

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Физический факультет

Кафедра общей физики

Перепелов Александр Евгеньевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование эффекта Холла в переменном  
магнитном поле**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа 19314

**Научный руководитель**

д.ф.-м.н. Д.С. Чуркин

Оценка научного руководителя

---

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Преподаватель практикума**

к.ф.-м.н. И.И. Морозов

Оценка преподавателя практикума

---

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Куратор практикума**

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

---

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Новосибирск, 2020

## **Аннотация**

Целью данной работы было изучение свойств полупроводников, помещенных в электромагнитное поле, исследование эффекта Холла в полупроводниках. Для этого через полупроводниковый образец - датчик Холла - пропускался ток в присутствии внешнего магнитного поля, создаваемого электромагнитом, были определены тип и величина проводимости, постоянная Холла, концентрация и подвижность носителей заряда в полупроводниковом образце - датчике Холла. Проведена оценка погрешностей результатов.

**Ключевые слова:** эффект Холла, датчик Холла, полупроводник

# Содержание

<b>1. Введение</b>	<b>3</b>
<b>2. Теоретическая часть</b>	<b>4</b>
2.1. Общие сведения о полупроводниках . . . . .	4
2.2. Движение заряженных частиц в электромагнитном поле . .	5
2.3. Эффект Холла . . . . .	6
<b>3. Экспериментальная часть</b>	<b>7</b>
3.1. Описание установки . . . . .	7
3.2. Методика измерений . . . . .	8
<b>4. Результаты</b>	<b>9</b>
<b>5. Обработка результатов</b>	<b>10</b>
<b>6. Вывод</b>	<b>11</b>

# 1. Введение

Современный мир нельзя представить без полупроводниковых устройств: диоды, транзисторы, микросхемы - всё это в составе всевозможных гаджетов используется каждый день каждым из нас. Минитюаризация техники, работавшей раньше на электронных лампах, стала возможной благодаря исследованию полупроводников. Вот что говорит о полупроводниках Р. Фейнман:

*“Одним из самых замечательных и волнующих открытий последних лет явилось применение физики твёрдого тела к разработке ряда электрических устройств, таких, как транзисторы. Изучение полупроводников привело к открытию их полезных свойств и ко множеству практических применений.”*

В связи с их повсеместным использованием, важно знать различные методы исследования свойств полупроводников. Один из методов, применяемый в данной работе - это использование эффекта Холла - возникновения поперечной ЭДС при пропускании тока через образец в присутствии магнитного поля. В применении к полупроводникам он позволяет определить тип проводимости, концентрацию и подвижность носителей заряда и другие параметры.

Но возможно использование эффекта Холла и в обратную сторону: для измерения величины магнитного поля — так работают датчики Холла. Датчики Холла применяются в сервомоторах, в системах зажигания ДВС, а также для бесконтактного измерения силы тока.

Целью работы являлось исследование эффекта Холла в полупроводнике, помещенном в переменное магнитное поле. Эксперимент проводился на базе электромагнитного практикума ФФ НГУ. Были поставлены задачи теоретического описания эффекта Холла в беспримесном полупроводнике, а также определения типа и величины проводимости, концентрации и подвижности носителей заряда, постоянной Холла.

## 2. Теоретическая часть

### 2.1. Общие сведения о полупроводниках

В соответствии с зонной теорией строения твердого тела, при сближении атомов вещества внешние электронные оболочки перекрываются, и электроны с определенного энергетического уровня одного атома получают возможность переходить без затрат энергии на соответствующий уровень соседнего атома. Атомные орбиты отдельных атомов становятся коллективными, а оболочки соединяются в сплошные полосы, называемые *зонами*, и электроны могут свободно перемещаться вдоль всего твердого тела. Так как внутренние электронные оболочки атомов полностью заполнены, то соответствующие зоны тоже полностью заполнены — таким образом, электроны с внутренних оболочек не могут переносить электрический ток. В свою очередь, в зоне, образовавшейся из верхних уровней, на которых располагались валентные электроны, дело может обстоять иначе. Рассмотрим, как распределены по энергиям электроны из внешних электронных оболочек в различных веществах.

