

RƏŞAD QABİL OĞLU ABASZADƏ

**A³B⁵ TIPLİ YARIMKEÇİRİCİ NANOSTRUKTURLARIN
KİNETİK VƏ OPTİK XASSƏLƏRİ**

2220.01 – Yarımkəçiricilər fizikası

**Fizika üzrə fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün
təqdim olunmuş dissertasiyanın**

A V T O R E F E R A T I

Bakı – 2018

**Dissertasiya işi Azərbaycan MEA akademik H.M. Abdullayev adına
Fizika İnstitutunda yerinə yetirilmişdir**

Elmi rəhbər:

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor **H.B. İbrahimov**

Rəsmi opponentlər:

Fizika üzrə elmlər doktoru **N.A. Abdullayev**

Fizika üzrə elmlər doktoru **X.A. Həsənov**

Aparıcı təşkilat: Azərbaycan MEA Radiasiya Problemləri
İnstitutunun «Yarımkeçiricilərin radiasiya fizikası» laboratoriyası

Dissertasiyanın müdafiəsi «___» _____ 2018-ci il, saat __-də
Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutunun nəzdində
fəaliyyət göstərən D01.011 Dissertasiya Şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: Bakı, Az-1143, H.Cavid pr., 131

E-mail: director@physics.ab.az

Dissertasiya ilə Azərbaycan MEA akademik H.M. Abdullayev adına
Fizika İnstitutunun kitabxanasında tanış olmaq olar.

Avtoreferat «___» _____ 2018-ci ildə göndərilmişdir.

**D01.011 Dissertasiya Şurasının elmi katibi,
Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor**

D.H.Arash

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı: Müasir dövrdə aparılan eksperimental və nəzəri tədqiqatların əsas obyektı aşağı ölçülü elektron sistemləridir. Bu tip obyektlərə misal olaraq laylı kristalları, kvant çuxurları, süni yaradılmış ifrat qəfəsləri, nazik qalınlıqlı müstəvi təbəqələri, heteroquruluşları və müxtəlif həndəsi ölçüdə olan nanoboruları göstərmək olar.

Texnologiyanın inkişafı metallik, yarımkeçirici və hətta dielektrik xassələrə malik, ölçüləri bir neçə nanometr olan və $10^2 \div 10^9$ sayda elektron saxlayan quruluşlar yaratmağa imkan verir. Bu quruluşlarda ölçüyə görə kvantlanma hesabına fundamental maraq kəsb edən yeni unikal fiziki xassələr meydana çıxır. Məlum olduğu kimi yarımkeçiricilərdə elektron və deşiklərin De Broyl dalğasının uzunluğu kristal qəfəsin periodundan böyükdür. Kristalın bir, iki və üç ölçüləri De Broyl dalğası ilə müqayisə olunarsa, belə kristallar uyğun olaraq 2D – iki ölçülü (kvant – lay), 1D – bir ölçülü (kvant – mətil) və sıfır ölçülü (kvant – nöqtə) adlanır.

Elektronların hərəkətinin müəyyən istiqamətdə məhdudlaşdırılması onların enerji spektrlərini köklü surətdə dəyişdirir. Bu isə elektron sistemlərin xassələrinin əsaslı dəyişməsinə səbəb olur. Eyni bir maddə elektronlarının hərəkətinə məhdudiyətin qoyulub – qoyulmamasından asılı olaraq tamamilə müxtəlif xassələrə malik ola bilər. Heteroquruluşların, yarımkeçirici cihaz və kristalın fundamental parametrlərini – qadağan olunmuş zonanın enini, effektiv kütləni, yürüklüyü, sındırma əmsalını, enerji spektrini və s. idarə etməklə ümumi problemi həll etməyə imkan verir. Yarımkeçirici kristalın ölçülərini atom qəfəs sabitinin bir və ya iki tərtibinə qədər azaltsaq, onda materialın bütün əsas xarakteristikaları ölçülü kvantlanma effekti nəticəsində köklü surətdə dəyişəcək.

Aşağı ölçülü sistemlərin fiziki xassələrinə xarici maqnit sahəsinin təsiri güclüdür. Maqnit sahəsi ilə saxlayıcı potensial arasında qarşılıqlı təsir hesabına yeni fiziki xassələr meydana çıxır. Bu onunla əlaqədardır ki, maqnit sahəsi ya əlavə məhdudiyət yaradır, yaxud da nanoquruluşlarda olan məhdudiyəti gücləndirir. Maqnit sahəsində yerləşmiş aşağı ölçülü sistemin enerji spektri köklü surətdə dəyişikliyə məruz qalır. Nəticədə bütün kinetik və optik xassələr dəyişir. Bundan başqa bu xassələr yalnız maqnit sahəsinin qiymətindən asılı olmayıb, həm də maqnit sahəsinin bu sistemlərə nəzərən hansı istiqamətdə yönəlməsindən də asılıdırlar. Kvantlayıcı maqnit sahəsində aşağı ölçülü sistemlərin hal sıxlığının diskret şəkllə malik olması onların köçürmə və optik hadisələrinə təsir edir.

Aşağı ölçülü sistemlərə olan diqqətin artma səbəblərindən biri

onların müxtəlif mikro və nanoelektronika cihazlarında tətbiq olunmasıdır. A^3B^5 , Ge və Si əsaslı nanoquruluşların tətbiqi ilə yetərinə nailiyyətlər əldə edilmişdir.

Sistemin ölçüləri onlarla nanometr həddində olduqda baş verən elektron hadisələrinin kvant xarakteri yarımkeçiricilər texnikasında yeni istiqamətin - nanoelektronikanın yaranması üçün əlavə imkanlar açmışdır.

