

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ  
ԱԿԱԴԵՄԻԱ  
ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԿԻՐԱՌԱԿԱՆ ՊՐՈԲԼԵՄՆԵՐԻ ԻՆՍՏԻՏՈՏ

Թադևոսյան Լևոն Արմենի

ՔՎԱԶԻԵՐԿՉԱՓ ԿՈԼԼՈԻԴԱԼ ՆԱՆՈԹԻԹԵՂՆԵՐԻ ԵՎ ՆԱՆՈՇԵՐՏԵՐԻ  
ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ԵՎ ՋԵՐՄԱՆՈՒՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ  
ՈՒՍՈՒՄՆԱՄԻՐՈՒՄԸ

Ա.04.10 – «Կիսահաղորդիչների ֆիզիկա» մասնագիտությամբ  
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի զինական  
աստիճանի հայցման ատենախոսության  
Մ Ե Ղ Մ Ա Գ Ի Ր

ԵՐԵՎԱՆ – 2025

---

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНЫХ ПРОБЛЕМ ФИЗИКИ

ТАДЕВОСЯН ЛЕВОН АРМЕНОВИЧ  
ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК КВАЗИДВУМЕРНЫХ КОЛЛОИДАЛЬНЫХ  
НАНОПЛАСТИНОК И НАНОСЛОЕВ

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 – 2025

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայ-Ռուսական համալսարանում

Գիտական ղեկավար՝ ֆ.մ.գ.դ., պրոֆեսոր Հ.Ա. Մարգարյան  
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ

ֆ.մ.գ.դ., պրոֆեսոր Կ.Մ. Ղամբարյան  
ֆ.մ.գ.թ., Ա.Ա. Կոստանյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ ՀՀ ԳԱԱ ֆիզիկական  
հետազոտություններ ինստիտուտ

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա Հունիսի 28-ին, ժամը 12:30 ՀՀ ԳԱԱ ֆիզիկայի կիրառական պրոբլեմների ինստիտուտի ֆիզիկայի 053 մասնագիտական խորհրդի նիստում: Հասցե՝ ք. Երևան 0014, Հր. Ներսիսյանի փ. 25:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀՀ ԳԱԱ ՖԿՊԻ գրադարանում:

Սեղմագիրը առաքված է 2025թ. մայիսի 27-ին

Մասնագիտական խորհրդի  
գիտական քարտուղար



Ֆիզ.մաթ. գիտ. թեկնածու,  
Հ.Ֆ. Խաչատրյան

---

Тема диссертации утверждена в Российско-Армянском университете

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук, профессор А.А. Саркисян  
Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук, профессор К.М. Гамбарян  
кандидат физ.-мат. наук, А.А. Костанян

Ведущая организация: Институт физических исследований НАН РА

Защита диссертации состоится 28-го июня в 12:30 на заседании специализированного совета по физике 053 Института прикладных проблем физики НАН РА по адресу Ереван, 0014, ул. Гр. Нерсисяна, 25

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИППФ.

Автореферат разослан 27-го мая 2025г.

Ученый секретарь  
специализированного совета



кандидат физ.-мат. наук,  
Г.Ф. Хачатрян

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность исследования**

Слоистые наноразмерные структуры остаются объектами интенсивных исследований в связи с тем, что рассматриваются в качестве перспективных кандидатов для элементной базы полупроводниковых приборов нового поколения [1–3]. На сегодняшний день реализованы слоистые наноструктуры как плоской геометрии – нанопластины, так и сферической и цилиндрической геометрий [4–7]. Последние называются сферическими и цилиндрическими квантовыми точками (КТ) типа ядро–оболочка.

Нанопластины (НПЛ) являются квазидвумерными гибридными структурами по своим физическим характеристикам, занимающими промежуточное место между КТ и квантовыми ямами (КЯ). Геометрически такие структуры можно представить в качестве прямоугольного параллелепипеда одна из сторон которого значительно меньше двух других. Благодаря сильному аксиальному квантованию энергетические уровни носителей заряда в НПЛ имеют ярко выраженный подзонный характер, когда с каждым уровнем аксиального квантования связано семейство уровней планарного квантования. Подобный спектр приводит к довольно богатой картине оптических переходов в НПЛ, характеризующейся как внутривоззонами, так и межвоззонами, а также межзонами переходами. Ясно, что результаты этих исследований могут найти непосредственное применение в оптоэлектронных приборах [1–3]. При этом оптические свойства у НПЛ могут управляться не только путем изменения геометрических размеров, но и за счет наложения внешних полей.

В отличие от НПЛ, энергетическим спектром цилиндрических и сферических КТ типа ядро–оболочка можно управлять с помощью большего набора геометрических параметров (внешний и внутренний радиусы, высота цилиндрической КТ), а также путем изменения кривизны как сферической, так и цилиндрической поверхностей. Это позволяет проводить гибкую манипуляцию энергетического спектра носителей заряда и, следовательно, создает широкие возможности управления физическими характеристиками подобных систем. В первую очередь, это отразится на характере оптических переходов в КТ типа ядро–оболочка, которые можно настраивать на заранее определенные резонансные частоты переходов [8–10].

Наряду с оптическими характеристиками в слоистых наноструктурах можно управлять термодинамическими и магнитными параметрами электронного и дырочного газов, локализованных в таких системах [11]. Примечательно что в случае несколько–частичного газа, при сравнительно высоких температурах, вычисление термодинамических и магнитных параметров системы можно реализовать в рамках больцмановского приближения. При этом статистическая сумма будет зависеть как от геометрии рассматриваемой структуры, так и от ее размеров. Наличие полностью квантованного спектра специфическим образом отразится на поведении энтропии, теплоемкости и намагниченности указанных систем, в зависимости от их размеров, а также величин налагаемых полей [11].

