

Эффект Холла в полупроводниках*

Иван Едигарьев,
Московский Физико-Технический Институт
Факультет Общей и Прикладной Физики, 526т

Цель работы: 1) измерение подвижности и концентрации носителей заряда в полупроводниках.

В работе используются: электромагнит с источником питания, амперметр, миллиамперметр, милливольтметр, реостат, цифровой вольтметр, источник питания (1,5 В), образцы легированного германия.

I. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ СПРАВКА.

Значение для ЭДС Холла даётся выражением:

$$\mathcal{E}_x = -\frac{IB}{nea} = -R_x \frac{IB}{a} \quad (1)$$

Константа R_x называется постоянной Холла и даётся выражением:

$$R_x = \frac{1}{ne} \quad (2)$$

Также будет полезным записать выражение для значения удельной электрической проводимости:

$$\sigma = enb \quad (3)$$

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА.

Электрическая схема установки для измерения ЭДС Холла представлена на рис. 1.

В зазоре электромагнита (рис. 1а) создаётся постоянное магнитное поле, величину которого можно менять с помощью регулятора R_1 источника питания электромагнита. Ток питания электромагнита измеряется амперметром A_1 . Разъём K_1 позволяет менять направление тока в обмотках электромагнита.

Градуировка магнита проводится при помощи милливольтметра. Описание милливольтметра и правила работы с ним приведены на с. 148.[1]

Образец из легированного германия, смонтированный в специальном держателе (рис. 1б), подключается к источнику питания ($\sim 1,5$ В).

При замыкании ключа K_2 вдоль длинной стороны образца течёт ток, величина которого регулируется реостатом R_1 и измеряется миллиамперметром A_2 .

В образце с током, помещённом в зазор электромагнита, между контактами 3 и 4 возникает разность потенциалов U_{34} , которая измеряется с помощью цифрового вольтметра.

Иногда контакты 3 и 4 вследствие неточности подпайки не лежат на одной эквипотенциали, и тогда напряжение между ними связано не только с эффектом Холла, но и с омическим падением напряжения, вызванным протеканием основного тока через образец. Измеряемая разность потенциалов при одном направлении магнитного поля равна сумме ЭДС Холла и омического падения напряжения, а при другом — их разности. В этом случае ЭДС Холла \mathcal{E}_x может быть определена как половина алгебраической разности показаний вольтметра, полученных для двух противоположных направлений магнитного поля в зазоре. Знак измеряемого напряжения высвечивается на цифровом табло вольтметра.

Можно исключить влияние омического падения напряжения иначе, если при каждом токе через образец измерять напряжение между точками 3 и 4 в отсутствие магнитного поля. При фиксированном токе через образец это дополнительное к ЭДС Холла на-

* 3.3.4

пряжение U_0 остаётся неизменным. От него следует (с учётом знака) отсчитывать величину ЭДС Холла:

$$\mathcal{E}_x = U_{34} \pm U_0 \quad (4)$$

При таком способе измерения нет необходимости проводить повторные измерения с противоположным направлением магнитного поля. По знаку \mathcal{E}_x можно определить характер проводимости — электронный или дырочный. Для этого необходимо знать направление тока в образце и направление магнитного поля.

Измерив ток I в образце и напряжение U_{35} между контактами 3 и 5 в отсутствие магнитного поля, можно, зная параметры образца, рассчитать проводимость материала образца по формуле

$$\sigma = \frac{IL_{35}}{U_{35}al} \quad (5)$$

где L_{35} — расстояние между контактами 3 и 5, a — толщина образца, l — его ширина.

III. ЗАДАНИЕ.

В работе предлагается исследовать зависимость ЭДС Холла от величины магнитного поля при различных токах через образец для определения константы Холла; определить знак носителей заряда и проводимость материала образца.

1. Подготовьте приборы к работе.
2. Проверьте работу цепи питания образца. Ток через образец не должен превышать 1 мА.
3. Проверьте работу цепи магнита. Определите диапазон изменения тока через магнит.
4. Прокалибруйте электромагнит — определите связь между индукцией B магнитного поля в зазоре электромагнита и током I_m через обмотки магнита. Для этого с помощью милливольтметра снимите зависимость магнитного потока Φ , пронизывающего пробную катушку, находящуюся в зазоре, от тока I_m ($\Phi = BSN$). Значение SN (произведение площади сечения контура катушки на число витков в ней) указано на держателе катушки.
5. Проведите измерение ЭДС Холла. Для этого вставьте образец в зазор выключенного электромагнита и определите напряжение U_0 между холловскими контактами 3 и 4 при минимальном токе через образец ($\simeq 0,2$ мА). Это напряжение U_0 вызвано несовершенством контактов 3, 4 и при фиксированном токе через образец остаётся неизменным. Значение U_0 с учётом знака следует принять за нулевое.

