

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования_
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Туннельные явления в нанофизике

Уровень высшего образования

Магистратура

Направление подготовки / специальность

03.04.03 - Радиофизика

Направленность образовательной программы

Квантовая радиофизика и лазерная физика

Форма обучения

очная

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.ДВ.06.04 Туннельные явления в нанофизике относится к части, формируемой участниками образовательных отношений образовательной программы.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ПК-1: Способен анализировать и обрабатывать научную информацию и результаты исследований в области квантовой радиофизики, лазерной физики и фотоники при решении задач своей профессиональной деятельности	<p>ПК-1.1: Применяет принципы сбора и анализа информации, рассматривает и оценивает современные научные достижения, а также генерирует новые идеи при решении исследовательских и практических задач</p> <p>ПК-1.2: Работает с большим объемом данных, систематизирует и анализирует информацию, полученную из различных источников, в том числе с использованием современных информационных и коммуникационных технологий</p>	<p>ПК-1.1:</p> <p>Знать: основы теории рассеяния в квантовой механике; основы теории туннельного эффекта в задачах физики твердого тела; методы расчета вольт-амперных характеристик туннельно-связанных систем; принципы работы эмиссионного и сканирующего туннельного микроскопа; связь туннельной проводимости и локальной плотности состояний.</p> <p>Уметь пользоваться законами квантовой механики для расчета коэффициентов отражения и прохождения волн в неоднородном потенциале, рассчитывать вольт-амперные характеристики туннельно-связанных систем.</p> <p>Владеть навыками решения задач, основанных на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях.</p> <p>ПК-1.2:</p> <p>Знать: основы теории рассеяния в квантовой механике; основы теории туннельного эффекта в задачах физики твердого тела; методы расчета вольт-</p>	Задачи	<p>Зачёт:</p> <p>Задачи</p> <p>Контрольные вопросы</p>

		<p>амперных характеристик туннельно-связанных систем; принципы работы эмиссионного и сканирующего туннельного микроскопа; связь туннельной проводимости и локальной плотности состояний.</p> <p>Уметь пользоваться законами квантовой механики для расчета коэффициентов отражения и прохождения волн в неоднородном потенциале, рассчитывать вольт-амперные характеристики туннельно-связанных систем.</p> <p>Владеть навыками решения задач, основанных на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях.</p>		
<p>ПК-2: Способен выполнять теоретические и экспериментальные исследования и разработки по отдельным разделам тем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области квантовой радиофизики, лазерной физики и фотоники и оформлять их результаты</p>	<p>ПК-2.1: Анализирует современное состояние исследований в области квантовой радиофизики, лазерной физики и фотоники, современные подходы к описанию и моделированию различных физических явлений и оценке полученных результатов</p> <p>ПК-2.2: Выбирает и применяет аналитические, аналитико-численные, экспериментальные методы исследования в соответствии с типом поставленной задачи</p> <p>ПК-2.3: Участвует в планировании, подготовке и проведении НИР</p> <p>ПК-2.4: Анализирует полученные данные, формулирует выводы и рекомендации по отдельным разделам тем в области квантовой радиофизики, лазерной физики и фотоники</p>	<p>ПК-2.1:</p> <p>Уметь применять полученные знания при проведении научных исследований в избранной области.</p> <p>Владеть основными методами теоретического описания макроскопических систем и использовать их при необходимости при проведении теоретических и/или экспериментальных физических исследований.</p> <p>ПК-2.2:</p> <p>Уметь применять полученные знания при проведении научных исследований в избранной области.</p> <p>Владеть основными методами теоретического описания макроскопических систем и использовать их при необходимости при проведении теоретических и/или экспериментальных физических исследований.</p> <p>ПК-2.3:</p> <p>Уметь применять полученные знания при проведении</p>	Задачи	<p>Зачёт:</p> <p>Задачи</p> <p>Контрольные вопросы</p>

		<p>научных исследований в избранной области.</p> <p>Владеть основными методами теоретического описания макроскопических систем и использовать их при необходимости при проведении теоретических и/или экспериментальных физических исследований.</p> <p>ПК-2.4:</p> <p>Уметь применять полученные знания при проведении научных исследований в избранной области.</p> <p>Владеть основными методами теоретического описания макроскопических систем и использовать их при необходимости при проведении теоретических и/или экспериментальных физических исследований.</p>		
--	--	---	--	--

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	2
Часов по учебному плану	72
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	32
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	0
- КСР	1
самостоятельная работа	39
Промежуточная аттестация	0
	Зачёт

3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе	
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем),	Самостоятельная работа

		часы из них			обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/ лабора- торные работы), часы	Всего	
	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0
Тема 1. Введение в спецкурс. Задача рассеяния в квантовой механике. Точные решения	13	6		6	7
Тема 2. Квазиклассическое описание туннелирования	9	4		4	5
Тема 3. Квазистационарные состояния в квантовой механике	9	4		4	5
Тема 4. Метод туннельного гамильтониана	4	2		2	2
Тема 5. Особенности туннельного эффекта в системе нормальных металлов	14	6		6	8
Тема 6. Особенности туннельного эффекта в системе сверхпроводящих металлов	12	5		5	7
Тема 7. Особенности туннельного эффекта в системе ферромагнитных металлов	10	5		5	5
Аттестация	0				
КСР	1			1	
Итого	72	32	0	33	39

Содержание разделов и тем дисциплины

-

Практические занятия /лабораторные работы организуются, в том числе, в форме практической подготовки, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

На проведение практических занятий / лабораторных работ в форме практической подготовки отводится: очная форма обучения - 4 ч.

