hadisələri 2-ci işdə tədqiq olunmuşdur. Holl konsentrasiyasının samariumun konsentrasiyasından asılılığı doymuş xarakterə malikdir. Deşiklərin hədd konsentrasiyası ($PbTe$ və $PbSe$ –də $\sim 10^{20} sm^{-3}$, PbS –də $\sim 5 \cdot 10^{19} sm^{-3}$ [7]) samariumun həllolma həddindən bir neçə dəfə aşağıdır. Samarium və natriumla legirə olunmuş qurğusunun halkogenidlərində kiçik konsentrasiyalarda termo ehq və Holl yüyürlüüyünün qiymətləri arasında fərq cüzdür. Samariumla legirə olunmuş tərkibdə doyma konsentrasiyasına yaxın qiymətlərdə fərq aydın sezilməyə başlayır: alçaq temperaturlarda termo ehq azalır, yüyürlük bir tərtib aşağı düşür, $\partial R / \partial T$ isə bir neçə dəfə artır.

$Pb_{1-x}Sm_xTe$ bərk məhlulunu natriumla legirə etdikdə samariumun sabitləşdirici rolu aydınlaşır – natrium konsentrasiyasının geniş dəyişmə intervalında dəşiklərin Holl konsentrasiyası və deməli, kimyəvi potensial sabit qalır. $Pb_{1-x}Sm_xTe$ bərk məhluluna izafi qurğusunun (donor) daxil etdikdə də kimyəvi potensial dəyiş-

mir. Bu xüsusiyyətləri samariumla legirə olunma zamanı valent zonasında kvazilokal səviyyələrin yaranmasını fərz etməklə izah etmək mümkündür. Məsələn, ionlaşma olmadıqda, qadolinium halında olduğu kimi, aşqar halların yarısının elektronlarla dolu olmasını qəbul etsək, onda valent zonasında bu səviyyələr akseptor xassələrinə malik olurlar. Aşqar səviyyələr qismən dolu olduğundan, əlavə aşqarlama donor və ya akseptor səviyyələrini artırır. Ancaq əlavə aşqarlamanın köməyi ilə aşqar zolağın ortasına nəzərən Fermi enerjisini sürüşdürmək və Fermi səviyyəsi tərtibindəki aşqar halların sıxlığını geniş intervalda dəyişdirmək olar. Aşqar zolağın dolması tərtibi materialın Holl əmsalının temperatur asılılığına təsir edir. Bərk məhlulun tərkibində natriumun miqdarı artdıqca, $100-200K$ temperatur intervalında Holl əmsalının artması azalma ilə əvəz olunsun da, $T=77K$ temperaturda dəyişməz qalır. Belə dəyişmənin səbəbi aşqar zolaqları tam dolu olduqda dəşiklərin aşqar səviyyələrdən valent zonasına, əksinə, aşqar zolaqları tam dolu olmadıqda valent zonasından aşqar zolaqlarına istilik keçidləri ilə əlaqədardır. Ona görə də səviyyələrin dolma dərəcəsi asılı olaraq, həm dəşiklərin valent zonasındakı konsentrasiyası, həm də R əmsalının dəyişmələri əks xarakterlidir.

$Pb_{1-x}Sm_xTe$ -da samarium aşqar səviyyəsi yaxınlığında ağır dəşiklər zonasının yerləşməsi (Valent zonanın kənarından $0,15-0,25eV$) Sm-un kvazilokal səviyyələrinin tədqiqini çətinləşdirir.

Qurğusun halkogenidlərində dərin və rezonans aşqar hallar

Kinetik əmsalların temperatur və konsentrasiya asılılıqlarını, keyfiyyət nöqtəyi-nəzərdən, dəşiklərin zonalarda paylanması və zonalarası səpilmə faktları ilə izah etmək mümkündür. Belə ki, 2-ci işdə kvazilokal səviyyələri cəlb etmədən Sm və Na-la legirə olunmuş nümunələrdəki fərqlər samariumun dəşiklərin səpilməsinə təsiri faktoru ilə əsaslandırılır. Ancaq $Pb_{1-x}Sm_xTe$ -u natrium və izafi qurğusunla legirə etdikdə aparılmış tədqiqatların nəticələrini, Sm-un aşqar səviyyələrini nəzərə almadan, ikizonalı model çərçivəsində şərh etmək qeyri-mümkündür. Samariumun kvazilokal səviyyələri haqqında təsəvvürlərin tətbiq olunmasını rezonans səpilmə hadisəsi və aparılmış optik eksperimentlər zəruri edir.

