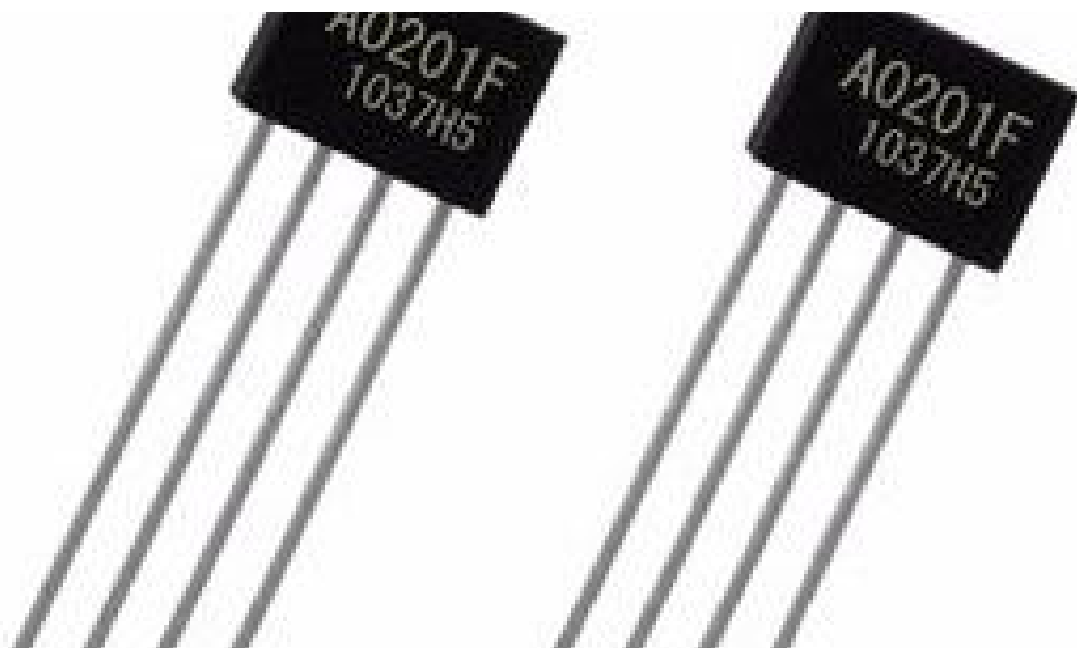


# Изучение эффекта Холла в германиевом проводнике n- и p-типа (РС)



Физика

Современная физика

Физика твердого тела



Уровень сложности

тяжелый



Кол-во учеников

2



Время подготовки

45+ Минут



Время выполнения

45+ Минут

This content can also be found online at:

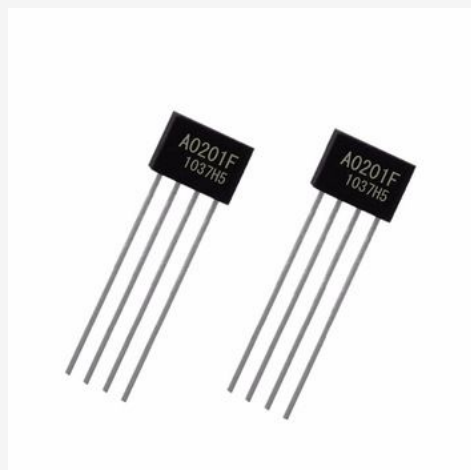
<http://localhost:1337/c/5f215840e77a360003be9a5d>

PHYWE

## Общая информация



## Описание



Датчик эффекта Холла

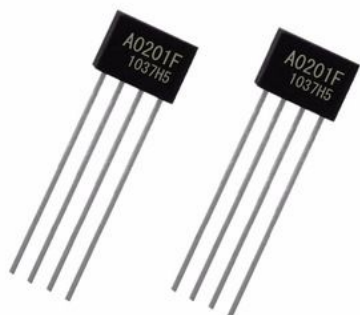
Датчик эффекта Холла состоит в основном из тонкого куска прямоугольного полупроводникового материала р-типа, такого как арсенид галлия (GaAs), антимонид индия (InSb) или арсенид индия (InAs), пропускающего через себя непрерывный ток.

Это электронное устройство используется для обнаружения эффекта Холла и измерения магнитного поля.

Датчики эффекта Холла пользуются большим спросом и широко применяются в датчиках приближения, переключателях, датчиках скорости движения колес и позиционирования и т.д.

