

YARÍMÓTKIZGISHLERDE JÍLLÍLÍQ TASÍWSHÍLAR HÁM FONONLARDÍŃ ÓZ ARA TÁSIRLESIWINÍŃ TEMPERATÍWRA GRADIENTINEN ĞÁREZLILIGI.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17498791>

Abdreymov A.A.

Arzieva A

*¹Berdaq atındağı Qaraqalpaq mámleketlik universiteti, Ch.Abdirov kóshesi №1,
742012. Nókis qalası, Ózbekistan,*

Annotaciya.

Bul izertlewde gidrodinamikalıq model tiykarında úlken kerı ótiw kernewine iye bolgan p-i-n diodında jillılıq tasıwshılardıń transportı úyrenildi. Elektr maydanınıń bólistiriliwi hám toqtıń ulıwmalıq tıgızlığı boyınsha dreyf-diffuziya modeli hám gidrodinamikalıq model arqalı alınğan nátiyjeler tesiw (proboy) oblasti júzege kelgenge shekem derlik birdey ekenligi anıqlandı. Bul bolsa elektr maydanınıń bólistiriliwi jillılıq tasıwshılar tásirinen sezilerli dárejede ózgermeytuđınlıđın kórsetedi. Biraq, tiykarđı bolmağan tasıwshılardıń tarqalıwı hám olarđa tiyisli toqtıń tıgızlıđınıń mánisleri, ásirese, usı oblastlardıń sheklerinde, tasıwshılardıń temperaturasınıń gradientleri sebepli sezilerliktey parıqlanatuğınlığı anıqlandı. Izertlew nátiyjeleri boyınsha jeterli kerı kernew astında tiykarđı yemes tasıwshılardıń diffuziyası, yağnıy neytral oblastlarda olardıń generaciyası, tiykarınan koncentraciya gradienti menen yemes, al temperatura gradienti menen belgilenedi. Bul jağday dreyf-diffuziya teoriyası sheńberinde tastıyqlanadı hám jillılıq tasıwshılardı esapqa alıwdıń zárúrligin kórsetedi.

I. KIRISIW.

Úlken waqıt hám uzınlıq masshtablarında, sonıń ishinde submikron diapazonđa shekemgi jağdaylarda kúshli elektr maydanı astındağı transport processlerin táriyiplew ushın teoriyalıq tiykar sıpatında, tiykarınan, yarım klassikalıq Bolcman transport teńlemesi qabıl etilgen. Bul integraldı-differencial teńlemeni sheshiw ushın bir neshe esaplaw usılları islep shığılğan. Tikkeley esaplaw usılları arasında Monte-Karlo modeli eń tabıslı jantasıwlardan biri sıpatında tán alınğan. Biraq, bóleksheler tiykarında modellestiriw processleri, ásirese eki hám úsh ólshemli keńisliklik tallawlarda júdá úlken esaplawdı talap etedi. Bunnan tisqari, bul qatnaslar potenciallıq tosqınlıqlar bar bolğan oblastta (mısalı, MOS interfeysleri yamasa p-n ótiw oblastları) jáne kúshsiz elektr maydanına iye regionlardı modellestiriwde anıq nátiyje bermeydi.

Gidrodinamikalıq model bolsa tasıwshılardıń bólistiriw funkciyasınıń anıq túrin anıqlamastan transport mashqalaların sheshiw imkaniyatın beretuǵın alternativ kózqaras bolıp tabıladı. Hidrodinamikalıq model - Bolcman transport teńlemesiniń bir neshe dáslepki momentlerine tiykarlanadı [2]. Bul haldı ayırım jaǵdaylarda teńsalmaqlıq tenlemeleri dep ataladı, sebebi olar yarımótkizgishlerdegi zaryad tasıwshılar sanı, impulsi hám ortasha energiyasınıń saqlanıwın anlatadı. Bul saqlanıw teńlemeleri sisteması dástúriy dreyf-diffuziya modeline salıstırǵanda ádewir anıqlıq beredi hám yarım klassikalıq Bolcman transport teńlemesin tikkeley sheshiw usıllarına qaraǵanda esaplawdıń qıyınshılıǵı kemirek. Sonlıqtan, sońǵı jıgırma jıl dawamında gidrodinamikalıq model eki hám úsh ólshemli qurılmanı modellestiriwde esaplaw jaǵınan nátiyjeli hám ámeliy alternativ qural sıpatında barǵan sayın keńnen qollanıwmaqta. Kópshilik izertlewler gidrodinamikalıq model formalizmine hám onıń menen baylanıslı fizikalıq parametrlerdi úyreniwge baǵıshlangan bolsa da, salıstırmalı az sanlı jumıslar usı modeldi ápiwayı dreyf-diffuziya modelinen pariq qılatuǵın jańa dinamikalıq esaplawdıń modellestiriw nátiyjelerine tásirine itibar qaratqan. Hidrodinamikalıq modeldi ámeliyatqa engiziw imkaniyatı hám onıń yarımótkizgish qurılımlarında jıllılıq tasıwshılardıń sızıqlı emes transportın anıqlıq penen táriyiplew qábileti mine usı qosımsha dinamikalıq esaplawlar menen tıǵız baylanıslı bolıp, olardıń áhmietin tereń úyreniw áhmietli másele bolıp tabıladı. Tasıwshılardıń jıllılıq aǵısı roli haqqında ádebiyatlarda talqılawlar bar[3]. Usı izertlewde biz gidrodinamikalıq modeldi xarakterlewshi tiykarǵı dinamikalıq faktorlardan biri bolǵan - tasıwshılar temperatura gradientiniń yarımótkizgishtegi p-n ótiw oblastı ishindegi transport mexanizmlerine hám sırtqı volt-ampere xarakteristikalarına tásirin analiz yetemiz. Izertlew nátiyjeleri sonı kórsetedi, tasıwshılardıń temperatura gradienti, dreyf-diffuziya modelindegi boljawlarǵa qarama-qarsı ráwishte, tiykarǵı yemes tasıwshılardıń tarqalıwında áhmietli ayırmashlıqlardı keltirip shıǵaradı. Sonday-aq, biz elektr maydanınıń bólistiriliwiniń jıllılıq tasıwshılar effektleriniń tásirinde sezilerliktey dárejede buzılmaytuǵınlıǵın da kórsetemiz.