Qurğusun halkogenidləri əsasında alınmış $Pb_{1-x}Sm_xX$ bərk məhlullarında optik əksolunma spektri 8-ci işdə tədqiq edilmişdir. $Pb_{1-x}Sm_xX$ –da dəşiklərin Fermi səviyyəsinə uyğun gələn konsentrasiyasına nisbətən daha kiçik konsentrasiyalarda əksolunma zolağının elektronların aşqar zolaqdan valent zonasına optik keçidi ilə əlaqədar olan sürüşmələri nəzərə çarpır.

$300K$ temperaturda $Pb_{1-x}Sm_xS$ -də $(0,20 \pm 0,02)eV$ və $Pb_{1-x}Sm_xSe$ -də $(0,26 \pm 0,01)eV$ olan bu sürüşmələr kinetik əmsalların tədqiqindən alınmış eksperimental nəticələrlə yaxşı uyğunlaşır. $Pb_{1-x}Sm_xTe$ -un əksolunma spektrində də aşqar izləri sezilməkdədir. Samariumun $Pb_{1-x}Sm_xS$ -də və $Pb_{1-x}Sm_xSe$ -də ikinci valent zonasından yuxarıda mövqe tutan səviyyəsi, $Pb_{1-x}Sm_xTe$ -da zonanın bilavasitə sərhədində yerləşir. Samariumun bərk məhlulun tərkibindəki miqdarını $1at.\%$ -dən $4at.\%$ -ə qədər artırıqda səpilmə zolağının eni, halkogenidin növündən asılı olaraq, $2kT$ -dən $6kT$ -yə qədər artır.

Samariumun aşqar zolaqları haqqındakı təsəvvürlərə əsaslanaraq, bərk məhlullardakı xarakterik xüsusiyyətləri p-oblastda samariumun aşqar səviyyələri arasında elektron tunel keçidinin mövcud olması ilə əlaqələndirmək olar.

Rezonans səpilmə

$Pb_{1-x}Sm_xX$ bərk məhlullarında yükdaşıyıcıların səpilməsi 4 və 5-ci işlərdə tədqiq

edilmişdir. Samariumun böyük olmayan konsentrasiyalarında ($2 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}$ -ə qədər) yükdaşıyıcıların samariumda səpilməsinin kəsiyi $2 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}$ olur. Natriumla əlavə legirətmə bu göstəriciyə təsir etmir. Lakin samariumun konsentrasiyasının $5 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}$ -dən böyük qiymətlərində dəşiklərin səpilmə kəsiyi 1 tərtibdən də çox artır (şək.1). Rezonans artımı μ -nün dar zolağında- samariumun ehtimal olunan aşqar səviyyələri yaxınlığında baş verir. Natriumda səpilmənin kəsiyi ilə müqayisədə samarium aşqarında həm ağır, həm də yüngül dəşiklərdə səpilmə kəsiyi daha böyük olur. Aşkar olunmuş effekt kvazilokal səviyyədə rezonans səpilməsinin mövcud olması ilə izah edilir.

Rezonans səpilmə aşqar səviyyələr zolağının eni ilə sıx bağlıdır. Səviyyənin genişlənməsinin bir neçə səbəbi ola bilər: a) Aşqar səviyyələrin qeyri-stasionarlığı, başqa sözlə, səviyyə icazə verilmiş zonaya düşdükdə, yəni rezonans səviyyə olduqda, zona və aşqar səviyyələrinin hibridləşməsi; b) Lokallaşmış səviyyələri aşqar zonasına çevirən dalğa funksiyalarının bir-birini örtməsi; c) Nümunənin qeyri-bircinsliliyi və nizamsız yerləşmiş aşqarların qarşılıqlı təsiri nəticəsində aşqar səviyyələrin səpilməsi. Rezonans səpilmənin təhlili aşqar zolaqların genişlənmə səbəbləri haqqında informasiya verir.

