

MEYLLİ MAQNİT SAHƏSİNDƏ YARIMKEÇİRİCİ İFRATQƏFƏSDƏ ELEKTROMAQNİT ŞÜALANMASININ ALTZONALARARASI UDULMASI

S.Ə. ZALOVA¹, B.H. İBRAHİMOV²

¹Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyi Fizika İnstitutu,
AZ1073, Bakı, Azərbaycan, H.Cavid pr., 131,
saida.zalova@physics.science.az

²Azərbaycan-Fransız Universiteti,
AZ1000, Nizami küçəsi, 183, Bakı, Azərbaycan,
ibrahimov.behbut@asoiu.edu.az

Xarici meyilli maqnit sahəsinin yarımkeçirici ifratqəfəsdə elektromaqnit şüalanmasının udulmasına təsirini öyrənirik. Udma əmsalının düşən maqnit sahəsinin istiqaməti ilə ifratqəfəs oxu arasındakı bucaqdan asılılığını ədədi olaraq GaAs, InAs və Insb ifratqəfəsləri üçün elektromaqnit tezliyinin funksiyası kimi müəyyən edilə bilər.

Açar sözlər: meyilli maqnit sahələri, yarımkeçirici ifratqəfəs, altzonalalararası udulma

DOI:10.70784/azip.2.2025342

Yarımkeçirici ifratqəfəs strukturları müasir nanofizikanın əsas tədqiqat obyektlərindən biridir. Onlar kvant quyularının periodik ardıcılığından təşkil olunur və nəticədə Blox tipli elektron spektri minizonalar şəklində formalaşır. Bu cür strukturlar elektromaqnit şüalanmasının udulması, qeyri-xətti optik effektlər, həmçinin terahertz diapazonunda işləyən cihazların yaradılması baxımından xüsusi əhəmiyyət kəsb edir.

Yarımkeçirici ifratqəfəslər-etekro strukturlar əsasında yaradılmış süni periodik strukturlardır. Aşağı ölçülü yarımkeçirici quruluşlar kimyəvi buxar çökdürmə, metal üzvi kimyəvi buxar çökmə və molekulyar şüa epitaksiyasından elektron litoqrafiya, öz-özünə təşkil olunma üsulundan istifadə etməklə yaradıla bilər. Bu texnologiyalar bir atom layı dəqiqliklə istənilən profilli aşağı ölçülü sistemlər yaratmağa imkan verir. Müasir texnologiya yarımkeçirici ifratqəfəs, kvant çuxurlar, kvant naqillər və kvant nöqtələr yaratmağa imkan verir.

Yarımkeçiricilərin optik spektroskopiyası digər üsullar arasında rezonans hallarının, qadağan olunmuş enerji və aşqar hallarının başa düşülməsinə təsir göstərmişdir. Təbii ki, yarımkeçiricilərin inkişafından uzun müddət əvvəl spektroskopik üsullardan atom spektrlərinin təhlilində istifadə edilmişdir. Qadağan olunmuş zonaya yaxın udma olan fotonlar optik prosədə iştirak edən hallar arasındakı enerji intervalını əks etdirdiyindən, spektrin əsas xüsusiyyətləri qadağan olunmuş enerjinin qiyməti ilə əlaqələndirilə bilər. İcazə verilən enerji halları optik keçidlər üçün zəruri olduğundan icazə verilən hal sıxlığının optik keçidlərlə necə əlaqəli olduğunu başa düşmək faydalıdır.

Həcmi və ya üçölçülü materiallarda enerji səviyyələrinin dolması Fermi-Dirak statistikası ilə müəyyən edilir və icazə verilən vəziyyətlərin sıxlığı daşıyıcının enerjisindən $\varepsilon^{1/2}$ kimi asılıdır. İkiölçü maddələrdə icazə verilən enerji hallarının sıxlığı pilləli olur. Bir ölçülü

maddələrdə enerji hallarının sıxlığı kənarlarda yüksək enerjilərə doğru $\varepsilon^{-1/2}$ ilə azalan pik yara bilər. Kvazi-sıfır ölçülü maddələrdə icazə verilən halların sıxlığı δ -funksiyalar toplusuna qədər azalır [1].

