

UOT 539.958**NANOQURULUŞLU p-Si/n-ZnSSe HETEROKEÇİDİNİN
ELEKTRİK XASSƏLƏRİ****E.F.NƏSİROV***elshannasirov@bsu.edu.az****Bakı Dövlət Universiteti, Fizika Problemləri İnstitutu***

Heterokeçiddə cərəyankeçmə mexanizmini öyrənmək üçün onun elektrik xassələri 80K-400K ölçmə temperaturu intervalında tədqiq olunmuşdur. p-Si/n-ZnSSe heterokeçidinin düzünə istiqamətdə I-V xarakteristikası tədqiq edilmiş, Çenq metodundan istifadə etməklə ardıcıl müqavimətin (R_a) qiyməti hesablanmış, $dV/d(\ln I)$ nin I-dən və $H(I)$ nin I-dən asılılığı qurulmuş, p-Si/n-ZnSSe heterokeçidinin energetik zona quruluşu Anderson modeli ilə təsvir olunmuşdur.

Açar sözlər: Heterokeçid, cərəyankeçmə mexanizmi, VAX, VFX.

Yüksək müqavimətli və enli zolaqlı xalkogenid yarımkəçiricilərin fizikası, texnologiyası və texnikası üzrə tədqiqatlar bu maddələrin işıq mənbələri, işıq qəbulediciləri, qeyri-xətti optik çeviricilər, elektrofotografik təbəqələr və s. yaratmaq üçün perspektivli olmaları müəyyən edilmişdir.

Enli zolaqlı təbəqələrə daxil edilmiş yarımkəçirici atom mərkəzləri üçün rezonans tunel effektindən istifadə olunması bu cihazların xarakteristikalarını əhəmiyyətli dərəcədə dəyişəcəkdir. Bu baxımdan bu materiallar əsasında iki və çoxlaylı heterokeçidlərinin təbəqələrin qalınlığının kiçildilməsi, yeni nanoquruluşlu təbəqələrdə baş verən proseslərin və keçid sərhədindəki defektlərin öyrənilməsi və idarə olunması çox aktualdır. Heterostrukturlar bahalı, mürəkkəb kimyəvi və texnoloji cihazlar olsa da daha effektiv hesab olunur. Müasir elektronika heterokeçidlərdən istifadə olunmasına əsaslanır. Sürətli mikro- və nanoelektronika heterokeçidlər əsasında reallaşacaq. Heterokeçidlər günəş enerjisinin çevrilməsində bahalı element və ən ucuz elektrik enerjisi istehsalçısıdır [1, 2].

Sink selen (ZnSe) II-VI qrup birləşməsi olan düzgonalı ($E_g=2,7$ eV) yarımkəçirici material kimi optoelektron sensorlarında və heterokeçidli günəş elementlərində geniş tətbiq imkanları var. Ondan işıq diodları və fotodiodlar üçün qoruyucu və işıqlandırıcı örtük kimi istifadə olunur. Si və ZnSe materiallarının əsasında heterokeçid hazırlanması perspektivli sayılır. Lakin qəfəs parametrləri, istidən genişlənmə əmsalı, ionluq dərəcəsi kimi fiziki parametrlərdəki

fərqlər müxtəlif növ krastillik defektlər yaradır ki, bu da heteroqeçidin optik və elektron xassələrinə ziyanlı təsir göstərərək onların istismar müddətinin azalmasına səbəb olur [3, 4]. ZnSe-nin optoelektronikaya tam qoşulması üçün, onun Si-əsaslı mikroelektronikaya inteqrasiya olunmasına maksimum səy göstərmək lazımdır. Bu cür səylər əsasən Si/ZnSSe heteroqeçidinin alınmasının fiziki və texnoloji əsaslarının öyrənilməsinə yönəlir. Heteroqeçiddə cərəyankeçmə mexanizmini öyrənmək üçün onun elektrofiziki xassələri geniş intervalda tədqiq olunmuşdur.

