

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа аэрокосмических технологий

Лабораторная работа №3.3.4
Эффект Холла в полупроводниках

Работу выполнил
Лохматов Арсений Игоревич
Б03-303



Долгопрудный, 2024

1 Теоретическая часть

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

Оборудование: электромагнит источником питания; вольтметр; амперметр; миллиамперметр; милливеберметр; источник питания; образцы легированного полупроводника.

1.1 Теоретическая часть

В работе изучаются особенности проводимости полупроводников в геометрии *мостика Холла*. Ток пропускается по плоской полупроводниковой пластинке, помещённой в перпендикулярное пластинке магнитное поле. Измеряется разность потенциалов между краями пластинки в поперечном к току направлении. По измерениям определяется *константа Холла*, тип проводимости (*электронный* или *дырочный*) и на основе соотношения ниже вычисляется концентрация основных носителей заряда.

$$R_H = \frac{1}{nq}, \text{ где } R_H - \text{постоянная Холла.}$$

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

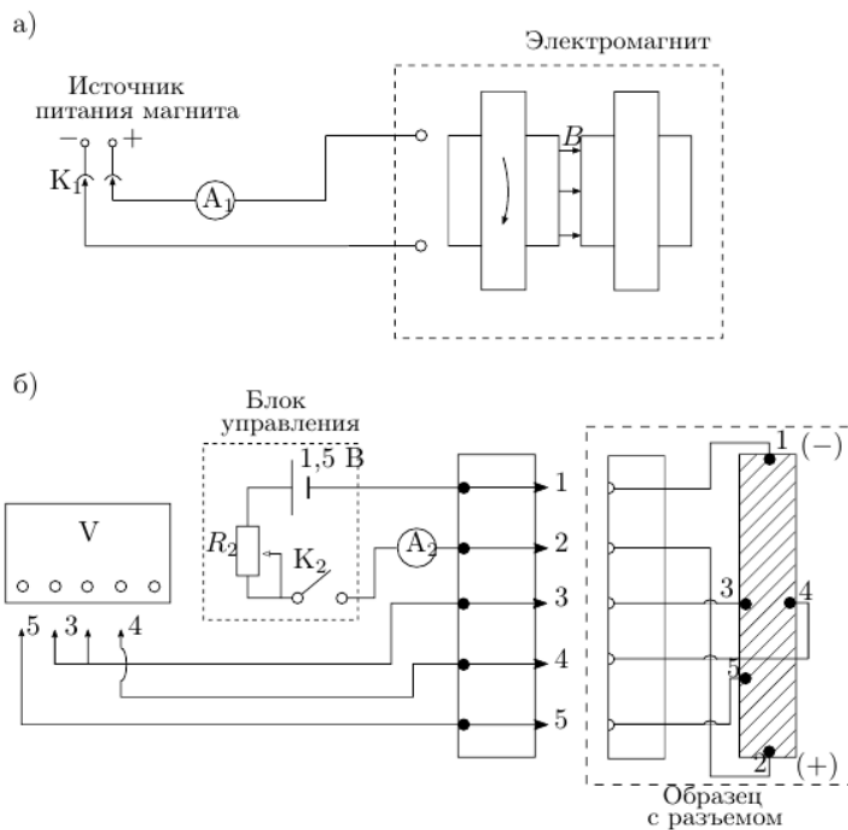


Рис. 1: Схема установки для исследования эффекта Холла в полупроводниках

В зазоре электромагнита (рис. 1а) создаётся постоянное магнитное поле, величину которого можно менять с помощью регулятора источника питания электромагнита. Ток питания электромагнита измеряется амперметром A_1 . Направление тока в обмотках электромагнита меняется переключением разъёма K_1 .

Градуировка электромагнита (связь тока с индукцией поля) проводится при помощи милливеберметра на основе датчика Холла.

Прямоугольный образец из легированного германия, смонтированный в специальном держателе (рис. 1б), подключается к источнику питания (1.5В). При замыкании ключа K_2 вдоль длинной стороны образца течёт ток, величина которого регулируется реостатом R_2 и измеряется миллиамперметром A_2 .

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

Контакты 3 и 4 вследствие неточности подпайки могут лежать не на одной эквипотенциали. Тогда напряжение между ними связано не только с эффектом Холла, но и с омическим падением напряжения вдоль пластинки. Исключить этот эффект можно, изменяя направление магнитного поля, пронизывающего образец. При обращении поля ЭДС Холла меняет знак, а омическое падение напряжения остаётся неизменным. Поэтому ЭДС Холла U_{\perp} может быть определена как половина алгебраической разности показаний вольтметра, полученных для двух противоположных направлений магнитного поля в зазоре: $U_{\perp} = \frac{1}{2}(U_{34}^{(+)} - U_{34}^{(-)})$.

