

## Краткая неофициальная версия программы учебной дисциплины

Название дисциплины	Научно-исследовательский семинар: практикум по физике низких температур
Где проводится	Базовая кафедра ФТНТ, ИФП им. П.Л.Капицы РАН
Автор программы	Завьялов В.В., к.ф.-м.н., ст.научн.сотр. ИФП РАН,
Курс	3-ый курс бакалавриата
Модули	3, 4-й модули
Объем курса	123.6 уч. часов
Элементы контроля	Контроль работы в процессе занятий, устный экзамен

## Аннотация дисциплины

Курс «Практикум по физике низких температур» посвящен приобретению навыков проведения низкотемпературного эксперимента с использованием жидкого гелия. Он является продолжением курса «Научно-исследовательский семинар: методы измерений» (1 и 2 модули) и существенно опирается на освоенный в нем материал.

В процессе обучения студенты планируют эксперимент, готовят образцы, налаживают экспериментальную установку, собирают схему для измерений, составляют программу для компьютерного управления экспериментом, работают с криожидкостями, проводят измерения, анализируют и обрабатывают его результаты. 😞

Отдельное рабочее место на время всего семестра и интерактивный режим обучения позволяют студентам работать в своем темпе, уделяя больше времени тем этапам работы, которые вызывают у них затруднение.

Результатом работы является оформление выполненного эксперимента в виде отчета, оформленного по стандартам, принятым для научных статей. В результате студенты получают представление о специфике работы экспериментатора и смогут определить свою склонность к этому роду деятельности. В этом данный курс отличается от обычных вузовских лабораторных работ, которые призваны быть иллюстрацией к изучаемому на лекциях материалу и проводятся на полностью готовых и отлаженных установках, исключающих участие студента в их отладке.

## Содержание

1	Программа дисциплины . . . . .	3
	1.1 Основы физики низких температур. Свойства сверхтекучего гелия. Режимы теплопереноса в жидком гелии. Электроны и гелий. Основные свойства сверхпроводников 1 и 2-го рода. Отдельные вопросы физики твердого тела.	
	1.2 Задачи, предлагаемые для экспериментального исследования.	
2	Элементы контроля и правила оценивания . . . . .	3
3	Темы для исследования. . . . .	4
	Изучение проводимости меди в диапазоне 1.4–295 К. Изучение проводимости Pt-пленки в диапазоне 1.4–295 К. Образец – термометр Pt1000. Влияние отжига на низкотемпературную проводимость металлов Изучение проводимости Ge в диапазоне 1.4–295 К. Образец: некалиброванный Ge-термометр. Определение материала и изучение транспортных свойств холловского датчика ДХК-05. Температура перехода для сплава двух сверхпроводящих металлов. Образцы $\text{Sn}_{0.63}\text{Pb}_{0.37}$ . Разрушение сверхпроводимости током. Образец: тонкая Sn-нить Вольфрамовая нить накала с температурой 1.4–3000 К в сверхтекучем гелии. Острийный криоэмиттер электронов. Изготовление и исследование структуры с туннельной проводимостью.	
4	Рекомендованная литература и ссылки . . . . .	6

# 1 Программа дисциплины

## 1.1 Основы физики низких температур.

### Свойства сверхтекучего гелия [3, 1].

Наблюдение и свойства сверхтекучей фазы. Вязкость (эксперимент Андроникашвили). Течение сверхтекучей пленки и ее толщина. Вихри. Термомеханический эффект в гелии.

### Режимы теплопереноса в жидком гелии [2].

Градиенты температур в He I и He II в условиях теплового потока. Пузырьковое и плёночное кипение. Градиент температуры в He II в поле тяжести. Более подробное обсуждение свойств переохлажденного/перегретого гелия (при отклонении от кривой равновесия жидкость-пар) в диапазоне температур 1.3–5 К. Различие режимов охлаждения и отогрева при проведении температурозависимых измерений.

### Электроны и гелий [3].

Методы напуска электронов. Подвижность электронов в He I и He II. Бабблони. Двумерный слой электронов над поверхностью жидкого гелия и методы его наблюдения.