Nano sistemlərin ən maraqlı cəhəti ondan ibarətdir ki, belə obyektlərin ölçülərini və həndəsi quruluşunu dəyişməklə sistemin xassələrini idarə etmək olur. Aparılan tədqiqatlar göstərir ki, nanoquruluşların fiziki xassələri onların həndəsi quruluşuna qarşı çox həssasdır. Məsələn, karbon NB – rı (karbon nanoboruları) həndəsi quruluşundan asılı olaraq dielektrik, yarımkeçirici və ya metal ola bilər.

Dissertasiya işinin məqsədi: A^3B^5 əsaslı müxtəlif formalı yarımkeçirici nanoquruluşların optik xassələrini nəzəri tədqiq etmək, maqnit sahəsinin və məhdudlaşdırıcı potensialın bu xassələrə təsiri və səpilmə mexanizmlərini müəyyən etməkdən ibarətdir.

Bu məqsədi həyata keçirmək üçün aşağıdakı məsələlər qoyulmuşdur:

- Silindirik kvant məftildə sərbəst yükdaşıyıcılarla işığın udulma nəzəriyyəsini qurmaq;
- Maqnit sahəsində yerləşmiş silindirik kvant məftildə astana dislokasiyaları vasitəsi ilə sərbəst yükdaşıyıcılarla optik udulmanı tədqiq etmək;
- Parabolik kvant çuxurunda elektromaqnit şüalanmasının udulmasını tədqiq etmək;
- Maqnit sahəsində yerləşmiş parabolik kvant çuxurunda elektromaqnit şüalanmasının udulmasını tədqiq etmək;
- Yarımkeçirici kvant diskdə fononlar vasitəsilə elektronların relaksasiyasını tədqiq etmək;
- Kvant həlqəsində elektromaqnit şüalanması ilə zonalar arası udulmanı tədqiq etmək.

Elmi yeniliklər:

- Silindirik kvant məftildə sərbəst yükdaşıyıcılarla işığın udulma nəzəriyyəsi qurulmuşdur.
- Maqnit sahəsində yerləşmiş kvant məftildə astana dislokasiyaları vasitəsi ilə sərbəst yükdaşıyıcılarla işığın udulma nəzəriyyəsi qurulmuşdur.

- Yarımkəçirici kvant diskdə yükdaşıyıcılar fononlardan səpildikdə onların relaksasiya müddəti müəyyən edilmişdir.
- Maqnit sahəsində kvant həlqədə işığın zonalar arası optik udulması hesablanmışdır.
- Maqnit sahəsində və maqnit sahəsi olmadıqda parabolik potensiallı kvant çuxurlarında zonadaxili udulma üçün hesablanmışdır.
- Maqnit sahəsində parabolik potensiallı kvant çuxurlarında sərbəst yükdaşıyıcılarla işığın udulma nəzəriyyəsi qurulmuşdur.

İşin elmi və praktiki əhəmiyyəti: Dissertasiya işinin nəticələrindən aşağı ölçülü sistemlərdə optik hadisələrin eksperimental öyrənilməsində, onların izahı və infraqırmızı detektorda mümkün tətbiqi üçün istifadə oluna bilər.

Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar:

- Silindirik kvant məftildə sərbəst yükdaşıyıcıların uzununa optik fononlardan səpilməsi ilə işığın udulma nəzəriyyəsi verilmişdir. Udulma əmsalının məftilin radiusundan asılılığı müəyyən edilmişdir.
- Maqnit sahəsində yerləşmiş parabolik potensiallı silindirik kvant məftildə astana dislokasiyaları vasitəsi ilə sərbəst yükdaşıyıcılarla işığın udulmasının fotonun tezliyinin və məftilin radiusunun artması ilə azaldığı müəyyən olunmuşdur.
- Kvant diskdə kvant limit halında elektronlar fononlardan səpildikdə kvant diskin qalınlığının artması ilə səpilmənin şüreti azalır və relaksasiya müddəti artması müəyyənləşdirilmişdir.
- Bircins maqnit sahəsində yerləşmiş Volkano konfaynmentli potensiala malik kvant həlqədə işığın udulması üçün optik keçidlər müəyyən edilmişdir. Fundamental udulmanın maqnit sahəsindən və kvant həlqənin radiusundan asılılığı tapılmışdır.
- Uzununa maqnit sahəsində parabolik potensiallı kvant çuxurda sərbəst yükdaşıyıcılarla işığın udulması, ikinci tərtib həyacanlaşma nəzəriyyəsinin köməyi ilə qurulmuşdur.

İşin aprobeşiyası: Dissertasiya işinin əsas nəticələri aşağıdakı Beynəlxalq, Respublika konfranslarında «AMEA – nın aspirantlarının Elmi Konfransı» (Bakı, 2010), «Fizikanın müasir problemləri» (Bakı, 2009, 2010), «Зимняя школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния» (С.Петербург, Россия, 2011, 2012, 2013, 2014, 2016), «Наука і

İnnovasiya» (Przemysl, Polski, 2011, 2013), «VIII национальная конференция, рентгеновское, синхротронное излучения, нейтроны и электроны для исследования наносистем и материалов» (Москва, Россия, 2011), «Научно-методические проблемы современной физики» (Брест, Беларусь, 2011), «Young scientists conference on semiconductor physics» (Kiev, Ukraine, 2012), «Труды XVI-ой конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ» (Москва, Россия, 2012), «XIX Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников» (Екатеринбург, Россия 2012), «Applied Sciences and technologies in the United States and Europe: common challenges and scientific findings» (New York, USA, 2014) məruzə və müzakirə edilmişdir.

Dissertasiya işi həmçinin Azərbaycan MEA akademik H.M. Abdullayev adına Fizika İnstitutunun elmi seminarların da sınaqdan keçmişdir.

Nəşrlər: Dissertasiya materiallarına aid 18 iş dərc olunmuşdur.