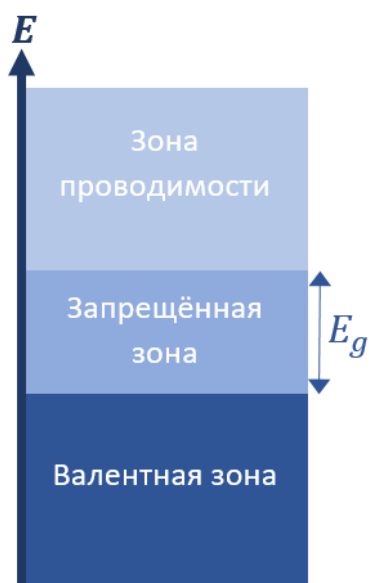


Рис. 1. Диаграмма распределения валентных электронов по энергиям в полупроводниках и диэлектриках

В полупроводниках и диэлектриках имеется целиком заполненная валентная зона, а также промежуток до следующей зоны, называемый *запрещенной зоной*, - величины энергий, которые электроны иметь не могут. Если электрон каким-то образом получает дополнительную энергию, превышающую ширину запрещенной зоны  $E_g$  (gap), он попадает в зону проводимости и становится коллективизированным. Полупроводники и диэлектрики отличаются друг от друга лишь количественным образом - величиной  $E_g$ , у полупроводников она обычно до 3 эВ, у диэлектриков - выше.

У металлов же отличие качественное: валентная зона перекрывается с зоной проводимости, а запрещенная зона отсутствует. Это происходит потому, что связь электронов с ядрами очень слабая, и любое повышение температуры дает электрону достаточно энергии, чтобы начать двигаться по всему твердому телу и переносить электрический ток.

Когда электрон переходит из связанного состояния в атоме в свободное состояние в зоне проводимости, в ионизированном атоме в валентной зоне остается “вакантное место” — так называемая *дырка*. Когда на место дырки перепрыгивает соседний электрон, дырка перемещается в противоположном направлении —

таким образом, дырки ведут себя, как положительно заряженные частицы.

В чистых полупроводниках при комнатной температуре ионизируется очень небольшое количество атомов, так как средняя энергия частиц  $\frac{3}{2}kT$  много меньше  $E_g$ , соответственно число частиц с большей энергией, чем  $E_g$  (а они имеют максвелловское распределение), крайне мало. Говорят о малой *собственной проводимости* (число дырок и электронов проводимости одинаково). Однако, если ввести в полупроводник примесные легко-ионизируемые атомы, то проводимость резко возрастёт: если внесённые атомы имеют бóльшую валентность, чем атомы полупроводника (то есть, лишние электроны), возникнет примесная *электронная проводимость* (п-проводимость); если меньшую - *дырочная проводимость* (р-проводимость).

## 2.2. Движение заряженных частиц в электромагнитном поле

Известно, что на заряженную частицу, движущуюся в электрическом и магнитном полях, действует сила Лоренца:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + \frac{q}{c}[\mathbf{v} \times \mathbf{B}],$$

где  $c$  - скорость света,  $q$  - заряд частицы,  $v$  - скорость частицы.

Если электрическое и магнитное поле перпендикулярны, и  $E < B$ , то, при отсутствии столкновений с другими частицами, траектория движения – циклоида: частица движется по окружности радиуса

$$R = \frac{pc}{qB} \approx \frac{mvc}{qB}$$

с угловой частотой

$$\omega = \frac{qB}{\gamma mc} \approx \frac{qB}{mc},$$

центр окружности равномерно движется в направлении, перпендикулярном  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{E}$ , со скоростью дрейфа

$$\mathbf{v}_d = \frac{[\mathbf{E} \times \mathbf{B}]}{B^2}c.$$

Учтём теперь столкновение частиц в веществе. Пусть из-за теплового хаотического движения средняя по модулю скорость частиц равна  $v$ . Тогда среднее время между столкновениями равно

$$\tau = \frac{\langle l \rangle}{v},$$

где  $\langle l \rangle$  - длина свободного пробега.

За время  $\tau$  частица под действием внешнего электрического поля движется равноускоренно и получает некоторую добавку к скорости. После столкновения с атомами решетки частица рассеивается изотропно, и проекция её скорости на любое направление равна нулю. Далее она опять ускоряется, сталкивается, и таким образом, совершает дрейф с постоянной скоростью. Если добавка к скорости за время  $\tau$  много меньше средней по модулю тепловой скорости, то поле называется слабым. В слабом электрическом поле дрейфовая скорость пропорциональна напряжённости поля:

$$\mathbf{v}_d = u\mathbf{E}, \quad (1)$$

где  $u$  - подвижность носителей заряда. Подвижность связана с проводимостью  $\sigma$  соотношением

$$u = \frac{v_d}{E} = \frac{\sigma v_d}{j} = \frac{\sigma v_d}{qn v_d} = \frac{\sigma}{qn} \quad (2)$$