Nanotexnologiyanın inkişafı bu strukturların fiziki xassələrinə xarici təsirlərin öyrənilməsinə zəruri edir. Yarımkeçirici ifratqəslərin optik xüsusiyyətlərinin tədqiqinə çoxsaylı nəzəri tədqiqatlar həsr olunmuşdur [2–7]. Bu işdə meyilli maqnit sahəsində yarımkeçirici ifratqəfəslərdə altzonalalararası optik keçidlər tədqiq olunub. Bu məsələ yarımkeçirici ifratqəfəs strukturlarında zonalalararası keçidlərin və ya minizonaların elektromaqnit dalğaları ilə qarşılıqlı təsirini, həmçinin maqnit sahəsinin istiqamətindən və gücündən asılı olaraq udulma spektrinin dəyişməsinə öyrənir.

Meyilli maqnit sahəsinin rolu ondanır ki, əgər B sahəsi səthə perpendikulyar olduqda klassik Landau kvantlanması yaranır, paralel olduqda isə əsasən yalnız impulsların istiqaməti dəyişir.

Biz tədqiq üçün güclü əlaqə yaxınlaşmasında z istiqaməti boyunca d periodik potensial $U(z)=\Delta(1 - \cos pzd)/2$ olan N elektronlu yarımkeçirici ifratqəfəs strukturunu nəzərdən keçiririk. Məhdudlaşdırıcı izotropik parabolik potensial çuxur $V(x, y) = m^* \omega_0^2 (x^2 + y^2)/2$ kimi götürülüb. Bu halda p_z keçirici elektronun enidir. Maqnit sahəsi $B = (0, B \sin \theta, B \cos \theta)$ y oxundan ifratqəfəs oxuna paralel olan z oxuna meyilli yönəlib. Vektor potensialın Landau kalibrovkası isə belə olar: $A = (0, xB \cos \theta, -xB \sin \theta)$. Bu formalizm Landau səviyyələri ilə minizonaların qarışmasına gətirib çıxarır. Enerji spektri meyllilik bucağı artdıqca parçalanır və yeni kvant keçidləri meydana gəlir. Baxdığımız halda sistemin Hamilton funksiyası aşağıdakı kimi olar [2-4]:

$$H = \frac{p_x^2}{2m} + \frac{1}{2} m \omega_c^2 \left(x \cos \theta + \frac{p_y}{m \omega_c} \right)^2 + \frac{\Delta}{2} (1 - \cos (k_z - \frac{eB}{\hbar} x \sin \theta) d) \quad (1)$$

Burada p_x və p_y impulsun uyğun olaraq, x və y oxu istiqamətində komponentləri, $\omega_0 = \frac{eB}{m}$ –tsiklotron tezliyi, m elektronun effektiv kütləsidir.

Altzonalalararası optik udulma əmsalı aşağıdakı düsturla hesablanır [6]:

$$\alpha = \frac{2\pi\sqrt{\epsilon}}{c\hbar n_0} \left[1 - \exp\left(-\frac{\hbar\Omega}{k_B T}\right) \right] \sum_{n k_y k_z} \sum_{n' k'_y k'_z} f_0(E_n(k^z)) |\langle n k_y k_z | H_R | n' k'_y k'_z \rangle|^2 \delta(E_n(k'_z) - E_n(k'_z) + \hbar\Omega) \quad (2)$$

Burada H_R elektron fotom qarşılıqlı təsir operatoru, ϵ -dielektrik nüfuzluğunun həqiqi hissəsidir, $f_0(E_n(k^z))$ -elektronların paylanma funksiyası, N_f - Ω tezlikli fotonların konsentrasiyasıdır. $\delta(E_n(k'_z) - E_n(k'_z) + \hbar\Omega)$ -Dirak delta funksiyasıdır, $\vec{\epsilon}$ şüalanma sahəsinin polyarizasiya vektoru, c işıq dalğasının sürətidir.

