

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

AŞAĞI ÖLÇÜLÜ SİSTEMLƏRDƏ İŞIĞIN UDULMASI VƏ YÜKDAŞIYICILARIN SƏPİLMƏSİ PROSESİNDƏ RAŞBA SPİN ORBİTAL QARŞILIQLI TƏSİRİN ROLU

İxtisas: 2220.01 – yarımkəçiricilər fizikası

Elm sahəsi: Fizika

İddiaçı: **Raidə Zabit qızı İbayeva**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi
almaq üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

AVTOREFERATI

Bakı – 2021

Dissertasiya işi Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası Fizika İnstitutunun “Yarımkeçiricilərdə və yarımkeçirici nanostrukturlarda köçürmə hadisələri” laboratoriyasında yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbər: Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Hüseyn Behbud oğlu İbrahimov

Rəsmi opponentlər: AMEA-nın həqiqi üzvü,
Fizika elmləri doktoru, professor
Ənvər Pirverdi oğlu Nəhmədov

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Rauf Mədət oğlu Sərdarlı

Fizika üzrə fəlsəfə doktoru, dosent
Vahid Əmir oğlu Tanrıverdiyev

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının AMEA Fizika İnstitutu nəzdində fəaliyyət göstərən
ED 1.14 Dissertasiya şurası

Dissertasiya şurasının sədri:

AMEA-nın həqiqi üzvü,
fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Nazim Timur oğlu Məmmədov

Dissertasiya şurasının elmi katibi:

Fizika elmləri doktoru, dosent
Rəfiqə Zabil qızı Mehdiyeva

Elmi seminarın sədri:

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Tələt Rzaqulu oğlu Mehdiyev



İşin ümumi xarakteristikası

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi: Müasir elm və texnikanın nailiyyətləri arasında süni yaradılmış yarımkeçirici strukturlar xüsusi yer tutur. Kvant effektlərin yaranması ilə bu yarımkeçirici strukturlar unikal fiziki xüsusiyyətlərə malik olur. Onlardan daha intensiv şəkildə öyrəniləni ölçüyə görə kvantlanma effektidir. Bu effekt sistemin xarakterik ölçüləri zərrəciklərin de Broyl dalğası qiyməti ilə müqayisə oluna bildikdə, həmin zərrəciklərin hərəkətinə qoyulan məhdudiyyətlər nəticəsində yaranır. Aşağıölçülü sistemlərin bir çox növləri mövcuddur: kvant çuxur, ifratqəfəslər, kvant məftil, kvant nöqtə, kvant halqa, kvant disk və s.

Müasir texnologiyanın nailiyyətləri, məsələn, kompüter nəzarəti vasitəsilə molekulyar şüa epitaksiya metodu istənilən konfaynmentli, o cümlədən parabolik potensial ilə ölçülü-məhdudlanan yarımkeçirici sistemlər almağa imkan verir. Parabolik potensiallı sistemlərdə ölçülü kvantlanma effekti eni kifayət qədər böyük kvant çuxurlarda ($1000\text{\AA}$ -dən böyük) yaranır və $T \sim 100\text{ K}$ temperaturda enerji spektrinin kvantlanması sistemin xassələrinə nəzərə çarpacaq dərəcədə təsir edir. Potensialın kvadratik asılılığı sistemin bir çox xarakteristikasının analitik şəkildə ifadəsini almağa imkan verir, bu da baxılan fiziki halları analiz etmək üçün əlverişlidir.

Elektrik və maqnit sahələrinin yarımkeçirici strukturlarda optik şüalanmaya təsiri zamanı yeni effektlər müşahidə olunur, bu da daha çox mükəmməl cihazların yaranmasına gətirib çıxarır. Maqnit sahəsinin və nanostrukturların həndəsi formasının optik və kinetik xassələrə təsirinin öyrənilməsi nanoelektronikanın aktual istiqamətlərindən biridir. Müxtəlif aşağıölçülü strukturlarda elektron qazının spektral xassələrinin əsas tədqiqat metodlarından biri elektomaqnit şüalanmasının təsiri altında zonadaxili elektron keçidlərinin araşdırılmasıdır. Nanostrukturların spektral xüsusiyyətlərinin öyrənilməsində rezonans udulmanın tədqiqi, kinetik ölçmələrindən daha üstündür, çünki sistemin fiziki xüsusiyyətlərinə təsir göstərə bilən kontakt sistemləri ilə əlaqə yaratmaq tələb olunmur. Son onilliklərdə yarımkeçiricilərdə və

nanostrukturlarda spin hadisələri geniş şəkildə tədqiq olunur: spin-orbital qarşılıqlı təsirinin xüsusiyyətləri, elektron və dəşiklərin spin dinamikası, elektron sistemdə fotonun bucaq momentinin ötürülməsi prosesləri geniş araşdırılır. Bu effektlər yük və spin sərbəstlik dərəcələrinin birgə öyrənilməsi ilə müəyyən olunmuşdur. Elmin bu bölməsi spintronika adlandırılır. Bundan başqa aşağıölçülü strukturlarda həcmi materiallarla müqayisədə relaksasiya müddəti daha böyük olur.

Yüksək tezlikli elektromaqnit şüalanmasının zonadaxili udulmasının tədqiqinin əsas aspekti onunla əlaqədardır ki, diskret enerji spektri halında udulma əyrisi müəyyən nöqtələrdə rezonans pikinə malikdir və bu nöqtələrdə şüalanma tezliyi elektronların enerji səviyyələri arasındakı məsafəyə bərabərdir. Bu halda müəyyən olunan rezonans tezliyi, nanostrukturlarda lateral konfaynment və elektron enerji spektrinin parametrləri haqda məlumat almağa imkan verir.

Bir sıra yarımkeçirici strukturlarda zonadaxili udulma, elektronların fononlardan səpilməsi ilə işığın sərbəst yükdaşıyıcılarla udulması, və bu udulmada yükdaşıyıcıların səpilməsinə Raşba spin orbital qarşılıqlı təsir kifayət qədər ətraflı tədqiq olunmamışdır.

Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri: Dissertasiya işinin əsas məqsədi müxtəlif nanostrukturlarda (ifrat qəfəslərdə, kvant nöqtəli ifrat qəfəslərdə, kvant çuxurlarda, kvant məftillərdə, kvant daralmada) işığın udulması və kvant çuxurlarda yükdaşıyıcıların səpilməsi prosesində Raşba spin orbital qarşılıqlı təsirin rolunu müəyyənləşdirməkdən ibarətdir.

Göstərilən məqsədə çatmaq üçün aşağıdakı məsələlər həll edilmişdir:

- Maqnit sahəsində ifrat qəfəslərdə elektronlar fononlardan səpildikdə yükdaşıyıcılarla işığın udulmasının tədqiqi.
- Kvant nöqtəli ifrat qəfəslərdə elektronlar fononlardan səpildikdə yükdaşıyıcılarla işığın udulmasının tədqiqi.
- Kvant nöqtəli ifrat qəfəslərdə işığın zonadaxili udulmasının tədqiqi.