### 2.3. Эффект Холла

Рассмотрим однородный изотропный полупроводник в виде прямоугольного параллелепипеда (Рис. 2). Если магнитного поля нет, то при

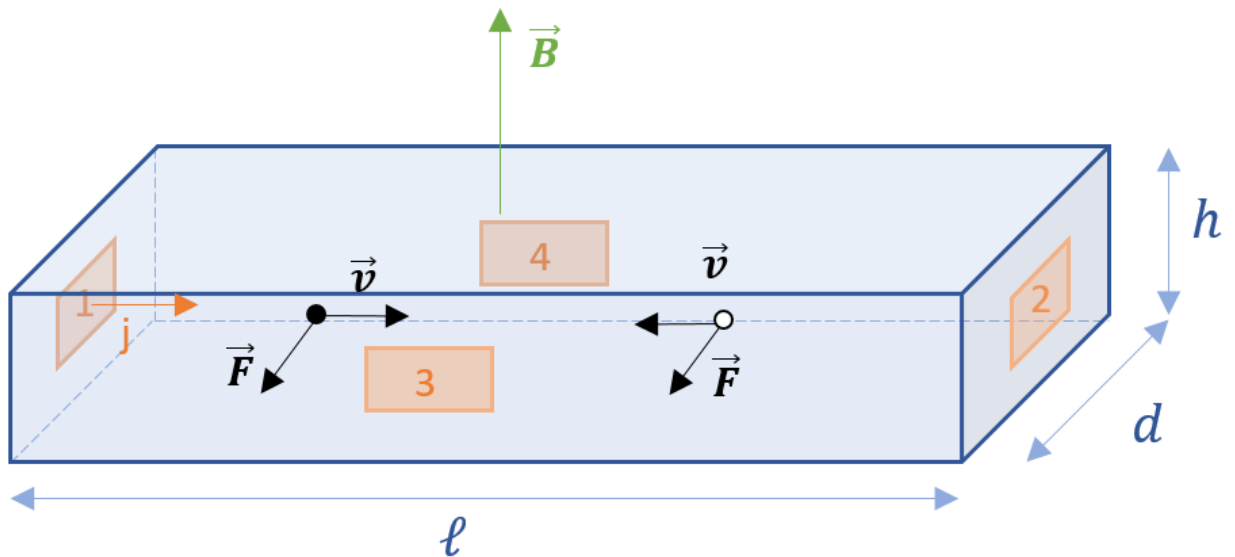


Рис. 2. Полупроводник. 1, 2 - токовые контакты; 3, 4 - потенциальные контакты

пропускании тока между контактами 1 и 2 напряжение между контактами 3 и 4 равно нулю в силу симметрии. Включим теперь магнитное поле  $\mathbf{B}$ , перпендикулярное току. Так как носители тока имеют как тепловую  $\mathbf{v}_T$ , так и дрейфовую  $\mathbf{v}_d$  составляющие скорости, сила Лоренца разложится на три слагаемых:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + \frac{q}{c}[\mathbf{v}_T \times \mathbf{B}] + \frac{q}{c}[\mathbf{v}_d \times \mathbf{B}].$$

При усреднении по времени тепловая скорость пропадает:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + \frac{q}{c}[\mathbf{v}_d \times \mathbf{B}].$$

Заметим, что магнитное поле отклоняет как положительно, так и отрицательно заряженные частицы в одну сторону — к грани 3.

Пусть, для простоты, полупроводник имеет только р-проводимость. Тогда после включения магнитного поля на грани 3 начинает скапливаться положительный заряд, который создаёт поле  $\mathbf{E}_H$  (*поле Холла*), направленное перпендикулярно грани 3 (Рис. 3). Отметим, что  $\mathbf{E}_H$  меняет знак при изменении знака  $\mathbf{B}$ . Заряд будет расти до тех пор, пока сила действия поля  $\mathbf{E}_H$  на частицы не уравновесит магнитную составляющую силы Лоренца:

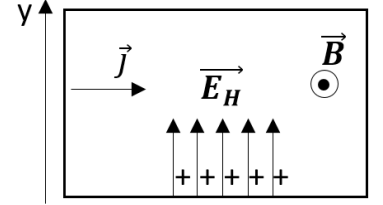


Рис. 3. Поле Холла

$$q\mathbf{E}_H = -\frac{q}{c}[\mathbf{v}_d \times \mathbf{B}].$$

В проекции на ось  $y$  (используем соотношение для плотности тока  $j = qnv_d$ , где  $n$  - концентрация носителей заряда):

$$E_H = \frac{v_d B}{c} = \frac{jB}{qnc}.$$

Тогда напряжение между точками 3 и 4 (называемое *ЭДС Холла*) равно:

$$U_H = \int_3^4 (\mathbf{E} + E_H \mathbf{e}_y) d\mathbf{l} = E_H d = \frac{IB}{qnc} = \frac{R_H B}{h} I, R_H = \frac{1}{qn}, \quad (3)$$

где  $R_H$  - *постоянная Холла*.

Если полупроводник имеет, наоборот, только n-проводимость, то у постоянной Холла будет противоположный знак из-за изменения знака  $q$ . Таким образом, по знаку постоянной Холла можно выяснить тип проводимости полупроводника, а по её величине - концентрацию  $n$  носителей заряда.

## 3. Экспериментальная часть

### 3.1. Описание установки

Схема установки приведена на рис. 4. Исследуемый полупроводниковый образец в виде прямоугольной пластинки размерами  $\ell \times d \times h$  помещается в однородное постоянное магнитное поле, создаваемое электромагнитом. Величина поля  $B$  пропорциональна току в катушках с коэффициентом



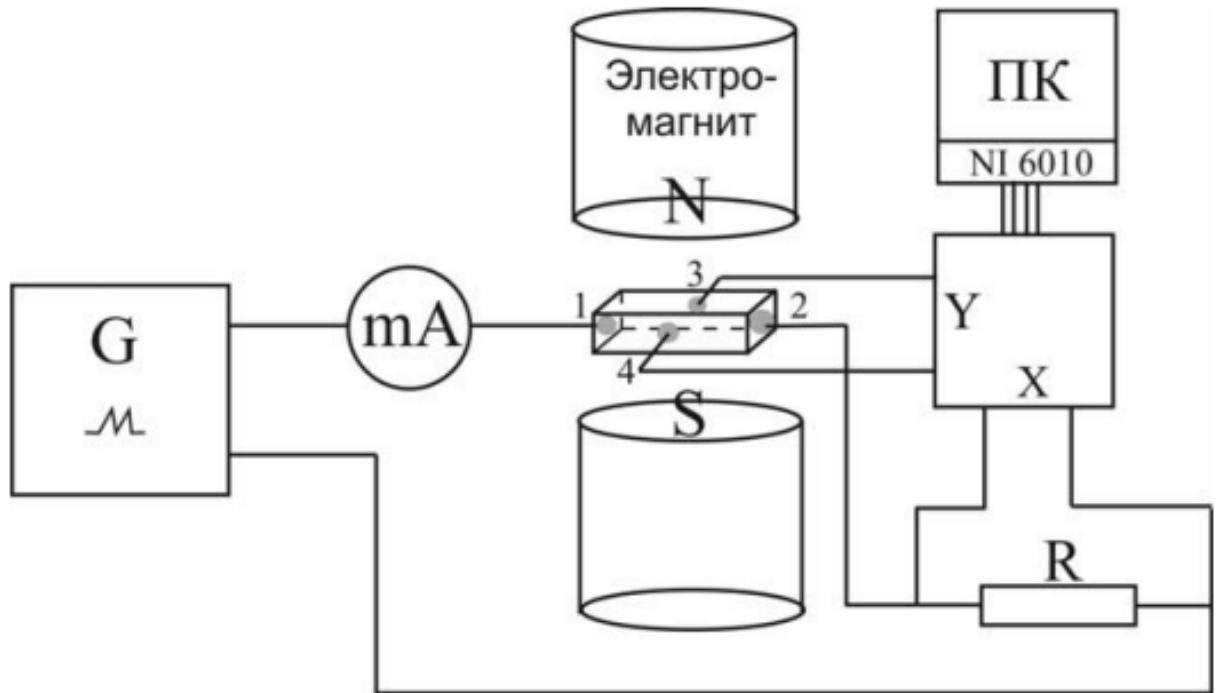


Рис. 4. Схема установки

пропорциональности  $k = 1.927$  Тл/В. Ток между контактами 1 и 2 создаётся источником линейно меняющегося напряжения. Последовательно с образцом подключено известное сопротивление  $R = 24$  Ом, напряжение на котором пропорционально току через образец и подаётся на вход X переходного модуля, содержащего соединительный блок NI CB-37F-LP. На вход Y подаётся разность потенциалов между точками 3 и 4. Блок соединён с платой сбора данных National Instruments NI 6010, позволяющей регистрировать осциллограммы сигналов с помощью виртуального осциллографа программного комплекса LabView.