Eksperiment

Tədqiq edilmiş heterostruktur "sendviç" quruluşuna malikdir. Onların hazırlanması zamanı altlıq (katod) qismində $0,4 \pm 0,5$ mm qalınlıqlı və (100) simmetriya oxuna malik monokristallik Si lövhələrindən istifadə edilmişdir. p-Si-un xüsusi müqaviməti müvafiq olaraq 8 ± 20 Om·sm-ə bərabər olmuşdur. Anod materialı kimi molibden lövhəsindən istifadə edilmişdir. Müxtəlif mexaniki defektlərin, nazik oksid təbəqələrinin və başqa çirklənmələrin kənarlaşdırılması məqsədilə silisium altlıqlar əvvəlcə HCl-da, daha sonra isə KOH + KNO (1:3) qarışığında $250-500$ °C temperaturda, işçi məhlula salınmazdan əvvəl qabaqcadan təyin edilmiş rejimə uyğun olaraq aşındırılmışdır.

Elektrokimyəvi çökdürülmə prosesi bizim tərəfimizdən otaq temperaturunda xüsusi kvars qabda silisium lövhələrinin üzərində yerinə yetirilmişdir. kimyəvi məhlulun optimal tərkibi aşağıdakı kimi seçilmişdir: $1:12:500$ ($1,5 \pm 2,2 \times 10^{-3}$ M $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{OOO})_2$, $1,5 \pm 2 \times 10^{-3}$ M SeO_2 , $0,01 \pm 0,02$ M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, $1,05$ M NH_4OH). Alınmış nazik təbəqələrin tərkibi $0 \leq x \leq 0,5$ diapazonunda dəyişir və ona kimyəvi, termik və rentgen analizləri ilə nəzarət edilir. Müxtəlif nümunələr üçün onların qalınlığı 2 μm-ə bərabərdir. Nazik təbəqələr n-tip keçiricilik qabiliyyətinə malikdir; bu, termo-e.h.q.-nin işarəsinə görə müəyyən edilmişdir.

Nazik təbəqələrin struktur xarakteristikaları Rigaku D/Max-IIIc rentgen difraktometrindən istifadə edilməklə 20 ± 70 skanlama bucağı diapazonunda müəyyən olunmuşdur. Səthin morfologiyası, nümunənin stexiometriyasının keyfiyyət ölçmələri skanlayıcı elektron mikroskopunun köməyi ilə müəyyən edilmişdir. Nazik təbəqənin strukturu haqqında informasiyanın alınması üçün Rentgen şüalarının difraksiyasının (XRD) şəkilləri təhlil edilmişdir. $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ nazik təbəqəsinin struktur analizi rentgen difraktometrinin köməyi ilə 20 ± 70 skanlama bucağı diapazonunda aparılmışdır. Müəyyən edilmişdir ki, $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ nazik təbəqələri polikristal təbiətə malikdir və RD tədqiqatlarından tapıldığı kimi, güclü sürətdə üstün olaraq (002) müstəvisi boyunca heksaqonal kristal quruluşunda böyüyür.

$80\text{K}-400\text{K}$ ölçmə temperaturu intervalında strukturun voltamper xarakteristikası şəkil 1-də göstərilmişdir. Bu xarakteristikalar ailəsi göstərir ki, P-Si altlığı ilə n- ZnSSe təbəqəsi arasında heteroqeçid formalaşmışdır. Termoelek-

tron emissiyası (TE) nəzəriyyəsinə görə düzünə cərəyanın gərginlikdən asılılığı [5]

$$I = I_s \left[\frac{\exp(qV_d)}{nkt} - 1 \right] \quad (1)$$

tənliyi ilə ifadə olunur. Burada

$$I_s = A_{eff} A^{**} T^2 \exp(-q\phi_B/kT) \quad (2)$$

Düsturlarda q - elektronun yükü, n - qeyri ideallıq əmsalı, k – Bolsman sabiti, T – mütləq temperatur, I_s - doyma cərəyanı, A - en kəsiyin sahəsi, A^{*} - Riçardson sabiti, ϕ_B - potensial çəpərin hündürlüyüdür. n - qeyri ideallıq əmsalı cərəyanın ifadəsindən belə təyin olunur:

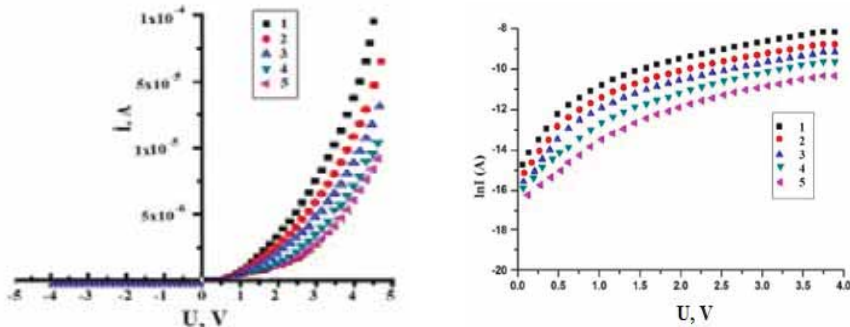
$$n = (q/kT) [dV/d(\ln I), V_d = V - IR, I = I_s \exp[q(V - IR)/nkT]$$

$$V = RA_{eff} J + n\phi_B + (n/\beta) \ln(J/A^{**}T^2) \quad \beta = q/kT.$$

$$\frac{d(V)}{d(\ln(J))} = RA_{eff} J + \frac{n}{\beta} H(J) \equiv V - (n/\beta) \ln(J/A^{**}T^2) H(J) = RA_{eff} J + n\phi_B. \quad (3)$$

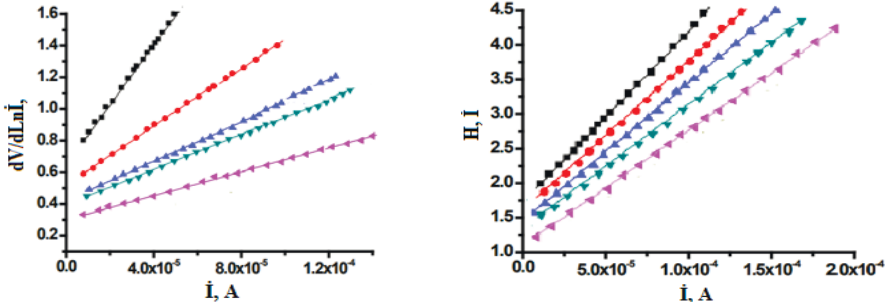
Ən kiçik kvadratlar metodu ilə $\ln I$ - U qrafiklərinin gərginliyin 0,2-0,8V qiymətləri intervalında ordinat oxuna approksimasiya ilə müxtəlif temperaturlarda I_s doyma cərəyanının qiyməti tapılmış və potensial çəpərin hündürlüyü hesablanmışdır. Otaq temperaturunda potensial çəpərin hündürlüyü 0,83 eV təşkil etmiş və temperaturun 80 k- qədər azalması ilə 0,075 eV qədər kiçilmişdir.

p-Si/n-ZnSSe heteroqəçidi üçün ideallıq əmsalı 300K-də 2,8 olması göstərir ki, heteroqəçid Si altlığı ilə ZnSe arasında səht hallarının mövcud olduğuna görə ideallıqdan uzaqdır. p-Si/n-ZnSSe heteroqəçidinin düzünə istiqamətdə I-V xarakteristikasının Çenq metodundan istifadə etməklə R_a -nın qiyməti hesablanmış, $dV/d(\ln I)$ -nin I-dən və $H(I)$ -nin I-dən asılılığı qurulmuşdur.



Şəkl. 1. p-Si/n-ZnSSe heteroqəçidinin normal (a) və yarımlaqariflik (b) koordinatda volt-ampere xarakteristikaları, T, K: 1-350, 2-300, 3-250, 4-180, 5-80.

R_a -nın qiyməti Çenq metodu ilə düzünə gərginliyin qiymətlərindən hesablanmışdır. $dV/d(\ln I)$ -nin cərəyandan asılılığının meylinə görə R_a və Y oxu ilə kəsişməsinə görə nkT/q təyin olunur (şəkil 2a). $H(I) - I$ asılılığının Y oxunu kəsdiyi nöqtə $n\phi_{B0}$ verir ki, buradan n -nin qiymətini tapırıq (şəkil 2b). Bu asılılığın meylinə görə də R_a -nı qiymətləndirməyin ikinci metodu sayılır. Hər iki metoddan alınan nəticələrin yaxınlığı bu yanaşmanın uyğunluğunu göstərir. R_a -nın $dV/d(\ln I) - I$ və $H(I) - I$ asılılıqlarının hər ikisindən alınan qiymət eyni olub, $10^3 \Omega$ -ə bərabərdir n , ϕ_{B0} və R_s -in qiymətləri temperaturdan kəskin asılıdır.