## Описание

PHYWE



Датчик эффекта Холла

Датчик эффекта Холла состоит в основном из тонкого куска прямоугольного полупроводникового материала р-типа, такого как арсенид галлия (GaAs), антимонид индия (InSb) или арсенид индия (InAs), пропускающего через себя непрерывный ток.

Это электронное устройство используется для обнаружения эффекта Холла и измерения магнитного поля.

Датчики эффекта Холла пользуются большим спросом и широко применяются в датчиках приближения, переключателях, датчиках скорости движения колес и позиционирования и т.д.

## Дополнительная информация (1/3)

PHYWE

### Предварительные знания



Полупроводники р-типа и n-типа создаются путем легирования собственного полупроводника акцепторами и донорами соответственно. Понятие n-типа происходит от отрицательного заряда электрона. В полупроводниках р-типа дырки являются основными носителями, а электроны - неосновными носителями, в полупроводниках n-типа электроны являются основными носителями, а дырки - неосновными.

### Научный принцип



Удельное сопротивление и напряжение Холла прямоугольного германиевого образца измеряются как функция температуры и магнитного поля. По результатам измерений определяется расстояние между зонами, удельная проводимость, тип носителя заряда и подвижность носителей заряда.

## Дополнительная информация (2/3)

PHYWE

Цель  
обучения

Понять механизмы электропроводности в легированном германии с помощью эффекта Холла.

## Задачи



- Напряжение Холла  $U_H$  измеряется при комнатной температуре и постоянном магнитном поле как функция тока управления  $I_p$ .
- Напряжение на образце  $U_p$  измеряется при комнатной температуре и постоянном токе управления как функция магнитной индукции  $B$ .

## Дополнительная информация (3/3)

PHYWE

## Задачи



- Напряжение на образце  $U_p$  измеряется при постоянном управляющем токе как функция температуры  $T$ . Расстояние между полосами р- и n-германия рассчитывается на основе измерений.
- Напряжение Холла  $U_H$  измеряется как функция магнитной индукции  $B$  при комнатной температуре. Знак носителей заряда и постоянная Холла  $R_H$  вместе с холловской подвижностью  $\mu_H$  и концентрацией носителей  $p$  рассчитываются по результатам измерений.
- Напряжение Холла  $U_H$  измеряется как функция температуры  $T$  при постоянной магнитной индукции  $B$ .

## Правила техники безопасности

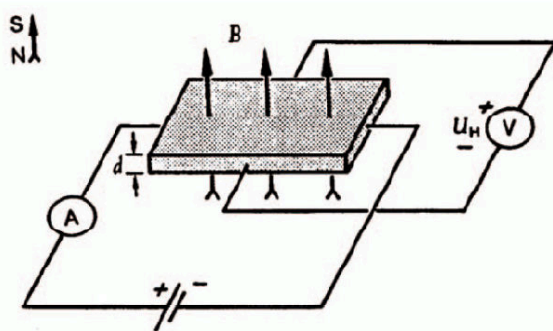
PHYWE

Для этого эксперимента применяются общие инструкции по безопасному проведению экспериментов при преподавании естественных наук.

Чтобы не повредить полупроводниковый материал, необходимо знать значения магнитного поля, протекающего тока и температуры.

## Теория (1/5)

PHYWE



Эффект Холла в прямоугольном образце

Если ток  $I$  проходит через токопроводящую полосу прямоугольного сечения и если полоса пересекается под действием магнитного поля под прямым углом к направлению тока, между двумя наложенными друг на друга точками на противоположных сторонах полосы возникает напряжение - так называемое напряжение Холла.

Это явление возникает под действием силы Лоренца: носители заряда, вызывающие ток, протекающий через образец, отклоняются в магнитном поле  $B$  в зависимости от их знака и скорости.  $v$ :

$$\vec{F} = e(\vec{v} \times \vec{B})$$

где  $F$  - сила, действующая на носители заряда и  $e$  - элементарный заряд.

## Теория (2/5)

PHYWE

Поскольку отрицательные и положительные носители заряда в полупроводниках движутся в противоположных направлениях, они также отклоняются в противоположных направлениях.

Таким образом, тип носителя заряда, вызывающего протекание тока, можно определить по полярности напряжения Холла, зная направление тока и направление магнитного поля.