В случае тонких нанослоев поведение частиц становится двумерным. В результате образуется двумерный ограниченный газ, обладающий специфическими свойствами гибридного характера присущими как КТ, так и КЯ.

Исходя из вышесказанного вызывает интерес изучение оптических, термодинамических и магнитных характеристик НПЛ и КТ типа ядро–оболочка с учетом тонкости ограничивающего слоя, когда электронные и дырочные подсистемы можно рассматривать двумерными.

Объектами исследования представленной диссертационной работы являются НПЛ, сферические и цилиндрические КТ типа ядро–оболочка малой толщины содержащие слабо–взаимодействующий электронный газ. Представлены результаты теоретического исследования экситонного и межзонного электропоглощений в НПЛ, а так же вычислены термодинамические и магнитные характеристики слабо–взаимодействующего электронного газа локализованного в вышеуказанных системах.

### **Цель работы**

Целью диссертационной работы является:

1. Исследование межзонного и экситонного поглощений в *CdSe* нанопластинах.
2. Изучение термодинамических характеристик слабо взаимодействующего электронного газа в *CdSe* НПЛ как в высокотемпературном пределе, так и низкотемпературном.
3. Исследование магнитных характеристик электронного газа, локализованного в тонкой цилиндрической КТ типа ядро–оболочка.
4. В рамках больцмановского приближения исследование термодинамических характеристик слабо взаимодействующего электронного газа, локализованного в тонкой сферической *CdSe* КТ типа ядро–оболочка.
5. Изучение характера межзонного поглощения в тонких сферических КТ типа ядро–оболочка.

### **Научная новизна**

1. В рамках модели Такагахары исследованы межзонное и экситонное электропоглощение в *CdSe* НПЛ с учетом поляризационных эффектов в аксиальном направлении.
2. В рамках статистик Больцмана и Ферми-Дирака исследованы термодинамические характеристики слабо взаимодействующего электронного газа в *CdSe* НПЛ.
3. Для тонкой цилиндрической *CdSe* КТ типа ядро–оболочка изучены магнитные и термодинамические характеристики слабо взаимодействующего электронного газа.
4. На основе модели сферического ротатора исследованы термодинамические свойства электронного газа, локализованного в сферической *CdSe* КТ типа ядро–оболочка изучены
5. В тонкой сферической *CdSe* КТ типа ядро–оболочка рассмотрены межзонные оптические переходы.

## Научная и практическая ценность

Полученные в диссертационной работе результаты, имеют как фундаментальное значение, так и прикладное. В частности, они расширяют наши знания относительно физических процессов, имеющих место в плоских цилиндрических и сферических слоистых наноструктурах. Создают возможность тестирования фундаментальных квантовомеханических принципов на конкретных объектах, а также могут найти приложение в опто- и наноэлектронике и квантовой информатике.

## Основные научные положения, выносимые на защиту

1. С ростом латерального электрического поля, в плоскости НПЛ, имеет место красное смещение пиков экситонного поглощения.
2. Слабо взаимодействующий электронный газ, локализованный в тонкой *CdSe* КТ типа ядро–оболочка, обладает ярко выраженным диамагнетизмом с постоянной диамагнитной восприимчивостью.
3. Энтропия слабо взаимодействующего электронного газа, локализованного в тонкой сферической *CdSe* КТ типа ядро–оболочка, с ростом эффективного радиуса КТ увеличивается, при этом теплоемкость системы падает
4. С ростом эффективного радиуса сферической КТ типа ядро–оболочка, при постоянной толщине КТ, резонансные частоты межзонных переходов претерпевают красное смещение.

**Апробация работы.** Основные результаты, полученные в данной диссертационной работе, докладывались на научных семинарах лаборатории физики нано- и мезо систем Института Прикладных Проблем Физики НАН РА, а также докладывались на следующих локальных и международных научных конференциях:

- 17-я Годичная научная конференция, РАУ 2023.
- 18-я Годичная научная конференция, РАУ 2024.
- Optics and its applications 2024, Yerevan, Armenia
- Conference Channeling 2024 – Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena, Riccione, Italy

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 5 работ. Список приводится в конце автореферата.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка используемой литературы. Текст изложен на 101 странице и содержит 23 рисунка, 7 таблицы и 107 наименований литературы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** представлен обзор научной литературы по теме диссертационной работы. Представлены последние результаты исследований оптических и термодинамических характеристик КТ и НПЛ. Сформулированы цели диссертации, ее новизна, а также приведены ее основные положения.

**В первой главе** диссертационной работы рассматривается межзонное и экситонное поглощения в нанопластинках  $CdSe$  при наличии внешнего электрического поля.

**В параграфе 1.1** представлены модели ограничивающего и поляризационного потенциалов  $CdSe$  НПЛ с учетом поляризационных эффектов в аксиальном направлении, в рамках модели Такагахары [12]. Поляризационный потенциал в рамках модели Такагахары имеет вид:

$$V_{self}(z) = \sum_{m=\pm 1, \pm 2, \dots} \frac{k|m|e^2}{2\varepsilon_w|z - (-1)^m z + mL_z|}, |z| < \frac{L_z}{2},$$

$$V_{self}(z) = \frac{2\varepsilon_w}{\varepsilon_w + \varepsilon_b} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{k^{2m+1}e^2}{(\varepsilon_w + \varepsilon_b)|2z + (2m+1)L_z|} - \frac{ke^2}{2\varepsilon_b|2z - L_z|}, |z| > \frac{L_z}{2}, \quad (1)$$

$$V_{self}^i(z) = V_{self}^i(-z), \quad z < -\frac{L_z}{2}.$$

Здесь  $k = \frac{\varepsilon_w - \varepsilon_b}{\varepsilon_w + \varepsilon_b}$ ,  $\varepsilon_w$  и  $\varepsilon_b$  являются диэлектрическими проницаемостями материала НПЛ и окружающей среды соответственно, а  $L_z$  – толщина НПЛ вдоль направления квантования. Также, представлены профили полного аксиального потенциала  $V_{total}(z)$  для различных значений диэлектрических проницаемостей НПЛ и окружающей среды (рисунок 1), а также размеров НПЛ.