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

Помимо ознакомления с рекомендованной литературой в процессе обучения самостоятельная работа обучающегося предполагает проработку контрольных вопросов.

5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:

5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-1:

Задача 1.1. Используя явный вид волновых функций состояний рассеяния

$$\psi_E(z) = \begin{cases} \frac{a_1}{\sqrt{2\pi\hbar v_1}} e^{ik_1 z} + \frac{b_1}{\sqrt{2\pi\hbar v_1}} e^{-ik_1 z} & (z \rightarrow -\infty) \\ \frac{a_2}{\sqrt{2\pi\hbar v_2}} e^{ik_2 z} + \frac{b_2}{\sqrt{2\pi\hbar v_2}} e^{-ik_2 z} & (z \rightarrow +\infty) \end{cases},$$

покажите, что слева от барьера плотность потока вероятности есть $\Pi = (a_1^2 - b_1^2)/(2\pi\hbar v_1)$, а справа от барьера $\Pi = (a_2^2 - b_2^2)/(2\pi\hbar v_2)$.

Задача 1.2. Используя общий вид матрицы рассеяния для случая одноканального рассеяния

$$\hat{S} = \begin{pmatrix} r & t' \\ t & r' \end{pmatrix},$$

покажите, что трансфер-матрица в этом случае может быть записана в следующем виде

$$\hat{M} = \begin{pmatrix} t^{-1} & -t'^{-1}r' \\ rt^{-1} & t' - rt'^{-1}r' \end{pmatrix}.$$

Задача 1.3. Вычислите амплитуды отражения r и прохождения t при падении частицы на одномерный потенциальный барьер вида

$$U(z) = D\delta(z - z_1) + \begin{cases} U_1 & (z < z_1) \\ U_2 & (z > z_1) \end{cases}.$$

слева.

Задача 1.4. Вычислите амплитуды отражения r и прохождения t при падении частицы на одномерный потенциальный барьер вида

$$U(z) = D\delta(z - z_1) + \begin{cases} U_1 & (z < z_1) \\ U_2 & (z > z_1) \end{cases}.$$

справа.

Задача 1.5. Вычислите амплитуды отражения и прохождения для потенциала с двумя локализованными рассеивателями для случая многоканального рассеивания по теории возмущений, предполагая, что коэффициент прохождения для каждого барьера близок к единице.

Задача 1.6. Вычислите амплитуды отражения и прохождения для потенциала с двумя локализованными рассеивателями для случая многоканального рассеивания без привлечения аппарата теории возмущений.

Задача 1.7. Вычислить амплитуды отражения и прохождения для потенциала с двумя локализованными рассеивателями для случая одноканального рассеивания, используя формализм трансфер-матрицы.

Задача 1.8. Используя выражение для трансфер-матрицы, соответствующей скачку потенциала (см. задачу 1.3)

$$\hat{M} = \frac{1}{2\sqrt{k_1 k_2}} \begin{pmatrix} (k_1 + k_2 + im^* D/\hbar^2) e^{i(-k_1 + k_2)z_1} & (k_1 - k_2 + im^* D/\hbar^2) e^{i(-k_1 - k_2)z_1} \\ (k_1 - k_2 - im^* D/\hbar^2) e^{i(k_1 + k_2)z_1} & (k_1 + k_2 - im^* D/\hbar^2) e^{i(k_1 - k_2)z_1} \end{pmatrix}.$$

вычислить компоненты трансфер-матрицы для одномерного прямоугольного потенциального барьера.

Задача 1.9. Используя выражение для трансфер-матрицы, соответствующей скачку потенциала (см. задачу 1.8), вычислите коэффициент прохождения для случая нормального падения частицы и исследуйте асимптотическое поведение для малых и больших энергий.

Задача 1.10. Используя выражение для трансфер-матрицы, соответствующей одномерному прямоугольному потенциальному барьеру

$$\hat{M} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix}, \quad \text{где}$$

$$M_{11} = \frac{e^{-ik_1 z_1 + ik_3 z_2}}{4\sqrt{k_1 k_2} \sqrt{k_2 k_3}} \left[(k_1 + k_2)(k_2 + k_3) e^{-ik_2 w_2} + (k_1 - k_2)(k_2 - k_3) e^{ik_2 w_2} \right]$$

$$M_{12} = \frac{e^{-ik_1 z_1 - ik_3 z_2}}{4\sqrt{k_1 k_2} \sqrt{k_2 k_3}} \left[(k_1 + k_2)(k_2 - k_3) e^{-ik_2 w_2} + (k_1 - k_2)(k_2 + k_3) e^{ik_2 w_2} \right]$$

$$M_{21} = \frac{e^{ik_1 z_1 + ik_3 z_2}}{4\sqrt{k_1 k_2} \sqrt{k_2 k_3}} \left[(k_1 - k_2)(k_2 + k_3) e^{-ik_2 w_2} + (k_1 + k_2)(k_2 - k_3) e^{ik_2 w_2} \right]$$

$$M_{22} = \frac{e^{ik_1 z_1 - ik_3 z_2}}{4\sqrt{k_1 k_2} \sqrt{k_2 k_3}} \left[(k_1 - k_2)(k_2 - k_3) e^{-ik_2 w_2} + (k_1 + k_2)(k_2 + k_3) e^{ik_2 w_2} \right]$$