Aşqar səviyyələrin güclü lokallaşması adi səpilmə halında olduğu kimi, rezonans səpilmədə də s-səpilmənin düsturlarını tətbiq etməyə imkan verir. Rezonans s-səpilmə üçün Breyt-Viqner [9] düsturundan istifadə etməklə relaksasiya müddəti üçün

$$\tau_{rez.}(\varepsilon) = \frac{\hbar \rho_0}{\rho_1(\varepsilon) \gamma} \quad (1)$$

düsturu alınır. Burada, ρ_0 - icazə verilmiş zonada hallar sıxlığı, γ - rezonans səviyyənin aşqar və zona hallarının hibridləşməsi ilə əlaqədar olan eni, ρ_1 - aşqar halların sıxlığıdır. ρ_1 -i $\rho_1(\varepsilon)$ asılılığı zıncırovabənzər formalı olduqda

$$\rho_i(\varepsilon) = \frac{N_i}{\pi} \frac{\Gamma}{(\varepsilon - \varepsilon_i)^2 + (\Gamma/2)^2} \quad (2)$$

düsturuna approksimasiya etmək mümkündür. Burada, Γ - aşqar zolağının bütün genişləndirmə mexanizmləri ilə əlaqəli olan tam eni, N_i - rezonans səpilmə yaradan aşqar konsentrasiyasıdır.

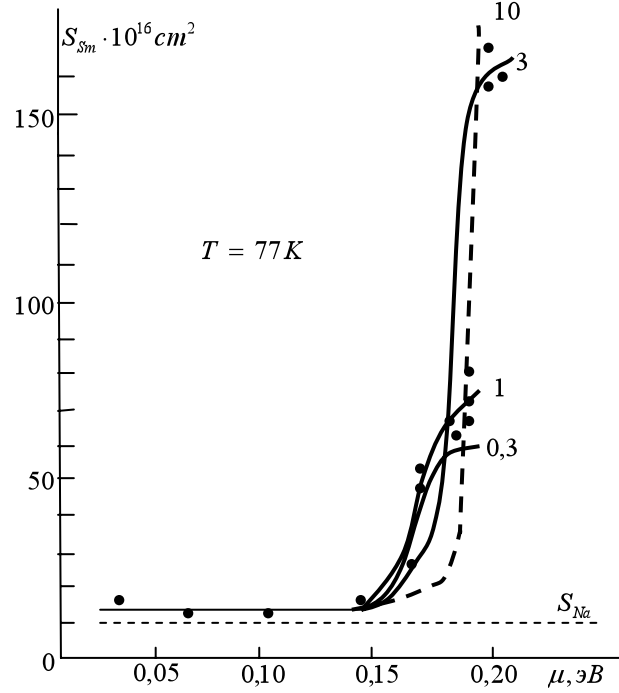
Kiçik temperaturlarda ($kT \ll \Gamma$) $\varepsilon = \mu$ olduqda, elektrik keçiriciliyi relaksasiya müddəti ilə mütənasibdir. Legirətmə Sm-la və ya eyni zamanda həm Sm, həm də Na-la həyata keçirilirsə, onda $\mu - \varepsilon_1$ kəmiyyətini və deməli, $\rho_1(\mu)$, $\tau_{rez.}(\mu)$ kəmiyyətlərini də aşqar zolağın dolma dərəcəsini xarakterizə edən

$$k^{(D)} = \frac{1}{2} + \frac{N_{Na} - p}{2N_{Sm}} \quad (3)$$

kəmiyyəti vasitəsilə ifadə etmək olar. Nəticədə elektrik keçiriciliyi üçün aşağıdakı düstur alınır:

$$\sigma = \frac{(3\pi^2)^{1/3} e^2 p^{4/3}}{4\pi \cdot \hbar \cdot N_{Sm}} \cdot \frac{m_d^*}{m_c^*} \cdot \frac{\Gamma}{\gamma} \cdot \left(1 + \text{tg}^2 \left(\pi \left(k^{(D)} - \frac{1}{2} \right) \right) \right) \quad (4)$$

Burada, m_d^* və m_c^* - müvafiq olaraq, hallar sıxlığı və keçiriciliyin effektiv kütlələridir. (4) düsturu eksperimental qiymətlər əsasında λ/Γ kəmiyyəti və aşqar zolağın enlənməsinin təbiəti haqqında informasiyanın alınmasına kömək edir.



Şəkl.1. Qurğuşun telluriddə yüngül deşiklərin samarium aşqarlarında səpilməsinin kəsiyi. Hesablamalar ağır və yüngül deşiklərin yüyrüklüklərinin müxtəlif nisbətində aparılmışdır: 0,3; 1,0; 3,0; 10.