Это означает: если направление тока и магнитное поле известны, полярность напряжения Холла определяет, является ли ток преимущественно результатом дрейфа отрицательных зарядов или положительных зарядов.

Как для р-германия, так и для п-германия существует линейная зависимость между напряжением Холла  $U_H$  и током управления  $I_p$  :

$$U_H = \alpha I_p$$

## Теория (3/5)

PHYWE

Изменение сопротивления образца под действием магнитного поля связано с уменьшением длины свободного пробега носителей заряда. Поскольку во время измерения ток постоянен, изменение сопротивления рассчитывается как

$$\frac{R_m - R_0}{R_0} = \frac{U_m - U_0}{U_0}$$

где  $R_m$ ,  $U_m$  - сопротивление и напряжение образца при наличии магнитного поля; и  $R_0$ ,  $U_0$  - сопротивление напряжение образца при магнитном поле  $B = 0$ .

В области собственной проводимости имеем

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp\left(\frac{E_g}{2kT}\right)$$

где  $\sigma$  = проводимость,  $E_g$  = энергия запрещенной зоны,  $k$  = постоянная Больцмана,  $T$  = абсолютная температура.

## Теория (4/5)

PHYWE

Логарифмируя обе части приведенного выше уравнения, получаем

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 + \frac{E_g}{2k} T^{-1}$$

Если логарифм проводимости  $\ln \sigma$  отображается как функция, обратная температуре  $T^{-1}$ , то получается линейная зависимость с наклоном, из которого можно определить.

В направлениях тока управления и магнитного поля носители заряда, вызывающие ток в образце, отклоняются к переднему краю образца. Следовательно, если (в n-легированном зонде) электроны являются преобладающими носителями заряда, то передний край становится отрицательным, а при дырочной проводимости в p-легированном образце - положительным.

## Материал

Позиция	Материал	Пункт No.	Количество
1	Эффект Холла, основной модуль	11801-01	1
2	Эффект Холла, Ge-полупроводник p-типа, несущая панель	11805-01	1
3	Эффект Холла, Ge-полупроводник n-типа, несущая панель	11802-01	1
4	Программное обеспечение "measureLAB" многократная лицензия	14580-61	1
5	Датчик Холла, тангенциальный, с защитным колпачком	13610-02	1
6	PHYWE Источник питания пост. ток: 0...12 В, 2 А / перемен. ток: 6 В, 12 В, 5 А	13506-93	1
7	Катушка, 600 витков	06514-01	2
8	Железный сердечник, U-образный, пластинчатый	06501-00	1
9	Полюс. наконечники, плоские, 30x30мм, 2 шт.	06489-00	1
10	Треножник	02002-55	1
11	Прямоугольный зажим	02054-00	1
12	Штативный стержень, нерж. ст., l=250 мм, d = 10 mm	02031-00	1
13	Соединительный проводник, 500 мм, красный	07361-01	2
14	Соединительный проводник, 500 мм, синий	07361-04	1
15	Соединительный проводник, 750 мм, черный	07362-05	2

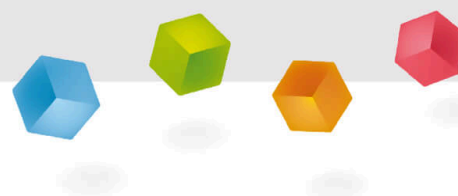


## Материал

PHYWE

Позиция	Материал	Пункт No.	Количество
1	<a href="#">Эффект Холла, основной модуль</a>	11801-01	1
2	<a href="#">Эффект Холла, Ge-полупроводник p-типа, несущая панель</a>	11805-01	1
3	<a href="#">Эффект Холла, Ge-полупроводник n-типа, несущая панель</a>	11802-01	1
4	<a href="#">Программное обеспечение "measureLAB" многократная лицензия</a>	14580-61	1
5	<a href="#">Датчик Холла, тангенциальный, с защитным колпачком</a>	13610-02	1
6	<a href="#">PHYWE Источник питания пост. ток: 0...12 В, 2 А / перемен. ток: 6 В, 12 В, 5 А</a>	13506-93	1
7	<a href="#">Катушка, 600 витков</a>	06514-01	2
8	<a href="#">Железный сердечник, U-образный, пластинчатый</a>	06501-00	1
9	<a href="#">Полюс. наконечники, плоские, 30x30мм, 2 шт.</a>	06489-00	1
10	<a href="#">Треножник</a>	02002-55	1
11	<a href="#">Прямоугольный зажим</a>	02054-00	1
12	<a href="#">Штативный стержень, нерж. ст., l=250 мм, d = 10 mm</a>	02031-00	1
13	<a href="#">Соединительный проводник, 500 мм, красный</a>	07361-01	2