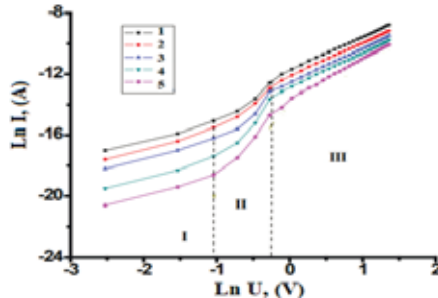


Şəkil 2. p-Si/n-ZnSSe heteroqecidi üçün $dV/d(\ln I)$ -I (a) və $H(I)$ -I (b) asılılıqları, T, K: 1-350, 2-300, 3-250, 4-180, 5-80.

Düzünə istiqamətdə, kiçik gərginliklərdə, tədqiq olunan temperatur intervalında cərəyan $I = kV^m$ qanunu ilə ifadə olunur (şəkil 3). Çox kiçik gərginliklərdə cərəyan gərginlikdən xətti asılıdır. Orta gərginliklərdə (ikinci oblastda) qeyri-xətti oblast termoelektron emissiyası mexanizminə uyğun gəlir. Gərginliyin 0,8V-dan böyük qiymətlərində həcmi yüklərlə məhdudlanan cərəyan mexanizminə uyğun güclü injeksiya müşahidə olunur ($m=2,4$). Həcmi yüklər oblastında və ya keçid sərhədində dərin mərkəzlərdə rekombinasiyanın tunel keçidləri hesabına güclənməsinə əsaslanan bu cür yeni yanaşma son zamanlarda CIGS əsaslı günəş elementlərində cərəyanın birbaşa daşınması üçün tətbiq olunmuşdur. (1) tənliyini bu şəkllə salmaq

$$n \ln(J_s) = E_a/kT + n \ln(J_{00}) \quad (4)$$

$n \ln J - 1/kT$ asılılığı düz xətt verir ki, onun meylinə E_a aktivləşmə enerjisi üçün 1,3 eV tapılmışdır.



Şəkil 3. p-Si/n-ZnSSe heteroqecidinin müxtəlif temperaturlarda loqarifmik miqyasda VAX-I, T, K: 1-350, 2-300, 3-250, 4-180, 5-80.

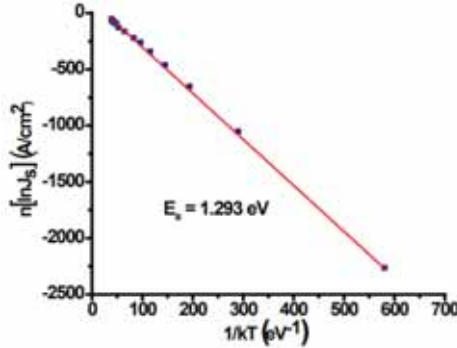
Bu qiymət ZnSe -nin qadağan olunmuş zonasının enindən kiçikdir ($E_g = 2,71$ eV) və onun dəşiklər üçün potensial çəpərə uyğun gəldiyini qəbul etmək olar. Bundan başqa, dəşiklərin Si-un daxilindən keçid sərhədinə tunel keçidi və delektronlarla rekombinasiyası ideallıq əmsalının temperaturdan aşağıdakı şəkildə asılılığına gətirir.

$$n = (E_{00}/kT) \coth (E_{00}/kT) \quad (5)$$

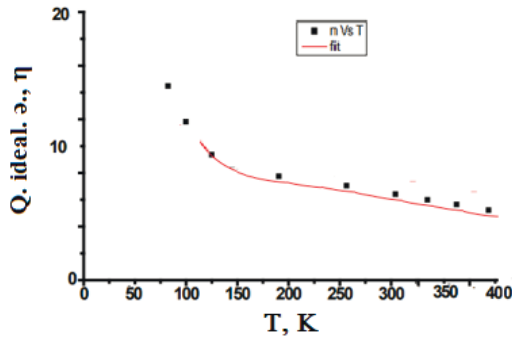
burada E_{00} - rekombinasiya prosesində tunel keçidlərinin payını xarakterizə edən tunel enerjisi hesab olunur. Əgər neytral həcmdə tələ səviyyələrindən rekombinasiya üstünlük təşkil edirsə, n-nin temperatur asılılığı bu şəkildə olar [6]