Dissertasiya işinin strukturu və həcmi. Dissertasiya işi giriş, dörd fəsil, əsas nəticələr və ədəbiyyat siyahısından ibarətdir. İş 152 adda bibliografiya daxil olmaqla 127 səhifədən ibarətdir.

İşin qısa məzmunu.

Girişdə dissertasiyanın araşdırma obyektini seçilmiş, mövzunun aktuallığı əsaslandırılmış, araşdırmaların məqsədi və həll ediləcək əsas məsələlər ifadə olunmuş, dissertasiyanın praktiki əhəmiyyəti göstərilmiş, dissertasiyanın elmi yeniliklərini təyin edən əsas nəticələr göstərilmiş və dissertasiya işinin qısa məzmunu şərh edilmişdir.

Birinci fəsilə maqnit sahəsində və maqnit sahəsi olmadıqda nanoquruluşlarda yükdaşıyıcıların dalğa funksiyası, enerji spektri və paylanma funksiyası haqqında məlumat verilmişdir Bu fəsilə həmçinin ölçüyə görə kvantlanma və onların müşahidə olunma şərtləri verilmişdir.

İkinci fəsilə məhdudlaşdırıcı potensialı parabolik olan kvant çuxurlarda altzonalar arası optik udulma hesablanmışdır. Belə potensial kvant çuxurlarda elektronun məxsusi funksiya və qiyməti aşağıdakı kimi götürülmüşdür:

$$\Psi_{\alpha}(r) \equiv \Psi_{n, k_x, k_y}(r) = \frac{1}{\sqrt{L_x L_y}} e^{ik_x x} e^{ik_y y} \Phi_n(z), \quad (1)$$

$$E_n(k_x, k_y) = \frac{\hbar^2(k_x^2 + k_y^2)}{2m^*} + (n + 1/2)\hbar\omega_0, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (2)$$

Burada ω_0 - potensialın xarakteristik tezliyidir, m^* - elektronun effektiv kütləsi, k_x və k_y uyğun olaraq x və y oxu istiqamətində elektronun dalğa vektorunun komponentləri, r - elektronun radius vektoru, $\phi_n(z)$ - harmonik ossilyatorun məxsusi funksiyaları L_x və L_y uyğun olaraq x və y istiqamətində kvant cuxurun ölçüləridir.

Udulma əmsalı α birinci tərtib həyəcanlaşma nəzəriyyəsinə əsasən hesablanmışdır:

$$\alpha = \frac{2\pi\sqrt{\epsilon}}{ch n_0} \left[1 - \exp\left(-\frac{\hbar\Omega}{K_B T}\right) \right] \sum_{n k_x k_y} \sum_{n' k'_x k'_y} f_0(E_{n k_x k_y}) \left| \langle n, k_x, k_y | H_R | n', k'_x, k'_y \rangle \right|^2 \times \delta(E_{n k_x k_y} - E_{n' k'_x k'_y} + \hbar\Omega) \quad (3)$$

Burada $f_0(E_{n, k_x, k_y})$ - elektronun paylanma funksiyası, Ω - fotonun tezliyidir.

Biz cırlaşmamış elektron qazı halına baxmışıq. Polyarizasiya vektorunu Oz oxu istiqamətində götürsək, H_R elektron – foton qarşılıqlı təsir operatorunun matris elementlərinin kvadratını aşağıdakı kimi ifadə olunar:

$$\left| \langle n, k_x, k_y | H_R | n', k'_x, k'_y \rangle \right|^2 = \frac{\pi m_0 m^* \omega_0}{\epsilon \Omega V} [n(n+1)\delta_{n+1, n} + n\delta_{n-1, n}] \delta_{k_x, k'_x} \delta_{k_y, k'_y}$$

Burada n_0 - Ω tezliyinə malik fotonların sayı, \vec{p} - impulsdur, ϵ - dielektrik nüfuzluğun həqiqi hissəsi, δ - Dirakin delta funksiyasıdır.

Optik keçidlər qonşu alt səviyyələr arası olur və $\Omega = \omega_0$ olduqda udulmada rezonans olur.

Bu fəsildə həmçinin uzununa maqnit sahəsində yerləşən parabolik potensiallı kvant çuxurunda zonadaxili optik udulma tədqiq edilmişdir. İkiölçülü kvant çuxur quruluşda elektronların hərəkəti x oxu istiqamətində

$U = \frac{m^* \omega_0^2 x^2}{2}$ parabolik potensial ilə məhdudlaşmışdır. \vec{H} maqnit sahəsi

(yz) müstəvisində yerləşən elektron qazı təbəqəsinə paralel, z oxu istiqamətində yönəlib. Maqnit sahəsi kvant çuxur müstəvisinə perpendikulyar olduqda elektron və deşiklərin enerji spektri tam diskret olur. Baxılan halda elektronun məxsusi qiyməti və məxsusi funksiyası məlum aşağıdakı ifadə kimi götürülmüşdür:

$$E_{n,k_x,k_z} = \left(n + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega + \frac{\hbar^2 k_z^2}{2m^*} + \frac{\omega_0^2 \hbar^2 k_y^2}{2m^* \omega^2}, \quad (4)$$

$$\varphi_{n,k_y,k_z}(r) = \varphi_n(x - x_0) e^{i(k_y y + k_z z)}, \quad (5)$$

Burada $\omega = \sqrt{\omega_0^2 + \omega_c^2}$ hibrid tezlik adlanır, $\omega_c = \frac{eH}{m^* c}$ - elektronların tsiklotron tezliyi, e - yükünün modulu, c - işıq sürəti n - Landau səviyyələrinin sayı, $\varphi_n(x - x_0)$ - mərkəzi x_0 olub, xətti harmonik

ossilyatorun dalğa funksiyası, $x_0 = \frac{\omega_0}{\omega} R^2 k_y$, $R = \sqrt{\frac{\hbar}{m^* \omega}}$.

