УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

П.Г. Плотников, Л.В. Плотникова

Изучение полупроводников в курсе физики твердого тела

Учебное пособие

а)

Санкт-Петербург
2015

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

П.Г. Плотников, Л.В. Плотникова

Изучение полупроводников в курсе физики твердого тела

Учебное пособие

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург
2015

Плотников П.Г., Плотникова Л.В. Изучение полупроводников в курсе ФТТ: Учебное пособие. − СПб: НИУ ИТМО, 2015. − 58 с.

В учебно–методическом пособии представлен цикл лабораторных работ по изучению свойств полупроводников с использованием физических методов и современной приборной базы. Пособие предназначено для бакалавров, обучающихся по направлению 223200 «Техническая физика» Физические принципы аналитического приборостроения.

Методические указания содержат краткое изложение основ физики полупроводников, теории погрешностей, способов измерения параметров среды, расчёта основных параметров полупроводников и правила составления итоговых отчётов.

Рекомендовано к печати Ученым советом Инженерно-физического факультета, протокол № 3 от 10.03.2015 года

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2015

© Плотников П.Г.. 2015

© Плотникова Л.В., 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Аннотация 4

Введение 5

Лабораторная работа №№1-2 Теория погрешностей и определение объема сплошного цилиндра 9

Лабораторная работа №3 Определение параметров среды 17

Лабораторная работа №4 Определение удельного сопротивления проводника 24

Лабораторная работа №5 Изучение свойств термопар, элементов Пельтье, солнечных батарей, светодиодов, фоторезистров 26

Лабораторная работа №6 Изучение физических свойств полупроводников термочувствительных резисторов 30

Лабораторная работа №7 Изучение фотопроводимости полупроводников. 36

Лабораторная работа №8 Изучение фотоэлектрических свойств железоселенового элемента 41

Лабораторная работа №9 Исследование эффекта Холла в полупроводнике..... 49

Лабораторная работа №10 Определение ширины запрещенной зоны полупроводника по краю собственного поглощения 56

Литература 61

О кафедре ИТТЭК Университета ИТМО 62

АННОТАЦИЯ

Настоящее пособие содержит описание цикла лабораторных работ по изучению свойств полупроводников, выполняемых бакалаврами IV курса, обучающихся по направлению Физические принципы аналитического приборостроения 16.03.01 «Техническая физика». Работы выполняются в рамках лабораторного практикума, соответствующего курсу «Б.3.1.15-ИТТЭК Теоретическая физика (физика твёрдого тела)». Курс рассчитан на один семестр (4 курс 7 семестр) и состоит из одного модуля.

Методические указания содержат краткое описание теоретических основ теории полупроводников и описания цикла из 10 лабораторных работ по изучению теории погрешностей и свойств полупроводников, форму и правила оформления представляемого к защите отчёта, контрольные вопросы.

Методическое пособие состоит из краткого введения и основной части со сквозной нумерацией лабораторных работ, рисунков, таблиц и применяемых формул.

Введение содержит краткий курс теории полупроводников, где вводятся основные понятия, дается краткое описание теоретических основ, на которых базируется исследование физических свойств полупроводниковых материалов.

Основная часть пособия посвящена описанию лабораторных работ и знакомит студентов с основами работы на цифровом мультиметре Mastech MS8229, который объединяет в себе сразу пять измерительных приборов с непревзойденными характеристиками. Помимо основных функций мультиметра (измерения величин силы постоянного и переменного тока, постоянного и переменного напряжения, сопротивления), MS8229 позволяет измерять температуру, влажность, уровень звукового поля и уровень внешней освещенности. Прибор полностью соответствует международному стандарту IEC1010- 1 CATII 1000V/CATIII 600V. Mastech MS8229 имеет возможность автоматического или ручного выбора пределов измерений. Прибор обладает большим $3^{3/4}$-разрядным ЖК дисплеем с подсветкой. Полученные результаты можно зафиксировать с помощью функции DATA HOLD.

Кроме того, здесь описываются способы обработки экспериментальных данных и получения основных физических характеристик полупроводников.

Подача материала рассчитана на освоение студентами математического аппарата обработки экспериментальных данных, полученных в результате изучения физических свойств полупроводников, понимания связи наблюдаемых эффектов со строением вещества, взаимосвязи структура вещества – физические свойства.

В результате освоения предложенного курса студенты должны получить навыки и умения работы на современных физических приборах, способность самостоятельно проводить сложные физические исследования.

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводники относятся к классу веществ, величина электропроводности которых занимает среднее положение между проводниками и изоляторами (диэлектриками). При комнатной температуре удельное электросопротивление металлов составляет 10^{-8}–10^{-6} Ом*м, полупроводников – 10^{-8}–10^{8} Ом*м, изоляторов (диэлектриков) – 10^{8}–10^{13} Ом*м.

Одной из важнейших особенностей полупроводников является резкое нелинейное возрастание их электропроводности с повышением температуры.

Носителями зарядов в полупроводниках могут быть электроны и электронные вакансии (положительно заряженные квазичастицы «дырки»). Кроме того, полупроводники очень чувствительны к воздействию света, разного вида излучений, бомбардировке заряженными частицами, влиянию окружающей атмосферы.

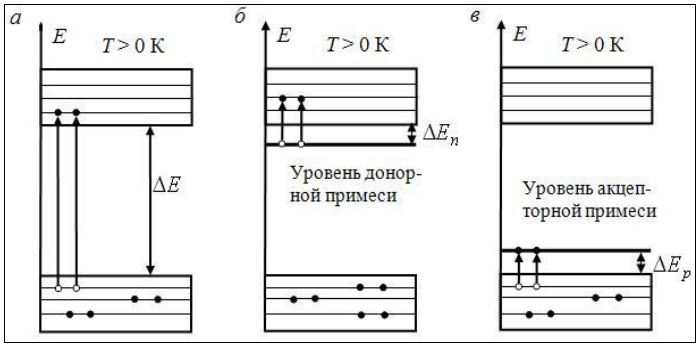

Рисунок 1 – Схема уровней в полупроводнике

Свойства кристаллических полупроводников хорошо объясняются теорией твёрдого тела. Кратко её положения заключаются в следующем. Как известно, в изолированном атоме электроны имеют дискретные значения энергий. В кристалле электроны взаимодействуют не только со своим атомом, но и с соседними атомами. Это приводит к незначительному смещению дискретных уровней отдельных атомов и образованию, практически, сплошных так называемых энергетических зон твёрдого тела – чередующихся областей разрешённых и запрещённых энергий (рисунок 1а).

В зависимости от числа электронов в кристалле энергетические уровни разрешенных зон могут быть в соответствии с принципом Паули полностью заполнены электронами – по два электрона с противоположными спинами на каждом уровне. Это будут все низкоэнергетические зоны разрешённых энергий электронов. Самая высокоэнергетическая зона разрешенных энергий, незаполненная электронами, называется свободной или зоной проводимости. Первая под ней зона разрешённых энергий называется валентной, так как её образуют валентные электроны атомов. Между ними в полупроводниках лежит запрещённая зона шириной ΔE, величина которой колеблется в разных полупроводниках в пределах от 10^{-3} эВ до 3 эВ.

Зоны разрешенных энергий состоят из большого, но конечного числа энергетических уровней. Ширина разрешённых зон порядка нескольких электрон-вольт, а число энергетических уровней внутри разрешённой зоны определяется числом атомов в кристалле, причём, разница в энергиях соседних уровней в зоне очень мала (10^{-21}–10^{-22} эВ).

В отличие от металлов в полупроводниках вблизи абсолютного нуля температур валентная зона целиком заполнена электронами, в то время как зона проводимости свободна от них. С точки зрения зонной теории твёрдого тела различие между полупроводником и изолятором (диэлектриком) заключается в величине запрещённых зон. В связи с малой величиной ΔE у полупроводников оказывается возможным при повышении температуры T от абсолютного нуля переход электронов из валентной зоны в свободную зону (зону проводимости) под влиянием какого-либо внешнего воздействия. При этом одновременно с появлением электронов в зоне проводимости в заполненной валентной зоне образуются электронные вакансии – положительно заряженные квазичастицы «дырки».

Во внешнем электрическом поле вакансия также перемещается («дрейфует»), но в направлении, противоположном движению электрона, как положительный заряд, равный по величине заряду электрона. Такая проводимость, обусловленная движением дырок в валентной зоне полупроводника, называется дырочной проводимостью или проводимостью *p*-типа (в отличие от обычной электронной проводимости *n*-типа). Таким образом, в химически чистом полупроводнике (примесей не более 10^{-8}–10^{-9} %%) проводимость обеспечивается как электронная в зоне проводимости, так и вакансионная («дырками») в валентной зоне. Такая проводимость называется собственной проводимостью полупроводника. Ею обладают, например, чистые химические элементы германий (*Ge*) и кремний (*Si*).

Электрическая проводимость полупроводников в большой степени зависит от наличия примесей. Например, с введением в кремний лишь 0.001% химического элемента бора (*B*) проводимость материала при комнатной температуре увеличивается примерно в тысячу (10^3) раз. Проводимость, обусловленная примесями, называется примесной проводимостью, а сами полупроводники – примесными полупроводниками.

В зависимости от внедренных атомов примеси (донорных или акцепторных) можно получить полупроводники либо только с электронным типом проводимости (*n*-типа), либо только с дырочным (*p*-типа). Это связано с появлением в запрещенной зоне соответственно электрон-донорных или электроноакцепторных уровней энергии (*рис.1б,1в*).

Величины ΔE_n и ΔE_p носят названия соответственно энергия активации доноров и энергия активации акцепторов.

Вероятности появления электронов в зоне проводимости или вакансий в валентной зоне будут соответственно пропорциональны $exp[-\Delta E_n/kT]$ или $exp[-\Delta E_p/kT]$.

Если, например, в кристаллический германий (*Ge*) в качестве примеси ввести мышьяк (*As*), внешняя электронная оболочка которого содержит на один

электрон больше, чем оболочка германия, то этот электрон, в соответствии с принципом Паули, вынужден будет занять энергетический уровень вблизи дна свободной зоны. При этом в решётке *Ge–As* появится положительно заряженный дефект. Если атом примеси имеет на один электрон меньше, чем атом решётки, то в валентной зоне образуется положительно заряженная вакансия. Примеси, наличие которых приводит к появлению электронов в свободной зоне (зоне проводимости), называют донорными примесями; примеси, приводящие к появлению вакансий – акцепторными примесями.

Проводимость как собственного, так и примесного полупроводников складывается из электронной и дырочной проводимостей. Полупроводник, в котором концентрация электронов проводимости значительно превышает концентрацию вакансий ($n_e >> n_p$), называют полупроводниками *n*-типа. Если же выполняется неравенство $n_e << n_p$, то полупроводник называется полупроводником *p*-типа.

Электроны и дырки подчиняются статистике Ферми – Дирака (они являются фермионами), но при высоких температурах статистика Ферми – Дирака мало отличается от статистики Больцмана. Поэтому в собственных полупроводниках концентрация электронов в зоне проводимости n_e и концентрация дырок в валентной зоне n_p при высоких температурах определяется формулой

$$n_e = n_p = A_0 * exp[-\Delta E/2kT], \qquad (1)$$

где A_0 – член, зависящий от температуры, который учитывает свойства конкретного полупроводника.

Учитывая, что электропроводность σ пропорциональна числу носителей заряда, можно представить зависимость удельной электропроводности полупроводника от температуры в виде

$$\sigma = A * exp[-\Delta E/2kT], \qquad (2)$$

где ΔE – ширина запрещенной зоны (для полупроводника с собственной проводимостью) или энергии активации ΔE_n и ΔE_p для полупроводников с примесной проводимостью. Коэффициент A в формуле (2) зависит от природы полупроводника.

До сих пор мы рассматривали переход электрона в свободную зону и образование вакансии в валентной зоне как результат нагрева полупроводника. Но, оказывается, что этот процесс может происходить и за счёт энергии света: облучение полупроводника светом приводит к повышению электропроводности полупроводника. Это явление называется фотопроводимостью или внутренним фотоэффектом. Электроны, находящиеся в валентной зоне полупроводника, поглощают энергию падающего на него кванта света $E=h\nu$, которая зависит от частоты световых колебаний ν и не зависит от интенсивности света.

С увеличением интенсивности света возрастает число, поглощающих свет электронов, но не энергия, получаемая каждым из них. Электрон может принять энергию только от одного кванта света (фотона). Вероятность того, что электрон может поглотить энергию одновременно двух фотонов при малых интенсивностях света, практически, равна нулю, и только при интенсивностях монохроматического света, которую обеспечивают импульсные лазеры, эта возможность реализуется.

Если энергия фотона $E=h\nu$ превышает величину запрещенной зоны ΔE в собственном полупроводнике (либо энергии активации ΔE_n и ΔE_p в примесных полупроводниках), то электрон, возбуждаясь, переходит в свободную зону, где может перемещаться под действием электрического поля, осуществляя так называемый фототок.

Зависимость между максимальной энергией фотоэлектрона и частотой падающего монохроматического света даётся вторым законом фотоэффекта – законом Эйнштейна:

$$E=h\nu=e\varphi_ф+m\upsilon^2_{max}/2, \qquad (3)$$

где $h\nu$ – энергия поглощённого фотона; ν – частота падающего света; h – постоянная Планка ($6.62*10^{-34}$ Дж/с); $e\varphi_ф$ – фотоэлектрическая работа выхода электрона из фотокатода; $m\upsilon^2_{max}/2$ – максимальная кинетическая энергия, которой обладает электрон при выходе из вещества фотокатода; m – масса электрона; υ_{max} – максимальная скорость электрона, выбитого квантом света.

Уравнение Эйнштейна выражает закон сохранения и превращения энергии для случая взаимодействия фотона с веществом.

Непременным условием возникновения фотоэффекта в собственных полупроводниках является соблюдение неравенства $h\nu\geq\Delta E$, т.е. энергия поглощенного фотона должна быть больше или равна ширине запрещенной зоны полупроводника. Наименьшая частота света ν, при которой прекращается (или возникает) явление фотопроводимости в полупроводниках называется порогом или красной границей фотоэффекта. Существуют такие примесные полупроводники, у которых для перевода электронов в свободное состояние достаточно десятых долей электрон-вольта, и поэтому повышение электропроводности может наблюдаться при облучении их квантами далёкой инфракрасной области спектра.

Подведём итог. В 1887 году Генрих Рудольф Герц обнаружил явление, впоследствии названное фотоэффектом. Его суть он определил в следующем: если свет от ртутной лампы направить на металл натрий, то с его поверхности будут вылетать электроны.

Современная формулировка фотоэффекта иная: при падении световых квантов на вещество и при их последующем поглощении в веществе будут частично или полностью освобождаться заряженные частицы. Другими словами, при поглощении световых фотонов происходят следующие явления:

1. эмиссия электронов из вещества;
2. изменение электропроводности вещества;

3. возникновение фото–ЭДС на границе сред с различной проводимостью (например, металл – полупроводник).

Таким образом, в настоящее время существует три вида фотоэффекта.

1. Внутренний фотоэффект. Заключается в изменении проводимости полупроводников. Он используется в фоторезисторах, которые применяются в дозиметрах рентгеновского и ультрафиолетового излучения, также используется в медицинских приборах (оксигемометр) и в датчиках пожарной сигнализации.

2. Вентильный фотоэффект. Заключается в возникновении фото–ЭДС на границе веществ с разным типом проводимости, в результате разделения носителей электрического заряда электрическим полем. Он используется в солнечных батареях, в селеновых фотоэлементах и датчиках, регистрирующих уровень освещенности.

3. Внешний фотоэффект. Как уже говорилось ранее, это процесс выхода электронов из вещества в вакуум под действием квантов электромагнитного излучения.

Лабораторная работа №№1-2
ТЕОРИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА СПЛОШНОГО ЦИЛИНДРА

с последующим возможным определением материала, из которого изготовлен данный объект.

Цель работы

Целью данной работы является получение студентами практических навыков измерений физических величин, правильной оценки неопределенностей прямых и косвенных измерений и усвоение логической последовательности в оформлении протокола эксперимента.

Главная задача – закрепление на практике основных положений теории неопределенностей при измерениях физических величин.

Основные теоретические положения

Получение и закрепление навыков проведения и обработки результатов прямых и косвенных измерений имеет смысл проводить на простейших моделях. В качестве такой модели выбран сплошной цилиндр.

Перед выполнением лабораторной работы студенту следует ознакомиться с методикой измерений с помощью штангенциркуля, правилами обработки результатов измерений, изложенными в данном пособии, а также подробно изучить приведенный ниже пример «Измерение объема конуса». Это позволит закрепить правила оценки неопределенностей прямых и косвенных измерений, усвоить структуру отчета по эксперименту.

Пример. Измерение объема конуса

На рис. 2 представлено тело в виде конуса. Необходимо определить объем данного объекта. Расчетной формулой в этом случае является

$$V = \frac{1}{3} S * H = \frac{1}{12} \pi D^2 * H , \qquad (4)$$

где D – диаметр конуса; H – высота конуса.

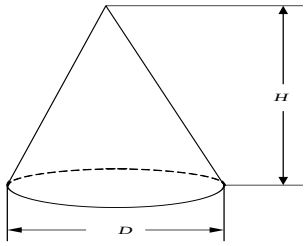

Рисунок 2 - Конус

Прямые измерения – это измерения высоты и диаметра конуса, а определение его объема является косвенным измерением на основе рабочей формулы (4).

Измерения высоты и диаметра будем проводить штангенциркулем с ценой деления 0.05 мм. Правила работы со штангенциркулем приведены в приложении данной работы. Проведем серию из n измерений D и H. Данные прямых измерений D и H занесем в таблицу 1 для числа измерений n = 10.

Оценим отдельно вклад случайных и систематических (приборных ошибок) в вычислении неопределенности (погрешности) прямых измерений. Будем считать, что случайные ошибки измерений подчиняются закону нормального распределения. Грубые ошибки (промахи) исключим из измерений.

Таблица 1 – Запись данных измерений.