Альтернативно можно исключить влияние омического падения напряжения, если при каждом значении тока через образец измерять напряжение между точками 3 и 4 в отсутствие магнитного поля. При фиксированном токе через образец это дополнительное к ЭДС Холла напряжение U_0 остаётся неизменным. От него следует (с учётом знака) отсчитывать величину ЭДС Холла:

$$U_{\perp} = U_{34} - U_0.$$

При таком способе измерения нет необходимости проводить повторные измерения с противоположным направлением магнитного поля.

По знаку U_{\perp} 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

$$\sigma = \frac{IL_{35}}{U_{35}al}, \quad (1)$$

где l — расстояние между контактами 3 и 5, a — ширина образца, h — его толщина.

2 Практическая часть

2.1 Приборные погрешности

$$\sigma_a = \pm 0.2\%; \sigma_v = \pm 0.004\%; \sigma_{vb} = \pm 1.5\%.$$

2.2 Градуировка электромагнита

А можем далее устанавливать такое значение тока, при котором мы уже измерили индукцию магнитного поля. Мы воспользуемся вторым способом.

2.3 Измерение ЭДС Холла

Для разных значений I через образец снимем зависимость ЭДС Холла от тока I_m через электромагнит. Результаты измерений занесём в таблицу 2.

Последнее измерение было произведено при изменённой ориентации образца. Теперь вычислим значение \mathcal{E}_x по разности показаний вольтметра и сопоставим токи в электромагните с соответствующими значениями индукции магнитного поля. Полученные результаты занесём в таблицу 3.

По полученным данным построим графики зависимости $\mathcal{E}_x(B)$ для различных значений I .

