

**ГОУ ВПО РОССИЙСКО-АРМЯНСКИЙ (СЛАВЯНСКИЙ)
УНИВЕРСИТЕТ**

Составлен в соответствии с государственными требованиями к минимуму содержания и уровню подготовки выпускников по направлению 11.04.04 Электроника и наноэлектроника и Положением «Об УМКД РАУ»

УТВЕРЖДАЮ:

А.А. Саркисян



Инженерно-физический институт

Кафедра: Общей физики и квантовых наноструктур

Автор(ы): д.ф.-м.н., профессор Саркисян Айк Араевич

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Дисциплина: Б1.В.08 Квантовые наноструктуры во внешних полях

Направление: 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

**Основная образовательная программа магистратуры:
«Квантовая и оптическая электроника»**

ЕРЕВАН

1. Аннотация

1.1. **Выписка из ФГОС ВО РФ по минимальным требованиям к дисциплине** – данный курс является специальным и не включен в ФГОС ВО РФ.

1.2. **Взаимосвязь дисциплины с другими дисциплинами учебного плана специальности (направления)**

Данная дисциплина является связующим звеном между такими разделами, как квантовая механика, квантовая теория твердого тела и физика низкоразмерных систем. Методы применяемые в процессе преподавания дисциплины (как математические так и физические) являются синтезом методов математической физики и теоретической физики.

1.3. **Требования к исходным уровням знаний, умений и навыков студентов для прохождения дисциплины (что должен знать, уметь и владеть студент для прохождения данной дисциплины)**

Для усвоения дисциплины студенты должны знать основы теории поля, квантовой механики, квантовой теории твердого тела, физики наноструктур, математической физики, комплексного анализа. Они должны обладать навыками решения уравнения Шредингера в декартовых и криволинейных координатных системах, свободно пользоваться методом разделения переменных, знать как вариационный метод решения уравнения Шредингера, так и метод теории возмущений. Уметь вычислять также характеристики как коэффициент поглощения и орбитальная плотность тока, а также плотность спинового магнитного момента. Студенты должны свободно владеть базовыми знаниями по квантовой механике и физике твердого тела.

1.4. **Предварительное условие для прохождения (дисциплина(ы), изучение которых является необходимой базой для освоения данной дисциплины)**

Предварительным условием прохождения дисциплины является обладание основами теоретической физики, а также ее математическим аппаратом. После прохождения данного курса студенты должны уметь вычислять различные физические характеристики квантовых наноструктур во внешних полях. Они должны уметь пользоваться соответствующей научной литературой, анализировать результаты полученные различными авторами, исследующих физические процессы в наноструктурах помещенных во внешние поля. У студентов должны выработаться навыки по анализу возможностей управления физическими свойствами наноструктур как с помощью изменения геометрических параметров изучаемых систем, так и путем изменения значений внешних полей.

2. Содержание

2.1. Цели и задачи дисциплины

*Данный курс имеет своей целью ознакомить магистрантов II-ого года обучения с физическими процессами в полупроводниковых квантовых наноструктурах при наличии внешних полей. Курс имеет ярко выраженный междисциплинарный характер, так как затрагивает вопросы связанные как с оптическими и электронными свойствами квантовых наноструктур, так и со спиновыми, а также многочастичными характеристиками таких систем. Помимо сугубо твердотельных задач, обсуждаются фундаментальные квантомеханические вопросы затрагивающие основы квантовой теории (эффект А^{***}- Бона, фаза Берри и т.д.).*

2.2. Требования к уровню освоения содержания дисциплины (какие компетенции (знания, умения и навыки) должны быть сформированы у студента ПОСЛЕ прохождения данной дисциплины)

После прохождения данного курса студент должен иметь навыки решения уравнения Шредингера для квантовых систем во внешних полях. Вычислять различные физические характеристики (коэффициент межзонного поглощения, орбитальный и спиновый токи, время обмена состояниями и т.д.) квантовых наноструктур. Анализировать особенности спектров излучения и поглощения квантовых точек различных геометрических форм и размеров.