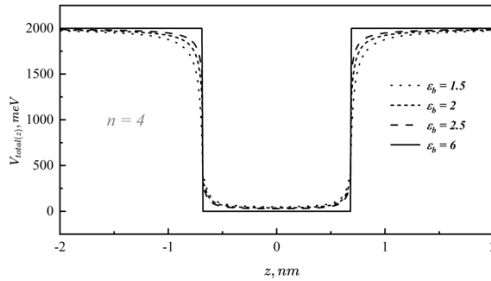


Рисунок 1: Профили полного аксиального потенциала  $V_{total}(z)$  для различных значений диэлектрической проницаемости окружающей среды.

**В параграфе 1.2** изучаются одноэлектронные состояния в тонкой  $CdSe$  НПЛ, при наличии аксиального электростатического поля  $\vec{E}$ . Показано, что для сравнительно низких уровней полный аксиальный потенциал такой системы можно аппроксимировать параболической функцией. Получены аналитические выражения для волновой функции и энергетического спектра квантовой частицы. Найдено выражение для штарковского сдвига энергетических уровней и показано, что имеет место квадратичный эффект Штарка.

**В параграфе 1.3** вычислены коэффициенты межзонного электропоглощения в вышеуказанной системе, для режима сильного размерного квантования. Определены пороговые частоты поглощения, а также показано, что наложение поля снимает правила отбора в аксиальном направлении.

**В параграфе 1.4** рассматриваются экситонные состояния в НПЛ *CdSe* при наличии латерального электрического поля.

**В параграфе 1.5** определен коэффициент экситонного поглощения, и интенсивность фотолуминесценции в НПЛ, при наличии латерального электрического поля. Показано, что с увеличением электрического поля пик экситонного поглощения претерпевают красное смещение. Коэффициент межзонного поглощения  $K(\omega)/K_0$  в зависимости от энергии падающего фотона  $\hbar\omega$  показан на рисунке 2.

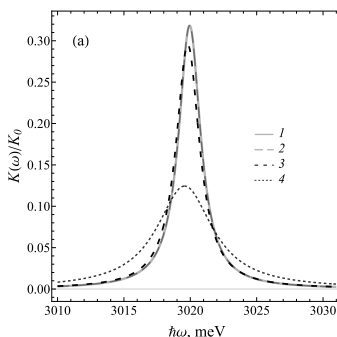


Рисунок 2: Коэффициент межзонного поглощения  $K(\omega)/K_0$  в зависимости от энергии падающего фотона  $\hbar\omega$  для числа монослоев НПЛ: (a)  $n = 3$ . Значения внешнего электрического поля:  $\mathcal{E} = 0$  (кривая 1),  $\mathcal{E} = 250$  кВ/см (кривая 2),  $\mathcal{E} = 400$  кВ/см (кривая 3) и  $\mathcal{E} = 600$  кВ/см (кривая 4).

**Вторая глава** диссертации посвящена исследованию термодинамических и магнитных характеристик слабо взаимодействующего электронного газа в НПЛ *CdSe* и КТ *CdSe* типа ядро–оболочка.

**В параграфе 2.1** представлены результаты изучения коллективных эффектов в КТ и НПЛ. В частности, обсуждаются термодинамические и магнитные характеристики электронного и дырочного газов в нульмерных ограниченных системах.

**В параграфе 2.2** для высокотемпературного приближения исследуются термодинамические характеристики идеального электронного газа, локализованного в НПЛ *CdSe*. Показано, что в рамках Больцмановской статистики вычисление соответствующей статистической суммы сводится к тета-функциям Рамандужана, которые имеют следующий общий вид [13]:

$$\varphi(q) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (q)^{n^2}, \quad q < 1. \quad (2)$$

Для статистической суммы  $Z_N$  найдено следующее выражение:

$$Z_N = \frac{1}{N!} e^{-\beta \frac{\pi^2 \hbar^2 N}{2\mu_z L_z^2}} \left\{ \frac{\varphi(e^{-\pi t_1}) - 1}{2} \right\}^N \left\{ \frac{\varphi(e^{-\pi t_2}) - 1}{2} \right\}^N, \quad (3)$$

$\beta = \frac{1}{kT}$  – обратная температура,  $\mu_i$  – эффективная масса электрона вдоль оси  $Oi$ ,  $L_z$  – толщина НПЛ,  $L_{x(y)}$  – длина НПЛ вдоль оси  $OX(Y)$ ,  $N$  – число электронов и введены обозначения  $t_1 = \beta \frac{\pi \hbar^2}{2\mu_x L_x^2}$ , а  $t_2 = \beta \frac{\pi \hbar^2}{2\mu_y L_y^2}$ , а  $\varphi(e^{-\pi t}) = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\pi n^2 t}$ .

**В параграфе 2.3**, на основе распределения Ферми-Дирака рассматривается низкотемпературное приближение. Показывается, что электронный газ внутри *CdSe* НПЛ становится фактически двумерным, и образуется двумерный ферми-газ, теплоемкость которого прямо пропорциональна температуре и определяется двумерной плотностью состояний.

**В параграфе 2.4** были определены термодинамические параметры больцмановского газа в НПЛ. С помощью функций Рамануджана были найдены зависимости энтропии (рисунок 3) и теплоемкости (рисунок 4) исследуемого газа от длины  $L_{x(y)} \approx 5L_z$ , при различных температурах.

