

KVANT ÇUXURLARINDA İKİÖLÇÜLÜ ELEKTRON QAZININ TERMOELEKTRİK HƏRƏKƏT QÜVVƏSİ

M.M. BABAYEV, X.B. SULTANOVA

Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutu

Azərbaycan, AZ 1143, Bakı, H.Cavid pr. 131

mirbabababayev@yahoo.com

Modifikasiya olunmuş Pöşl-Teller potensialı yarımkeçirici kvant çuxurunda elektronların termoelektrik hərəkət qüvvəsi hesablanmışdır. GaAs/Al_xGa_{1-x}As kvant çuxurunda termoelektrik hərəkət qüvvəsinin elektronların səth sıxlığından və temperaturdan asılılıqları tədqiq edilmişdir. Göstərilmişdir ki, elektronların səth sıxlığının böyük qiymətlərində termo-ehq temperaturdan xətti asılı olur; kiçik səth sıxlıqlarında termo-ehq daha böyük qiymətlər alır, lakin temperaturun artması ilə onun artımı zəifləyir.

Açar sözlər: Kvant çuxuru, Pöşl-Teller potensialı, termoelektrik hərəkət qüvvəsi.

PACS: 73.50 Lw; 73.63 Hs

Elektron cihazların ölçüsünün kiçildilməsi problemi ilə bağlı olaraq aşağıölçülü sistemlərdə kinetik effektivliyin öyrənilməsi məsələsi aktual məsələlərdəndir. Kvant çuxurlarında (nazik təbəqələrdə) termoelektrik hərəkət qüvvəsinin (termo-ehq) ölçülməsinə əsaslanan bir sıra cihazlar yaradılmışdır. Məsələn, aşağı temperaturalarda elektron temperaturunu ölçən və iş prinsipi nazik təbəqələrdə termo-ehqnin diffuziya hissəsinin ölçülməsinə əsaslanan termocüt hazırlanmışdır [1]. Həmin cihazların iş keyfiyyətinin yüksəldilməsi üçün nazik təbəqələrdə termo-ehqnin öyrənilməsi, onun elektron və ionların səth sıxlığından, qəfəsin temperaturundan asılılıqlarının tədqiq edilməsinin böyük əhəmiyyəti vardır.

Nazik təbəqələrdə termo-ehq təcrübi və nəzəri olaraq [2-5] işlərində öyrənilmişdir. Kvant çuxurlarında məhdudlayıcı potensialın forması dəqiq bilinmədiyi üçün müxtəlif modellərdən istifadə edilir. [2-4] işlərində düzbucaqlı potensialdan, [5] işində isə parabolik potensial modelindən istifadə edilmişdir. Bizim bu işimizdə kvant çuxurunda məhdudlayıcı potensialın modeli olaraq, modifikasiya olunmuş Pöşl-Teller potensialından [6] istifadə edilir.

[7-9] işlərində modifikasiya olunmuş Pöşl-Teller potensialı yarımkeçirici kvant çuxurunda elektronların kimyəvi potensialı, elektronların relaksasiya prosesləri və yürüklüyü öyrənilmiş, o cümlədən yürüklüyün ionların səth sıxlığından asılılığı tədqiq edilmişdir. Alınmış nəzəri nəticələrin eksperimental nəticələrə uyğunluğu modifikasiya olunmuş Pöşl-Teller potensialının kvant çuxurunda məhdudlayıcı potensialı yaxşı təsvir etdiyini göstərir. Bu işdə həmin potensialı yarımkeçirici kvant çuxurunda ekranlaşma nəzərə alınmaqla termo-ehqnin diffuziya (elektron) hissəsi hesablanmışdır. Elektronların ionlardan, akustik və pzeoakustik fononlardan səpilməsi nəzərə alınmışdır.

Elektronların hərəkətinin məhdudlaşdığı istiqamət olaraq z oxunu götürək. Pöşl-Teller potensialı 2 parametrlə xarakterizə olunur [6] - λ və α . Hesablamalar göstərir ki, GaAs/Al_xGa_{1-x}As kvant çuxurlarında təbəqənin eni $\cong 100\text{Å}$ olan halda temperaturun $T \leq 100\text{K}$ və elektronların səth sıxlığının $n \leq 10^{16}\text{m}^{-2}$ qiymətlərində elektronlar ən aşağı enerjili $N=0$ səviyyəsində olur. Ona görə də, biz Pöşl-Teller potensialının parametrlərini $\lambda=1$ götürəcəyik. Bu halda ($\lambda=1, N=0$) modifikasiya

