

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ

Факультет физики

Серия лабораторных работ по современной физике

Работу выполнили студенты 3 курса

Захаров Сергей Дмитриевич

Еремин Валентин Антонович

Святковская Ольга Алексеевна



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Москва
2021

Содержание

1. Зависимость сопротивления материала от температуры	2
2. Зависимость вида ВАХ диода от температуры	2
2.1. Постановка целей работы	2
2.2. Описание установки	2
2.3. Анализ полученных результатов	3
2.3.1. Диод	3
2.3.2. Светодиод	4
3. Изучение эффекта Холла	6
3.1. Цели работы	6
3.2. Теория эффекта	7
3.2.1. Тензор сопротивления в магнитном поле	7
3.2.2. Подвижность и концентрация носителей. Схема снятия напряжений	7
3.3. Ход работы	9
3.3.1. Калибровка магнита	9
3.3.2. Снятие данных зависимости продольного и поперечного напряжений от величины и направления магнитного поля	9
3.4. Обработка данных	10
3.4.1. Определение типа носителей заряда	10
3.4.2. Продольное напряжение	10
3.4.3. Поперечное сопротивление	11

1. Зависимость сопротивления материала от температуры

2. Зависимость вида ВАХ диода от температуры

2.1. Постановка целей работы

Перед началом работы группой были поставлены следующие задачи:

- 1) Собрать установку для определения вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода и светодиода
- 2) Получить зависимость формы ВАХ от температуры для диода
- 3) Получить зависимость формы ВАХ от температуры для светодиода

2.2. Описание установки

Для проведения эксперимента была предложена схема с использованием осциллографа, который одновременно выступает в роли генератора синусоидального сигнала, представленная на рисунке 1.

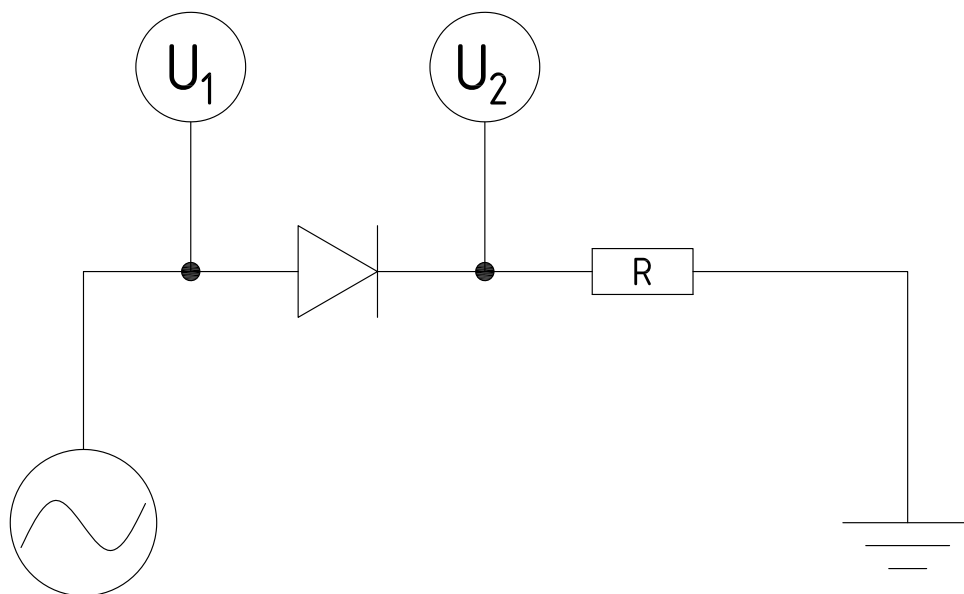


Рис. 1. Электрическая схема для проведения эксперимента по получению ВАХ диодов.

2.3. Анализ полученных результатов

2.3.1. Диод

Полученные в ходе измерений данные визуализированы на рисунке 2.