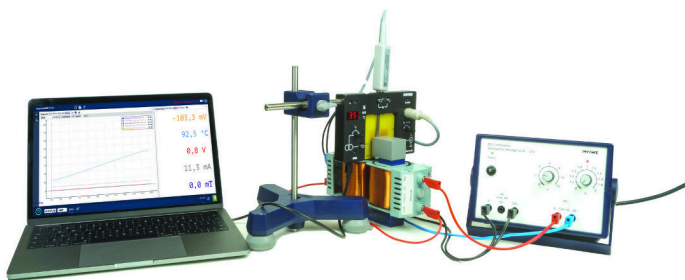
PHYWE



## Подготовка и выполнение работы

## Подготовка (1/4)

PHYWE



Экспериментальная установка

Образец для экспериментов должен быть помещен в модуль эффекта Холла через направляющую канавку. Модуль непосредственно подключается к выходу 12В.~ источника питания через вход переменного тока на задней стороне модуля.

Пластина должна быть поднесена к магниту очень осторожно, чтобы не повредить кристалл, в частности, избегать сгибания пластины. Она должна находиться в центре между полюсными наконечниками.

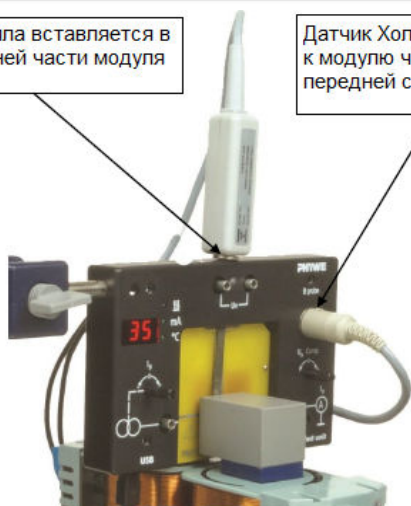
Порт USB в нижней части модуля используется для подключения модуля к ноутбуку с помощью кабеля USB.

## Подготовка (2/4)

PHYWE

Датчик Холла вставляется в паз в верхней части модуля

Датчик Холла подключается к модулю через порт на передней стороне модуля



Подключение датчика Холла к модулю

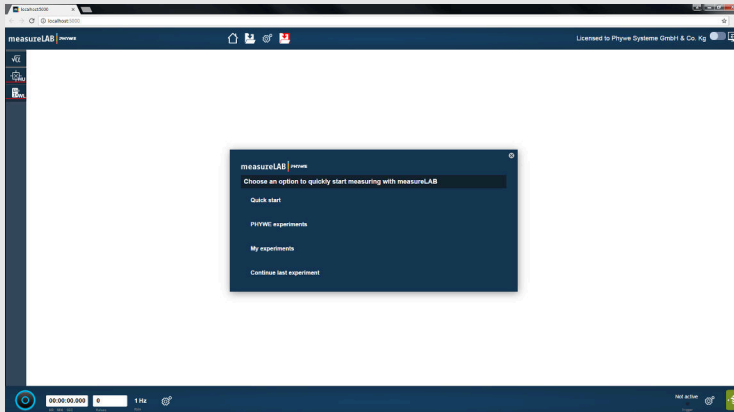
Различные измерения контролируются программным обеспечением measureLAB.

Магнитное поле измеряется с помощью датчика Холла, который подключается к модулю через порт на передней стороне модуля, и может быть направлено в канавку в верхней части модуля, чтобы гарантировать измерение магнитного потока непосредственно на исследуемом образце.

