

n-TİP SİLİSIUM SƏTHİNDƏ FORMALAŞDIRILMIŞ MƏSAMƏLİ SİLİSIUMDA YÜK DAŞINMASI PROSESİ

H.Ə. HƏSƏNOV

Milli Təhlükəsizlik Nazirliyinin Heydər Əliyev adına Akademiyası

Məsaməli silisium (MS) təbəqələrində $T=290-350\text{K}$ temperatur intervalında və elektrik sahəsinin $E=(1.5-1.7)\cdot 10^4\text{V/sm}$ intensivliyində güclü injeksiya rejimində uçuş müddətinin ölçülməsi metodu vasitəsilə yük daşınması prosesi tədqiq edilmişdir. $T=292\text{K}$ və $E=4\cdot 10^4\text{V/sm}$ olduqda, elektron və deşiklərin dreyf yüyrüklükləri müvafiq olaraq $\mu_e=2\cdot 10^{-3}\text{sm}^2/\text{V}\cdot\text{san}$, $\mu_p=6\cdot 10^{-4}\text{sm}^2/\text{V}\cdot\text{san}$ olmuşdur. Elektron və deşiklər üçün müvafiq olaraq $\approx 0.38\text{eV}\approx 0.41\text{eV}$ aktivləşmə enerjilərində dreyf yüyrüklüyünün temperaturdan eksponensial asılı olması müəyyən olunmuşdur. Göstərilmişdir ki, yük daşıyıcıların dreyfinə uyğun olan fotocərəyanın zamandan asılılığının xarakteri və uçuş müddətinin gərginliyin tərs qiymətindən ifrat xətti asılılığı anomal dispers daşınma şəraitində fəza yükləri ilə məhdudlaşmış cərəyan haqqında təsəvvürlərin tətbiq olunmasına imkan verir. Eksperimental nəticələr lokal hallarda daşıyıcıların tutulması ilə tənzimlənən daşınma prosesi modelinin köməyi ilə əsaslandırılmışdır. Valent və keçiricilik zonalarının sərhəd enerjiləri boyunca paylanan lokal hallar xarakteristik enerjisi $\approx 0.03\text{eV}$ olan eksponensial qanunla təsvir olunur.

Giriş.

Məsaməli silisium (MS) əsasında çoxsaylı cihazların, o cümlədən, optoelektron cihazların yaradılması perspektivi onu daim tədqiqatçıların diqqət mərkəzində saxlayır. MS əsasında hazırlanmış fotorezistorlar, Günəş elementləri və işıq diodları hazırda müvəffəqiyyətlə tətbiq olunur [1-3]. MS-in keyfiyyətinin yaxşılaşdırılmasına yönəldilmiş bir çox uğurlu işlərə baxmayaraq [4-6], hələlik elektrolüminessensiyanın yüksək kvant çıxışını almaq mümkün olmamışdır ($\approx 0.1\%$) [2,3,6]. Elektrolüminessensiyanın kvant çıxışının artırılması yollarını müəyyən etmək üçün yükdaşıyıcıların elektrik sahəsində hərəkətinin qanunauyğunluqlarını araşdırmaq lazımdır. Optoelektron cihazlarının bazis elementi olan məsaməli silisium həm *n*-, həm də *p*-tip keçiriciliyə malik olan silisium lövhə üzərində formalaşdırılsa da, *p*-tip keçiriciliyə malik olan silisium üzərində formalaşdırılmış məsaməli silisiumun tədqiqinə daha böyük diqqət yetirilir [7,9].

İşin məqsədi *n*-tip keçiriciliyə malik olan silisium lövhə üzərində formalaşdırılmış məsaməli silisiumda yük daşınması prosesinin tədqiq olunmasıdır.

Nümunələrin hazırlanma texnologiyası və ölçmə metodikası.