Udulma əmsalı cırlaşmamış elektron qazı halında, elektron - foton qarşılıqlı təsirinin birinci tərtib həyacanlaşma nəzəriyyəsi ilə (4) ifadəsi ilə hesablanmışdır. Elektromaqnit dalğasının polyarizasiya vektoru x oxu istiqamətində yönəldikdə, udulma əmsalı üçün aşağıdakı ifadəni alarıq:

$$\alpha = \frac{2\pi K_B T \omega^2 n_e e^2}{c \sqrt{\epsilon(\omega) \omega_0}} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-(2n+1) \frac{\hbar \omega}{2K_B T}} \left[n \frac{(\pi \tau)^{-1}}{\tau^{-2} + (\Omega + \omega)^2} - (n+1) \frac{(\pi \tau)^{-1}}{\tau^{-2} + (\Omega - \omega)^2} \right] \quad (6)$$

Hamar udulma spektirin alınması üçün, biz δ funksiyasını Lorens funksiyası ilə əvəz etmişik və burada τ fenomenoloji relaksasiya müddətidir. (6) ifadəsindən görünür ki, uzununa maqnit sahəsində yerləşən parabolik potensiallı kvant çuxuruna düşən fotonun tezliyi $\Omega = \omega$ olduqda rezonans olur.

Fəslin sonunda uzununa maqnit sahəsində yerləşən parabolik potensiallı kvant çuxurunda sərbəst yükdaşıyıcılar ilə işığın udulması tədqiqi verilmişdir. Elektromaqnit şüaları maqnit sahəsinə perpendikulyar olub z oxu boyunca yönəlib. Bu halda elektromaqnit şüalarının sərbəst yükdaşıyıcılar ilə işığın birbaşa udulması enerji və impulsun saxlanması qanuna ziddir. Ancaq fononlar, aşqarlar və digər defektlər vasitəsi ilə işığın udulması baş verir və üçüncü cismin iştirakı impulsun dəyişməsinə səbəb olur. Bu işə sərbəst yükdaşıyıcılarla udulma vasitəsi ilə səpilmə mexanizmlərini müəyyən etməyə imkan verir. Sərbəst yükdaşıyıcılarla işığın udulması, ikinci tərtib həyacanlaşma nəzəriyyəsinin köməyi ilə səpilmə mexanizmlərini nəzərə almaqla öyrənilmişdir.

Kvant – mexaniki keçid ehtimalı, fononların udulması və ya buraxılmasıyla bağlı olub, yükdaşıyıcıların fotonlardan səpilməsi ilə işığın udulması aşağıdakı ifadə ilə hesablanmışdır:

$$\alpha = \frac{\epsilon^{1/2}}{n_0 c} \sum_i W_i f_i, \quad (7)$$

Burada ϵ - materialın dielektrik nüfuzluğudur, n_0 - şüalanma sahəsində fotonların sayıdır. Cəmləmə bütün mümkün başlanğıc 'i' halları ilə baş verir. W_i keçid ehtimalı olub, ikinci tərtib həyacanlaşma nəzəriyyəsi ilə tapılır:

$$W_i = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_{jq} \left[\langle f | M_+ | i \rangle^2 \delta(E_f - E_i - \hbar\Omega - \hbar\omega_q) + \langle f | M_- | i \rangle^2 \delta(E_f - E_i - \hbar\Omega + \hbar\omega_q) \right], \quad (8)$$

Burada E_i və E_f uyğun olaraq elektronların başlanğıc və son enerjiləridir, $\hbar\Omega$ - fotonun enerjisidir, $\hbar\omega_q$ - fononun enerjisidir, $\langle f | M_{\pm} | i \rangle$

elektronların və fononların qarşılıqlı təsiri üçün bir haldan digər hala keçmələri ilə bağlı matris elementidir. Göstərilmişdir ki, rezonans udulma tsiklotron tezliyində deyil, hibrid tezliyində baş verir. Uzununa maqnit sahəsində parabolik potensiallı kvant çuxurlarında (7) və (8) ifadələri əsasında akustik və optik fononlardan səpilmə nəzərə alınmaqla sərbəst yükdaşıyıcılarla işıq udulması üçün analitik ifadə alınmışdır. Müəyyən olunmuşdur ki, həcmi kristallara və sonsuz dərin düzbucaqlı potensiallı kvant çuxurlara nisbətən udulma əmsalının qiyməti tezliyin artması ilə tez azalır.

Üçüncü fəsildə silindirik kvant məftilində kvazibirölçülü elektron qazı üçün yükdaşıyıcıların optik fononlardan səpilməsi ilə işığın sərbəst yükdaşıyıcılarla udulmasına baxmışıq. Bu zaman şüalanma sahəsi məftil boyunca polyarlaşır. Elektronlar silindirik kvant məftildə R radiusu boyunca məhdudlaşılır və L uzunluğu ilə məftil boyunca sərbəst hərəkət edirlər. Kvant məftildə elektronun dalğa funksiyasının effektiv kütlə yaxınlaşması ilə belə ifadə olunur:

$$\Psi_{nlk}(r) = \frac{\exp(iKz)\exp(il\vartheta)}{(\pi R^2 L)^{1/2}} \varphi_{nl}(\rho), \quad (9)$$

Burada

$$l=0,1,2,3,\dots, n=1,2,3,\dots, \quad \varphi_{nl}(\rho) = \frac{J_l(k_{nl}\rho)}{J_{l+1}(k_{nl}R)}, \quad (10)$$