### 3.2. Методика измерений

Для того, чтобы определить тип проводимости образца, пустим ток через образец и катушки электромагнита, чтобы направление тока и магнитного поля были такими же, как на Рис. 2.

Измерим напряжение  $U_{34}$ . Полученное значение – это сумма ЭДС Холла и различных сторонних ЭДС: контактной разности потенциалов, термо-ЭДС и других. Чтобы исключить их, воспользуемся тем фактом, что они не меняют знак при изменении направления магнитного поля. Перевернём образец и измерим новое напряжение между контактами 3 и 4 -

$U'_{34}$ . Тогда ЭДС Холла будет равна

$$U_H = \frac{U_{34} - U'_{34}}{2}.$$

Поскольку сердечник электромагнита изготовлен из ферромагнитного материала, то даже при отсутствии тока в катушках сохраняется некоторое остаточное поле  $B_0$ , поэтому в формуле (3) нужно его учесть:

$$U_H = \frac{R_H(B + B_0)}{h} I \quad (4)$$

Меняя напряжение источника, построим зависимость  $U_H$  от тока через образец  $I_{12}$ . Методом наименьших квадратов построим аппроксимирующую прямую, её угловой коэффициент -  $k_i$ . Чтобы найти  $R_H$  и  $B_0$ , перепишем уравнение (4) в виде:

$$B = \frac{h}{R_H} k_i - B_0. \quad (5)$$

Для разных токов  $i$  через катушки получим зависимость  $B$  от  $k_i$ , построим аппроксимирующую прямую и по её угловому коэффициенту найдём постоянную Холла  $R_H$ . Если  $R_H$  отрицательна, полупроводник имеет  $n$ -проводимость; положительна —  $p$ -проводимость. Из соотношения  $R_H = 1/qn$  найдём концентрацию носителей заряда.

Для определения подвижности носителей заряда воспользуемся соотношением (2) между подвижностью и проводимостью. Однако прежде нужно убедиться в омичности контактов 1-2, иначе вообще нельзя говорить о проводимости. Если  $U_H \ll U_{34}$ , то есть угол между  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{E} + \mathbf{E}_H$  мал (см. Рис. 3), то сопротивление между гранями 1 и 2 примерно равно сопротивлению прямоугольного параллелепипеда, а для него проводимость  $\sigma$  находится из формулы

$$r = \frac{1}{\sigma} \frac{\ell}{hd}, \quad (6)$$

где  $r$  - сопротивление образца (измеряем мультиметром).

## 4. Результаты

Результаты измерений вольт-амперной характеристики образца для различных величин тока через катушки электромагнита приведены на Рис. 5. Пунктиром обозначены аппроксимирующие прямые, построенные по методу наименьших квадратов.