I. Hidrodinamikalıq model.

Joqarıda atap ótilgenindey, gidrodinamikalıq model Bolcman transport teńlemesiniń dáslepki bir neshe hallarına tiykarlanadı. Yarımótkizgish kólemindegi q-túrdegi zaryad tasıwshılar (elektronlar yamasa tesikler) gazi ushın yarım klassikalıq Bolcman transport teńlemesi tómendegishe anlatıladı:

$$\frac{\partial f_q}{\partial t} + U_p \cdot \nabla I_q + \frac{F}{\hbar} \cdot \nabla_k f_q = \left[\frac{\partial f_q}{\partial t} \right]_{col} \quad (1)$$

Bul jerde $f_q = f_q(x, k, t)$ - tasıwshılardıń keńisliktegi $x = [x, y, z]$ koordinatalarında hám tolqın vektorlarında $k = [k_x, k_y, k_z]$ tarqalıw funkciyası; \hbar - Planck turaqlısınıń 2π ge bólingen mánisi; u_q - tasıwshılardıń ulıwmalıq tezligi; F - sırtqı kúsh, yagniy

tasıwshılar gazine tásir etiwshi uliwma kúsh. Sırtqı magnit maydanları bolmagan jagdayda elektronlar ushin $F=-eE$, bul jerde E -elektr maydanı, e -elektronnıń elementar zaryadı. Tómenдеgi $\left(\frac{\partial f_q}{\partial t}\right)_{col}$ ańlatpası bolsa f_q funkciyasınıń kristallıq reshetka menen tasıwshılar arasındaqı soqlısıwlar nátiyjesindegi ózgeriw tezligin ańgartadı. Joqarıdağı Bolcman transport teńlemesiniń ańlatpası soqlıgısıwlar tez bolıp ótetuǵın hám sırtqı kúshler waqıt penen keńislikte áste ózgeretuǵın jagdaylar ushın qollanıwı múmkin. Bolmasa (mısalı, sırtqı kúshler de Broyl tolqın uzınlıǵına teń yamasa onnan kishi masshtablarda ózgeretuǵın bolsa) yarım klassikalıq Bolcman transport teńlemesi jaramsız boladı. Tasıwshılardıń koncentraciyası, impulsı hám energiyası ushın saqlanıw nızamları Bolcman teńlemesin sáykes u_q , hám E_q (bul jerde E_q - tasıwshınıń energiyası) menen kóbeytiw hám nátiyjeni tolqın vektorlarınıń keńisligi boyınsha integrallaw arqalı alınadı. Nátiyjede gidrodinamikalıq modelge tiykar bolatuǵın diferencial teńlemeler sisteması qalıpleseıdi.

Saqlanıw teńlemeleri jıynaǵı

Relaksasiya waqıtı jaqınlasıwınan paydalanbastan, bir tekli yarım ótkizgishtegi elektronnıń impuls hám energiyasın saqlaw teńlemeleri tómenдеgishe boladı:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (nv_{\perp}) = \left[\frac{\partial n}{\partial t} \right]_{col} \quad (2)$$

$$\frac{\partial (nv_{\perp})}{\partial t} + \nabla \cdot (m_{\perp}^{-1} \cdot P_{\perp}) + \nabla \cdot (nv_{\perp} \otimes v_{\perp}) = nm_{\perp}^{-1} F + \left[\frac{\partial (nv_{\perp})}{\partial t} \right]_{col} \quad (3)$$

$$\frac{\partial (n\omega_{\perp})}{\partial t} + \nabla \cdot (S_{\perp}) = nv_{\perp} F + \left[\frac{\partial (n\omega_{\perp})}{\partial t} \right]_{col} \quad (4)$$

Bul jerde n - elektronlar koncentraciyası, V_n - ortasha tezlik, ω_n hám P_n sáykes túrde ortasha energiya hám basım tenzori. \otimes belgisi eki vektordıń tenzor kóbeymesin bildiredi, sonlıqtan biz tómenдеgilerdi jazıwımız múmkin:

$$\nabla \cdot (n v_n \otimes v_n) = v_n \nabla \cdot (n v_n) + (n v_n \cdot \nabla) v_n$$

Basım tenzori tómenдеgishe anıqlanadı:

$$m_n^{-1} \cdot P_n = \langle (u_{\perp} \cdot v_{\perp}) \otimes (u_{\perp} \cdot v_{\perp}) \rangle \quad (5)$$