- Kvant məftildə elektronlar fononlardan səpildikdə yükdaşıyıcılarla işığın udulmasının tədqiqi.
- Anizotrop parabolik kvant məftildə işığın udulmasının tədqiqi.
- Kvant daralmada işığın zonalararası optik udulmasının tədqiqi.
- Aşağı ölçülü sistemlərdə Raşba spin orbital qarşılıqlı təsiri nəzərə almaqla elektronlar fononlardan səpildikdə sərbəst yükdaşıyıcılarla işığın udulmasının tədqiqi.
- Maqnit sahəsində aşağı ölçülü sistemlərdə Raşba spin orbital qarşılıqlı təsiri nəzərə almaqla elektronlar fononlardan səpildikdə sərbəst yükdaşıyıcılarla işığın udulmasının tədqiqi.

Tədqiqat metodları: Müxtəlif aşağıölçülü strukturlarda elektron qazının spektral xassələrini tədqiq etmək üçün elektomaqnit şüalanmasının təsiri altında zonadaxili elektron keçidlərinin matris elementinin dəqiq formalarını müəyyən edilməsi üçün müxtəlif riyazi hesablama metodlarından, kvant mexanikasının birinci və ikinci tərtib həyacanlaşma nəzəriyyəsi metodundan hesablama proqram paketlərindən istifadə olunmuşdur.

Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar:

- Maqnit sahəsi yarımkeçirici ifratqəfəsin səthinə perpendikulyar yönəldikdə polyar və qeyri-polyar fononlardan səpilmə halında sərbəst yükdaşıyıcılarla işığın udulma əmsalının həm maqnit sahəsinin intensivliyindən, həm də düşən işığın tezliyindən asılı olaraq ossilyasiya etdiyi və rezonans şərtinin $N\omega_c = \Omega + \omega_0$ olduğu göstərilir.
- Anizotrop parabolik potensialla məhdudlanan kvant nöqtələrdən ibarət ifratqəfəslərdə polyar və qeyri-polyar fononlardan səpilməklə sərbəst yükdaşıyıcılar ilə elektromaqnit şüalanmasının udulma əmsalı işığın tezliyindən asılı olaraq ossilyasiya edir və udma əmsalının rezonans halı $N\omega_x + P\omega_y \pm \omega_0 = \Omega$ ifadəsi ilə veilir.
- Parabolik potensiallı kvant nöqtəli ifratqəfəsdə zonadaxili optik udulma, elektromaqnit dalğasının polyarizasiya vektorunun

məhdudlaşdırıcı potensial oxu istiqamətdə yönəldikdə qonşu alt səviyyələr arası olur.

- Uzununa maqnit sahəsinin təsiri altında kvant daralmasında işığın zonalararası udulma əmsalı xarici maqnit sahəsinin intensivliyindən və mikrodaralma uzunluğundan asılılığı müəyyən olunmuşdur.
- Asimmetrik parabolik potensiallı kvant məftillərdə zonadaxili optik udulma əmsalının piklərinin yerinin məhdudlaşdırıcı potensialın xarakterik tezliyindən asılılığı $N\omega_x + P\omega_y \pm \omega_0 = \Omega$ müəyyən edilmişdir.
- Kvant çuxurlarda Raşba spin orbital qarşılıqlı təsir nəzərə alındıqda səpilmə sürəti artdığından sərbəst yükdaşıyıcılarla işığın udulması artır.

Tədqiqatın elmi yeniliyi:

İlk dəfə olaraq aşağıdakılar edilmişdir:

- Maqnit sahəsi yarımkeçirici ifratqəfəsin səthinə perpendikulyar yönəldikdə polyar və qeyri-polyar fononlardan səpilmə halında sərbəst yükdaşıyıcılarla işığın udulma əmsalı üçün analitik ifadə alınmışdır.
- Anizotrop parabolik potensialla məhdudlanan kvant nöqtələrdən ibarət ifratqəfələrdə polyar və qeyri-polyar fononlardan səpilməklə sərbəst yükdaşıyıcılar ilə elektromaqnit şüalanmasının udulma əmsalı üçün analitik ifadə alınmışdır.
- Parabolik potensiallı kvant nöqtəli ifratqəfəsdə zonadaxili optik udulma əmsalı üçün ifadə alınmışdır.
- Uzununa maqnit sahəsinin təsiri altında kvant daralmasında işığın zonalararası udulma əmsalı müəyyən edilmişdir.
- Asimmetrik parabolik potensiallı kvant məftillərdə zonadaxili optik udulma əmsalı üçün ifadə alınmışdır.
- Silindirik kvant məftildə elektronlar akustik fononlardan səpildikdə sərbəst yükdaşıyıcılarla işığın udulma əmsalı hesablanmışdır.

- Kvant çuxurlarda Raşba spin orbital qarşılıqlı təsir nəzərə alınmaqla sərbəst yükdaşıyıcılarla işığın udulma əmsalı üçün ifadə alınmışdır.

Tədqiqatın nəzəri və praktiki əhəmiyyəti: Dissertasiya işinin tədqiqatı nanostrukturlarda: ifrat qəfəslərdə, kvant nöqtəli ifrat qəfəslərdə, kvant çuxurlarda, kvant məftillərdə, kvant daralmada aparılmışdır. Gözlənilir ki, kvant nöqtələrdən ibarət ifratqəfəslər əsasında olan kvant kaskad lazerləri, kvant çuxurlardan ibarət ifratqəfəslər əsasında olan kvant kaskad lazerlərdən daha səmərəli olmalıdır. Qeyd edək ki, zonadaxili optik keçidlərin tədqiqi elektronların fermi səthi və enerji spektrinin parametrləri haqqında vacib məlumatlar verir. Zonadaxili udulma infraqırmızı detektorların hazırlanmasında istifadə oluna bilər. İşdə əsasən parabolik potensiallı sistemlərdə tədqiqat aparılmışdır. Parabolik potensiallı sistemlərdə ölçülü kvantlanma effekti eni kifayət qədər böyük kvant çuxurlarda yaranır. Potensialın kvadratik asılılığı nəzəri hesablamalar üçün əlverişlidir. Belə ki, sistemin bir çox xarakteristikasını analitik şəkildə almaq olur, bu da baxılan fiziki halları analiz etmək üçün məqsədə uyğundur.

Aprobasiyası və tətbiqi: Dissertasiya işinin əsas nəticələri aşağıda qeyd olunan Beynəlxalq və Respublika elmi konfranslarında - "International conference on physical, mathematical and technical sciences" (Naxçıvan, 2008), "Fizikanın müasir problemləri" (Bakı, 2009, 2014), "AMEA – nın aspirantlarının Elmi Konfransı" (Bakı, 2010), "Nanotexnologiyalar və onların texnikada tətbiqi " I Beynəlxalq konfrans, Azərbaycan Texniki Universiteti (Bakı, 2010), "VIII Национальная конференция Рентгеновское, Синхротронное излучения, Нейтроны и Электроны для исследования наносистем и материалов. Нано-Био-Инфо-Когнитивные технологии" (Москва, 2011), XLVII Школа ФГБУ «ПНПФ» по физике конденсированного состояния, (С.-Петербург, 2013, 2014), IX międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji, Nauka i Innowacja (Polska, Przemyśl, 2013), 8th

International Scientific Conference "Applied Sciences and technologies in the United States and Europe: common challenges and scientific findings" (New-York, 2014), "BDU Fizika problemləri İnstitutu, VIII Respublika konfransı" (Bakı, 2014), Academician G.B. Abdullayev Centenary International Conference and School Modern Trends in Condensed Matter Physics MTCMP (Baku-2018), "Energetika ixtisasları üzrə kadr hazırlığının aktual məsələləri Respublika elmi konfransının materialları, Sumqayıt Dövlət Universiteti" (Sumqayıt, 2019), "Maqniyumşaq ərintilərin informasiya texnologiyalarında və hərbi sənayedə tətbiqi perspektivləri mövzusunda Beynəlxalq elmi-praktik konfrans", Az.MİU (Bakı, 2019), XIV International scientific conference "Advanced science" (Russia, 2020) - məruzə edilmişdir.