вычислите коэффициент прохождения T через такой барьер. Рассмотрите частные случаи: симметричный барьер, «слабый» барьер и малопрозрачный барьер.

Задача 1.11. Получите выражение для трансфер-матрицы для случая наклонного падения частицы на скачок потенциала

$$U(z) = \begin{cases} U_1 & (z < z_1) \\ U_2 & (z > z_1) \end{cases}.$$

Задача 1.12. Исследуйте зависимость коэффициентов отражения и прохождения при рассеянии частицы на скачке потенциала

$$U(z) = \begin{cases} U_1 & (z < z_1) \\ U_2 & (z > z_1) \end{cases}.$$

от энергии налетающей волны E и угла падения Θ_1 для случая наклонного падения частицы на барьер.

Задача 1.13. Получите выражение для трансфер-матрицы для случая наклонного падения частицы на скачок потенциала с дельта-функцией

$$U(z) = D\delta(z - z_1) + \begin{cases} U_1 & (z < z_1) \\ U_2 & (z > z_1) \end{cases}.$$

Задача 1.14. Вычислить коэффициент отражения и прохождения для дельта-образного потенциального барьера $U(z) = D\delta(z - z_1)$ для случая нормального падения частицы на барьер.

Задача 1.15. Используя выражение для трансфер-матрицы, описывающей прохождение частицы через прямоугольный потенциальный барьер, из задачи 1.10, получить трансфер-матрицу для дельта-

функционального барьера предельным переходом $w_2 = x_2 - x_1 \rightarrow 0$ и $U_2 \rightarrow \infty$ при условии $w_2 U_2 = D$.

Задача 1.16. Рассчитать положение максимумов и минимумов коэффициента пропускания для прямоугольного потенциального барьера, рассматривая синфазное и противофазное сложение волн на стенках барьера. Сравнить с результатами задачи 1.10.

Задача 1.17. Для потенциального барьера следующего вида

$$U(z) = D_1 \delta(z - z_1) + D_2 \delta(z - z_2)$$

исследовать зависимость коэффициентов отражения и прохождения от энергии налетающей волны E для случая нормального падения. Обсудить эффективность резонансного прохождения от отношения D_1/D_2 .

Задача 1.18. Вычислите коэффициент прохождения через двойной прямоугольный потенциальный барьер для случая подбарьерного прохождения.

Задача 1.19. Используя метод трансфер-матрицы рассчитать спектр разрешенных состояний (зонный спектр) для электрона в потенциале, представляющем собой последовательность прямоугольных потенциальных барьеров (L -- период структуры).

Задача 1.20. Используя метод трансфер-матрицы рассчитать спектр разрешенных состояний (зонный спектр) для электрона в периодическом потенциале дельта-образного вида

$$U(z) = \sum_n D \delta(z - Ln)$$

где L – период структуры.

Задача 1.21. В квазиклассическом приближении рассчитать вероятность отражения и прохождения частицы от потенциального барьера $U(z)$.

Задача 1.22. В квазиклассическом приближении рассчитать вероятность отражения и прохождения частицы от треугольного потенциального барьера.

Задача 1.23. В квазиклассическом приближении рассчитать коэффициент прохождения частицы через потенциальный барьер вида $U(r) = -U_0$ при $r < r_0$ и $U(r) = -A/r$ при $r > r_0$ (в предположении о малой туннельной прозрачности барьера).

Задача 1.24. Рассчитайте энергетический спектр частицы в дельта-образной потенциальной яме, где $D < 0$.

$$U(z) = D \delta(z - z_1)$$

Задача 1.25. Рассчитайте энергетический спектр частицы в прямоугольной потенциальной яме конечной высоты, используя соотношение $\arg r_1 + \arg r_2 = 2\pi n$, где r_1 и r_2 есть амплитуды отражения от левой и правой стенок потенциальной ямы.

Задача 1.26. Рассчитайте энергетический спектр частицы в прямоугольной потенциальной яме конечной высоты, используя формализм трансфер-матрицы.

Задача 1.27. Используя общее выражение для спектра частицы в прямоугольной потенциальной яме конечной высоты $k_2(z_2 - z_1) = \pi n - \arctg k_2/\kappa_1 - \arctg k_2/\kappa_3$, получите энергетический спектр для глубокой и мелкой потенциальных ям.

Задача 1.28. Рассчитайте расщепление уровней в симметричных связанных прямоугольных ямах в предположении о малой прозрачности туннельного барьера

Задача 1.29. Оцените период осцилляций электронной плотности в туннельно-связанных потенциальных ямах.