### Основные свойства сверхпроводников 1 и 2-го рода [3, 8].

Магнитные свойства. Оптические свойства. Теплопроводность. Эффект Джозефсона. Сверхпроводящий квантовый интерферометр (SQUID).

### Отдельные вопросы физики твердого тела. [6, 7, 9].

Общефизические курсы рекомендуемые для ознакомления с теорией для выбранной экспериментальной задачи 3.

## 1.2 Задачи, предлагаемые для экспериментального исследования.

Задачи можно выбрать из предлагаемого списка (см. раздел 3), но можно предложить и свою, совместимую с возможностями Практикума, идею опыта. Перед началом выполнения задачи предполагается обсуждение физической модели, характерной для этой темы.

# 2 Элементы контроля и правила оценивания

На каждом занятии в обязательном порядке нужно делать записи в информационном текстовом файле `info.txt`<sup>1</sup>, в котором, как минимум, должна быть отражена дневная активность, — что и с каким результатом делалось, что и почему не получилось и что планируется на следующий раз. Это позволяет преподавателю не только вести учет и контроль текущего состояния дел, но и помогает в организации необходимого содействия, ремонтных работ, заказе гелия, и т.д.

Так как основным методом освоения учебного материала является работа в лаборатории в режиме интерактивного обучения, то для положительной оценки необходимо присутствие и активная работа (контроль по файлам `info.txt`) на всех занятиях. Отличная оценка присуждается на основании промежуточного и финального отчетов по выполненным задачам.

Отчеты представляются в виде полного пакета файлов (включая коды Gnuplot'a, с помощью которых строились графики), помещенного в домашней директории (`~/Report2022/`) локальной сети Практикума. Формальные требования к отчетам следующие:

- Отчет оформляется в LaTeX'e. Все рисунки и таблицы следует снабжать подписями с кратким изложением тех результатов, которые они иллюстрируют. В подписи допускаются повторы (выдержки) из текста отчета или отсылки к нему. В идеале одни только рисунки и подписи к ним уже должны давать определенное представление о работе и ее результатах. Для построения графиков и аппроксимации данных используйте Gnuplot.

Для работы с L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X'ом и Gnuplot'ом рекомендуется использовать редактор Geany. Весь этот софт является свободным и многоплатформенным, — тем не менее, чтобы не тратить время дома, рекомендуется пользоваться им в лаборатории Практикума, где вы сразу же можете получить необходимую помощь и разъяснения.

<sup>1</sup>При залогинивании на компьютере Практикума, в домашней папке пользователя автоматически создается дневная рабочая директория `~/Desktop/lab"NN"/"user"/"yymmdd"/`, а в ней — заготовка файла: `info.txt`. Этот файл можно заполнять в файл-менеджере mc, включив режим редактирования клавишей F4 и выбрав кодировку клавиатуры (рус/англ) клавишей Tab.

- Отчет состоит из:
  - \* Титульного листа;
  - \* введения, содержащего формулировку задачи;
  - \* теоретической части;
  - \* описания установки со схемами установки, собранных измерительных цепей, сканов написанных вами диаграмм Labview<sup>2</sup>;
  - \* описание хода эксперимента с пояснением характера временных графиков измеряемых величин;
  - \* анализа и обсуждения результатов измерений;
  - \* заключения;
  - \* списка литературы.

Следует начать написание отчета и получать консультацию по нему не откладывая. Это существенно сэкономит время, которого особенно не хватает во время сессии, и улучшит оцениваемое качество работы.

### 3 Темы для исследования.

---

#### Изучение проводимости меди в диапазоне 1.4-295 К.

**Теги:** механизмы рассеяния электронов, правило Матиссена, эффект Кондо.

**Образцы:** медная (обычная и безжелезистая) проволоки. Оценить нужную длину проволоки, а также величину измерительного тока, чтобы ее нагрев был пренебрежимо мал, а измеряемое напряжение соответствовало чувствительности вольтметра.

**Задача:** измерить  $R(T)$  для образцов обычной и безжелезистой меди по методике, использовавшейся при калибровке RuO<sub>2</sub>-термометра. Проанализировать полученные данные и сравнить их с теорией.