Dissertasiya mövzusu üzrə təqdim edilən dissertasiyanın axırında siyahısı dərc olunan məqalələr aşağıdakı jurnallarda çap olunmuşdur:

Azerbaijan Journal of Physics 2018; Azerbaijan National Academy of Sciences, Transactions, Physics and Astronomy, 2013,2014, 2019; Bakı Universitetinin Xəbərləri, 2014; Azərbaycan Texniki Universiteti, Elmi əsərlər, 2018; Sciences of Europe, 2019; Инженерный вестник Дона, 2020; Journal of Non-Oxide Glasses, 2020.

Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı:

Dissertasiya işi, Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının akademik H.M. Abdullayev adına Fizika İnstitutunun "Yarımkeçiricilərdə və yarımkeçirici nanostrukturada köçürmə hadisələri" laboratoriyasında yerinə yetirilmişdir.

Dissertasiya işinin quruluşu və həcmi. Dissertasiya işi giriş, 4 fəsil, əsas nəticələr və 172 adda istifadə olunmuş ədəbiyyat siyahısından ibarət olub kompüterdə çap edilmiş 120 səhifəni əhatə edir.

İŞİN MƏZMUNU

Girişdə dissertasiyanın araşdırma obyekti seçilmiş, mövzunun aktuallığı əsaslandırılmış, araşdırmaların məqsədi və həll ediləcək əsas məsələlər ifadə olunmuş, dissertasiyanın praktiki əhəmiyyəti göstərilmiş, dissertasiyanın elmi yenilikləri verilmiş və dissertasiya işinin qısa məzmunu şərh edilmişdir.

Birinci fəsildə nanoölçülü sistemlər və Raşba spin orbital qarşılıqlı təsir haqqında məlumat və qısa icmal verilmişdir.

İkinci fəsildə maqnit sahəsində yarımkeçirici ifratqəfəslərdə zonadaxili optik keçidi tədqiq etmişik. Maqnit sahəsi ifratqəfəsin səthinə perpendikulyar yönəldikdə Landau kvantlanması baş verir və enerji diskret səviyyələrə ayrılır. Eyni zamanda z istiqamətində elektronlar və dəşiklərin hərəkətinin nəticəsi olan minizonalar kəsilməz olaraq qalırlar. Uzununa maqnit sahəsinin ($H = H_z$) təsiri altında z oxu boyunca d_{SL} periodlu, $U(z)$ potensial çuxurlu ifratqəfəslərdə elektronun enerji spektri və dalğa funksiyası yaxşı məlum olan aşağıdakı kimi ifadə oluna bilər:

$$E_n(k_z) = (n + 1/2)\hbar\omega_c + \frac{\Delta}{2}(1 - \cos k_z d_{SL}) \quad (1)$$

$$\Psi_{nk_x k_z} = \frac{1}{L_y} \exp(ik_x x) \Phi_{nk_x}(y - y_0) \xi(k_z) \quad (2)$$

Burada $\Phi_{nk_x}(y - y_0)$ ossilyator funksiyası, L_x , L_y , L_z ifratqəfəs nümunəsinin ölçüləridir, Δ minizonanın eni, ω_c - tsiklotron tezliyi və $\xi_k(z)$ – z istiqamətində Blox funksiyasını göstərir. (1) enerji spektri həm kvazi iki ölçülü sistemlərin səthinə maqnit sahəsi perpendikulyar yönəldikdə yükdaşıyıcıların enerji spektri tam kvantlandığından onların enerji spektrindən, həm də kvazi bir ölçülü sistemlərin enerji spektrindən fərqlənir.

Elektromaqnit sahəsinin polyaizasiya vektoru ifrat qəfəsin müstəvisi boyunca yönəldikdə elektron - foton qarşılıqlı təsirin matrisa elementinin kvadratının

$$\left| \langle n k_x k_z | H_R | n' k'_x k'_z \rangle \right|^2 = \left(\frac{2\pi\hbar n_0}{\epsilon(\omega)\omega} \right) (e\Delta d_{SL} \sin(k_z d_{SL}) / 2\hbar)^2 \delta_{nn'} \delta_{k_x k'_x} \delta_{k_z k'_z} \quad (3)$$

ifadəsindən görünür ki, işığın birbaşa zona daxili udulması baş vermir. Zona daxili udulma elektron, fotondan başqa həm də üçüncü bir “cismın”, məsələn fononların iştirakı ilə baş verir.

Burada $\vec{\epsilon}$ şüalanma sahəsinin polyarizasiya vektoru, ϵ - dielektrik sabiti, ω və c işıq dalğasının tezliyi və sürətidir. H_R operatorunun matris elementlərini hesabladıqda yüksək tezlikli sahə bircins hesab olunur.

Kvant mexaniki keçid ehtimalı ilə əlaqədar olaraq yükdaşıyıcıların eyni zamanda yükdaşıyıcılar foton uduraq fononlardan səpilir, ya da fononlardan səpildikdən sonra foton udur. Biz elektronların polyar və qeyri-polyar fononlardan səpilməsinə halına baxırıq. Bu halda sərbəst yükdaşıyıcılarla işığın udulma əmsalı

$$\alpha = \frac{\epsilon^{1/2}}{n_0 c} \sum_i W_i f_i \quad (4)$$

kimisi hesablanır. Burada n_0 – şüalanma sahəsində fotonların sayı, f_i sərbəst yükdaşıyıcıların paylanma funksiyası, W_i – yaxşı məlum olan aşağıdakı ifadə ilə müəyyən olunan keçid ehtimalıdır:

$$W_i = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_{fq} \left[\left| \langle f | M_+ | i \rangle \right|^2 \delta(E_f - E_i - \hbar\omega - \hbar\omega_q) + \left| \langle f | M_- | i \rangle \right|^2 \delta(E_f - E_i - \hbar\omega + \hbar\omega_q) \right] \quad (5)$$

burada E_i və E_f – uyğun olaraq başlanğıc və son halda elektronların enerjisinin göstərir, $\hbar\omega_q$ – fononun enerjisidir və $\langle f | M_+ | i \rangle$ - elektron, fonon və fotonlar arasındakı qarşılıqlı təsir üçün başlanğıc vəziyyətdən son vəziyyətə keçidin matris elementləridir. i, α, f indeksləri elektronun başlanğıc, aralıq və son vəziyyətini göstərir. V_S – elektron-fonon qarşılıqlı təsir operatorudur. Yükdaşıyıcılar həm polyar fononlardan səpildikdə, həm də qeyri-polyar fononlardan səpildikdə işığın sərbəst yükdaşıyıcılarla udulma

əmsalının ifadəsinə $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{4}{\Delta^2} \Theta_{1\pm}^2}}$ vuruğu daxildir

$(\Theta_{1\pm}(k_z d) = (n' - n)\hbar\omega_c \pm \hbar\omega_0 + \hbar\Omega + \frac{\Delta}{2} \cos k_z d)$. Bu isə hər iki

səpilmə halında sərbəst yükdaşıyıcılarla işığın udulma əmsalının həm maqnit sahəsinin intensivliyindən, həm də düşən işığın tezliyindən asılı olaraq ossilyasiya etdiyini və rezonans şərtinin $N\omega_c = \Omega + \omega_0$ olduğunu göstərir. Hər dəfə $1 - 4\Theta_{1\pm}^2/\Delta^2 = 0$ şərti ödəndikdə, udma əmsalı dağılır. Bundan başqa, $1 - 4\Theta_{1\pm}^2/\Delta^2$ qiymətinin həqiqi və müsbət olduğunu nəzərə alsaq, udma əmsalının mümkün qiymətləri üçün enerji intervalı tapılır.