Задача 1.30. Получить формулу Бора--Зоммерфельда, используя формулу связи затухающих и осциллирующих квазиклассических решений вблизи классической точки поворота $z=z_0$

$$\frac{1}{2\sqrt{|p(z)|}} \exp\left(-\frac{1}{\hbar} \int_{z_0}^z |p(z)| dz\right) \text{ при } E < U(z) \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{p(z)}} \cos\left(\frac{1}{\hbar} \int_{z_0}^z p(z) dz\right) \text{ при } E > U(z)$$

Задача 1.31. Получить выражение для нормированной квазиклассической волновой функции частицы в потенциальной яме.

Задача 1.32. Применяя формулу квантования Бора—Зоммерфельда

$$\frac{1}{\pi \hbar} \int_{z_1}^{z_2} |p(z)| dz = n + \frac{1}{2}$$

получите спектр состояний частицы в прямоугольной потенциальной яме в бесконечно высокими стенками. Сравните полученный результат с точным решением.

Задача 1.33. Применяя формулу квантования Бора—Зоммерфельда

$$\frac{1}{\pi \hbar} \int_{z_1}^{z_2} |p(z)| dz = n + \frac{1}{2}$$

получите спектр состояний частицы в параболической потенциальной яме. Сравните полученный результат с точным решением.

Задача 1.34. Исследуйте энергетический спектр E_n частицы в сферически-симметричном s-состоянии, локализованной в сферической потенциальной яме

$$U(r) = \begin{cases} U_1 & \text{при } r < r_1 \\ U_2 & \text{при } r > r_1 \end{cases}$$

Задача 1.35. Исследуйте энергетический спектр E_n частицы в сферически--симметричном s-состоянии, локализованной внутри сферического потенциального барьера

$$U(r) = \begin{cases} U_1 & \text{при } r < r_1 \\ U_2 & \text{при } r_1 < r < r_2 \\ U_3 & \text{при } r > r_2 \end{cases}$$

и оцените скорость распада такого квазистационарного состояния.

Задача 1.36. Используя решение задачи 1.23, оцените вероятность альфа-распада атома в основном s-состоянии.

Задача 1.37. Используя соотношения для вольт--амперной характеристики туннельного перехода, состоящего из двух массивных нормальных металлов в приближении свободного электронного

$$j_{\text{газа}} = \frac{2e}{2\pi\hbar} \int T(E_{\parallel}) N(E_{\parallel}) dE_{\parallel}$$

$$N(E_{\parallel}) = \frac{m^{\star}}{2\pi\hbar^2} \int_{E_{\parallel}}^{\infty} (f_0(E - e\phi_L) - f_0(E - e\phi_R)) dE$$

где

получите формулу Тцу-Есаки (задача 1.38).

$$j = \frac{2e}{2\pi\hbar} \int_0^{\infty} T(E_{\parallel}) \cdot \frac{m^{\star}}{2\pi\hbar^2} \cdot kT \cdot \ln \frac{(1 + e^{-(E_{\parallel} - \mu - e\phi_L)/kT})}{(1 + e^{-(E_{\parallel} - \mu - e\phi_R)/kT})} dE_{\parallel}$$

Задача 1.38. Используя формулу Тцу-Есаки

оцените туннельную проводимость перехода, состоящего из двух массивных нормальных металлов, при $T=0$ и при малых смещения.

Задача 1.39. Используя формулу Тцу-Есаки (задача 1.38), рассчитайте вольт-амперную характеристику перехода, состоящего из двух массивных нормальных металлов, при $T=0$ и при больших смещения.

Задача 1.40. Рассчитайте вольт-амперную характеристику туннельного перехода, состоящего из двух массивных нормальных металлов и квантовой ямы с дискретным энергетическим спектром (резонансно-туннельный диод), при $T=0$

Задача 1.41. Оцените число распространяющихся мод, анализируя площадь сечений сферы Ферми для заданного импульса, для туннельно-связанных металлов в приближении свободного электронного газа

5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-2:

Задача 2.1. Используя выражение для средней свободной энергии системы попарно-коррелированных электронов

$$E = \sum_k 2\varepsilon_k |v_k|^2 + \sum_k V_{k,k} u_k v_k^{\star} u_k^{\star} v_k$$

определите зависимости факторов когерентности u_k и v_k от волнового вектора в состоянии термодинамического равновесия.

Задача 2.2. Используя выражение для спектра квазичастичных возбуждений $E_k = \sqrt{\varepsilon_k^2 + \Delta_k^2}$, рассчитайте плотность состояний квазичастичных возбуждений.

Задача 2.3. Рассчитайте вольт-амперную характеристику перехода сверхпроводник – изолятор – нормальный металл при $T=0$.

Задача 2.4. Рассчитайте вольт-амперную характеристику перехода сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник при $T=0$.

Задача 2.5. Рассчитать зависимость полного джозефсоновского тока через короткий джозефсоновский контакт от внешнего магнитного поля.

Задача 2.6. Решить задачу о структуре джозефсоновского вихря в широком джозефсоновском переходе в модели Феррела-Прейджа.