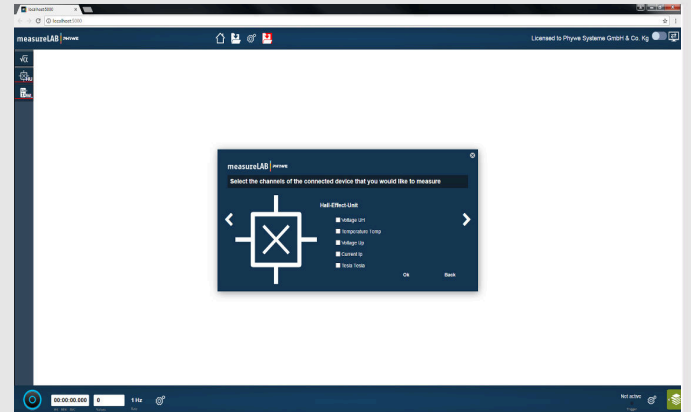
Для начала измерений запустите программное обеспечение measureLAB и выберите на главной странице опцию "Быстрый запуск". Вы получите стартовый экран, который появляется перед каждым измерением.

## Подготовка (3/4)

PHYWE



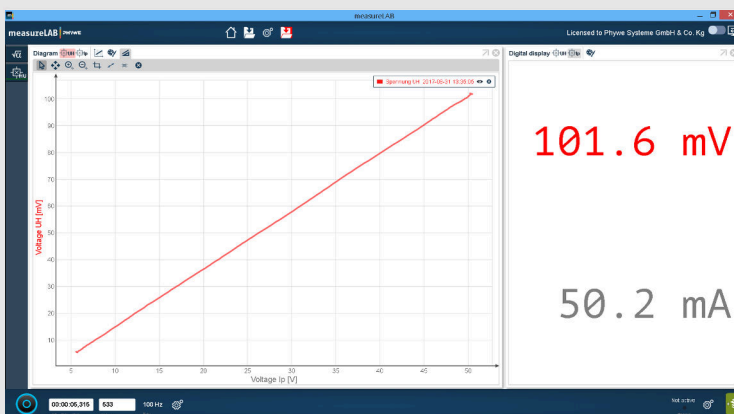
Главная страница measureLAB



Стартовый экран, который появляется перед каждым измерением

## Подготовка (4/4)

PHYWE



Пример параметров измерения

Здесь Вы можете выбрать, какие параметры должны быть измерены, смещены и т.д.

Например, выберите напряжение Холла  $U_H$  в зависимости от тока  $I_p$  и нажмите кнопку "ОК", после чего появляется окно с измерением. На этом экране следует начать измерение, нажав на синий нижний элемент в правом нижнем углу экрана.

Измеренные значения отображаются графически на «Диаграмме» и в виде цифровых значений на «Цифровом дисплее»,

## Задачи (1/3)

PHYWE

### Задача 1:

Выберите напряжение Холла  $U_H$ , силу ток  $I_P$  и магнитное поле "Тесла" в качестве параметров измерения в стартовом окне и нажмите на "Ok". Установите силу тока и магнитное поле на ноль, а затем откалибруйте напряжение Холла  $U_H$  на ноль. Теперь установите магнитное поле на значение 250 мТл, изменяя напряжение и силу тока на источнике питания. Определите напряжение Холла  $U_H$  в зависимости от силы тока  $I_P$  от -30 мА до 30 мА с шагом 5 мА. В результате Вы получите типичные измерения для n- и p-германия.

### Задача 2:

Выберите напряжение образца  $U_p$ , силу тока  $I_P$  и магнитное поле "Тесла" в качестве параметров измерения в стартовом окне и нажмите на "Ok". Установите силу тока  $I_P$  на 30 мА. Определите напряжение образца  $U_p$  в зависимости от положительной магнитной индукции  $B$  до 300 мТ. Рассчитайте изменение сопротивления образцов по результатам измерений и постройте графики зависимости.

## Задачи (2/3)

PHYWE

### Задача 3:

Выберите напряжение образца  $U_p$ , силу тока и температурный режим "Температура" в качестве параметров измерения из стартового экрана и нажмите на "Ok". В начале установите силу тока  $I_P$  на 30 мА. Магнитное поле выключено. Во время измерения ток остается почти постоянным, а напряжение  $U_p$  изменяется в зависимости от изменения температуры  $T$ . Начните измерение, активировав нагревательную спираль с помощью ручки "Вкл/Выкл" на задней стороне модуля. Образец нагревается до максимальной температуры около 145-150 °C, а затем модуль автоматически прекращает нагревание. Определите кривую охлаждения изменения напряжения  $U_p$  в зависимости от изменения температуры  $T$  в диапазоне температур от 140°C до комнатной температуры. В результате будут получены типичные кривые.