"col." tómenge indeksi elektron gaziniń yarım ótkizgishtiń kristallıq pánjeresi menen soqlıgısıwlarınıń saldarınan qawsırma ishindegi shamanıń ózgeriw tezligin bildiredi. Elektronnıń ortasha kerı massası.

$$m_n^{-1} = \langle m_n^{*-1} \rangle$$

Ádette tenzor bolıp, oniń komponentleri elektron energiyasının funkciyaları bolıp tabıladı. Biraq energiyalıq zona dúzilisi parabolalıq dep boljanǵanda (sonlıqtan ol turaqlı boladı) m_n^{-1} elektronnıń ádettegi kerı effektiv massasına teń

boladı. Sonday-aq, elektron gaziniń kinetikalıq basımı skalyar shama sıpatında qaralsa, yaǵnıy $P_n = P_n I$ bolsa, bul jerde I - birlik tenzor (3×3 birlik matrica), ideal gazlar nızamı boyınsha elektron gaziniń temperaturası T_n $P_n = n \cdot k_B \cdot T_n$ dep anıqlanıwı múmkin, bul jerde k_B - Bolcman turaqlısı. Joqarıdaǵı boljaw impuls keńisligindegi ortasha mániske salıstırǵanda sferalıq simmetriyalı bólistiriw funkciyasın ańǵartpaytuǵınlıǵın atap ótiw kerek. Solay etip, biz tasıwshılardıń temperaturasını anıqlaǵanda Maksvell bólistiriw funkciyasın boljay almaymız. Demek, elektronniń ortasha energiyası ω_n skalyar elektron temperaturası T_n menen tómendegishe baylanısqan:

$$\omega_n = \frac{m_n v_n^2}{2} + \frac{3}{2} k_B T_n$$

Bul jerde k_B - Bolcman turaqlısı. Joqarıdaǵı boljawlardan paydalanıp, elektron tıǵızlıǵı, impulsi hám energiyasını saqlawdıń yarım klassikalıq teńlemeleri jıynaǵın tómendegishe jazıw múmkin:

$$e \cdot \frac{\partial n}{\partial t} \cdot \nabla \cdot J_n = e \cdot \left[\frac{\partial n}{\partial t} \right]_{col} \quad (6)$$

$$J_n + n \cdot \mu_{\perp} \cdot m_{\perp} \frac{d[v_{\perp}]}{dt} - e \cdot \mu_{\perp} n E + k_{\perp} \mu_{\perp} \nabla \cdot (n T_{\perp}) \quad (7)$$

$$\frac{\partial(n\omega_{\perp})}{\partial t} + \nabla \cdot (S_{\perp}) = E J_n + \left[\frac{\partial(n\omega_{\perp})}{\partial t} \right]_{col} \quad (8)$$

$$S_n = H_n - \left(\frac{J_n}{e} \right) (\omega_n + k_B T_n) \quad (9)$$

Sonday-aq, H_n - elektronlardıń jıllılıq aǵımı, al μ_n bolsa tómendegi ańlatpa menen anıqlanatuǵın dreyf elektronlarınıń qozǵalıwshańlıǵı bolıp tabıladı:

$$\mu_n^{-1} = \mu_{n0}^{-1} \left[1 + \frac{\mu_{n0}}{e [v_n^{sat}]^2} \left(\frac{\omega_n - \omega_0}{\tau_{wn}} \right) \right] \quad (10)$$

Bul jerde μ_{n0} - kúshsiz maydanlardaǵı elektronlardıń dreyf qozǵalıwshańlıǵı, v_n , v_n^{sat} - elektronlardıń toyınıw tezligi, $\omega_0 = 3/2 k_B T_L$ - jıllılıq teńsalmaqlıǵındaǵı elektronlar energiyası (bul jerde T_L - pánjere temperaturası). Atap ótiw orınlı, impulsti saqlaw teńlemelerinde (2) impuls relaksaciyasınıń juwıqlasıwı qollanılmaydı. Onıń ornına qozǵalıwshańlıq qatnasları basqa jerde [5] kórsetilgendey, impuls hám energiyanı saqlaw teńlemelerinen analitikalıq túrde keltirip shıǵarıladı. Kúshli maydanlardaǵı zona strukturasınıń parabolik emesligi m_n^{-1} ortasha kerı massa arqalı esapqa alınadı, onıń energiyalıq ǵárezlilikin Monte Karlo modellestiriw arqalı alıw múmkin. Anıq, m_n^{-1} zona dúzilisi parabolik bolganda ápiwayı kerı effektiv massaga m_n^{-1} teń boladı. Stacionar jaǵdayda toqtıń tıǵızlıǵınıń (konstituciyalıq qatnaslar) impulsti saqlaw teńlemelerinen (7) waqıt boyınsha dara tuwındılaw arqalı alınadı.

$$J_n - \mu_n \cdot m_n^* n (v_n \nabla \cdot) (v_n) = e \cdot \mu_n n E + k_B \mu_n \nabla \cdot (n T_n) \quad (12)$$

Bul jumusta biz tiykarınan elektronlar menen hám tesikler menen shugıllanamız. Biraq, ápiwayılıq ushın keyingi ala elektronlıq teńlemeler menen sheklenemiz. Uqsas analiz tesikler ushın da qollanıladı, biraq aǵzalar arasındagı hár qıylı belgilerdi esapqa alınadı. Generaciya-rekombinaciya aǵzasın Shokley, Rid, Xoll hám Ojenniń statistikası, sonday-aq soqqılı ionizaciya tezlikleriniń sáykes modelinen paydalanıp, tasıwshılardıń koncentraciyası hám ortasha energiyaları kóz-qarasları boyınsha modellestiriwge boladı.