Burada $r = (\rho, \vartheta, z)$, ϑ məftil ətrafında azimutal bucaq, K - silindirik məftildə elektronun dalğa vektoru olub z oxu istiqamətində yönəlib, $J_l(x)$ birinci növ Bessel funksiyasıdır. Məxsusi qiymət (10) ifadəsinə uyğun olaraq,

$$E_{nlk} = E_k + \frac{\hbar^2 k_{nl}^2}{2m^*}, \quad (11)$$

Burada E_k – elektronun kinetik enerjisinin z oxu üzrə komponentidir. (11) ifadəsinə əsasən dalğa funksiyasından istifadə edərək elektron – foton qarşılıqlı təsiri üçün matris elementini aşağıdakı kimi yazmaq olar:

$$\langle n'l'K'|H_R|nlK\rangle = -\frac{e\hbar}{m^*} \left(\frac{2\pi\hbar n_0}{V\Omega \epsilon} \right)^{1/2} (\epsilon K) \delta_{KK'} \delta_{ll'} G_{nl,n'l'}(R) \quad (12)$$

Burada V- kristalın həcmi, ϵ - süalanma sahəsinin polarizasiya vektorudur. Şüalanma sahəsi məftil boyunca polyarlaşır. Bu ifadədən $G_{nl,n'l'}(R)$ matris elementini müəyyən etmək çətinidir. Bu baxımdan, radial dalğa funksiyasının əsas halda olan ifadəsindən istifadə edərək

$G(R) = |G_{nl,n'l'}|^2 = \frac{9R^2}{12}$ kimi götürülmüşdür. Elektron - fonon qarşılıqlı təsirinin matris elementi səpilmə mexanizmindən asılıdır:

$$\langle f|V_s|\alpha\rangle = C_{nl}(q_z) I_{n'l',n'l''}(q_{nl}) \delta_{K',K''+q_z}, \quad (13)$$

Burada

$$I_{n'l',n'l''}(k_{nl}R) = 2 \int_0^1 \xi d\xi \frac{1}{J_{l'+1}(k_{n'l'}R) J_{l'+1}(k_{n'l''}R)} J_n(k_{nl}R\xi) J_{|n'-n|}(k_{n'l}R\xi) J_{n'}(k_{n'l''}R\xi)$$

Silindirik nanoməftildə elektronların və optik fononların qarşılıqlı təsiri dielektrik kontinum modelində baxılmışdır. Bu halda

$$|C_{n,l,q_z}^{LO}|^2 = \frac{e^2 \hbar \omega_{LO}}{2\pi \epsilon_0 L R^2 J_{n+1}^2(k_{nl}R)^2 (k_{nl}^2 + q_z^2)} \left(\frac{1}{\epsilon_\infty} - \frac{1}{\epsilon_s} \right) \quad (14)$$

Burada ϵ_0 - vakuum nüfuzluğu, ϵ_s və ϵ_∞ uyğun olaraq statik və yüksək-tezlikli nüfuzluqdur.

Fəslin sonunda maqnit sahəsində yerləşmiş kvant məftildə astana dislokasiyaları vasitəsilə sərbəst yükdaşıyıcıların optik udulması tədqiq olunmuşdur. Kvant məftilin elektron konfaynmenti simmetrik parabolik potensial kimi götürülmüşdür:

$$V(x, y) = \frac{m^*}{2} \omega_0 (x^2 + y^2),$$

Sabit bircins maqnit sahəsinin vektor potensialının qəliblənməsi uyğun olaraq $\vec{A} = (-\frac{yH}{2}, \frac{xH}{2}, 0)$ formasında götürülüb. Baxılan model üçün enerji spektiri aşağıdakı kimi götürülmüşdür:

$$E_{nmk_z} = \frac{\hbar\omega_c}{2}m + \frac{\hbar\Omega}{2}(2n + |m| + 1) + \frac{\hbar^2 k_z^2}{2m^*}, \quad (15)$$

Burada $n = 0, 1, 2, \dots$ - mövcud olan Landau səviyyəsinə müvafiq olaraq kvant ədədidir; $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ - maqnit kvant ədədidir; $\omega_c = \frac{|e|H}{m^*c}$ - tsiklotron tezlikdir $\Omega = \sqrt{\omega_c^2 + 4\omega_0^2}$, $\hbar k_z$ - Oz oxu istiqamətində elektronun kvazi impulsudur.

Məlum olduğu kimi kovalent rabitəyə malik yarımkeçiricilərdə kənarın dislokasiyaları akseptor mərkəzləri rolunu oynayır. Odur ki, n - tip krastallarda dislokasiya xətti mənfi yüklənmiş olur və xəttin ətrafında müsbət yüklənmiş sahə yaranır. Bonç – Bureviç və Koqan modellərinə müvafiq olaraq yüklənmiş dislokasiya üçün ekranlaşma potensialı aşağıdakı formada ifadə olunur:

$$V_D(\rho_1) = \frac{e^2 f_0^* K_0\left(\frac{\rho_1}{\lambda_0}\right)}{2\pi \epsilon \epsilon_0 a_0^*}, \quad (16)$$

Burada f_0^* - dislokasiya xətti boyu akseptor mərkəzinin tutulma ehtimalı, a_0^* - dislokasiya xətti boyu akseptor mərkəzləri arası məsafədir, ϵ_0 - elektrik sabiti, $K_0(x)$ - Makdonalds funksiyası, $\rho_1 = \sqrt{x^2 + z^2}$, $\lambda_0 = \sqrt{\epsilon \epsilon_0 k_B T / (e^2 n_e)}$ - Debay ekranlaşma uzunluğu, n_e - kvant məftilində elektronların sıxlığıdır.

Elektron dislokasiya qarşılıqlı təsirinə elastiki qarşılıqlı təsir kimi baxıb (7) və (8) ifadələri əsasında sərbəst yükdaşıyıcılarla işığın udulması üçün analitik ifadə alınmışdır. Müəyyən olunmuşdur maqnit sahəsində

yerləşmiş parabolik potensiallı silindrik kvant məftildə astana dislokasiyaları vasitəsi ilə sərbəst yükdaşıyıcılarla işığın udulma əmsalının hibrid kvantlanma hesabına azalır.

