

ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ
ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Ամիրխանյան Սերգեյ Մերուժանի

Քվանտային նանոշերտերի էլեկտրադինամիկական և սպինային
բնութագրերի տեսական հետազոտում

Ա.04.10 – «Կիսահաղորդիչների ֆիզիկա» մասնագիտությամբ
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական
աստիճանի հայցման ատենախոսության

Ս Ե Ղ Ս Ա Գ Ի Ր

ԵՐԵՎԱՆ – 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РА
ЕРЕВАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Амирханян Сергей Меружанович

Теоретическое исследование электродинамических и спиновых
характеристик квантовых нанослоёв

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико – математических наук
по специальности 01.04.10 – “Физика полупроводников”

ЕРЕВАН – 2017

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայ-Ռուսական համալսարանում

Գիտական ղեկավար՝

Ֆիզ.մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր
Հ.Ա. Սարգսյան, ՀՌՀ

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

Ֆիզ.մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր
Ա.Լ. Վարդանյան, ԵՊՀ ֆիզիկայի ֆակուլտետ
Ֆիզ.մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր
Ա.Ա. Սահարյան, ՀՀ ԳՊԿ

Առաջատար կազմակերպություն՝

ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի
ինստիտուտ

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա 2017թ. մայիսի 27-ին, ժամը 12⁰⁰-ին
Երևանի պետական համալսարանի ֆիզիկայի 049 մասնագիտական խորհրդի նիստում:
Հասցե՝ 0025, Երևան, Ա. Մանուկյան 1

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԵՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրը ցրված է 2017թ. ապրիլի 26-ին

Մասնագիտական խորհրդի
գիտական քարտուղար

Ֆիզ.մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր
Վ.Ս. Ղամբարյան

Тема диссертации утверждена в Российско-Армянском университете

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук, профессор
А.А. Саркисян, РАУ

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук, профессор
А.Л. Варданян, физический факультет ЕГУ
доктор физ.-мат. наук, профессор
А.А. Саарян, ГКН РА

Ведущая организация:

Институт радиопизики и электроники НАН РА

Защита диссертации состоится 27-го мая 2017г. в 12⁰⁰ часов на заседании
специализированного совета по физике 049 Ереванского государственного университета
по адресу: 0025, Ереван, ул. А. Манукяна 1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕГУ.

Автореферат разослан 26-го апреля 2017г.

Ученый секретарь
специализированного совета

доктор физ.-мат. наук, профессор
К.М. Гамбарян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Теоретическое описание физических характеристик КТ является одним из первых и важных этапов на пути создания наноэлектронных приборов нового поколения. Так как современные методы выращивания КТ позволяют получать нульмерные системы различных геометрических форм и размеров, то для каждой геометрии КТ приходится решать соответствующее уравнение Шрёдингера или Паули с учётом специфики граничных условий, а также физико-химических свойств как самой КТ, так и окружающей среды [1]. При этом на начальной стадии построения математической модели КТ возникает необходимость введения её ограничивающего потенциала, с учётом симметрии изучаемой системы, а также компонентного состава. Первый из указанных факторов определяет симметрию одночастичного гамильтониана, а второй профиль и высоту ограничивающего потенциала. Изначально рассматривались сравнительно простые геометрии КТ: сферическая и цилиндрическая (см. например [2,3]). Одной из пионерских работ, посвященной данной проблематике, является статья [2], в которой описываются электронные и экситонные состояния, а также оптическое поглощение в сферической КТ с непроницаемыми стенками. Эти системы и сейчас активно исследуются, свидетельством чего является большое количество недавно опубликованных работ по данной тематике (см. например [4,5]). Цилиндрические КТ впервые рассматривались в работе [3], где в приближении огибающих волновых функций вариационным методом произведён расчёт энергии основного состояния экситона в цилиндрической КТ. Физические свойства цилиндрических КТ рассмотрены также в недавних работах (см. например [6]). В дальнейшем были реализованы и всесторонне изучены КТ пирамидальной, эллипсоидальной, линзообразной, конической и т. д. форм (см. например [7]).

Сравнительно недавно удалось вырастить сферические и цилиндрические слоистые КТ типа ядро-оболочка (core/shell) и ядро-оболочка-оболочка (core/shell/shell) (см. например [8]). Наряду с чисто прикладным интересом подобные системы имеют очень важное фундаментальное значение, так как с их помощью можно проверить целый ряд основополагающих положений квантовой механики. Ярким примером сказанного является экспериментальное подтверждение эффекта

Ааронова-Бома для связанных состояний электрона в кольцеобразной структуре, обладающей топологией “выколотого центра” (см. например [9]). Другим ярким примером практической реализации известных квантовомеханических моделей является получение с помощью тонких сферических и цилиндрических нанослоёв, соответственно, пространственного и плоского ротаторов (см. например [10, 11]).

Наряду с исследованием электронных, кулоновских и оптических свойств КТ и нанослоев вызывает интерес исследование их спиновых и электродинамических характеристик. В частности, речь идёт о таких параметрах, как дипольный и квадрупольный моменты, диамагнитная восприимчивость, орбитальный ток и ток спинового магнитного момента, создаваемые электроном, локализованным в указанных системах. Исследованию этих характеристик и посвящена предлагаемая диссертационная работа.

Целью данной диссертации является теоретическое исследование электростатических мультиполей, создаваемых электроном в сферическом и цилиндрическом нанослоях, диамагнетизма примесного электрона в КТ и нанослоях сферической симметрий, а также изучение особенностей тока спинового магнитного момента в цилиндрическом нанослое.