$$G_{ion} = \left(\frac{n}{\tau_{1n}} \right) + \left(\frac{p}{\tau_{1p}} \right) \quad (13)$$

Bul jerde $\frac{1}{\tau_{1n}} \omega_n$ hám $\frac{1}{\tau_{1p}} \omega_p$ - elektronlar menen tesiklerdiń ortasha ionizaciya tezlikleri. Elektronniń jıllılıq aǵımı H_n ni Fure qatnasınan paydalanıp tómendegishe anlatıw múmkin:

$$H_n = \cdot k_n \nabla T_n \quad (14)$$

Bul jerde k_n - elektronniń jıllılıq ótkiziwsheliǵı. Frants-Vaydeman qatnasları boyınsha, elektronniń jıllılıq ótkiziwsheliǵı tómendegishe aniqlanadı:

$$k_n = \gamma_n \mu_n \left(\frac{k_B^2}{e} \right) n \quad (15)$$

Bul jerde γ_n - ólshem birliksiz turaqlı. (14-15) ańlatpalar analitikalıq jaqtan sızıqlandıırılǵan Bolcman transport teńlemesine tiykarlangan bolsa da [6], joqarı elektr maydanlarında payda bolatuǵın qátelik itibarǵa alınbaydı. Tilekke qarsı, joqarı elektr maydanlarına beyim bolǵan zonalar ádette hálsiretileđi hám jıllılıq ótkizgishlikke úles qosatuǵın erkin tasıwshılar sanı ol jerde salıstırmalı az. Demek, tasıwshılardıń energiya aǵısı menen salıstırǵanda tasıwshılardıń jıllılıq aǵısı barlıq waqıtta júdá kishi boladı. Biraq, [6] de analizlengenindey, bul aǵzaǵa itibar bermew ayırım jaǵdaylarda bazı bir sanlı mashqalalardı keltirip shıǵarıwı múmkin.

p-n-ótkeriw arqalı jıllılıq tasıwshılardıń transportın modellestiriw.

Biz keri awısıwdaǵı p-i-n-diodi arqalı transport mexanizmin talqılay ótkergenimizde Sanlı nátiyjeler elektronlar ushın da, tesikler ushın da Puasson teńlemesi hám energiyaǵa baylanıslı fizikalıq parametrler menen birge tolıq saqlanıw teńlemelerin sheshiw arqalı alınadı. Biziń diskretlestiriw sxemamız tiykarında HDE SIMULADD [7] járdeminde sheshildi. Áhmietli nátiyjeler sol simulyator tárepinen alınǵan dreyf-diffuziya nátiyjeleri menen salıstırıladı. Tiykargı metallıq ótiwge perpendikulyar bagıtta p-i-n-diodtiń legirlew profili kórsetilgen. p-táreptegi akseptorlardıń tarqalıwı 10^{19} cm^{-3} betlik koncentraciyası hám 11mkm ótiw tereńliǵi menen Gauss profiline iye. Qurılma betindegi passivaciya ideal dep bolǵan hám betlik zaryadlar itibardan shette qaldırılǵan. Oraylıq n-oblast 10^{14} cm^{-3} koncentraciya menen birdey legirlengen hám onnan keyin joqarı keri awısıwda keńislik zaryadı oblastınıń keńeyiwini sheklew ushın

birdey legirlengen bufer oblastına ie. Diod omlıq kontakt sıpatında xızmet etetuǵın n+ -qatlamı menen tamamlanadı. Tasıwshılardıń statikalıq temperaturasınıń tómendegi qatnas járdeminde DD modellestiriwden esaplaw múmkin:

$$T_{n(static)} = T_L \frac{\mu_{n0}}{\mu_n^{DDM}(E)} \quad (16)$$

Bul jerde μ_{n0} - kúshsiz elektr maydanındaǵı elektronlardıń hárekecheńligi, $\mu_n^{DDM}(E)$ - dreyf-diffuziya modelindegi dástúriy maydan menen sheklengen elektronlardıń qozǵalgıshlıǵı [8]. Teń salmaqlıq halda hám 500 V keri awısıwda x kósheri boyınsha elektronlar ushın da, tesikler ushın da statikalıq hám dinamikalıq tasıwshılardıń temperaturası súwretlengen. Modellestiriwimizdiń tártibiniń dinamikalıǵın tastıyıqlaw ushın gidrodinamikalıq modeldiń sheshimi statikalıq tasıwshılardıń temperaturasınıń tarqalıwında ayqın kórinetuǵın ornatılǵan maydanlar tárepinen tasıwshılardıń nızamsız ısıwın bastıratuǵınlıǵı kórsetilgen. Bul toq nolge teń bolǵanda hám "makroskopiyalıq" tasıw orın almaytuǵın jaǵdayda, ornatılǵan maydanlar teń salmaqlıqtaǵı tasıwshılardı qızdırmawı kerek ekenligi haqqındaǵı fizikalıq faktke sáykes keledi. Tesiklerdiń temperaturası p-n-ótkeriw arqalı sezilerliktey mánislerge jetiwi múmkin ekenligi kórsetilgen. Aldıńǵı bazı izertlewlerde (mısalı, [8]) máseleniń quramalılıǵın kemeyttiriw ushın gidrodinamikalıq model elektronlar ushın, al dreyf-diffuziya modeli tesikler ushın qollanılǵan. Biz juwmaq shıǵaramız, bul jaqınlasıw (tek bir túrdegi tasıwshılar ushın gidrodinamikalıq model hám basqa túrdegi tasıwshılar ushın dreyf-diffuziya modeli) quramında p-n-ótiwler bar bolǵan qurılımalardaǵı, ásirese kúshli elektr maydanlarında, elektronlar da, tesikler de sezilerliktey qızıwǵa ushıraytuǵın jaǵdaylarda jıllı tasıwshılardıń tásin izertlew ushın na tuwrı, na jeterli dárejede tiykarlangan.