Задача 2.7. В рамках модели резистивно-шунтированного перехода рассчитать вольт-амперную характеристику короткого джозефсоновского перехода для заданного стороннего тока (задача о нестационарном эффекте Джозефсона).

Задача 2.8. В рамках модели резистивно-шунтированного перехода рассчитать вольт-амперную характеристику точечного джозефсоновского перехода для заданного переменного напряжения (задача о ступеньках Шапиро).

Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне, выше предусмотренного программой ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо» ИЛИ Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатор достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено		зачтено				
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.

	вследствие отказа обучающегося от ответа		негрубых ошибок	. Допущено несколько негрубых ошибок	. Допущено несколько несущественных ошибок	и. Ошибок нет.	
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельным и несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-1

Задача 1.1. Используя явный вид волновых функций состояний рассеяния

$$\psi_E(z) = \begin{cases} \frac{a_1}{\sqrt{2\pi\hbar v_1}} e^{ik_1 z} + \frac{b_1}{\sqrt{2\pi\hbar v_1}} e^{-ik_1 z} & (z \rightarrow -\infty) \\ \frac{a_2}{\sqrt{2\pi\hbar v_2}} e^{ik_2 z} + \frac{b_2}{\sqrt{2\pi\hbar v_2}} e^{-ik_2 z} & (z \rightarrow +\infty) \end{cases},$$

покажите, что слева от барьера плотность потока вероятности есть $\Pi = (a_1^2 - b_1^2)/(2\pi\hbar v_1)$, а справа от барьера – $\Pi = (a_2^2 - b_2^2)/(2\pi\hbar v_2)$.

Задача 1.2. Используя общий вид матрицы рассеяния для случая одноканального рассеяния

$$\hat{S} = \begin{pmatrix} r & t \\ t & r \end{pmatrix},$$

покажите, что трансфер-матрица в этом случае может быть записана в следующем виде

$$\hat{M} = \begin{pmatrix} t^{-1} & -t^{-1}r \\ rt^{-1} & t - rt^{-1}r \end{pmatrix}.$$

Задача 1.3. Вычислите амплитуды отражения r и прохождения t при падении частицы на одномерный потенциальный барьер вида

$$U(z) = D\delta(z - z_1) + \begin{cases} U_1 & (z < z_1) \\ U_2 & (z > z_1) \end{cases}.$$

слева.

Задача 1.4. Вычислите амплитуды отражения r и прохождения t при падении частицы на одномерный потенциальный барьер вида

$$U(z) = D\delta(z - z_1) + \begin{cases} U_1 & (z < z_1) \\ U_2 & (z > z_1) \end{cases}.$$

справа.

Задача 1.5. Вычислите амплитуды отражения и прохождения для потенциала с двумя локализованными рассеивателями для случая многоканального рассеивания по теории возмущений, предполагая, что коэффициент прохождения для каждого барьера близок к единице.

Задача 1.6. Вычислите амплитуды отражения и прохождения для потенциала с двумя локализованными рассеивателями для случая многоканального рассеивания без привлечения аппарата теории возмущений.

Задача 1.7. Вычислить амплитуды отражения и прохождения для потенциала с двумя локализованными рассеивателями для случая одноканального рассеивания, используя формализм трансфер-матрицы.

Задача 1.8. Используя выражение для трансфер-матрицы, соответствующей скачку потенциала (см. задачу 1.3)

$$\hat{M} = \frac{1}{2\sqrt{k_1 k_2}} \begin{pmatrix} (k_1 + k_2 + im^* D/\hbar^2) e^{i(-k_1 + k_2)z_1} & (k_1 - k_2 + im^* D/\hbar^2) e^{i(-k_1 - k_2)z_1} \\ (k_1 - k_2 - im^* D/\hbar^2) e^{i(k_1 + k_2)z_1} & (k_1 + k_2 - im^* D/\hbar^2) e^{i(k_1 - k_2)z_1} \end{pmatrix}.$$

вычислить компоненты трансфер-матрицы для одномерного прямоугольного потенциального барьера.

Задача 1.9. Используя выражение для трансфер-матрицы, соответствующей скачку потенциала (см. задачу 1.8), вычислите коэффициент прохождения для случая нормального падения частицы и исследуйте асимптотическое поведение для малых и больших энергий.

Задача 1.10. Используя выражение для трансфер-матрицы, соответствующей одномерному прямоугольному потенциальному барьеру

$$\hat{M} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix}, \quad \text{где}$$

$$M_{11} = \frac{e^{-ik_1 z_1 + ik_3 z_2}}{4\sqrt{k_1 k_2} \sqrt{k_2 k_3}} \left[(k_1 + k_2)(k_2 + k_3) e^{-ik_2 w_2} + (k_1 - k_2)(k_2 - k_3) e^{ik_2 w_2} \right]$$

$$M_{12} = \frac{e^{-ik_1 z_1 - ik_3 z_2}}{4\sqrt{k_1 k_2} \sqrt{k_2 k_3}} \left[(k_1 + k_2)(k_2 - k_3) e^{-ik_2 w_2} + (k_1 - k_2)(k_2 + k_3) e^{ik_2 w_2} \right]$$

