

ANİZOTROP PARABOLİK POTENSİALLI KVANT NÖQTƏLİ İFRATQƏFƏSLƏRDƏ ALTZONALARARASI OPTİK UDULMA

H.B. İBRAHİMOV, R.Z. İBAYEVA

Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası Fizika İnstitutu AZ-1143, Bakı, H.Cavid pr., 131
e-mail: guseyn_gb@mail.ru, raidaibayeva1@gmail.com

Anizotrop parabolik potensiallı kvant nöqtəli ifratqəfəslərdə cırışmamış elektron qazı halında, elektromaqnit dalğasının polarizasiya vektorunun məhdudlaşdırıcı potensial oxu istiqamətdə yönəldikdə elektron-foton qarşılıqlı təsirinin birinci tərtib həyəcanlaşma nəzəriyyəsi çərçivəsində qonşu alt səviyyələri arasında zonadaxili udulma hesablanmışdır. Udulma əmsalının fotonun tezliyindən və maqnit sahəsindən asılılığında rezonans piklərinin yeri müəyyən edilmişdir.

Açar sözlər: Kvant nöqtəli ifratqəfəslər, parabolik potensiallı, zonadaxili optik udulma, udulma əmsalı
UO: 535.343.2

Müasir nanotexnologiya müxtəlif formalı kvant nöqtələr hazırlamağa imkan verir. Kvant nöqtələrin yarımcı ifratqəfəslərinin müxtəlif qurğularda tətbiqləri böyük maraq doğurur. Məsələn, günəş enerjisinin daha effektiv alınması üçün onların potensialı kifayət qədərdir [8]. Kvant nöqtələrdən ibarət ifratqəfəslər əsasında olan kvant kaskad lazerləri kvant çuxurlardan ibarət ifratqəfəslər əsasında olan kvant kaskad lazerlərdən daha səmərəlidir və onlar praktikada daha geniş tətbiq olunurlar [9, 10, 11]. Beləliklə, kvant nöqtəli ifratqəfəslərdə yüklərin daşınmasının tətbiqinə çox böyük maraq var [12]. Eyni zamanda kvant nöqtəli ifratqəfəslər qeyri-adi optik və optoelektron xüsusiyyətlərinə görə maraq doğurur [13, 8, 12, 14]. Bu xüsusiyyətlər yeni optik cihazların və qurğuların yaranmasında istifadə oluna bilər.

Kvant nöqtəli ifratqəfəslərdə yüklərin daşınmasının tətbiqi də diqqət çəkən sahələrdən biridir. Kvant çuxurlarda altzonalarası udulma kvant çuxurlu infraqırmızı detektorlarda [15] və kvant kaskad lazerlərdə

[9, 10, 16] istifadə olunduğundan, onun öyrənilməsi böyük maraq kəsb edir.

Bu işdə parabolik potensiallı kvant nöqtəli ifratqəfəsdə zonadaxili optik udulma tədqiq edilmişdir. Qeyd edək ki, zonadaxili optik keçidlərin tədqiqi elektronların fermi səthi və enerji spektrinin parametrləri haqqında vacib məlumatlar verir. Bu işdə parabolik potensiallı konfaynmentə baxıldığından elektron-elektron qarşılıqlı təsir nəzərə alınmır. Kvant nöqtəli ifratqəfəslərdə elektron qazı kimi anizotrop parabolik potensialla məhdudlanır:

$$V(x, y) = \frac{m^*}{2} (\omega_x^2 x^2 + \omega_y^2 y^2) \quad (1)$$

burada m^* - effektiv kütlə, ω_x və ω_y - uyğun olaraq x və y istiqamətlərində konfaynmentin tezlikləridir.

Güclü əlaqənin yaxınlaşmasında kvant nöqtəli ifratqəfəslərdəki yükdaşıyıcılar üçün Hamilton operatoru aşağıdakı kimi yazıla bilər [4, 6]:

$$H = \frac{(p_x^2 + p_y^2)}{2m^*} + \frac{m^*}{2} (\omega_x^2 x^2 + \omega_y^2 y^2) + \frac{\Delta}{2} (1 - \cos \frac{p_z d}{\hbar}) \quad (2)$$

burada Δ – minizonaların enidir.

