

PACS: 12.39 Pn, 73.21 Fg, 73.63

PÖŞL-TELLER POTENSİALLI KVANT ÇUXURUNDA ELEKTRONLARIN KİMYƏVİ POTENSİALI

X.B.SULTANOVA

*Azərbaycan MEA Fizika İnstitutu
AZ1143, Bakı şəhəri, H.Cavid pr., 131
xatire280@gmail.com*

Daxil olub: 17.12.2019
Çapa verilib: 28.02.2020

REFERAT

Pöşl-Teller potensialı yarımkeçirici kvant çuxurunda elektronların kimyəvi potensialı tədqiq edilmişdir. Göstərilmişdir ki, kimyəvi potensialın (η) qiyməti elektronların səth sıxlığının nisbətən kiçik qiymətlərində bu potensialın parametrinin (λ) seçilməsindən asılı olmur, səth sıxlığının böyük qiymətlərində isə η -nin qiyməti λ -dan asılıdır. λ parametrinin müxtəlif qiymətlərində kimyəvi potensialın elektronların səth sıxlığından asılılıq qrafikləri qurulmuşdur. Güclü cırlanmış elektron qazı üçün $\lambda = 1$ halında η səth sıxlığından xətti asılı olur, λ -nın birdən böyük qiymətlərində isə kimyəvi potensialın səth sıxlığından asılılığı xətti asılılıqdan zəif olur.

Açar sözlər: kvant çuxuru, Pöşl-Teller potensialı, kimyəvi potensial.

Kvant çuxurları, kvant məftilləri, kvant nöqtələri və kvant borularının nanotexnologiyada tətbiq imkanları genişləndikcə bu obyektlərdə baş verən fiziki proseslərin daha ətraflı nəzəri tədqiqinə ehtiyac da artır. Bu obyektlərin xassələrinin formalaşmasında məhdudlayıcı potensialın forması mühüm rol oynayır. [1] işində modifikasiya olunmuş Pöşl-Teller potensialı yarımkeçirici kvant çuxurunda elektronların kimyəvi potensialının çuxurun parametrlərindən və təbəqənin qalınlığından asılılığı araşdırılmışdır. Ədədi hesablamaların nəticələri düzbucaqlı potensialı çuxur üçün analogi hesablamalarla müqayisə edilmişdir. [2-4] işlərində 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 $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ kvant çuxurunda məhdudlayıcı potensialı yaxşı təsvir etdiyini göstərir.

Bu işlərdə elektronların kimyəvi potensialı hesablanarkən yalnız parametrin $\lambda = 1$ qiymətinə baxılmışdır. Təkcə [1] işində λ -nın digər qiymətlərinə də baxılmışdır, lakin burada kimyəvi potensialın elektronların konsentrasiyasından asılılığı tədqiq edilməmişdir. Biz bu işdə λ parametrinin müxtəlif qiymətlərində elektronların kimyəvi potensialının elektronların konsentrasiyasından asılılığını tədqiq edirik.

Modifikasiya olunmuş Pöşl-Teller potensialı aşağıdakı kimi ifadə edilə bilər [5]

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

burada m - keçirici elektronların effektiv kütləsi, $\lambda > 0$ və α isə potensialın parametrləridir.

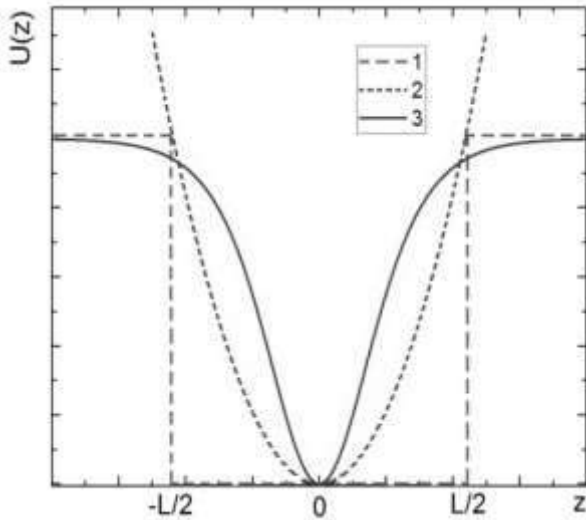
Elektronların enerjisi çuxurun dibindən hesablanır. Yarımkeçirici kvant təbəqəsində x və y istiqamətində hərəkət məhdudlaşdığı üçün (1) məhdudlayıcı potensialı nümunədə elektronların dispersiya qanununu aşağıdakı kimidir [5]