$$M_{21} = \frac{e^{ik_1 z_1 + ik_3 z_2}}{4\sqrt{k_1 k_2} \sqrt{k_2 k_3}} \left[(k_1 - k_2)(k_2 + k_3) e^{-ik_2 w_2} + (k_1 + k_2)(k_2 - k_3) e^{ik_2 w_2} \right]$$

$$M_{22} = \frac{e^{ik_1 z_1 - ik_3 z_2}}{4\sqrt{k_1 k_2} \sqrt{k_2 k_3}} \left[(k_1 - k_2)(k_2 - k_3) e^{-ik_2 w_2} + (k_1 + k_2)(k_2 + k_3) e^{ik_2 w_2} \right]$$

вычислите коэффициент прохождения T через такой барьер. Рассмотрите частные случаи: симметричный барьер, «слабый» барьер и малопрозрачный барьер.

Задача 1.11. Получите выражение для трансфер-матрицы для случая наклонного падения частицы на скачок потенциала

$$U(z) = \begin{cases} U_1 & (z < z_1) \\ U_2 & (z > z_1) \end{cases}.$$

Задача 1.12. Исследуйте зависимость коэффициентов отражения и прохождения при рассеянии частицы на скачке потенциала

$$U(z) = \begin{cases} U_1 & (z < z_1) \\ U_2 & (z > z_1) \end{cases}.$$

от энергии налетающей волны E и угла падения Θ_1 для случая наклонного падения частицы на барьер.

Задача 1.13. Получите выражение для трансфер-матрицы для случая наклонного падения частицы на скачок потенциала с дельта-функцией

$$U(z) = D\delta(z - z_1) + \begin{cases} U_1 & (z < z_1) \\ U_2 & (z > z_1) \end{cases}.$$

Задача 1.14. Вычислить коэффициент отражения и прохождения для дельта-образного потенциального барьера $U(z) = D\delta(z - z_1)$ для случая нормального падения частицы на барьер.

Задача 1.15. Используя выражение для трансфер-матрицы, описывающей прохождение частицы через прямоугольный потенциальный барьер, из задачи 1.10, получить трансфер-матрицу для дельта-

функционального барьера предельным переходом $w_2 = x_2 - x_1 \rightarrow 0$ и $U_2 \rightarrow \infty$ при условии $w_2 U_2 = D$.

Задача 1.16. Рассчитать положение максимумов и минимумов коэффициента пропускания для прямоугольного потенциального барьера, рассматривая синфазное и противофазное сложение волн на стенках барьера. Сравнить с результатами задачи 1.10.

Задача 1.17. Для потенциального барьера следующего вида

$$U(z) = D_1\delta(z - z_1) + D_2\delta(z - z_2)$$

исследовать зависимость коэффициентов отражения и прохождения от энергии налетающей волны E для случая нормального падения. Обсудить эффективность резонансного прохождения от отношения D_1/D_2 .

Задача 1.18. Вычислите коэффициент прохождения через двойной прямоугольный потенциальный барьер для случая подбарьерного прохождения.

Задача 1.19. Используя метод трансфер-матрицы рассчитать спектр разрешенных состояний (зонный спектр) для электрона в потенциале, представляющем собой последовательность прямоугольных потенциальных барьеров (L -- период структуры).

Задача 1.20. Используя метод трансфер-матрицы рассчитать спектр разрешенных состояний (зонный спектр) для электрона в периодическом потенциале дельта-образного вида

$$U(z) = \sum_n D \delta(z - Ln)$$

где L -- период структуры.

Задача 1.21. В квазиклассическом приближении рассчитать вероятность отражения и прохождения частицы от потенциального барьера $U(z)$.

Задача 1.22. В квазиклассическом приближении рассчитать вероятность отражения и прохождения частицы от треугольного потенциального барьера.

Задача 1.23. В квазиклассическом приближении рассчитать коэффициент прохождения частицы через потенциальный барьер вида $U(r) = -U_0$ при $r < r_0$ и $U(r) = -A/r$ при $r > r_0$ (в предположении о малой туннельной прозрачности барьера).

Задача 1.24. Рассчитайте энергетический спектр частицы в дельта-образной потенциальной яме, где $D < 0$.

$$U(z) = D \delta(z - z_1)$$

Задача 1.25. Рассчитайте энергетический спектр частицы в прямоугольной потенциальной яме конечной высоты, используя соотношение $\arg r_1 + \arg r_2 = 2\pi n$, где r_1 и r_2 есть амплитуды отражения от левой и правой стенок потенциальной ямы.

Задача 1.26. Рассчитайте энергетический спектр частицы в прямоугольной потенциальной яме конечной высоты, используя формализм трансфер-матрицы.

Задача 1.27. Используя общее выражение для спектра частицы в прямоугольной потенциальной яме конечной высоты $k_2(z_2 - z_1) = \pi n - \arctg k_2/\kappa_1 - \arctg k_2/\kappa_3$, получите энергетический спектр для глубокой и мелкой потенциальных ям.