olunmuş Pöşl-Teller potensialını aşağıdakı şəkildə yazmaq olar [6]:

$$U(z) = \frac{\hbar^2 \alpha^2}{m} \tanh^2 \alpha z \quad (1)$$

Qalan iki istiqamətdə (x və y) hərəkət məhdudlaşmadığı üçün, (1) potensialına malik kvant çuxurunda elektronların dispersiya qanunu aşağıdakı şəkildədir [6]:

$$\varepsilon_n = \frac{\hbar^2}{2m} (\alpha^2 + k^2) \quad (2)$$

Burada m - keçirici elektronların effektiv kütləsi, α - Pöşl-Teller potensialının parametri, $k = (k_x, k_y)$ - elektronların 2-ölçülü dalğa vektorudur.

Temperatur qradientinin 2-ölçülü elektron qazı müstəvisində yaradıldığı hala baxırıq (Bu istiqaməti x ilə işarə edək: $\nabla T = \nabla T_x$). Aydındır ki, temperatur qradienti nəticəsində yaranan termoelektrik sahə (E_x) və elektrik cərəyanı (j_x) da x oxu istiqamətində olacaq. Təbəqə müstəvisində kvantlanma baş vermədiyinə görə, keçirici elektronlar üçün relaksasiya müddəti yaxınlaşmasından və Bolsmanın kinetik tənliyindən istifadə edə bilirik [10]:

$$\frac{\hbar k_x}{m} \cdot \frac{\partial f(k_x, k_y)}{\partial x} - \frac{e}{\hbar} E_x \cdot \frac{\partial f(k_x, k_y)}{\partial k_x} = - \frac{f_1(k_x, k_y)}{\tau(\varepsilon)} \quad (3)$$

Burada $E_x = -\frac{\partial}{\partial x} (\varphi_0 - \xi)$, φ_0 - elektrostatik potensial, ξ - elektronların kimyəvi potensialı, $\tau(\varepsilon)$ - relaksasiya müddəti, $f(k_x, k_y) = f_0(\varepsilon) + f_1(k_x, k_y)$ - temperatur qradienti nəticəsində tarazlıqdan çıxmış elektronların paylanma funksiyası,

$$f_0(\varepsilon) = \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \xi}{k_0 T} + 1\right)} \quad (4)$$

- tarazlıq halında Fermi-Dirak paylanma funksiyası (k_0 - Bolsman sabiti), $f_1(k_x, k_y)$ isə paylanma funksiyasına qeyri-tarazlıqdan yaranan əlavədir. Relaksasiya müddəti yaxınlaşmasında bu əlavə (3) tənliyindən tapılır:

$$f_1(k_x, k_y) = \frac{\hbar}{m} \frac{\partial f_0(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \tau(\varepsilon) \left(eE_x + \frac{\varepsilon - \xi}{T} \nabla_x T \right) k_x \quad (5)$$

Elektronların yalnız ən aşağı enerjili $N=0$ səviyyəsində olduğu halda 2-ölçülü kvant təbəqəsi üzrə elektronların yaratdığı elektrik cərəyanı aşağıdakı ifadə ilə təyin edilir [10]:

$$j_x = 2 \sum_{k_x, k_y} (-e) \frac{\hbar k_x}{m} f_1(k_x, k_y) \quad (6)$$

Burada 2 vuruğu spinə görə cırlaşmadan meydana çıxır. (5) bərabərliyini nəzərə alsaq, $k = (k_x, k_y)$ üzrə cəmləməni inteqrallama ilə əvəz etsək və polyar oxu k_x üzrə götürməklə polyar koordinatlara keçsək elektrik cərəyanının (6) ifadəsi aşağıdakı şəkllə düşər:

$$j_x = \frac{e^2 \hbar^2}{2 \pi m^2} \int_0^\infty k^3 dk \left(-\frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} \right) \tau(\varepsilon) \left(E_x + \frac{\varepsilon - \xi}{eT} \nabla_x T \right) \quad (7)$$

Termo-ehq $\alpha = \frac{E_x}{\nabla_x T}$ nisbəti ilə müəyyən olunur və $j_x = 0$ tənliyindən tapılır [10]. Onda (7)-dən termo-ehq üçün alırıq:

$$\alpha = -\frac{k_0}{e} \cdot \frac{J_1}{J_0} \quad (8)$$

Burada aşağıdakı işarələmələr qəbul edilmişdir:

$$J_i = \int_0^\infty x^2 dx \frac{e^{x-\eta}}{(e^{x-\eta}+1)^2} \tau(x) (x-\eta)^i; i = 0, 1 \quad (9)$$

$$x = \frac{\hbar^2 k^2}{2mk_0T}, \quad \eta = \frac{\xi}{k_0T} - \frac{\hbar^2 \alpha^2}{2mk_0T} \quad (10)$$