$$\varepsilon(k_x, k_y) = \varepsilon_{\lambda, N} + \frac{\hbar^2(k_x^2 + k_y^2)}{2m}, \quad (2)$$

burada k_x və k_y - elektronların dalğa vektorunun, uyğun olaraq, x və y istiqamətində proyeksiyaları, $N = 0, 1, 2, \dots$ isə enerji səviyyələrinin nömrəsidir ($N \leq \lambda$),

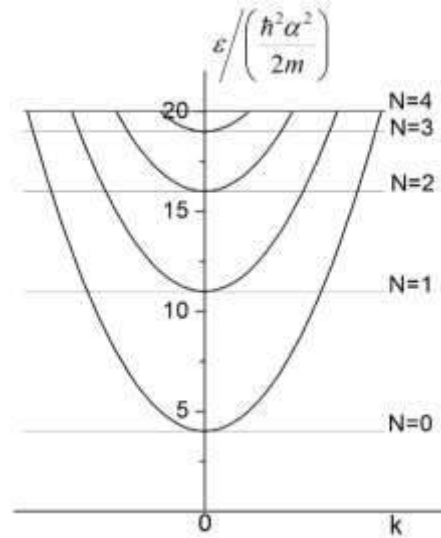
$$\varepsilon_{\lambda, N} = \frac{\hbar^2 \alpha^2}{2m} [\lambda(\lambda + 1) - (\lambda - N)^2]. \quad (3)$$

(1) potensialının forması düzbucaqlı potensialla parabolik potensial arasında aralıq formaya malikdir. Düzbucaqlı[6] potensialda elektronların enerjisinin z -dən asılılığı nəzərə alınmır; parabolik[7] potensial bu asılılığı nəzərə alır, lakin bu potensialın qiyməti qeyri-məhduddur. Pöşl-Teller potensialı isə elektronların enerjisinin z -dən asılılığını nəzərə alır və z -in böyük qiymətlərində sonlu qiymətə malikdir. Müxtəlif potensialların müqayisəsi Şəkil 1-də, Pöşl-Teller potensiallı kvant çuxurunda elektronların enerji spektri isə ($\lambda = 4$ halında) Şəkil 2-də təsvir edilmişdir.



Şəkil 1

Kvant çuxurunda məhdudlayıcı potensialın müxtəlif modelləri: 1- düzbucaqlı – sonlu model, 2- parabolik model, 3- modifikasiya olunmuş Pöşl-Teller potensialı (L -kvant çuxurunun enidir).



Şəkil 2

$\lambda = 4$ halında Pöşl-Teller potensiallı kvant çuxurunda elektronların enerji spektri.

Ümumi halda hal sıxlığı

$$g(\varepsilon) = \sum_{N, k_x, k_y, \sigma} \delta[\varepsilon_{\lambda, N}(k_x, k_y) - \varepsilon] \quad (4)$$

ifadəsi ilə təyin edilir (σ - spin kvant ədədidir). Pöşl-Teller potensialı üçün enerji spektrinin (3) ifadəsindən istifadə etməklə alırıq

$$g(\varepsilon) = \frac{L_x L_y m}{\pi \hbar^2} \sum_{N=0}^{\lfloor \lambda \rfloor} H(\varepsilon - \varepsilon_{\lambda, N}), \quad (5)$$

burada L_x və L_y - kvant təbəqəsinin x və y oxu istiqamətində ölçüləri, $H(\varepsilon - \varepsilon_{\lambda,N})$ - Hevisayd funksiyası, $[\lambda]$ isə λ parametrinin tam hissəsidir. Buradan görünür ki, hal sıxlığı enerjinin pilləli funksiyasıdır.

Elektronların kimyəvi potensialı elektronların səth sıxlığının ümumi ifadəsindən tapılır

$$n = \frac{1}{L_x L_y} \int_0^{\infty} g(\varepsilon) f_0(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (6)$$

burada $f_0(\varepsilon)$ -Fermi-Dirak paylanma funksiyasıdır

$$f_0(\varepsilon) = \left[1 + \exp\left(\frac{\varepsilon - \xi}{k_0 T}\right) \right]^{-1}, \quad (7)$$

$\xi(n)$ - elektronların kimyəvi potensialı, k_0 - Bolsman sabiti, T - temperaturdur.