Dördüncü fəsilə Volkano potensiallı kvant həlqədə maqnit

$$V(r) = \frac{a_1}{r^2} + a_2 r^2, \quad (17)$$

sahəsində optik udulma tədqiq olunmuşdur.

Burada r - polyar koordinat sistemində zərrəciyin radius vektorudur,

a_1, a_2 - digər parametrlərdir.

Elektronların lateral hərəkəti üçün enerji spektri və dalğa funksiyası

$$E_{n,m} = \left(n + \frac{1}{2} + \frac{M}{2} \right) \hbar \omega - \frac{m}{2} \hbar \omega_c - \frac{m^*}{4} \omega_0^2 r_0^2, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad m = \dots, -1, 0, 1, \dots,$$

Burada $\omega = \sqrt{\omega_c^2 + \omega_0^2}$, $\lambda = \sqrt{\frac{\hbar}{m^* \omega}}$, $V_0 = 2 \sqrt{a_1 a_2}$, $\omega_0 = \sqrt{8 a_2 / m^*}$,
 $r_0 = (a_1 / a_2)^{1/4}$, $M = \sqrt{m^2 + \frac{2 a_1 m^*}{\hbar^2}}$

n, m - elektronun uyğun olaraq radial və bucaq momentidir. Analoji olaraq deşiklərin spektrini və dalğa funksiyasını da tapmaq olar. r_0 və ω_0 parametrlərini elektron və deşiklər üçün bir – birinə bərabər götürmək olar.

Texnologiyanın inkişafı radiusu kifayət qədər böyük intervalda dəyişə bilən həlqə yaratmağa imkan verir. Kiçik radiuslu həlqələrdə ($r_0 \ll a_B^*$, a_B^* - həlqə materialında effektiv Bor radiusudur) Kulon qarşılıqlı təsiri nəzərə almamaq mümkün olduğundan elektron və deşiklərin dinamikası bir – birindən asılı olmur və elektron və deşiklər üçün Şredinger tənliyi ayrılıqda həll edilir. Kvant həlqənin səthinə işıq normal düşdükdə Al.L.Efros və A.L.Efrosun zonalar arası optik udulmanın (fundamental udulma) məlum ifadəsindən istifadə etmişik:

$$\alpha = A \sum_{\alpha\alpha'} \left| \int \psi_{\alpha}^e \psi_{\alpha'}^h dr \right|^2 \times \delta(\Delta - E_{\alpha}^e - E_{\alpha'}^h),$$

Burada α, α' - uyğun olaraq elektron və ağır deşiklərin kvant ədədlərinin məcmusu, $\Delta = \hbar\Omega - E_g$, E_g - qadağan olunmuş zonanın eni, $\psi_{\alpha}^e, \Psi_{\alpha'}^h$ - uyğun olaraq elektron və ağır deşiklərin dalğa funksiyası, $E_{\alpha}, E_{\alpha'}$ - uyğun olaraq elektron və deşiklərin enerjisi, A – Blox amplitudlarında qurulmuş matrisa elementləri ilə mütənasib əmsaldır.

Müəyyən olunmuşdur ki, kvant həlqənin müstəvisinə perpendikulyar olan istiqamətdə seçmə qaydası üçün $l = l'$, yəni eyni kvant ədədləri olan haldan keçidlər mümkündür. Lay müstəvisində keçidlər $m = m'$ olduqda olur. Fundamental udulma əmsalı üçün müəyyən olunmuşdur ki,

$$\alpha \sim {}_2F_1 \left(n, n', M + 1, \frac{4\lambda_e^2 \lambda_h^2}{(\lambda_h^2 - \lambda_e^2)} \right) \left(\frac{\lambda_h^2 - \lambda_e^2}{4(\lambda_e^2 \lambda_h^2)} \right)^{M+1} (\lambda_e \lambda_h)^{-(M+1)}, \quad (18)$$

Burada ${}_2F_1(\alpha, \beta, \gamma, x)$ - hiperqoemetrik funksiyadır.

Fundamental udulmanın sərhəd enerjisi (tezliyi) üçün alınmışdır:

$$\hbar\Omega_{000} = E_g + \hbar \frac{\omega_l + \omega_h}{2} + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2d^2} \left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) - 4 \frac{a_1}{r_0^2}, \quad (19)$$

Bu fəsildə həmçinin radiusu R olan kvant diskdə optik udulma tədqiq olunmuşdur. Kvant limit həddində, kvant diskdə məhdudlaşmış elektron üçün əsas halların dalğa funksiyaları məlum ifadələrlə verilmişdir

$$\Psi_{n_0} = \sqrt{\frac{2}{V}} \frac{1}{J_1(x_{0t})} J_0 \left(\frac{x_{0t}}{R} \rho \right) \sin \frac{(z+d)n\pi}{2d},$$

$$E_{n,t,0} = \frac{\hbar^2}{2m^*} \left[\left(\frac{x_{0t}}{R} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{2d} \right)^2 \right],$$

Deformasiya potensialı vasitəsi ilə elektron uzununa akustik fononun modaları ilə qarşılıqlı təsirdə olur və ona uzun səs dalğası kimi baxıla bilər. Bu halda fonon üçün aşağıdakı ifadəni götürmək olar.

$$H(r, t) = i \sqrt{\frac{\hbar q}{2\rho v_s}} E_{ac} (e^{(iqr - \omega t)} - h.c.),$$

Burada E_{ac} - deformasiya potensialıdır və v_s - səs sürətidir.