2.3. Взаимосвязь с другими дисциплинами специальности:

Компьютерные технологии в физике; Квантовые наноструктуры во внешних полях; Квантоворазмерные структуры наноэлектроники.

2.4. Трудоемкость дисциплины и виды учебной работы (в академических часах и кредитах)

2.4.1 Объем дисциплины и виды учебной работы

1.1.1. 1.1.2.	Виды учебной работы	Всего, в акад. часах
	1. Общая трудоемкость изучения дисциплины по семестрам, в т. ч.:	108 (3 кр.)
	1.1. Аудиторные занятия, в т. ч.:	34
	1.1.1. Лекции	18
	1.1.2. Практические занятия, в т. ч.	16
	1.1.2.1. Контрольные работы	1 шт.
	1.2. Самостоятельная работа, в т. ч.:	38
	1.2.1. Подготовка к экзаменам	-
	1.2.1.1. Письменные домашние задания	-
	Итоговый контроль (экзамен, зачет, диф. зачет - указать)	зачет

2.4.2 Распределение весов по модуля и формам контроля

Веса и формы контролей	Веса форм текущих контролей в результирующей оценке текущего контроля			Веса форм промежуточных контролей и результирующей оценки текущего контроля в итоговой оценке промежуточного контроля			Веса итоговых оценок промежуточных контролей в результирующей оценке промежуточного контроля	Веса результирующей оценки промежуточных контролей и оценки итогового контроля в результирующей оценке итогового контроля
	M1	M2	M3	M1	M2	M3		
Вид учебной работы/контроля								
Контрольная работа				0	0	1		
Тест								
Курсовая работа								
Лабораторные работы								
Письменные домашние задания								
Эссе								
Обзор научной литературы	0	0	0					
Устный опрос								
Веса результирующих оценок текущих контролей в итоговых оценках соответствующих промежуточных контролей				0	0	0		
Вес итоговой оценки 1-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей							0	
Вес итоговой оценки 2-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей							0	
Вес итоговой оценки 3-го промежуточного контроля в результирующей оценке промежуточных контролей т.д.							1	
Вес результирующей оценки промежуточных контролей в результирующей оценке итогового контроля								1
Экзамен/зачет (оценка итогового контроля)								0
	$\Sigma=0$	$\Sigma=0$	$\Sigma=0$	$\Sigma=0$	$\Sigma=0$	$\Sigma=1$	$\Sigma=1$	$\Sigma=1$

2.4.3. Распределение объема дисциплины по темам и видам учебной работы

Разделы и темы дисциплины	Всего (ак. часов)	Лекции(ак. часов)	Практ. занятия (ак. часов)	Семина-ры (ак. часов)	Лабор. (ак. часов)	Другие виды занятий (ак. часов)
1	2	3	4	5	6	7
Модуль 1.						
Введение	1	1	-			
Раздел 1. Квантовые наноструктуры в магнитном поле.						
Тема 1. Электрон в однородном магнитном поле. Уровни Ландау. Квантовая яма в однородном магнитном поле.	2	1	1			
Тема 2. Параболическая квантовая точка в однородном магнитном поле. Конкуренция размерного и магнитного квантований.	2	1	1			
Тема 3. Межзонное поглощение в параболической квантовой точке при наличии однородного магнитного поля. Зависимость края поглощения от геометрических параметров и значения магнитного поля.	4	2	2			
Тема 4. Квантовое кольцо в магнитном поле.	2	1	1			
Тема 5. Эффект Ааронова- Бома для связанных состояний.	3	2	1			
Тема 6. Плотность электронного тока в магнитном поле с учетом спина. Ток спинового магнитного момента.	3	1	2			
Тема 7. Ток спинового магнитного момента в квантовом кольце.	2	1	1			
Раздел 2. Квантовые наноструктуры в электрическом поле.						
Тема 8. Квантовая яма в однородном электрическом поле.	2	1	1			
Тема 9. Слоистая нанопроволока в однородном электрическом поле(сильные и слабые поля).	3	2	1			
Тема 10. Параболическая квантовая точка в однородном электрическом	2	1	1			
Тема 11. Электропоглощение в параболической квантовой точке. Край электропоглощения и его зависимость от геометрических параметров и значения электрического поля.	2	1	1			
Тема 12. Сферический нанослой в однородном электрическом поле. Эффект Штарка для близких уровней.	4	2	2			
Тема 13. Электропоглощение в сферическом нанослое.	2	1	1			
ИТОГО	34	18	16			