№ опыта	H_i, мм	$(H_{ср}-H_i)$, мм	$(H_{ср}-H_i)^2$, мм^2	D_i, мм	$(D_{ср}-D_i)$, мм	$(D_{ср}-D_i)^2$, мм^2
1	43.25	0.05	0.003	18.45	0.04	0.002
2	43.15	0.05	0.003	18.40	0.01	0.0001
3	43.20	0.00	0.0000	18.45	0.04	0.002
4	43.15	0.05	0.003	18.35	0.06	0.004
5	43.25	0.05	0.003	18.40	0.01	0.0001
6	43.25	0.05	0.003	18.40	0.01	0.0001
7	43.15	0.05	0.003	18.40	0.01	0.0001
8	43.20	0.00	0.0000	18.40	0.01	0.0001
9	43.15	0.05	0.003	18.45	0.04	0.002
10	43.25	0.05	0.003	18.35	0.06	0.004
Среднее	43.20			18.41		

Обработка результатов прямых измерений

1. Определить среднее арифметическое значение измеряемых величин по формуле:

$$H_{\text{ср}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} H_i \ , \tag{5}$$

аналогично

$$D_{\text{ср}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} D_i \ . \tag{6}$$

Результаты вычислений по этим формулам дают:

H_{cp} = 43.20 мм, D_{cp} = 18.42 мм.

2. Вычислить отклонения результатов отдельных измерений D_i и H_i от их средних арифметических значений, а затем рассчитать квадратичные отклонения. Результаты записать в таблицу 1.

3. По данным таблицы 1 определить среднее квадратичное отклонение S результата серии из n=10 измерений для диаметра и высоты конуса.

Вычисления $S(H_{\text{ср}})$ и $S(D_{\text{ср}})$ нужно провести по формулам:

$$S(H_{\text{ср}}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(H_{\text{ср}} - H_i)^2}{n(n-1)}} \ , \tag{7}$$

аналогично

$$S(D_{\text{ср}}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(D_{\text{ср}} - D_i)^2}{n(n-1)}} \ . \tag{8}$$

Вычисления дают следующие значения: $S(H_{\text{ср}})$ = 0.016 мм, $S(D_{\text{ср}})$ = 0.012 мм.

Так как измерения производятся штангенциркулем с ценой деления 0.05 мм, то данные для $S(H_{\text{ср}})$ и $S(D_{cp})$ следует округлить до сотых.

Тогда $S(H_{\text{ср}})$ = 0.02 мм, $S(D_{\text{ср}})$ = 0.01 мм.

4. Следующий этап – оценка доверительного интервала, т.е. интервала, в котором с заданной вероятностью P находится измеряемая величина.

Границы доверительных интервалов для измеряемых величин определяются по формулам:

$$\Delta H_{\text{А}} = t(P,n)\cdot S(H_{\text{ср}}), \tag{9}$$

$$\Delta D_{\text{А}} = t(P,n)\cdot S(D_{\text{ср}}), \tag{10}$$

где $t(P,n)$ – коэффициент Стьюдента, зависящий от P и n. Значение $t(P,n)$ при заданных значениях P и n представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Значение коэффициентов Стьюдента $t_{P,n}$

P / **n**	0.7	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99	0.999
2	1.3	1.9	6.31	12.71	31.82	63.66	636.62
3	1.3	1.6	2.92	4.30	6.69	9.92	31.60
4	1.2	1.5	2.35	3.18	4.54	5.84	12.94
5	1.2	1.5	2.13	2.78	3.75	4.60	8.61
6	1.1	1.4	2.02	2.57	3.36	4.03	6.86
7	1.1	1.4	1.94	2.45	3.14	3.71	5.96
8	1.1	1.4	1.90	2.36	3.00	3.50	5.40
9	1.1	1.4	1.86	2.31	2.90	3.36	5.04
10	1.1	1.3	1.83	2.26	2.82	3.25	4.78
50	1.1	1.3	1.7	2.0		2.7	
100	1.0	1.3	1.7	2.0		2.6	
∞	1.0		1.6	2.0		2.6	

В практике учебных лабораторий принято брать значение $P \sim (0.68 \div 0.9)$.

В нашем случае мы имеем дело с достаточно точными измерениями и можем считать $P \sim 0.9$. Тогда, как видно из таблицы 2, при $P = 0.9$ и $n = 10$ коэффициент Стьюдента $t(P,n) = 1.83$.

С учетом этого вычислим значение ΔH_A и ΔD_A:

$\Delta H_{\text{А}} = 1.83*0.02$ мм = 0.0366 мм ≈ 0.04 мм;

$\Delta D_{\text{А}} = 1.83*0.01$ мм = 0.0183 мм ≈ 0.02 мм.

5. Теперь оценим вклад систематических (приборных) ошибок в наши измерения. При измерениях с помощью штангенциркуля систематическую составляющую неопределенности будем считать равной половине цены деления штангенциркуля, то есть

$\Delta H_{\text{В}} = 0.025$ мм ≈ 0.03 мм.

В данном случае приборная ошибка соизмерима со случайными ошибками. Поэтому необходимо оценить границу доверительного интервала для суммарной неопределенности, обусловленной обоими типами ошибок.

Вычисление будем проводить по формуле:

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_{\text{А}})^2 + (\Delta x_{\text{В}})^2} \quad , \qquad (11)$$

где x – измеряемая величина; $\Delta x_{\text{А}}$ – граница доверительного интервала, обусловленная случайными ошибками измерений; $\Delta x_{\text{В}}$ – граница доверительного интервала, вызванная систематическими ошибками.

Вычисления по формуле (11) дают:

$\Delta H = \sqrt{(\Delta H_{\text{А}})^2 + (\Delta H_{\text{В}})^2} = \sqrt{9+9} * 10^{-2} = 0.043$ мм;

$\Delta D = \sqrt{(\Delta D_{\text{А}})^2 + (\Delta D_{\text{В}})^2} = \sqrt{4+9} * 10^{-2} = 0.036$ мм.

В соответствии с правилами округления можно принять

$\Delta H = 0.04$ мм; $\Delta D = 0.04$ мм.

6. Результаты прямых измерений следует записать в стандартной форме: $D=D_{ср.}\pm\Delta D$; $H=H_{ср.}\pm\Delta H$.

Окончательно:

H=(43.20±0.04) мм; D=(18.42±0.04) мм.

Обработка результатов косвенных измерений

После проведения прямых измерений следует по рабочей формуле (4) вычислить среднее значение объема конуса:

$$V_{\text{ср}} = \frac{1}{12}\pi D_{\text{ср}}{}^2 H_{\text{ср}} = \frac{1}{12}\pi (18.41)^2 \cdot 43.20 = 3831 \text{ мм}^3.$$

Затем следует оценить неопределенность (погрешность) косвенных измерений.

Для этого необходимо выполнить следующие этапы:

а) вывести формулу относительной неопределенности искомой величины

$$\gamma = \frac{\Delta V}{V};$$

б) по полученной формуле вычислить значение γ;

в) определить границу доверительного интервала для косвенного измерения:

$$\Delta V = \gamma \cdot V_{\text{ср}}.$$

Окончательный результат представить в стандартной форме:

$$V=V_{ср.}\pm\Delta V.$$

Вывод формулы относительной неопределенности

Как видно из формулы (4), искомая величина V является функцией двух переменных D и H, т.е. V можно записать в виде:

$$V = f(D,H) = H^{\alpha} D^{\beta}, \qquad (12)$$

где α=1, β=2.

В случае такой простейшей функциональной зависимости выражение для относительной неопределенности γ можно записать как:

$$\gamma = \frac{\Delta V}{V} = \sqrt{(\frac{\Delta H}{H})^2 + 2^2(\frac{\Delta D}{D})^2} \ . \qquad (13)$$

Для вычисления γ в формулу (13) подставим средние значения результатов прямых измерений $H_{ср}$ и $D_{ср}$, и граничные значения их доверительных интервалов ΔH и ΔD.

Вычисления γ дают:

$$\gamma = \frac{\Delta V}{V} = \sqrt{(\frac{\Delta H}{H_{ср}})^2 + 2^2(\frac{\Delta D}{D_{ср}})^2} = 10^{-2}\sqrt{(\frac{4}{43.20})^2 + 4(\frac{4}{18.41})^2} = 4.45 \cdot 10^{-2} \ .$$

По правилам округления запишем γ с точностью до двух значащих цифр $\gamma=4.4*10^{-2}$.

Вычислим границу доверительного интервала косвенного измерения:

$$\Delta V = \gamma \cdot V_{ср} = 4.4 \cdot 10^{-2} \cdot 3.831 \cdot 10^3 \text{ мм}^3 = 167 \text{ мм}^3 .$$

Согласно правилам округления, ΔV запишем с точностью до двух значащих цифр (так как первая значащая цифра в ΔV меньше 4) и до того же знака округлим результат $V_{ср}$.

Тогда

$\Delta V = 1.7 \cdot 10^2 \text{ мм}^3$, $V_{ср} = 38.3 \cdot 10^2 \text{ мм}^3$.

Окончательный результат представим в стандартной форме:

$$V=(V_{ср.} \pm \Delta V) \text{ мм}^3,$$

получим $V=(3.83\pm0.17)*10^3$ мм или $V\approx(3.8\pm0.2)*10^3$ мм.

Лишь после ознакомления с правилами измерений штангенциркулем и обработки результатов этих измерений, представленных в данном примере, следует приступать к выполнению данной лабораторной работы.

<u>Измеряемый объект</u>

В данной лабораторной работе измеряемым объектом является сплошной цилиндр (рис. 3). Для вычисления объема цилиндра следует провести прямые измерения диаметра цилиндра *(D)* и его высоты *(H)* с помощью штангенциркуля.

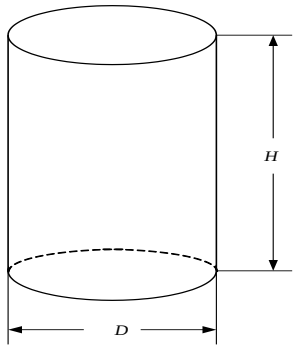

Рисунок 3 - Цилиндр

Объем цилиндра вычисляется по рабочей (расчетной) формуле:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \cdot H \,. \qquad (14)$$

Порядок выполнения работы

1. Измерить высоту и диаметр цилиндра 10 раз, результаты измерений занести в таблицу по форме, аналогичной табл. 1 в приведенном примере.

Замечание: если цилиндр не идеальной формы, то измерение D следует проводить по диаметрам на разной высоте цилиндра, а высоту H – в нескольких различных местах оснований цилиндра.

Вычисление и обработка результатов измерений

1. Провести обработку результатов прямых измерений. Вычислить средние арифметические значения $H_{ср}$ и $D_{ср}$ для серии измерений. Затем определить отклонения результатов отдельных измерений от их средних арифметических значений – $(H_{ср}–H_i)$ и $(D_{ср}–D_i)$. Далее вычислить квадратичное отклонение – $(H_{ср}–H_i)^2$ и $(D_{ср}-D_i)^2$. Все результаты занести в таблицу по форме табл. 1.

2. Определить средние квадратичные отклонения $S(H_{ср})$ и $S(D_{ср})$ результата серии измерений от среднего арифметического значения для каждой измеряемой величины.

3. Вычислить границы доверительных интервалов ΔD и ΔH за счет случайных ошибок.

4. Оценить систематическую (приборную) неопределенность и сравнить ее с неопределенностью измерений, вызванных случайными ошибками. Если эти ошибки сравнимы, то вычислить суммарную неопределенность каждого прямого измерения, обусловленную обоими типами ошибок. Определить границы доверительных интервалов ΔD и ΔH, обусловленных обоими типами неопределенностей.

5. Записать результаты прямых измерений в стандартной форме:

$D=D_{ср.}\pm\Delta D$; $H=H_{ср.}\pm\Delta H$,

учитывая правила округления величин.

6. Рассчитать среднее значение объема цилиндра $V_{ср}$ по рабочей формуле (14), куда подставить средние значения результатов прямых измерений $H_{ср}$ и $D_{ср}$.

7. Вывести формулу для расчета относительной неопределенности $\gamma = \frac{\Delta V}{V}$ косвенного измерения. Затем вычислить γ по полученной формуле.

8. Оценить границу доверительного интервала для косвенного измерения, т.е. $\Delta V = \gamma V_{ср}$.

9. Окончательно записать результат в стандартной форме:

$V=(V_{ср.}\pm\Delta V)$.

Приложение. Методика измерений с помощью штангенциркуля и микрометра

Измерение с помощью штангенциркуля

При расчете неопределенностей следует помнить, что математические действия не могут повысить точности измерений.

Точность измерения повышается с помощью нониуса. В штангенциркуле (рис. 4) нониус представляет собой небольшую линейку, которая может перемещаться вдоль основной.

Пусть n – число делений на шкале нониуса;

X – цена деления шкалы нониуса;

Y – цена деления шкалы основной линейки.

$t = \frac{y}{n}$, где t – точность штангенциркуля, выгравирована на приборе.

Следовательно, чем меньше цена деления основной линейки и больше делений на нониусе, тем точнее можно произвести измерение. Для измерения длины предмета с помощью нониуса необходимо расположить предмет между нулевыми делениями основной линейки и нониуса. Отсчитав число целых делений масштаба, найти то деление нониуса, которое совпало с каким-либо делением основной линейки.

Длина предмета определяется по формуле:

$l = \beta + kt$, где l – длина предмета, β – число целых делений основной линейки, k – номер деления нониуса, совпадающего с каким-либо делением масштаба, t – точность нониуса.

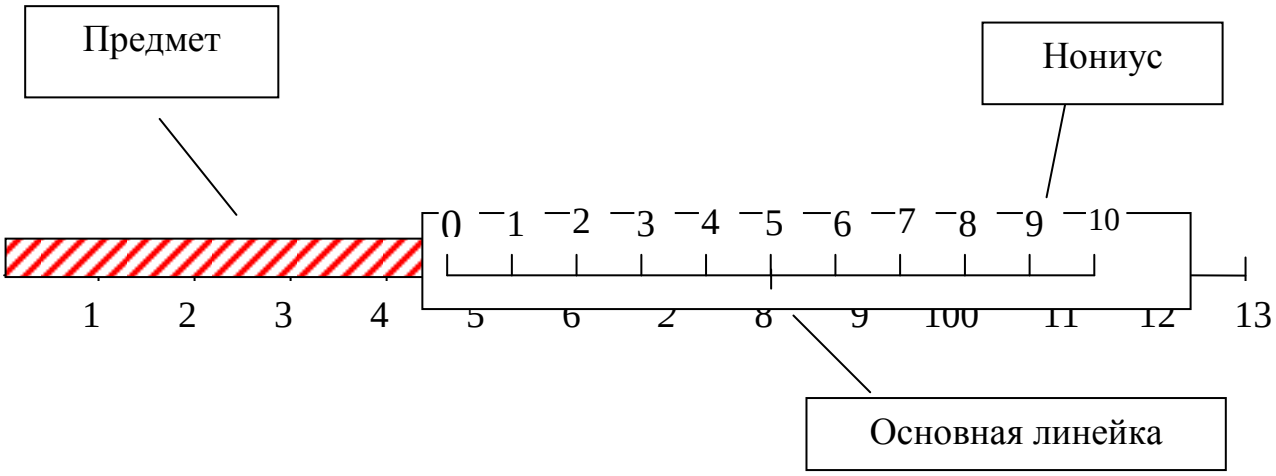

Рисунок 4 – Принцип измерения длины предмета

Для случая, рассмотренного на рисунке:

β = 4 мм; t = 0.1 мм; k = 5; l = 4 мм + 5*0.1 мм = 4.5 мм.

Измерения с помощью микрометра

При измерениях штангенциркулем величину вычисляемой средней неопределенности (погрешности) следует сравнивать с точностью нониуса.

Для более точных измерений длины применяются микрометры. В микрометрах используется микровинтовая пара, преобразующая вращательное движение в поступательное. Так, если шаг микровинта равен 0.5 мм, то при одном полном обороте винта его конец перемещается на 0.5 мм, если головка винта имеет круговую шкалу с 50 делениями, то поворот его на одно деление вызывает смещение на 0.01 мм, т.е. цена деления круговой шкалы будет равна 0.01 мм. При измерениях микрометром доли деления по круговой шкале следует округлять до половины значения и предельную приборную неопределенность считать равной ±0.005 мм. Перед началом измерений следует обязательно проверить положение нулевого отсчета.

Контрольные вопросы

1. Как найти среднее квадратичное отклонение?
2. Каков смысл вероятности?
3. Что показывает величина доверительного интервала?
4. Каков смысл относительной неопределенности?
5. Каковы отличия штангенциркуля от микрометра?

Лабораторная работа №3.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ

Основные положения

Параметры среды: влажность, освещённость, звуковое давление, температура

Влажность.

Абсолютная влажность – количество воды, содержащейся в одном кубическом метре воздуха. Это давление водяного пара в атмосфере. Из-за малости величины обычно измеряют в г/м³. Но в связи с тем, что при определённой температуре воздуха в нём может максимально содержаться только определённое количество воды (с увеличением температуры это максимально возможное количество воды увеличивается, с уменьшением температуры воздуха максимальное возможное количество воды уменьшается), ввели понятие относительной влажности.

Относительная влажность. Эквивалентное определение – отношение молярной доли водяного пара в воздухе к максимально возможной доле при данной температуре. Измеряется в процентах и определяется по формуле:

$$RH = \frac{p_{(H_2O)}}{p^*_{(H_2O)}} \times 100\% , \qquad (15)$$

где: *RH* – относительная влажность рассматриваемой смеси (воздуха); $p(H_2O)$ – парциальное давление паров воды в смеси; $p^*(H_2O)$ – равновесное давление насыщенного пара.

Давление насыщенных паров воды сильно растёт при увеличении температуры. Поэтому при изобарическом (то есть, при постоянном давлении) охлаждении воздуха с постоянной концентрацией пара наступает момент (точка росы), когда пар насыщается, при этом «лишний» пар конденсируется в виде тумана или кристалликов льда. Процессы насыщения и конденсации водяного пара играют огромную роль в физике атмосферы.

Процессы образования облаков и образование атмосферных фронтов в значительной части определяются процессами насыщения и конденсации; теплота, выделяющаяся при конденсации атмосферного водяного пара, обеспечивает энергетический механизм возникновения и развития тропических циклонов (ураганов).

Относительная влажность воздуха измеряется числом, показывающим, сколько процентов составляет абсолютная влажность воздуха, от плотности или давления водяного пара необходимых для насыщения воздуха при имеющейся у него температуре.

