

Рабочая программа дисциплины

1. Название дисциплины: *Динамика джозефсоновских систем*

2. Уровень высшего образования – *магистратура*

3. Направление подготовки: *03.03.02 Физика (магистратура)*

4. Аннотация:

Целью настоящего Курса является формирование у слушателей углубленных базовых знаний, необходимых для исследовательской работы в области квантовых вычислительных систем, использующих фазовые кубиты, физики сверхпроводниковой нано-электроники, макроскопических квантовых эффектов в сверхпроводниках. Задача данного курса - изучение нелинейной динамики джозефсоновских систем различного типа, в том числе, многоэлементных джозефсоновских структур и джозефсоновских систем с различными внешними цепями, различными типами электромагнитной связи и различными видами воздействующих внешних сигналов. Рассматриваются системы с различными типами джозефсоновских переходов как на основе традиционных низкотемпературных сверхпроводников, так и высокотемпературных сверхпроводников и слабо-магнитных материалов.

4. Объем дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических или астрономических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся (указывается согласно рабочему плану):

Объем дисциплины составляет 2 зачетных единиц, всего 72 часа, из которых 36 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем, 36 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

5. Входные требования для освоения дисциплины, предварительные условия: Компетенции ПК-1; ПК-2; ПК-5; ПК-6; ОНК-5

6. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества **академических** часов и виды учебных занятий:

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего, часы	В том числе							
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них					Самостоятельная работа обучающегося, часы из них		
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Групповые консультации	Индивидуальные консультации	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости коллоквиумы, практические контрольные занятия и др.*	Всего	Выполнение домашних заданий	Подготовка рефератов и т.п.
<ul style="list-style-type: none"> Динамика одиночного джозефсоновского перехода, смещенного постоянным током. <p>2 часа. Динамика джозефсоновских переходов, описываемых резистивной моделью с емкостью. Джозефсоновская генерация. Ток возврата, плазменные осцилляции, частота плазменных осцилляций и время затухания. Численное моделирование динамических процессов с использованием программного пакета PSCAN.</p> <p>2 часа. Микроскопическая теория туннельных переходов. Гистерезис и риделевский пик на вольт-амперной характеристике (ВАХ) джозефсоновских переходов. Ток возврата, динамический пробой. Шунтирование туннельного джозефсоновского перехода низкоомным резистором. Нелинейно-резистивная модель. Численное моделирование</p>	8	4				4	4		4

туннельных джозефсоновских переходов с использованием SIS и SNINS моделей.									
<ul style="list-style-type: none"> Динамика джозефсоновского перехода под воздействием внешнего высокочастотного сигнала. 2 часа. Захват частоты джозефсоновской генерации. Ступени Шапиро на ВАХ джозефсоновского перехода. Фазовые соотношения в области синхронного режима. Эффект увлечения частоты. «Обратный» эффект Джозефсона в туннельных джозефсоновских структурах. Высокочастотный предел. Учет влияния емкости. 2 часа. Переход от явления захвата частоты к динамическому хаосу. Численное моделирование джозефсоновских структур под воздействием высокочастотного сигнала с использованием резистивной, нелинейно-резистивной и туннельной моделей (SIS и SNINS) джозефсоновских переходов. 	8	4				4	4		4
<ul style="list-style-type: none"> Сверхпроводящие квантовые интерференционные датчики. 2 часа. Одно-контактный сверхпроводящий квантовый интерферометр. Динамика переключений. Плазменные осцилляции. Много-квантовые скачки. Динамический хаос. Критерий отсутствия хаоса. Численное моделирование динамических процессов, включая динамический хаос. 2 часа. Двух-контактный сверхпроводящий квантовый интерферометр. Влияние приложенного магнитного потока. Сигнальная характеристика. Динамика интерферометра в резистивном состоянии, фазовых соотношения в процессах джозефсоновской генерации. Численное моделирование динамики. 2 часа. Одно-контактный пи-интерферометр и его характеристики. Двух- и трех-контактные пи-интерферометры и их характеристики. Численное моделирование. Влияние емкости джозефсоновских переходов. Би-интерферометр. 	12	6				6	6		6