2.3.4 Содержание разделов и тем дисциплины

Модуль 1

Введение

Во введении представлена общая картина развития основных теоретических понятий лежащих в основе описания поведения квантовых наноструктур во внешних полях.

Раздел 1. Квантовые наноструктуры в магнитном поле

Тема 1. Электрон в однородном магнитном поле. Уровни Ландау. Квантовая яма в однородном магнитном поле.

В рамках нерелятивистского уравнения Шредингера исследуются стационарные состояния электрона в однородном магнитном поле. Показывается, что поведение частицы в поперечной к полю плоскости описывается уравнением гармонического осциллятора. Если теперь рассмотреть квантовую яму в однородном магнитном поле, направленном перпендикулярно к плоскости ямы, то спектр становится полностью квантованным.

Литература:

1. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц – “Квантовая механика”, М. “Наука” 1989.
2. Գ.Ս. Սահակյան, Է.Վ. Չոբարյան – “Քվանտային մեխանիկա”, ԵՊՀ հրատարակ. 2011.

Тема 2. Параболическая квантовая точка в однородном магнитном поле. Конкуренция размерного и магнитного квантований.

Исследуется поведение электрона в параболической квантовой точке при наличии однородного магнитного поля направленного вдоль оси квантовой точки. Определены волновая функция и энергетический спектр электрона. Показано, что спектр частицы является осциллятором, частота которого выражается через комбинацию циклотронной частоты и частоты параболического потенциала ограничения. При этом в случае сильных полей в системе реализуется спектр Ландау.

Литература:

1. В.М. Галицкий, Б.М. Карнаков, В.И. Коган – “Задачи по квантовой механике” М. “Наука” 1981.
2. M.S. Atoyan, E.M. Kazaryan, H.A. Sarkisyan “Direct interband light absorption in a cylindrical quantum dot in quantizing magnetic field”, Physica E, vol. 22, p. 860-866 (2004).

Тема 3. Межзонное поглощение в параболической квантовой точке при наличии однородного магнитного поля. Зависимость края поглощения от геометрических параметров и значения магнитного поля.

На основе полученных в предыдущей теме результатов рассмотрено межзонное поглощение в параболической квантовой точке при наличии магнитного поля. При этом обсуждается режим сильного размерного квантования, когда можно пренебречь экситонными эффектами. Вычисляется коэффициент поглощения и определяются пороговые частоты поглощения. На основе аналитического выражения исследуется зависимость порога поглощения от геометрических размеров квантовой точки и величины магнитного поля.

Литература:

1. M.S. Atoyan, E.M. Kazaryan, H.A. Sarkisyan "Direct interband light absorption in a cylindrical quantum dot in quantizing magnetic field", *Physica E*, vol. 22, p. 860-866 (2004).

Тема 4. Квантовое кольцо в магнитном поле.

Рассмотрены одноэлектронные состояния в квантовом кольце при наличии аксиального магнитного поля. Показано, что в случае кольца малой толщины проблема сводится к задаче плоского ротатора в магнитном поле. Особое внимание уделяется специфической геометрии кольцеобразной наноструктуре. Топология кольца позволяет экспериментально продемонстрировать реализацию эффекта Ааронова-Бома в случае связанных состояний.

Литература:

1. A. Lorke et al. "Spectroscopy of Nanoscopic Semiconductor Rings", *Physical Review Letters*, vol., pp.2223-2226 (2000).
2. E.M. Kazaryan, H.A. Sarkisyan, "Layered nanostructures", *Encyclopedia UNESCO Nanoscience and Nanotechnology*, Ed. V.N. Kharkin (Russian Edition) pp. 120-133 (2011).