Включите электромагнит и снимите зависимость напряжения U_{34} от тока I_m через обмотки магнита при фиксированном токе через образец.

Проведите измерения $U_{34} = f(I_m)$ при постоянном токе через образец для 6-8 его значений в интервале 0,2-1 мА. При каждом новом значении тока через образец величина U_0 будет иметь своё значение.

При максимальном токе через образец ($\simeq 1$ мА) проведите измерения $U_{34} = f(I_m)$ при другом направлении магнитного поля.

6. Определите знак носителей в образце. Для этого необходимо знать направление тока через образец, направление магнитного поля и знак ЭДС Холла.

Направление тока в образце показано знаками «+» и «-» на рис. 1. Направление тока в обмотках электромагнита при установке разъёма K_1 в положение I показано стрелкой на торце магнита.

Зарисуйте в тетради образец. Укажите на рисунке направления тока, магнитного поля и отклонение носителей. По знаку (\pm) на клеммах цифрового вольтметра определите характер проводимости.

7. Для определения удельной проводимости удалите держатель с образцом из зазора. Подключите к клеммам « H_x » и « L_x » вольтметра потенциальные концы 3 и 5. Измерьте падение напряжения между ними при токе через образец 1 мА.

8. Запишите характеристики приборов и параметры образца L_{35} , a , l , указанные на держателе.

Обработка результатов

1. Постройте график зависимости $B = f(I_m)$
2. Рассчитайте ЭДС Холла по формуле (4) и постройте на одном листе семейство характеристик $\mathcal{E}_x = f(B)$ при разных значениях тока I через образец. Определите угловые коэффициенты $k(I) = \Delta \mathcal{E}_x / \Delta B$ полученных прямых.

Постройте график $k = f(I)$. Рассчитайте угловой коэффициент прямой и по формуле (1) определите величину постоянной Холла R_H . Рассчитайте концентрацию n носителей тока в образце по формуле (2).

Оцените погрешность результата и сравните результат с табличным.

3. Рассчитайте удельную проводимость σ материала образца по формуле (5).

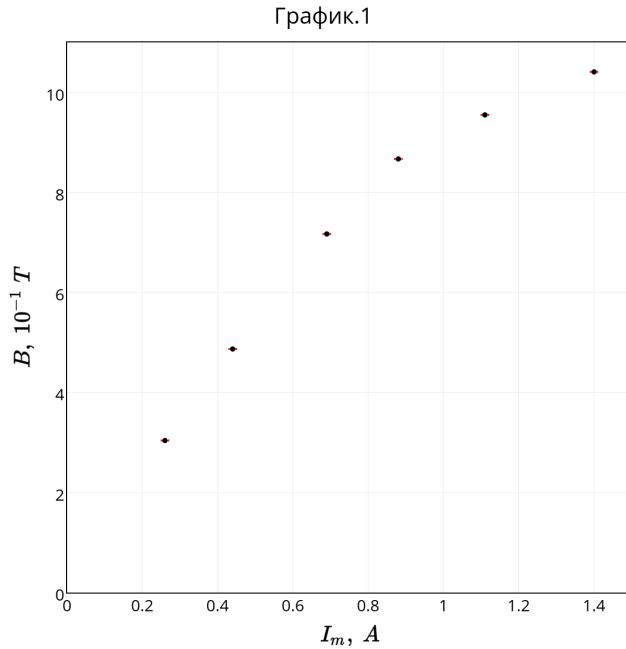
Используя найденные значения концентрации n и проводимости σ , с помощью формулы (3) вычислите подвижность b носителей тока в общепринятых для этой величины внесистемных единицах: размерность напряжённости электрического поля $[E] = [U/L] = \text{В/см}$, размерность скорости $[v] = \text{см/с}$, поэтому размерность подвижности $[b] = \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Оцените погрешности и сравните результаты с табличными.