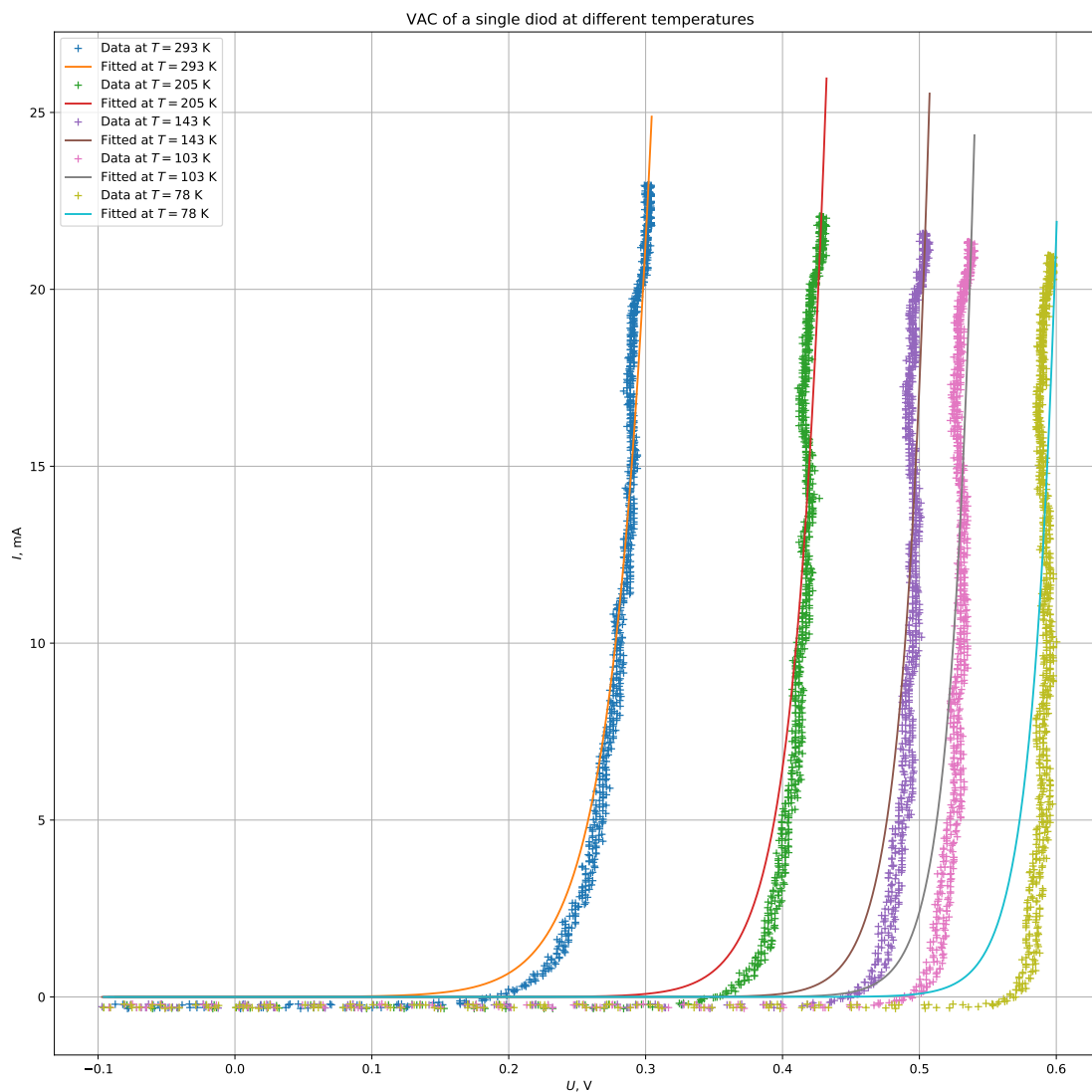


Рис. 2. ВАХ-и диода при его различных температурах.

Из полученных графиков мы можем заключить, что с уменьшением температуры величина напряжения, при котором происходит открытия диода, увеличивается линейно, что видно на рисунке 3 и коррелирует с предсказанием теории. Кроме того, с уменьшением температуры все более резким становится скачок тока при открытии диода.