$$1/n = 1/2(1 + T/T^* - E_{00}^2/3k^2T^2) \quad (6)$$

Burada kT^* - tələ səviyyələrinin eksponensial paylanması xarakterik enerjisidir. Təklif olunan rekombinasiya kanalının doğruluğu ideallıq əmsalının temperatur asılılığına görə yoxlanılır. Bu asılılıq təcrübi olaraq qurulmuş (şəkil 4) (5) düsturuna görə alınmış nəzəri ifadəsilə yaxşı uzlaşır. Tunel enerjisi üçün alınmış qiymət $E_{00} = 95$ mƏB təşkil edir.



Şəkil 4. p-Si/n-ZnSSe heteroqəçidi üçün $n \ln J_s$ kəmiyyətinin temperatur asılılığı

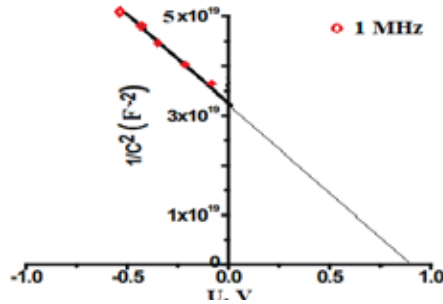


Şəkil 5. p-Si/n-ZnSSe heteroqəçidinin Q/ ideallıq əmsalının temperatur asılılıqları

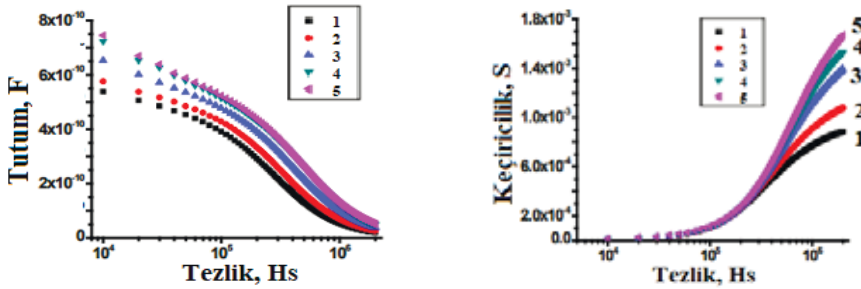
Tədqiq olunan heteroqəçidin tutumu otaq temperaturunda, 1MHs tezlikdə tətbiq olunan gərginlikdən asılılığı ölçülmüşdür. $1/C^2$ -nin gərginlikdən asılılıq qrafiki şəkil 6-da göstərilmişdir.

Elektronların konsentrasiyasının $1/C^2$ -U asılılığının meylinə görə hesab-

lanmış qiyməti otaq temperaturunda $3,16 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. V_{bi} potensial çəpərin hündürlüyünün qeyd olunan asılılığın gərginlik oxu ilə kəsişmə nöqtəsindən tapılmış qiyməti 0,89 eV təşkil edir. C-f variasiyası Şokli-Rid-Holl münasibətinə görə elektronları tutulub buraxılma prosesi ilə yaxşı izah olunur. Şəkil 7-də beş müxtəlif temperaturda tutum və keçiriciliyin tezlikdən asılılıq əyriləri göstərilmişdir. Aşağı tezliklərdə ($<10 \text{ kHz}$) keçiricilik faktiki dəyişmir, lakin yüksək tezliklərdə ($> 100 \text{ kHz}$) kəskin artır.



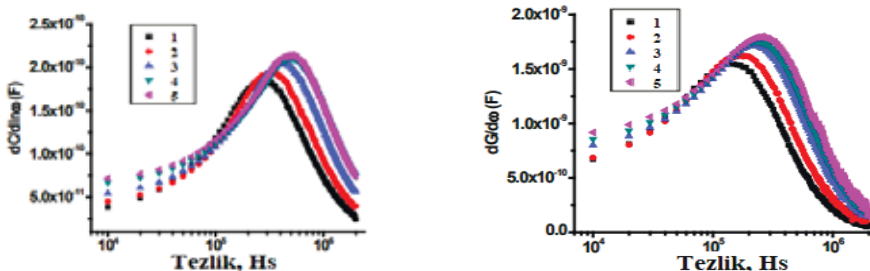
Şəkil 6. p-Si/n-ZnSSe heteroqecidinin tutum xarakteristikası



Şəkil 7. p-Si/n-ZnSSe heteroqecidinin tutumunun (a) və keçiriciliyinin (b) tezlikdən asılılıq xarakteristikaları

Defektlərin E_F -yə yaxın səviyyələri yükdaşıyıcıları tutub buraxmaqla keçiriciliyi dəyişə bilər.