Цель работы

1. Определение электростатических мультиполей, создаваемых электроном в узкозонных сферическом и цилиндрическом нанослоях.
2. Теоретическое исследование диамагнетизма примеси в сферическом нанослое.
3. Изучение особенностей тока спинового магнитного момента в цилиндрическом нанослое.

Научная новизна

1. Для узкозонных сферического и цилиндрического нанослоёв *InSb* с учётом непараболичности закона дисперсии носителей заряда, определены дипольные и квадрупольные поправки к значениям потенциала и напряжённости электрического поля, создаваемого локализованным в них электроном.
2. Для примеси, находящейся в состояниях $1s$ и $2s$, локализованной в сферическом нанослое с ограничивающим потенциалом Кратцера, получены точные аналитические выражения для диамагнитной восприимчивости.

3. Выявлен характер поведения тока спинового магнитного момента для электрона, локализованного в цилиндрическом нанослое при наличии внешнего магнитного поля.

Научная и практическая ценность

Результаты, полученные в диссертационной работе, имеют как академический интерес, так и практический. Они могут быть использованы для стимулирования экспериментов, выявляющих спиновые и электродинамические характеристики слоистых наноструктур сферической и цилиндрической симметрий, а также могут быть полезны при конструировании полупроводниковых приборов нового поколения.

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Абсолютные значения квадрупольного момента электрона, локализованного в узкозонных сферическом и цилиндрическом нанослоях, увеличиваются с ростом как внутреннего, так и внешнего радиусов.

2. С уменьшением точки минимума r_0 ограничивающего потенциала Кратцера, характер кривой зависимости диамагнитной восприимчивости $\chi_{dia}(r_0)$ носит немонотонный характер и имеет точку максимума, которой соответствует квантовый выброс электрона из нанослоя во внешнюю среду.

3. Для электрона, локализованного в цилиндрическом нанослое, находящемся в магнитном поле, существуют значения радиусов “вращения” $\rho_m = \sqrt{2|m|}a_M$ (m – магнитное квантовое число, a_M – магнитная длина), при которых орбитальный ток полностью гасится и остаётся только ток спинового магнитного момента. При этом данный ток в зависимости от радиальной координаты имеет немонотонный характер поведения.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы обсуждались на научных семинарах РАУ, а также докладывались на следующих научных конференциях:

- Международный аспирантский форум РАУ, 2013.
- 3rd International Symposium “Optics and its Applications” (OPTICS-2015) Yerevan-Ashtarak, Armenia October 1-5, 2015.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 6 работ. Список приводится в конце автореферата.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка использованной литературы. Текст изложен на 109 страницах, содержит 46 рисунков и 1 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение диссертации посвящено обзору научной литературы, охватывающей тематику диссертационной работы. Представлены цель, научная новизна и основные положения диссертации.

В первой главе диссертации определены вклады дипольного и квадрупольного моментов в выражения для электростатических потенциалов, создаваемых электроном, локализованным в узкозонных сферическом и цилиндрическом нанослоях, а также сферической КТ из *InSb*. При этом нами учитывается, что закон дисперсии электрона является непараболическим и описывается в рамках двухзонной зеркальной модели Кейна, когда зависимость энергии от импульса по форме аналогична релятивистской [12]:

$$E = \sqrt{P^2 s^2 + \mu^2 s^4} - \mu s^2,$$

где s – параметр непараболичности ($s = 10^8$ см/с), μ – эффективная масса электрона ($\mu = 0,018m_0, m_0$ – масса свободного электрона).

В параграфе 1.1 представлен обзор научной литературы, посвященной исследованию физических свойств КТ и слоистых наноструктур сферической и цилиндрической симметрий как в отсутствие, так и при наличии внешних полей. Приводится обоснование возможности использования подобных структур в полупроводниковых приборах нового поколения, таких, как одноэлектронные транзисторы.

В параграфе 1.2 вычислены компоненты дипольного и квадрупольного моментов в сферическом нанослое и КТ из *InSb*. Для сферического нанослоя выявлена зависимость z -компоненты квадрупольного момента от геометрических

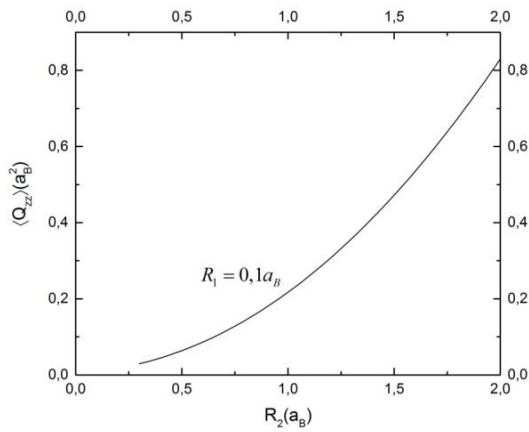
параметров структуры, а также характер электростатического потенциала и напряжённости электрического поля. С учётом симметрии рассматриваемой задачи показано, что компоненты среднего значения дипольного момента равны нулю:

$$\langle P_x \rangle = \langle P_y \rangle = \langle P_z \rangle = 0. \quad (1)$$