Məsaməli silisium təbəqələri xüsusi müqaviməti $\rho=10\text{m}\cdot\text{cm}$ olan *n*-tip keçiriciliyə və (111) kristallik oriyentasiyasına malik olan silisium lövhə üzərində elektrokimyəvi metodla formalaşdırılmışdır [2]. İlkin materialın səthi əvvəlcədən mexaniki üsulla hamarlanmışdır. Anodlaşmadan öncə nümunələr yağsızlaşdırılmış və deionizə olunmuş suda yuyulmuşlar. Anodlaşmanın cərəyan sıxlığı $10\text{mA}/\text{cm}^2$, anodlaşma müddəti 30dəq. olmuşdur. Elektrolit 1:1 nisbətində HF (plavik) turşusu və izopropil spirtindən ibarət olmuşdur. Işıqlanma 60Vt-lıq közərmə lampası ilə aparılmışdır. Ölçmələr «sendviç» strukturlu nümunələrdə həyata keçirilmişdir. Yuxarı elektrod vakuumda tozlandırılmış və sahəsi $2.3\cdot 10^{-2}\text{cm}^2$ olan alüminium təbəqə, aşağı elektrod isə silisium lövhənin özüdür. Dreyf yüyrüklüyü yük daşıyıcının nümunədən keçmə müddətinin ölçülməsi metodunun köməyi ilə tədqiq olunmuşdur [10]. Dalğa uzunluğu 0.337mkm , impulsun davamətmə müddəti 8ns olan ILQI-503 tipli azot lazerindən alınan şüalanma impulsu yuxarı elektrodun yaxınlığında izafi yük daşıyıcıları konsentrasiyasının yaradılmasını təmin edir. Gərginliyin və impulsun verilmə anları arasında

100mks interval saxlamaqla, nümunələrə $\sim 1\text{ms}$ müddətli impuls gərginliyi verilir. Ölçmələr nümunədən fəza yükləri ilə məhdudlaşmış cərəyanın (FYMC) keçməsinə təmin edən güclü ineksiya pecimində aparılmışdır.

Ölçmələr və alınmış nəticələrin müzakirəsi.

Tədqiqatlar göstərdi ki, həm elektron, həm də deşik fotocərəyanlarının zamandan asılılığı struktursuz azalmanı ifadə edən xətdir (Şəkl.1). Cərəyan şiddəti gərginlikdən kvadratik asılıdır. Cərəyan şiddətinin ineksiyaedici şüalanmadan asılı olmaması FYMC reciminin bərqərar olmasına dəlalət edir [11]. Bununla belə, fotocərəyanların görkəmi $I(t)$ asılılığında xarakterik maksimumları olan ideal FYMC-ya bənzəmir. İdeal FYMC-ya məxsus olan maksimumlar yük daşıyıcıların nümunədən keçmə müddətini təyin etməyə imkan verir:

$$t_T \approx 0.8t_0. \quad (1)$$

Burada,

$$t_0 = L^2 / \mu U, \quad (2)$$

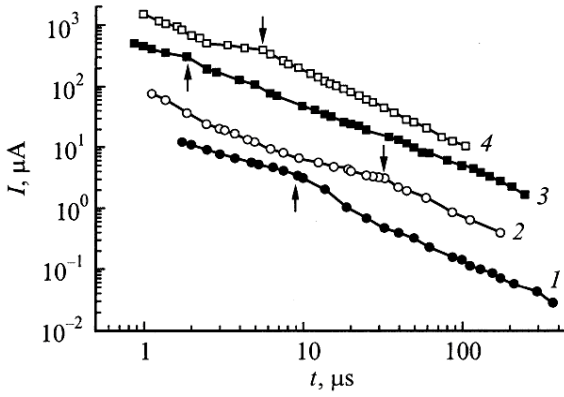
L - nümunənin qalınlığı, μ - daşıyıcıların dreyf yüyrüklüyüdür. Onda (1) düsturuna əsasən dreyf yüyrüklüyü

$$\mu = 0.8L^2 / U t_T \quad (3)$$

ilə hesablanır.