Bu fəsilə həmçinin kvant nöqtələrdən ibarət ifratqəfəslərdə fononlardan səpilməklə elektromaqnit şüalanmasının sərbəst yükdaşıyıcılar ilə udulması tədqiq olunmuşdur. Fərz olunur ki, kvant nöqtəli ifratqəfəslərdə elektron qazı anizotrop parabolik potensialla məhdudlanıb. Güclü əlaqə yaxınlaşmasında kvant nöqtəli ifratqəfəslərdə elektronun normallaşdırılmış məxsusi funksiyası $\Psi_{n,l,k_z}(r)$ və keçirici zonada enerjisinin məxsusi qiymətləri $E_{n,l}(k_z)$ uyğun olaraq bu şəkildə tapılır¹.

$$\Psi_{n,l,k_z}(r) = \frac{1}{\sqrt{L_z}} \Psi_n(x) \Psi_l(y) \xi_{k_z}(z) , \quad (6)$$

$$E_{n,l}(k_z) = (n + \frac{1}{2})\hbar\omega_x + (l + \frac{1}{2})\hbar\omega_y + \frac{\Delta}{2}(1 - \cos k_z d) = \varepsilon_{n,l} + \varepsilon(k_z), \quad (7)$$

burada m^* - elektronun effektiv kütləsi, ω_x və ω_y - uyğun olaraq x və y istiqamətlərində konfaynmentin tezlikləridir. $n(=0,1,2,...)$ və $l(=0,1,2,...)$ ilə elektronun altzonaları səviyyəsinin indeksləri göstərilib, $k_z - z$ istiqamətində dalğa vektoru komponenti, $\Psi_n(x)$ və $\Psi_l(y)$ – sadə harmonik ossilyatorun məxsusi funksiyalarıdır. (6) ifadəsi ilə verilən dalğa funksiyasından istifadə edərək elektron-foton qarşılıqlı təsirinin matris elementini (3) ifadəsində $\delta_{k_x k_x}$ simvolun

¹Sang Chil Lee_ Electrophonon Resonance in Quantum-Dot Superlattices Journal of the Korean Physical Society, Vol. 52, No. 4, April 2008, pp. 1081-1085

$\delta_{ll'}$ simvolu ilə əvəz etməklə alınır, burada V – kristalın həcmidir, şüalanma sahəsi z - oxu istiqaməti boyunca polyarlaşıb.

Elektron-fonon qarşılıqlı təsirinin matris elementinin ifadəsi belədir:

$$\left| \langle k'_z n' l' | V_s | k_z n l \rangle \right| = C'_j J_{nn'}(x) J_{ll'}(y) I(q_z) \quad (8)$$

V_S – elektronun fononla qarşılıqlı təsir operatorudur. $C'_j C_j$ – elektronlar və fononlar arasındakı qarşılıqlı təsiri xarakterizə edən funksiyadır və ifadələri belədir²

$$J_{nn'}(q_x) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{iq_x x} dx \Psi_n(x) \Psi_{n'}(x)$$

$$J_{ll'}(q_y) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{iq_y y} dy \Psi_l(y) \Psi_{l'}(y)$$

$$I(q_z) = \int_0^d \xi_{k_z}(z) \xi_{k'_k}(z) e^{iq_z z} dz \quad C_j'^2 = C_j^2 F_j(q)$$

C_j və $F_j(q)$ fononların növündən asılıdır.

Polyar və qeyri-polyar optik fononlarla səpilmə zamanı udma əmsalı üçün aşağıdakı ifadələri alırıq:

$$\alpha_{pol} = \frac{4\pi e^4 \Delta d \omega_0 L_z}{c \Omega^3 \epsilon^{1/2} \hbar^3} \left(\frac{1}{\epsilon_\infty} - \frac{1}{\epsilon_0} \right) \sum_{n'l'} \sum_{nl} \sum_{\pm} \int_{-\pi/d}^{\pi/d} dk_z f_{nlk_z} \left(N_0 + \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} \right) \frac{\sqrt{1 - \frac{4}{\Delta^2} \theta_{\pm}^2 - \sin k_z d}}{\sqrt{1 - \frac{4}{\Delta^2} \theta_{\pm}^2}} \times$$

² İbrahimov H.B. Nanoölçülül sistemlərdə elektron prosesləri / -Bakı, 2012. -s.255.

$$\times \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{|I_{nn'}(q_x)|^2 |I_{ll'}(q_y)|^2}{(q_x^2 + q_y^2) + a_\pm^2} dq_x dq_y, \quad a_\pm^2 = \frac{1}{d^2} \left(k_z d - \arccos \left(\frac{2}{\Delta} \Theta_\pm(k_z d) \right) \right)^2 \quad (9)$$

$$\alpha_{n,pol} = \frac{D^2 e^2 \Delta d}{\pi c \rho \omega_0 \Omega^3 L_x L_y} \sum_{n'l'} \sum_{nl} \sum_{\pm} \int_{-\pi/d}^{\pi/d} dk_z f_{nek_z} \left(N_0 + \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} \right) \frac{\sqrt{1 - \frac{4}{\Delta^2} \Theta_\pm^2 - \sin k_z d}}{\sqrt{1 - \frac{4}{\Delta^2} \Theta_\pm^2}} \times$$

$$\times \frac{1}{n' - n} \cdot \frac{1}{l' - l},$$

$$\Theta_\pm(k_z d) = (n' - n) \hbar \omega_x + (l' - l) \hbar \omega_y \pm \hbar \omega_0 + \hbar \Omega + \frac{\Delta}{2} \cos k_z d \quad (10)$$

$1 - 4\Theta_i^2/\Delta^2$ qiymətinin həqiqi və müsbət olduğunu nəzərə alsaq, udma əmsalının mümkün qiymətləri üçün enerji intervalını tapa bilərik.

(9) və (10) ifadələrindən görünür ki, düşən fotonun müəyyən tezliklərində piklər müşahidə olunur. Elektron-fonon səpilməsi üçün udma əmsalının rezonans halı

$$N\hbar\omega_x + P\hbar\omega_y \pm \hbar\omega_0 = \hbar\Omega \quad (11)$$

(11) ifadəsinin ödənildiyi tezliklərdə yaranır, burada $N = n' - n = 1, 2, 3, \dots$ və $P = l' - l = 1, 2, 3, \dots$.

(11) ifadəsindən görünür ki, $n(l)$ indeksi ilə müəyyən olunan altzonalardan elektronlar səpilmə nəticəsində n' (l') indeksli altzonalardan birinə keçə bilər. Bu zaman $\hbar\omega_0$ enerjili LO-fononların udulması halında elektronlar $\hbar\Omega$ enerjili fotonları udur və ya buraxır.