**Доп. оборудование:** не требуется

---

#### Изучение проводимости Pt-пленки в диапазоне 1.4-295 К.

**Теги:** механизмы рассеяния электронов, правило Матиссена.

**Образцы:** готовый Pt1000 термометр.

**Задача:** измерить  $R(T)$  по методике, использовавшейся при калибровке RuO<sub>2</sub>-термометра.

Проанализировать полученные данные и сравнить их с литературными данными для проводимости чистой массивной платины и с теорией.

**Доп. оборудование:** не требуется.

---

#### Влияние отжига на низкотемпературную проводимость металлов

**Теги:** рассеяние электронов на дефектах решетки.

**Образцы:** медная и серебряная проволоки

**Задача:** измерить остаточное сопротивление RRR (Residual-resistance ratio), служащее показателем наклёпа и чистоты материала и определяемая отношением  $R(300K)/R(4.2K)$  ([ссылка для примера.](#))

**Доп. оборудование:** вакуумная печь для отжига.

---

#### Изучение проводимости Ge в диапазоне 1.4-295 К.

**Теги:** Зонная теория. Электроны и дырки, их эффективная масса и подвижность.

**Образцы:** готовый некалиброванный Ge-термометр.

**Задача:** измерить  $R(T)$  по методике, использовавшейся при калибровке RuO<sub>2</sub>-термометра.

Проанализировать полученные данные и сравнить их с теорией.

**Доп. оборудование:** не требуется.

---

#### Определение материала и изучение транспортных свойств холловского датчика ДХК-05.

**Теги:** Зонная теория. Электроны и дырки, их эффективная масса и подвижность. Эффект Холла.

**Образцы:** фабричный датчик Холла – ДХК-05

**Задача:** а) измерить  $R(T)$  в нулевом магнитном поле в диапазоне 1.4-295 К;

б) измерить величину магнитного поля в центре кольцевого постоянного магнита;

в) измерить Э.Д.С. Холла и её температурную зависимость.

г) Определить материал образца и описать его температурозависимые транспортные свойства.

**Доп. оборудование:** кольцевой магнит (неодим-железо-бор)

---

<sup>2</sup>Диаграммы LabView следует предварительно «причесать» (распутать клубки, убрать лишние колена проводников, выровнять ряды однородных иконок), чтобы они стали достаточно компактны для скриншота.

**Температура перехода для сплава двух сверхпроводящих металлов ( $\text{Sn}_{0.63}\text{Pb}_{0.37}$ ) [10].**

**Теги:** Сверхпроводимость. Диаграмма состояния сплава. Эвтектика.

**Образцы:** эвтектический сплав  $\text{Sn}_{0.63}\text{Pb}_{0.37}$

**Задача:** измерить температуру сверхпроводящего перехода. Проанализировать полученные данные и сравнить их с данными работы [10].

**Доп. оборудование:** Не требуется.

**Разрушение сверхпроводимости током.**

**Теги:** Сверхпроводники 1-го и 2-го рода, критический ток, эффект Мейснера.

**Образцы:** тонкая Sn-проволока

**Задача:** Исследовать процесс возникновения и разрушения сверхпроводящего состояния оловянной нити в зависимости от величины протекающего по ней тока. Построить график зависимости температуры сверхпроводящего перехода от расчетной величины магнитного поля на поверхности нити. Сравнить с теорией.

**Доп. оборудование:** управляемый клапан MKS-253, PID-контроллер MKS-651, нановольтметр Keithley-2182A, управляемый источник тока Rigol DP832.

**Вольфрамовая нить накала с температурой 1.4-3000 К в сверхтекучем гелии [12]**

**Теги:** Механизмы теплоотвода в HeI и HeII. Пузырьковое и пленочное кипение гелия.

**Образцы:** вскрытая миниатюрная лампа накаливания H35-01501 (1.5В, 0.15Вт).

**Задача:**

- измерить вольт-амперную характеристику  $U(I)$  погруженной в сверхтекучий гелий вольфрамовой нити от  $T \approx 1.5$  К (при нулевом токе) до  $T \approx 3000$  К (при увеличении тока до начала яркого свечения лампы).