Оценка относительной влажности

Относительная влажность водно-воздушной смеси может быть оценена, если известны её температура (T) и температура точки росы (T_d). Когда температуры T и T_d выражены в градусах Цельсия, тогда истинно выражение:

$$RH = \frac{e_p}{e_s} \times 100\% \quad . \tag{16}$$

где парциальное давление водяного пара в смеси оценено e_p:

$$e_p = e^{\frac{(17.269 \times T_d)}{(237.7 + T_d)}}, \tag{17}$$

и влажное давление пара воды в смеси при температуре оценено e_s:

$$e_s = e^{\frac{(17.269 \times T)}{(237.7 + T)}}. \tag{18}$$

Пересыщенный водяной пар. В отсутствие центров конденсации при снижении температуры возможно образование перенасыщенного состояния, то есть, относительная влажность становится более 100%.

В качестве центров конденсации могут выступать ионы или частицы аэрозолей, именно на конденсации пересыщенного пара на ионах, образующихся при прохождении заряженной частицы в таком паре основан принцип действия камеры Вильсона и диффузионных камер: капельки воды, конденсирующиеся на образовавшихся ионах, образуют видимый след (трек) заряженной частицы.

Другим примером конденсации пересыщенного водяного пара являются инверсионные следы самолётов, возникающие при конденсации пересыщенного водяного пара на частицах сажи выхлопа двигателей.

Средства и методы контроля. Для определения влажности воздуха используются приборы, которые называются психрометрами и гигрометрами. Психрометр Августа состоит из двух термометров – сухого и влажного. Влажный термометр показывает температуру ниже, чем сухой, так как его

резервуар обмотан тканью, смоченной в воде, которая, испаряясь, охлаждает его. Интенсивность испарения зависит от относительной влажности воздуха. По показаниям сухого и влажного термометров находят относительную влажность воздуха по психрометрическим таблицам.

В последнее время стали широко применяться интегральные датчики влажности (как правило, с выходом по напряжению), основанные на свойстве некоторых полимеров изменять свои электрические характеристики (такие, как диэлектрическая проницаемость среды) под действием содержащихся в воздухе паров воды.

Для поверки приборов для измерения влажностей применяют специальные установки – гигростаты.

Относительная влажность воздуха – важный экологический показатель среды. При слишком низкой или слишком высокой влажности наблюдается быстрая утомляемость человека, ухудшение восприятия и памяти. Высыхают слизистые оболочки человека, движущиеся поверхности трескаются, образуя микротрещины, куда напрямую проникают вирусы, бактерии, микробы.

Низкая относительная влажность (до 5–7%) в помещениях квартиры, офиса отмечена в регионах с продолжительным стоянием низких отрицательных температур наружного воздуха. Обычно продолжительность до 1–2 недель при температурах ниже минус 20^0С, приводит к высушиванию помещений. Значительным ухудшающим фактором в поддержании относительной влажности является воздухообмен при низких отрицательных температурах. Чем больше воздухообмен в помещениях, тем быстрее в этих помещениях создается низкая (5–7%) относительная влажность. Наиболее комфортно человек чувствует себя при влажности воздуха: летом – от 60 до 75%; зимой от 55 до 70%.

В помещениях с паркетом и мебелью, сделанными из натурального дерева, относительная влажность должна составлять от 50 до 60%.

Замечено, что при длительных морозах редко возникают заболевания гриппом и ОРЗ, но когда морозы спадают – люди, пережившие эти холода, заболевают, причём в первую продолжительную (до недели) оттепель.

Продукты питания, строительные материалы и даже многие электронные компоненты допускается хранить в строго определённом диапазоне относительной влажности воздуха. Многие технологические процессы возможны только при строгом контроле содержания паров воды в воздухе производственного помещения.

Влажность воздуха в помещении можно изменять. Для повышения влажности применяются увлажнители воздуха.

Функции осушения (понижения влажности) воздуха реализованы в большинстве кондиционеров и в виде отдельных приборов – осушителей воздуха.

Освещённость.

Нормы освещенности учреждений общего образования, начального, среднего и высшего специального образования собраны в таблице 3.

Таблица 3 – Нормы освещенности

№	Освещаемые объекты	Средняя освещенность *Eср.* в люксах (лк) не менее
1.	Классные комнаты, аудитории, учебные кабинеты, лаборатории общеобразовательных школ, школ-интернатов, средне-специальных и профессионально-технических учреждений (на доске).	500
2.	Классные комнаты, аудитории, учебные кабинеты, лаборатории общеобразовательных школ, школ-интернатов, средне-специальных и профессионально-технических учреждений (на столах, Г-0.8).	400
3.	Аудитории, учебные кабинеты, лаборатории техникумов и высших учебных заведений (на столах, Г-0.8).	400
4.	Кабинеты информатики и вычислительной техники (на столах, Г-0.8).	400
5.	Кабинеты технического черчения и рисования (на столах, Г-0.8).	500
6.	Лаборатории при учебных кабинетах (на столах, Г-0.8).	400
7.	Мастерские по обработке металлов и древесины (на столах, Г-0.8).	300
8.	Кабинеты обслуживающих видов труда (на столах, Г-0.8).	400
9.	Спортивные залы (на полу, Г-0,0).	200
10.	Спортивные залы (на уровне 2.0 м от пола).	75
11.	Крытые бассейны (на поверхности воды).	150
12.	Актовые залы, киноаудитории (на полу, Г-0).	200
13.	Эстрады актовых залов (на полу, Г-0.0).	300
14.	Кабинеты и комнаты преподавателей (на столах, Г-0.8).	300
15.	Рекреации (на полу, Г-0.0)	150

Все указанные нормы освещенности являются общепринятыми нормами по СНиП (Строительные Нормы и Правила) от 23.05.2010 (актуализированная редакция СНиП 23.05.95), включая СП 52.13330.2011 и Санитарным правилам и нормам СаНПиН 2.21/2.1.1.1278-03.

Освещенность измеряется в лк – люксах; 1 люмен/кв. метр (люмен *Lm* – единица величины светового потока).

Внимание!

Нормы указаны для рабочей поверхности: если это кабинет или лаборатория – то это высота стола; если это лестница, дорога или допустим стадион – то это: пол, полотно дороги, поле и т.п.

Звуковое давление.

Звуковое давление не следует путать с давлением звукового излучения.

Звуковое давление – переменное избыточное давление, возникающее в упругой среде при прохождении через неё звуковой волны. Единица измерения – паскаль (Па).

Мгновенное значение звукового давления в точке среды изменяется как со временем, так и при переходе к другим точкам среды, поэтому практический интерес представляет среднеквадратичное значение данной величины, связанное с интенсивностью звука:

$$I = \frac{< p^2 >_t}{Z_S}, \tag{19}$$

где I – интенсивность звука, p – звуковое давление, Z_S – удельное акустическое сопротивление среды, $<>_t$ – усреднение по времени.

При рассмотрении периодических колебаний иногда используют амплитуду звукового давления; так, для синусоидальной волны

$$p = p_0 \sin(\omega t + \varphi), \qquad < p^2 >_t = \frac{\pi p_o^2}{\omega}, \tag{20}$$

$$I = \frac{\pi p_0^2}{\omega Z_S}, \tag{21}$$

где p_0 – амплитуда звукового давления.

Уровень звукового давления (англ. *SPL*, Sound Pressure Level) – измеренное по относительной шкале значение звукового давления, отнесённое к опорному давлению p_{SPL}=20 мкПа, соответствующему порогу слышимости синусоидальной звуковой волны частотой 1 кГц, выраженное в дБ:

$$\mathrm{N} = 20 \lg \frac{p}{20\ \mu\text{Па}}. \tag{22}$$

Уровни звукового давления от различных источников отражены в таблице 4.

Таблица 4 - Уровни звукового давления различных источников

№	Уровень в дБ SPL	Уровень в МПа	Примеры, где наблюдается подобный уровень, последствия для человека
1	0		Специальная измерительная камера
2	5		Почти ничего не слышно
3	10		Почти не слышно: шёпот, тиканье часов, тихий шелест листьев
4	15		Едва слышно: шелест листьев на ветру
5	20		Едва слышно: уровень естественного фона на открытой местности при отсутствии ветра, норма шума в жилых помещениях
6	25		Тихо: сельская местность вдали от дорог
7	30		Тихо: настенные часы

8	35		Хорошо слышно: приглушённый разговор
9	40		Хорошо слышно: тихий разговор, учреждение (офис) без источников шума, уровень звукового фона днём в городском помещении с закрытыми окнами, выходящими во двор
10	50		Отчётливо слышно: разговор средней громкости, тихая улица, стиральная машина
11	60		Шумно: обычный разговор, норма для контор
12	65		Шумно: громкий разговор на расстоянии 1м
13	70		Шумно: громкие разговоры на расстоянии 1м, шумная улица, пылесос на расстоянии 3м
14	75		Шумно: крик, смех с расстояния 1м; шум в вагоне электрички
15	80		Очень шумно: громкий будильник на расстоянии 1м; крик; мотоцикл с глушителем; шум работающего двигателя грузового автомобиля
16	85		Очень шумно: громкий крик, мотоцикл с глушителем
17	90		Очень шумно: громкие крики, пневматический отбойный молоток, тяжёлый дизельный грузовик на расстоянии 7м
18	95		Очень шумно: вагон метро на расстоянии 7м
19	100		Крайне шумно: громкий автомобильный сигнал на расстоянии 5-7м, очень шумный завод
20	110		Крайне шумно — шум работающего трактора на расстоянии 1м, громкая музыка, вертолёт
21	115		Крайне шумно: пескоструйный аппарат на расстоянии 1м, мощный автомобильный сабвуфер
22	120		Почти невыносимо: болевой порог, гром (иногда до 120 дБ), отбойный молоток, вувузела на расстоянии 1м
23	130		Боль: сирена
24	140		Травма внутреннего уха: взлёт реактивного самолёта на расстоянии 25м, максимальная громкость на рок-концерте
25	150		Контузия, травмы: реактивный двигатель на расстоянии 30м
26	160	0.002	Шок, травмы, возможен разрыв барабанной перепонки: выстрел из ружья близко от уха; ударная волна от сверхзвукового самолёта
27	168		Шок, травмы, возможен разрыв барабанной перепонки: выстрел из винтовки M1 Garand на расстоянии 1м
28	170	0.0063	Свето–шумовая граната, воздушная ударная волна
29	180	0.02	Свето–шумовая граната, воздушная ударная волна давлением, длительный звук с таким давлением вызывает смерть

30	190	0.063	Воздушная ударная волна
31	194	0.1	Воздушная ударная волна давлением, равным атмосферному давлению, возможен разрыв лёгких
32	200	0.2	Воздушная ударная волна давлением, возможна смерть
33	210	0.63	Воздушная ударная волна давлением
34	220	2	Воздушная ударная волна давлением
35	230	6.3	Воздушная ударная волна давлением
36	240	20	Воздушная ударная волна давлением
37	249.7	61	Максимальное давление воздушной ударной волны при взрыве тринитротолуола. Давление ударных волн при обычном взрыве может быть больше (максимальное – давление детонации), но это будет ещё не воздушная, а начальная взрывная ударная волна, образованная разлётом продуктов детонации
38	260	200	Ударная волна давлением
39	270	632	Ударная волна давлением
40	280	2000	Ударная волна давлением
41	282	2500	Максимальное давление воздушной ударной волны при ядерном взрыве. Максимальное давление продуктов реакции в момент ядерного взрыва гораздо больше – до 100 млн. МПа
42	300	20000	Среднее давление детонации обычных взрывчатых веществ
43	374	100 млн	Давление в ядерном заряде в момент ядерного взрыва
44	467		4.63309 × 10113 Па — планковское давление

Давление свыше 140 дБ *SPL* может вызвать разрыв барабанной перепонки, баротравмы и даже смерть.

Работа выполняется с помощью цифрового мультиметра Mastech MS8229

Содержание отчета:

Таблицы полученных экспериментальных данных. Оценки погрешности итоговых результатов.

Контрольные вопросы:

1. Что такое абсолютная влажность?

2. Что такое относительная влажность?

3. В каких единицах измеряется освещённость и световой поток?

4. Что такое уровень звукового давления?

5. Что такое комфортные условия среды?

Лабораторная работа №4.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА

Удельное электрическое сопротивление, или просто удельное сопротивление вещества – физическая величина, характеризующая способность вещества препятствовать прохождению электрического тока.

Удельное сопротивление обозначается греческой буквой ρ. Величина, обратная удельному сопротивлению, называется удельной проводимостью (удельной электропроводностью). В отличие от электрического сопротивления, являющегося свойством проводника и зависящего от его материала, формы и размеров, удельное электрическое сопротивление является свойством только вещества.

Электрическое сопротивление однородного проводника с удельным сопротивлением ρ, длиной l и площадью поперечного сечения S может быть рассчитано по формуле

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}, \tag{23}$$

(при этом предполагается, что ни площадь, ни форма поперечного сечения не меняются вдоль проводника). Соответственно, для ρ выполняется

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}. \tag{24}$$

Из последней формулы следует: физический смысл удельного сопротивления вещества заключается в том, что оно представляет собой сопротивление изготовленного из этого вещества однородного проводника единичной длины и с единичной площадью поперечного сечения. Единицы измерения Ом*м или Ом*мм^2/м.

Вычислить удельную проводимость σ по формуле

$$\rho = \frac{1}{\sigma}. \tag{25}$$

Оценить относительную погрешность величин ρ и σ.

Таблица 5 - Физические характеристики медных жил проводов и кабелей

Сечение токопроводящей жилы, мм^2	Напряжение, 220В		Напряжение, 380В	
	Ток, А	Мощность, кВт	Ток, А	Мощность, кВт
1.5	19	4.1	16	10.5
2.5	27	5.9	25	16.5
4	38	8.3	30	19.8
6	46	10.1	40	26.4
10	70	15.4	50	33.0
16	85	18.7	75	49.5
25	115	25.3	90	59.4
35	135	29.7	115	75.9
50	175	38.5	145	95.7
70	215	47.3	180	118.8
95	260	57.2	220	145.2
120	300	66.0	260	171.6

Таблица 6 - Допустимый длительный ток для проводов и шнуров с резиновой и поливинилхлоридной изоляцией с медными жилами

Сечение токопроводящей жилы, мм	Открыто	Ток, А, для проводов проложенных в одной трубе				
		Двух одножильных	Трех одножильных	Четырех одножильных	Одного двухжильного	Одного трехжильного
0.5	11	—	—	—	—	—
0.75	15	—	—	—	—	—
1	17	16	15	14	15	14
1.2	20	18	16	15	16	14.5
1.5	23	19	17	16	18	15
2	26	24	22	20	23	19
2.5	30	27	25	25	25	21
3	34	32	28	26	28	24
4	41	38	35	30	32	27
5	46	42	39	34	37	31
6	50	46	42	40	40	34
8	62	54	51	46	48	43
10	80	70	60	50	55	50
16	100	85	80	75	80	70
25	140	115	100	90	100	85
35	170	135	125	115	125	100
50	215	185	170	150	160	135
70	270	225	210	185	195	175
95	330	275	255	225	245	215
120	385	315	290	260	295	250
150	440	360	330	—	—	—
185	510	—	—	—	—	—
240	605	—	—	—	—	—
300	695	—	—	—	—	—
400	830	—	—	—	—	—

Работа выполняется с использованием учебных планшетов, цифрового мультиметра Mastech MS8229, лабораторных блоков питания и элементной базы.

Содержание отчета:

Таблицы полученных экспериментальных данных. Оценки погрешности итоговых результатов.

Контрольные вопросы:

1. Что такое удельное электрическое сопротивление?

2. Из каких материалов изготавливают электрические провода?

3. Электропроводность и теплопроводность металлов?

4. Различия между металлами и изоляторами?

5. Из какого материала сделаны провода на телескопе Хаббл?

Лабораторная работа №5.
ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ТЕРМОПАР, ЭЛЕМЕНТОВ ПЕЛЬТЬЕ, СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ, СВЕТОДИОДОВ, ФОТОРЕЗИСТОРОВ

Светодиод или светоизлучающий диод (СД, СИД; англ. *light-emitting diode*, LED) — полупроводниковый прибор с электронно-дырочным переходом, создающий оптическое излучение при пропускании через него электрического тока в прямом направлении.

Излучаемый светодиодом свет лежит в узком диапазоне спектра. Иными словами, его кристалл изначально излучает конкретный цвет (если речь идёт об СД видимого диапазона) — в отличие от лампы, излучающей более широкий спектр, где нужный цвет можно получить лишь применением внешнего светофильтра. Диапазон излучения светодиода во многом зависит от химического состава использованных полупроводников.

При пропускании электрического тока через p-n переход в прямом направлении, носители заряда — электроны и дырки — рекомбинируют с излучением фотонов (из-за перехода электронов с одного энергетического уровня на другой).

Не все полупроводниковые материалы эффективно испускают свет при рекомбинации. Лучшие излучатели относятся к прямозонным полупроводникам (то есть к таким, в которых разрешены прямые оптические переходы зона-зона), типа *AIIIBV* (например, *GaAs* или *InP*) и *AIIBVI* (например, *ZnSe* или *CdTe*). Варьируя состав полупроводников, можно создавать светодиоды для всевозможных длин волн от ультрафиолета (*GaN*) до среднего инфракрасного диапазона (*PbS*).

Диоды, сделанные из непрямозонных полупроводников (например, кремния, германия или карбида кремния), свет практически не излучают. Впрочем, в связи с развитием кремниевой технологии, активно ведутся работы по созданию светодиодов на основе кремния. Советский жёлтый светодиод КЛ 101 на основе карбида кремния выпускался ещё в 70-х годах, однако имел очень низкую яркость. В последнее время большие надежды связываются с технологией квантовых точек и фотонных кристаллов.

Вольт-амперная характеристика светодиодов в прямом направлении нелинейна. Диод начинает проводить ток начиная с некоторого порогового напряжения. Это напряжение позволяет достаточно точно определить материал полупроводника.

Важно знать, что непосредственное подключение светодиода к источнику напряжения может вызвать протекание через него тока, превышающего предельно допустимый, перегрев и мгновенный выход из строя. В простейшем случае (для маломощных индикаторных светодиодов) токоограничительная цепь представляет собой резистор, последовательно включенный со светодиодом. Для мощных светодиодов применяются схемы с широтно-импульсной модуляцией, которые поддерживают средний ток через светодиод на заданном уровне, и позволяют регулировать его яркость.