(11) ifadəsi udulmanın spektral xəttinin formasının təyin olunması üçün əsas ifadədir. Bu, yarımkəçiricilərdə rezonans effektləri analiz etməyə imkan verir. Qeyd edək ki, (9) ifadəsindəki altzonalalar üzrə cəmləmə üç növə malikdir: (i) $n' \neq n, l' = l$,

(ii) $n' = n, l' \neq l$ və (iii) $n' \neq n, l \neq l'$. Seçmə qaydasına əsasən elektronların polyar optik fononlarla səpilməsi zamanı üç keçid mümkündür: (1) yalnız x-istiqamətində ölçülü altzonalar arası keçid, (2) yalnız y-istiqamətində ölçülü altzonalar arası keçid, (3) həm x-istiqamətində, həm də y-istiqamətində ölçülü altzonalar arası keçid. (10) ifadəsindən görünür ki, elektronların qeyri-polyar optik fononlardan səpilməsi üçün yalnız bir keçid mümkündür: həm x-istiqamətində, həm də y-istiqamətində ölçülü altzonalar arası keçid.

Bu fəsilə həmçinin parabolik potensiallı kvant nöqtəli ifratqəfəsdə zonadaxili optik udulma tədqiq edilmişdir. Parabolik potensiallı konfaynmentə baxdığımızdan elektron-elektron qarşılıqlı təsir nəzərə alınmır. Fərz olunur ki, kvant nöqtəli ifratqəfəslərdə elektron qazı anizotrop parabolik potensialla məhdudlanır.

Elektronun məxsusi funksiyası $\Psi_{n,e,k_z}(r)$ və keçirici zonadakı məxsusi qiymətləri $E_{n,l}(k_z)$ uyğun olaraq (6) və (7) ifadələri ilə verilir. Udulma əmsalı cırlaşmamış elektron qazı halında, elektron-foton qarşılıqlı təsirinin birinci tərtib həyacanlaşma nəzəriyyəsi ilə hesablanır. Elektromaqnit dalğasının polyarizasiya vektoru x oxu istiqamətdə yönəldikdə elektron foton - qarşılıqlı təsir operatorunun matrisa elementi aşağıdakı kimi olar:

$$\begin{aligned} \langle n, l, k_z | H_R | n', l', k'_z \rangle = & ie \frac{\sqrt{\hbar m^*} \Omega}{m^*} \sqrt{\frac{2\pi\hbar N_f}{\epsilon(\omega)\Omega}} \delta_{l_y, l'_y} \delta_{k_z, k'_z} \\ & \times \left(\sqrt{\frac{n}{2}} \delta_{n', n-1} - \sqrt{\frac{n+1}{2}} \delta_{n', n+1} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

Qeyd edək ki, elektromaqnit dalğasının polyarizasiya vektoru y oxu istiqamətdə yönəldikdə elektron foton - qarşılıqlı təsir operatorunun matrisa elementi (12) ifadəsində n və l kəmiyyətlərinin yerinin dəyişilməsi ilə alınır.

Beləliklə, alırıq ki, elektromaqnit dalğasının polyarizasiya vektoru x oxu istiqamətdə yönəldikdə, keçid yalnız qonşu ($n' = n \pm 1$) səviyyələri, elektromaqnit dalğasının polyarizasiya

vektoru y oxu istiqamətdə yönəldikdə, keçid yalnız qonşu ($l' = l \pm 1$) səviyyələri arasında olur.

Üçüncü fəsilə silindrik kvant məftildə kvazi bir ölçülü elektron qazı üçün şüalanma sahəsinin məftilin uzunluğu boyunca polyarlaşdığı halda yükdaşıyıcılar akustik fononlardan səpildikdə sərbəst yükdaşıyıcıların udulması nəzəriyyəsini araşdırmışıq.

Elektronlar R radiuslu silindrik kvant məftilin L uzunluğu boyunca sərbəst hərəkət edir və məftilin en kəsiyi boyunca onların hərəkəti məhdudlanır. Belə halda effektiv kütlə yaxınlaşması daxilində kvant məftildə elektronun dalğa funksiyası aşağıdakı kimi olacaq²:

$$\Psi_{nK}(r) = \frac{\exp(iKz)\exp(il\vartheta)}{(\pi R^2 L)^{1/2}} \cdot \frac{J_n(k_{nL} R)}{J_{l+1}(k_{nL} R)}, \quad l=0,1,2,3,\dots, n=1,2,3,\dots \quad (13)$$

burada $r = (\rho, \vartheta, z)$ -dir, ϑ - məftilin azimutal bucağıdır, K - silindrik məftilin oxu boyunca seçilmiş z oxu boyunca olan elektronun dalğa vektorudur, $J_l(x)$ - birinci dərəcəli Bessel funksiyasıdır.

Dalğa funksiyasından istifadə edərək elektron-foton qarşılıqlı təsir Hamiltonunun matris elementlərini aşağıdakı kimi yazı bilərik:

$$\langle n'l'K'|H_R|nlK\rangle = -\frac{e\hbar}{m^*} \left(\frac{2\pi\hbar n_0}{V\Omega} \right)^{1/2} (\varepsilon K) \delta_{KK'} \delta_{ll'} G_{nl,n'l'}(R) \quad (14)$$

Elektron-fonon qarşılıqlı təsirinin matrisa elementləri səpilmə mexanizmindən asılı olduğundan akustik fonon üçün

$$\langle f|V_s|\alpha\rangle = C_{nl}(q_z) I_{n'l',n'l''}(q_{nl}) \delta_{K',K''+q_z} \quad (15)$$

Biz nanoməftildə eninə məhdudlanmış akustik fononlarla deformasiya olunmuş potensialın qarşılıqlı təsirinə baxırıq. Bu halda (14) ifadəsinə daxil olan $C_{nl}(q_z)$ -in ifadəsi aşağıdakı kimi verilir³:

³Hong-Jing, X. Bound polaron in a cylindrical quantum wire of polar crystal / Ch.-Y. Chen, K. M. Ben // Physical Review B, 2000. 61, 7, - p.4827-4834.

$$\left| C_{nl,q_z}^{LA} \right|^2 = \frac{D^2 \hbar \sqrt{k_{nl}^2 R^2 + R^2 q_z^2}}{2\pi R L \mu c_s J_{n+1}^2(k_{nl} R)} \quad (16)$$

burada c_s - səs tezliyi, μ - materialın sıxlığı, D isə zolağın deformasiya potensialıdır. (4)-(5) və (14)-(16) ifadələrindən istifadə edərək silindirik kvant məftildə sərbəst yükdaşıyıcıların akustik fononlardan səpilməsi ilə işığın udulma əmsalının məftilin radiusunun artdıqca azaldığı müəyyən edilmişdir.

Bu fəsilə həmçinin parabolik konfaynment potensiallı kvant məftildə elektronlar ilə elektromaqnit şüalanmasının udulmasına və fononlardan səpilməsinə eyni vaxtda baxılır.