İkinci valent zonanın mövcudluğu faktı $\text{Pb}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Te}$ -da rezonans səpilmə haqqında məlumatların emalını çətinləşdirir. Hesablamalar zamanı iki əlavə γ_y/Γ və γ_a/Γ parametrlərini daxil etmək lazım gəlir. Burada, γ_y və γ_a - aşqar halların, müvafiq olaraq, yüngül və ağır deşik zonalarındakı hallarla hibridləşməsi ilə əlaqədar olan parsial enləndir. Bununla belə, $\gamma/\Gamma \leq 1$ ($\gamma = \gamma_y + \gamma_a$) düsturu dəqiq hesablamalar yerinə yetirməyə imkan verir. $\text{Pb}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Te}$ üçün alınırsa ki, əvvəla, yüngül və ağır deşiklərin yüyrüklüyü təqribən bərabərdir, ikincisi, $\gamma/\Gamma \sim 1$, yəni aşqar zolağının genişlənməsinin əsas səbəbi hibridləşmədir. Lakin Γ samariumun konsentrasiyasından və bərk məhlullarda tərkibdən də asılı olduğundan, digər genişlənmə mexanizmlərinin mövcudluğunu da inkar etmək olmaz.

$\text{Pb}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Te}$ -un natriumla əlavə legirə olunması $k^{(D)}$ dolma əmsalını dəyişdirərək, rezonans səpilməsinə güclü təsir göstərir [6]. $k^{(D)} \approx 1/2$ olduqda minimum müşahidə olunur, yəni Fermi səviyyəsi ε_1 zolağının ortasına yaxın yerləşir və $\sigma(N_{Na})$ əyrisinin (3) və (4) düsturları vasitəsilə təsvir olunması mümkünləşir.

Beləliklə, qadoliniumdan fərqli olaraq, samarium qurğuşun halkogenidlərinin

də yükdaşıyıcıları güclü və rezonans səpilməyə məruz qoyur. Alçaq temperaturalarda $PbTe(Gd)$ -da rezonans səpilmənin olmaması faktı uzunmüddətli relaksasiya effektinin amilləri ilə əsaslandırıla bilər. Həqiqətən, $77K$ -dən yüksək temperaturalarda qadoliniumda səpilmənin kəsiyi temperaturla mütənasib olaraq artmağa başlayır [9,10].

Gd-lu nümunələrin yodla əlavə legirə olunması zamanı yüyürlüklüyün artmasını [11] rezonans səpilmə nöqtəyi-nəzərdən izah etmək asandır: Fermi səviyyəsi aşqar zolağın ortasından uzaqlaşır və nəticədə rezonans səpilmə zəifləyir.

Aşqar halların ρ_1 sıxlığının enerjiden güclü asılılığı, (4) düsturuna əsasən, sərbəst yükdaşıyıcıların relaksasiya müddətinin enerjiden kəskin və qeyri-monoton asılılığına gətirib çıxarır. Bu da öz növbəsində termo ehq-ni azaldır. Effekt samariumla legirə olunmuş bütün qurğuşun halkogenidlərində, həmçinin onların əsasında alınmış bərk məhlullarda müşahidə olunmuşdur [7]. Optik məlumatlar əsasında hesablanmış termo ehq 9-cu işin eksperimental nəticələri yaxşı uyğunlaşır.

Rezonans səpilmənin tədqiqi zamanı γ kəmiyyəti haqqında alınmış informasiyanı təhlil edək.

Aşağı temperaturalarda elektronların Gd-dan rezonans səpilməsinin olmaması sayəsində aşqar və zona hallarının hibridləşməsinin çox zəif olması zolağın genişlənməsini nəzərə alınmayacaq dərəcədə kiçik edir: $\gamma/\Gamma \ll 1 \Rightarrow \gamma \ll \Gamma$. Γ kəmiyyətinin çox kiçik olması nəzərə alınarsa, onda γ -nın qiyməti haqqında aydın təsəvvür yaranır: $\gamma \leq 10^{-6} eV$. Samarium üçün isə əksinə, $\gamma/\Gamma \approx 1 \Rightarrow \gamma \approx \Gamma$ olduğundan, Γ kəmiyyəti yüzlərlə eV -a çatır, γ isə Gd-un analogi parametrindən 100 dəfələrlə böyük olur. Gd-un PbTe-dakı rezonans səviyyələrinin hallar sıxlığı az olan elektron zonasının sərhədində yerləşməsi γ -nın qiymətinin kiçik olmasına səbəb olur. Samariumun ağır valent zonasının sərhədi yaxınlığında yerləşən səviyyəsi isə əksinə, bir qədər də yayılır.