Maqnit sahəsində elektron -foton qarşılıqlı təsir operatorunun ifadəsi aşağıdakı kimidir:

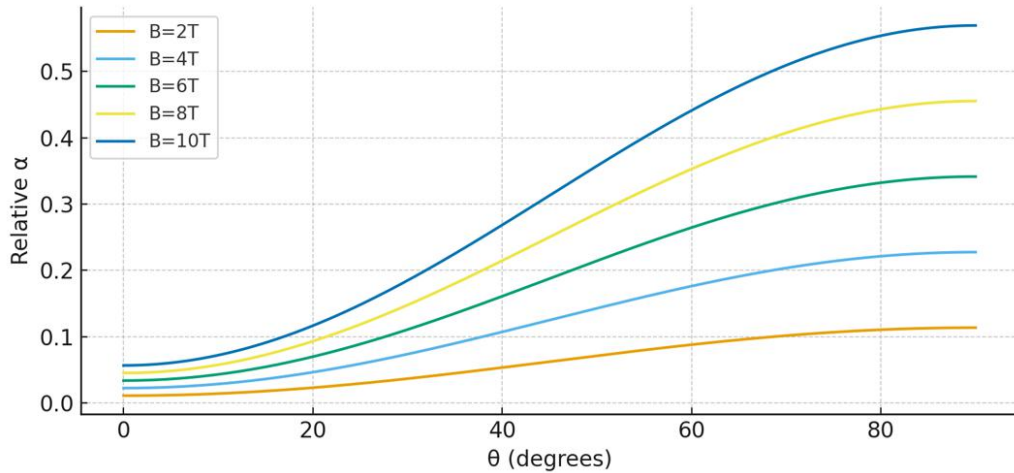
$$H_R = \frac{e}{m^*} \sqrt{\frac{2\pi\hbar n_0}{\epsilon(\omega)\omega}} \vec{\epsilon} \left(p + \frac{e}{c} A \right) \quad (3)$$

H_R operatorunun matris elementlərini hesabladıqda yüksək tezlikli sahə biricins hesab olunur.

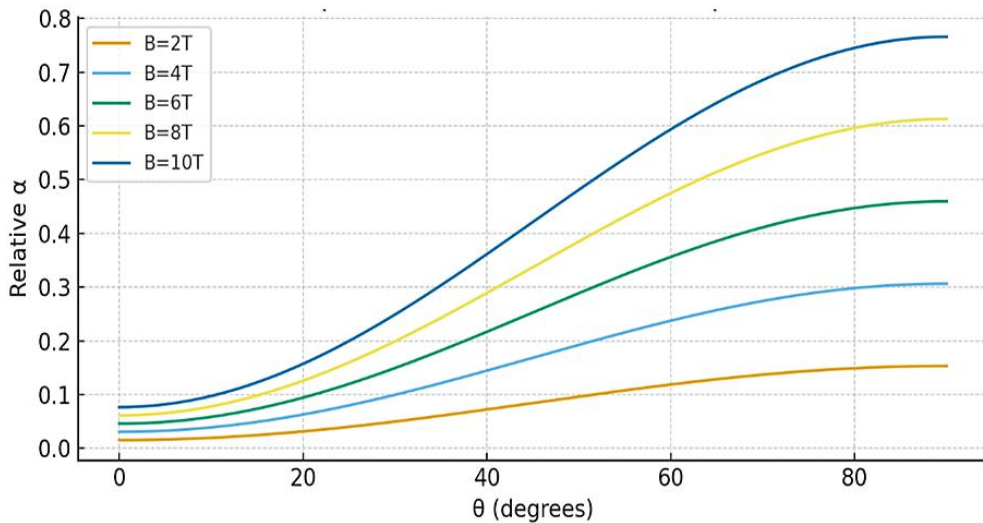
Elektronların sayını N_e olan yarımkəçirici ifratqəfəslərdə paylanma funksiyası aşağıdakı şərtdən hesablanır:

$$\sum_{n k_x k_z} f_0(E_{n k_x k_z}) = N_e \quad (4)$$

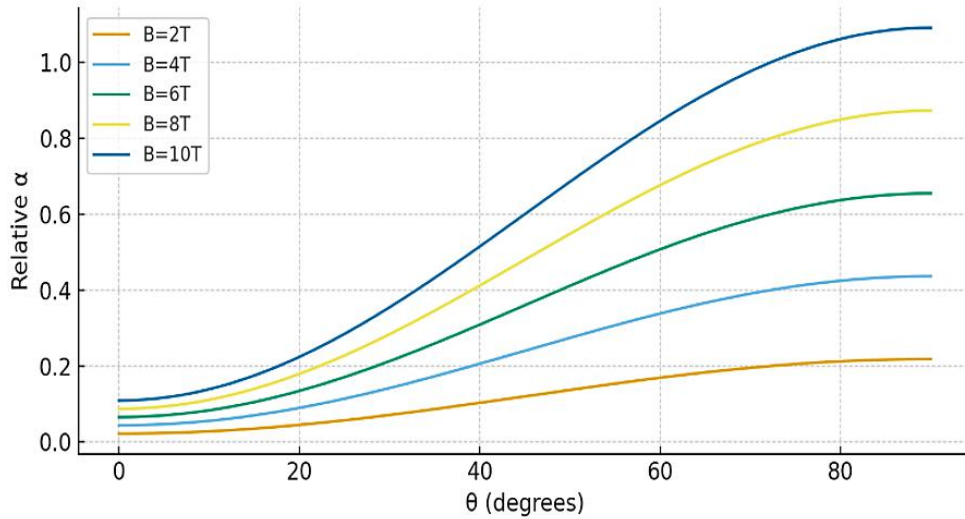
(1) ifadəsi ilə verilən Hamilton operatorunun məxsusi qiymət və məxsusi funksiyasını (2)-(4)-də nəzərə alsaq, meyli maqnit sahəsində yarımkəçirici ifratqəfəslərdə altzonalararası optik udulma əmsalı üçün analitik ifadə alarıq. Udulma maqnit sahəsinin bucağından asılı olaraq rezonans pikləri göstərir. Bu piklər optik rezonans və siklotoron rezonans şəklində müşahidə olunur. Maqnit sahəsinin meyl bucağını dəyişməklə GaAs, InAs və InSb ifratqəfəs üçün udulma əmsalının elektromaqnit tezliyinin verilmiş qiymətində bucaqdan asılılığı müəyyən edilmişdir. Şəkil 1-3-də GaAs, InAs və InSb ifratqəfəslərində udulma əmsalının maqnit sahəsindən və meyl bucağından asılılıqları verilmişdir. Bu prosesin nəzəri və eksperimental öyrənilməsi gələcəkdə yüksək tezlikli nanoelektron cihazlarının hazırlanmasına zəmin yaradır.



Şəkil 1. GaAs ifratqəfəslərində udulma əmsalının maqnit sahəsindən və meyl bucağından asılılıqları.



Şəkil 2. InAs ifratqəfəslərində udulma əmsalının maqnit sahəsindən və meyl bucağından asılılıqları



Şəkil 3. GaAs, InAs və InSb ifratqəfəslərində udulma əmsalının maqnit sahəsindən və meyl bucağından asılılıqları.

- [1] *H.B. İbrahimov*. Nanoölçülü sistemlərin fizikası. Bakı 2010, 254s.
- [2] *N.A. Goncharuk, L. Smrčka, J. Kučera, and K. Výborný*. Electronic structure of three-dimensional superlattices subject to tilted magnetic fields. *Phys. Rev. B* 71, 195318, 2005.
- [3] *Daniela Pfannkuche and Rolf R. Gerhardts*. Theory of magnetotransport in two-dimensional electron systems subjected to weak two-dimensional superlattice potentials. *Phys. Rev. B* 46, 12606, 1992.
- [4] *Sang Chil Lee and Dong Shik Kang Jeong Dae Ko, Young Hun Yu and Jai Yon Ryu Suck Whan Kim*. Magnetophonon Resonances in the Miniband Transport in Semiconductor Superlattices. *Journal- Korean Physical Society* 39(4), 2001.
- [5] *G.B. İbrahimov, R.Z. İbaeva*. Light Absorption by Free Charge Carriers with Scattering Mechanisms in a Semiconductor Superlattice *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Technique*, 2024
- [6] *G.B. İbrahimov*. Intersubband optical absorption in parabolic quantum wires under a tilted magnetic field. *Physica Status Solidi (b)* v. 241, p. 1923-1927, 2004.
- [7] *S.A.Zalova*. Optical properties of semiconductor superlattices. *AJP FIZIKA*, v. XXX №3, Section: E, 2024.

S.A. Zalova, B.G. İbrahimov

INTERSUBBAND ABSORPTION OF ELECTROMAGNETIC RADIATION IN A SEMICONDUCTOR SUPERLATTICE UNDER A TILTED MAGNETIC FIELD

We investigate the effect of an externally tilted magnetic field on the absorption of electromagnetic radiation in a semiconductor superlattice. The dependence of the absorption coefficient on the angle between the direction of the magnetic field and the superlattice axis has been numerically determined as a function of electromagnetic frequency for a GaAs-GaInAs superlattice.

Qəbul olunma tarixi: 08.10.2025