## Задачи (3/3)

PHYWE

### Задача 4:

Выберите напряжение Холла  $U_H$ , силу тока  $I_p$  и магнитное поле "Тесла" в качестве параметров измерения в стартовом окне и нажмите на "Ok". Установите силу тока  $I_p$  и магнитное поле на ноль и откалибруйте напряжение Холла  $U_H$  на ноль. Теперь установите силу тока на значение 30 мА. Определите напряжение Холла  $U_H$  в зависимости от магнитной индукции  $B$ . Начните с -300 мТл, изменяя полярность тока катушки на источнике питания и увеличивайте магнитную индукцию с шагом почти 20 мТл. В нулевой точке нужно снова изменить полярность.

### Задача 5:

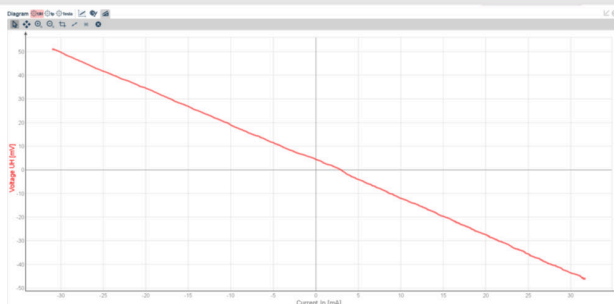
Выберите напряжение образца  $U_p$ , силу тока, температурный режим "Температура" и магнитное поле "Тесла" в качестве параметров измерения из стартового экрана и нажмите на "Ok". Установите силу тока на 30 мА и магнитную индукцию на 300 мТ. Следуя той же процедуре, что и в задаче 3, определите напряжение Холла  $U_H$  в зависимости от температуры  $T$ .

## Выполнение работы (1/9)

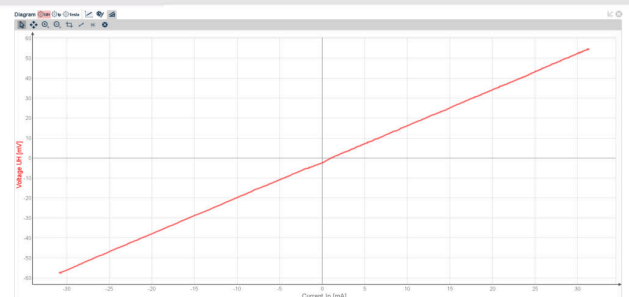
PHYWE

### Задача 1:

Поскольку носители заряда в n- и p-германии различны, тенденция линейной зависимости между  $U_H$  и  $I_p$  обратная, с  $B = 250$  мТл и  $T = 300$  К.



n-германий



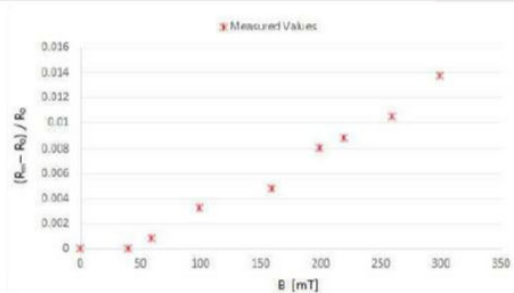
p-германий

## Выполнение работы (2/9)

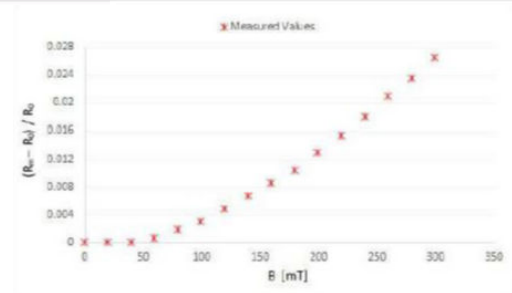
PHYWE

## Задача 2:

Нелинейное изменение сопротивления с увеличением напряженности поля для n- и p-германия при  $I_p = 30\text{мА}$  и  $T = 300\text{K}$



n-германий



p-германий

## Выполнение работы (3/9)

PHYWE

## Задача 3:

Наклоны линий регрессии равны:

$$b = -\frac{E_g}{2k} = -2.87 \cdot 10^3 \text{ со стандартным отклонением } s_b = \pm 0.3 \cdot 10^3 K \text{ для n-германия, и}$$

$$b = -\frac{E_g}{2k} = -4.18 \cdot 10^3 \text{ со стандартным отклонением } s_b = \pm 0.07 \cdot 10^3 K \text{ для p-германия}$$