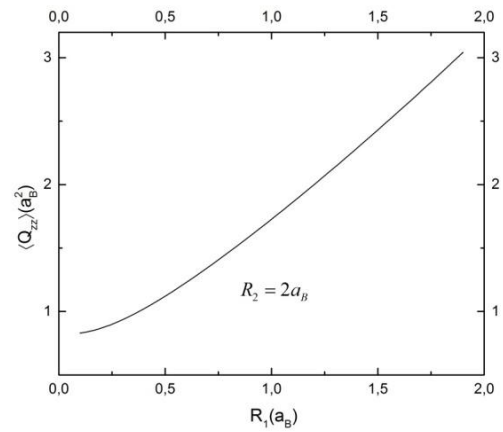
В свою очередь, для компонент тензора среднего значения квадрупольного момента справедливо соотношение:

$$\langle Q_{xx} \rangle = \langle Q_{yy} \rangle = -\frac{1}{2} \langle Q_{zz} \rangle. \quad (2)$$

Используя выражения для волновых функций, найденных из стационарного уравнения Клейна-Гордона, для z -компоненты $\langle Q_{zz} \rangle$ получено соответствующее аналитическое выражение. В частности, выявлена зависимость $\langle Q_{zz} \rangle$ от геометрических параметров сферического нанослоя для состояний с $l=1$ (l – орбитальное квантовое число) при произвольных значениях магнитного квантового числа m . На рис. 1 приведены зависимости $\langle Q_{zz} \rangle$ от геометрических параметров нанослоя. Как следует из рисунков, при увеличении как R_1 , так и R_2 для $m=0$ происходит увеличение квадрупольного момента по абсолютному значению, что является следствием удаления области наиболее вероятной локализации электрона от геометрического центра системы. Для состояния $m=0$ зенитное распределение электронной волновой функции, характеризуемое орбитальным квантовым числом $l=1$, преобладает над азимутальным, характеризуемым магнитным квантовым числом $m=0$. В этом случае для электронной оболочки реализуется так называемая конфигурация вытянутого сфероида вращения и, по аналогии с теорией атомного ядра [13], квадрупольный момент получается положительным. Аналогичные зависимости приведены для состояния $m=\pm 1$, из которых видно, что имеет место обратная картина и реализуется конфигурация сплюснутого эллипсоида, что приводит к отрицательным значениям $\langle Q_{zz} \rangle$.



(a)



(б)

Рис. 1. Зависимость квадрупольного момента электрона **(а)** от внешнего радиуса при постоянном значении внутреннего радиуса равном $R_1 = 0.1a_B$ и **(б)** от внутреннего радиуса при постоянном значении внешнего радиуса равном $R_2 = 2a_B$ для состояния $n = 1$ (главное квантовое число), $l = 1$, $m = 0$.

Получено аналитическое выражение, характеризующее зависимость электростатического потенциала $\varphi(r)$, а также напряженности $E(r)$ электрического поля от радиальной координаты

В параграфе 1.3 рассматривается задача нахождения зависимости электростатических мультиполей электрона, локализованного в цилиндрическом core/shell нанослое из *InSb*. При этом на структуру воздействует внешнее магнитное поле, калибровка векторного потенциала которого в цилиндрических координатах выбрана, как $\vec{A} = \left\{ A_\rho = A_z = 0, A_\varphi = \frac{B\rho}{2} \right\}$, где \vec{B} – вектор напряжённости магнитного поля, ρ – радиальная координата. Показано, что в данном случае также имеют место соотношения (1) и (2), однако соответствующее значение $\langle Q_{zz} \rangle$ необходимо теперь вычислить в цилиндрических координатах. Построены зависимости квадрупольного момента от параметров нанослоя, а также зависимости потенциала электростатического поля и его напряжённости от радиальной координаты.

Вторая глава диссертации посвящена описанию диамагнитных свойств примеси, расположенной в центре сферического нанослоя с ограничивающим потенциалом Кратцера, а также в сферической КТ с параболическим ограничивающим потенциалом.

В параграфе 2.1 приведен обзор литературы, посвящённой изучению водородоподобных систем в квантовых наноструктурах различных геометрических форм. Особое внимание уделено роли гидростатического давления, как метода манипуляции энергетическими и оптическими характеристиками наноструктур, а также исследованию диамагнитных свойств электронного газа и примесных систем в выше указанных системах.

В параграфе 2.2 определяется диамагнитная восприимчивость примесного электрона, локализованного в сферическом нанослое из **GaAs** с кратцеровским потенциалом ограничения:

$$V_{conf}(r) = \frac{\alpha}{r^2} - \frac{\beta}{r} + U_0, \quad (3)$$

где $\alpha = U_0 r_0^2$ (U_0 – высота потенциала), $\beta = 2U_0 r_0$.

Предполагается, что система находится во внешнем магнитном поле \vec{B} . Найдены аналитические выражения для диамагнитной восприимчивости, когда примесь находится соответственно в 1s и 2s состояниях. Выявлена зависимость диамагнитной восприимчивости от высоты кратцеровского потенциала U_0 , внешнего гидростатического давления, а также координаты минимума потенциала r_0 . Для 1s и 2s состояний получены аналитические выражения для диамагнитной восприимчивости, имеющие вид:

$$\chi_{dia}^{0,l'_0} = -\frac{e^2}{3\mu c^2} \frac{l'_0(2l'_0+1)}{(2\gamma_0)^2}, \quad (4)$$

$$\chi_{dia}^{1,l'_0} = -\frac{e^2}{3\mu c^2} \frac{l'_0(2l'_0+1)(l'^2_0+7l'_0+9)}{(2\gamma_1)^2(l'_0+2)(l'_0+3/2)}, \quad (5)$$