Pöşl-Teller potensiallı kvant çuxurunda elektronların ξ kimyəvi potensialı [7] işində hesablanmışdır:

$$\xi = \frac{\hbar^2 \alpha^2}{2m} + k_0T \ln \left[\exp \left(\frac{\pi \hbar^2 n}{mk_0T} \right) - 1 \right] \quad (11)$$

(9) ifadəsində $\tau(x) = (v_{ak} + v_{pz} + v_i)^{-1}$ – elektronların ümumi relaksasiya müddətidir. Elektronların akustik fononların deformasiya və pyezoelektrik potensiallarından və aşqar ionlardan səpilmə tezlikləri aşağıdakı kimi ifadə olunur [8]:

$$\xi = \frac{\hbar^2 \alpha^2}{2m} + k_0T \ln \left[\exp \left(\frac{\pi \hbar^2 n}{mk_0T} \right) - 1 \right] \quad (12)$$

$$v_{ak} = \frac{4E_1^2 k_0 T \alpha m}{3\pi \rho \hbar^3 v_0^2} \int_0^1 \frac{t^2 dt}{\varepsilon^2(k,t) \sqrt{1-t^2}} \quad (13)$$

$$v_{pz} = \frac{2k_0 T m e^2 \beta^2}{\pi \alpha \rho \hbar^3 v_0^2} \int_0^1 \frac{t^2 dt}{\varepsilon^2(k,t) \sqrt{1-t^2}} \int_0^\infty \frac{y^2 dy}{y^2 + \left(\frac{\pi k t}{\alpha} \right)^2} \operatorname{csch}^2 y,$$

$$v_i = \frac{4\pi Z^2 e^4 m n_i \alpha^2}{\chi^2 \hbar^3 k^2} \int_0^1 \frac{dt}{\varepsilon^2(k,t) \sqrt{1-t^2}} \left[\int_0^\infty e^{-2kzt} (1 - \tanh^2 \alpha z) dz \right]^2 \quad (14)$$

Burada

$$\varepsilon(k,t) = 1 + \frac{me^2}{\hbar^2 \chi k t} \left\{ 2 \left(\frac{kt}{\alpha} \right)^2 \Psi^{(1)} \left(-1 + \frac{kt}{\alpha} \right) - \frac{1 + \left(\frac{2kt}{\alpha} - 1 \right) \left(\frac{kt}{\alpha} \right)^2}{\left(\frac{kt}{\alpha} - 1 \right)^2} \right\} f_0 \left(\frac{\hbar^2 \alpha^2}{2m} \right) \quad (15)$$

– Pöşl-Teller potensiallı yarımkəçirici kvant çuxurunda səpici potensialların ekranlaşmasını xarakterizə edən dielektrik funksiya [8], $\Psi^{(1)}(z) = \frac{d^2}{dz^2} \ln \Gamma(z)$ – triqamma-funksiya, $\Gamma(z)$ – qamma-funksiya, $f_0 \left(\frac{\hbar^2 \alpha^2}{2m} \right)$ – ən aşağı enerjili halın ($k = 0$) elektronlar tərəfindən tutulma ehtimalıdır. ρ – kristalın sıxlığı, v_0 – səs kristalda

sürəti, χ – statik dielektrik nüfuzluğu, Ze və n_i , uyğun olaraq, ionların yükü və səth sıxlığı, E_1 – deformasiya potensialının sabiti, $\beta = 4\pi \sqrt{0.8} e_{14} / \chi$ (e_{14} – pyezopotensialın parametridir) [11].

Yuxarıda termoeq üçün alınan nəzəri nəticələri GaAs/Al_xGa_{1-x}As kvant çuxurlarına tətbiq edək. Bu kvant çuxuru üçün: $m = 0.067m_0$ (burada m_0 – sərbəst elektronun kütləsidir), $\rho = 5.3 \cdot 10^3$ kq/m³,

$v_0 = 5.14 \cdot 10^3 \text{ m/s}$, $\chi = 12.9$, $E_1 = 7.4 \text{ eV}$,
 $e_{14} = 0.16 \text{ C/m}^2$ [11].