Elektronun məxsusi funksiyası $\Psi_{n,e,k_z}(r)$ və keçirici zonadakı məxsusi qiymətləri $E_{n,l}(k_z)$ isə uyğun olaraq aşağıdakı kimi olacaqdır [7]:

$$\Psi_{n,l,k_z}(r) = \frac{1}{\sqrt{L_z}} \Psi_n(x) \Psi_l(y) \xi_{k_z}(z) \quad (3)$$

$$E_{n,l}(k_z) = (n + \frac{1}{2}) \hbar \omega_x + (l + \frac{1}{2}) \hbar \omega_y + \frac{\Delta}{2} (1 - \cos k_z d) = \varepsilon_{n,l} + \varepsilon(k_z) \quad (4)$$

burada $n(=0,1,2,\dots)$ və $l(=0,1,2,\dots)$ ilə elektronun altzonaları səviyyəsinin indeksləri göstərilib, k_z – z istiqamətində dalğa vektoru komponenti, $\Psi_n(x)$ və $\Psi_l(y)$ – sadə harmonik ossilyatorun məxsusi funksiyaları, $\xi_{k_z}(z)$ – z istiqamətində güclü əlaqənin Blox funk-

siyası və L_z – z istiqamətində normallaşdırılmış uzunluqdur.

Udulma əmsalı cırışmamış elektron qazı halında, elektron-foton qarşılıqlı təsirinin birinci tərtib həyəcanlaşma nəzəriyyəsi ilə hesablanır [1, 3]:

$$\alpha = \frac{2\pi\sqrt{\varepsilon(\Omega)}}{chN_f} \sum_{nlk_z} \sum_{n'l'k'_z} f_0(E_{nlk_z}) | \langle nlk_z | H_R | n'l'k'_z \rangle |^2 \delta(E_{nlk_z} - E_{n'l'k'_z} + \hbar\Omega) \quad (5)$$

Burada $\varepsilon(\omega)$ - dielektrik nüfuzluğunun həqiqi hissəsidir, $f_0(E_{n,l,k_z})$ - elektronların paylanma funksiyası, N_f - Ω tezlikli fotonların konsentrasiyasıdır. $\delta(E_{nlk_z} - E_{n'l'k'_z} + \hbar\Omega)$ - Dirak delta funksiyasıdır.

Elektron – foton qarşılıqlı təsir operatorunun ifadəsi aşağıdakı kimidir.

$$H_R = \frac{e}{m^*} \sqrt{\frac{2\pi\hbar N_f}{\epsilon(\Omega)\Omega}} \vec{\epsilon} \vec{p} \quad (6)$$

Burada $\vec{p} = (p_x, p_y, p_z)$ impuls operatorudur. (5) ifadəsində paylanma funksiyasının normallaşma sabiti aşağıdakı şərdən tapılır :

$$n_e V = \sum_{n,k_y,k_z} f_0(E_{nlk_z}) \quad (7)$$

$n_e V$ -elektronların sayıdır. Cırlaşmamış elektron qazı üçün elektronların paylanma funksiyası aşağıdakı ifadə ilə hesablanır [5]:

$$f_0(E_{nlk_z}) = \frac{2n_{1d} d e^{\frac{\Delta}{k_B T}} \sinh\left(\frac{\hbar\omega_x}{2k_B T}\right) \sinh\left(\frac{\hbar\omega_y}{2k_B T}\right)}{M\left(\frac{1}{2}, 1, \frac{\Delta}{k_B T}\right)} \exp\left(-\frac{E_{nlk_z}}{k_B T}\right) \quad (8)$$

burada n_{1D} – vahid uzunluqda elektronların sayı və $M(a; c; x)$ – konflyuent hiperhəndəsi funksiyadır [2].