Şəkil 8a və 8b-də göstərilirdiyi kimi $dC/d(\ln\omega)$ və $dG/d\omega$ asılılıq əyrilərinə piklərin vəziyyəti, əsasən də, xarakterik tezliyin qiyməti temperaturun artması ilə daha böyük qiymətlərə doğru sürüşür.



Şəkil 8. p-Si/n-ZnSSe heteroqecidinin tutumunun (a) və keçiriciliyinin (b) tezlikdən asılılıq xarakteristikaları

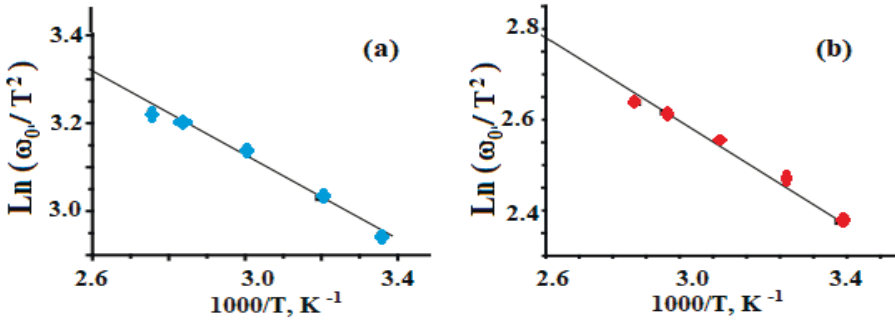
Şəkil 9 a,b-də $\ln(\omega_0/T^2)$ -nin $1/T$ -dən asılılığı, Arrenius qrafiki göstərilmişdir. Xarakteristik tezliklə (ω_0) temperatur arasında əlaqə [6, 7]:

$$\omega_0 = \xi_0 T^2 \exp [-(E_t - E_V)/kT] \quad (7)$$

$$\xi_0 = 2\sigma_t v_{th} N_V \quad (8)$$

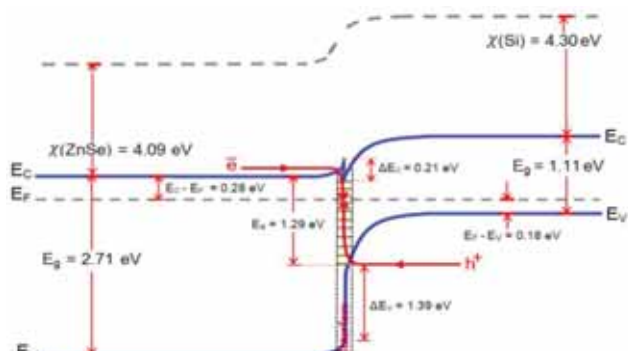
$$\ln(\omega_0/T^2) = \ln\xi_0 - (E_t - E_V)/kT \quad (9)$$

v_t – dəşiklərin orta istilik sürəti, N_V -valent zonasında effektiv hal sıxlığı, σ_t – tutma en kəsiyidir. Si materialı üçün $v_t = 1,1 \times 10^7$ sm / s və $N_V = 2,65 \times 10^{19}$ sm⁻³. Energetik səviyyənin ($E_t - E_V$) dərinliyi və tutma en kəsiyi uyğun olaraq qrafiklərin meyindən və $1/T$ oxu ilə kəsişmə nöqtəsindən tapılır. Defektlərin energetik səviyyəsi üçün $dC/(d\ln\omega)$ və $dG/d\omega$ asılılıqlarından tapılan qiymət - 0,05, ola bilsin ki, bor aşqarlarının Si-da yaratdığı akseptor səviyyəsi ilə bağlıdır.