Fərz olunur ki, kvant məftildə elektron qazı x və z istiqamətində uyğun olaraq ω_x və ω_z tezlikli anizotrop parabolik potensialı ilə məhdudlanıb. Asimmetrik parabolik potensiallı kvant məftillərdə keçirici zonada elektronun məxsusi funksiyası $\Psi_{n,m,p_y}(r)$ və məxsusi enerjisi $E_{n,m}(p_y)$ aşağıdakı məlum düsturlarla veilir:

$$\Psi_{n,m,p_y}(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\hbar}} \Psi_n(x) \Psi_m(z) \exp(ip_y y) \quad , \quad (17)$$

$$E_{n,m}(p_y) = (n + \frac{1}{2})\hbar\omega_x + (m + \frac{1}{2})\hbar\omega_z + \frac{p_y^2}{2m} \quad , \quad (18)$$

Burada n ($= 0, 1, 2, \dots$) və m ($= 0, 1, 2, \dots$) ilə elektron altzonaları səviyyələrinin indeksləri ifadə olunub, p_y - y istiqamətində elektronun impuls komponentidir (y oxu istiqaməti məftilin oxuna uyğundur), $\Psi_n(x)$ və $\Psi_m(z)$ - sadə harmonik ossilyatorun məxsusi funksiyalarıdır. Sistemin bütün başlanğıc “ i ” hallarına görə cəmləmə aparılır. $W_i - mnP_y$ vəziyyətindən $m'n'P'_y$ vəziyyətinə keçid ehtimalı (5) ifadəsi ilə müəyyən olunur.

Dalğa funksiyasının (17) ifadəsindən istifadə etməklə elektron-foton qarşılıqlı təsirinin matris elementi aşağıdakı kimi yazıla bilər:

$$\langle n'l'K'|H_R|nlK\rangle = -\frac{e}{m^*}\left(\frac{2\pi\hbar n_0}{V\Omega\epsilon}\right)^{1/2}(\epsilon P_y)\delta_{P_y P_y}\delta_{mm'}\delta_{nn'}, \quad (19)$$

Şüalanma sahəsi y-istiqaməti boyunca polyarlaşmışdır.

$f_0(E_{nmP_y})$ paylanma funksiyası baxılan halda belə normallaşma şərtinə tabe olur:

$$\frac{L_y}{2\pi\hbar} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_0(E_{nmP_y}) dP_y = N \quad (20)$$

Burada N – vahid həcmdə elektronların sayıdır, L_y - y oxu boyunca məftilin uzunluğudur.

Elektron-fonon qarşılıqlı təsirinin matris elementləri aşağıdakı kimi ifadə oluna bilər:

$$\langle n''m''P_y''|V_s|nmP_y\rangle = D_q \sqrt{N_q + \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}} \langle n''m''P_y''|e^{\pm iqr}|nmP_y\rangle \quad (21)$$

Deformasiya (DO-fononlar) və polyar optik (PO-fononlar) fononlar üçün elektron-fonon əlaqə sabiti aşağıdakı kimi verilir⁴:

$$|D_q|^2 = \frac{2\pi\hbar^2\alpha_L\omega_0}{m^*} \begin{cases} \sqrt{2m^*\hbar\omega_0}/q^2 - PO \\ 4\hbar^2/\sqrt{2m^*\hbar\omega_0} - DO \end{cases} \quad (22)$$

Burada α_L - ölçüsüz əlaqə sabitidir.

$\exp(\pm aP_x/\hbar)\Phi(x) = \Phi(x \pm a)$ sürüşmə operatorundan istifadə edərək elektron-fonon qarşılıqlı təsirinin matris elementləri hesablanmışdır.

Udulma əmsal α üçün ifadələr (19) elektron-foton qarşılıqlı təsir matris elementlərindən və (20) elektron-fonon qarşılıqlı matris

⁴Басс Ф. Г., Левинсон И. Б. Циклотронно-фононный резонанс в полупроводниках // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики, - 1965. 49, -с. 924.

elementlərindən, istifadə etməklə qiymətləndirilir. Asimmetrik parabolik potensiallı kvant məftillərdə zonadaxili optik udulma əmsalının piklərinin yerinin məhdudlaşdırıcı potensialın xarakterik tezliyindən asılılığı $N\omega_x + P\omega_y \pm \omega_0 = \Omega$ müəyyən edilmişdir.

Bu fəsilə həmçinin uzununa maqnit sahəsinin təsiri altında kvant daralmasında işığın udulması tədqiq edilmişdir. Müasir nanotexnologiya kvant məftillərdə onların qalınlığının fluktasiyası ilə əlaqəli olan təsadüfi sahənin mövcud olmasını istisna etmir. Qalınlığın qeyri-bircinsliyi mikrodaralmanın yaranmasına gətirib çıxarır. Nanostrukturların forma və ölçülərinin dəyişməsi spektral xassələrə əhəmiyyətli dərəcədə öz təsirini göstərir.

Mikrodaralmanın həndəsi formasının xüsusiyyətləri "kvant məftil-mikrodaralma" keçidində elektron spektrinin kardinal modifikasiyasında öz əksini tapır.

Kvant məftilin oxu boyunca tətbiq olunmuş H maqnit sahəsi, məlum olduğu kimi, lateral həndəsi konfaynmenti gücləndirir.

Uzununa maqnit sahəsində mikrodaralmada düz zonalararası işığın udulması tədqiq olunmuşdur. Mikrodaralma konfaynmentinin potensialı modeli kimi "yumşaq divar" potensialı götürülür:

$$V(x,y,z) = m^* (\omega_0^2 x^2 + \omega_0^2 y^2 - \omega_z^2 z^2) / 2 \quad (23)$$

burada z - mikrodaralma oxu istiqamətindəki koordinatdır; ω_z tezliyi mikrodaralmanın effektiv uzunluğu ilə müəyyən olunur $\omega_z = \sqrt{\hbar / (m^* L_z^2)}$; ω_0 – ikiölçülü harmonik ossilyatorun xarakterik tezliyidir. Mikrodaralmanın oxu boyunca istiqamətlənən A bircins maqnit sahəsinin vektor potensialı simmetrik kalibrovkada seçilib $\vec{A} = (-yB/2, xB/2, 0)$.

Birelektronlu hal üçün H_H Hamiltonu aşağıdakı aşağıdakı məlum ifadə kimi yazmaq olar

$$H_H = H_{\rho,\varphi} + H_z \quad (24)$$

harada ki

$$H_{\rho,\varphi} = -\frac{\hbar^2}{2m^*} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} - \frac{i\hbar\omega_H}{2} \frac{\partial}{\partial \varphi} + \frac{m^*}{8} \Omega^2 \rho^2 \right),$$

$$H_z = -\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{m^*}{2} \omega_z^2 z^2$$

$\Omega = \sqrt{4\omega_0^2 + \omega_C^2}$ -hibrid tezliyidir. ω_z tezliyi mikrodaralmanın

effektiv uzunluğu ilə müəyyən olunur $\omega_z = \sqrt{\hbar/(m^* L_z^2)}$

Hamiltonianın uyğun məxsusi funksiyası və məxsusi qiymətləri aşağıdakı məlum ifadə vasitəsilə verilir:

$$E_{n,m,\lambda} = \frac{\hbar\omega_B m}{2} + \frac{\hbar\Omega}{2} (2n + |m| + 1) + \hbar\omega_z \lambda, \quad (25)$$

$$\Psi_{n,m,\lambda}(\rho, \varphi, z) = \Psi_{n,m}(\rho, \varphi) \Psi_\lambda(z),$$

Burada $\Psi_{n,m}(\rho, \varphi)$ və $\Psi_\lambda(z)$ - uyğun olaraq $H_{\rho,\varphi}$ və H_z operatorlarının məxsusi funksiyalarıdır:

harada ki $n = 0, 1, 2, \dots, m$ - Landau səviyyələrinə uyğun olan kvant ədədləridir; $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, - maqnit kvant ədədidir.