Elektromağnit dalğasının polyarizasiya vektoru x oxu istiqamətdə yönəldikdə elektron foton qarşılıqlı təsir operatorunun matrisa elementi aşağıdakı kimi olar:

$$\langle n, l, k_z | H_R | n', l', k'_z \rangle = ie \frac{\sqrt{\hbar m^* \Omega}}{m^*} \sqrt{\frac{2\pi\hbar N_f}{\epsilon(\omega)\Omega}} \delta_{l_y, l'} \delta_{k_z, k'_z} \left(\sqrt{\frac{n}{2}} \delta_{n', n-1} - \sqrt{\frac{n+1}{2}} \delta_{n', n+1} \right) \quad (9)$$

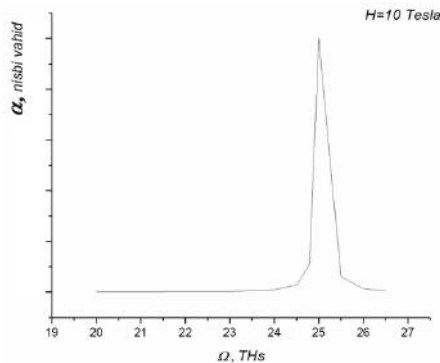
Elektromağnit dalğasının polyarizasiya vektoru y oxu istiqamətində yönəldikdə elektron-foton qarşılıqlı təsiri operatorunun matrisa elementi aşağıdakı kimi olar:

$$\langle n, l, k_z | H_k | n', l', k'_z \rangle = ie \frac{\sqrt{\hbar m^* \Omega}}{\epsilon \Omega} \delta_{nn'} \delta_{k_z, k'_z} \left(\sqrt{\frac{l}{2}} \delta_{l', l-1} + \sqrt{\frac{l+1}{2}} \delta_{l', l+1} \right) \quad (10)$$

(9) və (10) ifadələrindən görünür ki, keçid yalnız qonşu səviyyələr arasında olur ($n' = n \pm 1$ və $l' = l \pm 1$). (9) ifadəsini (5)-də nəzərə alıb, bəzi çevirmələr aparsaq, udulma əmsalı üçün analitik ifadə alarıq:

$$\alpha = C \sum_{nlk_z} \sum_{n'l'k'_z} e^{\left(\frac{n+1}{2}\right)\frac{\hbar\omega_x}{k_B T}} e^{\left(\frac{l+1}{2}\right)\frac{\hbar\omega_y}{k_B T}} e^{\frac{\Delta}{2k_B T}(1-\cos k_z d)} \delta_{ll'} \delta_{k_z, k'_z} \times \\ \times \left| \left(\sqrt{\frac{n}{2}} \delta_{nn'} - \sqrt{\frac{n+1}{2}} \delta_{nn'+1} \right) \right|^2 \delta(E_{nlk_z} - E_{n'l'k'_z} + \hbar\Omega) = C \sum_{nlk_z} e^{\left(\frac{n+1}{2}\right)\frac{\hbar\omega_x}{k_B T}} e^{\left(\frac{l+1}{2}\right)\frac{\hbar\omega_y}{k_B T}} e^{\frac{\Delta}{2k_B T}(1-\cos k_z d)} * \\ * \left\{ n\delta(\hbar\Omega - \hbar\omega_x) + \frac{n+1}{2} \delta(\hbar\Omega + \hbar\omega_x) \right\} \quad (11)$$

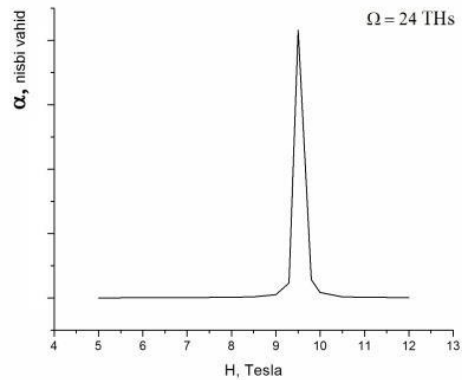
Burada C sabit kəmiyyətdir. (11) ifadəsindən görünür ki, anizotrop parabolik potensiallı kvant nöqtəli ifratqəfəslərdə cırlaşmamış elektron qazı halında, elektromağnit dalğasının polyarizasiya vektorunun məhdudlaşdırıcı potensial oxu istiqamətində yönəldikdə elektron-foton qarşılıqlı təsirin birinci tərtib həyəcanlaşma nəzəriyyəsi çərçivəsində zonadaxili udulma qonşu alt-səviyyələr arası olur.



Şəkil 1. Udulma əmsalının düşən fotonun tezliyindən asılılığı

Şəkil 1-də udulma spektrində udulma əmsalının düşən fotonun tezliyindən asılılığının rezonans xarakter daşdığı göstərilmişdir.