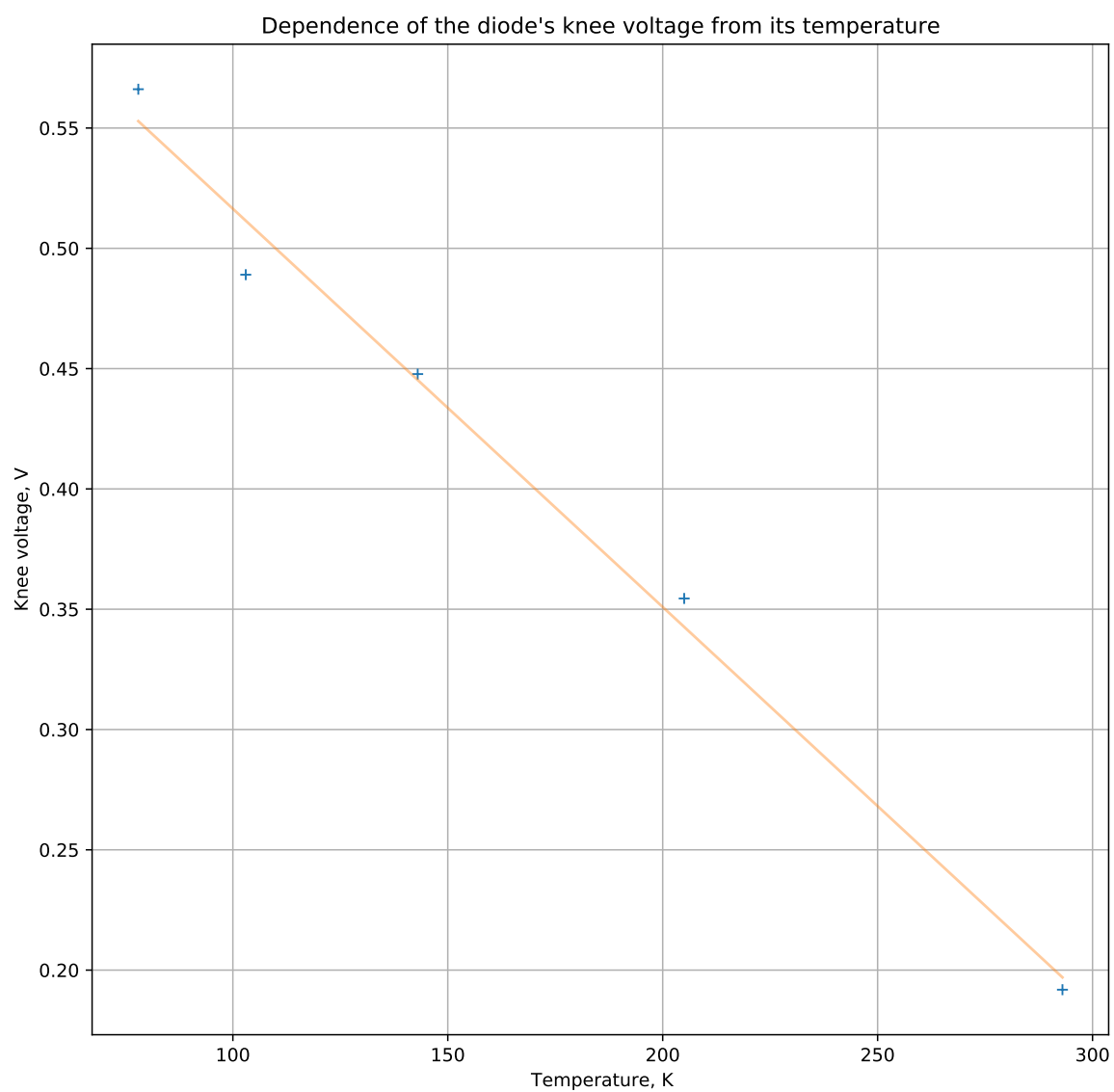


Рис. 3. Зависимость напряжения, при котором происходит открытие диода, от его температуры.

2.3.2. Светодиод

Как и раньше, представим собранные данные на рисунке 4.

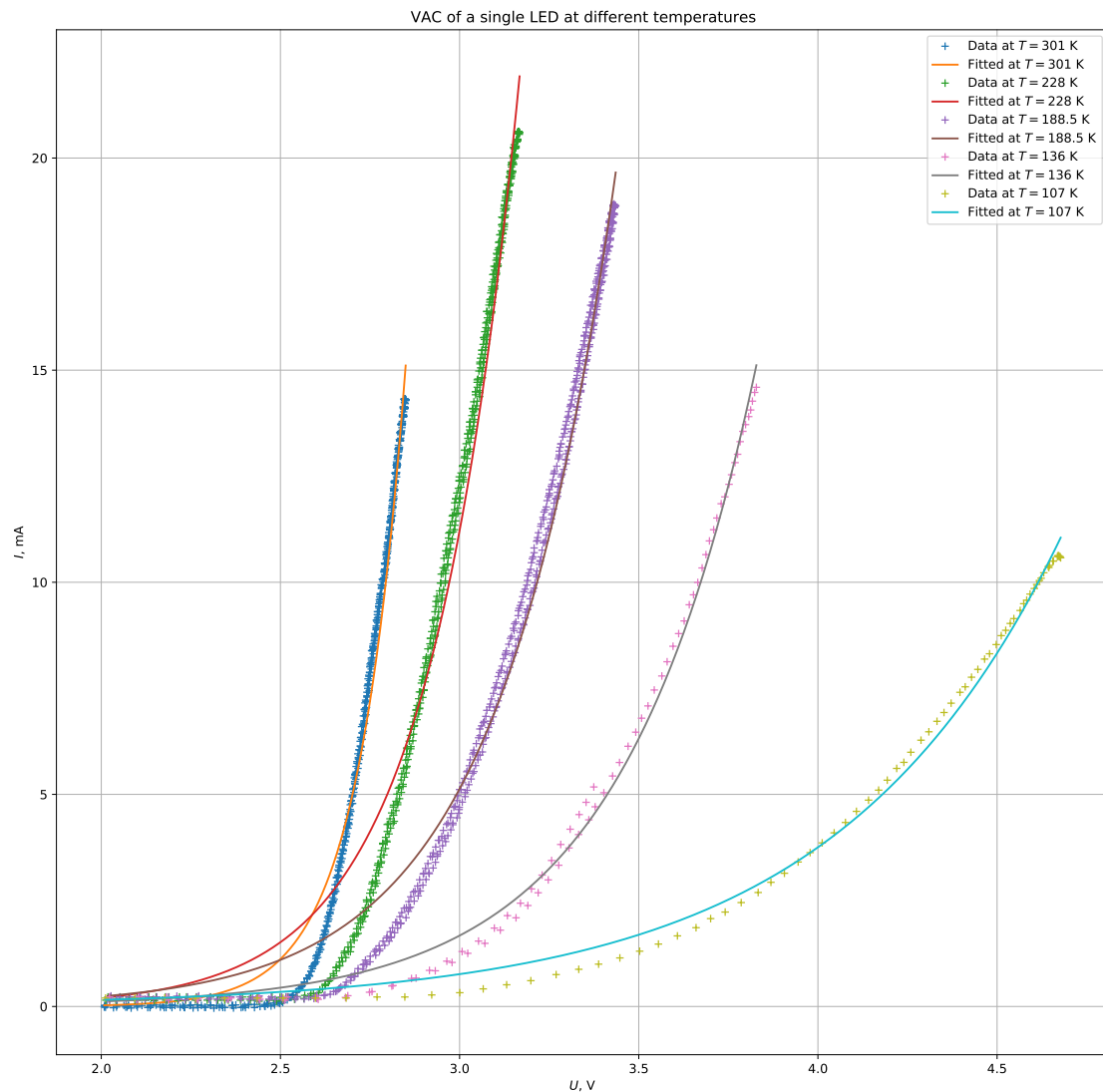


Рис. 4. ВАХ-и светодиода при его различных температурах.