Tasıwshılar koncentraciyasınıń bólistiriliwi

500V keri jılıwda p-i-n diodı ishindegi elektronlar menen tesiklerdiń koncentraciyalarınıń tarqalıwı kórsetilgen. Salıstırıw ushin sáykes keletuǵın dreyf-diffuziya nátiyjeleri de sol súwretke túsirilgen. Ádettegi dreyf-diffuziya modellestiriw jaǵdayında biz kemeygen oblast shegarasında tereńlikti ayqın kóremiz. Standart dreyf-diffuziya teoriyasına muwapıq, bul tereńlik elektr maydanınıń tartıw kúshi menen baylanıslı. Solay etip, elektr maydanı qońsı neytral n-tárepte termikalıq túrde payda bolǵan elektronlardı "tutadı" hám olardıń n-oblastqa diffuziyasınıń payda etedi, ol jerde olar kópshilikke aylanadı. Biraq, HD modellestiriw jaǵdayında bul tereńlik kishireygen oblasttıń shetinde kórinbeydi. Onıń ornına biz neytral p-tárepiniń ishinde nátiyjeli jaylasqan minimallıq jılıw oypatlıǵın qaraymız. Bunday haldıń sebebi sırtqı kúsh maydanına ($F = -eE$) keri baǵıtta elektronlardıń termikalıq diffuziyası menen baylanıslı. Dáslep keńisliktegi

zaryad oblastınıń shetine diffuziyalangan tiykarǵı emes tasıwshılar qızadı. Sońınan, eger temperatura gradienti jetkilikli dárejede úlken bolsa, ol elektr maydanın jeńip ótiwi hám elektronlar salqın neytral p-oblastqa qayıtıp diffuziyalana aladı. Stacionar halda tasıwshılardıń tarqalıw forması hám minimumnıń jaylasıwı eki tiykarǵı kúsh arasındǵı báseki menen belgilenedi: birinshisi elektr maydanı E , al ekinshisi tasıwshılardıń temperatura gradienti ∇T_n sebepli. Jıllı elektronlardıń neytral p-tárepiniń ishinde diffuziya waqıtındaǵı waqıyalardıń rawajlanıwın ayqınlastırıw ushın kórsetilgendey, keńisliklik zaryad oblastında elektronlardıń n^{DDM} hám n^{HDM} (joqarı indeksler modellestiriw túrin bildiredi) koncentraciyaları ekvivalent bolǵan noqat bar. Usı noqatta jıllı elektronlar elektr maydanı tásirinde keńisliktegi zaryad oblastında aldına jılıw múmkinshiligine iye yamasa tasıwshılar temperatura gradienti tásirinde kvazineytral p-tárep ishinde kerı diffuziyalanıwı múmkin. Kórsetilgenindey, tasıwshılar temperatura gradienti 500 V kerı awısıwda sonshellı kúshli, ol jıllı elektronlardıń transportına tásir etedi hám olardı p-tárepke qayıtıp diffuziyalawǵa májbúrleydi. Dáslep jıllılıq tasıwshılardıń tıǵızlıǵı izotermalıq emes toq hám úzliksizlik teńlemelerine sáykes qısqa aralıqta (shama menen 0,05 mkm) tez tómenleydi. Bul waqıtta elektronlar fononlardıń salqınlatıwshı tásiriniń saldarınan pánjere temperaturasına shekem (yamasa onnan biraz joqarıraq) salqınlaydı. Sebebi bul noqatta elektr maydanı onsha kúshli emes hám elektronlardıń koncentraciyası jıllılıq teń salmaqlıǵı mánisinen úlkenirek, elektronlar diffuziya processin p táreptiń ishinde tereńde, biraq ásterek tezlik penen (yaǵnıy, uzınıraq diffuziya koefficienti menen) tamamlaydı. 500 V kerı awısıwda tolıq tamamlanǵan oraylıq oblastta tasıwshılardıń temperatura gradienti sebepli tasıwshılardıń ortasha tezligi ósedı. Hidrodinamikalıq model jaǵdayında elektronlardıń da, tesiklerdiń de tıǵızlıǵınıń dreyf-diffuziya modeliniń járdeminde alınǵan sáykes mánislerden kishi ekenligin kóremiz.