Şəkil 2 – də udulma spektrində udulma əmsalının maqnit sahəsindən asılılığının rezonans xarakter daşdığı göstərilmişdir.



Şəkil 2. Udulma əmsalının maqnit sahəsindən asılılığı

- [1] *H.A. Усов*. ЖЭТФ, 1988, 94, 12, с.305-319.
- [2] *B.A. George, J.W. Hans*. Mathematical Methods for Physicists. New York: Academic Press. 2001, 832p.
- [3] *G.B. Ibragimov*. J. Phys. Stat. Sol. (b). 2004, 241, p.1923-1927.
- [4] *W. Knap, C. Skierbiszewski, A. Zduniak*. Physical Review B, 1996, 53, p. 3912.
- [5] *S. C. Lee*. Journal of the Korean Physical Society. 2008, 52, 4, p.1081-1085.
- [6] *H. Noguchi, J.P.Leburton, H.Sakaki*. Physical Review B. 1993, 47, p.15593.
- [7] *S.A. Wolf, D. D. Awschalom, R.A. Buhrman*. Spintronics: A Spin-Based Electronics Vision for the Future. Science. 2001, 294, p.1488.
- [8] *Y.Harada, N.Iwata, D.Watanabe, T.Kita*. Hot-Carrier Extraction in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cells. IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Chicago, IL, USA: IEEE. 16-21 June. 2019, p. 3004-3006.
- [9] *I.A. Dmitriev, R.A.Suris*. Quantum cascade lasers based on quantum dot superlattice. Phys. Status Solidi A. 2005, 202, p.987.
- [10] *J. Faist, F.Capasso, D.L.Sivco*. Quantum cascade Laser. Science, 1994, 264, p. 553-556.
- [11] *E.E. Mendez, edited by C.Leavens and R. Taylor*. Interfaces, Quantum Wells, and Superlattices. New York: Plenum. 1988, 227 p.
- [12] *S. Hiura, K. Itabashi, K. Takeishi et al.*. Quantum spin transport to semiconductor quantum dots through superlattice. Applied Physics Letters. 2019, 114, 7, 072406-5p.
- [13] *V.A. Ermakov, J.M. Clemente da Silva Filho, L.G. Bonato et al.*. Three-Dimensional Superlattice of PbS Quantum Dots in Flakes. ACS Omega, 2018, 3, 2, p. 2027–2032.
- [14] *A. Imran, J. Jiang, D. Eric [et al.]*. Optical properties of InAs/GaAs quantum dot superlattice structures. Results in Physics, 2018. 9. p. 297-302.
- [15] *B.F. Levine*. Quantum well infrared photodetectors. Journal of Applied Physics. 1993. 74. p. R1-R81.
- [16] *H.T. Grahn, M. Hempel, B. Röben et al.*. Fast continuous tuning of terahertz quantum-cascade lasers by rear-facet illumination. Applied Physics Letters. 2016. Том 108. 19. p. 191106.

G.B. Ibragimov, R.Z. Ibaeva

INTERBAND OPTICAL ABSORPTION IN QUANTUM DOT SUPERLATTICES WITH ANISOTROPIC PARABOLIC POTENTIAL

In the case of nondegenerate electron gas in quantum point superlattice with anisotropic parabolic potential, the intra-zone absorption is found to be between adjacent sub-levels within the first-order excitation theory of electron-photon interaction when the polarization vector of the electromagnetic wave is directed in the direction of the limiting potential axis.

Г.Б. Ибрагимов, Р.З. Ибаева

МЕЖЗОННОЕ ОПТИЧЕСКОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В СВЕРХРЕШЕТКАХ ИЗ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК С АНИЗОТРОПНЫМ ПАРАБОЛИЧЕСКИМ ПОТЕНЦИАЛОМ

В случае невырожденного электронного газа в сверхрешетках из квантовых точек с анизотропным параболическим потенциалом внутризонное поглощение оказывается между соседними подуровнями в рамках теории возбуждения первого порядка электрон-фотонного взаимодействия, когда вектор поляризации электромагнитного поля волна направлена в направлении оси предельного потенциала.