Mikrodaralmada düz zonalar arası işığın udulmasına baxırıq. Bu udulmanın əmsalını hesablamaq üçün A.L. Efros və A.L. Efrosun məlum düsturundan istifadə edilmişdir⁵:

$$\alpha = A \sum_{v,v'} \left| \int \psi_v^e \psi_{v'}^h dr \right|^2 \times \delta(\Delta - E_v^e - E_{v'}^h) \quad (26)$$

burada $\Delta = \hbar\Omega - E_g$ E_g - massiv yarımkəçiricilərin qadağan olunmuş zonasının eni, A - Blox funksiyasından götürülmüş matris elementinin kvadratına proporsional kəmiyyətdir; v və v' - elektron və ağır dəşiklərə uyğun olan kvant ədədləridir. Burada δ vasitəsilə funksiya müvafiq keçidlər üçün enerjinin saxlanması qanununu ödəyir.

⁵Efros A. L. , Efros A. L. Interband absorption of light in a semiconductor sphere // Semiconductors, - 1982. 16, -p.772–775.

Düz zonalar arası işığın udulması əmsalını hesablayarkən Xille-Xardi düsturundan və Veber inteqralından istifadə olunub.

Mikrodaralmada işığın udulma əmsalının xarici maqnit sahəsinin intensivliyindən və mikrodaralma uzunluğundan asılılığı müəyyən olunmuşdur. "Mikrodaralma → kvant məftil" keçidinə baxılmışdır.

Dördüncü fəsildə Raşba spin-orbital qarşılıqlı təsiri nəzərə alınmaqla iki ölçülü elektron qazının xətti polyarlaşmasının zonadaxili udulması tədqiq olunub. Məlumdur ki, yarımkeçirici strukturlarda heterokeçidlərdəki kimi nümunənin parametrləri sərhəddə sıçrayışla dəyişirsə, belə asimmetriya struktur asimmetriyası adlanır və SIA (Structure Inversion Asymmetry) kimi yazılır. Bu baxımdan spin – orbital (SO) qarşılıqlı təsirində Raşba (E.İ.Raşba, 1960) Hamiltonu əlavə pay kimi iştirak edir və Oz oxu boyunca yönəlmiş $\nabla V(r)$ aşağıdakı kimi yazılır:

$$\hat{H}_R = \alpha(\hat{\sigma}_x \hat{p}_y - \hat{\sigma}_y \hat{p}_x)$$

Zeeman parçalanması və Raşba spin-orbital qarşılıqlı təsiri nəzərə alınmaqla sabit bircins perpendikulyar maqnit sahəsində ($H||O_z$) ikiölçülü sistemdə elektronun kvant-mexaniki hərəkətini təsvir edən Hamilton operatoru aşağıdakı kimi yazılır:

$$H = \frac{P^2}{2m^*} + \frac{a}{\hbar}(\sigma_x P_y - \sigma_y P_x) + \frac{1}{2}g\mu_B B \sigma_z \quad (27)$$

P – impuls operatoru, σ – Pauli matrisi, μ_B – Bor maqnetonu, α – Raşba spin-orbital qarşılıqlı təsiri sabiti, g – Lande faktoru, $\hbar$ – Plank sabitidir. Maqnit sahəsinin vektor potensialı üçün Landau (kalibri) $A=(0, H \cdot x, 0)$ götürülür. Məlumdur ki, bu halda, elektronun spektri cüt şəklində birləşmiş diskret səviyyələri təsvir edir:

$$E_n^\pm = \hbar\omega_c n \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\hbar\omega_c + 2g\mu_B H)^2 + \frac{8\alpha^2}{l_H^2} n} \quad (28)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots E_0^+ = (\hbar\omega_c / 2 + g\mu_B B),$$

Fotonların polyarizasiyası istiqamətini oX oxu boyunca götürsək, elektron-foton qarşılıqlı təsiri operatoru aşağıdakı kimi yazıla bilər:

$$H_R = -\frac{e}{m^* c} \left(P - \frac{eA}{c} \right) A_0 + \frac{ea}{c\hbar} \sigma_y A_0 \quad (29)$$

burada A_0 – fotonların həcmi konsentrasiyası ilə əlaqəli olan elektromaqnit dalğası amplitududur. Elektron-fonon qarşılıqlı təsirinin matris elementi aşağıdakı şəkil alır:

$$\left| \langle k'_y n' l' | V_s | k_y n l \rangle \right|^2 = C_j'^2 \delta_{k'_y, k_y \pm q_y} F_{nn'}^\pm(q_x q_y) \Lambda_{ll'}(q_z) \quad (30)$$

V_s – elektronun fononla qarşılıqlı təsirinin enerjisi operatoru, C_j – elektron və fonon arasındakı qarşılıqlı təsiri xarakterizə edən funksiyadır,

$$F_{nn'}^\pm(q_n) = \left| \langle \Psi_n(x, y) | e^{i(q_x x + q_y y)} | \Psi_{n'}(x, y) \rangle \right|^2 \quad (31)$$

burada $A_{ll'}(q_z)$ məlum ifadəsi belədir.

$$A_{ll'}(q_z) = \left| \frac{2}{d} \int_0^d dz \exp(iq_z z) \sin\left(\frac{l'\pi z}{d}\right) \sin\left(\frac{l\pi z}{d}\right) \right|^2$$

$$\int_0^\infty A_{ll'}(q_z) dq_z = \frac{2\pi}{d} \left(1 + \frac{1}{2} \delta_{ll'} \right)$$

Elektron foton qarşılıqlı təsirin matrisa elementinin və elektron-fonon qarşılıqlı təsirinin matris elementinin ifadələrindən istifadə edərək kvant çuxurlarda Raşba spin orbital qarşılıqlı təsir nəzərə almaqla sərbəst yükdaşıyıcılarla işığın udulma əmsalı hesablanmışdır. Müəyyən olunmuşdur ki, kvant çuxurlarda Raşba spin orbital qarşılıqlı təsiri nəzərə alındıqda səpilmə sürəti artdığından sərbəst yükdaşıyıcılarla işığın udulma əmsalı artır.

NƏTİCƏ

1. Maqnit sahəsi yarımkeçirici ifratqəfəsin səthinə perpendikulyar yönəldikdə ikinci tərtib həyacanlaşma nəzəriyyəsi cərcivəsində polyar və qeyri-polyar fononlardan səpilmə halında sərbəst yükdaşıyıcılarla işığın udulma əmsalının həm maqnit sahəsinin intensivliyindən, həm də düşən işığın tezliyindən asılı olaraq ossilyasiya etdiyi və rezonans şərtinin $N\omega_c = \Omega + \omega_0$ olduğu müəyyən edilmişdir.

2. Anizotrop parabolik potensialla məhdudlanan kvant nöqtələrdən ibarət ifratqəfələrdə polyar və qeyri-polyar fononlardan səpilməklə sərbəst yükdaşıyıcılar ilə elektromaqnit şüalanmasının udulma əmsalı işığın tezliyindən asılı olaraq ossilyasiya edir və udma əmsalının rezonans halı $N\omega_x + P\omega_y \pm \omega_0 = \Omega$ ifadəsi ilə veilir.