Tasıwshılar tezliginiń emissiyası hám tasıwshılardıń dinamikalıq hárekecheńligi

Kórsetilgendey, P-tárepindegi tiykarǵı tasıwshılardıń keskin kemeyiwi keńisliklik zaryad oblastınıń ishindegi tuwrıdan-tuwrı túsiw menen baylanıslı. Bul túsiw kúshli maydan oblastınıń shegarasında tasıwshılardıń tezliginiń emissiyası menen baylanıslı. Bul oblastta toqtıń tıǵızlıǵı áste ózgeretuǵın funkciya bolǵanlıqtan (soqqılı ionizaciya menen generaciya 500 V da ele ázzi), tesiklerdiń tıǵızlıǵınıń tez kemeyiwi tiykarınan usı oblasttıń sheklerinde tezleniw menen baylanıslı (Itibar berıńiz, $J_p = e_p V_p$). Bunnan basqa, qozǵalgıshlıq ańlatpasında tezlik divergenciyası agzasınıń kirgiziliwi tesikler koncentraciyasınıń túsiwin (hám demek, tezliktiń emissiya piyin) tegislewge umtılatuǵınlıǵı anıq, sebebi ol jerde toqtıń tıǵızlıǵına kemeytiwshi tásir etedi.

Tasıwshılardıń jıllılıq aǵısı hám energiya aǵısı

Aldın aytıp ótilgenindey, [3] de tasıwshılardıń jıllılıq aǵısına itibar bermew fizikalıq emes nátiyjelerge alıp keletuǵınlıǵı hám sanlıq turaqsızlıqqa alıp keletuǵınlıǵı kórsetildi. Bunnan basqa, temperatura gradientiniń roli haqqındaǵı aldınǵı talqılawǵa tiykarlanıp, tasıwshılardıń jıllılıq aǵısı tasıwshılardıń transportı mexanizminiń anıqlanıwında áhmietli rol atqarıwı múmkin dep kútiwge boladı. Ekinshi tárepten, [3] de energiya transportı hám Monte Karlo nátiyjeleri arasındaǵı sáykeslikti támiyinlew ushın jıllılıq aǵısı vektorın kirgiziw shárt emes degen juwmaqqa kelingin. Bul, kerisinshe, qarama-qarsı nátiyjelerge anıqlıq kirgiziw ushın bizler $\gamma_n \backslash \gamma_n$ turaqlı parametriniń hár qıylı mánisleri menen kóplegen modellestiriw tájiriybelerin ótkerdik. Tań qalarlısın, tiykarǵı yemes tasıwshılar tarqalıwınıń forması da, p-oblastındaǵı minimumnıń jaylasıwı da sezilerli dárejede ózgermeytuǵınlıǵın anıqladı. Bul áhmietli nátiyjeni energiya teń salmaqlıǵı teńlemesi (4) járdeminde túsindiriwge boladı. Bul teńlemede biz tasıwshılardıń jıllılıq aǵısı H_n tasıwshılardıń energiya aǵısı S_n den ádewir kishi ekenligin bilemiz. Bul faktti kórsetken sanlı nátiyjelerdiń járdeminde tekseriwge boladı. Solay etip, elektr maydanına qarsı básiyles rol atqaratuǵın temperatura gradienti aǵzaları alıp júriwshi jıllılıq aǵısınan emes, al S_n niń ekinshi aǵzasınan kelip shıǵadı. Stacionar jaǵdayda (7) teńlemeni tómendegishe jazıw múmkin:

$$\nabla(\omega_n + k_B T_n) \vec{a}_j = -e \vec{E} \vec{a}_j - (G - R) \left(\frac{k_B T_n}{n v_n} \right) - \left(\frac{\omega_n - \omega_0}{\tau_{0n} v_n} \right) \quad (17)$$

Bul jerde $a_j = J_n / J_n$ - toq baǵıtındaǵı birlik vektor. (10) nan anıq, kvazineytral p-oblastta temperatura gradienti ($k_B \nabla T_n$) sebepli júzege kelgen kúsh elektr maydanı kúshine ($-eE$) qarsı turadı, bunı biz aldınǵı bólimde atap ótken edik. Tasıwshılardıń energiyası optikalıq fonon energiyasınan asqanda, optikalıq fononlardıń emissiyası múmkin bolıp qaladı hám fonon aǵzası óziniń salqınlatıwshı tásiri esabınan básiyki procesinde nátiyjeli qatnasa baslaydı. Aqır-ayaǵında biz jıllılıq aǵısı modellestiriw nátiyjelerine sezilerliktey tásir etpeydi degen juwmaqqa kelemiz, biraq onıń bar ekenligi qarap atırılǵan problemanıń matematikalıq formulasına hám sanlıq turaqlılıǵına úlken járdem beredi. Onıń roli Monte Karlo modellestiriwdegi jalǵan soqlıǵısıw mexanizmin esletedi. Tasıwshılardıń temperatura gradienti p-i-n diodınıń hár qıylı oblastlarında tasıwshılar temperatura gradientleri hám elektr maydanı sebepli elektronlar menen tesiklerge tásir etetuǵın kúshler kórsetilgen. dreyf-diffuziya modeli jaǵdayında biz elektronlar menen tesiklerdiń elektr maydanı tásirinde oraylıq oblastta dreyf etetuǵınlıǵın hám tasıwshılar gradientleriniń járdeminde kvazineytral oblastlarǵa diffuziyalanatuǵınlıǵın bilemiz. Hidrodinamikalıq model jaǵdayında bizde tasıwshılardıń temperatura gradienti sebepli basqa kúsh bar. Bul qosımsha kúshniń

bağıtı kemeygen oraylıq oblasttağı elektr maydanı menen birdey boladı hám tasıwshılardıń tezligin arttıradı. Sebebi bul oblastta elektronlardıń koncentraciyası aralıq penen az ózgeredi, elektronlardıń tezliginiń artıwı [1] ańlatpası menen anıqlanadı:

$$v_n^{HDM} - v_n^{DDM} \approx - \left(\frac{k_B \mu_n}{e} \right) \nabla T_n \quad (18)$$