<ul style="list-style-type: none"> ● Сквиды переменного и постоянного тока. <p>2 часа. Сквид переменного тока. Гистерезисный режим работы. Динамические процессы. Высокочастотная и сигнальная характеристики. Влияние флуктуаций. Безгистерезисный режим работы. Численное моделирование.</p> <p>2 часа. Сквид постоянного тока, сигнальные характеристики. Релаксационный сквид постоянного тока и его сигнальные характеристики. Явление динамического пробоя. Би-сквид и его сигнальные характеристики. Численное моделирование динамики.</p>	8	4					4	4		4
<ul style="list-style-type: none"> ● Параллельная цепочка джозефсоновских переходов. <p>2 часа. Параллельная цепочка джозефсоновских 0- и пи-переходов. Зависимость критического тока от магнитного поля. Цепочечная модель бикристаллического джозефсоновского перехода. Радиус связи. Численное моделирование.</p> <p>2 часа. Параллельная цепочка туннельных джозефсоновских переходов как модель распределенного туннельного перехода. Джозефсоновский вихрь. Критическое поле. Частоты и ступеньки Фиске. Скорость Свайхарта. Пик Экка, “flux-flow” режим. Численное моделирование.</p>	8	4					4	4		4
<ul style="list-style-type: none"> ● Динамика цепей быстрой одноквантовой логики (RSFQ). <p>2 часа. Джозефсоновская линия передачи одиночных квантов магнитного потока. Численное моделирование динамики. Скорость передачи квантов потока. Взаимодействие квантов и антиквантов потока. Быстрая одноквантовая логика.</p> <p>2 часа. Балансный джозефсоновский компаратор тока. Сравнение с другими схемами компараторов. Динамика балансного компаратора. Одно- и двух-квантовые режимы переключения. Пороговые характеристики. Численное моделирование динамики.</p>	8	4					4	4		4

<ul style="list-style-type: none"> Динамика одиночного джозефсоновского перехода и цепочек переходов в присутствии внешних цепей. <p>2 часа. Джозефсоновский переход, подключенный к высокодобротной цепи. Параллельный и последовательный резонансы Джозефсоновский переход в резонаторе и широкополосной волноводной линии. Численное моделирование.</p> <p>2 часа. Параметрический резонанс. Условия резонанса. Мягкое и жесткое возбуждения. Ступени Шапиро под воздействием сигнала с частотой, близкой к резонансной. Численное моделирование динамики и ВАХ.</p> <p>2 часа. Тепловые флуктуации в джозефсоновском переходе. Метод Ланжевена. Фактор шума. Влияние флуктуаций на ВАХ и динамику. Спектр флуктуаций тока и напряжения в резистивном состоянии. Спектр джозефсоновской генерации.</p> <p>2 часа. Ширина линии джозефсоновской генерации и способы ее сужения. Синхронизация в цепочках и решетках джозефсоновских переходов. Цепи электродинамической связи. Эффективный радиус взаимодействия. Ширина линии синхронной генерации.</p>	16	8					8	8		8
<ul style="list-style-type: none"> Сверхпроводящие квантовые решетки. <p>2 часа. Линейность отклика напряжения и динамический диапазон. Дифференциальная квантовая ячейка. Радиус взаимодействия джозефсоновских переходов на частоте джозефсоновской генерации и частоте сигнала. Зависимость формы отклика напряжения от радиуса взаимодействия.</p>	4	2					2	2		2
Промежуточная аттестация										
Итого	72	36					36	36		36

* Текущий контроль успеваемости может быть реализован в рамках занятий семинарского типа, групповых или индивидуальных консультаций

7. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

- Печатная версия презентации материала лекций,
- Программа курса,
- Список примеров задач по данному курсу,
- Задачи физического практикума по сверхпроводниковой электронике, Пособие [5].
- Сборник задач по курсу электродинамики сверхпроводников, Пособие [6].
- Методическое пособие по выполнению численного моделирования джозефсоновских устройств, Пособие [10].

8. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине.

Контрольные вопросы: Вопросы к задачам в Пособии [5].

Задачи методического пособия [6]

Примеры задач по курсу

- Во сколько раз плотность состояний в спектре возбуждения сверхпроводника больше плотности состояний электронов в нормальном состоянии около уровня Ферми для энергии возбуждений E , равных соответственно $1.01\Delta_0$, $1.5\Delta_0$, $2.0\Delta_0$?
- Два джозефсоновских перехода с критическими токами $I_1=500$ мкА и $I_2 = 700$ мкА включены параллельно в сверхпроводящую цепь. Полный ток через оба перехода равен 1 мА. Найти энергию джозефсоновских переходов.
- Как изменится шум-фактор γ , равный отношению эффективного размаха тока тепловых флуктуаций I_T с критическому току I_c , при последовательном включении 4 одинаковых джозефсоновских переходов? (б) Как изменится шум-фактор γ при параллельном включении 4 одинаковых джозефсоновских переходов?
- Найти разность между максимальным и минимальным значениями напряжения джозефсоновской генерации для джозефсоновского перехода с пренебрежимо малой емкостью (в рамках резистивной модели джозефсоновского перехода).
- Каким должен быть шунтирующий резистор, чтобы вольт-амперная характеристика шунтированного туннельного джозефсоновского перехода была безгистерезисной?
- Найти значение импеданса джозефсоновского перехода как функцию тока $I_0 < I_c$ в условиях следующей задачи. Критический ток джозефсоновского перехода $I_c= 100$ мкА. Через переход пропускаются постоянный ток $I_0=70$ мкА и слабый переменный ток с амплитудой $I_1 = 2$ мкА и частотой $f= 10$ МГц, то есть полный пропускаемый ток $I = I_0 + I_1 \sin(2\pi f \cdot t)$.

- Индуктивность кольца одно-контактного сверхпроводящего интерферометра равна 10^{-11} Гн. До какой величины нужно уменьшить критический ток джозефсоновского перехода, чтобы зависимость полного магнитного потока через интерферометр от приложенного потока стала безгистерезисной?
- Найти частоту плазменных осцилляций в джозефсоновском переходе с критическим током I_C и емкостью C , включенном в сверхпроводящее кольцо с индуктивностью L .
- К одно-контактному сверхпроводящему квантовому интерферометру с индуктивностью кольца $L = 1,6 \cdot 10^{-11}$ Гн и критическим током джозефсоновского перехода $I_C = 10$ мкА приложен магнитный поток, равный четверти кванта. Найти полный магнитный поток в интерферометре для случаев обычного джозефсоновского перехода и пи-перехода.
- Область сверхпроводящего состояния на ВАХ джозефсоновского перехода с пренебрежимо малой емкостью подавлена воздействием приложенного СВЧ сигнала с частотой, значительно превышающей характерную частоту джозефсоновского перехода. Частоту приложенного сигнала увеличивают в 5 раз. Как необходимо изменить амплитуду этого сигнала, чтобы сохранить подавление сверхпроводящей части ВАХ?
- Чем отличаются особенности на ВАХ джозефсоновского перехода, обусловленные силовым и параметрическим резонансами?
- В джозефсоновском переходе с пренебрежимо малой емкостью величина шум-фактора составляет 10^{-3} . Как изменится спектральная плотность низкочастотных флуктуаций $S(0)$ при изменении величины тока постоянного смещения от $I = 1,01 \cdot I_C$ до $I = 10 \cdot I_C$? Указание: использовать резистивную модель.
- Джозефсоновский переход образован двумя свинцовыми пленками, разделенными слоем диэлектрика толщиной $d = 4$ нм. Лондоновская глубина проникновения $\lambda_L = 40$ нм, плотность критического тока $j_C = 10$ А/см². Определить энергию джозефсоновского вихря, приходящуюся на единицу длины вихря.
- Длинный туннельный джозефсоновский переход образован двумя свинцовыми пленками, разделенными слоем диэлектрика толщиной $d = 4$ нм. Лондоновская глубина проникновения $\lambda_L = 40$ нм, плотность критического тока $j_C = 10$ А/см². Длина джозефсоновского перехода равна $D = 0,2$ мм. При каком внешнем поле будут наблюдаться первые два максимума критического тока?
- Найти скорость Свайхарта в длинном туннельном джозефсоновском переходе, который образован двумя свинцовыми пленками, разделенными слоем диэлектрика толщиной $d = 4$ нм. Лондоновская глубина проникновения $\lambda_L = 40$ нм, плотность критического тока $j_C = 10$ А/см².
- Используя условия предыдущей задачи, найти частоты Фиске и значения напряжения, соответствующие ступеням Фиске на ВАХ джозефсоновского перехода длиной $b = 0,1$ мм.