3. Müəyyən olunmuşdur ki, anizotrop parabolik potensiallı kvant nöqtəli ifratqəfələrdə cırlaşmamış elektron qazı halında, elektromaqnit dalğasının polarizasiya vektorunun məhdudlaşdırıcı potensial oxu istiqamətdə yönəldikdə elektron-foton qarşılıqlı təsirinin birinci tərtib həyacanlaşma nəzəriyyəsi cərcivəsində zonadaxili udulma qonşu alt səviyyələr arası olur.

4. Müəyyən edilmişdir ki, silindirik kvant məftildə sərbəst yükdaşıyıcıların akustik fononlardan səpilməsi ilə işığın udulma əmsalının məftilin en kəsiyinin artması ilə azalır.

5. Uzununa maqnit sahəsinin təsiri altında kvant daralmasında işığın zonalararası udulma əmsalı xarici maqnit sahəsinin intensivliyindən və mikrodaralma uzunluğundan asılılığı müəyyən olunmuşdur

6. Asimmetrik parabolik potensiallı kvant məftillərdə zonadaxili optik udulma əmsalının piklərinin yerinin məhdudlaşdırıcı potensialın xarakterik tezliyindən asılılığı $N\omega_x + P\omega_y \pm \omega_0 = \Omega$ müəyyən edilmişdir.

7. Kvant çuxurlarda Rasba spin orbital qarşılıqlı təsir nəzərə almaqla sərbəst yükdaşıyıcılarla işığın udulma əmsalı üçün analitik ifadə alınmışdır. Müəyyən olunmuşdur ki, kvant çuxurlarda Rasba

spin orbital qarşılıqlı təsiri nəzərə alındıqda səpilmə sürəti artdığından sərbəst yükdaşıyıcılarla işığın udulması artır.

DİSSERTASIYA MÖVZUSU ÜZRƏ ÇAP OLUNMUŞ ELMI İŞLƏR

1. Ibragimov, G.B., Abaszade, R.G., Ibayeva, R.Z. Intersubband magneto-absorption in semiconductor superlattices // IX meidzynarodowej naukow-i-practicnej konferencji, Nauka i Innovacija, - Polsha, Przemysl, -2013, -p. 10-13.
2. Ibragimov, G.B., Abaszade, R.G., Ibayeva, R.Z.. Intersubband absorption in semiconductor superlattices in magnetic field // Azerbaijan National Academy of Sciences, Transactions, Physics and Astronomy, - Baku: -2013. vol XXXIII, -p.10-12.
3. Ibragimov, G.B., Abaszade, R.G., Ibayeva, R.Z. Intraband optical absorption in semiconductor parabolic quantum well // 8th International Scientific Conference "Applied Sciences and technologies in the United States and Europe: common challenges and scientific findings", - New York, - 2014, -p. 90-93.
4. Ибаева, Р.З. Внутризонное поглощение электромагнитного излучения квантовыми наноструктурами с анизотропным параболическим потенциалом конфайнмента // BDU Fizika problemləri İnstitutu, VIII Respublika konfransı, -Baku, -24-25 dekabr, - 2014. -s.135-137.
5. Ibragimov, G.B., Abaszade, R.G., Ibayeva, R.Z. Indirect electronic transitions in quantum wells due to scattering of charge carriers by edge dislocations // XLVIII Школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния, - С.-Петербург, -2014, 10-15 марта, -стр. 164.
6. Ибрагимов, Г.Б. Ибаева, Р.З. Внутризонное оптическое поглощение в сверхрешетках из квантовых точек // Baki Universitetinin Xəbərləri, -2014. №4, - s. 94-100.

7. Ибрагимов, Г.Б. Ибаева, Р.З. Влияние спин-орбитальных взаимодействий Рашбы на внутризонное магнитопоглощение электромагнитного излучения двумерных электронов в полупроводниковых гетероструктурах // Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Xəbərləri, -2014. №5, -2014.- s. 7-10.
8. Ибрагимов, Г.Б. Ибаева, Р.З. Поглощения света в квантовом сужении в продольном магнитном поле // Academician G.B. Abdullayev Centenary International Conference and School Modern Trends in Condensed Matter Physics MTCMP, - 2018, -стр.88.
9. Ibrahimov, H.B., İbayeva, R. Z. Parabolik potensiallı kvant nöqtəli ifratqəfəslərdə optik udulma // Azərbaycan Texniki Universiteti, Uçun sənədli, – Bakı, -2018. №1, -стр.71-73.
10. Ибрагимов, Г.Б. Ибаева, Р.З. Поглощения света в квантовом сужении в продольном магнитном поле // Azerbaijan Journal of Physics, -Bakı: -2018. vol. XXIV, Number 03, -с. 172-173.
11. Ibrahimov, H.B., İbayeva, R. Z. Parabolik potensiallı kvant nöqtəli ifratqəfəslərdə optik udulma // “Energetika ixtisasları üzrə kadr hazırlığının aktual məsələləri” Respublika elmi konfransı, -Sumqayıt: -2019. -30-31 may, -s.79-80.
12. Ибрагимов, Г.Б. Ибаева, Р.З. Поглощение света свободными носителями заряда с участием фононов в анизотропной квантовой проволоке // “Energetika ixtisasları üzrə kadr hazırlığının aktual məsələləri” Respublika elmi konfransı, -Sumqayıt: -2019. -30-31 may, -s. 137-139.
13. İbayeva, R.Z. Yarımkəçirici ifratqəfəslərdə müxtəlif səpilmə mexanizmləri ilə işığın altzonadaxili udulması // Maqnitumşaq ərintilərin informasiya texnologiyalarında və hərbi sənayedə tətbiqi perspektivləri mövzusunda beynəlxalq elmi-praktik konfrans, Az.MİU, -Bakı: -2019. -09-10 oktyabr, s.59-62.

14. Ибаева, Р.З. ИК-поглощение свободными носителями зарядами с участием фононов в анизотропной квантовой проволоке // Sciences of Europe, -2019. v. 2, №35, -с.56-59.
15. İbayeva, R.Z. Yarımkəçirici ifratqəfəslərdə müxtəlif səpilmə mexanizmləri ilə işığın altzonadaxili udulması // AMEA Xəbərləri, -Bakı: -2019. volumeXXXIX, № 5, -s. 135-140.
16. Ibrahimov, H.B., İbayeva, R. Z. Theory of intraband absorption of electromagnetic radiation in cylindrical quantum wires // Journal of Non-Oxide Glasses, -Romania: - 2020. Vol. 12, No.4, -p. 31-34.
17. Ибрагимов, Г.Б. Ибаева, Р.З. Внутризонное поглощение электромагнитного излучения электронами с участием оптических фононов в сверхрешетках из квантовых точек // XIV International scientific conference " Advanced science", -2020. -23 september, -p. 10-13.
18. Ibrahimov, H.B., İbayeva, R. Z. Intraband optical absorbtion induced by Rashba spin-orbit coupling in two-dimensional electron gas // Инженерный вестник Дона, -Россия: -2020. №3, -с. 2007-2015.

Dissertasiyanın müdafiəsi 18 iyun 2021-ci il tarixində saat 1900-da Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası Fizika İnstitutunun nəzdində fəaliyyət göstərən ED 1.14 Dissertasiya şurasının iclasında keçiriləcək.

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

e-mail: director@physics.science.az

Dissertasiya ilə Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası Fizika İnstitutunun kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası Fizika İnstitutunun rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat 16 may 2021 il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 15.05.2021

Kağızın formatı: A5

Həcm: 36721

Tiraj: 100