Недопустимо подавать на светодиоды напряжение обратной полярности. Светодиоды имеют невысокое (несколько вольт) обратное пробивное напряжение. В схемах, где возможно появление обратного напряжения, светодиод должен быть защищён параллельно включенным обычным диодом в противоположной полярности.

Обычные светодиоды изготавливаются из различных неорганических полупроводниковых материалов, в таблице 7 приведены доступные цвета с диапазоном длин волн, падение напряжения на диоде, и материал:

Таблица 7 - Доступные цвета с диапазоном длин волн, падение напряжения на диоде, и материал

Цвет	Длина волны (нм)	Напряжение (В)	Материал полупроводника
Инфракрасный	$\lambda > 760$	$\Delta U < 1.9$	Арсенид галлия (*GaAs*). Алюминия-галлия арсенид (*AlGaAs*)
Красный	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta U < 2.03$	Алюминия-галлия арсенид (*AlGaAs*). Галлия арсенид-фосфид (*GaAsP*) Алюминия-галлия-индия фосфид (*AlGaInP*). Галлия(III) фосфид (*GaP*)
Оранжевый	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < \Delta U < 2.10$	Галлия фосфид-арсенид (*GaAsP*). Алюминия-галлия-индия фосфид (*AlGaInP*). Галлия(III) фосфид (*GaP*)
Жёлтый	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < \Delta U < 2.18$	Галлия арсенид-фосфид (*GaAsP*). Алюминия-галлия-индия фосфид (*AlGaInP*). Галлия(III) фосфид (*GaP*)
Зелёный	$500 < \lambda < 570$	$1.9 < \Delta U < 4.0$	Индия-галлия нитрид (*InGaN*). Галлия(III) нитрид (*GaN*). Галлия(III) фосфид (*GaP*). Алюминия-галлия-индия фосфид (*AlGaInP*). Алюминия-галлия фосфид (*AlGaP*)
Голубой	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta U < 3.7$	Селенид цинка (*ZnSe*). Индия-галлия нитрид (*InGaN*). Карбид кремния (*SiC*) в качестве субстрата. Кремний (*Si*) в качестве субстрата — (в разработке)

Фиолетовый	$400 < \lambda < 450$	$2.76 < \Delta U < 4.0$	Индия-галлия нитрид (*InGaN*)
Пурпурный	Смесь нескольких спектров	$2.48 < \Delta U < 3.7$	Двойной: синий/красный диод, синий с красным люминофором, или белый с пурпурным пластиком
Ультрафиолетовый	$\lambda < 400$	$3.1 < \Delta U < 4.4$	Алмаз (235 нм). Нитрид бора (215 нм). Нитрид алюминия (*AlN*) (210 нм). Нитрид алюминия-галлия (*AlGaN*). Нитрид алюминия-галлия-индия (*AlGaInN*) — (менее 210 нм)
Белый	Широкий спектр	$\Delta U \approx 3.5$	Голубой/ультрафиолетовый диод с люминофором

Светодиоды также могут иметь цветной корпус.

По сравнению с другими электрическими источниками света (преобразователями электроэнергии в электромагнитное излучение видимого диапазона), светодиоды имеют следующие отличия.

1. Высокая световая отдача. Современные светодиоды сравнялись по этому параметру с натриевыми газоразрядными лампами и металлогалогенными лампами, достигнув 160 люмен на ватт.
2. Высокая механическая прочность, вибростойкость (отсутствие нити накаливания и иных чувствительных составляющих).
3. Длительный срок службы — от 30000 до 100000 часов (при работе 8 часов в день — 34 года). Но и он не бесконечен — при длительной работе и/или плохом охлаждении происходит «отравление» кристалла и постепенное падение яркости.
4. Спектр современных белых светодиодов бывает различным — от тёплого белого = 2700 К до холодного белого = 6500 К.
5. Спектральная чистота достигаемая не фильтрами, а принципом устройства прибора.
6. Малая инерционность — включаются сразу на полную яркость, в то время как у ртутно-фосфорных (люминесцентных-экономичных) ламп время включения от 1 с до 1 мин, а яркость увеличивается от 30 % до 100 % за 3-10 минут, в зависимости от температуры окружающей среды.
7. Количество циклов включения-выключения не оказывают существенного влияния на срок службы светодиодов (в отличие от традиционных источников света — ламп накаливания, газоразрядных ламп).
8. Различный угол излучения — от 15 до 180 градусов.
9. Низкая стоимость индикаторных светодиодов.
10. Безопасность — не требуются высокие напряжения, низкая температура светодиода или арматуры, обычно не выше 60°С.

11. Нечувствительность к низким и очень низким температурам. Однако, высокие температуры противопоказаны светодиоду, как и любым полупроводникам.
12. Экологичность — отсутствие ртути, фосфора и ультрафиолетового излучения в отличие от люминесцентных ламп. Отсутствуют проблемы утилизации отходов.
Применение светодиодов:
— в уличном, промышленном, бытовом освещении (в том числе светодиодная лента);
— в качестве индикаторов — как в виде одиночных светодиодов (например, индикатор включения на панели прибора), так и в виде цифрового или буквенно-цифрового табло (например, цифры на часах);
— массив светодиодов используется в больших уличных экранах, в бегущих строках, такие массивы часто называют светодиодными кластерами или просто кластерами;
— в оптопарах;
— мощные светодиоды используются как источник света в фонарях и светофорах;
6. светодиоды используются в качестве источников модулированного оптического излучения (передача сигнала по оптоволокну, пульты ДУ, светотелефоны, интернет);
— в подсветке ЖК-экранов (мобильные телефоны, мониторы, телевизоры и т.д.);
— в играх, игрушках, значках, USB-устройствах и прочее;
— в светодиодных дорожных знаках;
— в гибких ПВХ световых шнурах Дюралайт;
— в растениеводстве …

Элемент Пельтье — это термоэлектрический преобразователь, принцип действия которого базируется на эффекте Пельтье — возникновении разности температур при протекании электрического тока. В англоязычной литературе элементы Пельтье обозначаются TEC (от англ. Thermoelectric Cooler — термоэлектрический охладитель).
Эффект, обратный эффекту Пельтье, называется эффектом Зеебека.

Термопара (термоэлектрический преобразователь) — устройство, применяемое для измерения температуры в промышленности, научных исследованиях, медицине, в системах автоматики.
Международный стандарт на термопары МЭК 60584 дает следующее определение термопары: Термопара — пара проводников из различных материалов, соединенных на одном конце и формирующих часть устройства, использующего термоэлектрический эффект для измерения температуры.
Для измерения разности температур зон, ни в одной из которых не находится вторичный преобразователь (измеритель термо-ЭДС), удобно использовать дифференциальную термопару: две одинаковые термопары, соединенные навстречу друг другу. Каждая из них измеряет перепад температур между своим рабочим спаем и условным спаем, образованным концами термопар,

подключёнными к клеммам вторичного преобразователя, но вторичный преобразователь измеряет разность их сигналов, таким образом, две термопары вместе измеряют перепад температур между своими рабочими спаями.

Работа выполняется с использованием учебных планшетов, цифрового мультиметра Mastech MS8229, лабораторных блоков питания и элементной базы.

Содержание отчета:

Таблицы полученных экспериментальных данных. Оценки погрешности итоговых результатов.

Контрольные вопросы:

1. *Отличие светодиода от обычного полупроводникового диода.*
2. *Каковы сходства и различия излучения светодиода от обычной лампы накаливания?*
3. *Каковы сходства и различия излучения светодиода от лазера?*
4. *Почему в элементах Пельтье не используются контакты двух различных металлов?*
5. *Преимущества и недостатки термопар?*

Лабораторная работа №6
ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ РЕЗИСТОРОВ

Физическое обоснование эксперимента

Термочувствительны резисторы (терморезисторы или *ТР*) представляют собой полупроводниковые сопротивления. Их действия основаны на свойстве полупроводников значительно менять своё сопротивление при изменении температуры. В отличие от металлов температурный коэффициент сопротивления у *ТР* имеет отрицательный знак и сильно отличается по величине. При нагревании металлов на 1^0С их сопротивление повышается на 0.3 – 0.5 %. Сопротивление полупроводника падает на 3 – 6 % при том же нагревании. Значительный по абсолютной величине температурный коэффициент *ТР* является его ценным свойством, на котором основана работа *ТР*.

Металлические термометры сопротивления (например, платиновый), ранее применявшиеся в лабораторной практике для измерения большого температурного интервала, имеют малый температурный коэффициент, вследствие чего точность измерений температуры весьма мала. В отличие от таких термометров, *ТР* имеют большие преимущества:

а) малые размеры *ТР* (до десятых долей миллиметра), вследствие большого удельного сопротивления;

б) малая инерционность, вследствие незначительных размеров;

в) высокая точность измерений, вследствие большого относительного изменения сопротивления полупроводников по сравнению с металлами;

г) дешевизна.

Применение *ТР* позволяет обнаружить изменения температуры до $5*10^{-4}$ градуса.

Зависимость электропроводности полупроводникового терморезистора от температуры

Если терморезистор изготовлен из собственного полупроводника, то зависимость электропроводности от температуры для него будет определяться формулой (при условии $\Delta E >> kT$)

$$\sigma=\sigma_0*exp[-\Delta E/2kT], \qquad (26)$$

где σ_0 – множитель, не зависящий от температуры и равный σ при $T=\infty$, т.е. когда все валентные электроны перешли в зону проводимости. Его значение постоянно.

Приведенная формула справедлива для проводимости собственного полупроводника в том случае, если подвижность носителей тока постоянна и не зависит от температуры.

График этой зависимости удобно построить, прологарифмировав формулу (26):

$$ln\sigma=ln\sigma_0-\Delta E/2k*(1/T). \qquad (27)$$

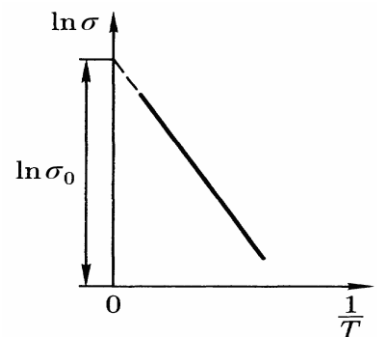

Рисунок 5 - Зависимость электропроводности полупроводникового терморезистора от температуры.

На рисунке 5 эта зависимость представлена в полулогарифмическом масштабе. Тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс даёт величину $\Delta E/2k$, откуда можно найти значение ΔE для полупроводника. Такая сильная зависимость для электропроводности от температуры объясняется температурной зависимостью концентрации носителей тока и их подвижности. Но электропроводность сильнее зависит от изменения концентрации носителей тока с ростом температуры, чем от изменения их подвижности. Увеличение концентрации носителей тока с ростом температуры будет определяться выражением

$$n=CN^{1/2}exp[-\Delta E/2kT], \qquad (28)$$

где C – постоянная, зависящая от температуры и эффективной массы носителей тока; N – концентрация примесных атомов; ΔE – энергия активации примесных атомов.

Для примесного полупроводника по аналогии с формулой (26) электропроводность в общем виде будет определяться формулой

$$\sigma=\sigma_1*exp[-\Delta E/2kT]+\sigma_2*exp[-\Delta E_{прим.}/2kT], \qquad (29)$$

где $\Delta E_{прим.}$ – энергия активации примесных атомов.

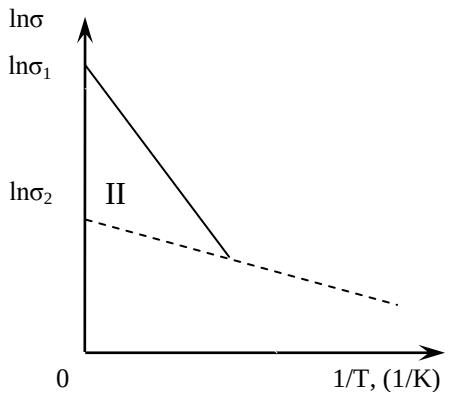

Рисунок 6 - Зависимость электропроводности примесного полупроводника от температуры.

По этой формуле на рисунке 6 построен график.

Прямая с большим наклоном, пересекающая ось ординат в точке $ln\sigma_1$, соответствует первому слагаемому выражения (28), пологая прямая – второму слагаемому. Точка пересечения этих двух прямых соответствует такой температуре, при которой кристалл переходит из состояния примесной проводимости (область I, справа от критической точки) в состояние собственной проводимости (область II, слева от критической т I). Эта температура называется критической $T_{кр.}$. Логарифм σ, т.е. логарифм суммы двух членов правой части выражения (7), как видно из рис.4, уже не может быть выражен прямой, а выражается кривой, которая при низких температурах полностью совпадает с прямой, соответствующей примесной проводимости, а при высоких – с прямой, которая будет соответствовать собственной проводимости. При промежуточных температурах, близких к $T_{кр.}$, наблюдается переходный криволинейный ход этой зависимости. Такой температурный ход электропроводности примесного полупроводника объясняется тем, что при низких температурах процесс генерации пар электрон – дырка (собственных носителей) затруднён, так как большая часть электронов обладает недостаточной энергией для перехода из заполненной валентной зоны в зону проводимости.

Положение и наклон примесного участка кривой зависит от концентрации примесей. Чем больше концентрация атомов примеси в

кристалле, тем меньше наклон кривой к оси абсцисс, и тем она выше располагается (рисунок 7).

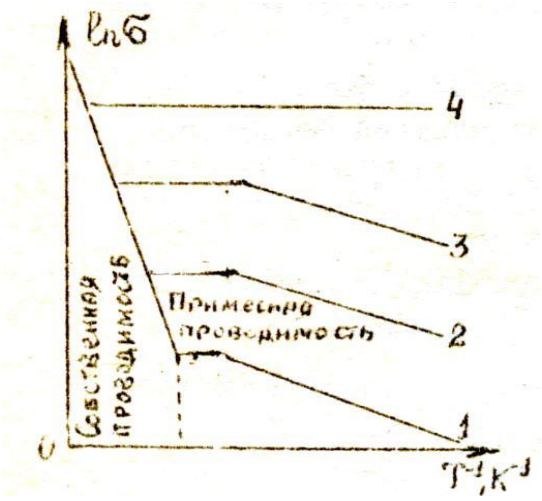

Рисунок 7 – Зависимость наклона кривой от концентрации примесей

Примесные прямые 1 – 4 имеют всё более возрастающую концентрацию примесей. Это объясняется тем, что, например, зона донорных уровней энергии примесных атомов, являющаяся в полупроводнике высокой частоты довольно узкой, расширяется по мере увеличения концентрации примесных атомов и, наконец, сливается с зоной проводимости. В этом случае полупроводник становится «вырожденным» и в нём электропроводность, практически, перестаёт зависеть от температуры. Вырождение, т.е. повышение температурно независимого участка на графиках зависимости электропроводности от температуры, наблюдается уже при малых концентрациях примеси. Горизонтальные части кривых на рис.5, соответствующие различным концентрациям примеси, называются областью насыщения. В этом интервале температур примесные атомы уже полностью ионизированы, а собственная проводимость ещё не оказала заметного влияния на концентрацию носителей.

Наклон участка кривой, соответствующий собственной проводимости, естественно не зависит от количества примесей и является одним из основных свойств полупроводника.

Как видно из рисунка 7, для полупроводников с более высокой концентрацией примеси переход от примесной к собственной проводимости происходит при более высоких температурах.

Для изготовления термосопротивлений используются полупроводники с большой шириной запрещенной зоны, в основном окиси металлов (Mn_3O_4, CuO и другие), в которые вносятся примесные атомы, имеющие не очень большую энергию активации. Так как геометрические размеры полупроводника ТР не известны, то при исследовании его температурной зависимости проводимости можно измерить зависимость сопротивления ТР от температуры.

Формулу (29) можно записать в виде

$$R=R_1*exp[\Delta E/2kT]+R_2*exp[\Delta E_{прим.}/2kT]. \qquad (30)$$

Первый член этой формулы характеризует собственный полупроводник с шириной запрещенной зоны ΔE, второй член характеризует свойства его примесных атомов, где $\Delta E_{прим.}$ – энергия активации примеси.

Так как критическая температура для применяемых в ТР проводниках достаточно высока, а исследуемые ТР имеют достаточно небольшую предельную температуру нагрева ($+120^0$С), то по температурной зависимостьи можно определить только энергию активации примеси $\Delta E_{прим.}$ по формуле:

$$R=R_2*exp[\Delta E_{прим.}/2kT]. \quad (31)$$

Обозначим $B=\Delta E_{прим.}/2k$, тогда формула (31) примет вид

$$R=R_2*exp[B/T]. \quad (32)$$

После логарифмирования формулы (32) получим

$$lnR=lnR_2+B/T. \quad (33)$$

Формула (33) представляет собой линейную зависимость $lnR=f(1/T)$, изображённую на рисунке 8.

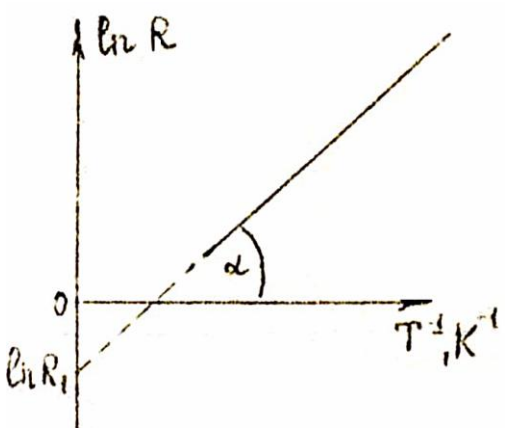

Рисунок 8 – Линейная зависимость $lnR=f(1/T)$

Тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс α равен B ($B=tg\alpha$), а lnR_2 – это отрезок оси ординат, отсекаемый итоговой прямой линией.

Для характеристики температурной зависимости ТР вводят температурный коэффициент сопротивления терморезистора по формуле

$$\alpha=(1/R)*(\partial R/\partial T). \quad (34)$$

Продифференцировав формулу (10) по температуре и подставив $\partial R/\partial T$ в формулу (34), получим для значения температурного коэффициента ТР величину

$$\alpha=-B/T^2. \quad (35)$$

Целью работы является изучение температурной зависимости сопротивления ТР, определение температурного коэффициента α для различных температур и энергии активации примеси $\Delta E_{прим.}$ полупроводникового терморезистора.