где $l'_0 = \frac{1}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{8\mu\alpha}{\hbar^2}} \right)$, $\kappa = \frac{e'^2 \mu}{\gamma \hbar^2}$, $\frac{2\mu(E-U_0)}{\hbar^2} = -\gamma^2$, $e'^2 = \beta + \frac{e^2}{\varepsilon}$,

$-n_r = l' + 1 - \kappa$ – радиальное квантовое число, n – главное квантовое число, ε – диэлектрическая проницаемость нанослоя. С учётом зависимости эффективной массы электрона, диэлектрической проницаемости среды и параметров нанослоя от давления, построены зависимости диамагнитной восприимчивости примесного электрона от параметра r_0 при различных значениях гидростатического

давления. В частности, для состояния $2s$ на рис. 2 приведена указанная выше зависимость. При этом диамагнитная восприимчивость возрастает (по модулю убывает) до определенного критического значения, после чего, с увеличением r_0 , начинает убывать (по модулю возрастает). Изменение хода кривой диамагнитной восприимчивости с уменьшением параметра r_0 обусловлено квантовым выбросом электрона из КТ во внешнюю окружающую среду.

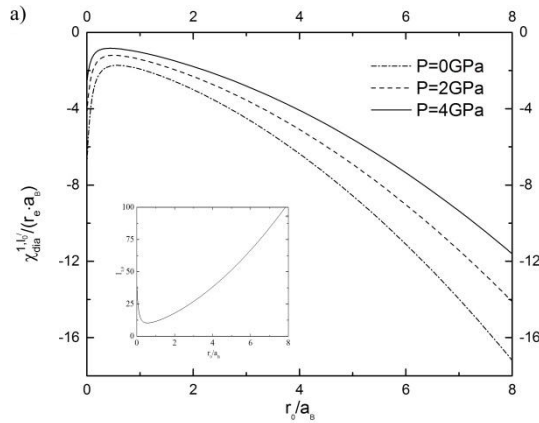


Рис. 2. Зависимость диамагнитной восприимчивости $\chi_{dia}^{1,l_0'}$ от параметра r_0 для различных значений гидростатического давления для состояния $2s$.

Аналогичные зависимости для состояния $1s$ также приведены. Отметим, что при прочих равных условиях абсолютные значения $\chi_{dia}^{2,l_0'}$ для $2s$ состояния превосходят значения для $1s$ состояния в связи с большей областью локализации электрона в $2s$ состоянии.

В параграфе 2.3 исследована диамагнитная восприимчивость примесного электрона в сферической КТ с параболическим потенциалом ограничения:

$$V_{conf}(r) = \frac{\mu\omega^2 r^2}{2}, \quad (6)$$

где ω – частота ограничивающего потенциала. На основе вариационного метода получено аналитическое выражение для волновой функции, соответствующей невозмущённому гамильтониану данной задачи и определена диамагнитная восприимчивость системы.

Показано, что при больших значениях эффективного радиуса КТ реализуется случай примесного электрона в массивном образце и, следовательно, диамагнитная восприимчивость стремится к постоянному значению. В случае кратцеоровского

потенциала ограничения подобной картины не наблюдается, так как с увеличением внешнего радиуса R_2 нанослая примесный электрон постоянно ощущает влияние внутренней бесконечно высокой стенки потенциала ограничения.

Третья глава диссертации посвящена исследованию особенностей незатухающего орбитального тока и тока спинового магнитного момента электрона в слоистых наноструктурах и КТ сферической и цилиндрической геометрий.

В параграфе 3.1 представлен обзор литературы, посвящённой исследованию спиновых характеристик КТ, в частности, тока спинового магнитного момента.

Общее квантомеханическое выражение для тока, создаваемого электроном в магнитном поле имеет вид [14]:

$$\mathbf{j} = -\frac{ie\hbar}{2m_0} \left[\left(\nabla \Psi^* \right) \Psi - \Psi^* \nabla \Psi \right] - \frac{e^2}{m_0 c^2} \mathbf{A} \Psi^* \Psi + \mu_B \text{crot} \left(\Psi^* \hat{\boldsymbol{\sigma}} \Psi \right), \quad (7)$$

где $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_0 c}$ – магнетон Бора, \mathbf{A} – вектор-потенциал напряжённости магнитного

поля, $\hat{\boldsymbol{\sigma}}$ – матрицы Паули. Первый член в этом выражении есть незатухающий орбитальный ток \mathbf{j}_{Orb} . Второй член характеризует вклад внешнего магнитного поля в орбитальный ток. Последний член в (7) называется током спинового магнитного момента \mathbf{j}_{SMM} . Ток спинового магнитного момента не связан с перемещением заряда частицы, а обусловлен наличием собственного магнитного момента у электрона (μ_B) и, подобно току смещения в уравнениях Максвелла, свидетельствует о наличии ненулевого тока даже при отсутствии движущихся зарядов.

В параграфе 3.2 обсуждается поведение электрона в цилиндрическом нанослое. Калибровку вектор-потенциала \mathbf{A} внешнего, однородного магнитного поля, направленного вдоль оси z , выберем так же, как и в параграфе 1.3. После соответствующих расчётов окончательные выражения для компонент орбитального тока можно записать, как:

$$\left(\mathbf{j}_{Orb} \right)_\rho = 0, \left(\mathbf{j}_{Orb} \right)_z = 0, \left(\mathbf{j}_{Orb} \right)_\varphi = \left(\frac{e\hbar m}{\mu\rho} - \frac{e^2 B}{2\mu c} \rho \right) |g(\rho, \varphi)|^2 |f(z)|^2. \quad (8)$$

Как видно, $\left(\mathbf{j}_{Orb} \right)_\varphi$ имеет две компоненты. Первый член характеризует ток, обусловленный орбитальным движением электрона с магнитным квантовым числом

m . В свою очередь, второй член это циклотронная часть тока ($\frac{eB}{\mu c}$ – циклотронная частота электрона), описывающая вклад магнитного поля в $(\dot{j}_{Orb})_\varphi$.