Təqdim olunmuş işdə uçuş müddəti $I(t)$ ayrılarının qrafikdəki azalmanın kvazistasionar haldan daha sürətli hala keçid intervalına uyğun olan zaman anına görə ikiqat loqarifmik miqyasda qurulmasından təyin olunmuşdur (Şəkl.1). Şəkilə uçuş müddəti oxlarla göstərilmişdir. Asılılığın daha anlaşılıqlı olması üçün 1, 3, 4 ayrılarında cərəyanın qiyməti müvafiq olaraq 0.25, 1.5, 5-ə vurulmuşdur.

12-ci işdə göstərilmişdir ki, maksimumları olmayan FYMC-lar lokal hallarda tutulan və sərbəst qalan yük daşıyıcıların bərqərar olmamış termodinamik tarazlığı şəraitində meydana çıxan anomal dispers daşınma prosesində müşahidə oluna bilər. Bu halda nümunə daxilində fəzada güclü yayılmış və yüyrüklüyü zamandan, deməli, nümunənin qalınlığı və gərginlikdən asılı olan yükdaşıyıcılar paketi dreyf edir. 12-ci işdə enerjiyə görə paylanması eksponensial qanuna tabe olan lokal halların tutduğu yük daşıyıcılarla tənzimlənən daşınma modeli nəzərdən keçirilmişdir.



Şəkil 1. 10mkm qalınlıqlı MS təbəqəsində müxtəlif temperaturalarda elektron (1,3) və deşik (2,4) foto-cərəyanlarının zamandan asılılığı. T,K: 1,2-292K; 3,4-335K. 1,3,4 əyrilərində cərəyanın qiyməti müüvafiq olaraq 0.5, 1.5, 5-ə vurulmuşdur.

Sadəlik üçün qəbul olunmuşdur ki, $g(E) = g_c$ paylanması müəyyən $E_f < E < E_c$ enerji intervalında eksponensial qanunla dəyişir:

$$g(E) = g_s \exp(-(E - E_f)/kT_0).$$

E-nin qiymətləri keçiricilik zonasının dibi E_c -dən hesablanmışdır. kT_0 –eksponensial paylanmanın xarakteristik enerjisidir. Bu halda uçuş müddəti uçuş müddəti üçün

$$t_T^* = t_0 \cdot (0.78)^{1/\alpha} \quad (4)$$

düsturu ilə təyin olunur. Burada,

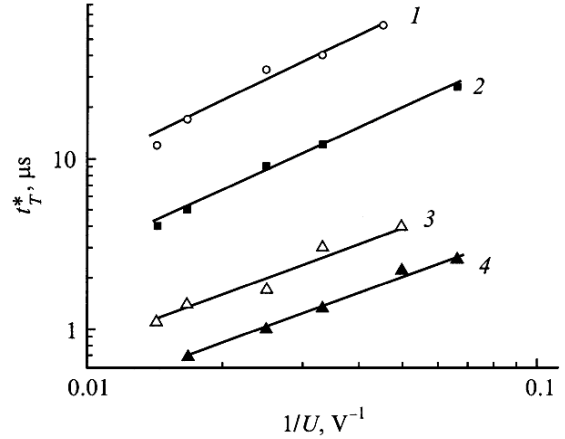
$$\alpha = kT/kT_0. \quad (5)$$

0 və 1 arasında qiymət alan α daşınmanın dispersionluq dərəcəsinə xarakterizə edir. α -nın qiyməti azaldıqca dispersionluq dərəcəsi artır (paketin yayılması daha güclü olur).

2-ci şəkildə elektron və deşiklər üçün t_T^* -in gərginliyin tərs qiymətindən asılılıq əyriləri verilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi, gərginlik artdıqca daşıyıcıların uçuş müddəti azalır. Alınmış asılılıq $t_T^* \sim (1/U)^n$ funksiyası ilə ifadə etmək olar. 292K temperaturda elektronlar və deşiklər üçün ~ 1.2 olan qüvvət dərəcəsi 352K temperaturda ~ 1 -ə qədər azalır.