Тема 5. Эффект Ааронова-Бома для связанных состояний.

Обсуждается проблема одноэлектронных уровней в тонком квантовом кольце при наличии аксиального однородного магнитного поля. Показывается, что энергия электрона определяется отношением потока магнитного поля сквозь квантовое кольцо на квант магнитного потока. Отмечается, что последнее обстоятельство является следствием

нелокальности взаимодействия в квантовой механике. На основе сказанного выявляется особая роль электромагнитных потенциалов в квантовых системах (эффект Ааронова-Бома).

Литература:

1. A. Lorke et all. "Spectroscopy of Nanoscopic Semiconductor Rings", *Physical Review Letters*, vol., pp.2223-2226 (2000).
2. З. Флюгге "Задачи по квантовой механике", т.1, М. "Мир" 1984.
3. Е.М. Kazaryan, Н.А. Sarkisyan, "Layered nanostructures", *Encyclopedia UNESCO Nanoscience and Nanotechnology*, Ed. V.N. Kharkin (Russian Edition) pp. 120-133 (2011).

Тема 6. Плотность электронного тока в магнитном поле с учетом спина. Ток спинового магнитного момента.

С учетом спина электрона выводится вырождение для плотности тока в однородном магнитном поле. Выводится формула для тока спинового магнитного момента.

Литература:

1. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц – "Квантовая механика", М. "Наука" 1989.
2. В.М. Галицкий, Б.М. Карнаков, В.И. Коган – "Задачи по квантовой механике", М. "Наука", 1981.

Тема 7. Ток спинового магнитного момента в квантовом кольце.

Рассматривается проблема одноэлектронного тока в квантовом кольце при наличие однородного аксиального магнитного поля. Показано, что благодаря размерному квантованию во всех трех направлениях, можно погасить одноэлектронный орбитальный ток и оставить только ток спинового магнитного момента. Показывается возможность управления током спинового магнитного момента путем изменения геометрических параметров квантового кольца и величины магнитного поля.

Литература:

1. N.G. Aghekyan, Е.М. Kazaryan, Н.А. Sarkisyan "A single electron current in a cylindrical nanolayer", *Reports of National Academy of Sciences Republic of Armenia*, vol.112, N1, pp.73-78 (2012).
2. В.М. Галицкий, Б.М. Карнаков, В.И. Коган – "Задачи по квантовой механике", М. "Наука" 1981.

Тема 8. Квантовая яма в однородном электрическом поле.

В приближении эффективной массы рассматривается задача о поведении электрона в непроницаемой квантовой яме при наличии однородного электрического поля направленного перпендикулярно к плоскости ямы. Выявляется квадратичный характер штарковского расщепления уровней энергии электрона. Обсуждается случай сильного электрического поля, когда можно рассматривать движение электрона в треугольной яме.

Литература:

1. Э.М. Казарян, С.Г. Петросян “Физические основы наноэлектроники”, Ереван Изд. РАУ 2005.
2. M. Matsuura, T. Kamirato, “Subbands and excitons in a quantum well in an electric field”, *Physical Review B*, vol. 33, pp. 8385-8389 (1986).
3. В.М. Галицкий, Б.М. Карнаков, В.И. Коган – “Задачи по квантовой механике” М. “Наука”, 1981.

Тема 9. Слоистая нанопроволока в однородном электрическом поле(сильные и слабые поля).

Рассматривается одноэлектронный спектр квантовой проволоки имеющей сечение в виде цилиндрического слоя при наличии электрического поля, направленного перпендикулярно оси проволоки. В случае слабого поля задача решается в рамках теории возмущений. В случае сильного поля показывается, что проблема может быть сведена к задаче гармонического осциллятора, эффективная частота которого определяется величиной электрического поля.