Из полученных графиков видно, что с уменьшением температуры ВАХ все больше похожа на экспоненту, в то время как ВАХ при более высоких температурах больше походят по внешнему виду на ВАХ обычного диода.

Различия, однако, начинаются, если мы посмотрим на аналог "напряжения открытия" для светодиода. Видно, что падение напряжения с ростом температуры происходит уже не линейно, как в случае с обычным диодом, а скорее как $1/x$ (см. рисунок 5).

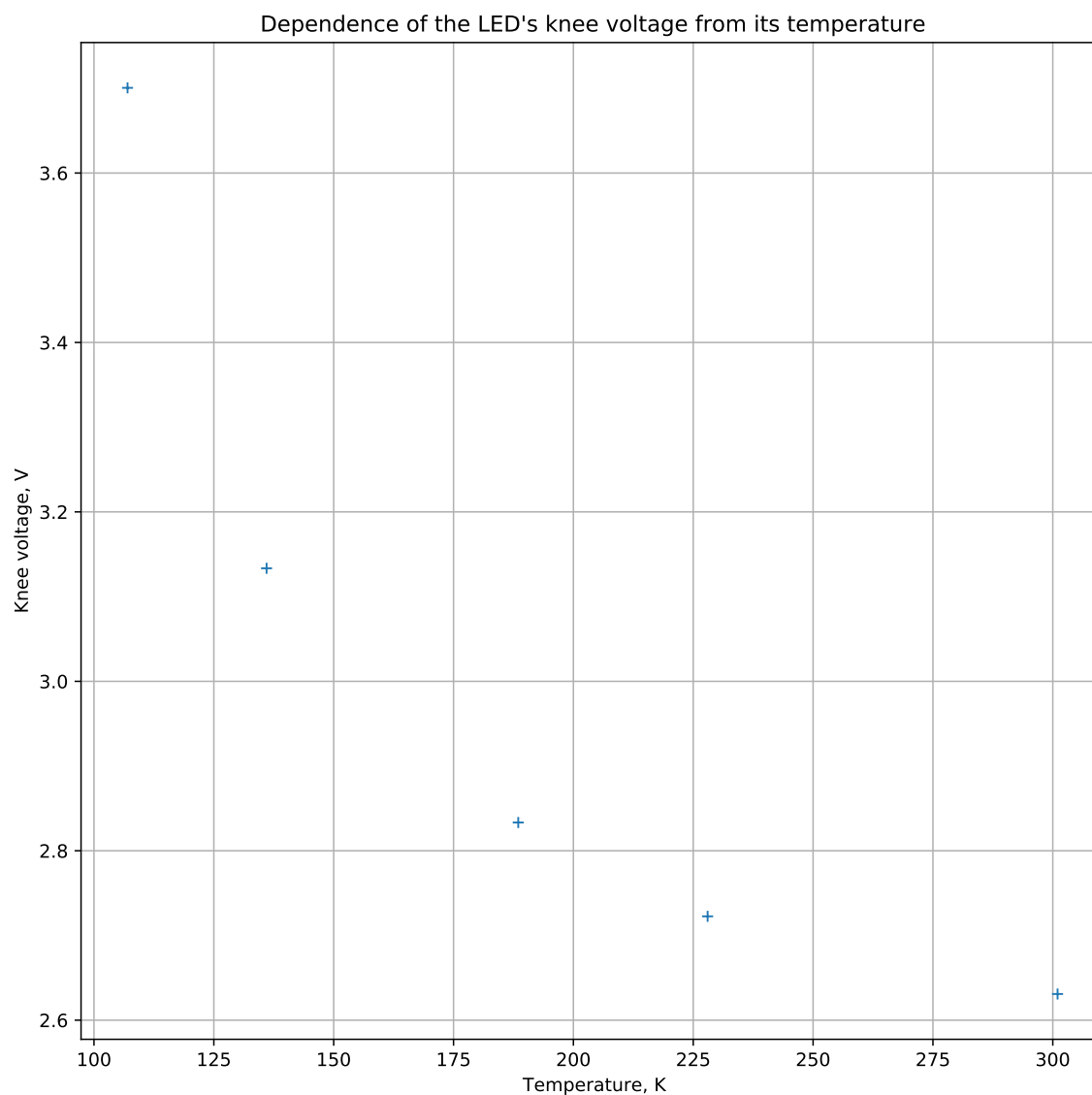


Рис. 5. Зависимость напряжения, при котором происходит "открытие" светодиода, от его температуры.