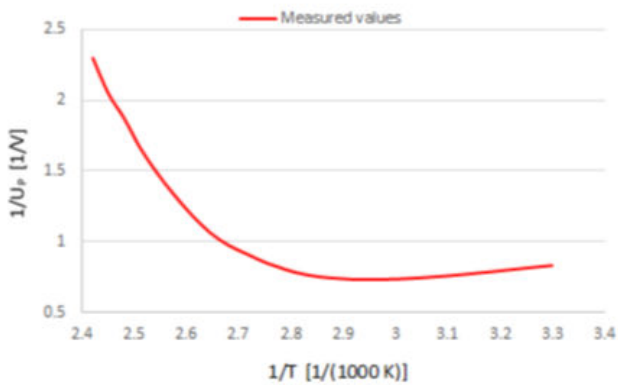
Поскольку  $k = 8.625 \cdot 10^{-5} \frac{\text{эВ}}{\text{K}}$ , мы получаем:

$$E_g = b \cdot 2k = (0.05 \pm 0.04) \text{ эВ для n-германия, и } E_g = b \cdot 2k = (0.72 \pm 0.03) \text{ эВ для p-германия.}$$

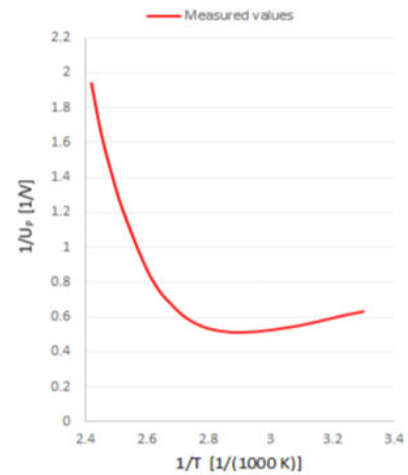
График обратного напряжения образца  $1/U_p$ , построенный в зависимости от обратной абсолютной температуры  $1/T$  с  $I_p = 30\text{мА}$  и отсутствии магнитного потока.

## Выполнение работы (4/9)

PHYWE



n-германий



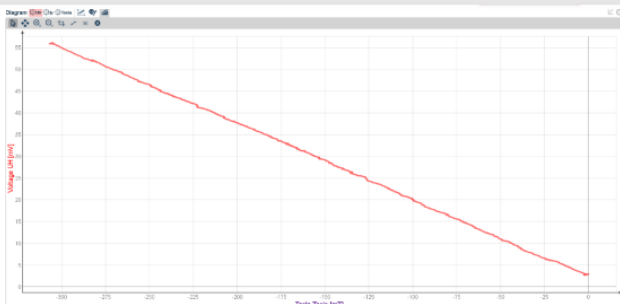
p-германий

## Выполнение работы (5/9)

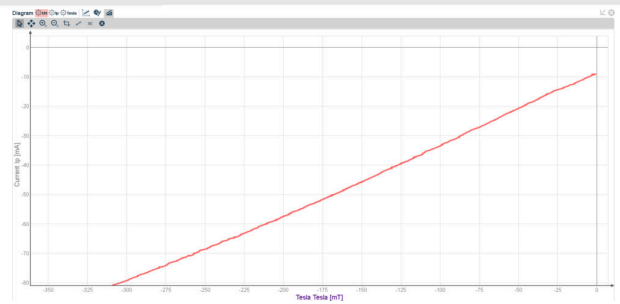
PHYWE

## Задача 4:

Линейные соотношения между напряжением Холла  $U_H$  и магнитным полем  $B$  для п и р - германия



n-германий



p-германий

## Выполнение работы (6/9)

PHYWE

При значениях, использованных на рисунках, линия регрессии с формулой  $U_H = U_0 + b \cdot B$  имеет наклон  $b = 0.144 \text{ ВТл}^{-1}$  со стандартным отклонением  $s_b \pm 0.004 \text{ ВТл}^{-1}$  для п-германия. и  $b = 0.125 \text{ ВТл}^{-1}$  со стандартным отклонением  $s_b \pm 0.004 \text{ ВТл}^{-1}$  для р-германия.

Так как толщина образца  $d = 1 \text{ мм}$  и  $I = 0.030 \text{ А}$ , постоянная Холла  $R_H$  становится равной:

$R_H = 4.8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$  со стандартным отклонением  $s_{R_H} = 0.2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$  для п-германия, и

$R_H = 4.17 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$  со стандартным отклонением  $s_{R_H} = 0.08 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$  для р-германия.