Литература:

1. V.A. Harutyunyan “Cylindrical nanolayer in the strong uniform electrical field: The field localization of carriers and electrooptical transitions”, *Physica E*, vol. 41, pp. 695-700 (2009).
2. V.A. Harutyunyan, E.M. Kazaryan, H.A. Sarkisyan “Optical absorption in a narrow-band InSb cylindrical layered nanowire in the presence of strong electrostatic field”, *Journal of Contemporary Physics*, vol. 46, pp. 285-292 (2011).

Тема 10. Параболическая квантовая точка в однородном электрическом поле.

Рассматривается влияние однородного электрического поля на состояние электрона в параболической квантовой точке. Показывается, что данная задача является аналитически

решаемой. При этом в направлении поля задача аналогична проблеме поведения электрона в параболической квантовой яме при наличии однородного электрического поля. Полученные аналитические результаты позволяют провести детальный анализ поведения спектра электрона в зависимости от геометрических размеров квантовой точки и величины электрического поля.

Литература:

1. Н.А. Sarkisyan, "Electronic states in cylindrical quantum dot in the presence of parallel electrical and magnetic fields", *Modern Physics Letters B*, vol.16, pp.835-841 (2002).
2. Э.М. Казарян, С.Г. Петросян “Физические основы наноэлектроники”, Ереван Изд. РАУ 2005.

Тема 11. Электропоглощение в параболической квантовой точке. Край электропоглощения и его зависимость от геометрических параметров и значения электрического поля.

Рассматривается проблема межзонного поглощения в параболической квантовой точке при наличии однородного электрического поля. Вычисляется коэффициент поглощения и определяются пороговые частоты поглощения. Выявляются зависимости частот переходов от размеров квантовой точки и величины поля.

Литература:

1. M.S. Atoyán, E.M. Kazaryan, H.A. Sarkisyan “Interband light absorption in parabolic quantum dot in the presence of electrical and magnetic fields”, *Physica E*, vol. 31, pp. 83-85 (2006).
2. M.S. Atoyán, E.M. Kazaryan, H.A. Sarkisyan, "Interband light absorption in a cylindrical quantum dots in the presence of electrical field", *Reports of National Academy of Sciences Republic of Armenia*, vol.104, pp.314-320 (2004).

Тема 12. Сферический нанослой в однородном электрическом поле. Эффект Штарка для близких уровней.

Рассматривается эффект Штарка в сферическом нанослое InSb с непроницаемыми стенками. Вычисления проводятся для случая близких уровней, когда учитывается перекрытие волновых функций невозмущенной задачи. Показано, что в системе реализуется квадратичный эффект Штарка.

Литература:

1. V.A. Harutyunyan “Optical transitions in semiconductor nanospherical layer under the presence of perturbing electrical field”, *Physica E*, vol. 39, pp. 37-49 (2007).

2. A.A. Kirakosyan, E.M. Kazaryan, V.N. Mughnetsyan, H.A. Sarkisyan, "Tunability of absorption threshold frequencies and Stark shift in the InSb narrow gap spherical quantum layer", *Semiconductor Science and Technology*, vol. 27, pp. 085003 (6 pages) (2012).

Тема 13. Электропоглощение в сферическом нанослое.

Обсуждается электропоглощение в сферическом нанослое. Учитывается также непараболичность закона дисперсии электронов и легких дырок. Показана возможность контроля частот поглощения путем изменения как внутреннего, так и внешнего радиусов. Выявлены правила отбора для межзонных переходов.

Литература:

1. V.A. Narutyunyan "Optical transitions in semiconductor nanospherical layer under the presence of perturbing electrical field", *Physica E*, vol. 39, pp. 37-49 (2007).
2. A.A. Kirakosyan, E.M. Kazaryan, V.N. Mughnetsyan, H.A. Sarkisyan, "Tunability of absorption threshold frequencies and Stark shift in the InSb narrow gap spherical quantum layer", *Semiconductor Science and Technology*, vol. 27, pp. 085003 (6 pages) (2012).