Anomal dispersion daşınma şəraitində $t_0 \sim (L/F)^{1/\alpha}$ olduğundan [13,14], (4) düsturundan $t_T^* \sim (1/U)^{1/\alpha}$ alınır. Nəticədə $n=1/\alpha$ düsturundan α üçün otaq temperaturunda $\cong 0.8$, 352K temperaturda isə $\cong 1$ alınmışdır.

Beləliklə, alınmış nəticələr α dispersion parametrinin temperaturdan asılı olmasını sübut edir və (5) düsturu ilə uzlaşaraq, eksperimental məlumatların anomal dispersion şəraitdə FYMC modeli çərçivəsində təhlil olunmasına imkan yaradır. (5) düsturuna görə, α -nın otaq temperaturunda alınmış 0.8 qiyməti üçün daşınma modelinə əsasən $kT_0 \cong 0.03eV$ xarakteristik enerjisinə malik olan $g(E)$ eksponensial paylanması olmalıdır.



Şəkil 2. Deşiklər (1,2) və elektronların (3,4) uçuş müddətinin temperaturun müxtəlif qiymətlərində gərginliyin tərs qiymətindən asılılığı. T,K: 1,2-292K, 3,4-352K. L=10mkm.

Qeyd edək ki, verilmiş modelə əsasən daşınmaya nəzarət edən lokallaşmış halların enerjiyə görə eksponensial paylanması zamanı $t > t_T^*$ olduqda cərəyanın zamandan asılılıq qüvvət funksiyası şəklində verilə bilər:

$$I(t) \sim t^{-(1+\alpha_f)}.$$

Burada α_f parametri α -ya bərabər olduğundan, otaq temperaturunda $\alpha_f \approx 0.8$ və $I(t) \sim t^{-1.8} (t > t_T^*)$. Ancaq eksperi-

mental məlumatların təhlili göstərdi ki, $\alpha_f = 0.1 - 0.3$, yəni dispersionluq dərəcəsi α parametridən xeyli böyükdür. Bu fərqin səbəbini, çox güman ki, məsaməli təbəqənin strukturunun qeyri-bircinsliliyi nəticəsində dreyf paketinin daha güclü yayılması ilə izah etmək olar [15].

$t \geq t_T^*$ olduqda, «kvaziplatolu» sahəyə malik olan $I(t)$ asılılıq 12-ci işdəki model əsasında hesablanmış $I(t)$ ilə yaxşı uyğunlaşır. $I(t)$ -nin başlanğıcdakı sürətli azalmasının səbəbi hələlik tam aydın deyil. Analoci FYMC əyrilərinin α -Si:H-da müşahidə olunmasını xüsusi qeyd etmək lazımdır [16,17].

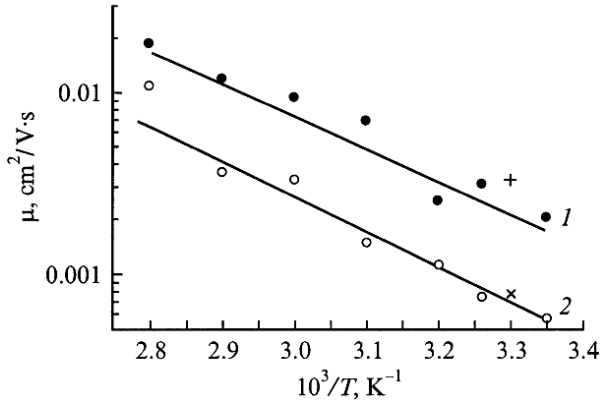
Yük daşıyıcıların dreyf yüyrüklüyünün (4) düsturuna əsasən müəyyən edilmiş qiyməti, $\alpha = 0.8$ olduqda, (3) düsturuna əsasən hesablanan qiymətdən cüzi fərqlənir ($\alpha = 0.73$). Nəticədə otaq temperaturunda və $E=4 \cdot 10^4$ v/sm intensivlikdə elektronların yüyrüklüyü $\mu_e = 2 \cdot 10^{-3} \text{ sm}^2/V \cdot \text{san}$, deşiklərin yüyrüklüyü isə $\mu_h = 6 \cdot 10^{-4} \text{ sm}^2/V \cdot \text{san}$ olmuşdur.