(3)-dən görünür ki, Pöşl-Teller potensialının seçilmiş formasında, yəni λ -nın hər bir qiymətində enerjinin minimal qiyməti ($N = 0$)

$$\varepsilon_{min} = \varepsilon_{\lambda,0} = \lambda \frac{\hbar^2 \alpha^2}{2m}. \quad (8)$$

Enerjinin qiymətlərini ε_{min} -dan hesablasaq elektronların səth sıxlığının ifadəsini belə yazmaq olar

$$n = \frac{mk_0 T}{\pi \hbar^2} \sum_{N=0}^{[\lambda]} \ln(1 + e^{\eta - N(2\lambda - N)x_0}), \quad (9)$$

burada

$$\eta = \frac{\xi}{k_0 T} - \lambda \frac{\hbar^2 \alpha^2}{2mk_0 T}; \quad x_{\lambda,N} = \frac{\hbar^2 \alpha^2}{2mk_0 T} N(2\lambda - N) \equiv N(2\lambda - N)x_0; \quad x_0 = \frac{\hbar^2 \alpha^2}{2mk_0 T}. \quad (10)$$

Qeyd edək ki, α və deməli, x_0 da λ -nın seçilmiş ($\lambda = 1, 2, \dots$) qiymətindən asılıdır, çünki α hər dəfə

$$\frac{\hbar^2 \alpha^2}{2m} \lambda(\lambda + 1) = \Delta \quad (11)$$

şərtindən tapılır (Δ -çuxurun dərinliyidir). $\lambda = 1$ parametrlı kvant çuxurunda, çuxurun dərinliyinin $\Delta = 0.1 \text{ eV}$ qiymətində (11) tənliyindən $\alpha_1 = 3 \cdot 10^8 \text{ m}^{-1}$ alınır. $\lambda = 2$, $\lambda = 3$ və $\lambda = 4$ halları üçün, uyğun olaraq, (11)-dən alırıq: $\alpha_2^2 = \alpha_1^2/3$; $\alpha_3^2 = \alpha_1^2/6$ və $\alpha_4^2 = \alpha_1^2/10$.

Elektronların η gətirilmiş kimyəvi potensialı (9) tənliyinin həllindən tapılır. Qeyd edək ki, λ tam ədəd olduqda $N = \lambda$ qiymətinə uyğun parabola enerjinin potensial çuxurdan kənara çıxdığı oblasta düşür. Ona görə də (9) ifadəsində cəmləmə $N = 0, 1, \dots, \lambda - 1$ qiymətləri üzrə aparılmalıdır. λ -nın seçilmiş tam qiymətlərində (9)-dan η -ni tapaq. $\lambda = 1$ halında (9)-dan aşağıdakı ifadəni alırıq

$$\eta = \ln\left(e^{\frac{\pi \hbar^2 n}{mk_0 T}} - 1\right). \quad (12)$$

Güclü cırlaşmış ($\frac{\pi\hbar^2 n}{mk_n T} \gg 1$) və cırlaşmamış ($\frac{\pi\hbar^2 n}{mk_n T} \ll 1$) hallarda, uyğun olaraq,

$$\eta = \frac{\pi\hbar^2 n}{mk_n T}, \quad \eta = \ln \frac{\pi\hbar^2 n}{mk_n T}. \quad (13)$$

$\lambda = 2$ halında (9)-dan götürülmüş kimyəvi potensial üçün aşağıdakı ifadəni alırıq ($N = 0, 1$)

$$\eta = \ln \left[\frac{1}{2} \left(\sqrt{4e^{c_n+3x_2} + e^{6x_2} - 2e^{3x_2} + 1} - e^{3x_2} - 1 \right) \right], \quad (14)$$