Из (8) следует, что при значениях радиальной координаты электрона, равных $\rho_m = \sqrt{2|m|}a_c$, происходит обнуление \dot{j}_{Orb} . Это связано с тем, что при таких значениях ρ имеет место следующее равенство: $-\frac{|e|hm}{\mu\rho} = \frac{e^2B}{2\mu c}\rho$. Для его выполнения должно

быть удовлетворено одно из следующих двух условий:

1) $m > 0$ и $\vec{B} \uparrow \downarrow O_z$, последнее означает, что \vec{B} имеет противоположное по отношению к оси O_z направление.

2) $m < 0$ и $\vec{B} \uparrow \uparrow O_z$ – наоборот, \vec{B} имеет с осью O_z одинаковое направление.

Таким образом, с увеличением ρ вклад энергии, обусловленный угловым моментом, уменьшается, однако, в то же время растёт вклад энергии циклотронного вращения. Для радиусов больших, чем ρ_m направление вращения главным образом становится обусловленным магнитным полем \vec{B} .

Производя вычисления для ρ , φ и z -компонент плотности тока спинового магнитного момента, можно записать:

$$\left(\dot{j}_{SMM}\right)_\rho = 0, \left(\dot{j}_{SMM}\right)_z = 0, \left(\dot{j}_{SMM}\right)_\varphi = -2\mu_B^*cs_z \frac{\partial}{\partial\rho}|g|^2|f|^2. \quad (9)$$

С учётом выше приведённых расчётов для плотности полного тока можно записать:

$$\left(\dot{j}_{tot}\right)_\varphi = \left(\frac{ehm}{\mu\rho} - \frac{e^2B}{2\mu c}\rho\right)|g|^2|f|^2 - 2\mu^*cs_z \frac{\partial}{\partial\rho}|g|^2|f|^2. \quad (10)$$

Отметим, что в выражениях как для орбитального тока, так и тока спинового магнитного момента наличие квантования вдоль O_z -направления выражается присутствием фактора $|f|^2$. Поэтому, для одного и того же значения ρ ток будет иметь различные значения, в зависимости от того в какой именно плоскости $z = const$ он рассматривается. На рис. 3 изображена зависимость плотности тока спинового

магнитного момента от радиальной координаты. Как можно видеть, j_{SMM}^z имеет немонотонный характер.

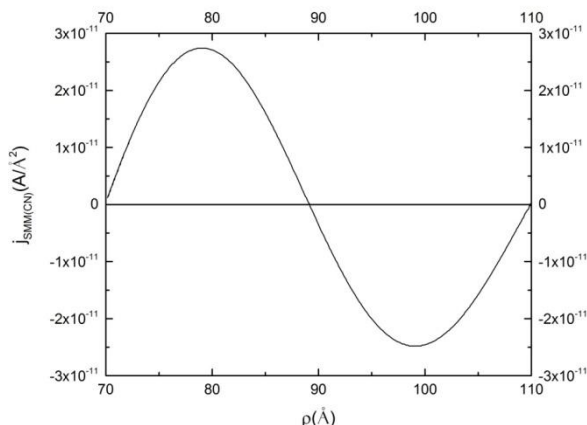


Рис. 3. Зависимость плотности тока спинового магнитного момента от радиальной координаты для квантового цилиндрического нанослоя при $\vec{B} = 10^4 Oe$.

В параграфе 3.3 аналогичная предыдущему параграфу задача обсуждается для цилиндрической КТ. Приведены зависимости волновой функции, орбитального тока, тока спинового магнитного момента и полного тока от радиальной координаты.

В параграфе 3.4 рассмотрен ток спинового магнитного момента, создаваемый электроном, локализованным в сферической КТ. Приведено выражение для радиальной волновой функции в состоянии $l = 0$ и проанализирована её зависимость от радиальной координаты. Найдено аналитическое выражение для тока спинового магнитного момента.

В параграфе 3.5 вычисляется ток спинового магнитного момента примесного электрона в том случае, когда примесь локализована в центре КТ. Гамильтониан данной системы был рассмотрен в работе [15], где подчёркивалось, что в зависимости от значения радиуса КТ полная энергия системы может быть как больше нуля, так и меньше, а также равна нулю ($E > 0$, $E < 0$, $E = 0$). Для каждой из областей даны выражения для волновых функций и спектров энергии. Найдено значение радиуса, при котором происходит обнуление энергии, которое равно $R_0 = 1,8325a_B^*$. Таким образом, при больших радиусах КТ энергия электрона принимает только отрицательные значения, а при радиусах меньших, чем $1.8325a_B^*$, положительные. Построены зависимости волновой функции электрона в состоянии $l = 0$ от

радиальной координаты для различных значений радиуса КТ. Выявлены зависимости токов спинового магнитного момента для состояния $l = 0$.