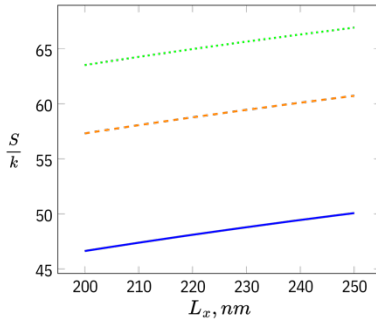


Рисунок 3: Зависимость энтропии электронного газа от длины сторон НПЛ  $L_x$  и при различных температурах. Пунктирная зеленая линия соответствует  $T = 300K$ , штрихованная красная линия соответствует  $T = 200K$ , а сплошная синяя линия соответствует  $T = 100K$ .

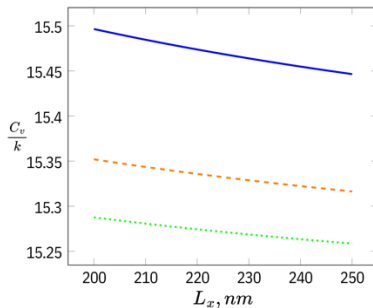




Рисунок 4: Зависимость теплоемкости электронного газа от длины стороны НПЛ  $L_x$  и при различных температурах. Пунктирная зеленая линия соответствует  $T = 300K$ , штрихованная красная линия соответствует  $T = 200K$ , а сплошная синяя линия соответствует  $T = 100K$ .

Показано, что с ростом планарных размеров НПЛ энтропия увеличивается, а теплоемкость падает.

**В параграфе 2.5** были исследованы магнитные и термодинамические характеристики электронного газа локализованного в тонкой цилиндрической КТ типа ядро–оболочка с внутренним радиусом  $R_1$  и внешним радиусом  $R_2$ .

На рисунке 5 представлены зависимости намагниченности  $M(B)$  от влияния магнитного поля при различных температурах. Следует отметить, что зависимости линейны, следовательно, диамагнитная восприимчивость  $\chi$  практически не меняется с ростом  $B$ . Однако большей температуре будет соответствовать большее по модулю значение  $\chi$ .

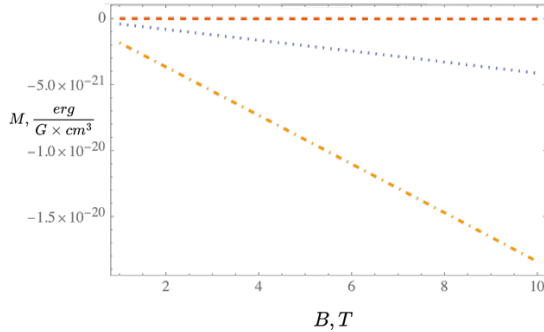


Рисунок 5: Зависимость намагниченности электронного газа от магнитного поля при различных температурах. Штриховая красная линия соответствует температуре  $T = 100K$ , пунктирная синяя линия соответствует температуре  $T = 200K$ , а штрихпунктирная оранжевая линия соответствует температуре  $T = 300K$ .

**Третья глава** диссертационной работы посвящена изучению термодинамических и оптических характеристик слабо взаимодействующего электронного газа в тонких сферических КТ типа ядро–оболочка.

**В параграфе 3.1** представлены межзонные оптические переходы в тонкой сферической  $CdSe$  КТ типа ядро–оболочка в рамках модели сферического ротатора. Для соответствующих переходов найдены правила отбора, а также определена частота порогового поглощения:

$$\begin{aligned} m_e &= -m_h, \\ l_e &= l_h. \end{aligned}$$

$$\hbar\omega_{00} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2(R_2 - R_1)^2} \left( \frac{1}{\mu_e} + \frac{1}{\mu_h} \right) + E_g = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2\mu_{np} \cdot (R_2 - R_1)^2} + E_g, \quad (4)$$

Для переходов между ротационными уровнями первых подзон радиального квантования валентной зоны и зоны проводимости окончательно получено:

$$\hbar\omega = E_g + \frac{\hbar^2}{2\mu_{np}} \left\{ \frac{\pi^2}{(R_2 - R_1)^2} + \frac{4l(l+1)}{(R_1 + R_2)^2} \right\}, \quad (5)$$

Показано, что, с уменьшением толщины нанослоя пороговая частота поглощения претерпевает синее смещение. С другой стороны, с увеличением эффективного радиуса КТ, при постоянной толщине нанослоя, резонансные частоты поглощения претерпевают красное смещение

**В параграфе 3.2** рассмотрены термодинамические параметры слабо взаимодействующего электронного газа в тонкой сферической КТ типа ядро-оболочка. В рамках больцмановского приближения получены зависимости средней энергии, энтропии и теплоемкости рассматриваемого электронного газа от  $R_{eff}$  при разных температурах. В частности, зависимости средней энергии газа от  $R_{eff}$ , при разных температурах показаны на рисунке 6.

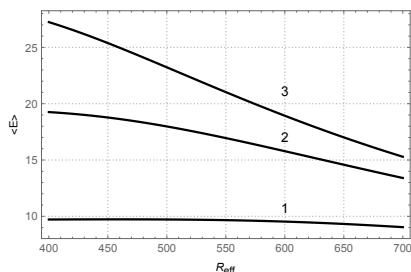


Рисунок 6: Зависимости средней энергии газа от  $R_{eff}$ , при температурах  $T_1 = 100$  (кривая 1),  $T_2 = 200$  (кривая 2) и  $T_3 = 300$  K (кривая 3).