При измеренных значениях  $l = 0.02 \text{ м}$ ,  $R = 37.3 \text{ Ом}$  для п-германия,  $R = 35.5 \text{ Ом}$  для р-германия,  $A = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$  имеем:

$\sigma_0 = 53.6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$  для п-германия, и  $\sigma_0 = 57.14 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$  для р-германия.

## Выполнение работы (7/9)

PHYWE

Следовательно

$\mu_H = 0.257 \pm 0.005 \text{ м}^2/\text{Вс}$  для п-германия, и

$\mu_H = 0.238 \pm 0.005 \text{ м}^2/\text{Вс}$  за р-германия.

Используя значение элементарного заряда  $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ , получаем

$p = 14.9 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ .

Концентрация электронов п-легированного образца определяется выражением  $n = \frac{1}{e \cdot R_H}$  следовательно:

$n = 13.0 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ .



## Выполнение работы (8/9)

PHYWE

### Задача 5:

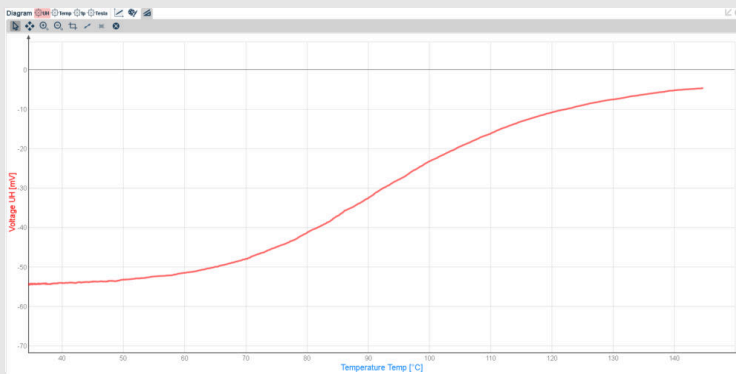
Напряжение Холла  $U_H$  отображается как функция от температуры  $T$  при силе тока  $I_p = 300 \text{ мА}$  и магнитном поле  $B = 300 \text{ мТ}$ . Графики показывают, что напряжение Холла уменьшается с увеличением температуры как для n-, так и для p-германия.

Поскольку эксперимент проводился с постоянным током, можно предположить, что за это отвечает увеличение носителей заряда (переход от внешней проводимости к собственной) с соответствующим уменьшением скорости дрейфа  $v$ . (Тот же ток для большего количества носителей заряда означает меньшую скорость дрейфа).

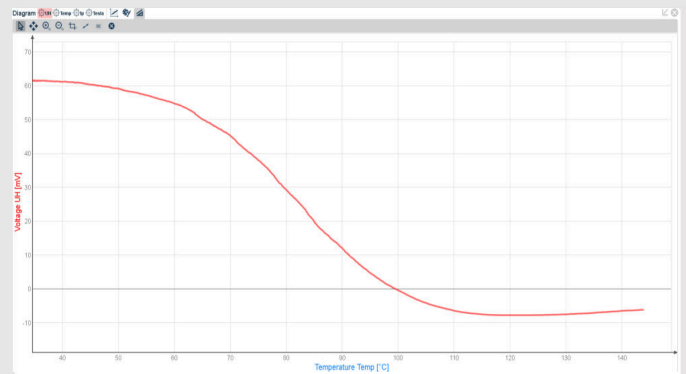
Скорость дрейфа, в свою очередь, связана с напряжением Холла силой Лоренца.

## Выполнение работы (9/9)

PHYWE



n-германий



p - германий

## Задача 1

PHYWE

Заполните пробелы в тексте:

В результате эксперимента напряжение Холла может быть увеличено за счет [ ] силы тока и [ ]. Кроме того, это может быть достигнуто за счет [ ] толщины пластины образца, т.е. пластины с [ ] несущей способностью.

☒ Проверить

## Задача 2

PHYWE

Коэффициент Холла полупроводника позволяет определить:

☐ подвижность носителей заряда☐ Теплопроводность☐ Тип проводимости и концентрация носителей заряда☒ Проверить

Коэффициент Холла для материала зависит от:

☐ Плотность носителей заряда☐ Температура☐ Тип носителей заряда☒ Проверить