

**UOT 538.97; 539.23****ÖLÇÜYƏ GÖRƏ KVANTLANMIŞ YARIMMAQNİT  
YARIMKEÇİRİCİ TƏBƏQƏDƏ ELEKTRON QAZININ MAQNİT  
QAVRAYICILIĞI****M.M.MAHMUDOV***Bakı Dövlət Universiteti**mmm@bsu.az*

*Ölçüyə görə kvantlanmış yarımmaqnit yarımkeçirici təbəqədə elektron qazının maqnit xassələri nəzəri cəhətdən tədqiq edilmişdir. Bu məqsədlə ölçü kvantlanmasına məruz qalmış elektron qazının böyük termodinamik potensialı hesablanmışdır. Tapılmış böyük termodinamik potensial əsasında yükdaşıyıcıların maqnitlənmə əmsalı və maqnit qavrayıcılığı tapılmışdır. Maqnit qavrayıcılığının maqnit sahəsinin qiymətindən, təbəqənin qalınlığından, yükdaşıyıcıların konsentrasiyasından və maddənin zona parametrlərindən aşkar asılılıqları təyin edilmişdir.*

**Açar sözlər:** kvantlayıcı maqnit sahəsi, yarımmaqnit yarımkeçirici təbəqə, maqnitlənmə əmsalı, maqnit qavrayıcılığı, mübadilə qarşılıqlı təsiri.

Spintronikanın inkişafı ilə əvvəllər məlum olan maqnetiklərlə yanaşı yeni – maqnit, yarımkeçirici və optik xassələri idarə oluna bilən maqnit yarımkeçiricilər yaranmağa başladı. Belə maddələr içərisində öz perspektivliyi və aktuallığına görə daha böyük maraq kəsb edən yarımmaqnit yarımkeçirici maddələrdir [1,2]. Bu maddələrin - xəlitələrin nizamlı kristallik qəfəs düyünlərində xaotik paylanmış maqnit komponentli atomların olması onlarda kompozisiyon nizamsızlıq əmələ gətirir. Bunun nəticəsində isə bu maddələrdə müxtəlif növ maqnit nizamlılıqları, o cümlədən spin və klaster şüələri yaranır. Həmin xəlitələr, eyni zamanda, yarımkeçirici və ferromaqnit xassələrə malik olur, bu isə onların mikro- və nanoelektronikada tətbiqi üçün nə qədər əhəmiyyətli olduğunu göstərir [3]. Qeyd etmək lazımdır ki, bu maddələrin elektron xassələrinin öyrənilməsində əsas yeri onların termodinamik xassələrinin tədqiqi tutur. Odur ki, belə sistemlərdə elektron qazının fiziki xüsusiyyətlərini daha dərinlən öyrənmək üçün onların statistikasına baxmaq və termodinamik xassələrinin həm nəzəri, həm də təcrübi tədqiqinə ehtiyac duyulmaqdadır.

Təqdim olunmuş nəzəri iş xarici kvantlayıcı bircins maqnit sahəsində ölçüyə görə kvantlanmış yarımmaqnit yarımkeçirici təbəqədə elektron qazının maqnit qavrayıcılığının öyrənilməsinə həsr olunmuşdur. Bunun üçün əvvəlcə məlum enerji spektri əsasında böyük termodinamik potensial hesablanmışdır. Tapılmış böyük termodinamik potensialın əsasında maqnitlənmə vektoru və maqnit qavrayıcılığı təyin edilmişdir.

Nümunənin ölçüləri yükdaşıyıcıların de-Broyl dalğasının uzunluğu tərtibində olduqda kvant ölçü effektləri yaranır [4]. Bu halda cərəyan daşıyıcılarının enerji spektri qismən diskret xarakterə malik olur. Əgər belə sistem kvantlayıcı maqnit sahəsinə yerləşdirilərsə onda onun enerji spektri tamamilə diskretləşir və bu spektrdə maqnit sahəsinin qiyməti ilə mütənasib olan əlavə toplanan yaranır. Həmçinin nəzərə almaq lazımdır ki, yarımmaqnit yarımkeçirici təbəqələrdə yükdaşıyıcıların və maqnit ionlarının lokallaşmış spin momentləri arasındakı güclü mübadilə qarşılıqlı təsiri nəticəsində elektron sistemi iki alt zonaya parçalanır [5]. Yuxarıda deyilənləri nəzərə alsaq kvantlayıcı maqnit sahəsində olan ölçüyə görə kvantlanmış yarımmaqnit yarımkeçirici təbəqədə hər iki elektron alt zonası nəzərə alınmaqla yükdaşıyıcıların enerji spektrini aşağıdakı kimi yazı bilərik:

$$\varepsilon_{ki}(N_i, n) = \varepsilon_i + 2\mu B \left( N_i \pm \frac{3}{4} \right) + \varepsilon_0 n^2, \quad (1)$$

burada  $\varepsilon_i = \varepsilon_g \mp A$ ,  $\mu = e\gamma/\hbar$ ,  $\gamma = 2P^2/3\varepsilon_g$  - əvəzləmələri daxil edilmişdir, ( $i=1,2$ ),  $\varepsilon_g$  - qadağan olunmuş zonanın eni,  $A$  - yükdaşıyıcıların və maqnit ionlarının lokallaşmış spin momentləri arasındakı mübadilə qarşılıqlı təsir enerjisi [2],  $P$  - Keyn parametri,  $N_1 = 0,1,\dots$ ,  $N_2 = 1,2,\dots$  - uyğun olaraq birinci və ikinci elektron altzonalarına uyğun Landau kvant ədədləri,  $\varepsilon_0 = \gamma(\pi/d)^2$  - birinci təbəqə səviyyəsinin enerjisi,  $d$  - təbəqənin qalınlığı,  $n = 0,1,2,\dots$  - ölçü kvant ədədidir.

Ölçüyə görə kvantlanmış yarımmaqnit yarımkeçirici təbəqənin verilmiş spektri əsasında elektron qazı üçün diamagnet qavrayıcılığını

$$\chi = \frac{\mu_0 M}{B}, \quad (2)$$

münasibəti ilə hesablamaq olar [6], burada  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hn/m}$  - vakuunun maqnit nüfuzluğu,

$$M = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial \Omega}{\partial B} \right)_{T,V,\zeta}, \quad (3)$$

- maqnitlənmə momenti [7],  $\Omega$  - elektron qazının böyük termodinamik potensialı,  $\zeta$  - kimyəvi potensialı,  $V = L_x L_y d$  - təbəqənin əsas oblastının həcmidir.

Göründüyü kimi diamaqnit momentini və onun əsasında maqnit qavrayıcılığının qiymətini tapmaq üçün böyük termodinamik potensialın açıq şəklini  $\Omega = \Omega(T, V, \zeta, B)$  bilmək lazımdır. Baxılan halda böyük termodinamik potensialın ümumi şəkli aşağıdakı kimidir [7]:

$$\Omega(T, V, \zeta, B) = -k_0 T \sum_{\alpha} \ln \left[ 1 + \exp \left( \frac{\zeta - \varepsilon_{ki}(N_i, n)}{k_0 T} \right) \right], \quad (4)$$

burada  $\alpha \equiv (N_i, k_y, n)$  - elektronun halını təyin edən kvant ədədlərinin toplusudur,  $k_y$  - kvaziimpulsun uyğun olaraq  $y$  oxu istiqamətində toplananıdır.

Yuxarıda verilmiş (1) dispersiya qanununu (4)-də nəzərə alsaq kvantlayıcı maqnit sahəsində olan yarımmaqnit yarımkeçirici təbəqədə hər iki elektron altzonası nəzərə alınmaqla böyük termodinamik potensial üçün tapırıq:

$$\Omega = -\frac{5}{4} \frac{V k_0 T}{\pi R^2 d} \sum_n \left[ \sum_{N_1=0}^{\infty} F_1(\eta_1(n)) + \sum_{N_2=1}^{\infty} F_1(\eta_2(n)) \right], \quad (5)$$

burada  $F_r(\eta) = \int_0^{\infty} (-\partial f / \partial x) x^r dx$  - birparametrlı Fermi inteqralı [4],  $f(x, \eta)$  -

Fermi paylanma funksiyası,  $\eta_i = \zeta^* - \varepsilon_i^* - 2\nu(N_i \pm 3/4) - \varepsilon_0^* n^2$ ,  $\zeta^* = \zeta / k_0 T$ ,  $\varepsilon_i^* = \varepsilon_i / k_0 T$ ,  $\varepsilon_0^* = \varepsilon_0 / k_0 T$ ,  $\nu = \mu B / k_0 T$  - adsız kvantlanma parametri,  $R = (\hbar / eB)^{1/2}$  - maqnit uzunluğudur. Qeyd etmək lazımdır ki, böyük termodinamik potensial üçün tapılmış (5) münasibəti temperatur, maqnit sahəsi və təbəqə qalınlığının istənilən qiyməti üçün doğru olan ümumi ifadədir.