IV. ДАННЫЕ.

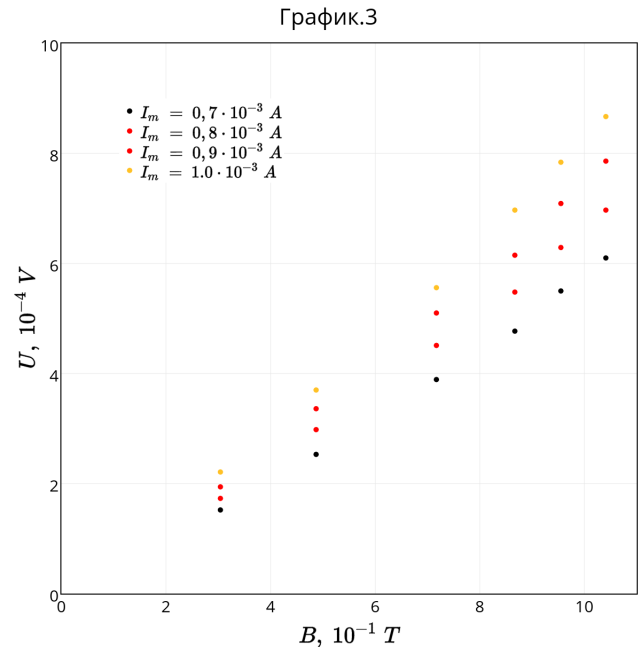
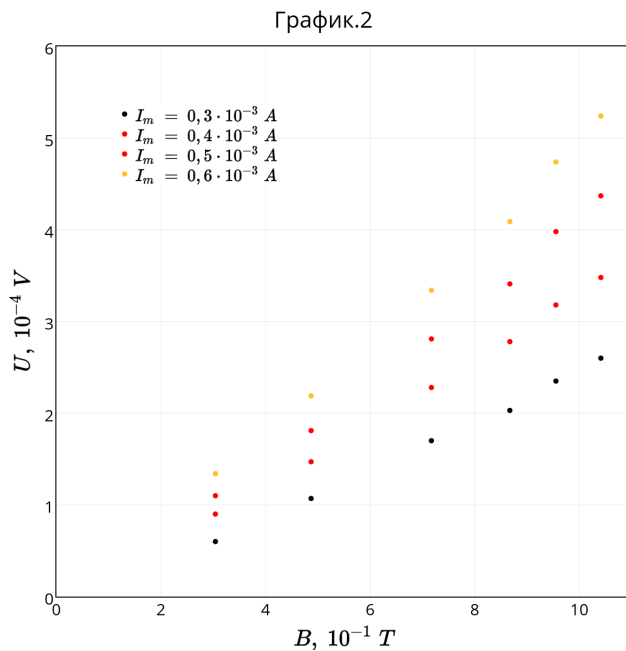
Взглянем на данные измерений, а именно построим график $B = f(I_m)$. Заметим, что линейность отклика графика отвергается начиная с 4-5 измерений. Данный эффект можно объяснить так называемым эффектом насыщения железа, то есть резким

спадом магнитной проницаемости при больших значениях магнитного поля порядка 1 T , что и легко заметить в данном эксперименте.



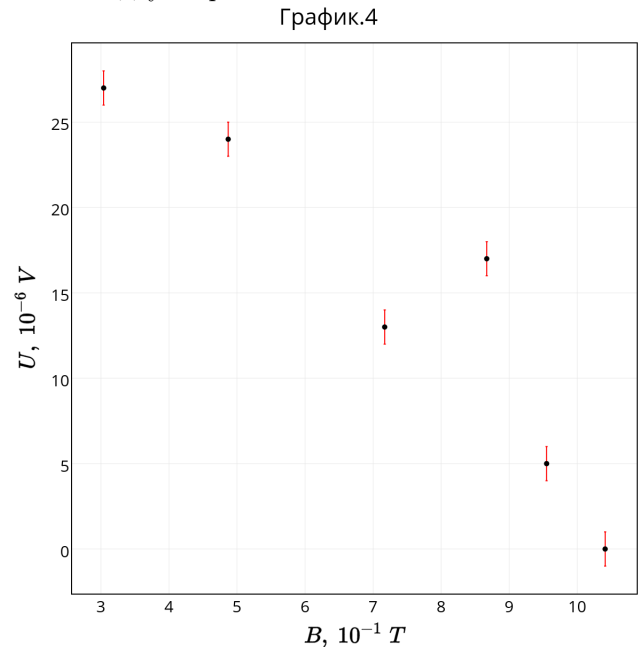
Эксперимент осуществлялся таким образом, что дальнейшие измерения ЭДС Холла проводились при тех же значениях тока, что и при построении зависимости $B = f(I_m)$, это и будет являться калибровкой электромагнита.

Далее построим графики по всем семействам характеристик $\mathcal{E}_x = f(B)$, измерения проводились при 8 различных значениях I - тока через образец. Заранее выровняем значения на U_0 в каждой серии, U_0 было измерено заранее.



Как видим на всех сериях наблюдается устойчивый линейный отклик, в отличие от $B = f(I_m)$. Систематическая погрешность составляет не более процента от измеряемых величин напряжения и магнитного поля.