Hibridləşməyə təsir edən digər amil simmetriyadır. Aşqar qəfəs düyünündə yerləşdikdə aşqar elektronun dalğa funksiyası kub qrupuna çevrilir və L nöqtəsindəki Blox dalğa funksiyasına analogi olaraq, konkret cütlüyə malik olur. Əgər daxilində səviyyənin yerləşdiyi zonada elektronun dalğa funksiyasının dominant komponentinin cütlüyü aşqar dalğa funksiyasına əksdirsə, onda örtmə inteqralının kiçik qiymətlər alması nəticəsində səviyyə zəif yayılır. Gd və Sm-un aşqar səviyyələrinin daxil olduqları elektron və dəşik zonalarının sərhədlərində Blox dalğa funksiyaları əksişarəli olduqlarımdan, Gd və Sm üçün γ -nın qiymətləri arasında kəskin fərq əmələ gəlir. Qəfəslə qarşılıqlı təsir aşqar halındakı elektronun yaşama müddətini artırmaqla yanaşı γ kəmiyyətini nəzərəcarpacaq dərəcədə azaltmalıdır.

Nadir torpaq elementlərinin qurğuşun halkogenidlərindəki aşqar səviyyələrinin mənşəyi

Şərh olunmuş eksperimental məlumatlar III qrup elementlərinin iştirakı ilə $A^{IV}B^{VI}$ əsasında alınmış bərk məhlullarda aşqar halların mövcudluğuna dəlalət edir. Bu hallar aşqarın və ya defektin qısamüddətli təsirə malik olan potensialı hesabına yarana bilər. Baxılan birləşmə və bərk məhlullarda aşqar səviyyəsi istər qadağan olunmuş zonada, istərsə də keçiricilik və ya valent zonalarında yerləşə bilər. Aşqar halının güclü lokallaşması, temperatur, təzyiq, bərk məhlulun tərkibi

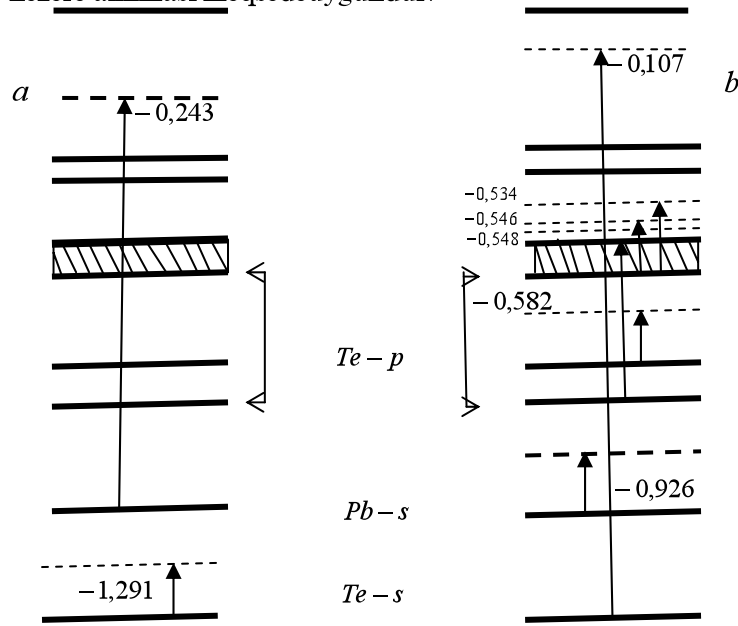
və aşqarın növündən kəskin asılılığı aşqar səviyyənin yaxınlığında yerləşdiyi L -ekstremumlarla genetik əlaqəsini inkar edir. Bu səviyyələri zonalardan aralıda budaqlanan və effektiv kütlə yaxınlaşmasında təsvir edilə bilməyən daha dərin səviyyələrə aid etmək məqsəda uyğundur.