3. Изучение эффекта Холла

3.1. Цели работы

- 1) Пронаблюдать эффект Холла
- 2) Определить знак носителей заряда в полупроводнике

3) Определить подвижность и концентрацию носителей

3.2. Теория эффекта

3.2.1. Тензор сопротивления в магнитном поле

Уравнение движения заряженной частицы, на которую действует электрическое поле в плоскости распространения заряда и магнитное поле перпендикулярно, можно записать как:

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) - m \frac{\mathbf{v}}{\tau} \quad (1)$$

Где \mathbf{v} - средняя по всем частицам скорость.

Подвижностью носителей заряда будет называться коэффициент пропорциональности между дрейфовой скоростью носителей и приложенным электрическим полем при отсутствии магнитного: $\mu = q\tau/m$

Тогда в стационарном состоянии $d\mathbf{v}/dt = 0$ в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} 1 & -\mu B & 0 \\ \mu B & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \mu \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

Вводя тензор сопротивления: $\mathbf{E} = \hat{\rho} \mathbf{j} = ne\hat{\rho} \mathbf{v}$, где n - концентрация носителей заряда получаем:

$$\hat{\rho} = \frac{1}{ne\mu} \begin{pmatrix} 1 & -\mu B & 0 \\ \mu B & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

И, соответственно, обратный тензор проводимости:

$$\hat{\sigma} = \frac{\hat{\sigma}_0}{1 + (\sigma B)^2} \begin{pmatrix} 1 & \mu B & 0 \\ -\mu B & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где $\sigma_0 = ne\mu$.

3.2.2. Подвижность и концентрация носителей. Схема снятия напряжений

Исследуемый образец (6) представляет из себя узкий и длинный прямоугольный параллелепипед с известными геометрическими параметрами. Токовые контакты (1 и 4) находятся на торцах образца, и ток, соответственно течет вдоль продольного направления, а магнитное поле направлено ему перпендикулярно.