Описание установки и порядок выполнения работы

В работе исследуется терморезистор ММТ-4, изготовленный из смеси двух полупроводников Mn_3O_4 и CuO, находящихся в герметизированной металлической оболочке. Этот тип *ТР* предназначен для работы в интервале температур от –100 до +120^{0}С.

1. *ТР* поместить для нагрева в термостат, температура которого измеряется при помощи термометра.

2. Термостат включить в сеть ~220 В.

3. Измерить сопротивление ТР при различных температурах цифровым мультиметром Mastech MS8229, включенным на измерение сопротивления. Измерение сопротивления *ТР* произвести в процессе непрерывного нагрева термостата в интервале температур от комнатной до 100^{0}С через каждые 5 градусов.

4. Полученные результаты занести в таблицу 8.

Таблица 8 – Таблица результатов.

№ п/п	*R*, Ом	*lnR*	*t*, ^{0}С	*T*, К	*1/T*, К$^{-1}$
1 2 3 4 …					

5. Составить таблицу 9 для вычисления величины *B* по методу наименьших квадратов для функции $y=ax+b$.

6. Вычислить энергию активации примесей по формуле $\Delta E_{прим.}=2kB$.

7. По формуле (35) вычислить для всех измеренных температур температурный коэффициент сопротивления (*ТКС*) терморезистора.

Таблица 9 – Таблица расчетов.

№ n/n	$x=1/T$, К$^{-1}$	$y=lnR$	$x^2=(1/T)^2$, К$^{-2}$	$y^2=(lnR)^2$	$xy=(lnR)(1/T)$, К$^{-1}$
1 2 3 4 …					
$\sum$	$\sum x_i$	$\sum y_i$	$\sum x_i^2$	$\sum y_i^2$	$\sum x_i y_i$

Расчёт погрешностей результата измерений

Расчёт погрешностей величины *B* произвести по методу наименьших квадратов для функции $y=ax+b$. Исходя из доверительных границ значения *B*, определить доверительные границы определения энергии активации примесей терморезистора.

Содержание отчёта

1. Таблица полученных данных (таблица 8).
2. Таблица для расчёта величины B по методу наименьших квадратов (таблица 9).
3. Расчёт величины B и её доверительной границы.
4. Расчёт величины $\Delta E_{прим.}$ и её доверительной границы.
5. Расчёт коэффициента α для всех измеренных температур.
6. Графики зависимостей $R=f(t)$, $lnR=f(1/T)$ и $\alpha=f(T)$.

Контрольные вопросы

1. *Какая разница между собственным и примесным полупроводником?*
2. *Что такое критическая температура?*
3. *Объясните, почему у полупроводника уменьшается сопротивление с ростом температуры, а у металла растёт?*

Лабораторная работа №7.
ИЗУЧЕНИЕ ФОТОПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ.

Физическое обоснование эксперимента

Возникновение свободных носителей заряда в полупроводнике и увеличение его электропроводности может происходить не только при нагревании полупроводника, но и при облучении его светом (внутренний фотоэффект). Энергия падающего на полупроводник света передаётся электронам. При этом энергия, передаваемая каждому отдельному электрону, зависит от частоты световых колебаний и не зависит от интенсивности света (числа фотонов). Каждый электрон воспринимает энергию одного фотона $E_ф=h\nu$, где h – постоянная Планка, ν – частота светового излучения. С увеличением интенсивности света возрастает число поглощающих свет электронов, но не энергия, получаемая каждым из них.

Минимальной или пороговой частотой света ν_{min} называется та частота, выше которой наблюдается фотоэффект в кристалле полупроводника. Так как у большинства собственных полупроводников ширина запрещённой зоны не превышает двух электрон-вольт, то уже при освещении полупроводника желтым светом ($h\nu_{yellow}\approx 2$ эВ) часть электронов из заполненной зоны будет переходить в зону проводимости, тем самым, повышая его электропроводность.

Для примесных полупроводников, у которых расстояние примесных уровней от дна зоны проводимости (электронный полупроводник) или от верхнего края заполненной зоны (дырочный полупроводник) составляет не более нескольких десятых долей электрон-вольта, полная ионизация всех атомов примеси может быть достигнута при облучении светом красной или инфракрасной области спектра.

Для каждого определённого полупроводника должна существовать наименьшая частота ν_{min} света, которая может вызвать фотоэффект в нём. В

этом случае световое излучение с частотой менее ν_{min}, не возбуждающее свободных носителей, не должно поглощаться полупроводниковым кристаллом. Практика, однако, показывает, что свет с частотой ниже ν_{min} также может поглощаться. Это явление объясняется тем, что электрон из заполненной зоны может быть переведён в состояние с повышенной энергией. При этом он не доходит до зоны проводимости и не участвует в электропроводности, а остаётся связанным с образованной после его ухода из заполненной зоны вакансией. Это состояние зарядов называется *экситоном*. Экситонные уровни энергий расположены в запрещённой зоне полупроводника и имеют водородоподобный спектр расположения экситонных линий. Эксперименты подтверждают существование экситонов в полупроводниках, которые образуются под действием света и не вызывают фотопроводимости. На образование экситона требуется меньше энергии, чем для перевода электрона в свободное состояние в зону проводимости. Экситон может свободно дрейфовать по кристаллу, перенося с собой энергию.

Дезактивация экситонов сопровождается либо излучением электромагнитного кванта, либо отдачей экситонной энергии решётке в виде тепла. Последнее явление наблюдается чаще. Но иногда может происходить и фотоактивная дезактивация экситонов. Так, например, при столкновении с каким-нибудь примесным центром экситон может разорваться. Вместо него появятся свободные носители – электрон и вакансия. Но чтобы электрон смог перейти с экситонного уровня в свободную зону, ему необходимо сообщить дополнительную энергию. При столкновении экситона с примесным центром эта энергия поставляется тепловыми колебаниями решётки.

Фотопроводимость полупроводника определяется как разность удельной электропроводности при освещении и в темноте:

$$\sigma_{ф}=\sigma_{св}-\sigma_{темн}. \qquad (36)$$

Темновая электропроводность выражается известной формулой

$$\sigma_{темн}=enu, \qquad (37)$$

где n – концентрация свободных темновых электронов, e – заряд электрона, u – подвижность носителей тока.

Электропроводность полупроводника при действии на него света

$$\sigma_{св}=e(n+\Delta n)u, \qquad (38)$$

где Δn – дополнительное число электронов, возникших вследствие облучения полупроводника светом.

Таким образом, электропроводность, обусловленная действием света, равна

$$\sigma_{ф}=e\Delta nu. \qquad (39)$$

Освобождённые светом электроны в течение очень короткого промежутка времени находятся в зоне проводимости (10^{-3}–10^{-7} с). При отсутствии электрического поля они хаотически перемещаются в межионных промежутках. Когда к кристаллу прикладывается разность потенциалов, они участвуют в электропроводности.

После окончания освещения образца электроны переходят на более низкие уровниэнергии – уровни примесей или в заполненную зону. При

непрерывном освещении полупроводника устанавливается динамическое равновесие между генерируемыми светом носителями и рекомбинирующими (уходящими на нижние уровни) носителями заряда.

Полупроводниковые фотоэлементы, принцип действия которых основан на явлении внутреннего фотоэффекта (фотопроводимости), называются *фотосопротивлениями* (ФС). Чувствительность ФС много больше, чем у фотоэлементов, в которых используется внешний фотоэффект. ФС широко используются для сигнализации и автоматизации, а также для обнаружения и измерения светового излучения. К числу основных характеристик ФС относятся вольтамперные, световые, спектральные и частотные характеристики.

Вольтамперная характеристика выражает зависимость фототока (при постоянном световом потоке) или темнового тока $I_{темн}$ от приложенного напряжения U. Для большинства ФС в рабочем режиме эта зависимость практически нелинейна. Под фототоком понимают разность между световым $I_{свет}$ током и темновым $I_{темн}$ током

$$I_ф=I_{свет}-I_{темн}. \qquad (40)$$

Световая характеристика выражает зависимость фототока от величины падающего на ФС светового потока постоянного спектрального состава при постоянном приложенном напряжении. Световые характеристики нелинейны.

Частотная характеристика выражает зависимость чувствительности ФС от частоты прерывания светового потока. Наиболее важными параметрами ФС являются чувствительность удельная, интегральная, спектральная, темновое сопротивление, кратность изменения сопротивления.

При определении чувствительности ФС необходимо учитывать зависимость фототока от спектрального состава и величины падающего светового потока, а также от величины приложенного напряжения.

Удельная чувствительность – отношение фототока $I_ф$ к произведению падающего светового потока Ф, излучаемого источником света с цветовой температурой 2850К (ГОСТ 10675-83) и создающего освещённость 200 лк, на приложенное к ФС напряжение U:

$$k=I_ф/(ФU)=I_ф/(ESU), \qquad (41)$$

где E – освещённость, S – площадь приёмной части ФС.

Интегральная чувствительность – произведение удельной чувствительности на предельное рабочее напряжение

$$\gamma=kU. \qquad (42)$$

Спектральная чувствительность – характеризует силу тока, возникающую в фоторезисторе под действием монохроматического света с различной длиной волны. Спектральную чувствительность обуславливают спектральные характеристики ФС. Например, ФС из CdS и CdSe имеют максимум спектральной чувствительности в видимой части спектра, а ФС из PbS имеет максимум спектральной чувствительности в ближней инфракрасной области спектра.

Кратность изменения сопротивления (r_m/r_c) – отношение темнового сопротивления ФС к сопротивлению при освещенности 200 лк от источника со цветовой температурой 2850К.

Рабочее напряжение – напряжение, при котором ФС может быть использовано в течение указанного срока службы без изменения его параметров свыше определённых допустимых значений.

Постановка экспериментальной задачи

В настоящей работе изучается фотосопротивление типа ФС–АI из сернистого свинца (рисунок 9), представляющее собой нанесённый на стеклянную пластинку 1 тонкий слой полупроводника 2, на поверхность которого помещены токопроводящие электроды 3.

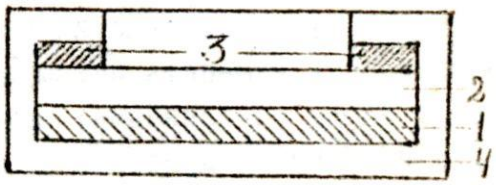

Рисунок 9 - Фотосопротивление типа ФС–АI

Все детали монтируются в пластмассовом корпусе 4. Приёмная площадь ФС–АI от 3 до 400 мм^2, выполняется в виде квадрата, прямоугольника или круга.

Целью работы является определение вольтамперных и световых характеристик ФС–АI и нахождение его удельной и интегральной чувствительности.

Описание экспериментальной установки

Электрическая схема для исследования характеристик и параметров ФС–АI представлена на рисунке 10.

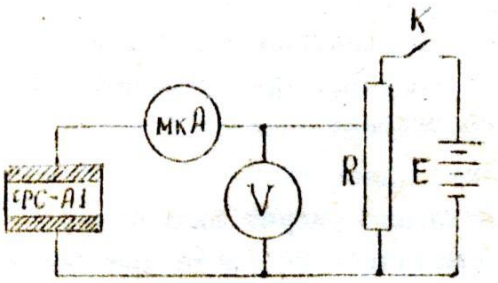

Рисунок 10 - Электрическая схема для исследования характеристик и параметров ФС–АI

Она состоит из ФС–АI, источника постоянного напряжения E, потенциометра R, вольтметра V, микроамперметра мкА на 500 мкА. ФС–АI помещено в закрытую прямоугольную трубу, в которой оно может перемещаться вдоль оси. На одном конце трубы помещена лампа накаливания. Это эталонная лампа, её сила света равна 10 кд. Питается эталонная лампа от

стабилизированного источника питания. Освещённость ФС–AI изменяется путём изменения расстояния между ФС–AI и эталонной лампой накаливания. Освещаемая площадь ФС–AI равна 0.24 см^2.

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую схему (см. рисунок 10).
2. Снять вольтамперную характеристику фотосопротивления в темноте, изменяя напряжение, подаваемое на него, от 0 до 15В (через 3 вольта).
3. Включить лампу накаливания и снять вольтамперные характеристики фотосопротивления на свету при различных освещённостях. Освещённость изменять путём помещения ФС–AI на различных расстояниях от лампы накаливания; расстояния брать равными 10, 12, 15, 20, 22.5 и 30 см. Напряжения на ФС установить те же самые, что и при снятии вольтамперных характеристик в темноте.
4. Вычислить из полученных данных световой поток Ф для различных расстояний r от лампы до фотосопротивления по формуле $Ф=(I/r^2)S$ лм, где I – сила света в кд; S – площадь приёмной поверхности фотосопротивления в м^2, r – расстояние между источником света и фотосопротивлением в метрах.
5. Определить освещённость для тех же значений r по формуле $E=Ф/S=I/r^2$ лк.
6. Вычислить световые характеристики $I_ф=f(E)_{U=Const}$, т.е. разность ($I_с–I_т$) в зависимости от освещённости при постоянном напряжении на фотосопротивлении.
7. Вычислить удельную чувствительность k для различных световых потоков Ф при максимальном напряжении, подаваемом на ФС–AI (15В).
8. Вычислить интегральную чувствительность $\gamma=kU$ фотосопротивления для 15В.
9. Рассчитать кратность изменения сопротивления r_m/r_c – отношение темнового сопротивления фотосопротивления к сопротивлению при при всех измеренных значениях освещённости. Сопротивления вычислить из вольтамперных характеристик как $ctg\alpha$, где α – угол наклона вольтамперной характеристики к оси напряжений.

Содержание отчёта

1. Таблица всех наблюдений.
2. Расчёты освещённостей E и потоков $Ф$ для всех расстояний.
3. Графики $I_m=f(U)$, $I_c=f(U)_{E=Const}$ (на одном графике) и $I_ф=f(E)_{U=Const}$.
4. Расчёт удельной и интегральной чувствительностей фотосопротивления для напряжения 15 вольт.
5. Расчёт кратности сопротивления r_m/r_c при всех измеренных освещённостях.

Контрольные вопросы

1. *В чём заключается явление фотопроводимости?*
2. *Что такое экситон?*
3. *Что такое внешний и внутренний фотоэффект?*
4. *Чему равно темновое сопротивление фотосопротивления при 0К?*

Лабораторная работа №8.
ИЗУЧЕНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖЕЛЕЗОСЕЛЕНОВОГО ЭЛЕМЕНТА

Физическое обоснование эксперимента

Фотоэлементы находят разнообразное применение как в качестве индикаторов, так и фотоэлектрических преобразователей лучистой энергии. В зависимости от типа фотоэффекта фотоэлементы подразделяются на следующие типы.

1. Фотоэлементы, основанные на вентильном фотоэффекте или фотоэффекте в запирающем слое, называются вентильными фотоэлементами или фотоэлементами с запирающим слоем.

2. Фотоэлементы, основанные на внутреннем фотоэффекте, называются фотосопротивлениями.

3. Фотоэлементы, основанные на внешнем фотоэффекте, вакуумные (в том числе фотоэлементы со вторичной эмиссией или фотоэлектронные умножители) и газонаполненные фотоэлементы.

Вентильные фотоэлементы имеют ряд преимуществ перед фотоэлементами с внешним фотоэффектом. Они более просты по своему устройству, более удобны в обращении, и, главное, не требуют включения в цепь внешних источников ЭДС, как фотоэлементы с внешним и внутренним фотоэффектом, и имеют довольно высокую чувствительность к свету.

Вентильный фотоэффект представляет собой возникновение ЭДС в системе, содержащей контакт двух разных полупроводников или проводника и металла, при поглощении квантов света. Наибольшее практическое применение имеет вентильный фотоэффект, возникающий в системах, состоящих из контактирующих друг с другом электронного (n – типа) и дырочного (p – типа) полупроводников.

При контакте двух полупроводников с различными механизмами проводимости образуется так называемый p-n – переход, представляющий собой тонкий слой на границе между электронным и дырочным полупроводниками. В области p-n – перехода возникает двойной электрический слой (запирающий слой). Электрическое поле этого слоя создаёт на границе между полупроводниками потенциальный барьер, препятствующий переходу основных носителей тока через запирающий слой. В отсутствие внешнего напряжения устанавливается равновесие электронного и дырочного тока через p-n – переход в обоих направлениях. Когда к p-n – переходу прикладывается внешнее напряжение, высота барьера меняется и равновесие в переходе нарушается, что приводит к появлению в цепи результирующего электрического тока. Известно, что запирающий слой обладает выпрямляющими свойствами.

Механизм возникновения в p-n – переходе вентильного фотоэффекта заключается в следующем. Рассмотрим для определённости фотоэлемент, у которого освещается полупроводник n-типа (n-область). При освещении полупроводника электроны из валентной зоны переходят в зону проводимости,

а в валентной зоне образуются так называемые дырки – положительно заряженные электронные вакансии. В результате появляются электронно – дырочные пары. Освобождённые светом носители тока, стремясь распределиться равномерно по объёму полупроводника, перемещаются в этом объёме. При подходе к p-n – переходу пары «электрон – дырка» под действием контактного электрического поля запирающего слоя будут разделяться: электроны будут отбрасываться p-n – переходом обратно в электронный полупроводник, а дырки свободно пройдут в дырочный полупроводник. Таким образом, электроны будут концентрироваться в электронном полупроводнике, а дырки – дырочном, изменяя распределение электронов и дырок вблизи контакта, имевшее место до освещения. Параллельно с ростом концентрации носителей тока возрастает создаваемое ими электрическое поле, которое препятствует их дальнейшему переходу через запирающий слой. В некоторый момент наступает динамическое равновесие, т.е. число перемещающихся неосновных носителей тока через запирающий слой будет одинаковым, а между электродами, подсоединёнными к p-n – переходу, устанавливается некоторая разность потенциалов.