Aşqar səviyyənin zonalarla genetik əlaqəsini güclü rabitə yaxınlaşmasında $PbTe\langle Gd \rangle$ üçün təhlil edək. Güclü rabitə yaxınlaşmasında keçiriciliyin ən aşağı səviyyəli zonaları qurğuşunun sp -halları hesabına yaranır (3 dənə ikiqat cırlaşmış zona). Qadağan olunmuş zonanın bilavasitə altında tellurun $5p$ -hallarının yaratdığı 3 dənə ikiqat cırlaşmış zona yerləşir. Tellurun $5p$ -zonasından $3-4eV$ dərində qurğuşunun ikiqat cırlaşmış $6s$ -zonası, həmin zonadan $2-3eV$ dərində isə tellurun $5s$ -zonası yerləşir (şək.2). Qəfəsdə qurğuşunu əvəz edən qadolinium qurğuşunun atom hallarının yaratdığı zonaları həyəcanlandırma bilər. Bu zaman Gd atomunun xarici təbəqəsinin qurğuşunun eyni orbital momentə malik olan xarici təbəqəsinə nisbətən daha böyük enerji ilə xarakterizə olunmasını nəzərə almaq lazımdır. Məsələn, qadoliniumun $5d$ -səviyyəsi qurğuşunun $5s$ -səviyyəsindən $2eV$ yuxarıda yerləşir. Gd -un $5d$ -səviyyəsinin qurğuşunun $5s$ -zonasından qoparaq qadağan olunmuş zonaya daha yaxın yerləşməsi istisna deyil. Təklif olunmuş hipotez $5d$ -səviyyəsində elektronlarının sayı qurğuşunun $5s$ -səviyyəsindəki elektronlarının sayından 1 ədəd az olmasına baxmayaraq, qadoliniumun $PbTe\langle Gd \rangle$ -da donor funksiyasını yerinə yetirə bilməsini əsaslandırır. Qurğuşundan fərqli olaraq, qadolinium tellurun valent p -zonası ilə rabitəyə 3 elektron verir. Qadoliniumun elektronları Fermi səviyyəsindən asılı olaraq ya keçiricilik zonasına keçir, ya da əvvəlki səviyyəsində qalır. Bərk məhlulu əlavə olaraq yodla legirə etdikdə elektronların qarşılıqlı itələmə qüvvəsinin kiçik olduğu şərt daxilində səviyyə daha bir elektron qəbul edə bilər. Əgər elektron qəbul edən səviyyə valent zonasına düşürsə ($Pb_{1-x}Sm_xX$ halı), onda aşqar akseptor xassələrinə malik olur. 3-cü qrup aşqarlarının donor-akseptor xassələrini təsvir edən bu model sadə də olsa, yeganə deyil. Aşqar səviyyənin yuxarı valent zonadan qopduğu hallarda (Te -un p -zonaları) model əsas cəhətlərini saxlayır [10].

Öz-özünə kompensasiya və məxsusi defektlər kompleksinin səviyyəsi

Kvazilokal halların təzahürü sərbəst yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının daxil edilmiş aşqarın konsentrasiyasına nisbətən kiçik olması ilə bağlıdır. Donor və akseptorların məxsusi defektlərlə, məsələn, vakansiyalarla öz-özünə kompensasiyası da analogi nəticəyə gətirib çıxara bilər. Krisallik qəfəsə elektrik cəhətdən aktiv olan kənar aşqar daxil edilərkən qəfəsin energetik faydalı olan və əksişərəli yükdaşıyıcılar yaradan məxsusi defektlərinin meydana çıxması öz-özünə kompensasiyanın mahiyyətini təşkil edir. Öz-özünə kompensasiya sayəsində əsas yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının dəyişməsi daxil edilmiş aşqarın konsentrasiyasından kiçik olur. Qurğuşun halkogenidlərinə böyük miqdarda donor daxil etdikdə (I, Cl, Gd, Nd) ifrat stexiometrik həll olmuş tellurun miqdarının artması, akseptor (Sm, Na) daxil etdikə isə izafi qurğuşunun həll olması artır. Bu hadisədən Sm, Nd, Gd -da aşqar halların dolma dərəcəsinin və sərbəst yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının tənzim olunması məqsədilə istifadə olunmuşdur. Ərintidən yetişdirilmiş monokristallarda bu prosesin idarə olunması daha çətinidir. Öz-özünə kompensasiyanın köməyi ilə $Pb_{1-x}Sm_xS$ və $Pb_{1-x}Sm_xSe$ -də yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının kifayət qədər kiçik qiymətlərini almaq mümkün olmuşdur. Neodim və qadolinium aşqarlarının

səviyyələri haqqında tam məlumat olmasa da, öz-özünə kompensasiyanın bu aşqarlar üçün də nəzərə alınması məqsəduyğundur.