Tapılmış böyük termodinamik potensialın (5) ifadəsindən istifadə edərək (3) tərifindən ixtiyarı kvantlayıcı maqnit sahəsində olan ölçüyə görə kvantlanmış yarımmaqnit yarımkeçirici təbəqədəki elektron qazının diamaqnit maqnitlənməsi üçün alırıq:

$$M = \frac{5}{4} \frac{e k_0 T}{\hbar \pi d} \sum_n \left\{ \sum_{N_1=0}^{\infty} [F_1(\eta_1(n)) - 3\nu^{-2} F_0(\eta_1(n))(N_1 + 3/4)] + \sum_{N_2=1}^{\infty} [F_1(\eta_2(n)) + 3\nu^{-2} F_0(\eta_2(n))(N_2 - 3/4)] \right\}. \quad (6)$$

Maqnitlənmə əmsalının ifadəsinə daxil olan kimyəvi potensialı isə elektron qazının konsentrasiyasının

$$n_{el} = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial \Omega}{\partial \zeta} \right)_{T,V}, \quad (7)$$

ifadəsindən [7] istifadə edərək

$$n_{el} = \frac{3}{2} \frac{1}{\pi R^2 d} \sum_n \left[ \sum_{N_1=0}^{\infty} F_0(\eta_1(n)) + \sum_{N_2=1}^{\infty} F_0(\eta_2(n)) \right], \quad (8)$$

tənliyindən tapmaq olar.

Diamaqnit maqnitlənməsi üçün tapılmış (6) ümumi düsturu elektron qazının ixtiyari cırlaşma tərtibi, kvantlayıcı maqnit sahəsi də daxil olmaqla maqnit sahəsinin və təbəqə qalınlığının istənilən qiyməti üçün doğrudur. Belə ki, (6) və (8) ümumi münasibətlərindən istifadə edərək, ayrı-ayrılıqda elektron qazının cırlaşmamış və cırlaşmış limit halları üçün maqnitlənmənin, o, cümlədən diamaqnit qavrayıcılığının yükdaşıyıcıların konsentrasiyası, maqnit sahəsinin qiyməti, temperatur və zona parametrlərindən aşkar asılılıqlarını tapmaq olar.

Konkretlik üçün tam cırlaşmış elektron qazı halına baxaq. Tam cırlaşmış elektron qazı üçün Fermi inteqralının məlum asimptotikasından istifadə edərək, cırlaşmaya görə sıfırıncı yaxınlaşma ilə kifayətlənsək (6) münasibətindən ixtiyari kvantlayıcı maqnit sahəsində maqnit momenti üçün

$$M = -\mu_0 \mu^2 B g(\zeta_F), \quad (9)$$

və (2)-yə uyğun olaraq diamaqnit qavrayıcılığı üçün isə

$$\chi = \mu_0 \mu^2 g(\zeta_F), \quad (10)$$

taparıq. Burada  $g(\zeta_F)$ - Fermi sərhədində elektron qazının hal sıxlığı olub aşağıdakı kimi təyin olunur:

$$g(\zeta_F) = \frac{1}{2\pi R^2 d} \left[ \left[ \sqrt{\frac{\zeta_F - \varepsilon_1}{\varepsilon_0}} \right] + \left[ \sqrt{\frac{\zeta_F - \varepsilon_2}{\varepsilon_0}} \right] \right], \quad (11)$$

burada  $\left[ \sqrt{(\zeta_F - \varepsilon_i)/\varepsilon_0} \right]$  kəmiyyəti  $\sqrt{(\zeta_F - \varepsilon_i)/\varepsilon_0}$  ədədinin tam hissəsidir [8].