Как следует из рисунка 6, с ростом  $R_{eff}$  значение средней энергии падает. При этом большей температуре соответствует большее значение средней энергии.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. В приближении эффективной массы исследовано межзонное поглощение в тонкой  $CdSe$  НПЛ при наличии аксиально направленного электрического поля. Показано, что эффекты поляризации на границе перехода НПЛ-окружающая среда в аксиальном направлении формирует, наряду с ограничивающим потенциалом, результирующую потенциальную энергию частиц, которую при малых толщинах можно аппроксимировать параболической функцией.

На основе указанной модели найдено аналитическое решение уравнения Шредингера и показано, что в системе имеет место квадратичный эффект Штарка. Вычислен коэффициент межзонного поглощения, и определены пороговые частоты межзонного поглощения.

- Показано, что наличие электрического поля приводит к снятию правил отбора в аксиальном направлении.
2. Изучены экситонные состояния в  $CdSe$  НПЛ при наличии латерального электрического поля, направленного вдоль оси  $OY$  в плоскости НПЛ. Показано, что наличие скачка диэлектрической проницаемости на границе перехода НПЛ–окружающая среда приводит к возникновению существенных поляризационных эффектов в аксиальном направлении. Учет поляризации можно осуществить в рамках модели Такагахары, на основе метода электростатического изображения зарядов. Путем произведения процедуры усреднения кулоновского потенциала электрон–дырочного взаимодействия по волновым функциям аксиального состояния, определен двумерный эффективный кулоновский потенциал. На основе решения уравнения Шредингера численно определены волновые функции и энергетический спектр двумерного экситона, а также вычислен коэффициент экситонного поглощения. Показано, что с ростом величины приложенного электрического поля пик экситонного поглощения смещается в длинноволновую область. Иначе говоря, в системе реализуется красное смещение.
  3. В высокотемпературном и низкотемпературном пределах исследованы термодинамические характеристики слабозадействующего электронного газа, локализованного в  $CdSe$  НПЛ. В высокотемпературном пределе вычисления производятся в рамках статистики Больцмана. Показано, что определение больцмановской статистической суммы дается через тета–функции Рамануджана, с помощью которых находятся энтропия и теплоемкость рассматриваемого газа. Результаты расчетов показывают, что с ростом линейных размеров НПЛ в плоскости  $XOY$  энтропия газа растет, что является следствием увеличения числа квантовых состояний на единичном энергетическом отрезке. С другой стороны, теплоемкость газа, с ростом линейных размеров НПЛ, падает, так как межузровые расстояния двумерного квантового спектра уменьшаются, и газ легче поглощает передаваемую энергию.

В низкотемпературном пределе, на основе распределения Ферми–Дирака, определена теплоемкость рассматриваемого газа и показано, что ее величина монотонно растет с ростом абсолютной температуры, а также определяется двумерной плотностью энергетических состояний.

  4. Исследованы термодинамические и магнитные характеристики слабозадействующего электронного газа, локализованного в тонкой цилиндрической  $CdSe$  КТ типа ядро–оболочка, при наличии аксиального магнитного поля. Статистическая сумма изучаемой системы вычисляется в рамках больцмановской статистики. Определена средняя энергия, энтропия, теплоемкость, а также намагниченность и магнитная восприимчивость электронного газа. Условие тонкости цилиндрического нанослоя позволяет применить модель плоского ротатора для определения выше указанных параметров газа. Найдено, что с ростом температуры и геометрических размеров КТ энтропия системы

увеличивается. С другой стороны, рост геометрических размеров КТ и температуры газа приводит к уменьшению его теплоемкости, что обусловлено полностью квантованным характером энергетического спектра электронов. Найден ярко выраженный диамагнетизм изучаемого газа, при этом с увеличением магнитного поля намагнитченность по модулю растет практически линейным образом, а магнитная восприимчивость остается неизменной.

5. Изучены межзонные оптические переходы в тонкой сферической *CdSe* КТ типа ядро–оболочка. Считая, что носители заряда локализованы в первой подзоне размерного квантования проблема рассматривается в рамках модели сферического ротатора, предполагая, что электроны и дырки находятся на сферической поверхности с эффективным радиусом:

$$R_{eff} = \frac{R_1 + R_2}{2}$$

где  $R_{1,2}$  – внутренний и внешний радиусы КТ. Вычислен коэффициент межзонного поглощения и определены правила отбора для указанных переходов. Показано, что переходы разрешены между уровнями валентной зоны и зоны проводимости с одинаковыми значениями орбитальных квантовых чисел, и по модулю одинаковыми, но с противоположными знаками, значениями магнитных квантовых чисел. Вычислены значения пороговой частоты, а также резонансных частот межзонного поглощения. С уменьшением толщины нанослоя пороговая частота претерпевает синяя смещение. С другой стороны, если, не меняя толщины нанослоя увеличивать эффективный радиус КТ, то резонансные частоты сместятся в длинноволновую область.

6. Для слабовзаимодействующего электронного газа локализованного в тонкой сферической КТ типа ядро–оболочка определены термодинамические характеристики. Определены средняя энергия, энтропия и теплоемкость газа. Показано, что с ростом эффективного радиуса КТ средняя энергия газа падает. Поведение энтропии и теплоемкости рассматриваемого газа в зависимости от температуры и эффективного радиуса КТ аналогично тому, которое обнаружено в цилиндрической КТ типа ядро–оболочка.