Задача 1.28. Рассчитайте расщепление уровней в симметричных связанных прямоугольных ямах в предположении о малой прозрачности туннельного барьера

Задача 1.29. Оцените период осцилляций электронной плотности в туннельно-связанных потенциальных ямах.

Задача 1.30. Получить формулу Бора--Зоммерфельда, используя формулу связи затухающих и осциллирующих квазиклассических решений вблизи классической точки поворота $z=z_0$

$$\frac{1}{2\sqrt{|p(z)|}} \exp\left(-\frac{1}{\hbar} \int_{z_0}^z |p(z)| dz\right) \text{ при } E < U(z) \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{p(z)}} \cos\left(\frac{1}{\hbar} \int_{z_0}^z p(z) dz\right) \text{ при } E > U(z)$$

Задача 1.31. Получить выражение для нормированной квазиклассической волновой функции частицы в потенциальной яме.

Задача 1.32. Применяя формулу квантования Бора—Зоммерфельда

$$\frac{1}{\pi \hbar} \int_{z_1}^{z_2} |p(z)| dz = n + \frac{1}{2}$$

получите спектр состояний частицы в прямоугольной потенциальной яме в бесконечно высокими стенками. Сравните полученный результат с точным решением.

Задача 1.33. Применяя формулу квантования Бора—Зоммерфельда

$$\frac{1}{\pi \hbar} \int_{z_1}^{z_2} |p(z)| dz = n + \frac{1}{2}$$

получите спектр состояний частицы в параболической потенциальной яме. Сравните полученный результат с точным решением.

Задача 1.34. Исследуйте энергетический спектр E_n частицы в сферически-симметричном s-состоянии, локализованной в сферической потенциальной яме

$$U(r) = \begin{cases} U_1 & \text{при } r < r_1 \\ U_2 & \text{при } r > r_1 \end{cases}$$

Задача 1.35. Исследуйте энергетический спектр E_n частицы в сферически--симметричном s-состоянии, локализованной внутри сферического потенциального барьера

$$U(r) = \begin{cases} U_1 & \text{при } r < r_1 \\ U_2 & \text{при } r_1 < r < r_2 \\ U_3 & \text{при } r > r_2 \end{cases}$$

и оцените скорость распада такого квазистационарного состояния.

Задача 1.36. Используя решение задачи 1.23, оцените вероятность альфа-распада атома в основном s-состоянии.

Задача 1.37. Используя соотношения для вольт-амперной характеристики туннельного перехода, состоящего из двух массивных нормальных металлов в приближении свободного электронного газа

$$j = \frac{2e}{2\pi\hbar} \int T(E_{||}) N(E_{||}) dE_{||}$$

$$N(E_{||}) = \frac{m^*}{2\pi\hbar^2} \int_{E_{||}}^{\infty} (f_0(E - e\phi_L) - f_0(E - e\phi_R)) dE$$

где

получите формулу Тцу-Есаки (задача 1.38).

$$j = \frac{2e}{2\pi\hbar} \int_0^{\infty} T(E_{||}) \cdot \frac{m^*}{2\pi\hbar^2} \cdot kT \cdot \ln \frac{(1 + e^{-(E_{||} - \mu - e\phi_L)/kT})}{(1 + e^{-(E_{||} - \mu - e\phi_R)/kT})} dE_{||}$$

Задача 1.38. Используя формулу Тцу-Есаки

оцените туннельную проводимость перехода, состоящего из двух массивных нормальных металлов, при $T=0$ и при малых смещения.

Задача 1.39. Используя формулу Тцу-Есаки (задача 1.38), рассчитайте вольт-амперную характеристику перехода, состоящего из двух массивных нормальных металлов, при $T=0$ и при больших смещения.

Задача 1.40. Рассчитайте вольт-амперную характеристику туннельного перехода, состоящего из двух массивных нормальных металлов и квантовой ямы с дискретным энергетическим спектром (резонансно-туннельный диод), при $T=0$

Задача 1.41. Оцените число распространяющихся мод, анализируя площадь сечений сферы Ферми для заданного импульса, для туннельно-связанных металлов в приближении свободного электронного газа

5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-2

Задача 2.1. Используя выражение для средней свободной энергии системы попарно-коррелированных электронов

$$E = \sum_k 2\varepsilon_k |v_k|^2 + \sum_k V_{k,k} u_k v_k^* u_k^* v_k^*$$

определите зависимости факторов когерентности u_k и v_k от волнового вектора в состоянии термодинамического равновесия.

Задача 2.2. Используя выражение для спектра квазичастичных возбуждений $E_k = \sqrt{\varepsilon_k^2 + \Delta_k^2}$, рассчитайте плотность состояний квазичастичных возбуждений.

Задача 2.3. Рассчитайте вольт-амперную характеристику перехода сверхпроводник – изолятор – нормальный металл при $T=0$.

Задача 2.4. Рассчитайте вольт-амперную характеристику перехода сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник при $T=0$.

Задача 2.5. Рассчитать зависимость полного джозефсоновского тока через короткий джозефсоновский контакт от внешнего магнитного поля.