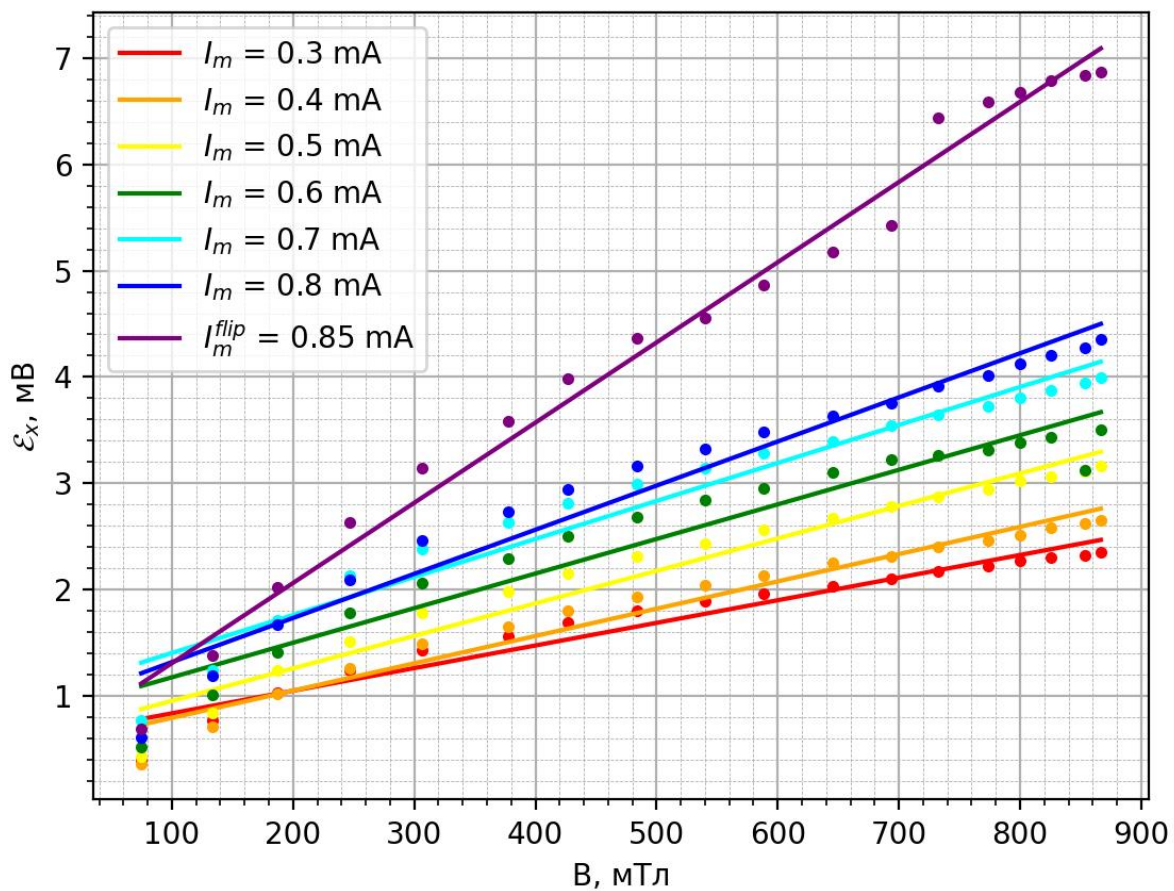


Рис. 2: График зависимости $\mathcal{E}_x(B)$

Аппроксимируем полученные данные зависимостями вида $\mathcal{E}_x = K(I)B + C$ при помощи метода наименьшего квадрата (модуль *curvefit* в Python). Результаты аппроксимации заносим в таблицу 1.

| $I, \text{ мА}$ | $K(I) \cdot 10^{-3}, \text{ В/Тл}$ | $\sigma_{K(I)} \cdot 10^{-3}, \text{ В/Тл}$ |
|-----------------|------------------------------------|---|
| 0.3 | 2.128 | 0.132 |
| 0.4 | 2.568 | 0.134 |
| 0.5 | 3.057 | 0.163 |
| 0.6 | 3.254 | 0.240 |
| 0.7 | 3.575 | 0.202 |
| 0.8 | 4.151 | 0.218 |
| 0.85 | 7.545 | 0.219 |

Таблица 1: Результаты аппроксимации

По этим данным построим график зависимости $K(I)$ от I .

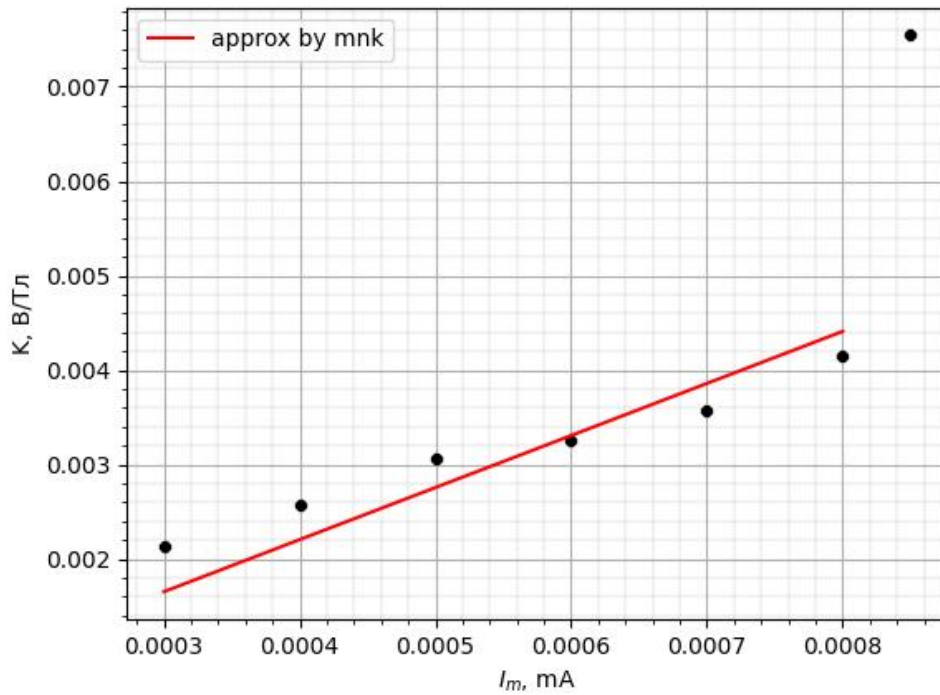


Рис. 3: График зависимости $K(I)$

Видим, что последняя точка явно выбивается из тренда, поэтому при аппроксимации её учитывать не будем. Аппроксимируем зависимость прямой вида $K = p \cdot I$. В итоге получаем

$$p = (5.51 \pm 0.25) \frac{\text{В}}{\text{Тл} \cdot \text{А}}, \quad (\varepsilon = 4.54\%). \quad (2)$$

Тогда, согласно формуле

$$\mathcal{E}_x = -\frac{IB}{nea} = -R_x \cdot \frac{IB}{a},$$

$R_x = pa$ – коэффициент Холла, где $a = 2 \text{ мм}$ – толщина исследуемого образца. После вычислений получаем:

$$R_x = (1.102 \pm 0.005) \cdot 10^{-3} \frac{\text{В} \cdot \text{м}}{\text{Тл} \cdot \text{А}} (\varepsilon = 0.45\%) \quad (3)$$