Modifikasiya olunmuş Pöşl-Teller potensialının parametri olan α - nı qiymətləndirmək üçün potensialın (2) ifadəsində $\tanh^2 \alpha z$ funksiyasının qarşısındakı əmsalin kvant çuxurunun dərinliyinə (Δ) ekvivalent olmasından istifadə edirik:

$$\frac{\hbar^2 \alpha^2}{m} = \Delta \quad (16)$$

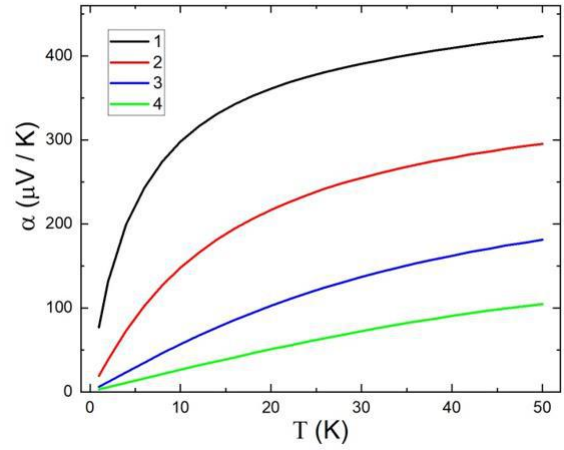
$\lambda=1$ parametrli kvant çuxurunda, çuxurun dərinliyinin $\Delta = 0.1 \text{ eV}$ qiymətində (16) tənliyindən $\alpha = 3 \cdot 10^8 \text{ m}^{-1}$ alırıq. Ədədi hesablamalarda biz α -nın bu qiymətindən istifadə edəcəyik.

Hesablamalar göstərir ki, 2-ölçülü elektron qazında yüüklükdən fərqli olaraq termoelektrik hərəkət qüvvəsinin elektron hissəsi ionların səth sıxlığından zəif asılıdır. Elektronların səth sıxlığından və qəfəsin temperaturundan termo-ehqnin asılılığı isə güclüdür. Ona görə də bu işdə elektronların səth sıxlığının sabit qiymətlərində termoeleqtrik temperaturdan və sabit temperaturda onun elektronların səth sıxlığından asılılıqlarına diqqət verilmişdir.

Qeyd edək ki, elektron və ionların konsentrasiyasının bir-birindən az fərqləndiyi 3-ölçülü aşqar yarımqeçiricilərdən fərqli olaraq, nazik təbəqələrdə elektron və ionların səth sıxlığı bir-birindən bir-iki tərtib (məsələn, [2] eksperimentində ≈ 60 dəfə) fərqlənir. Bunun səbəbi odur ki, n_i kvant təbəqəsində olan ionların sayı ilə müəyyən olunur (bu sayı kvant təbəqəsi yaradılarda idarə etmək olur), n isə kvant təbəqəsində atomların ionlaşmasından əlavə, həm də onu əhatə edən kristalda atomların ionlaşmasından əmələ gələn elektronların kvant çuxuruna dolması ilə formalaşır.

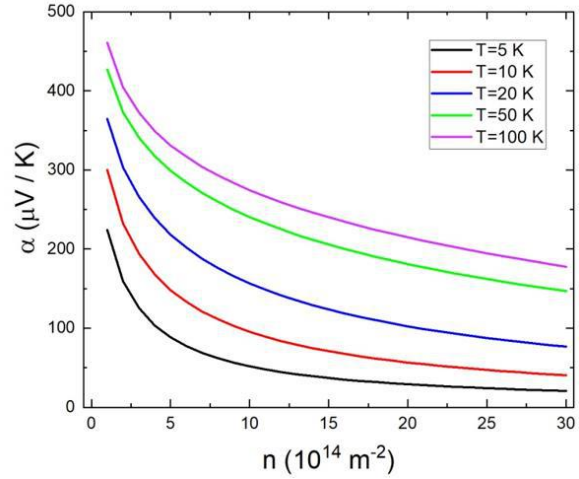
Elektronların səth sıxlığının müxtəlif qiymətlərində termo-ehqnin temperaturdan asılılıq qrafikləri şəkil 1-də göstərilmişdir. Termo-ehqnin qiyməti az da olsa, ionların səth sıxlığından da asılı olduğu üçün, ədədi hesablamaların aparıldığı hər bir hal üçün ionların istifadə edilmiş səth sıxlığı da göstərilmişdir.

Şəkil 1-dən görüldüyü kimi elektronların səth sıxlığının böyük qiymətlərində termo-ehq temperaturdan xətti asılı olur. Bu, həmin səth sıxlıqlarında elektronların cırılmış halda olması ilə bağlıdır. Kiçik səth sıxlıqlarında elektronlar cırılmamış və ya zəif cırılmış halda olur. Bu halda da bütün temperatur intervalında termo-ehq temperaturun artması ilə artır, lakin kiçik temperaturalarda $T < 10 \text{ K}$ termo-ehq temperaturun artması ilə daha güclü surətdə artır, nisbətən böyük temperaturalarda isə bu asılılıq zəifləyir.