Также дополнительно к 8 серии на величине тока $I_m = 1\text{ A}$ через обмотки магнита было проведено измерение при другом направлении магнитного поля. Для каждой из этих серий заранее было измерено показание U_0 , в предположении того, что две серии будут идентичны с учётом нормировки на U_0 и изменение знака U_{34} . Построим график разности модулей значений в этих двух сериях.



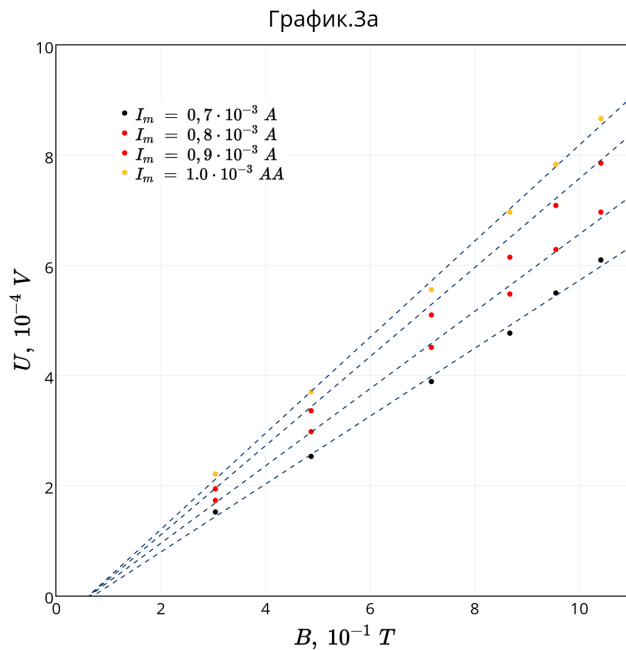
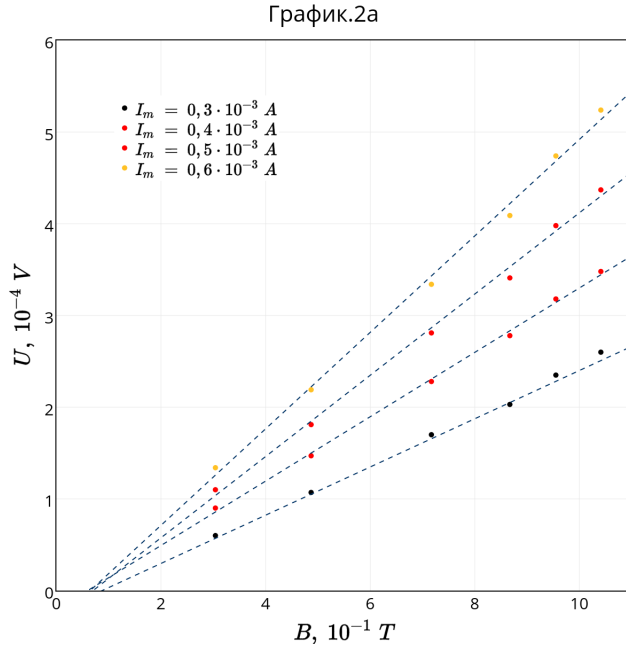
Как видим имеет место довольно странный разброс, не лежащий в пределах измерений U_0 для двух серий. В дальнейшем не будем использовать значения U_0 и

построим модель со свободным членом, это не повлияет на итоговое значение коэффициента пропорциональности в зависимости $\mathcal{E}_x = f(B)$.

Построим обычный метод наименьших квадратов. Усложнение метода построения регрессии не требуется в связи с опять таки хорошо заметным линейным откликом и малыми гомоскедастичными систематическими ошибками.

1) Метод наименьших квадратов (least squares):

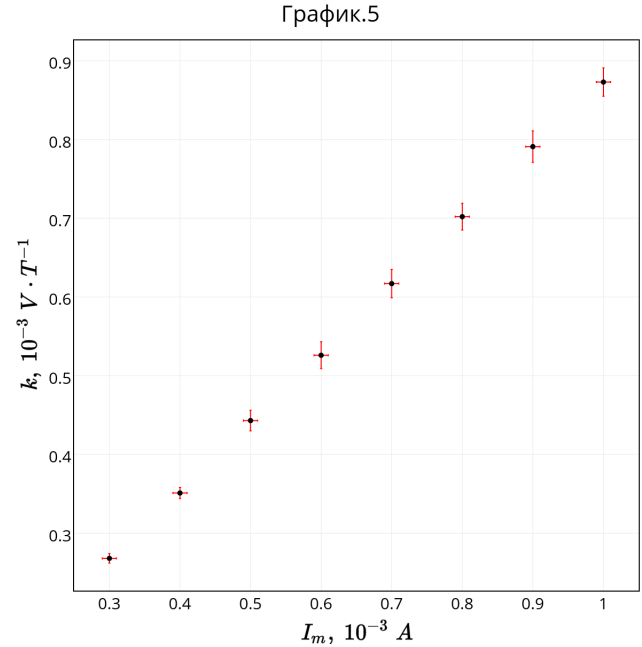
$$\beta = \operatorname{argmin}_{\beta, k} \left(\sum_i^n (y_i - kx_i - \beta)^2 \right)$$