Şəkil. 9. p-Si/n-ZnSSe heteroqəçidinin xarakteristik tezliyinin C-f və G-f əyrilərindən tapılmış qiymətləri üçün $\ln(\omega_0/T^2)$ kəmiyyətinin temperatur asılılığı

p-Si / n-ZnSSe heteroqəçidinin energetik zona quruluşunu Anderson modeliylə təsvir etmək olar (şəkil 10). Silisium altlığı ilə ZnSSe təbəqəsi arasında tunel şəffaf silisium oksid təbəqəsi ola bilər. Bu diaqramda Si və ZnSe-nin qadağan olunmuş eninin (E_g) qiymətlərinin uyğun olaraq 1,11 eV və 2,71 eV götürülmüşdür. Həmin materialların elektrona hərislik enerjiləri 4,30 eV və 4,09 eV təşkil edir. Şəkildə göstərilirdiyi kimi, keçirici zonada kəsinti $\Delta E_C = \chi$ (ZnSSe) - χ (Si) = 0,21 eV, valent zonasında isə $\Delta E_V = E_g$ (ZnSSe) - E_g (Si) - $\Delta E_C = 1,39$ eV-dur.



Şəkl. 10. p-Si/n-ZnSe heteroqəçidinin enerji diaqramı

ƏDƏBİYYAT

1. M.M. Ivashchenko, I.P. Buryk, A.S. Opanasyuk, D. Nam, H. Cheong, J.G. Vaziev, V.V. Bibyk, Influence of deposition conditions on morphological, structural, optical and electro-physical properties of ZnSe films obtained by close-spaced vacuum sublimation. *Materials Science in Semiconductor Processing* 36 (2015) 13-19.
2. X. Zhang, L. Wang, Y. Wu, Y. Wang, P. Gao, Y. Han, J. Jie, ZnSe nanowire / Si p-n heterojunction: device construction and optoelectronic applications, *Nanotechnology* 24 (2013) 395201-1-395201-7.
3. H.H. Gullu, O. Bayrakh, D.E. Yidiz, M. Parlak, Study on electrical properties of ZnSe/Si heterojunction diode, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* Doi 10.1007/s10854-017-7721-9
4. H. Bayhan, A.S. Kavasoglu, Tunneling enhanced recombination in polycrystalline CdS/CdTe and CdS/Cu(In,Ga)Se₂ heterojunction solar cells, *Solid State Electronics* 49 (2005) 991-996.
5. S.M. Sze, K.N.G. Kwok, *Physics of Semiconductor Devices*, third ed., John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2007, pp. 124-129.
6. Y.Y. Proskuryakov, K. Durose, B.M. Taelle, G.P. Welch, Admittance spectroscopy of CdTe/CdS solar cells subjected to varied nitric-phosphoric etching conditions, *J. Appl. Phys.* 105 (2007) 014505-1-014505-8.
7. X.L. He, J.Q. Zhang, L.H. Feng, L.L. Wu, W. Li, G.G. Zeng, Z. Lei, B. Li, J.G. Zheng, Admittance spectroscopy characterize graphite paste for back contact of CdTe thin film solar cells, *Sci. China Tech. Sci.* 53 (2010) 2337-2341.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ГЕТЕРОПЕРЕХОДА p-Si/n-ZnSSe

Э.Ф.НАСИРОВ

РЕЗЮМЕ

Для изучения механизма тока в гетеропереходе исследованы его электрические свойства в диапазоне температур измерения 80–400 К. Исследована ВАХ гетероперехода p-Si/n-ZnSSe в прямом направлении. Значение последовательного сопротивления (R_a) рассчитано по методу Ченга, было установлено зависимость $dV/d(\ln I)$ от I и $H(I)$ от I . Структура энергетической зоны гетероперехода Si/n-ZnSSe описывался моделью Андерсона.

Ключевые слова: гетеропереход, механизм передачи тока, VAX, VFX.

ELECTRICAL PROPERTIES OF NANOSTRUCTURED p-Si/n-ZnSSe HETEROJUNCTION

E.F. NASIROV

SUMMARY

To study the mechanism of the current in the heterojunction, we investigated its electrical properties in the measurement temperature range 80–400 K. The $I - V$ characteristic of the p-Si/n-ZnSSe heterojunction in the forward direction was investigated, the series resistance (R_s) was calculated by the Cheng method, and was established the dependences $dV/d(\ln I)$ from I and $H(I)$ from I . The structure of the energy band of the Si n-ZnSSe heterojunction was described by Anderson model.

Keywords: heterojunction, current transfer mechanism, VAX, VFX