Sebebi dreyf-diffuziya modelinde de, gidrodinamikalıq modelde de oraylıq oblasttağı zaryad tasıwshılardıń toqtıń tıǵızlıǵı derlik birdey, usı tezliktiń úlkeyiwi gidrodinamikalıq model tiykarındaǵı eritpede zaryad tasıwshılardıń koncentraciyasınıń kemeyiwi menen birge keliwi kerek.

$$\frac{n^{HDM}}{n^{DDM}} \approx \left[1 + \left(\frac{k_B T_n}{eE} \right) \right]^{-1} \quad (19)$$

Bul jerde tasıwshılardıń temperatura gradienti qurılmanıń dúzilisi hám legirlewiw profiline baylanıslı belgili bir oblastlarda sezilerliktey mánislerge jetiwi múmkin bolǵanlıqtan, ol jerde tasıwshılardıń koncentraciyası qattı buzılıwı múmkin. Kvazineytral oblastlardıń qasında tasıwshılardıń temperatura gradienti tiykarǵı emes tasıwshılar ushın elektr maydanına qolaysız rol atqaradı hám olardıń tarqalıwınıń ulıwmalıq ózgerisine alıp keledi.

Elektr maydanı Puasson teńlemesi menen qadaǵalanadı. Sonliqtan, dreyf-diffuziya modeli menen gidrodinamikalıq modeldegi tasıwshılardıń tarqalıwları arasındaǵı hár qanday ayırma elektr maydanı profiliniń ózgeriwi menen baylanıslı boliwi kerek. Kórsetilgendey, tasıwshılardıń tarqalıwları arasındaǵı ayırma tek metallurgiyalıq ótiw átirapında ǵana emes, al keńisliklik zaryad oblastında da orın aladı. i oblastınıń ortasındaǵı np kóbeymesi (bul jerde $E_{\max}=120$ kV/cm, x kósheri boyınsha) dreyf-diffuziya modeli járdeminde alınǵan np kóbeymesiniń tek úshen eki bólimin ǵana quraydı. Biraq qozǵalıwshı tasıwshılardıń ulıwmalıq tıǵızlıǵınıń (n-p) sap ózgerisi barlıq waqıtta da esapqa alınatuǵın zaryadtıń tıǵızlıǵı menen salıstırǵanda itibarsız. Solay etip, elektr maydanı pútkilley ózgermey qaladı. Bul nátiyje Monte-Karlo dreyf-diffuziya modelin modellestiriw boyınsha ayırım jumislarda qabıl etilgen, ádettegi dreyf-diffuziya modeli járdeminde alınǵan elektr maydanı jıllılıq tasıwshılardıń tásirinen ayırıqsha buzılmaydı degen boljawdıń durıs ekenligin tastıyıqlaydı.

Tasıwshılardıń toqtıń tıǵızlıǵı

Uliwma alganda yarımótkizgishlerdegi tok transporti elektr maydanı sebepli dreyf arqalı da, tasıwshılardıń koncentraciyası hám temperatura gradientleri bar bolǵanlıǵı sebepli diffuziya arqalı da júz beredi. Dreyf-diffuziya modelindegi toqtıń teńlemelerin Gidrodinamikalıq modeldegi sáykes impulsti saqlaw teńlemeleri menen ápiwayı salıstırıw arqalı biz dárhál termodiffuziyalıq toqlar (tasıwshılardıń

temperaturalıq gradientleri sebepli) eki model arasındadıǵı principiallıq ayırmanı kórsetetuǵınlıǵın anıqlaymız.

Biraq biz keyingi kishi paragraflarda talqılaǵanıımızday bul termodiffuziyalıq toqlar sezilerliktey bolıwı múmkin bolǵan oblastlar tasıwshılardıń tarqalıwında olardıń tásirin toqtıń basqa komponentleri arqalı (yaǵnıy dreyf hám tasıwshılardıń diffuziyalıq komponentleri) biykarlaytuǵın tegislew deformaciyası menen táriyiplenedi. Eki modelde de úzliksizlik tenlemeleri uqsas bolǵanlıqtan sáykes tok tıǵızlıqları arasındadıǵı ayırma eki jaǵdaydıǵı generaciya rekombinaciya anlatpalarına baylanıslı. dreyf-diffuziya modeli boyınsha, joqarı keri awısıwǵa ushiraytuǵın kremniy p n ótiwindegi termogeneraciyalıq toq bólme temperaturasında diffuziyalıq toqtan ústin bolatuǵınlıǵı jaqsı belgili. Nátiyjelerimizge tiykarlanıp biz bul fakt HDM ushın da orınlı degen juwmaqqa kelemiz. 500 V keri jılıwda (x kósheri boyınsha shama menen 120 kV/cm Emax qa sáykes keledi) tiykarǵı yemes tasıwshılardıń tok tıǵızlıǵınıń ózgeriwi 8 % ke jetiwi múmkin, biraq dreyf-diffuziya modeli hám Hidrodinamikalıq model uluwma tokları arasındadıǵı pariǵ sezilerli yemes (1% ten kem). Bul kishi awisiw eki modeldegi diffuziyalıq toqlar arasındadıǵı pariǵ penen baylanıslı. Qorshagan ortalıq joqarı temperaturada bolǵanda diffuziyalıq toqlar áhmiyetli bolıp qaladı hám eki model arasındadıǵı ayırmashılıq sezilerliktey bolıwi kútileti. Tesiwdiń qasında soqqılı ionizaciya menen generaciya hám jıllılıq generaciyasınan, hám diffuziyalıq toqlardan ústin boladı. Bul jaǵdayda biz burın talqılap ótkenimizdey tasıwshılardıń temperatura gradienti tasıwshılardıń tıǵızlıǵına tásiiri arqalı oraylıq oblasttaǵı generaciya tezligine tásir etiwı múmkin.