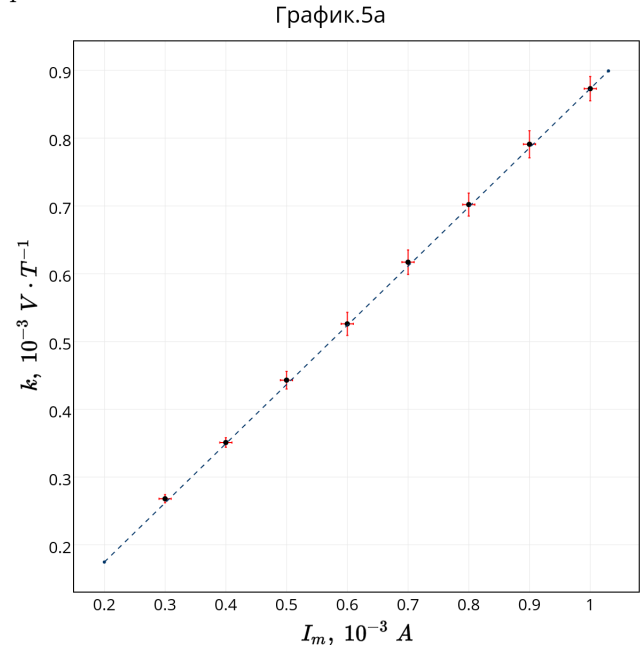
В итоге получим решение задачи регрессии с данными коэффициентами при значениях магнитного поля:

$I, 10^{-4} \text{ A}$	3	4	5	6	7	8	9	10
$k, 10^{-6} \text{ V} \cdot \text{T}^{-1}$	268	351	443	526	617	702	791	873
$\sigma_k, 10^{-6} \text{ V} \cdot \text{T}^{-1}$	6	7	13	17	18	17	20	18
$\beta, 10^{-6} \text{ V}$	-23	-21	-31	-34	-44	-45	-51	-54

Построим теперь уже график зависимости $k = f(I)$.



Теперь построим аналогичную регрессию только в модели уже без свободного члена, исходная физическая модель зависимости $k = f(I)$ предполагается строго линейной.



Итоговое значение получим в виде:

$$\frac{R_x}{a} = (893 \pm 13^{stat} \pm 38^{syst}) \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{T}^{-1} \cdot \text{A}^{-1}$$

Теперь определим величину постоянной Холла R_x по формуле (1), а также концентрацию n носителей тока в образце по формуле (5):

$$R_x = (893 \pm 13^{stat} \pm 47^{syst}) \times 10^{-6} \text{ V} \cdot \text{m} \cdot \text{T}^{-1} \cdot \text{A}^{-1}$$

$$n = (698 \pm 11^{stat} \pm 37^{syst}) \times 10^{19} \cdot \text{m}^{-3}$$

Также по измеренным в пункте 5. данным определим величину и ошибку проводимости σ образца с помощью формулы (3):

$$\sigma = (390 \pm 12^{syst}) \text{ Ohm} \cdot \text{m}^{-1}$$

И окончательно вычислим значение и оценим ошибку подвижности b носителей тока:

$$b = (3482 \pm 55^{stat} \pm 456^{syst}) \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

Приведём табличное значение подвижности для электронного типа проводимости германия:

$$b_{\text{Ge}} = 3800 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

Как видим, результаты согласуются с точностью до одного стандартного отклонения.

V. ТИП НОСИТЕЛЕЙ.

Изобразим образец, укажем направление тока, магнитного поля и знак ЭДС Холла:

Тип проводимости в нашем случае будет электронным.

VI. ССЫЛКИ.

[1] - Лабораторный практикум по общей физике. Электричество и магнетизм. МФТИ, 2007. ISBN 5-7417-0204-х (Т. 2)

LS - `scipy.optimize.curve_fit`

Весь процесс обработки данных можно проделать в открытом репозитории:

github.com/heyfaraday/labs_3sem/tree/master/3.3.4