## **СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Guo Y, Gao F, Huang P, Wu R, Gu W, Wei J, Liu F, Li H. Light-emitting diodes based on two-dimensional nanoplatelets. *Energy Material Advances*. 2022 Feb 4.
2. Cui J, Liu Y, Deng Y, Lin C, Fang Z, Xiang C, Bai P, Du K, Zuo X, Wen K, Gong S. Efficient light-emitting diodes based on oriented perovskite nanoplatelets. *Science Advances*. 2021 Oct 8;7(41): eabg8458.
3. Zhang C, Wan Q, Wang B, Zheng W, Liu M, Zhang Q, Kong L, Li L. Surface ligand engineering toward brightly luminescent and stable cesium lead halide

- perovskite nanoplatelets for efficient blue-light-emitting diodes. The Journal of Physical Chemistry C. 2019 Oct 9;123(43):26161-9.
4. Cricchio D, Fiordilino E, Persico F. Electrons on a spherical surface: Physical properties and hollow spherical clusters. Physical Review A—Atomic, Molecular, and Optical Physics. 2012 Jul;86(1):013201.
  5. Knize RJ. Polarizability of a free electron gas confined to a spherical shell. Optics communications. 1994 Mar 1;106(1-3):95-9.
  6. Agboola D, Knol AL, Gill PM, Loos PF. Uniform electron gases. III. Low-density gases on three-dimensional spheres. The Journal of Chemical Physics. 2015 Aug 28;143(8).
  7. Loos PF, Gill PM. Thinking outside the box: The uniform electron gas on a hypersphere. The Journal of chemical physics. 2011 Dec 7;135(21).
  8. Wang CW, Oyeka EE, Altman AB, Son DH. Effects of pressure on exciton absorption and emission in strongly quantum-confined CsPbBr<sub>3</sub> quantum dots and nanoplatelets. The Journal of Physical Chemistry C. 2024 Jan 31;128(5):2062-9.
  9. Baghdasaryan DA, Harutyunyan VA, Hayrapetyan DB, Kazaryan EM, Baskoutas S, Sarkisyan HA. Exciton states and optical absorption in CdSe and PbS nanoplatelets. Nanomaterials. 2022 Jan;12(20):3690.
  10. Liao C, Peng Z, Tang L, Shi W, Tao J, Sun S, Yao N. High-performance two-photon absorption optical limiter and stabilizer based on phase-pure thick-shell CdSe/CdS core/shell quantum dots. Laser Physics Letters. 2023 Apr 5;20(5):055401.
  11. Ghaltaghchyan HT, Hayrapetyan DB, Kazaryan EM, Sarkisyan HA. The electron gas in the core/shell cylindrical quantum dot: thermodynamic and diamagnetic properties. Micro and Nanostructures. 2023 Feb 1;174:207471.
  12. Kumagai M, Takagahara T. Excitonic and nonlinear-optical properties of dielectric quantum-well structures. Physical Review B. 1989 Dec 15;40(18):12359.
  13. Schmidt MD. Square series generating function transformations. arXiv preprint arXiv:1609.02803. 2016 Sep 9.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. **Tadevosyan LA**, Stepanyan VA, Ghaltaghchyan HT, Mamasakhlisov ES, Sarkisyan HA. Thermodynamics of an Ideal Electron Gas Localized in a Thin Spherical CdSe Nanolayer. Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences). 2024 Jun;59(2):172-8.
2. **Tadevosyan LA**, Ghaltaghchyan HT, Harutyunyan VA, Mamasakhlisov YS, Sarkisyan HA. Thermodynamic parameters of the electron gas in CdSe nanoplatelets. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2025 Feb 3:170274.

3. **Tadevosyan LA**, Ghaltaghchyan HT, Mamasakhlisov YS, Sarkisyan HA. Thermodynamic and Magnetic Properties of Weakly Interacting Electron Gas Localized in a CdSe Cylindrical Core–Shell Quantum Dot. Quantum Reports. 2025 Mar 1;7(1):13.
4. Nahapetyan AA, **Tadevosyan LA**, Baghdasaryan DA, Harutyunyan VA. Exciton absorption and luminescence in CdSe nanoplatelets: influence of a uniform electric field. Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences). 2025;60
5. **Tadevosyan LA**. Interband electroabsorption in CdSe nanoplatelets. Armenian Journal of Physics. 2025;18(1):1-6

### **ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ**

1. Արդյունավետ զանգվածի մոտարկման դեպքում, բարակ *CdSe* նանոթիթեղում միջգոտային կլանումը ուսումնասիրվել է առանցքային ուղղված էլեկտրական դաշտի առկայության դեպքում: Ցույց է տրված, որ նանոթիթեղ-միջավայր անցումային սահմանում բևեռացման էֆեկտները առանցքային ուղղությամբ, սահմանային պոտենցիալի հետ մեկտեղ, ձևավորում են մասնիկների առաջացող պոտենցիալ էներգիան, որը փոքր հաստոյությունների դեպքում կարելի է մոտավորել պարաբոլիկ ֆունկցիայով:  
Նշված մոդելի հիման վրա գտնվել է Շրյոդինգերի հավասարման անալիտիկ լուծումը և ցույց է տրվել, որ համակարգում տեղի է ունենում քառակուսային Շտարկի էֆեկտը: Հաշվարկվել է միջգոտային կլանման գործակիցը և որոշվել են միջգոտային կլանման շեմային հաճախականությունները: Ցույց է տրվել, որ էլեկտրական դաշտի առկայությունը հանգեցնում է ընտրության կանոնների վերացմանը՝ առանցքային ուղղությամբ:
2. *CdSe* նանոթիթեղներում էքսցիտոնային վիճակները ուսումնասիրվել են նանոթիթեղների հարթությունում *OY* առանցքի երկայնքով ուղղված կողմնային էլեկտրական դաշտի առկայության դեպքում: Ցույց է տրված, որ նանոթիթեղ-միջավայր անցումային սահմանում դիէլեկտրիկ հաստատունի ցատկի առկայությունը հանգեցնում է առանցքային ուղղությամբ նշանակալի բևեռացման էֆեկտների ի հայտ գալուն: Բևեռացումը կարելի է հաշվի առնել Տակագահարայի մոդելի շրջանակներում լիցքերի էլեկտրաստատիկ պատկերման մեթոդի հիման վրա: Կատարելով էլեկտրոն-անցք փոխազդեցության Կուլոնի պոտենցիալի միջինացման ընթացակարգը առանցքային վիճակի ալիքային ֆունկցիաների նկատմամբ, որոշվել է երկչափ արդյունավետ Կուլոնի պոտենցիալը: Շրյոդինգերի հավասարման լուծման հիման վրա թվայինորեն որոշվել են երկչափ էքսիտոնի ալիքային ֆունկցիաները և էներգետիկ սպեկտրը, և հաշվարկվել է էքսիտոնի կլանման գործակիցը: Ցույց է տրվել, որ կիրառվող էլեկտրական դաշտի մեծության մեծացման հետ մեկտեղ էքսիտոնի կլանման զագաթնակետը տեղափոխվում է