Планируемые результаты обучения*	Критерии оценивания результатов обучения				
	1	2	3	4	5
ВЛАДЕТЬ: навыками анализа методологических проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач	В целом успешное, но не систематическое применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач	Успешное и систематическое применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях
ВЛАДЕТЬ: навыками критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение технологий критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач.	В целом успешное, но не систематическое применение технологий критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач.	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение технологий критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач.	Успешное и систематическое применение технологий критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач.

9. Перечень основной и дополнительной учебной литературы

Основная литература

- [1] К. К. Лихарев, Б. Т. Ульрих. Системы с джозефсоновскими контактами. М.: Изд. Московского университета, 1978.
- [2] К. К. Лихарев. Введение в динамику джозефсоновских переходов. М.: Наука, 1985.
- [3] Т. Ван Дuzер, Ч.У. Тернер. Физические основы сверхпроводниковых устройств и цепей. М., Радио и связь, 1984.
- [4] В. К. Корнев. Компараторы тока на основе джозефсоновских переходов. М.: Физ. фак. МГУ имени М.В. Ломоносова, Зак.88-40, 2012, 78 стр.
- [5] В. К. Корнев, Н. В. Кленов. Задачи физического практикума по сверхпроводниковой электронике. М.: Физ. фак. МГУ имени М.В. Ломоносова, Зак.58-60, 2012, 78 стр.
- [6] В. К. Корнев, С. А. Васенко. Сборник задач по курсу электродинамики сверхпроводников с решениями. М.: Физ. фак. МГУ имени М.В.

Ломоносова, Зак.15-300, 2000, 84 стр.

Дополнительная литература

- [7] В.В. Шмидт. Введение в физику сверхпроводников. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: МЦНМО, 2000.
- [8] К.К. Лихарев, В.К. Семенов, А.Б. Зорин. Новые возможности для сверхпроводниковой электроники. Итоги науки и техники: сверхпроводимость. М.: ВИНТИ, 1988.
- [9] Л. Н. Булаевский, В. Л. Гинзбург, А. А. Собянин. Макроскопическая теория сверхпроводников с малой длиной когерентности. ЖЭТФ, т. 94, вып. 7, с. 355, 1988.
- [10] В. К. Корнев. Введение в работу с программным пакетом PSCAN в практикуме по сверхпроводниковой электронике. М.: Физ. фак. МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Зак.-87-60, 2012, 45 стр.

10. Перечень ресурсов Интернет необходимых для освоения дисциплины:

www.affp.mics.msu.su

11. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

- Печатная копия презентации по курсу лекций, Программа курса,
- Список примеров задач,
- Методические указания в учебных пособиях [5], [10].

12. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

- Компьютерная презентация,
- Демонстрация численного эксперимента с использованием программного пакета PSCAN для численного моделирования сосредоточенных джозефсоновских цепей,
- Самостоятельное выполнение обучающимися численного эксперимента с использованием программного пакета PSCAN.

13. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине

- Программный пакет PSCAN для численного моделирования сосредоточенных джозефсоновских цепей,
- Компьютер, проектор.