Если систему контактирующих полупроводников подключить к внешнему сопротивлению $R_н$, то при данном уровне освещённости в цепи устанавливается некоторый ток i, при этом суммарный фототок i_f, созданный возбуждёнными светом носителями, распределяется в цепи следующим образом: часть тока I проходит через внешнюю цепь и регистрируется измерительным прибором, а другая часть i_y возвращается через сопротивление запирающего слоя R_f обратно в полупроводник, образуя так называемый ток утечки через запирающий слой. Таким образом, суммарный фототок

$$i_f=i+i_y, \tag{43}$$

а величина регистрируемого во внешней цепи тока равна

$$i=i_f-i_y. \tag{44}$$

В результате прохождения в цепи тока i нагрузку $R_н$ и тока утечки i_y, между электродами фотоэлемента, подключёнными к нагрузке, устанавливается разность потенциалов U, зависящая от сопротивления нагрузки $R_н$.

Ток утечки через *p-n* – переход зависит от величины напряжения U, приложенного к *p-n* – переходу, т. е. $i_y=i_y(U)$ и, следовательно, фототок во внешней цепи

$$i(U)=i_f-i_y(U). \tag{45}$$

Зависимость $i_y(U)$ тока утечки через *p-n* – переход от приложенного напряжения принципиально не отличается от обычной *темновой* вольтамперной характеристики *p-n* – перехода. Отличие зависимости $i_y(U)$ в формуле (45) от обычных вольтамперных характеристик полупроводниковых диодов заключается лишь в том, что в данном случае напряжение U создаётся

не внешним источником ЭДС, а протекающим в цепи фототоком, и приложено к *p-n* – переходу со стороны сопротивления нагрузки.

Зависимость фототока *i* от напряжения во внешней цепи *U* (формула 45) называется вольтамперной характеристикой фотоэлемента. Поскольку, вольтамперные характеристики *p-n* – переходов, как правило, *нелинейны*, то согласно формуле (45) и вольтамперные характеристики большинства фотоэлементов также являются криволинейными.

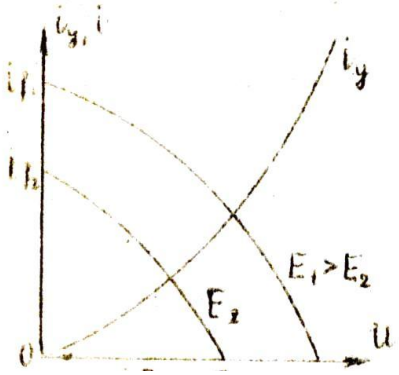

Рисунок 11 - типичный вид кривой $i_y=f(U)$ и вольтамперная характеристика фотоэлемента $i=f(U)$ при некотором уровне освещения.

При малых сопротивлениях нагрузки ($R_н \approx 0$ и, следовательно, $U \approx 0$), практически весь генерируемый фотоэлементом фототок i_f проходит через нагрузку, т.е. при $R_н=0$ $i=i_f$ (режим тока короткого замыкания). Фототок короткого замыкания представляет собой весьма важную характеристику вентильного фотоэлемента, и его величина может быть определена по точке пересечения вольтамперной характеристики с осью ординат.

С ростом сопротивления нагрузки $R_н$ ток во внешней цепи *i* уменьшается, а напряжение на *p-n* – переходе увеличивается, и при разомкнутой внешней цепи, т.е. при $i=0$, напряжение на электродах фотоэлемента достигает максимального значения, называемого электродвижущей силой или напряжением холостого хода фотоэлемента. Величина фото ЭДС может быть определена из вольтамперной характеристики по точке её пересечения с осью абсцисс. Напряжение *U* при увеличении $R_н$ стремится к величине ЭДС ε асимптотически, т.е. при больших значениях $R_н$ напряжение *U* слабо зависит от $R_н$. Отсюда следует, что зависимость обратной величины тока от сопротивления нагрузки $1/i=(1/U)*R_н$ при больших значениях $R_н$ будет приближаться к линейной.

Вольтамперные характеристики для различных освещённостей представляют собой ряд подобных кривых, смещённых относительно друг друга, причём ток короткого замыкания в широких пределах будет пропорционален силе падающего света, а ЭДС будет стремиться к насыщению, так как согласно зонной теории полупроводников, максимальная величина фотоЭДС, выраженная в вольтах, при больших освещённостях не может превышать ширины запрещённой зоны полупроводника, выраженной в электрон-вольтах.

Для практической характеристики фотоэлементов нередко употребляют такую величину, как внутреннее сопротивление фотоэлемента. Сопротивления типа *p-n* – перехода с нелинейными вольтамперными характеристиками не подчиняются закону Ома в обычной форме $R=U/i$, и к ним следует применять закон Ома в дифференциальной форме, т.е.

$$R_f=dU/di. \qquad (46)$$

Из формул (45) и (46) следует, что внутреннее сопротивление фотоэлемента можно определить из его вольтамперной характеристики по формуле

$$R_f=-1/(di/dU). \qquad (47)$$

Криволинейность вольтамперной характеристики обуславливает зависимость производной di/dU, а следовательно, и величины R_f, от напряжения на *p-n* – переходе.

Производная di/dU может быть определена численным дифференцированием таблично заданной функции $i=f(U)$. Приближённое значение производной, или отношение малых приращений $\Delta i/\Delta U$, может быть оценено из наклона секущей, проведённой через две близко расположенные точки вольтамперной характеристики. При малых освещённостях сопротивление фотоэлемента лежит в пределах $1*10^3$ – $5*10^4$ Ом.

Мощность $P=iU$, выделяемая фотоэлементом во внешней цепи, численно равна площади прямоугольника на графике $i=f(U)$ и легко может быть определена из вольтамперной характеристики фотоэлемента. Максимум отдачи мощности фотоэлементом во внешнюю цепь наступает, как известно, при сопротивлении нагрузки, равном внутреннему сопротивлению фотоэлемента. Однако при изменении сопротивления нагрузки $R_н$ внутреннее сопротивление фотоэлемента R_f не остаётся неизменным, так как оно зависит от от напряжения во внешней цепи U и, следовательно от $R_н$. Сопротивление нагрузки $R_н$, соответствующее любой точке вольтамперной характеристики определяется из закона Ома $R_н=U/i$. Для нахождение режима работы фотоэлемента, соответствующего максимальной отдаче мощности во внешнюю цепь, необходимо определить как R_f, так и $R_н$ для различных точек вольтамперной характеристики. Точка вольтамперной характеристики, соответствующая совпадению этих величин, используется для вычисления максимальной мощности $P_{max}=(i*U)_{Rн=Rf}$.

Для наиболее рационального использования фотоэлемента необходимо знание ряда его параметров и характеристик как электрических, так и оптических. К важнейшим характеристикам фотоэлементов следует отнести их интегральные световые характеристики, выражающие зависимость электродвижущей силы и фототока короткого замыкания от величины освещённости: $i_f=f(E)$ и $\varepsilon=f(E)$.

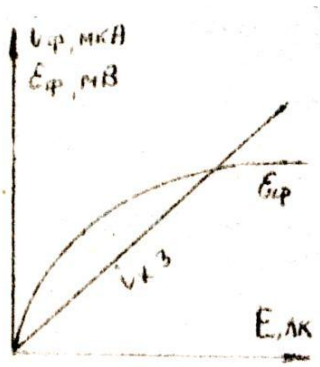

Рисунок 12 – Зависимость тока короткого замыкания и электродвижущей силы от освещённости

Как видно из рисунка 12, ток короткого замыкания практически линейно зависит от освещённости (для не очень больших значений Е), а электродвижущая сила при возрастании освещённости стремится к некоторому предельному значению. Зависимость тока короткого замыкания от величины освещённости называют люкс-амперной характеристикой фотоэлемента. Линейная зависимость фототока короткого замыкания от освещённости, а следовательно, и от падающего на фотоэлемент светового потока, позволяет характеризовать каждый фотоэлемент величиной его так называемой интегральной чувствительности, определяемой по формуле

$$\gamma = i_f/\Phi = (i_f * r^2)/(I_э * S), \qquad (48)$$

где i_f –фототок фотоэлемента, Ф – световой поток, $I_э$ – сила света эталонной лампы, S – площадь фотоэлемента, r – расстояние от фотоэлемента до лампы.

К важнейшим характеристикам фотоэлементов относится спектральная характеристика, выражающая зависимость фототока на единицу энергии от длины волны падающего света. Спектральные характеристики разных фотоэлементов охватывают широкую область света и в большинстве случаев имеют один ярко выраженный максимум.

Рисунок 13 - Вентильный фотоэлемент

Конструктивно вентильный фотоэлемент изготавливается следующим образом. На металлическую пластинку (рисунок 13), одновременно

являющуюся электродом, наносится тонкий слой того или иного полупроводника. Затем пластинка с полупроводниковым слоем подвергается специальной обработке. Цель этой обработки заключается в том, чтобы создать в объёме полупроводника p-n – переход. В результате этой обработки прилегающий к нижнему металлическому электроду слой полупроводника обогащается атомами металла или вступает в химическую реакцию с материалом электрода. Это приводит к тому, что нижняя область полупроводникового слоя приобретает механизм проводимости, противоположный верхней области. Когда эта цель достигнута, на наружную поверхность полупроводникового слоя наносится верхний сплошной металлический электрод, представляющий собой полупрозрачный слой металла.

Описание экспериментальной установки

Электрическая схема для изучения фотоэлектрических свойств железоселенового фотоэлемента представлена на рисунке 14.

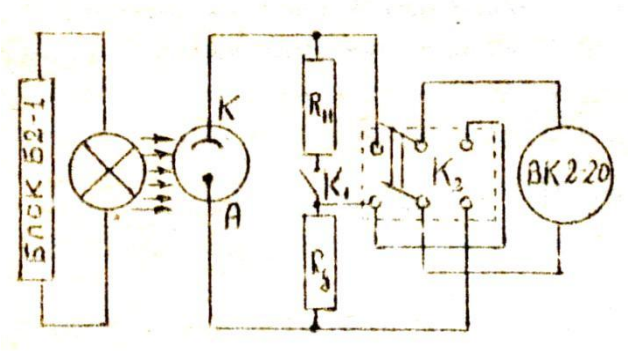

Рисунок 14 – Электрическая схема

Фотоэлемент включается в цепь, состоящую из двух сопротивлений $R_н$ и R_g, разделённых ключом K_1; $R_н$ – сопротивление нагрузки, состоящее из магазина сопротивлений, может изменяться от 0 до 10^5 Ом. При разомкнутом ключе K_1 сопротивление нагрузки равно бесконечности. Добавочное сопротивление R_g, равное 10 Ом, служит для определения тока в цепи фотоэлемента. Перекидной ключ K_2, на средние клеммы которого подключается микровольтметр с большим выходным сопротивлением марки ВК2–20 (В7-78/1 или Mastech MS8229), может включать микровольтметр параллельно либо сопротивлению нагрузки $R_н$, либо добавочному сопротивлению R_g. В первом случае микровольтметр измеряет падение напряжения на нагрузочном сопротивлении $R_н$, а во втором случае – на добавочном сопротивлении R_g. Ток в цепи фотоэлемента определяется по формуле

$$i=U_{Rg}/R_g.$$

Вольтамперметр ВК2–20 (В7-78/1 или Mastech MS8229) является электронно – цифровым многопредельным прибором и может измерять напряжение постоянного тока в диапазоне 10^{-6} – 200 В.

В данной работе измерения напряжения проводятся на двух пределах: 2 мВ при измерении напряжения на добавочном сопротивлении R_g и 200 мВ при измерении напряжения на нагрузочном сопротивлении $R_н$.

Сам фотоэлемент помещён в закрытую прямоугольную трубу, в которой он может перемещаться вдоль оси. На одном конце трубы помещена эталонная лампа накаливания, сила света которой равна 10 кд, питаемая стабилизированным источником напряжения. Освещенность фотоэлемента изменяется путём изменения расстояния между фотоэлементом и эталонной лампой накаливания. Освещаемая площадь фотоэлемента равна 10 см^2.

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую схему.

2. Снять вольтамперную характеристику фотоэлемента при постоянной его освещённости $i=f(U)_E$. Зависимость $i=f(U)_E$ снимают при расстояниях между фотоэлементом и источником света r=10, 15, 20, 30 см. Сопротивление нагрузки $R_н$ изменяют от 0 до ∞ (последнее измерение производится при разомкнутом ключе K_1). При измерении заполнить таблицу 10:

Таблица 10 – Таблица измерений

.

$R_н$, Ом	r_1=10см		r_2=15см		r_3=20см		r_4=30см	
	$U_н$	U_g	$U_н$	U_g	$U_н$	U_g	$U_н$	U_g
0								
100								
200								
400								
600								
800								
1000								
1500								
2000								
3000								
5000								
8000								
10000								
∞								

3. Вычислить при различных расстояниях r освещённость E (в люксах) и световой поток $Ф$ (в люменах) и построить графики $i=i(U)_{E=Const}$ и $1/i=f(R_н)$ ($E=I_э/r$; $Ф=ES$).

4. Определить из графика $i=i(U)_{E=Const}$ токи короткого замыкания и ЭДС для различных освещённостей E. На основании полученных значений построить в одной системе координат графики световых характеристик $i_f=f(E)_{Rн=Const}$, $\varepsilon=f(E)_{Rн=Const}$ ($E=I_э/r^2$).

5. Определить интегральную чувствительность фотоэлемента по формуле (48) для тока короткого замыкания.

6. Определить сопротивление запирающего слоя фотоэлемента по формуле (47) для различных точек вольтамперной характеристики и построить график зависимости $R_f=f(U_н)_{E=Const}$ при максимальной освещённости. На этом же графике построить зависимость $R_н=f(U_н)$ для различных точек вольтамперной характеристики. По пересечению указанных двух зависимостей определить оптимальные значения $R_н$, при котором достигается максимальная отдача мощности во внешнюю цепь.

7. Вычислить максимальную мощность, выделяемую фотоэлементом во внешнюю цепь по формуле: $P_{max}=(i*U)_{Rн=Rf}$.

8. Вычислить мощность, выделяемую в нагрузке при различных значениях сопротивления $R_н$, соответствующую максимуму кривой $P=f(R_н)$ с оптимальным значением $R_н$, определённым из вольтамперной характеристики.

Примечание. В ходе выполнения работы сначала включить ключ K_2 в положение $R_н$ и снять зависимость $U_н=f(R_н)$ в пределах от 0 до ∞, а затем то же самое повторить для положения ключа K_2 в положении R_g.

Содержание отчёта

1. Таблица наблюдений.
2. Вольтамперная характеристика $i=f(U)_{E=Const}$ для расстояний между фотоэлементом и источником света r=10, 15, 20 и 30 см.
3. Значения тока короткого замыкания и ЭДС, определённые из зависимости $i=f(U)_{E=Const}$ для различных освещённостей. Графики световых характеристик: $i_f=f(E)_{Rн=0}$, $\varepsilon=\varepsilon(E)_{Rн=\infty}$.
4. Значение интегральной чувствительности фотоэлемента для тока короткого замыкания, определённое по формуле (48).
5. Величина сопротивления запирающего слоя фотоэлемента, определённая по формуле (47) и зависимость $R_f=f(U_н)$ при максимальной освещённости.
6. Значение оптимальной величины $R_н$, при котором достигается максимальная отдача мощности во внешнюю цепь.
7 Значение максимальной мощности, выделяемой фотоэлементом во внешнюю цепь.
8. График зависимости $P=f(R_н)$.

Контрольные вопросы

1. *В чём заключается принцип вентильного фотоэффекта?*
2. *Как найти мощность, выделяемую фотоэлементом во внешнюю цепь?*
3. *Что такое спектральная характеристика фотоэлемента?*

Приложение. В данной работе сила света эталонной лампы накаливания $I_э$=10 кд, площадь фотоэлемента S=10 см^2.

Лабораторная работа №9.
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКЕ.

Физическое обоснование эксперимента

Если пластинку из металла, по которой в направлении оси *X* (рисунок 15) проходит постоянный ток, поместить в магнитное поле, направленное по оси *Z*, то между боковыми гранями пластинки (например, между точками A_1 и A_2) возникает разность потенциалов, так называемая электродвижущая сила Холла – ЭДС Холла ($E_{Холла}$). В этом заключается эффект, который впервые наблюдал Холл в 1879 году. Приближенно этот эффект можно объяснить по классической теории электронной проводимости.

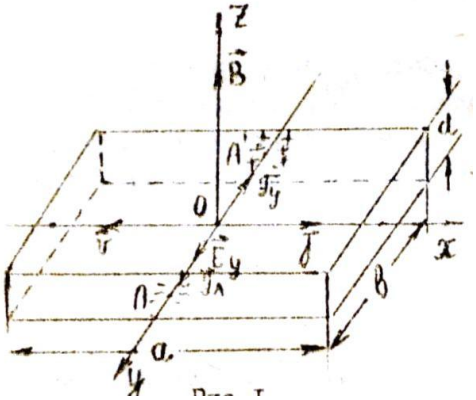

Рисунок 15 – Принцип теории электропроводимости.

Известно, что носителями заряда, обеспечивающими ток в металлах, являются электроны. Плотность тока в металле равна

$$j=-en\upsilon, \tag{49}$$

где вектор υ – средняя скорость направленного движения электронов, e – заряд электрона, n – концентрация электронов в металле.

На электроны, движущиеся в пластинке, в присутствии магнитного поля B будет действовать сила Лоренца:

$$F_{Лоренца}=-e[\upsilon B]. \tag{50}$$

Так как вектор υ направлен против вектора j, а υ перпендикулярен B, то сила Лоренца, действующая на электроны, будет направлена вдоль оси *Y* и равна по модулю $\left|F_{Лоренца}\right|=e\upsilon B$. Под действием силы Лоренца электроны при своём движении сместятся к передней грани пластинки (грань A_1), и на противоположной грани пластинки (грань A_2) возникает избыточный положительный заряд. Это приведёт к тому, что появится дополнительное электрическое поле с напряжённостью E_y, направленное параллельно ребру b

(вектор E_y перпендикулярен векторам j и B). Это поперечное электрическое поле будет действовать на электрон с силой

$$F_y=-eE_y, \tag{51}$$

которая направлена в сторону противоположную вектору E_y. Перемещение электронов к передней грани будет продолжаться до тех пор, пока сила F_y не станет равной по величине силе Лоренца $F_{Лоренца}$

$$eE_y=e\upsilon B. \tag{52}$$

Отсюда следует, что $E_y=\upsilon B$. Так как E_y связана с величиной градиента ЭДС Холла соотношением

$$\varepsilon_{Холла}=E_y b \text{ или } \varepsilon_{Холла}=\upsilon Bb, \tag{53}$$

где b – ширина металлической пластинки.