Анализ поведения тока спинового магнитного момента электрона в сферической КТ при наличии примеси и в ее отсутствие показывает, что при одинаковом радиусе КТ ($R = a_B$) максимальное значение тока в случае наличия примеси почти в 2.5 раза больше, чем для КТ без примесного центра. Последнее объясняется тем, что градиент радиальной волновой функции примесного электрона проявляет себя ярче, так как его локализация электрона обусловлена как кулоновским центром, так и стенками КТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Для узкозонных цилиндрического и сферического нанослоев из *InSb*, с учётом кейновского закона дисперсии носителей заряда, вычислены дипольные и квадрупольные поправки к значениям поля создаваемого электроном, локализованным в указанных системах. Показано, что дипольные поправки в обоих случаях равны нулю. Получены выражения для квадрупольных поправок. Даны условия, при которых эти поправки имеют положительный знак, когда конфигурация электронной оболочки имеет вид вытянутого сфероида, а также отрицательный – когда конфигурация электронной оболочки соответствует сплюснутому сфероиду. Для указанных случаев вычислены потенциалы, а также напряженности электрических полей на больших расстояниях от нанослоев.

2) Получены аналитические выражения для диамагнитной восприимчивости примесного электрона χ_{dia} в $Ga_{1-x_1}Al_{x_1}As/GaAs/Ga_{1-x_2}Al_{x_2}As$ core/shell/shell структуре с кратцеровским потенциалом ограничения, когда примесь локализована в центре наноструктуры. Показано, что при уменьшении параметра потенциала r_0 , существует пороговое значение этого параметра, начиная с которого диамагнитная восприимчивость резко возрастает, что является следствием квантового выброса примесного электрона из нанослоя во внешнюю среду. Зависимость диамагнитной восприимчивости от высоты потенциала U_0 показывает уменьшение χ_{dia} с ростом U_0 .

3) Исследованы орбитальный ток и ток спинового магнитного момента электрона в цилиндрическом нанослое. Выявлены условия при которых основной

вклад в полный ток обусловлен исключительно током спинового магнитного момента. В частности, определены радиусы “вращения” электрона при которых орбитальный ток становится равным нулю. Показано, что ток спинового магнитного момента имеет как немонотонный, так и знакопеременный характер в зависимости от радиальной координаты.

4) Получены зависимости токов спинового магнитного момента примесного электрона в сферической КТ от радиальной координаты при различных радиусах КТ. Показано, что при больших радиусах (область отрицательной энергии электрона) эта зависимость с увеличением радиуса практически не меняется, приобретая характер, присущий зависимости тока спинового магнитного момента электрона в водородоподобном атоме, что свидетельствует об ослаблении эффекта размерного квантования. При малых радиусах КТ (область положительной энергии), наоборот, влияние стенок преобладает над кулоновским влиянием со стороны примеси, что в свою очередь приводит к более ярко выраженной зависимости тока спинового магнитного момента электрона от радиальной координаты.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Э. М. Казарян, С. Г. Петросян. *Физические основы полупроводниковой наноэлектроники (на армянском языке)*. Изд. РАУ, Ереван, 2005.
2. Al. L. Efros and A. L. Efros. Interband absorption of light in a semiconductor sphere. *Sov. Phys. Semicond*, Volume 16, Issue 772, 1982.
3. S. Le Goff and B. Stebe. Binding energy of excitons in cylindrical quantum dots. *Solid State Commun.*, Volume 83, Issue 555, 1992.
4. V. Holovatsky, O. Voitsekhivska and I. Bernik. Oscillator strengths of quantum transitions in spherical quantum dot GaAs/Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Al_xGa_{1-x}As with on-center donor impurity. *Acta Phys. Pol. A*, Volume 125, Issue 1, pp. 93–97, 2014.
5. S. Yu. Kruchinin, I. D. Rukhlenko, A. S. Baimuratov, M. Yu. Leonov, V. K. Turkov, Yu. K. Gun'ko, A. V. Baranov and A. V. Fedorov. Photoluminescence of a quantum-dot molecule. *Journal of Applied Physics*, Volume 117, Issue 1, 2015.

6. V. Moldoveanu, I. V. Dinu, R. Dragomir and B. Tanatar. Light-hole exciton mixing and dynamics in Mn-doped quantum dots. *Physical Review B*, Volume 93, Issue 16, 2016.
7. Y. Zhang, X. Han, J. Zhang, Y. Liu, H. Huang, H. Ming, Sh. Lee and Zh. Kang. *Nanoscale*, Volume 4, 2012.
8. Y. Yao, J. Yao, V. K. Narasimhan, Z. R., Ch. Xie, Sh. Fan and Yi Cui. Broadband light management using low-Q whispering gallery modes in spherical nanoshells. *Nature Communications*, Volume 3, 2012.
9. A. Lorke, R. J. Luyken, A. O. Govorov, J. P. Kotthaus, J. M. Garcia and P. M. Petroff. Spectroscopy of nanoscopic semiconductor rings. *Physical Review Letters*, Volume 84, 2000.
10. T. Chakraborty and P. Pietilainen. Interacting-electron states and the persistent current in a quantum ring. *Solid State Commun.*, Volume 87, pp. 809–812, 1993.
11. E. M. Kazaryan, A. A. Kostanyan, H. A. Sarkisyan. Interband transitions in a spherical quantum layer in the presence of an electric field: Spherical rotator model. *Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences)*, Volume 42, Issue 4, pp. 145–150, 2007.
12. И. М. Цидильковский. *Электроны и дырки в полупроводниках: Энергетический спектр и динамика*. Наука, Москва, 1972.
13. А. С. Давыдов. *Теория атомного ядра*. Государственное издательство физико-математической литературы, Москва, 1958.
14. А. С. Давыдов. *Квантовая механика*. Наука, Москва, 1973.
15. D. S. Chuu, C. M. Hsiao and W. N. Mei. Hydrogenic impurity states in quantum dots and quantum wires. *Physical Review B*, Volume 46, 1992.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. С. М. Амирханян. Ток спинового магнитного момента электрона в сферической квантовой точке. *Вестник РАН*, №2, с. 51–60, 2013.
2. N. G. Aghekyan, S. M. Amirkhanyan, E. M. Kazaryan and H. A. Sarkisyan. Spin magnetic moment and persistent orbital currents in cylindrical nanolayer. *Superlattices and Microstructures*, Volume 69, pp. 87–98, 2014.