Şəkil 1. Termo-ehqnin temperaturdan asılılıq qrafikləri:

- 1 - $n = 10^{14}, n_i = 2 \times 10^{12}$,
- 2 - $n = 5 \times 10^{14}, n_i = 10^{13}$,
- 3 - $n = 2 \times 10^{15}, n_i = 5 \times 10^{13}$,
- 4 - $n = 5 \times 10^{15}, n_i = 10^{14} \text{ cm}^{-2}$.



Şəkil 2. Sabit temperaturda termo-ehqnin elektronların səth sıxlığından asılılıq qrafikləri.

Şəkil 2-də temperaturun müxtəlif qiymətlərində termo-ehqnin elektronların səth sıxlığından asılılıq qrafikləri göstərilmişdir. Yuxarıda qeyd etdik ki, termo-ehqnin qiyməti ionların səth sıxlığından zəif də olsa asılıdır. Ona görə hesablamalarda n_i - nin qiymətləri də verilməlidir. Nəticələri şəkil 2-də verilmiş bütün hesablamalar $\frac{n}{n_i} = 40$ qiymətləri üçün aparılmışdır. Şəkildən görüldüyü kimi temperaturun istənilən sabit qiymətində elektronların səth sıxlığı artdıqca termo-ehq azalır. Bu azalma ilk növbədə səth sıxlığı artdıqca elektronların cırılma dərəcəsinin artması ilə bağlıdır.

[1] W.E. Chickering, J.P. Eisenstein, J.L. Reno. Phys. Rev. Lett., 103, 2009, 046807 (1-4).
 [2] R. Fletcher, J.C. Maan, G. Weimann. Phys. Rev. B, 32, 1985, 8477-8479.
 [3] R. Fletcher, J.J. Harris, C.T. Foxon, M.Tsaousidou, P.N. Butcher. Phys. Rev. B, 50 1994, 14991-14998.
 [4] S.K. Lyo. Phys. Rev. B, 38, 1988, 6345-6347.

[5] F.M.Hashimzade, M.M.Babayev, B.H.Mehdiyev and Kh.A.Hasanov. Journal of Physics: Conference Series, 245, 2010, 012015.
 [6] S. Cruz y Cruz, S. Kuru, J. Negro. Classical motion and coherent states for Pöschl-Teller potentials. Phys. Lett. A, 372, 2008, 1391-1405.
 [7] M.M.Babayev, Kh.B.Sultanova. Fizika, XXIII - Az, 2017, 5-8.

- [8] *M.M. Babayev, Kh.B. Sultanova, N.B. Mustafayev.* Chinese Journal of Physics, 56, 2018, 2977-2983.
- [9] *M.M. Babayev, Kh.B. Sultanova, M.Q. Abbasli.* Dependence of electron mobility on their surface density in a semiconductor quantum well with the modified Pöschl-Teller confining potential. Fizika, XXV-En, 2019, 22-24.
- [10] *Б.М. Аскеров.* Электронные явления переноса в полупроводниках. Москва, Наука, 1985, 318 стр.
- [11] *В.Ф. Гантмахер, И.Б. Левинсон.* Рассеяние носителей тока в металлах и полупроводниках. Москва, Наука, 1984, 351 стр.

M.M. Babayev, Kh.B. Sultanova

THERMOPOWER OF TWO-DIMENSIONAL ELECTRONIC GAS IN QUANTUM WELLS

The thermopower of electrons in a semiconductor quantum well with a modified Pöschl-Teller potential is calculated. The dependences of the thermopower on the surface electron density and on the temperature in the GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum well are investigated. It is shown that at large values of the surface electron density, the thermopower linearly depends on temperature, and at relatively low densities it grows weakly with increasing temperature.

М.М. Бабаев, Х.Б. Султанова

ТЕРМОЭДС ДВУМЕРНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА В КВАНТОВЫХ ЯМАХ

Рассчитана термоэдс электронов в полупроводниковой квантовой яме с модифицированным потенциалом Пешля-Теллера. Исследованы зависимости термоэдс от поверхностной плотности электронов и от температуры в квантовой яме GaAs/Al_xGa_{1-x}As. Показано, что при больших значениях поверхностной плотности электронов термоэдс линейно зависит от температуры, а при относительно малых плотностях слабо растет с повышением температуры.

Qəbul olunma tarixi: 16.07.2021