Şəkil 2. Pb(a) və Te(b) vakansiyalı PbTe-un valent zonasından budaqlanan lokallaşmış səviyyələr.

$(PbTe)_{1-x}(Nd_2Te_3)_x$ bərk məhlulunda $N_{Ml} \geq 0,5at\%$ olduqda, konsentrasiyanın kifayət qədər kiçik olmasının qadağan olunmuş zonadakı lokal səviyyələrlə deyil, öz-özünə kompensasiya ilə əlaqədar olması istisna deyil. $(PbS)_{1-x}(Sm_2S_3)_x(Na)$, $(PbSe)_{1-x}(Sm_2Se_3)_x(Na)$ bərk məhlullarında ifrat stexiometrik qurğuşunun kompensasiyası nəticəsində qadağan olunmuş zonada dərin akseptor hallar aşkar edilmişdir. Akseptor halların konsentrasiyası aşqarların konsentrasiyasından 2 dəfə az olmaqla yanaşı enerjiləri aşqarın növündən asılı olmur. 12-ci işin müəllifləri bu halların məxsusi defektlər kompleksi ilə əlaqədar olduğunu fərz edirlər. Tədqiq olunmuş nümunələrdə monodefektlərin konsentrasiyası $10^{20} sm^{-3}$ olduğundan, böyük miqdarda biovakansiyaların yaranması ehtimalı da yüksəkdir.

YEKUN

Son onillikdə yerinə yetirilmiş və təqdim olunmuş xülasədə əksini tapmış tədqiqatlar $PbX(X - S, Se, Te)$ əsasında alınmış bərk məhlullarda lantanoid aşqarları və defektlər barədə təsəvvürləri bir qədər genişləndirdi. Eksperimental nəticələr texnikanın müxtəlif sahələrində müvəffəqiyyətlə tətbiq olunan qurğuşun halkogenidləri əsasında alınmış bərk məhlullarda dərin lokallaşmış və rezonans halların mövcudluğunu sübut etdi, materialın xassələrinin idarə olunmasının yeni metodlarını aşkara çıxardı. Nəzəri sahədə yeni hipotez təklif olunmuş həm zona strukturu, həm də lokal və rezonans səviyyələrin təsviri və hesablamalarında yeni yanaşma üsulu irəli sürülmüşdür. Xülasədə təqdim olunmuş informasiya $PbX(X - S, Se, Te)$ -da aşqar halları ilə bağlı problemlərin qeyri-triviallığını sübut

etməklə yanaşı tədqiqat sferasının genişləndirilməsinin zəruriliyi də əsaslandırılır. Lantanoidlərlə legtrətmə zamanı məxsusi defektlər və onların kompleksi ilə əlaqədar olaraq meydana çıxan halların xarakteristikalarının dəqiqləşdirilməsi, defektlərin strukturunun aydınlaşdırılması ilk növbədə həll edilməli olan məsələlərdəndir. Digər nadir torpaq elementlərinin $PbX(X - S, Se, Te)$ -da aşqarlarının eksperimental tədqiqatı da yeni və gözlənilməz nəticələrə gətirib çıxara bilər. Aşqar səviyyələrin energetik zonalarla genetik əlaqəsi, uzunmüddətli relaksasiya prosesinin mexanizmi, eyni aşqar mərkəzindəki elektronlar arasındakı qarşılıqlı təsir aktual nəzəri problemlər qismində qəbul oluna bilər.