Məlumdur ki, FYMC recimində yüyrüklüyün qiyməti I_0 başlanğıc cərəyanının və $t=t_T$ anındakı I_m cərəyan maksimumunun ölçülməsi vasitəsilə təyin edilə bilər. İdeal FYMC halında $I_m = 2.7 \cdot I_0$. 12-ci işdə anomal dispersion daşınma zamanı FYMC-nin təhlili göstərdi ki, $\alpha \leq 0.8$ olduqda $I(t)$ -nin azalması fonunda maksimum seçilmir və $I(t_T^*) \leq I_0$; $\alpha = 0.8$ olduqda isə $I_m \approx I_0$. Özü də I_0 -ın qiyməti ideal FYMC-nin qiymətindən elə də fərqlənmir. Tərəfimizdən yüyrüklüyün hesablanması üçün 11-ci işdəki düsturdan istifadə olunmuşdur:

$$I_0/S = \mu k U^2 / 2.25 \cdot 10^{13} L^3, A/sm^2. \quad (6)$$

Burada, k -dielektrik nüfuzluluğudur.

I_0 -in qiymətinin müəyyənəndirilməsi məlum səbəblərdən mümkün deyil. Belə ki, onun əsl qiyməti elektrik sahəsinin bərqərar olması və yük daşıyıcıların tərs diffuziyası nəticəsində meydana çıxan başlanğıc pikin qiyməti altında maskalanır [17]. Ona görə də $\alpha = 0.8$ olduqda $I(t_T^*) \approx I_0$ olması nəzərə alınaraq (6) düsturunda t_T^* anındakı cərəyanın qiyməti götürülmüşdür. 18-ci işin nəticələrinə əsasən $k=5$ qəbul edilmişdir. Belə üsulla tapılmış $\mu_e = 1.5 \cdot 10^{-3} sm^2/V \cdot san$, $\mu_h = 3.8 \cdot 10^{-4} sm^2/V \cdot san$ qiymətləri t_T^* anında hesablanmış qiymətlərdən cüzi fərqlənir.



Şəkil. 3. Elektronlar (1) və deşiklərin (2) dreyf yüyrüklüklərinin temperatur asılılıqları. «+», «x» işarələri yüyrüklüklərin temperaturun tərs gedindəki qiymətlərinə uyğun gəlir.

Yük daşıyıcıların yüyrüklüyünün temperatur asılılığı $10^{-3}mm.c.st.$ tərtibli vakuumda tədqiq edilmişdir. Şək.3-də $E = 4 \cdot 10^4 V/sm$ intensivlikdə 292-352K temperatur intervalında yüyrüklüyün temperatur asılılığı göstərilmişdir. MS-də elektron və deşiklərin temperatur asılılığı aktivləşmiş xarakterə malikdirlər. Aktivləşmə enerjisi elektronların yüyrüklüyü üçün $\Delta E_e = (0.38 \pm 0.05)eV$, deşiklərin yüyrüklüyü

üçün isə $\Delta E_h = (0.41 \pm 0.05)eV$ olmuşdur. Qeyd edək ki, 9-cu işdən fərqli olaraq, aktivləşmə enerjisi xassələri sabitləşdirilmiş nümunələrdə aparılmışdır. Temperaturun tərs gedində yüyrüklük öz ilkin qiymətinə qayıdır.