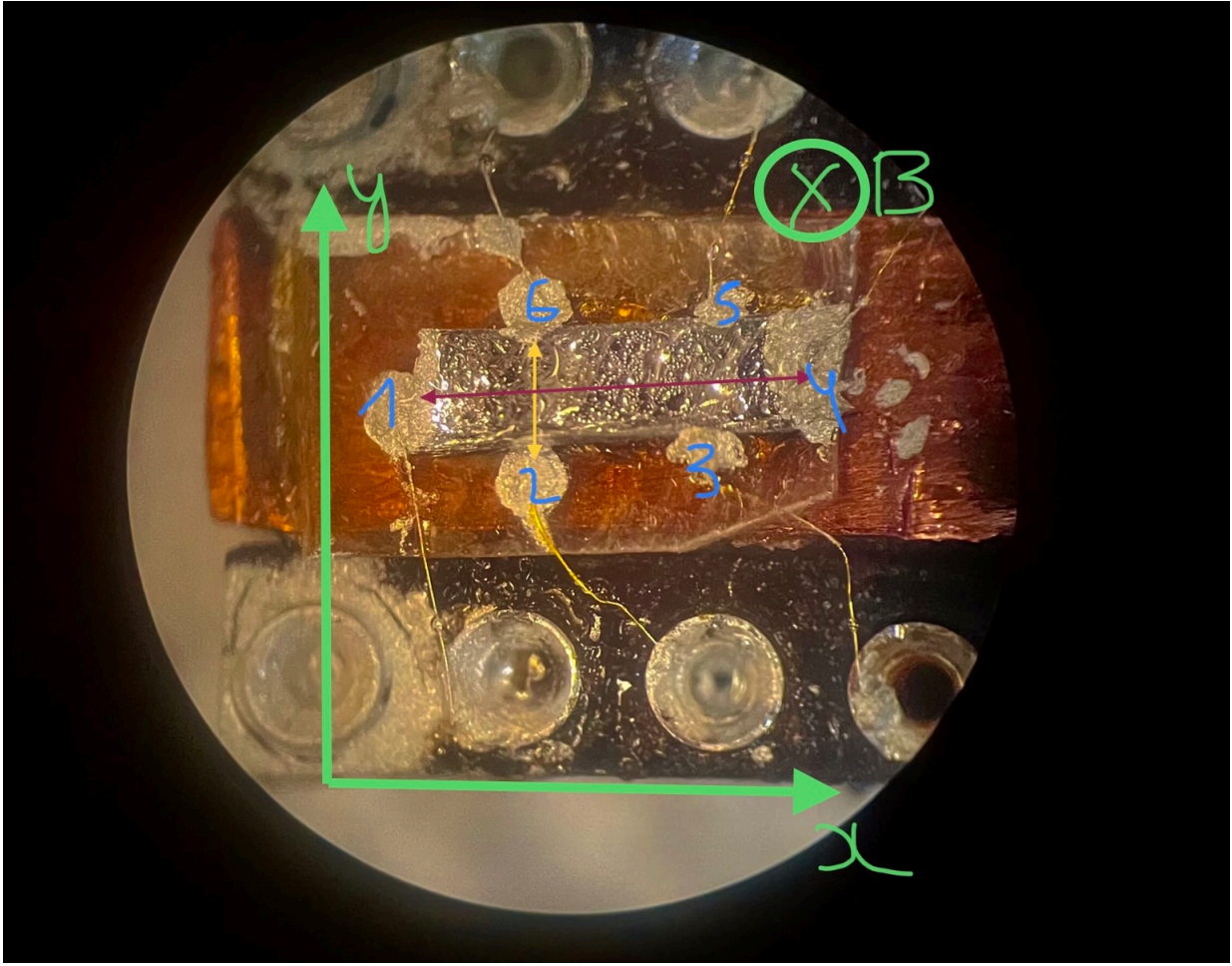


Рис. 6. Образец

Электронны под действием силы Лоренца будут отклоняться от направление тока и, соответственно, создавать разность потенциалов между краями образца (между 6 и 2, 5 и 3). То есть компонента электрического поля будет возрастать до тех пор, пока не компенсирует силу Лоренца.

В установившемся состоянии тока вдоль оси y не будет, то есть:

$$\begin{pmatrix} j_x \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{\hat{\sigma}_0}{1 + (\mu B)^2} \begin{pmatrix} 1 & \mu B \\ -\mu B & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \quad (5)$$

При этом $E_x = U_{xx}/l$ и $E_y = U_{xy}/w$, тогда

$$\mu = \frac{1}{B} \frac{V_y}{V_x} \frac{l}{w} \quad (6)$$

Также, зная направление тока и магнитного поля, а также знак холловского поперечного напряжения, можно определить тип носителей заряда, соответствующему знаку подвижности.

Записывая полный ток через образец, выразим его через концентрацию:

$$I = j_x w h = (\sigma_{xx} E_x + \sigma_{xy} E_y) w h = \sigma_0 w h = n e \mu w h \quad (7)$$

А следовательно

$$n = \left(e h \frac{V_y}{I B} \right)^{-1} \quad (8)$$

3.3. Ход работы

3.3.1. Калибровка магнита

Калибровка магнита с помощью теслометра позволила произвести взаимоднозначное соответствие силы подаваемого тока и напряженности поля внутри магнита. Также было установлено соответствие полярности подключения источника тока и направления поля. Результаты измерений приведены на графике (7) Полученная зависимость: 26.2 мТ/А

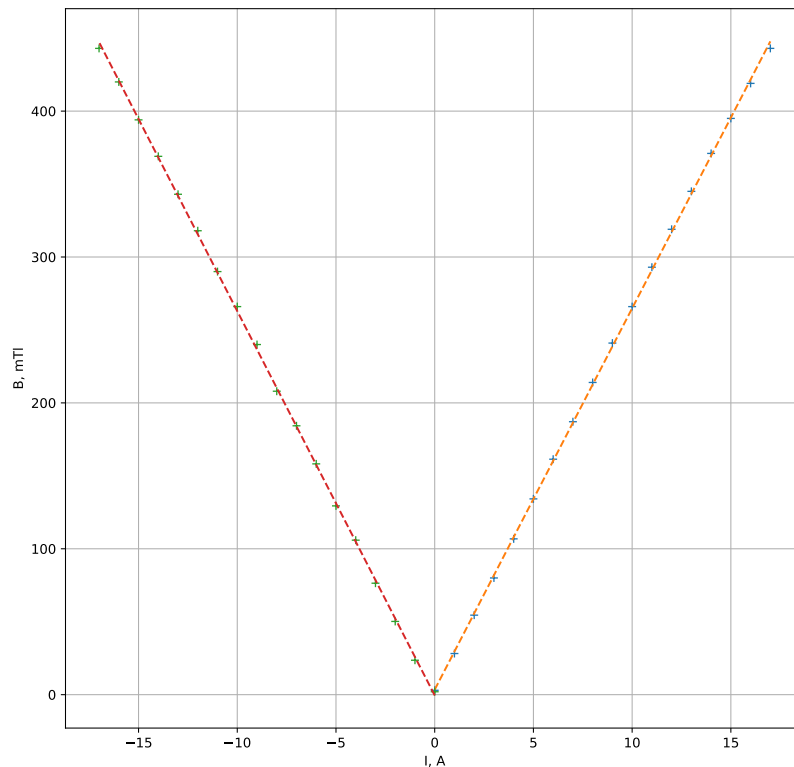


Рис. 7. Зависимость напряженности поля от тока

3.3.2. Снятие данных зависимости продольного и поперечного напряжений от величины и направления магнитного поля

Схема электрической цепи была собрана на вставке в криостат и разводящей коробке с общей землей, соединенной посредством внешним оплеток bnc-разъемов. Это позволяло легко переключаться между контактами для измерения продольного и поперечного напряжений.

На встроенном в усилитель Lock-in генераторе было установлено напряжение 5V, в цепь последовательно был подключен резистор сопротивлением 5.05 kΩ. Такое сопротивление много больше сопротивления на образце ($\sim 60 \text{ Ом}$), а следовательно ток через полупроводник:

$$I = 5 \text{ V} / 5.05 \text{ k}\Omega \approx 1 \text{ mA}$$

Далее образец помещался в магнитное поле и снималась зависимость продольного и поперечного напряжений от величины индукции магнитного поля. Аналогичный опыт проводился

после погружения образца в азот и, соответственно его охлаждение до 77 К.