Из формулы (49) получаем скорость электрона

$$\upsilon=j/(en)=I/(enS), \tag{54}$$

где S – площадь торцевой грани ($S=bd$), d – толщина металлической пластинки. Следовательно,

$$\upsilon=I/(enbd). \tag{55}$$

Подставим это равенство в (53):

$$\varepsilon_{Холла}=IBb/(enbd)=jBb/(en) \tag{56}$$

или

$$\varepsilon_{Холла}=(1/(en))*jBb. \tag{57}$$

Обозначая $1/(en)=R_x$ (R_x – постоянная Холла), получаем

$$\varepsilon_{Холла}=R_x jBb, \tag{58}$$

откуда

$$R_x=\varepsilon_{Холла}/(jBb)=\varepsilon_{Холла}d/(IB). \tag{59}$$

Из выражения (59) следует, что численно постоянная Холла равна ЭДС Холла, возникающей в образце единичной толщины, помещенном в магнитное поле с индукцией B, равной единице, при токе I, равном единице.

Зная R_x, можно вычислить концентрацию свободных электронов в металле:

$$n=1/(eR_x). \tag{60}$$

В чистых полупроводниках с «собственной проводимостью» носителями заряда являются электроны и дырки, движущиеся в электрическом поле в противоположных направлениях, но обуславливающие «электротехнический» ток одного направления. В магнитном поле под действием силы Лоренца те и другие заряды смещаются в одну и ту же сторону, и результирующая напряжённость «поперечного» электрического поля равна

$$E_y=E_{yp}-E_{yn}, \qquad (61)$$

где E_{yp} и E_{yn} – напряжённости электрического поля, обусловленные смещением в магнитном поле дырок и электронов соответственно.

Для примесных полупроводников, в которых проводимость осуществляется преимущественно носителями одного знака (электронами или дырками) для постоянной Холла теоретически обоснована зависимость

$$R_x=(3\pi/8)(1/(en)). \qquad (62)$$

Знак постоянной Холла совпадает со знаком заряда e носителей тока.

Если известно удельное сопротивление полупроводникового образца $\rho=1/\sigma$, где σ – удельная электропроводность образца, то можно определить подвижность основных носителей тока из выражения

$$U=\sigma/(en)=\sigma R_x. \qquad (63)$$

Описание электрической установки

В работе следует, измерив ЭДС Холла, рассчитать постоянную Холла, концентрацию и подвижность основных носителей заряда для полупроводника из германия с проводимостью n-типа. Электрическая схема установки показана на рисунке 16.

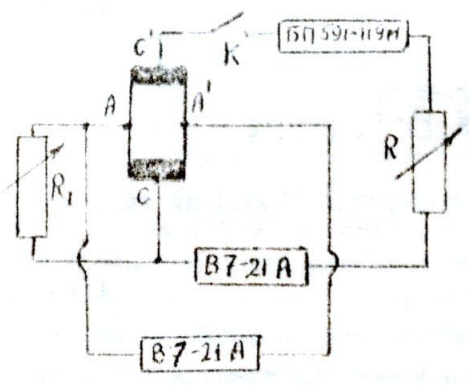

Рисунок 16 – Электрическая схема установки

Объектом исследования в работе служит пластинка из германия n-типа, к торцевым граням которой (на рисунке обведены жирной чертой) приварены токовые электроды из тонкой медной проволоки. «Холловские» электроды из

тонкой проволоки приварены к боковым граням кристалла германия. Германиевая пластинка с двумя парами проводников называется датчиком Холла. Для обеспечения механической прочности датчик Холла вместе с проводниками вмонтирован в оправу из оргстекла. Четыре электрода выведены на ламповую панельку, при помощи которой германиевую пластинку можно подключать к электрической схеме, показанной на рисунке 16.

Источником тока I через германиевую пластинку служит стабилизированный источник постоянного тока марки БП 591-110М. Ток через пластинку регулируется магазином сопротивлений R и измеряется цифровым вольтметром В7-21А (В7-78/1 или Mastech MS8229), работающим в токовом режиме. Между точками A_1 и C пластинки германия включается магазин сопротивлений R_1. Необходимость включения магазина сопротивлений R_1 вытекает из следующих обстоятельств. Практически, при изготовлении датчика Холла холловские электроды A_1 и A_2 чрезвычайно редко удаётся разместить на эквипотенциальной поверхности датчика, перпендикулярной к направлению первичного тока. Поэтому всегда при протекании по образцу первичного тока I между этими точками в отсутствие магнитного поля имеется некоторая разность потенциалов, не имеющая никакого отношения к эффекту Холла. Так как величина этой разности потенциалов имеет тот же порядок, что и величина ЭДС Холла, то необходимо принимать меры по её устранению. Меняя сопротивление магазина R_1 при отсутствии магнитного поля для данного тока через датчик, можно создать в точках A_1 и A_2 датчика одинаковые потенциалы. Измерение ЭДС Холла в работе производится вторым цифровым вольтметром В7-21А (В7-78/1 или Mastech MS8229).

В данной работе электрическая схема постоянно собрана на вертикально расположенном щите с указанием расположения всех приборов.

В задачу работы входит сначала градуировка данного датчика Холла в известном поле постоянного магнита и определение постоянной Холла. Затем по проградуированному датчику необходимо определить напряжённость магнитного поля на оси соленоида в его центре при различных токах через соленоид. Рассчитать напряжённость магнитного поля соленоида на его оси по формуле короткого соленоида по известному числу витков и току через него. Затем необходимо сопоставить напряжённости магнитного поля на оси соленоида, определённые этими двумя методами.

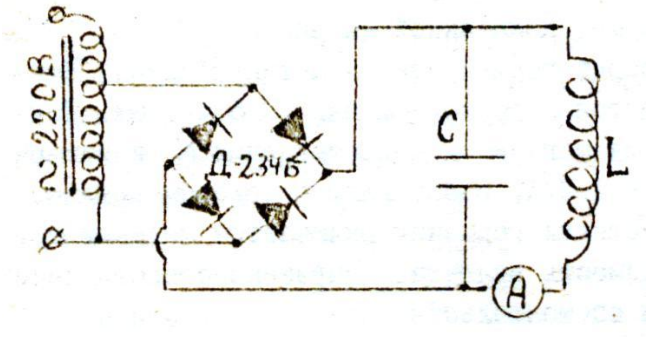

Рисунок 17 - Схема питания постоянным током катушки соленоида

Регулируемое переменное напряжение, снимаемое с лабораторного автотрансформатора ЛАТР-1, подаётся на мостовую схему двухполупериодного выпрямителя с фильтром из конденсатора C=1000 мкФ. Выпрямленный постоянный ток через амперметр (В7-78/1 или Mastech MS8229) подаётся на измеряемый соленоид.

Порядок выполнения работы

1. Проградуировать датчик Холла, используя для этого постоянный магнит ЭСМ-1, напряжённость магнитного поля которого равна 73609 А/м (965±10) эрстед. Для этого в схеме (рисунок 16) в отсутствие магнитного поля необходимо установить следующие токи через датчик: 2.5; 5.0; 7.5; 10.0; 12.5; 15.0; 17.5; 20 мА. При каждом токе необходимо добиться отсутствия разности потенциалов на холловских электродах при помощи магазина сопротивлений R_1. Записать показания магазина R_1, соответствующие каждому току через датчик. В дальнейшем, когда через датчик будет установлен данный ток, на магазине R_1, должно быть установлено соответствующее сопротивление.

Затем поместить датчик Холла между полюсами магнита ЭСМ-1, стараясь разместить его по центру полюсных наконечников таким образом, чтобы верх датчика был обращён к северному полюсу магнита. Затем, последовательно устанавливая указанные выше токи через датчик, при каждом токе измерить ЭДС Холла при помощи цифрового вольтметра В7-21А (В7-78/1 или Mastech MS8229).

2. Датчик Холла перенести из горизонтального держателя в вертикальный. Затем его следует поместить по оси исследуемой катушки соленоида таким образом, чтобы датчик Холла был расположен в центре катушки по высоте. ЛАТР-1 включить в розетку с напряжением U=220В (см. рисунок 17) и регулятором его установить ток по Mastech MS8229 через катушку соленоида I_C=0.5 А. Через датчик установить токи 5.0; 10; 15; 20 мА. Для каждого тока через датчик необходимо измерить ЭДС Холла $\varepsilon_{Холла}$. Затем повторить эти измерения для токов через соленоид 1.0; 1.5; 2.0; 2.5 А.

Порядок выполнения расчётов результатов измерений и их погрешностей

1. Вычисление постоянной Холла и её погрешности произвести следующим образом. Построить график зависимости ЭДС Холла $\varepsilon_{Холла}$ от токов I через датчик, снятых на постоянном магните ЭСМ-1. Обработать эти данные по методу наименьших квадратов. Из этих вычислений определить тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс $tg\alpha=\varepsilon_{Холла}/I$ и определить доверительные границы этого тангенса при доверительной вероятности P=0.95.

Вычисление постоянной Холла произвести по формуле (59). Так как в системе СИ величина $B=\mu_0\mu H$, где μ_0 – магнитная постоянная, то вычисление постоянной Холла в этой системе усложняется. Намного проще подставить в эту формулу величины $\varepsilon_{Холла}$, d, B в системе СГСМ, оставив ток датчика в амперах. Величина B в системе СГСМ будет $B=\mu H$, где μ для вакуума равно единице. Таким образом, значение B в гауссах численно будет совпадать со значением H в эрстедах. При этом формула (59) примет вид

$$R_x=(\varepsilon_{Холла}d/(IH))*10^8=(tg\alpha d/H)*10^8,\ tg\alpha=\varepsilon_{Холла}/I \qquad (64)$$

так как $1B=10^8$ единиц потенциала системы СГСМ. Численное значение толщины датчика в этой работе d=(0.035±0.001) см. Размерность постоянной Холла в формуле (64) будет см^3/Кл. Относительная погрешность постоянной Холла

$$\Delta R_x/R_x=((\Delta tg\alpha/tg\alpha)^2+(\Delta d/d)^2+(\Delta H/H)^2)^{1/2}.$$

2. Определение напряжённости магнитного поля на оси соленоида. При известной постоянной Холла R_x данного датчика определить величину неизвестного значения напряжённости магнитного поля из формулы (64)

$$H=(\varepsilon_{Холла}d/(IR_x))*10^8=(tg\beta d/R_x)*10^8, \qquad (65)$$

где $tg\beta=\varepsilon_{Холла}/I$. Построить зависимость ЭДС Холла от тока через датчик для всех измеренных токов соленоида от 0.5 до 2.5 А. Каждую из пяти снятых зависимостей обработать по методу наименьших квадратов и определить тангенс угла наклона прямых $tg\beta=\varepsilon_{Холла}/I$ и их доверительные границы. Множитель, стоящий при $tg\beta$ будет величиной постоянной: $K=(d/R_x)*10^8$. Тогда $H(I)=K*tg\beta$. Таким образом, для каждого тока, проходящего через соленоид, будет известна величина напряжённости магнитного поля H. Относительная погрешность определения напряжённости магнитного поля составит

$$(\Delta H/H)^2=(\Delta tg\beta/tg\beta)^2+(\Delta d/d)^2+(\Delta R_x/R_x)^2.$$

Построить график зависимости $H=f(I_c)$.

Сопоставить полученную напряжённость магнитного поля на оси катушки соленоида с теоретической напряжённостью магнитного поля на оси короткого соленоида по формуле

$$H=0.2\pi nI(cos\beta_1-cos\beta_2)=0.4\pi nIcos\beta_1, \qquad (66)$$

где углы β_1 и β_2 показаны на рисунке 18, а n – число витков на единицу длины соленоида, I – ток в амперах, текущий по катушке.

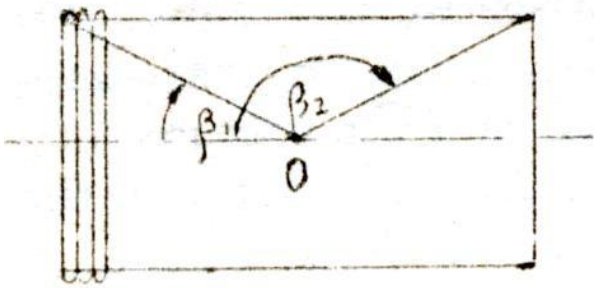

Рисунок 18 - Углы β_1 и β_2

Теоретическая зависимость $H=f(I_c)$ для катушки соленоида должна отличаться от снятой экспериментально такой же зависимости не более чем на величину погрешности определения напряжённости магнитного поля с помощью датчика Холла при данном токе соленоида.

Содержание отчёта

1. Таблица снятых значений ЭДС Холла при токах через датчик от 2.5 до 20 мА (через 2.5 мА).
2. График зависимости $\varepsilon_{Холла}=f(I_{дат.})$.
3. Расчёт методом наименьших квадратов для линейной зависимости $\varepsilon_{Холла}=f(I_{дат.})$. Определение значения для $tg\beta=\varepsilon_{Холла}/I$ и его доверительные погрешности.
4. Расчёт постоянной Холла по формуле (64) и её доверительных границ.
5. Таблица снятых значений ЭДС Холла при токах через датчик 5.0; 10; 15; 20 мА при нахождении датчика на оси соленоида, когда через соленоид идут токи от 0.5 до 2.5 А (через 0.5 А).
6. Расчёт для пяти линейных предыдущих зависимостей по методу наименьших квадратов и определение из них тангенсов $tg\beta=\varepsilon_{Холла}/I$ и их доверительных границ.
7. Графики всех снятых выше пяти линейных зависимостей при различных токах через соленоид.
8. Расчёты напряжённостей магнитного поля на оси соленоида по формуле (65) для пяти различных токов через соленоид и их доверительные границы.
9. График $H=f(I_c)$, исходя из расчётов предыдущего пунктов.
10. Расчёты напряжённости магнитного поля по теоретической формуле (66), если известно полное число витков катушки соленоида N=4300 витков. Геометрические размеры соленоида необходимо перед расчётом экспериментально измерить.
11. Выводы из сопоставления теоретической и экспериментальной зависимостей $H=f(I_c)$.
12. Расчёт концентрации электронов n по формуле (60) и их подвижности по формуле (63). Удельное сопротивление датчика ρ=4.60 Ом*см.

Контрольные вопросы

1. *Покажите, что при одном и том же направлении тока через датчик полярность ЭДС Холла будет зависеть от знака носителей тока.*
2. *Каков физический смысл постоянной Холла?*
3. *Где будет больше эффект Холла: для идеального чистого собственного полупроводника или полупроводника со значительным количеством примесей?*

Лабораторная работа №10.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЁННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКА ПО КРАЮ СОБСТВЕННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

Физическое обоснование эксперимента

Собственное поглощение света в полупроводнике обусловлено переходами электронов из валентной зоны в зону проводимости с поглощением фотона. Частота фотона, соответствующая краю поглощения, определяется условием $h\nu_{гр.}=E_0$. Край основной полосы поглощения может не иметь резко выраженной границы, ибо иногда на краю основного поглощения может находиться полоса поглощения примесей и дефектов, но, как правило, она значительно слабее основной полосы и зависит от концентрации атомов примеси. Поэтому, изучая основное (собственное) поглощение полупроводника, можно получить сведения об энергетической структуре его электронных состояний. Так, например, просто измерив частоту фотона, при которой образец толщиной около 0.3 мм становится оптически прозрачным, можно оценить ширину запрещённой зоны полупроводника с точностью до 20%. Исследуя спектральную зависимость коэффициента поглощения, можно найти ширину запрещённой зоны с точностью около 5% и определить характер электронного перехода.

Электрон в реальном полупроводнике участвует в сложных взаимодействиях: с дырками, примесями, дефектами, фотонами. Такие взаимодействия приводят к сдвигу края основного поглощения в сторону меньших энергий фотона. При низких температурах можно наблюдать структуру края основной полосы поглощения, связанную с упомянутыми выше эффектами. Если выявить и учесть такие взаимодействия, то можно с большей точностью определить ширину запрещенной зоны.

Самый простой способ определения края основного поглощения полупроводника заключается в измерении спектральной прозрачности образца. Этот способ и применяется в данной работе с целью определения ширины запрещённой зоны полупроводника.

Если монохроматический пучок света проходит через вещество, то вследствие отражения от поверхности и поглощения в его объёме интенсивность уменьшается. Пусть доля энергии, отражённой от поверхности составляет величину R, которая носит название коэффициента отражения. Если интенсивность падающего света I_0, а отражённого I_R, то

$$R=I_R/I_0. \qquad (67)$$

Зависимость коэффициента отражения от энергии падающего света $R(h\nu)$ или длины волны $R(\lambda)$ называется спектром отражения.

Пусть свет нормально падает на слой полупроводника толщиной d. Тогда с учётом отражения через первую поверхность пройдёт излучение $I_1=(1-R)I_0$. Вследствие поглощения света в слое толщиной dx интенсивность излучения I_1 уменьшится на величину dI. Доля поглощенного света не зависит в достаточно широком диапазоне интенсивностей от I и пропорциональна толщине dx:

$$dI=-\alpha I_1 dx, \qquad (68)$$

$$dI/I_1=-\alpha dx. \qquad (68^*)$$

Коэффициент пропорциональности α в этих формулах носит название коэффициент поглощения. Чтобы найти интенсивность света после прохождения участка конечной толщины, надо проинтегрировать равенство (68*) по I от I_1 до I_2 и по x от 0 до d:

$$\int_{I1}^{I2}\frac{\partial I}{I}=\int_0^d(-\alpha)\partial x;\ \ln I\Big|_{I1}^{I2}=(-\alpha)d\Big|_0^d;\ I_2=I_1e^{-\alpha d},\ где\ I_1=(1-R)I_0. \qquad (69)$$

Таким образом, ко второй поверхности подойдёт свет с интенсивностью $I_2=(1-R)I_0e^{-\alpha d}$, от неё он частично отразится, а частично выйдет из кристалла. При суммировании всех порций прошедшего сквозь кристалл света получается сумма бесконечной геометрической прогрессии, которая равна

$$I=\frac{(1-R)^2e^{-\alpha d}}{1-R^2e^{-2\alpha d}}I_0.$$

Коэффициент пропускания T, выражающий собой отношение интенсивности света I, прошедшего через образец толщиной d, и интенсивности падающего света, равен

$$T=\frac{I}{I_0}=\frac{(1-R)^2e^{-\alpha d}}{1-R^2e^{-2\alpha d}}. \qquad (70)$$

Если же αd велико по сравнению с единицей, то в знаменателе этого выражения можно пренебречь вторым слагаемым, и для коэффициента поглощения получаем формулу:

$$\alpha=(-1/d)ln(T/(1-R)^2). \qquad (71)$$

Спектральная зависимость $\alpha(\lambda)$ связана с энергетической зонной структурой кристалла полупроводника.