Juwmaqlar

Keri ótiwdegi PIN-diodta elektronlar hám de tesikler qatnasındadıǵı bipolyar transport, dinamikalıq tasıwshılar temperatura gradientleri roli áhmiyet berilip modellestirildi. Modellestiriw jetilistirilgen HDE niń jana diskretlestiriw sxemasına hám dinamikalıq háreketcheńliktiń jana modeline tiykarlangan. Modellestiriw nátiyjeleri dreyf-diffuziya modeli járdeminde alınǵan nátiyjeler menen salıstırıldı. Elektr maydanınıń bólistiriliwi ortasha awısıw diapazonına shekem jıllı elektronlardıń tásirinen kúshli buzılmaydı. Shıǵıwdadıǵı J(V) xarakteristikaları ortasha jılıw dárejelerine shekem tiyisli dreyf-diffuziya modeli nátiyjelerinen derlik parqı bolmasa da, bizler tasıwshılardıń tarqalıwlarında pariǵ bar yekenligin kórsettik. Elektr maydanı shama menen 100 kV/sm bolǵanda, np kóbeymesi bazı bir oblastlarda dreyf-diffuziya modeli járdeminde alınǵan shamanıń tek úshten eki bólegin qurawı múmkin. Bunnan basqa, keńisliktegi zaryad oblastına tutasqan zonalardaǵı tiykarǵı emes tasıwshılardıń tarqalıw forması sáykes keletuǵın dreyf-diffuziya simulyaciyasınan pútkilley ózgeshe. Bul ayırmashılıqlar úyrenildi hám

olardı tiykarlaw ushın kerı awısıwdığı p-n-ótiw arqalı transport mexanizminiń jańa sıpatlaması berildi. Termik tárizde payda bolgan hám elektr maydanı tásirinde keńisliktegi zaryad oblastına qısıp shıǵarılgan tiykarǵı emes tasıwshılar qızadı. Keyin, eger tasıwshılardıń temperatura gradienti jetkilikli dárejede úlken bolsa, bul jıllı tasıwshılar salqın kvazineytral oblastqa qaytadan ılaqtırıp taslanadı. Usı diffuziyalıq mexanizm tiykarǵı dreyf-diffuziyalıq model analizi boyınsha belgili bolgan tiykarǵı yemes tasıwshılar tarqalıwınıń tolıq deformaciyasına alıp keledi. Bul deformaciya ele ádebiyatlarda súwretlenbegen edi. Bunnan basqa, tasıwshılardıń qısıp shıǵarılıwı hám ılaqtırılıwı júdá qısqa aralıqta (shama menen 100 Å ólshemde) orın alatuǵın bolǵanlıqtan, bul qubılıstan nanotolıqlardı kúsheytiw yamasa generaciyalawda paydalanıw múmkin. Negizinde, bul qubılıs kóshki aymaǵınan ádewir tóimde de baqlanıwı múmkin. Sonday-aq, biz Bolsmannıń jaqınlasıwın jıllı tasıwshılar effektlerin kirgiziw arqalı analitikalıq túrde keńeyttik. Modellestiriwdiń áhmiyetli nátiyjeleri analitikalıq túrde shıǵarılgan juwıq formula menen salıstırıldı hám aqılǵa uǵras sáykeslikke erisildi. Bólme temperaturasındığı tolıq kerı toqtı anıqlawda nátiyjeli qatnaspasa da, biz probay oblastına jetemen degenshe tasıwshılardıń temperatura gradiyentleri kerı awısıwdığı p-n-ótiw arqalı zaryad tasıwshılardıń transportında áhmiyetli rol atqaradı,

ÁDEBIYATLAR:

1. Hydrodynamic analysis of DC and AC hot carrier transport in semiconductors - V. Gruzinskis, E. Starikov et al., 1993.
2. Yarımótkizgishli ásbaplarda ıssı tasıwshılar degradaciyası - Tibor Grasser (ed.), Springer, 2015.
3. Simulation of the hydrodynamic device model on distributed memory parallel computers - N. R. Aluru, K. H. Law, R. W. Dutton, 1996.
4. A finite element formulation for the hydrodynamic semiconductor device equations - N. R. Aluru, A. Raefsky et al., 1995.
5. Diffusion of hot and cold electrons in semiconductor barriers - R. Stratton, Phys. Rev., 1962.
6. A generalized finite element method for hydrodynamic modeling of short channel devices - M. Shen, M. C. Cheng, J. J. Liou, VLSI Design, 2001.