Yük daşıyıcıların lokallaşmış hallarda tutulması ilə tənzimlənən daşınma modelinə əsasən yüyrüklüyün aktivləşmə enerjisini aşağıdakı kimi yazmaq olar:

$$\Delta E = E_I + kT_0 \ln \left(\frac{L}{\sqrt{2} \mu_0 \tau_0 F} \right). \quad (7)$$

Burada, μ_0 - yük daşıyıcıların icazə verilmiş zonadakı yüyrüklüyü, τ_0 - onların yaşama müddətidir. $E_I=0,03eV$ qəbul edərək, L, kT_0, F -in məlum qiymətlərini (7) düsturunda yerinə yazdıqda $\mu_0 \tau_0 = 10^{-9} cm^2/V$ üçün $\Delta E_e, \Delta E_h$ -in eksperimental müəyyən olunmuş qiymətlərinə yaxın qiymətlər alınır. Qeyd etmək lazımdır ki, $\mu_0 \tau_0$ hasilini nizamsız yarımkəçiricilərdəki analoci hasilə eyni tərtibdədir. Məsələn, şüşəyabənzər As_2Se_3 yarımkəçiricisində $\mu_0 \tau_0 = 4 \cdot 10^{-10} cm^2/V$ -dur [14]. Aparılmış təhlil MS-in qadağan olunmuş zonasında icazə verilmiş zonaların «quyruq»larının olması müddəasını irəlisürməyə imkan verir.

Yekun.

Təqdim olunmuş işdə göstərilmişdir ki, MS-də yük daşıyıcıların dreyf yüyrüklüyünə müvafiq olan keçid fotocərəyanının zamandan asılılığını anomal dispersion daşınma şəraitində fəza yükləri ilə məhdudlaşmış cərəyan modeli çərçivəsində izah etmək mümkündür. 292-352K temperatur intervalında elektron və deşiklərin dreyf yüyrüklüyünün temperatur asılılığı tədqiq olunmuş, elektrik sahəsinin $E = 4 \cdot 10^4 V/sm$ intensivliyində və $T=292K$ temperaturda elektron və deşiklərin aktivləşmə enerjilərinin müvafiq olaraq

$\mu_e = 2 \cdot 10^{-3} ci^2/\hat{A} \cdot \tilde{n}$; $\mu_h = 6 \cdot 10^{-4} ci^2/\hat{A} \cdot \tilde{n}$ olması müəyyən edilmişdir.

- [1] L.A. Balagurov, S.C. Bayliss, A.F. Orlov, B. Unal, D.G. Yarkin. Abstracts Int. Conf. Porous Semiconductors. Science and Technology. (Madrid, Spain, 2000), p. 53.
- [2] Q.A.Qasanov. Bakı, AMEA, Fizika-Riyaziyyat və Texnika elmləri seriyası. Fizika və astronomiya bəlməsi. «Elm», 2008, X bəlməsi, XXVII cild, №2, s.42-48.
- [3] B. Das, S.P. McGinnis. Semicond. Sci. Technol., 14, 998(1999).
- [4] J.A. Roger, M.G. Blanchin, B. Canut, V.S. Teodorescu, S. Letant, J.C. Vial. Semicond. Sci. Technol., 14, L29 (1999).
- [5] M. Stewart, E.G. Robins, T.W. Geders, M.J. Allen, H.Ch. Choi, J.M. Buriak. Abstracts Int. Conf. Porous Semiconductors. Science and Technology. (Madrid, Spain, 2000) p. 31.
- [6] M. Balucani, V. Bondarenko, G. Lamedica, V.A. Yakovtseva, A. Ferrari. Appl. Phys. Lett., 74, 1960 (1999).
- [7] H.İ. Həsənov, A.Y. Həsənova. Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi İşləri, Bakı, 2007, №2, s.34-50.
- [8] E.A. Lebedev, E.A. Smorgonskaya, G. Polisski. Phys. Rev. B, 57, 14 607 (1998).
- [9] N.S. Averkiev, L.P. Kazakova, G.A. Lebedev, N.N. Smirnova. FTP,35, 93 (2001).
- [10] W.E. Spear. J. Non-Cryst. Sol., 1, 197 (1969).
- [11] M. Lampert, P. Mark. Incekiyonnie toki v tverdx telax (M.,Mir,1973). [Per.s anql.: İ.A. Lampert, P. Mark. Current injection in solids (N. Y..London, Academic Press, 1970)].
- [12] M. Silver, E. Snow, D. Wesson, K. Okamoto. J. Non-Cryst.Sol., 66, 237 (1984).
- [13] A.F. Rudenko, V.I. Arkhipov. Phil. Mag. B, 45, 189 (1982).