Düsturdan görüldüyü kimi, ölçüyə görə kvantlanmış təbəqədə güclü cırlaşmış elektron qazının maqnit qavrayıcılığı Fermi sərhədində təbəqənin hal

sıxlığı funksiyasının xüsusiyyətlərini təkrar edir. Maqnit sahəsinin dəyişməsi ilə, hər dəfə Landau səviyyəsi Fermi sərhədi ilə üst-üstə düşdükdə maqnit qavrayıcılığı sıçrayışa məruz qalır, yəni bu halda maqnit qavrayıcılığı xüsusiyyətə malik olur. Belə ki, hal sıxlığı funksiyasına daxil olan  $\left[ \sqrt{(\zeta_F - \varepsilon_i)/\varepsilon_0} \right]$  kəmiyyəti  $\sqrt{(\zeta_F - \varepsilon_i)/\varepsilon_0}$  ədədinin tam hissəsi, yəni dibi  $\zeta_F$  - Fermi sərhədindən aşağıda yerləşən təbəqə səviyyələrinin sayı olduğundan, hal sıxlığının enerjindən asılılığı pilləvari xarakter daşıyır. Odur ki, hər dəfə  $\zeta_F - \varepsilon_i$  enerjisi növbəti təbəqə səviyyəsinin dibi ilə üst-üstə düşdükdə hal sıxlığı və o cümlədən maqnit qavrayıcılığı sıçrayışa məruz qalır. Başqa sözlə, maqnit qavrayıcılığı təbəqənin qalınlığından asılı olaraq ossilliyasiya edəcək.

#### ƏDƏBİYYAT

1. Фурдына Я., Косут Я. Полумагнитные полупроводники. М.: Мир, 1992, 496 с.
2. Timm C. Disorder Effects in Diluted Magnetic Semiconductors. // J. Phys.: Condens. Matter. v.15, p.R1865-R1896, (2003).
3. Кульбачинский В.А., Гуринов П.В., Тарасов П.М., Давыдов А.Б., Данилов Ю.А., Вихрова О.В. Транспорт, магнитотранспорт и ферромагнетизм в разбавленных магнитных полупроводниках. // ФНТ, т.33, в.2-3, с.239-255 (2007).
4. Askerov B.M. Electron Transport Phenomena in Semiconductors. World Scientific, Singapore (1994), 394 p.
5. Furduna J. Diluted Magnetic Semiconductors // J. Appl. Phys., v.64, № 4, p.R29-R64 (1988).
6. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. М.: Наука, (1977), 552 с.
7. Askerov B.M., Figarova S.R. Thermodynamics, Gibbs Method and Statistical Physics of Electron Gases, Berlin: Springer-Verlag, (2010), 374 p.
8. Əsgərov B.M., Mahmudov M.M. Ölçüyə görə kvantlanmış yarımmaqnit yarımkeçirici təbəqədə elektron qazının termoelektrik hərəkət qüvvəsi. // Bakı Universitetinin Xəbərləri, fizika-riyaziyyat elmləri seriyası, 2011, №3, s.113-121.

#### МАГНИТНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА РАЗМЕРНО-КВАНТОВАННОЙ ПОЛУМАГНИТНО-ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПЛЕНКИ

М.М.МАХМУДОВ

#### РЕЗЮМЕ

В работе теоретически исследуются магнитные свойства электронного газа размерно-квантованной полумагнитно-полупроводниковой пленки. Для этой цели найдено общее выражение для большого термодинамического потенциала. На основе этого потенциала вычислены коэффициент намагниченности и магнитная восприимчивость электронного газа. Определена явная зависимость магнитной восприимчивости от величины магнитного поля, толщины пленки, от концентрации носителей тока и зонных параметров вещества.

**Ключевые слова:** квантующее магнитное поле, полумагнитно-полупроводниковая пленка, намагниченность, магнитная восприимчивость, обменное взаимодействие.

## MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF ELECTRON GAS IN SEMIMAGNETIC SEMICONDUCTOR QUANTUM SIZE FILM

M.M.MAHMUDOV

### SUMMARY

In this paper we theoretically investigated the magnetic properties of the electron gas in the semimagnetic semiconductor quantum size film. For this purpose, a general expression for the grand thermodynamic potential has been found. On the basis of the found potential, the coefficient of magnetization and magnetic susceptibility of the electron gas were calculated. The explicit dependence of the magnetic susceptibility of the magnetic field, the film thickness, the concentration of charge carriers and the band parameters of the material have been found.

**Keywords:** quantized magnetic field, semimagnetic semiconductor quantum size film, magnetization, magnetic susceptibility, exchange interaction.

*Redaksiyaya daxil oldu: 29.12.2014-ci il*  
*Çapa imzalandı: 13.02.2015-ci il*