ƏDƏBİYYAT

1. Гасанов Г.А. Электрические и фотоэлектрические свойства пленок сильно компенсированных твердых растворов на примере $(PbS)_{1-x}(Sm_2S_3)_x(Na)$ // Вопросы специальной радиоэлектроники. Москва-Таранрог: 2008, №2, с.113-121.
2. Hasanov H.A., Murquzov M.I. Hall mobility of charge carriers in films of $(PbX)_{1-x}(Sm_2X_3)_x$ semiconductors formed on porous silicon / Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. v.11,4,p.356-359.
3. Гасанов Г.А., Мургузов М.И. Температурные и концентрационные зависимости подвижности носителей заряда в твердых растворах $(PbS)_{1-x}(Sm_2S_3)_x$ ($x = 0 \div 0.04$) // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. Одесса: 2008, № 6, с.50-54.
4. Гасанов Г.А. Влияние рассеяния фононов на нейтральных и заряженных примесных центрах на теплопроводность решетки в $Pb_{0.98}Sm_{0.02}Te(Na)$ // Вестник Бакинского Университета, сер.физ-мат.науки, 2009, №1, с.166-172.
5. Гасанов Г.А., Мургузов М.И. Получение пленок $(PbX)_{1-x}(Sm_2X_3)_x$ (где $X - S, Se, Te$; $x = 0.01 \div 0.04$) на пористом кремнии // Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Əsərləri, Bakı, 2009, №1, səh.24-36.
6. Hasanov H.A. Electrical conductivity of $Sm_{0.04}Pb_{0.96}Te$ thin films // Труды Международной конференции «Научно-технический прогресс и современная авиация» посвященной 75-летию академика А.М. Пашаева. Баку, 2009, т. 1, с.197-201.
7. Həsənov H.Ə. Vakuum çökdürülməsi metodu ilə məsələli silisiumda (MS) aksial teksturirə olunmuş $(PbTe)_{1-x}(Sm_2Te_3)_x$ ($x = 0.01 \div 0.04$) təbəqələrinin alınması // S.Hacıyevin 80 illik yubileyinə həsr olunmuş «Fizikanın müasir problemləri» II Respublika konfransının materialları, noyabr, Bakı, 2008, s.41-43.
8. Гасанов Г.А., Мургузов М.И. Спектр диффузного отражения сплавов систем $Pb_{1-x}Sm_xX(X - S, Se, Te)$. Аз.НИИТИ «Депонированные научные работы» // Баку, 1988, №10, 204 с.
9. Ганина Н.В. Физико-химические особенности изовалентного легирования полупроводников // Physics and Chemistry of Solid State, 2002, v. 3, № 4, p. 565-572.
10. Щенников В.В., Овсянников С.В., Деревсков А.Ю. Термо-э.д.с. халькогенидов свинца при высоком давлении // ФТТ, 2002, т. 44, в.10, с.1762-1765.
11. Рябова Л.И., Хохлов Д.Р. Проблема примесных состояний в узкощелевых полупроводниках на основе теллурида свинца // Письма в ЖЭТФ, 2004, т. 80, в.2, с.143-149.
12. Сушкова Т.П., Семенова Г.В., Стрыгина Е.В. Термодинамическая оценка стабильности твердых растворов на основе халькогенидов свинца // Вестник ВГУ, 2004, №1, с.94-100.

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ ЛАНТАНОИДОВ НА МЕХАНИЗМ РАССЕЯНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ХАЛЬКОГЕНИДАХ СВИНЦА

Г.А.ГАСАНОВ

РЕЗЮМЕ

В настоящей работе изложены результаты анализа исследований, посвященных проблемам примесных состояний лантаноидов в халькогенидах свинца, проведенные за последнее десятилетие. Выяснено, что примеси лантаноидов в халькогенидах свинца могут иметь как акцепторный, так и донорный характер. Установлено, что лантаноиды способны создавать в халькогенидах свинца квазилокальные, глубокие и резонансные примесные уровни. Учитывая сильную локализацию примесных состояний, вычислено сечение рассеяния легких дырок на примеси самария для различных соотношений легких и тяжелых дырок. Определена роль самокомпенсации при формировании кинетических параметров твердых растворов систем $PbX-SmX$, $PbX-Ln_2X_3$ (где $X-S, Se, Te$, $Ln-Nd, Sm, Gd$). Предложена модель, описывающая механизм донорно-акцепторного действия примесей лантаноидов.

INFLUENCE OF IMPURITIES OF LANTHANIDES ON THE MECHANISM OF DISPERSION CHARGE CARRIERS IN CHALCOGENIDES OF LEAD

H.A.HASANOV

SUMMARY

The present paper outlines the results of the analysis of the investigations devoted to the problems of the impurity states of lanthanides in chalcogenides of lead within the last decade. It is clarified that impurities of lanthanides in chalcogenides of lead can have both acceptor and donor properties. It is ascertained that lanthanides are capable to create quasi-local, deep and resonant impurity levels in chalcogenides of lead. Considering the strong localization of the impurity states, the section of dispersion of easy electron defects on an impurity of samarium is calculated for various relations of easy and heavy electron defects. Self-neutralization role is spotted at formation of the kinetic parameters of firm solutions of $PbX-SmX$, $PbX-Ln_2X_3$ (where, $X-S, Se, Te$, $Ln-Nd, Sm, Gd$) systems. The model featuring the mechanism of donor-acceptor activity of impurities of lanthanides is offered.