- [14] Glektronnie əvleniə v xalğkoqenidnix stekloobraznix poluprovodnikax, pod red. *K.D. Tsendina* (SPb., Nauka. 1996). [16] *C.E. Nebel, R.A. Street*. Phil. Mag. B, 67, 721 (1993).
[15] *V.I. Arxipov, G.A. Lebedev, A.I. Rudenko*. FTP, 15, 712 (1981). [17] *J. Kocka, O. Klima, E. Sipek, C.E. Nebel, G.H. Bauer, G. Juska, M. Hoheisel*. Phys. Rev. B, 45, 6593 (1992).
[18] *L.P.Kazakova, G.A.Lebedev, A.A.Lebedev*. FTP, 31, 609 (1997).

H.A. Hasanov

CHARGE CARRIER TRANSFER IN POROUS SILICON FORMED ON THE SURFACE OF SILICON OF n-TYPE

Charge carrier transfer in porous silicon layers by the time of flight technique in the strong injection regime in the temperature interval $T = 290-350\text{K}$ at the electric field strength $E=(1.5-1.7)\cdot 10^4\text{V/cm}$ has been investigated. It is shown that the drift mobility values of electron and holes are $\mu_e=2\cdot 10^{-3}\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, $\mu_p=6\cdot 10^{-4}\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ at $T = 292\text{K}$ and $E=4\cdot 10^4\text{V/cm}$. The experimental dependence of drift mobility on temperature with energy activation $\approx 0.38\text{eV}\approx 0.41\text{eV}$ for electrons and holes is established correspondingly. It is shown that the character of the time dependence of the photocurrent corresponding to the charge carrier drift as well as the superlinear dependence of the time of flight on an inverse value of the voltage applied to the sample allow us to use the model of space charge under anomalous dispersion transfer condition. The experimental data are explained in framework of transfer model controlled by trapping of carriers on localized states energy distribution of which is described by exponential law with characteristic energy $\approx 0.03\text{eV}$ near edges of conduction band and valence one.

Г.А. Гасанов

ПЕРЕНОС НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОРИСТОМ КРЕМНИИ, СФОРМИРОВАННОМ НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ n-ТИПА

В представленной работе исследован перенос носителей заряда в слоях пористого кремния методом измерения времени пролета в режиме сильной инжекции в интервале температур $T=290-350\text{K}$ и напряженности электрического поля $E=(1.5-1.7)\cdot 10^4\text{В/см}$. Получено, что значения дрейфовых подвижностей электронов и дырок составляют $\mu_e=2\cdot 10^{-3}\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, $\mu_p=6\cdot 10^{-4}\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при $T=292\text{K}$ и $E=4\cdot 10^4\text{В/см}$ соответственно. Установлена экспериментальная зависимость дрейфовой подвижности от температуры с энергией активации $\approx 0.38\text{эВ}\approx 0.41\text{эВ}$ для электронов и дырок соответственно. Показано, что характер зависимостей от времени фототока, соответствующего дрейфу носителей заряда, и сверхлинейная зависимость времени пролета от величины, обратной приложенному к образцу напряжению, позволяют использовать представления о токе, ограниченном пространственным зарядом в условиях аномального дисперсионного переноса. Экспериментальные данные объяснены в модели переноса, контролируемого захватом носителей на локализованные состояния, распределение которых по энергии вблизи краев зоны проводимости и валентной зоны описывается экспоненциальным законом с характеристической энергией $\approx 0.38\text{В}$.

Received: 25.09.08