Elektron uzununa optik fonon qarşılıqlı təsiri kvadrat matrisasının elementləri belə ifadə olunur:

$$\langle \Psi_i(r) | H | \Psi_f \rangle^2 = \left[\frac{256\pi^2 e^2 \hbar \omega_{LO}}{V^3} \left(\frac{1}{\epsilon_\infty} - \frac{1}{\epsilon_0} \right) \right] \times \frac{1}{J_1^2(x_{0r}) J_1^2(x_{0r'})} \int_0^R J_0(k\rho) J_0\left(\frac{x_{0r}}{R} \rho\right) J_0\left(\frac{x_{0r'}}{R} \rho\right) \rho d\rho$$

$\Psi_i(r)$ ilkin və $\Psi_f(r)$ son hal arasında elektronların səpilməsi zamanı fonon emissiyası nəzərə alınmaqla Ferminin qızıl qaydası ilə hesablanıla bilər:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_{n,k} \left| \langle \Psi_i(r) | H | \Psi_f(r) \rangle \right|^2 \delta(E_f - E_i - \hbar\omega_q),$$

Elektron və fonon dalğa funksiyalarının nüfuz etməsi nəticəsində yaranan elektron - uzununa akustik fonon qarşılıqlı təsiri başlanğıc/son hallardan asılı olaraq belə verilə bilər:

$$I_{n,t,0;n't'0} = \int_0^R |\Psi_i(r)|^2 |\Psi_f|^2 r dr ,$$

Bu baxımdan fononların məhdudlaşdırılması ilə elektron yürüklüyü hesablanmışdır.

Əsas nəticələr:

1. Silindirik kvant məftildə sərbəst yükdaşıyıcıların uzununa optik fononlardan səpilməsi ilə işığın udulma nəzəriyyəsi verilmişdir. Udulma əmsalının məftilin radiusundan asılılığı müəyyən edilmişdir.

2. Uzununa maqnit sahəsində parabolik potensiallı kvant çuxurlarında ikinci tərtib həyacanlaşma nəzəriyyəsi cərçivəsində akustik və optik fononlardan səpilmə nəzərə alınmaqla sərbəst yükdaşıyıcılarla işığın udulması üçün analitik ifadə alınmışdır. Müəyyən olunmuşdur ki, həcmi kristallara və sonsuz dərin düzbucaqlı potensiallı kvant çuxurlara nisbətən udulma əmsalının qiyməti tezliyin artması ilə sürətlə azalır.

3. Məhdudlaşdırıcı potensialı parabolik olan kvant çuxurlarda altzonalar arası optik udulma üçün ifadə alınmışdır. Müəyyən olunmuşdur ki, optik keçidlər qonşu alt səviyələr arası olur və $\Omega = \omega_0$ olduqda udulmada rezonans baş verir.

4. Uzununa maqnit sahəsində parabolik potensiallı kvant çuxurda zonadaxili udulma əmsalının rezonans xarakter daşdığı və rezonansın $\Omega = \sqrt{\omega_0^2 + \omega_c^2}$ hibrid tezlikdə olduğu müəyyən edilmişdir.

5. Maqnit sahəsində yerləşmiş parabolik potensiallı silindirik kvant məftildə astana dislokasiyaları vasitəsi ilə sərbəst yükdaşıyıcılarla işığın udulma əmsalının hibrid kvantlanma hesabına azaldığı müəyyən olunmuşdur.

6. Müəyyən olunmuşdur ki, kvant diskdə kvant limit halında elektronlar fononlardan səpildikdə kvant diskin qalınlığının artması ilə səpilmənin sürəti azalır və relaksasiya müddəti artır.

7. Bircins maqnit sahəsində yerləşmiş Volkano konfaynmentli potensiala malik kvant həlqədə işığın udulması üçün optik keçidlər müəyyən edilmişdir. Fundamental udulmanın maqnit sahəsindən və kvant həlqənin radiusundan asılılığı müəyyən edilmişdir.

Dissertasiya mövzusuna aid elmi işlərin siyahısı

1. Abaszadə R.Q. A^3B^5 tipli kristallar əsasında hazırlanan məhdud ölçülü sistemlərdə səpilmə mexanizmləri/ АМЕА-nın Aspirantlarının Elmi Konfransının materialları, Bakı, 2010, s.3–4
2. Абасзаде Р.Г., Ибрагимов Г.Б., Алиева А.М., Ибаева Р.З. Внутризонное поглощение электромагнитного излучения в кольца Волкано/ VII Национальная конференция Рентгеновское, Синхротронное излучения, Нейтроны и Электроны для исследования наносистем и материалов. Нано-Био-Инфо-Когнитивные Технологии, Москва, Россия, 2011, с.99
3. Ибрагимов Г.Б., Абасзаде Р.Г., Якимчук Д.В. Магнетопоглощение света в квантовых кольцах конечной ширины/ Научно-методические проблемы современной физики, Брест, Беларусь, 2011, с.46-47
4. Ибрагимов Г.Б., Абасзаде Р.Г. Поглощение света свободными носителями низкоразмерными полупроводниковыми системами на основе A^3B^5 // Nauka i Innovacija, 2011, Przemysl, Polski, с.12 – 14
5. Ibragimov G.B., Abaszade R.G., Yakimchuk D.V. Optical properties of semiconductor nanosystems on the basis of A^3B^5 / Научно-методические проблемы современной физики, Брест, Беларусь, 2011, с.47
6. Ibragimov G.B., Abaszade R.G. Light magneto-absorption in quantum rings of finite width// Azerbaijan Journal of Physics, Section:En, №4, Vol.XVII, 2011, pp.12 – 13
7. Абасзаде Р.Г., Ибрагимов Г.Б. Внутризонные оптические переходы в низкоразмерной системе/ XLVI Зимняя школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния, ПИЯФ, С.Петербург, Россия, 2012, с.82
8. Абасзаде Р.Г., Джафаров Р.М. Вычисления коэффициента абсорбции в случае невырожденного электронного газа в наноструктурах/ XLVI Зимняя школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния, ПИЯФ, С.Петербург, Россия, 2012, с.95
9. Абасзаде Р.Г., Ибрагимов Г.Б. Рашба спиновые эффекты в квантовых кольцах/ Young scientists conference on semiconductor physics, Kiev, Ukraine, 2012, pp.269