երկար ալիքի երկարության տիրույթ: Այլ կերպ ասած՝ համակարգում իրականացվել է կարմիր շեղում:

3. *CdSe* նանոթիթեղում լույսի լույսագրող էլեկտրոնային գազի թերմոդինամիկական բնութագրերը ուսումնասիրվել են բարձր և ցածր ջերմաստիճանային միջակայքերում: Բարձր ջերմաստիճանի սահմանում հաշվարկները կատարվել են Բոլցմանի վիճակագրության շրջանակներում: Ցույց է տրված, որ Բոլցմանի վիճակագրական գումարի սահմանումը տրվում է Ռամանոյանի թեստա ֆունկցիաների միջոցով, որոնց օգնությամբ որոշվել են դիտարկվող գազի էնտրոպիան և ջերմունակությունը: Հաշվարկի արդյունքները ցույց են տալիս, որ *XOY* հարթությունում նանոթիթեղի գծային չափերի մեծացման հետ մեկտեղ գազի էնտրոպիան մեծանում է, ինչը միավոր էներգիայի հատվածի վրա քվանտային վիճակների թվի աճի հետևանք է: Մյուս կողմից, գազի ջերմունակությունը նվազում է նանոթիթեղի գծային չափերի աճին զուգընթաց, քանի որ երկչափ քվանտային սպեկտրի միջմակարդակային հեռավորությունները նվազում են, և գազն ավելի հեշտությամբ է կլանում փոխանցված էներգիան:

Ցածր ջերմաստիճանի սահմանում, Ֆերմի-Դիրակի բաշխման հիման վրա, որոշվել է դիտարկվող գազի ջերմունակությունը և ցույց է տրվել, որ դրա արժեքը մոտոտն աճում է բացարձակ ջերմաստիճանի աճին զուգընթաց և որոշվել է նաև էներգետիկ վիճակների երկչափ խտությամբ:

4. Ուսումնասիրվել են թույլ փոխազդող էլեկտրոնային գազի թերմոդինամիկ և մագնիսական բնութագրերը, որոնք տեղակայված են բարակ զանաձև *CdSe* միջուկ-թաղանթ քվանտային կետում՝ առանցքային մագնիսական դաշտի առկայության դեպքում: Ուսումնասիրվող համակարգի վիճակագրական գումարը հաշվարկվել է Բոլցմանի վիճակագրության շրջանակներում: Որոշվել են էլեկտրոնային գազի միջին էներգիան, էնտրոպիան, ջերմունակությունը, ինչպես նաև մագնիսացումը և մագնիսական ընկալունակությունը: Գլանաձև նանոշերտի բարակության պայմանը թույլ է տալիս օգտագործել հարթ պտտող մոդելը՝ վերը նշված գազի պարամետրերը որոշելու համար: Պարզվել է, որ քվանտային գծի ջերմաստիճանի և երկրաչափական չափերի բարձրացման հետ մեկտեղ համակարգի էնտրոպիան մեծանում է: Մյուս կողմից, քվանտային կետերի երկրաչափական չափերի և գազի ջերմաստիճանի մեծացումը հանգեցնում է դրա ջերմունակության նվազմանը, ինչը պայմանավորված է էլեկտրոնային էներգիայի սպեկտրի լիովին քվանտացված բնությամբ: Հայտնաբերվել է ուսումնասիրվող գազի արտահայտված դիամագնիսականություն, և մագնիսական դաշտի աճով մագնիսացման մոդուլը զրեթե գծային է աճում, մինչդեռ մագնիսական ընկալունակությունը մնում է անփոփոխ:

5. Ուսումնասիրվել են բարակ գնդաձև *CdSe* միջուկ-թաղանթ քվանտային կետերի միջգոտային օպտիկական անցումները: Հաշվի առնելով, որ լիցքի կրիչները տեղայնացված են չափային քվանտացման առաջին ենթագոտայում, խնդիրը դիտարկվում է գնդաձև պտտվող մոդելի շրջանակներում՝ ենթադրելով, որ էլեկտրոններն ու անցքերը գտնվում են արդյունավետ շառավղով գնդաձև մակերեսի վրա՝

$$R_{eff} = \frac{R_1 + R_2}{2},$$

որտեղ  $R_{1,2}$ -ը քվանտային կետի ներքին և արտաքին շառավիղներն են: Հաշվարկվել է միջգոտային կլանման գործակիցը և որոշվում են նշված անցումների ընտրության կանոնները: Ցույց է տրվել, որ վալենտային և հաղորդականության գոտիների մակարդակների միջև թույլատրվում են անցումներ՝ օրբիտալ քվանտային թվերի նույն արժեքներով և մագնիսական քվանտային թվերի նույն բացարձակ արժեքներով, բայց հակառակ նշաններով: Հաշվարկվել են միջգոտային կլանման շեմային հաճախականության և ռեզոնանսային հաճախությունների արժեքները: Նանոշերտի հաստության նվազումին զուգընթաց, շեմային հաճախականությունը ենթարկվել է կապույտ շեղման: Մյուս կողմից, եթե նանոշերտի հաստությունը չփոխելով՝ մենք մեծացնենք Քվանտային կետի արդյունավետ շառավիղը, ռեզոնանսային հաճախականությունները կտեղափոխվեն երկարալիք տիրույթ:

6. Բարակ գնդաձև միջուկ-թաղանթ քվանտային կետում լույսի զգացված թույլ փոխազդող էլեկտրոնային գազի համար որոշվել են թերմոդինամիկ բնութագրերը: Գազի միջին էներգիան, էնտրոպիան և ջերմունակությունը որոշվում են: Ցույց է տրվել, որ քվանտային կետի արդյունավետ շառավիղի մեծացման հետ մեկտեղ գազի միջին էներգիան նվազում է: Դիտարկվող գազի էնտրոպիայի և ջերմունակության վարքագիծը որպես քվանտային դիագրամի ջերմաստիճանի և արդյունավետ շառավիղի ֆունկցիա նման է միջուկ-շերտ տիպի գլանաձև քվանտային դիագրամում հայտնաբերվածին:

## **CONCLUSION**

1. In the effective mass approximation, the interband absorption in thin *CdSe* NPL in the presence of an axially directed electric field is investigated. It is shown that the polarization effects at the NPL–environment transition boundary in the axial direction form, along with the limiting potential, the resulting potential energy of particles, which at small thicknesses can be approximated by a parabolic function. Based on this model, an analytical solution of the Schrödinger equation is found, and it is shown that the quadratic Stark effect takes place in the system. The interband absorption coefficient is calculated, and the threshold frequencies of interband absorption are determined. It is shown that the presence of an electric field leads to the removal of selection rules in the axial direction.
2. Exciton states in *CdSe* NPLs are studied in the presence of a lateral electric field directed along the *OY* axis in the NPL plane. It is shown that the presence of a jump in permittivity at the NPL–environment transition boundary leads to the occurrence of significant polarization effects in the axial direction. Polarization can be considered within the Takagahara model based on the electrostatic charge imaging method. The two-dimensional effective Coulomb potential is determined by performing the procedure of averaging the Coulomb potential of the electron–hole interaction over the wave functions of the axial



state. Based on the solution of the Schrödinger equation, the wave functions and energy spectrum of a two-dimensional exciton are numerically determined, and the exciton absorption coefficient is calculated. It is shown that with an increase in the magnitude of the applied electric field, the exciton absorption peak shifts to the long-wave region. In other words, red shift is realized in the system.

3. Thermodynamic characteristics of weakly interacting electron gas localized in *CdSe* NPL are investigated in the high-temperature and low-temperature limits. In the high-temperature limit, calculations are performed within the framework of Boltzmann statistics. It is shown that the definition of the Boltzmann statistical sum is given by the Ramanujan theta functions, with the help of which the entropy and heat capacity of the gas under consideration are found. The calculation results show that with an increase in the linear dimensions of the NPL in the *XOY* plane, the entropy of the gas increases, which is a consequence of an increase in the number of quantum states on a unit energy segment. On the other hand, the heat capacity of the gas decreases with an increase in the linear dimensions of the NPL, since the interlevel distances of the two-dimensional quantum spectrum decrease, and the gas absorbs the transferred energy more easily. In the low-temperature limit, based on the Fermi-Dirac distribution, the heat capacity of the gas under consideration is determined and it is shown that its value increases monotonically with increasing absolute temperature and is also determined by the two-dimensional density of energy states.
4. Thermodynamic and magnetic characteristics of weakly interacting electron gas localized in a thin cylindrical *CdSe* core-shell QD in the presence of an axial magnetic field are studied. The statistical sum of the system under study is calculated within the Boltzmann statistics. The average energy, entropy, heat capacity, as well as magnetization and magnetic susceptibility of the electron gas are determined. The condition of thinness of the cylindrical nanolayer allows using the flat rotator model to determine the above gas parameters. It is found that with increasing temperature and geometric dimensions of the QD, the entropy of the system increases. On the other hand, an increase in the geometric dimensions of the QD and the gas temperature leads to a decrease in its heat capacity, which is due to the completely quantized nature of the electron energy spectrum. A pronounced diamagnetism of the gas is found, while with an increase in the magnetic field, the magnetization in modulus increases almost linearly, and the magnetic susceptibility remains unchanged.
5. Interband optical transitions in a thin spherical core-shell *CdSe* quantum dot is studied. Assuming that charge carriers are localized in the first subband of size quantization, the problem is considered within the framework of the spherical rotator model, assuming that electrons and holes are on a spherical surface with an effective radius:

$$R_{eff} = \frac{R_1 + R_2}{2},$$

where  $R_{1,2}$  are the inner and outer radii of the QD. The coefficient of interband absorption is calculated and selection rules for the specified transitions are determined. It is shown that transitions are allowed between the levels of the

valence and conduction bands with the same values of orbital quantum numbers, and the same absolute values of magnetic quantum numbers, but with opposite signs. The values of the threshold frequency and resonant frequencies of interband absorption are calculated. With decreasing nanolayer thickness, the threshold frequency undergoes blue shift. On the other hand, if the effective radius of the QD is increased without changing the nanolayer thickness, the resonant frequencies will shift to the long-wave region.

6. Thermodynamic characteristics are determined for a weakly interacting electron gas localized in a thin spherical core-shell QD. The average energy, entropy, and heat capacity of the gas are determined. It is shown that with an increase in the effective radius of the QD, the average energy of the gas decreases. The behavior of the entropy and heat capacity of the gas under consideration as a function of temperature and the effective radius of the QD is like that found in a cylindrical core-shell QD.