3.4. Обработка данных

3.4.1. Определение типа носителей заряда

Как уже было сказано выше, тип носителей заряда определяется знаком подвижности и, соответственно, направлением Холловского электрического поля.

На практике это происходило так: в конфигурации, изображенной на рисунке (6) ток был направлен вдоль оси x , а магнитное поле "от нас". Считывание напряжения выдавало разность потенциалов между контактами 2 и 6. Тогда в предположении, что носителями заряда являются электроны, на нижнем краю образца будет под действием силы Лоренца скапливаться отрицательный заряд, а на верхнем положительный. И соответственно мы будем считывать отрицательное напряжение. В действительности же, в данной конфигурации мы наблюдали положительную разность потенциалов между контактами, что напрямую свидетельствует о том, что носители заряда — дырки.

3.4.2. Продольное напряжение

Зависимость продольного сопротивления для $T = 77$ К (между контактами 6 и 5) представлено на рисунке (8)

Теоретически, зависимости продольного сопротивления, а следовательно и напряжения, от величины магнитного поля наблюдаться не должно. И действительно, разброс снятых величин составляет порядка 1 процента. Эти флуктуации можно объяснить неидеальным расположением контактов относительно направления тока (то есть возникновение холловского напряжения), слабой точностью позиционирования образца в магнитном поле и т.д.

Значения измеренного продольного напряжения для комнатной температуры:

$$V_{xx} = 229 \mu V$$

Для 77К:

$$V_{xx} = 17.46 \mu V$$

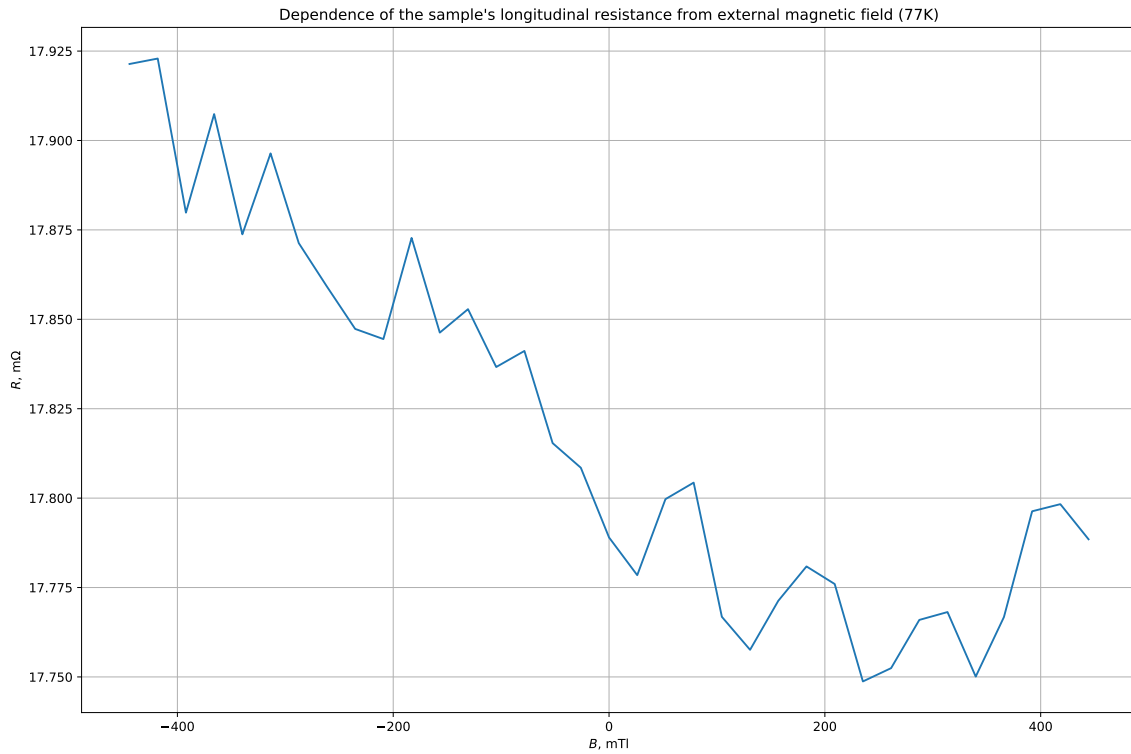


Рис. 8. Зависимость продольного сопротивления от поля

3.4.3. Поперечное сопротивление

Данные зависимости Холловского сопротивления от величины индукции магнитного поля приведены на рисунке (??) для комнатной температуры и на рисунке (??) для температуры азота.

Напомним формулы для подвижности носителей заряда и их концентрации:

$$\mu = \frac{1}{B} \frac{V_y}{V_x} \frac{l}{w}; \quad n = \left(eh \frac{V_y}{IB} \right)^{-1}$$

При этом $V_y/(IB) = R_y/B$ — наклон прямой зависимости холловского сопротивления от магнитного поля. $h = 180 \mu\text{м}$ — толщина образца.