- Пользуясь литературными данными  $R(T)$  для вольфрама, построить график зависимости температуры нити от рассеиваемой на ней мощности, указав на нем участки с различными режимами теплоотвода.

Внимание! Так как на вольт-амперной кривой будет участок с отрицательной производной, то для его регистрации следует использовать последовательно включенный эталонный резистор большого номинала, компенсирующий наблюдаемое отрицательное сопротивление неравновесно охлаждаемой нити на этом участке.

**Доп. оборудование:** не требуется

**Острый криоэмиттер электронов [13].**

**Теги:** туннельный ток, автоэмиссия, термоэмиссия

**Образцы:** самодельные иглы из вольфрамовой проволоки <sup>3</sup>.

**Задача:**

- собрать схему управляемого электрохимического травления вольфрамовых игл. Для обеспечения режима травления и своевременного его прерывания написать и отладить LabVIEW-программу управления функциональным генератором.
- Наладить приготовление игл.
- Собрать измерительную схему и написать программу регистрации зависимостей автоэмиссионного тока от потенциала на игле.
- Смонтировать наиболее удачный образец в криостате и измерить зависимость тока эмиссии от величины электрического потенциала иглы относительно коллектора, когда оба они погружены в жидкий гелий при температурах выше и ниже  $\lambda$ -перехода.
- Сравнить результаты с данными работы [13]

**Доп. оборудование:** установка травления игл, микроскоп, киловольтовый источник напряжения.

**Изготовление и исследование структуры с туннельной проводимостью [11].**

**Теги:** Туннелирование. МДМ- (метал-диэлектрик-металл) структуры

**Образцы:** Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al структуры

**Задача:** изготовить, измерить вольт-амперную характеристику и проанализировать результаты для Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al структуры.

**Доп. оборудование:** установка термического напыления в вакууме.

<sup>3</sup>Кусочки проволоки для травления можно отламывать с помощью плоскогубцев, ножницы и кусачки для этого использовать нельзя, так как твердость вольфрама выше чем у стали!

## 4 Рекомендованная литература и ссылки

Тексты доступны в локальной сети Практикума.

### Основной список

- [1] Д.Р. Тилли, Дж. Тилли «Сверхтекучесть и сверхпроводимость», Мир 1977.
- [2] S.W. Van Sciver, «Helium Cryogenics», 2-d edition, Springer 2012.
- [3] В.С. Эдельман, «Вблизи абсолютного нуля.», Серия Библиотечка «Квант», выпуск 26, М.: Наука, 1983, [djvu-файл](#).

### Дополнительный список

- [4] Ф. Побелл «Вещества и методы при низких температурах», с.28, изд-во ФТИНТ 1997.
- [5] Сводка данных по интегральному тепловому расширению материалов и их теплопроводности. ([html-ссылка](#)).
- [6] В.Н. Глазков, Лекции «Основы современной физики: Квантовая макрофизика », Кафедра общей физики МФТИ, Москва 2018. [html-ссылка](#)
- [7] Н.Ашкрофт, Н. Мермин «Физика твердого тела», Мир:1979, том.1 ([pdf-файл](#)), том.2 ([pdf-файл](#))
- [8] Н.Б. Брандт, «Сверхпроводимость», СОЖ 1996, No.1, стр.100
- [9] С. Зи «Физика полупроводниковых приборов», Мир 1984.
- [10] Y. Tsui, R. Mahmoud, E. Surrey, D.Hampshire, (2016). «*Superconducting and Mechanical Properties of Low-Temperature Solders for Joints.*» IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1-1. doi:10.1109/tasc.2016.2536806
- [11] Сборник Туннельные явления в твердых телах, Мир 1973.
- [12] I.F. Silvera, J.Tempere, «*Electron Emission in Superfluid and Low Temperature Vapor Phase Helium*», PRL 100, 117602 (2008)
- [13] P.V.E. McClintock, «*Temperature dependence of the field emission current in He II*», Journal of Physics C Solid State Physics 1973, V.6, pp. L186-L190.