В полупроводнике имеются энергетические уровни валентной зоны и зоны проводимости. Переходы электронов из первой зоны во вторую соответствуют собственному поглощению полупроводника. В запрещённой зоне могут находиться акцепторные и донорные уровни примесей. Переходы электронов на первые уровни создают в валентной зоне положительно заряженные вакансии – дырки, а переходы электронов с донорных уровней в зону проводимости соответствуют примесному поглощению, как и появление дырок в валентной зоне. Как уже указывалось, это поглощение может оказаться возле основной полосы поглощения полупроводника со стороны длинноволновой границы.

Кроме этого, при низких температурах наблюдается ещё экситонное поглощение. Это поглощение не сопровождается увеличением электропроводности полупроводника (явление фотопроводимости). Это явление объясняется тем, что электрон из заполненной зоны может быть переведён в состояние с повышенной энергией. При этом он не доходит до зоны проводимости и не участвует в электропроводности, а остаётся связанным с образованной после его ухода из валентной зоны дыркой. Это состояние зарядов называется экситоном. Экситонные уровни энергии расположены в запрещённой зоне полупроводника и имеют водородоподобный спектр расположения экситонных линий.

Эксперименты подтверждают существование в полупроводнике экситонов. Возбуждённый электрон может взаимодействовать с дыркой, даже находящейся от него на десятки межатомных расстояний. Это взаимодействие проявляется при низкой температуре, когда кинетическая энергия теплового движения электрона сравнима или меньше по величине с абсолютным значением потенциальной энергии электронно-дырочного взаимодействия. Ясно, что для создания такой слабо связанной электронно-дырочной пары (экситона) надо меньше энергии, чем для создания изолированных электрона и дырки. Поэтому экситонное поглощение начинается при меньших частотах, чем собственное поглощение полупроводника. Характерной особенностью экситона является то, что он не является носителем электрического тока.

Таким образом, экситонное поглощение может проявиться только при низких температурах. Примесное поглощение, проявляющееся при комнатных температурах (порядка 300К), имеет гораздо меньшую интенсивность, чем собственное поглощение полупроводника, так как примесных уровней, конечно, много меньше, чем уровней в валентной зоне.

Описание экспериментальной установки

Установка для снятия спектра поглощения образца кристалла *CdS* показана на рисунке 19.

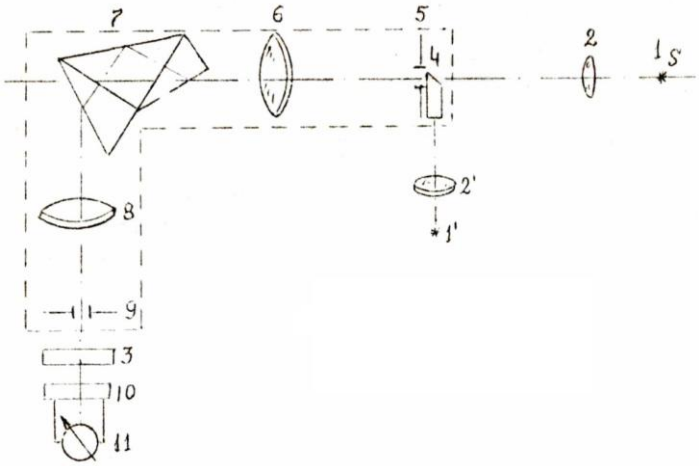

Рисунок 19 - Оптическая схема установки, собранная на базе универсального монохроматора УМ-2.

Свет от источника сплошного спектра 1 через конденсорную линзу 2 падает на входную щель 5 монохроматора, далее проходит объектив коллиматора 6, диспергирующую призму 7, объектив камеры 8 и фокусируется в плоскости 9, где расположена выходная щель монохроматора. За выходной щелью располагается держатель образца 3, который может занимать два положения: в положении 1 свет проходит мимо исследуемого образца, в положении II – свет проходит через образец.

За образцом помещается фотоприёмник 10, представляющий собой железоселеновый фотоэлемент с запорным слоем, фототок которого измеряется микроамперметром 11 с шунтом.

Свет, падающий в монохроматор от источника 1, разлагается призмой монохроматора в спектр и падает на образец. Вращая барабан поворота призмы монохроматора, можно менять длину волны света, падающего на образец. При этом надо установить соответствие между длиной световой волны и показаниями барабана монохроматора.

Для этого можно либо воспользоваться градуировочным графиком, либо самостоятельно проградуировать монохроматор (по указанию преподавателя).

Градуировка монохроматора производится в видимой области спектра при использовании излучения ртутной кварцевой лампы или газоразрядных трубок различных атомарных газов. Перед началом градуировки необходимо установить в выходной трубе монохроматора патрубок зрительной трубы со сменными окулярами. В фокальной плоскости окуляра находится указатель, освещаемый лампочкой через сменные светофильтры. Благодаря им при работе в любой области спектра указатель может быть освещён светом такой же или близкой длины волны. Ширину входной щели необходимо брать порядка 0.01 – 0.02 мм, а высоту – 2 мм. Высота щели регулируется с помощью вдвижной пластинки с прорезями (пластинка «ласточкин хвост»).

Следует иметь в виду, что из-за непостоянства линейной дисперсии призмы, при неизменной ширине выходной щели через неё проходит световой поток разной величины. Поэтому необходимо в различных областях спектра раскрывать выходную щель по-разному. Приводим расчёт выходной щели монохроматора УМ-2 по формуле $S_{вых.}=\partial\lambda/D$, где D – дисперсия призмы монохроматора для данной длины волны и $\partial\lambda$=50Å. Результаты расчёта приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Результаты расчетов

λ, Å	7865	5461	4861	4358	4046
D, Å/мм	335	115	80	47	33
$S_{вых.}$, мм	0.149	0.435	0.625	1.064	1.515

Градуировка осуществляется следующим образом. К указателю в фокальной плоскости окуляра подводится одна из известных спектральных линий излучения, например, гелиевой или ртутной лампы. Фокусировкой объектива коллиматора монохроматора добиваются совмещения в одной фокальной плоскости наблюдаемой линии и освещённого соответствующим светом указателя. При этом с изменением угла зрения или при лёгком покачивании головки с указателем не должно наблюдаться смещение линии спектра относительно указателя. Соответствующее деление барабана поворота призмы и положение объектива коллиматора записываются в таблицу. Аналогичные операции проводятся со всеми остальными линиями спектра излучения гелия или ртути. Таким образом получают ряд эталонных точек, определяющих зависимость между длиной волны и делениями барабана. По этим точкам строится градуировочный график – кривая дисперсии призмы монохроматора.

Порядок выполнения работы

1. Произвести градуировку монохроматора.

2. Измерить с помощью фотоэлемента и микроамперметра с шунтом интенсивность света I_0, падающего на образец. Для этого выдвинуть кристалл в оправке, чтобы свет из монохроматора непосредственно попадал на фотоэлемент, и пройти, вращая барабан, всю видимую область спектра (400 – 800 нм) через каждые 50 делений барабана.

3. Измерить интенсивность света I, прошедшего сквозь образец, вдвигая его между монохроматором и фотоэлементом, проходя видимую область спектра и записывая показания микроамперметра при тех же значениях указателя барабана, что и в предыдущем случае.

4. Получить значения коэффициента пропускания $T=I_0/I$. После этого перевести значения шкалы барабана с помощью градуировочного графика в длины волн, а затем в частоту света. Получить зависимости $T(\lambda)$ и $T(\nu)$.

5. По формуле (71) определить значения α при различных частотах и длинах волн. Толщина образца кристалла d указана на установке. Там же приведён график зависимости коэффициента отражения R от длины волны λ или $R(\nu)$.

6. По графику зависимости коэффициента поглощения α от частоты определить $\nu_{гр.}$ и ширину запрещенной зоны полупроводника $E_0=h\nu_{гр.}$.

Содержание отчёта

1. Оптическая схема установки.

2. График градуировки монохроматора.

3. График зависимости интенсивности света, выходящего из монохроматора от длины волны и от частоты $I_0(\lambda)$, $I_0(\nu)$.

4. График зависимости интенсивности света, прошедшего через образец I от длины волны и от частоты света $I(\lambda)$, $I(\nu)$.

5. График зависимости коэффициента отражения R от λ и ν.

6. График зависимости коэффициента поглощения α от λ и ν.

7. Определённая из последнего графика частота $\nu_{гр.}$ и расчёт ширины запрещённой зоны полупроводника *CdS*.

Контрольные вопросы

1. *Что называется собственной полосой поглощения полупроводника?*
2. *Почему край собственной полосы поглощения полупроводника называется длинноволновым?*
3. *Что такое экситон, и почему он наблюдается при низких температурах?*
4. *Что означает знак «минус» в формуле (68)?*
5. *Как производится градуировка монохроматора?*

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев, И.В. Курс общей физики: в 4-х томах. Том 3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. - М.: КноРус, 2012. – 368 с.
2. Цифровой мультиметр Mastech MS8229 [Электронные ресурс], URL: http://www.mastech.ru/catalog/mult/ms8229.html (дата обращения: 10.03.2015).
3. Зависимость сечения кабеля и провода от токовых нагрузок и мощности [Электронные ресурс], URL: http://rostech.info/zavisimost-secheniya-kabelya-i-provoda-ot-tokovyh-nagruzok-i-moschnosti (дата обращения: 10.03.2015).
4. The elemental treasure hunt [Электронные ресурс], URL: http://www.rsc.org/chemistryworld/2013/07/last-retort-elemental-treasure-hunt (дата обращения: 10.03.2015)
5. Физика твердого тела [Электронный ресурс], URL: http://journals.ioffe.ru/ftt/ (дата обращения: 10.03.2015).

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Кафедра химии входила в состав первых 14 кафедр ЛИТМО, сформированных в 1930 году. В 1930–1960 годах кафедра работала в рамках факультета Точной механики; в период деятельности Инженерно-физического факультета (ИФФ) с 1946 года по 1954 год кафедра входила в состав ИФФ. С 1933 года – кафедру возглавлял известный специалист в области оптического стекла профессор В.Г. Воано, позже – известный русский ученый-химик профессор С.А. Щукарев. С 1954 по 1972 год кафедру возглавлял доцент Г.С. Кошурников.

С момента второго рождения инженерно-физического факультета в 1976 г. кафедра химии вошла в его состав. В это время на кафедре стали развиваться, в основном, три научно-технологических направления: создание новых композиционных оптических материалов; разработка химических сенсоров; технология оптического волокна.

В последующие годы сотрудники кафедры, прежде всего, профессора Новиков А.Ф. и Успенская М.В., существенно переработали методику преподавания курса химии, адаптировав ее к активно внедрявшейся тогда в Университете системе дистанционного обучения. В результате, преподавание курса химии в Университете ИТМО вышло на новый более высокий уровень.

В дальнейшем на кафедре под руководством профессора М.В. Успенской активно развивалось научно-техническое направление в области химии и физики сорбирующих полимерных материалов и нанокомпозитов. В частности, на основе акриловых супервлагоабсорбентов разработан ряд новых материалов многофункционального назначения: сенсоры, жидкие линзы, раневые повязки, искусственные почвы для сельского хозяйства, огнестойкие конструкционные элементы и др.

В связи с этим в 2011 году данная кафедра (исторически – кафедра химии) позиционировала себя как отдельное структурное подразделение Национального исследовательского университета ИТМО в качестве кафедры “Информационных технологий топливно-энергетического комплекса”.

С переходом отечественных предприятий на международные стандарты продукции, повышением требований к охране окружающей среды и внедрением сложных аналитических автоматизированных систем контроля качества и мониторинга, с 2008 года в рамках направления «Техническая

физика» кафедра проводит подготовку магистров и бакалавров по профилю «Физико-технические аспекты аналитического приборостроения».

Подготовка включает в себя следующие разделы:

- Компьютерные комплексы для автоматизированного контроля физических, химических, механических, термических, реологических и некоторых других свойств нефтяного сырья и продуктов нефтепереработки;
- Встроенные микропроцессорные комплексы для управления технологическими процессами и измерением широкого круга параметров энергетических установок и систем энергоснабжения;
- Физико-математическое моделирование технологических процессов нефтепереработки и топливно-энергетического комплекса;
- Информационно-аналитические системы и комплексы различного профиля, адаптированные под специфические условия работы на предприятиях ТЭК.

Уникальная программа обучения сочетает фундаментальную подготовку в области информационных систем, физической оптики, молекулярной спектроскопии, аналитической и физической химии, компьютерной метрологии, общехимической технологии и автоматики.

В рамках специальных дисциплин изучаются приборы и методы контроля качества продукции и принципы построения автоматизированных анализаторных систем для предприятий ТЭК, нефтяной и химической промышленности.

Такие системы как основа информационных технологий контроля качества и мониторинга безопасности могут успешно применяться практически на всех предприятиях и лабораториях химического и нефтехимического профиля, а также в металлургической, пищевой и фармацевтической промышленности.

Выпускники кафедры имеют широкие перспективы трудоустройства в современных крупных компаниях ТЭК, таких как Роснефть, ПТК, Газпром, Киришинефтеоргсинтез, Лукойл, ТНК-ВР, а также на предприятиях и лабораториях пищевой, фармацевтической и других отраслях промышленности.

Практика эксплуатации предприятий ТЭК подтверждает необходимость создания и применения эффективных систем контроля за безопасностью и систем экологического мониторинга.

В связи с этим с 2011 года были разработаны и открыты бакалаврская и магистерская программы по направлению подготовки 241000 " Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии ". Основной целью образовательной магистерской программы "Информационные ресурсосберегающие технологии и экологические аспекты на предприятиях ТЭК" является подготовка высококвалифицированных специалистов, соответствующих современным требованиям к выпускникам вуза, с учетом потребностей рынка труда Санкт-Петербурга и регионов России. Будущие магистры будут способны

использовать информационные технологии и математическое моделирование для описания различных физических и физико-химических процессов, для контроля качества продукции нефтепереработки, работать на современном оборудовании в научных, научно-производственных и производственных лабораториях по исследованию выпускаемой продукции и т.д.

Основными направлениями научной деятельности в рамках магистерской программы являются:

- Создание приборов и датчиков физических величин и физико-химических параметров углеводородного сырья и продуктов (в том числе на основе нанотехнологий);
- Разработка приборов для измерения параметров качества нефтепродуктов и пищевых продуктов на основе компьютерных технологий;
- Создание эффективных информационных систем контроля качества продукции и коммерческого учета на предприятиях ТЭК на основе приборов и устройств различного назначения;
- Создание эффективных информационных систем мониторинга безопасности эксплуатации объектов ТЭК.

Подготовка магистров ведется с участием ряда промышленных предприятий, научно-производственных объединений, научно-исследовательских институтов и вузов Санкт-Петербурга, что дает возможность получить отличные знания и неоценимый опыт в различных сферах деятельности: производственной, научно-исследовательской, административной и т.д.

Биотехнология и биоинженерия являются приоритетными направлениями современной науки и промышленного производства. Продукты биотехнологии и биоинженерии востребованы в медицине, фармации, биологии, и других высокотехнологичных отраслях народного хозяйства. Разработка новых источников энергии, создание биосовместимых материалов и синтез биологически активных веществ – главные составляющие этих двух наук и отраслей производства. В частности, интенсивно развиваются производство и применение ферментов в переработке различных видов сырья и в получении биопрепаратов. Ферментные технологии имеют преимущества с экономической, технологической и экологической точек зрения, поэтому годовой оборот ферментных препаратов составляет десятки миллионов долларов США и он непрерывно растёт. По объёму производства ферментные препараты занимают третье место после аминокислот и антибиотиков. Ферментативные процессы, применяемые в технологиях, аналогичны природным, но они более безопасны и для здоровья человека и для окружающей среды.

Развитие этих отраслей сдерживается недостатком специалистов высшего уровня, подготовленных в области информационного обеспечения и средств измерения живых систем и биологических структур.

Для решения проблемы подготовки магистров на стыке информационных технологий, биологии и инженерии объединены усилия двух кафедр: Кафедра химии и молекулярной биологии ИХиБТ и кафедра ИТТЭК, имеющих опыт подготовки специалистов бакалавров и магистров в информационных технологиях и биотехнологии.

В учебный план предлагаемой программы включены, наряду с общеобразовательными, дисциплины по информационной, биологической, химической, технологической подготовке и ряду других отраслей знаний, необходимых в подготовке специалистов заявленного уровня.

В настоящее время на каф. ИТТЭК под руководством проф. Успенской М.В., ведутся работы по направлениям, связанных с созданием материалов для фармакологии и регенеративной медицины, предметов санитарно-гигиенического назначения, а также биосовместимых и биодеградируемых материалов.

Также на кафедре под руководством проф. Неелова И.М. активно развивается моделирование полимеров и биополимеров, начиная от структуры веществ и физико-химических процессов, протекающих в живых организмах до физико-механических и эксплуатационных характеристик материалов и биосистем.

Профессорско-преподавательский состав на кафедре насчитывает 18 человек, из них 6 профессоров и докторов наук.

В настоящее время на базе кафедр НИУ ИТМО создан Международный научно-исследовательский институт биоинженерии, возглавляемый проф. М.В. Успенской, что значительно расширяет экспериментальную базу и научный потенциал кафедр и способствует повышению уровня подготовки кадров высшей категории.

В настоящее время на кафедре трудятся 18 преподавателей, шестеро из них являются докторами наук, профессорами, признанными на международном уровне, членами ученых советов в России и за рубежом.

Плотников Петр Геннадьевич
Плотникова Людмила Валерьевна

Изучение полупроводников в курсе физике твердых тел

Учебное пособие

В авторской редакции
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова
Подписано к печати
Заказ №
Тираж
Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49