Задача 2.6. Решить задачу о структуре джозефсоновского вихря в широком джозефсоновском переходе в модели Феррела-Прейджа.

Задача 2.7. В рамках модели резистивно-шунтированного перехода рассчитать вольт-амперную характеристику короткого джозефсоновского перехода для заданного стороннего тока (задача о нестационарном эффекте Джозефсона).

Задача 2.8. В рамках модели резистивно-шунтированного перехода рассчитать вольт-амперную характеристику точечного джозефсоновского перехода для заданного переменного напряжения (задача о ступеньках Шапиро).

Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне, выше предусмотренного программой ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо» ИЛИ Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.3.3 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-1

1. Применение формализма матриц рассеяния и трансфер-матриц для решения квантовомеханических задач рассеяния.
2. Осцилляции электронной плотности в туннельно-связанных потенциальных ямах. Представление о скорости туннелирования.
3. Вольт-амперная характеристика туннельного перехода, состоящего из двух нормальных металлов. Случай малых напряжений.

4. Холодная полевая эмиссия в электрическом поле. Формула Фаулера-Нордхейма.
5. Резонансное когерентное туннелирование в плоскостной структуре. Вольт-амперная характеристик резонансно-туннельного диода.
6. Принцип работы сканирующего туннельного микроскопа
7. Низкотемпературная сканирующая туннельная спектроскопия.
8. Принцип работы электронного эмиссионного микроскопа.
9. Кулоновская блокада туннелирования в одноэлектронном транзисторе с затвором.
10. Квазиклассическое приближение (Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна). Прохождение частицы через квазиклассический потенциальный барьер. Формула Кембла.
11. Связь туннельной проводимости и локальной плотности состояний (задача Терсофа - Хаманна).

5.3.4 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-2

1. Квазичастичное туннелирование в сверхпроводниках. Вольт-амперные характеристики системы «сверхпроводник – изолятор – нормальный металл» и «сверхпроводник – изолятор –сверхпроводник».
2. Критический ток короткого джозефсоновского перехода. Осцилляции критического тока в магнитном поле.
3. Стационарный эффект Джозефсона.
4. Нестационарный эффект Джозефсона. Вольт-амперная характеристика короткого джозефсоновского перехода в модели резистивно-шунтированного перехода для заданного тока.
5. Низкотемпературная сканирующая туннельная спектроскопия и проблема визуализации вихрей (включений нормального металла в сверхпроводящих пленках).
6. Принцип работ двухконтактного квантового интерферометра постоянного тока (dc-SQUID)

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне, выше предусмотренного программой ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна

Оценка	Критерии оценивания
	компетенция сформирована на уровне «хорошо» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо» ИЛИ Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Туннельные явления в твердых телах : [лекции] / под ред. Э. Бурштейна и С. Лундквиста ; пер. с англ. И. П. Ипатовой и А. В. Субашиева ; под ред. Б. И. Переля. - М. : Мир, 1973. - 421 с. : черт. - 2.63., 3 экз.
2. Ландау Лев Давидович. Теоретическая физика. Том 3. Квантовая механика (нерелятивистская теория) : Учебное пособие. - 6-е изд. - Москва : Издательская фирма "Физико-математическая литература" (ФИЗМАТЛИТ), 2016. - 800 с. - ВО - Бакалавриат. - ISBN 978-5-9221-0530-9., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=741026&idb=0>.
3. Демиховский Валерий Яковлевич. Физика квантовых низкоразмерных структур / В. Я. Демиховский, Г. А. Вугальтер. - М. : Логос, 2000. - 248 с. : ил. - ISBN 5-88439-045-9 : 25.00., 3 экз.
4. Абрикосов Алексей Алексеевич. Основы теории металлов : [учеб. пособие] / [под ред. Л. А. Фальковского]. - 2-е изд., доп. и испр. - М. : Физматлит, 2010. - 600 с. - ISBN 978-5-9221-1097-6 : 541.42., 1 экз.
5. Солимар Л. Туннельный эффект в сверхпроводниках и его применение / пер. с англ. А. Ф. Волкова и Э. М. Эпштейна. - М. : Мир, 1974. - 428 с. : с черт. - 2.74., 4 экз.

Дополнительная литература:

1. Блохинцев Дмитрий Иванович. Основы квантовой механики : [учеб. пособие для вузов]. - 5-е изд., перераб. - М. : Наука, 1976. - 664 с. : ил. - 1.60., 86 экз.
2. Бом Давид. Квантовая теория / пер. с англ. Л. А. Шубиной ; под ред. С. В. Вонсовского. - Изд. 2-е, испр. - М. : Наука, 1965. - 727 с. : черт. - 2.48., 4 экз.
3. Задачи по квантовой механике : учеб. пособие для студентов физ. специальностей вузов. - М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. - 648 с. : граф. - 1.70., 44 экз.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

Абрикосов А.А., «Основы теории металлов». — М.: Физматлит, 2010. Постоянная ссылка на документ: <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785922110976.html>

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки/специальности 03.04.03 - Радиофизика.

Автор(ы): Аладышкин Алексей Юрьевич, доктор физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Красильник Захарий Фишелевич, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 18.12.2023 г., протокол № 09/23.