10. Абасзаде Р.Г., Ибрагимов Г.Б. Оптические свойства низкоразмерных систем/ Труды XVI – ой конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ, Дубна, Россия, 2012, с.185–187
11. Абасзаде Р.Г. Вычисление коэффициента поглощения в случае невырожденного электронного газа в наноструктурах/ XIX Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников, Екатеринбург, Россия, 2012, с.251
12. Абасзаде Р.Г. Поглощение электромагнитного излучения в параболической квантовой яме// АМЕА-нын Хəбərləri, Fizika-Riyaziyyat və Texnika Elmləri Seriyası, Fizika və Astronomiya, 2014, с.34, №5, s.127-129
13. Абасзаде Р.Г., Ибрагимов Б.Г. Оптическое поглощение свободных носителей дислокациями края в квантовой проволоке, помещенной в магнитное поле// Азербайджанский Технический Университет, Учение записки, №2, Баку, 2014, с.124-128
14. İbragimov G.B., Abaszade R.G., R.Z.İbayeva Effect of phonon scattering on free - carrier absorption in cylindrical quantum wires, Applied Sciences and technologies in the United States and Europe: common challenges and scientific findings// New York, USA, 2014, pp.85-89
15. İbragimov G.B., Abaszade R.G., İbayeva R.Z. Theory of free-carrier absorption in cylindrical quantum wires// International Journal of Latest Research in Science and Technology, v.3, Issue 4: İndia, 2014, pp.78-80
16. Ибрагимов Г.Б. Абасзаде Р.Г. Электронная релаксация, вызываемая фононами в полупроводниковом квантовом диске// АМЕА-нын Хəбərləri, Fizika-Riyaziyyat və Texnika Elmləri Seriyası, Fizika və Astronomiya, Baku, с.35, №5, 2015, s.124-127
17. Абасзаде Р.Г., Ибрагимов Г.Б., Алиев А.А., Якимчук Д.В. Электронно-фононное взаимодействие квантовых дисков/ L Зимняя школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния, ПИЯФ, С.Петербург, Россия, 2016, с.164
18. İbrahimov H.B., Abaszadə R.Q. Uzununa maqnit sahəsində parabolik potensiallı kvant çuxurda optik udulma// Azərbaycan Texniki Universiteti, Elmi Əsərləri, № 3 Bakı, 2017, s.10-16

РАШАД ГАБИЛ ОГЛЫ АБАСЗАДЕ

**КИНЕТИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
НАНОСТРУКТУР ТИПА A^3B^5**

РЕЗЮМЕ

В диссертационной работе теоретически изучены оптические свойства полупроводниковых наноструктур на основе A^3B^5 различной формы, рассмотрено влияние магнитного поля и ограничивающего потенциала на эти свойства и исследованы механизмы рассеяния. Выявлено, что в продольном магнитном поле коэффициент межзонного поглощения квантовой ямы с параболическим потенциалом носит резонансный характер и найдена зависимость резонанса от гибридной частоты. С учетом механизмов рассеяния с помощью теории возмущения второго порядка было изучено поглощение света свободными носителями заряда в продольном магнитном поле в квантовой яме с параболическим потенциалом. Получено, что в помещенной в магнитное поле цилиндрической квантовой проволоке с параболическим потенциалом поглощение света свободными носителями заряда посредством дислокаций краев уменьшается с ростом частоты фотона и радиуса проволоки. Показано, что в квантовом диске в квантовом пределе в случае рассеяния электронов фононами с увеличением толщины диска скорость рассеяния уменьшается и растет время релаксации. Дана теория поглощения света свободными носителями заряда при рассеянии на продольных оптических фононах в цилиндрической квантовой проволоке. Определена зависимость коэффициента поглощения от радиуса проволоки. В помещенном в однородное магнитное поле квантовом кольце с потенциалом конфайнмента Волкано для поглощения света определены оптические переходы. Определена зависимость фундаментального поглощения от магнитного поля и радиуса квантового кольца.

RASHAD GABİL OGLU ABASZADE

TRANSPORT AND OPTICAL PROPERTIES OF NANOSTRUCTURES of A^3B^5 TYPE

SUMMARY

In the thesis, the optical properties of semiconductor nanostructures based on A^3B^5 of various shapes are theoretically studied, the effect of the magnetic field and the confinement potential on these properties is examined, and the scattering mechanisms are investigated. It was found that in a longitudinal magnetic field the interband absorption coefficient of a quantum well with a parabolic potential is resonant and the dependence of the resonance on the hybrid frequency is found. Taking into account the scattering mechanisms using the second-order perturbation theory, the light absorption by free charge carriers in a longitudinal magnetic field in a quantum well with a parabolic potential is studied. It is found that in a cylindrical quantum wire with a parabolic potential placed in a magnetic field, the light absorption by free charge carriers by means of edge dislocations decreases with increasing photon frequency and wire radius. It is shown that in a quantum disk for the quantum limit, in the case of scattering of electrons by phonons with increasing disk thickness, the scattering rate decreases and relaxation time increases. The theory of light absorption by free charge carriers is given in a cylindrical quantum wire for scattering by longitudinal optical phonons. The dependence of the absorption coefficient on the wire radius is determined. In a quantum ring with the Volkano confinement potential placed in a uniform magnetic field, for the light absorption, optical transitions are determined. The dependence of the fundamental absorption on the magnetic field and the radius of the quantum ring is obtained.

Format 60x80 1/16
Sayı: 100 nüsxə.

РАШАД ГАБИЛ ОГЛЫ АБАСЗАДЕ

**КИНЕТИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
НАНОСТРУКТУР ТИПА A^3B^5**

2220.01 – Физика полупроводников

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**диссертации на соискание ученой степени доктора
философии по физике**

Баку – 2018