3 Теоретический блок

3.4 Материалы по теоретической части курса

3.4.1 Учебник(и)

- Э.М. Казарян, С.Г. Петросян "Физические основы наноэлектроники", Ереван Изд. РАУ 2005.
- Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц – "Квантовая механика", М. "Наука" 1989.
- В.М. Галицкий, Б.М. Карнаков, В.И. Коган – "Задачи по квантовой механике" М. "Наука" 1981.

3.4.2 Учебное(ые) пособие(я)

- А.А. Саркисян, В.В. Эвоян, К.П. – "Элементы математического аппарата теоретической физики", Ереван Изд. РАУ 2009.

3.4.3 Краткий конспект лекций (краткие аннотации по каждой теме) – выше представлены.

3.5 Глоссарий/терминологический словарь

- Уровни Ландау – энергетические уровни квантовой частицы в однородном магнитном поле.

- Параболическая квантовая точка – квантовая точка с параболическим профилем потенциала ограничения (частоты ограничения по разным направлениям могут быть различными).
- Электропоглощение – поглощение света при наличии электрического поля.
- Квантовое кольцо – наноразмерная кольцеобразная квантовая точка (в частности цилиндрический нанослой малой высоты).
- Штарковский сдвиг уровней – сдвиг уровней энергии электрона под воздействием электрического поля.
- Эффект Ааронова-Бома – квантовое явление, в котором на частицу с электрическим зарядом или магнитным моментом электромагнитное поле влияет даже в тех областях, где напряженность электрического поля \mathbf{E} и индукция магнитного поля \mathbf{B} равны нулю, но не равны нулю скалярный и/или векторный потенциалы электромагнитного поля (то есть если не равен нулю электромагнитный потенциал).

4 Практический блок

4.4.1 Др. (Данный курс является теоретическим)

5 Материалы по оценке и контролю знаний

- 5.4 Образцы вариантов контрольных работ, тестов и/или других форм текущих и промежуточных контролей
- Промежуточный контроль проводится путем устного опроса.
- 5.5 Перечень экзаменационных вопросов
- Электрон в однородном магнитном поле. Уровни Ландау.
 - Квантовая яма в однородном магнитном поле.
 - Параболическая квантовая точка в однородном магнитном поле. Конкуренция размерного и магнитного квантований.
 - Межзонное поглощение в параболической квантовой точке при наличии однородного магнитного поля.
 - Зависимость края поглощения параболической квантовой точки от геометрических параметров точки и значения магнитного поля.
 - Квантовое кольцо в магнитном поле: одноэлектронная волновая функция и энергетический спектр.
 - Эффект Ааронова-Бома для связанных состояний.
 - Плотность электронного тока в магнитном поле с учетом спина.
 - Ток спинового магнитного момента.
 - Ток спинового магнитного момента в квантовом кольце.
 - Квантовая яма в однородном электрическом поле.

- Слоистая нанопроволока в однородном электрическом поле(сильные поля).
- Слоистая нанопроволока в однородном электрическом поле(слабые поля).
- Параболическая квантовая точка в однородном электрическом поле.
- Электропоглощение в параболической квантовой точке.
- Край электропоглощения в параболической квантовой точке и его зависимость от геометрических параметров и значения электрического поля.
- Сферический нанослой в однородном электрическом поле.
- Эффект Штарка для близких уровней в сферическом нанослое.
- Электропоглощение в сферическом нанослое.
- Край электропоглощения в сферическом нанослое и его зависимость от геометрических параметров и значения электрического поля.

5.6 Образцы экзаменационных билетов

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ N

- Квантовая яма в однородном магнитном поле.
- Эффект Штарка для близких уровней в сферическом нанослое

6 Методический блок

6.4 Методика преподавания, обоснование выбора данной методики

- Мел, доска и информация из интернета (статьи, обзоры, монографии). Активный контакт со студентами.

6.5 Методические рекомендации для студентов

6.5.1 Методические указания по организации самостоятельной работы студентов при изучении конкретной дисциплины

- Необходимо на первом этапе научиться читать монографии и обзоры. На втором этапе студенты должны пытаться понять научные статьи опубликованные в научной периодике.