burada

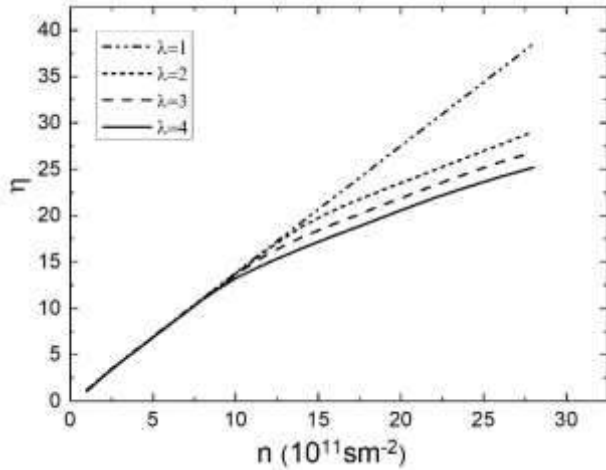
$$c_n = \pi\hbar^2 n / mk_0 T, \quad x_2 = (\hbar^2 \alpha_1^2) / (6mk_0 T).$$

Cırlaşmış halda ($e^\eta \gg 1$) (14) tənliyi bu şəkə düşür

$$\eta = c_n - \ln \left[\frac{1}{2} \sqrt{1 + 4e^{c_n - 3x_2} + 1} \right]. \quad (15)$$

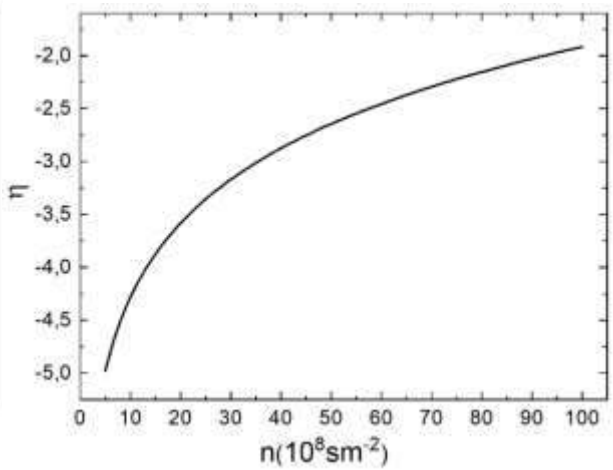
Xüsusi halda, əgər $c_n - 3x_2 \gg 1$ şərti ödənilsə (yəni, səth sıxlığının böyük qiymətlərində)

$$\eta = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi\hbar^2 n}{mk_0 T} + 3 \frac{\hbar^2 \alpha_2^2}{2mk_0 T} \right). \quad (16)$$



Şəkil 3

λ parametrlərində götürülmüş kimyəvi potensialın (η) elektronların səth sıxlığından (n) asılılıq qrafikləri.



Şəkil 4

Cırlaşmamış halda götürülmüş kimyəvi potensialın (η) elektronların səth sıxlığından (n) asılılıq qrafiki.

$\lambda = 3$ halında (9)-dan alırıq

$$\ln(1 + e^\eta) + \ln(1 + e^{\eta-5x_3}) + \ln(1 + e^{\eta-8x_3}) = \frac{\pi\hbar^2 n}{mk_n T}, \quad x_3 = (\hbar^2 \alpha_1^2) / (12mk_0 T). \quad (17)$$

$\lambda = 4$ halında isə

$$\ln(1 + e^\eta) + \ln(1 + e^{\eta-7x_4}) + \ln(1 + e^{\eta-12x_4}) + \ln(1 + e^{\eta-15x_4}) = \frac{\pi\hbar^2 n}{mk_0 T};$$

$$x_4 = (\hbar^2 \alpha_1^2)/(20mk_0 T). \quad (18)$$

Gətirilmiş kimyəvi potensialın elektronların səth sıxlığından asılılığı $\lambda = 1$ halında (12)-dən, $\lambda = 2$ halında (14)-dən analitik yolla, $\lambda = 3$ və $\lambda = 4$ hallarında isə, uyğun olaraq, (17) və (18)-dən ədədi hesablamalarla tapılmışdır. Cırlaşmış elektron qazı üçün bu asılılığın qrafikləri Şəkil 3-də, cırlaşmamış elektron qazı üçün Şəkil 4-də verilmişdir.