3. S. M. Amirkhanyan, E. M. Kazaryan and H. A. Sarkisyan. Spin magnetic moment current of impurity electron in a spherical quantum dot. *Journal of Contemporary Physics* (Armenian Academy of Sciences), Volume 49, Issue 6, pp. 264–271, 2014. (С. М. Амирханян, Э. М. Казарян, А. А. Саркисян. Ток спинового магнитного момента примесного электрона в сферической квантовой точке. *Известия НАН Армении, Физика*, т. 49, №6, с. 400–409, 2014).
4. S. M. Amirkhanyan, E. M. Kazaryan, H. A. Sarkisyan. Calculation of electrostatic multipoles of electron localized in narrow-band InSb spherical nanolayer. *Journal of Contemporary Physics* (Armenian Academy of Sciences) , Volume 50, Issue 3, 2015. (С. М. Амирханян, Э. М. Казарян, А. А. Саркисян. Вычисление электростатических мультиполей электрона, локализованного в узкозонном сферическом наносле InSb. *Известия НАН Армении, Физика*, т. 50, №3, с. 357–367, 2015).
5. S. M. Amirkhanyan, E. M. Kazaryan and H. A. Sarkisyan. Electrostatic multipoles created by electron localized in narrow-band cylindrical nanolayer. *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 673, 2016.
6. D. B. Hayrapetyan, S. M. Amirkhanyan, E. M. Kazaryan and H.A. Sarkisyan. Effect of hydrostatic pressure on diamagnetic susceptibility of hydrogenic donor impurity in core/shell/shell spherical quantum Dot with Kratzer confining potential. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, Volume 84, pp. 367–371, 2016.

Ամփոփագիր

Վերջին տարիներին, կապված գնդային և գլանային կվանտային նանոշերտերի էքսպերիմենտալ իրագործման հետ, կտրուկ աճել է այդ համակարգերի տեսական հետազոտման նկատմամբ հետաքրքրությունը: Նման հետազոտություններն արդիական են ինչպես ակադեմիական, այնպես էլ կիրառական տեսանկյուններով: Ակադեմիական հետաքրքրությունը պայմանավորված է նրանով, որ նշված կառուցվածքները թույլ են տալիս ստուգել քվանտային մեխանիկայի մի շարք հիմնարար դրույթներ: Իսկ արակտիկ առումով նրանք հետաքրքիր են նրանով, որ ամենալայն կիրառումն են ստանում նոր սերնդի կիսահաղորդչային սարքավորումներում:

Նանոշերտերի համար ստացվող արդյունքներն ունեն ընդհանրացնող բնույթ, քանզի սահմանային անցումների միջոցով հնարավոր է այդ համակարգերից ստանալ ինչպես գնդային և գլանային համաչափության ՔԿ-եր, այնպես էլ քվանտային լարեր (ՔԼ) և քվանտային փոսեր (ՔՓ): Ներկայացվող ատենախոսությունը նվիրված է գնդային և գլանային նանոշերտերում գտնվող էլեկտրոնի կողմից ստեղծվող էլեկտրաստատիկ մոլեկուլների, գնդային նանոշերտում և ՔԿ-ում գտնվող խառնուկային էլեկտրոնի դիամագնիսականության, ինչպես նաև գլանային նանոշերտում և “խառնուկ-գնդային-ՔԿ” համակարգում գտնվող էլեկտրոնի սպինային մագնիսական մոմենտի հոսանքի տեսական հետազոտմանը:

- *InSb* նեղգոտիական գնդային և գլանային նանոշերտերում, հաշվի առնելով Կեյնի դիսպերսիայի օրենքը, լիցքակիրների համար հաշվված են դիպոլային և քվադրոլային ուղղումները նշված կառուցվածքներում առկա էլեկտրոնի ստեղծած դաշտի համար: Ցույց է տրված, որ երկու դեպքում էլ դիպոլային ուղղումները հավասար են զրոյի: Ստացված են արտահայտություններ քվադրոլային ուղղումների համար: Նշված են այն պայմանները, որոնց դեպքում այդ ուղղումներն ունեն դրական նշան և էլեկտրոնային թաղանթն ունի ձգված սֆերոիդի տեսք, ինչպես նաև այն պայմանները, երբ ուղղումները բացասական են, և վերջինս համապատասխանում է սեղմված սֆերոիդին: Այդ դեպքերի համար հաշվված են էլեկտրական դաշտի պոտենցիալները և լարվածությունները մեծ հեռավորությունների վրա:

- Կրաոցերի սահմանափակող պոտենցիալով $Ga_{1-x_1}Al_{x_1}As/GaAs/Ga_{1-x_2}Al_{x_2}As$ core/shell/shell կառուցվածքում գտնվող խառնուկային էլեկտրոնի համար ստացված են χ_{dia} դիամագնիսական ընկալունակության վերլուծական