Таким образом концентрация носителей заряда при температуре 77K:

$$n \approx 15 \cdot 10^{19} \text{см}^{-3}$$

При комнатной температуре:

$$n \approx 21 \cdot 10^{19} \text{см}^{-3}$$

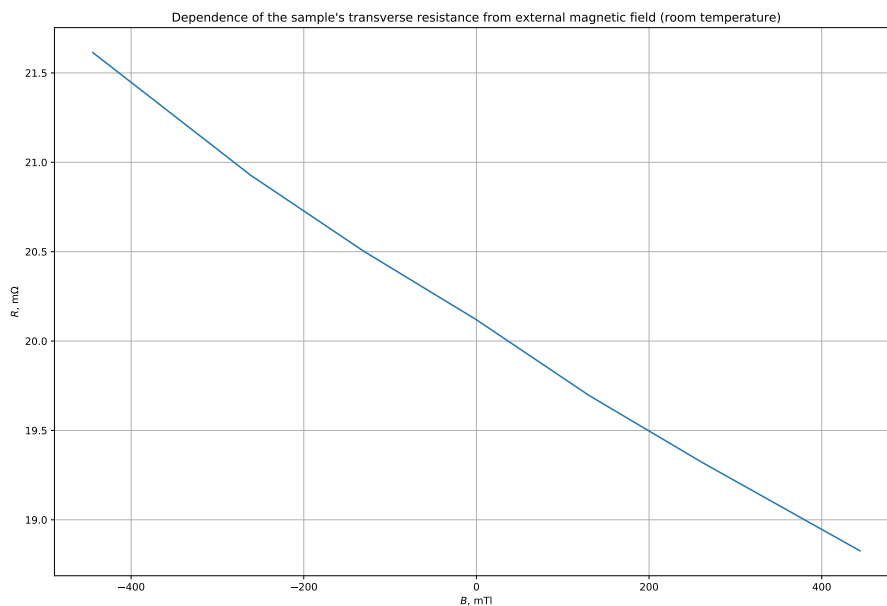


Рис. 9. Зависимость поперечного сопротивления от поля (комнатная температура)

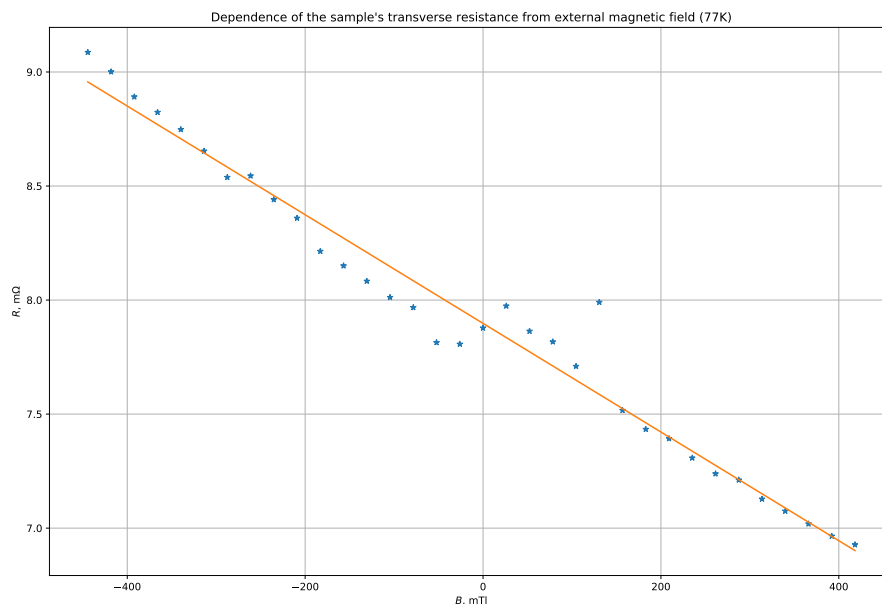


Рис. 10. Зависимость поперечного сопротивления от поля (температура жидкого азота)

Измеряя отношение расстояний между продольными и поперечными контактами: $l_1/w=1.7$, находим значение подвижности при комнатной температуре:

$$\mu \approx 0.72 \frac{\text{m}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

И при 77К:

$$\mu \approx 3.2 \frac{\text{m}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

Наблюдаемый эффект возникновения поперечного напряжения линеен по полю. При этом заметим, что при нулевой напряженности магнитного поля, вопреки теоретическому ожиданию, все равно существует ненулевое напряжение. Объясняется это, как уже было сказано выше, неточностью расположения контактов и рядом других факторов.

Тогда симметризацией тензора напряжения и сопротивления мы получим постоянное значение, а антисимметризацией линейное по полю:

$$\rho_{xx} = \frac{R(B) + R(-B)}{2}; \rho_{xy} = \frac{R(B) - R(-B)}{2}$$

Подставляя измеренные значения получаем для 298К:

$$\rho_{xx} \approx 20,1 \text{ m}\Omega; \quad \rho_{xy} \approx 0.00312B \text{ m}\Omega$$

И для 77К:

$$\rho_{xx} \approx 7,9 \text{ m}\Omega; \quad \rho_{xy} \approx 0.00238B \text{ m}\Omega$$