NƏTİCƏLƏR

1. Elektronların səth sıxlığının nisbətən kiçik qiymətlərində (elektronlar yalnız $N = 0$ səviyyəsində olduqda) gətirilmiş kimyəvi potensialın qiyməti həmcırlaşmamış, həm də cırlaşmış halda λ -nın seçilməsindən asılı olmur (Şəkil 3 və Şəkil 4).
2. Elektronların səth sıxlığının böyük qiymətlərində elektronların yuxarı $N = 1, 2, \dots$ səviyyələrə keçməsi hesabına kimyəvi potensialın qiyməti λ -nın seçilməsindən asılı olur; səth sıxlığının verilmiş qiymətində λ -nın qiyməti artdıqca η -nın qiyməti azalır (Şəkil 3).
3. Cırlaşmış elektron qazı üçün $\lambda = 1$ halında gətirilmiş kimyəvi potensial səth sıxlığından xətti asılı olur, $\lambda \neq 1$ hallarında isə qrafik xətti olmur; λ artdıqca kimyəvi potensialın səth sıxlığından asılı olaraq dəyişmə sürəti azalır.(Şəkil 3).

1. П.П.Костробий, І.А.Рижа, *Про одну модель тонкої електронної пливки. Journal of National University "Lvivska Politehnika", Phys. Math. Sci., 718* (2011) 89-95.
2. M.M.Babayev, Kh.B.Sultanova, N.B.Mustafayev, *Relaxation processes and mobility of electrons in a semiconductor quantum well with the modified Pöschl-Teller confining potential. Chinese J.Phys., 56* (2018) 2977-2983.
3. M.M.Babayev, X.B.Sultanova, N.B.Mustafayev, *Modifikasiya olunmuş Pöşl-Teller potensiallı yarımkeçirici kvant çuxurunda elektronların kimyəvi potensialı və yürüklüyü. AJP Fizika, XXII* (2016) 19-22.
4. M.M.Babayev, X.B.Sultanova, M.Q.Abbashi, *Dependence of electron mobility on their surface density in a semiconductor quantum well with the modified Poschl-Teller confining potential. AJP Fizika, XXV* (2019) 22-24.
5. S. Cruz y Cruz, S.Kuru, J.Negro, *Classical motion and coherent states for Pochl-Teller potentials. Phys. Lett. A, 372* (2008) 1391-1405.
6. T.Ando, A.B.Fowler and F.Stern, *Electronic properties of two-dimensional systems. Rev. Mod. Phys., 54* (1982) 437-672.
7. F.M.Hashimzade, Kh.A.Hasanov, M.M.Babayev, *Negative magnetoresistance of an electron gas in a quantum well with parabolic potential. Phys. Rev. B, 73* (2006) 235349 (1-8).

THE CHEMICAL POTENTIAL OF ELECTRONS IN A SEMICONDUCTOR QUANTUM WELL WITH THE MODIFIED PÖSCHL-TELLER POTENTIAL

Kh.B.SULTANOVA

The chemical potential of electrons in a semiconductor quantum well with a modified Pöschl-Teller potential has been investigated. It has been shown that the value of the chemical potential (η) for relatively small values of the surface electron density didn't depend on the parameter (λ) of this potential, and for high values of the surface electron density the value η depends on the parameter λ . Plots of the dependence of the chemical potential on the surface electron density have been obtained for different values of the parameter λ . For a strongly degenerate electron gas in the case $\lambda = 1$, η linearly depended on the surface density, and for values of $\lambda > 1$, the dependence of the chemical potential on the surface density differed from the linear dependence.

ХИМИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ КВАНТОВОЙ ЯМЕ С МОДИФИЦИРОВАННЫМ ПОТЕНЦИАЛОМ ПЕШЛЯ-ТЕЛЛЕРА

Х.Б.СУЛТАНОВА

Исследован химический потенциал электронов в полупроводниковой квантовой яме с модифицированным потенциалом Пешля-Теллера. Показано, что значение химического потенциала (η) при сравнительно малых значениях поверхностной плотности электронов не зависит от параметра (λ) этого потенциала, а при высоких значениях поверхностной плотности электронов значение η зависит от параметра λ . Получены графики зависимости химического потенциала от поверхностной плотности электронов при разных значениях параметра λ . Для сильно вырожденного электронного газа в случае $\lambda = 1$, η линейно зависит от поверхностной плотности, а при значениях $\lambda > 1$ зависимость химического потенциала от поверхностной плотности отличается от линейной зависимости.