արտահայտու թյ ու ն ն եր, երբ խառնուկը նանոկառուցվածքի կենտրոնում է: Տույց է տրված, որ պոտենցիալի r_0 պարամետրի նվազման դեպքում գոյություն ունի վերջինիս սահմանային արժեք, որից հետո դիամագնիսական ընկալ ու նակոթյ ու նը կտրուկ աճում է, ինչը նանոշերտից դեպի արտաքին միջավայր էլեկտրոնի քվանտային արտանետման հետևանք է: Դիամագնիսական ընկալ ու նակոթյ ան կախվածությ ու նն U_0 -ից արտահայտվում է χ_{dia} -ի նվազմամբ՝ փոսի U_0 բարձրության աճմանը զուգընթաց:

- Չեռազոտված են գլանային նանոշերտում էլեկտրոնի ուղեծրային և սպինային մագնիսական մոմենտի հոսանքները: Բացահայտված են այն պայմանները, որոնց ժամանակ ամբողջ հոսանքը պայմանավորված է բացառապես սպինային մագնիսական մոմենտով: Մասնավորապես, որոշված են էլեկտրոնի պոտման այն շառավիղների արժեքները, որոնց դեպքում ուղեծրային հոսանքը գրոյանում է: Տույց է տրված, որ սպինային մագնիսական մոմենտի հոսանքն ունի ոչ մոնոտոն բնույթ՝ կախված շառավղային կոորդինատից:

- Ստացված են գնդային ք4-ում խառնուկային էլեկտրոնի սպինային մագնիսական մոմենտի հոսանքի կախվածությ ու նները շառավղային կոորդինատից տարբեր շառավիղների համար: Տույց է տրված, որ մեծ շառավիղների համար (բացասական էներգիաների տիրույթ) այդ կախվածությ ու նը շառավղի մեծացմամբ գործնականորեն չի փոխվում՝ ձեռք բերելով ջրածնանման ատոմում էլեկտրոնի սպինային մագնիսական մոմենտի հոսանքին բնորոշ պահվածք, ինչը վկայում է չափային քվանտացման երևույթի թուլացման մասին: Փոքր շառավիղների դեպքում (դրական էներգիաների տիրույթ), հակառակը, պատերի ազդեցությ ու նը գերազանցում է կոլլոնյան ազդեցությ ու նը խառնուկի կողմից, ինչն իր հերթին հանգեցնում է սպինային մագնիսական մոմենտի

հոսանքի ավելի վառ արտահայտված կախվածությունը
շահավղային կոորդինատից:

SUMMARY

In recent years, due to the experimental realization of the spherical and cylindrical nanolayers especially increased the interest in the theoretical investigation of these structures. The academic importance of these investigations caused by the fact that these structures allows to check the fundamental terms of quantum mechanics. These investigations have practical importance as well such structures can be widely applied in the design of the new generation semiconductor devices. The results obtained for nanolayers has generalizing character, because with the corresponding limiting transition from these systems can be realized quantum dots, quantum wells and quantum wires of spherical and cylindrical symmetries. As of today, the electronic and optical properties of quantum nanolayers are studied good enough, and there is strong interest in studying of electrodynamical and spin characteristics of these structures.

The presented dissertation is devoted to theoretical investigation of the electrostatic multipoles created by electron in the spherical and cylindrical nanolayers, the diamagnetism of impurity electron in spherical QD and nanolayer, and the spin magnetic moment current in the cylindrical nanolayer and in the system of “impurity-spherical QD”.

- The dipole and quadrupole corrections of the field created by electron localized in the narrow-band *InSb* spherical and cylindrical nanolayers have been calculated by taking into account Kane dispersion law. It has been shown that the dipole corrections are equal to zero in both cases. Analytical expressions have been obtained for quadrupole corrections. In the conditions, when these corrections have positive values the electron shell has shape of prolate spheroid, and when these corrections have negative values the electron shell has shape of oblate spheroid. For mentioned cases, have been calculated the potentials and strengths of electric field located in long distances from nanolayer.

- Analytical expressions have been obtained for diamagnetic susceptibility χ_{dia} of impurity electron in $Ga_{1-x_1}Al_{x_1}As/GaAs/Ga_{1-x_2}Al_{x_2}As$ core/shell/shell structure with Kratzer confining potential, when impurity is localized in center of nanostructure. It has been shown that with the decreasing of the potential's parameter r_0 , there is a threshold value for that parameter after which the diamagnetic susceptibility sharply increases as a result of quantum emission of the electron from nanolayer to external environment. It has been shown that with the increase of the quantum well height U_0 the diamagnetic susceptibility χ_{dia} decreases.

- The orbital current and spin magnetic moment current of the electron localized in cylindrical nanolayer have been investigated. For each current, has been obtained analytical expression. The conditions have been revealed, when the total current is caused only by the spin magnetic moment current. In particular, the rotation radiuses of electron have been defined, for which the orbital current becomes equal to zero. It has been revealed, that spin magnetic moment current dependence on radial coordinate has nonmonotonic and alternating character.

- For the different radiuses of QD have been obtained the dependencies of spin magnetic moment currents of the impurity electron in spherical QD on radial coordinates. It's shown, that for big radiuses (negative energy area) with increasing of the QD radius this dependence practically doesn't change, becoming similar to the behavior of spin magnetic moment current of electron in hydrogen-like atom. This fact demonstrates the weakening of the size quantization effect. On the contrary, in the case of small radiuses of QD (positive energy area), when effect of walls prevails on Coulomb effect of impurity, which in turn leads to more pronounced dependence of spin magnetic moment current of electron on QD radius.