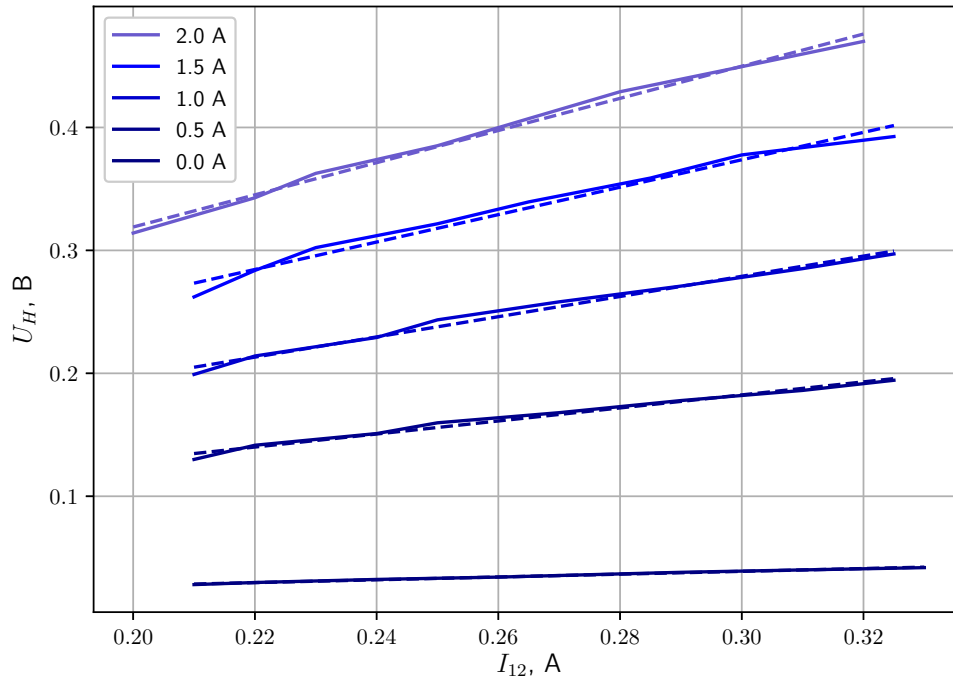


Рис. 5. Зависимость ЭДС Холла от тока через образец для разных величин тока в катушках.

## 5. Обработка результатов

Угловые коэффициенты  $k_i$  аппроксимирующих прямых приведены в Таблице 1. Зависимость (5) приведена на Рис. 6. Её аппроксимирующая прямая также построена по методу наименьших квадратов, и её угловой коэффициент равен  $\alpha = (2.53 \pm 0.19)$  Тл. С другой стороны, из формулы (5)  $\alpha = h/R_H$ . Вычисленное значение

$$R_H = (1.52 \pm 0.19) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{Кл.}$$

Таким образом, образец имеет дырочную проводимость, а концентрация дырок равна

$$n = (4.1 \pm 0.59) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

Проводимость образца, вычисленная по формуле (6), равна

$$\sigma = 595 \pm 23 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}.$$

Подвижность дырок, вычисленная по формуле (2), равна

$$u = (9.04 \pm 1.48) \cdot 10^3 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$$

Таблица 1. Коэффициенты наклона прямой  $U_H(I)$ .

$I, \text{A}$	$k_i, \text{B/A}$
0	$0.115 \pm 0.042$
0.5	$0.53 \pm 0.066$
1	$0.822 \pm 0.036$
1.5	$1.115 \pm 0.025$
2	$1.308 \pm 0.003$

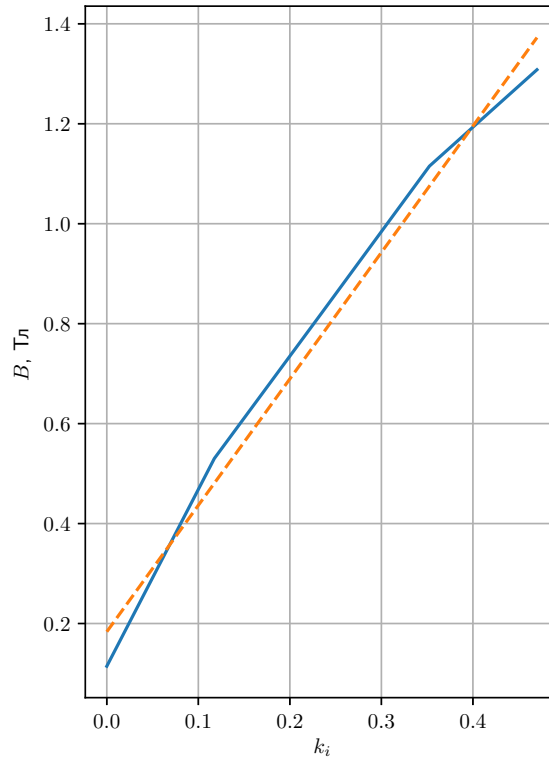


Рис. 6. Зависимость  $B(k_i)$

## 6. Вывод

Экспериментально изучен эффект Холла в полупроводниках, определены основные характеристики датчика Холла. Главным источником погрешностей является то, что в теоретической части рассматривается только чистый полупроводник без примесей, тогда как образец вполне может иметь примеси, количество которых неизвестно.

Также был приобретен полезный навык работы с системой вёрстки  $\text{\LaTeX}$ .

## Список литературы

- [1] Лабораторный практикум "Электричество и магнетизм". Выпуск 4. Электрические и магнитные свойства твердых тел. Князев Б.А. Новосибирск: КОФ НГУ, 2008. - 129 с.
- [2] Магнитные измерения. Изд. 2, Чечерников В.И. Издательство МГУ, 1969. - 388 с.
- [3] Набор и вёрстка в системе  $\text{\LaTeX}$ . Изд. 3, Львовский С.М., 2003. - 448 с.