Отсюда найдём концентрацию носителей заряда согласно формуле, учитывая, у в нашем случае носителями заряда являются дырки. Погрешность определения концентрации есть погрешность определения постоянной Холла, так как считаем значение элементарного заряда известным.

$$R_x = \frac{1}{ne}.$$

$$n = (543.38 \pm 2.45) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}, (\varepsilon = 0.45\%) \quad (4)$$

2.4 Расчёт удельной проводимости и подвижности

По формуле 1 рассчитаем удельную проводимость нашего образца. По результатам измерений $U_{35} = 121.5 \text{ мВ}$, $I = 0.89 \text{ мА}$, $L_{35} = 15 \text{ мм}$ и $l = 8 \text{ мм}$, $a = 2 \text{ мм}$. Погрешность определения проводимости есть погрешность измерений силы тока амперметром ($\sigma = 1\%$). В итоге получаем

$$\sigma = (6.87 \pm 0.07) (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}, (\varepsilon = 1.02\%) \quad (5)$$

Теперь, зная эти характеристики, можно рассчитать подвижность носителей заряда по следующей формуле:

$$\mu = \frac{\sigma}{en} \quad (6)$$

В итоге получаем

$$\mu = (75.71 \pm 0.76) \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}, (\varepsilon = 1.01\%) \quad (7)$$

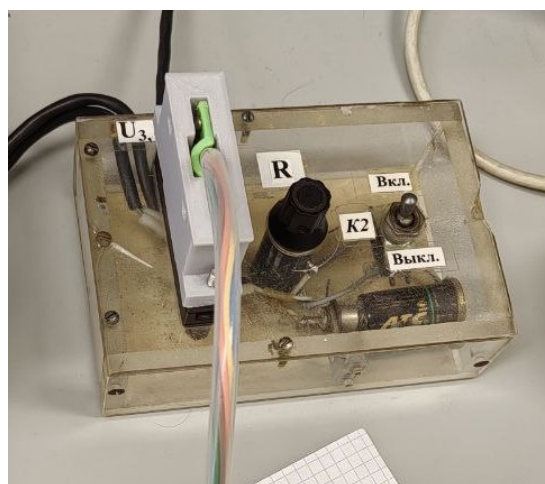
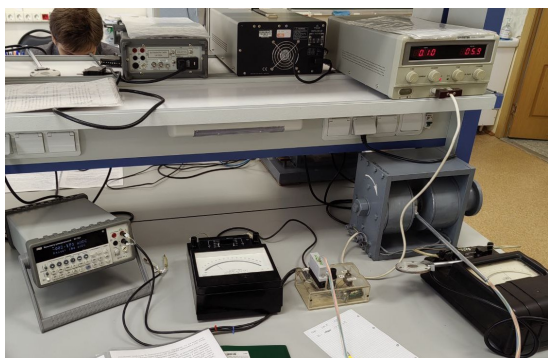
3 Вывод

В ходе выполнения данной лабораторной работы был исследован эффект Холла в полупроводнике. Была определена постоянная Холла для исследуемого образца $R_x = (1.102 \pm 0.005) \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-3}/\text{Кл}$. Также была вычислена концентрация носителей заряда $n = (543.38 \pm 2.45) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

По полярности вольтметра, полярности подключения источника тока и направлению тока в катушках была определён тип проводимости. Тип проводимости оказался дырочным.

Также была вычислена подвижность электронов в образце $\mu = (75.71 \pm 0.76) \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

3.1 Приложение



| | | | | | | |
|------------|--------------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| I , мА | 0,30 | | 0,40 | | 0,50 | |
| U_0 , мВ | -2.58 | | -3.16 | | -3.87 | |
| | I_M , А | U , мВ | I_M , А | U , мВ | I_M , А | U , мВ |
| | 0.1 | -2.18 | 0.1 | -2.8 | 0.1 | -3.44 |
| | 0.2 | -1.81 | 0.2 | -2.45 | 0.2 | -3.03 |
| | 0.3 | -1.55 | 0.3 | -2.14 | 0.3 | -2.63 |
| | 0.4 | -1.34 | 0.4 | -1.9 | 0.4 | -2.36 |
| | 0.5 | -1.15 | 0.5 | -1.67 | 0.5 | -2.09 |
| | 0.6 | -1.02 | 0.6 | -1.51 | 0.6 | -1.89 |
| | 0.7 | -0.89 | 0.7 | -1.36 | 0.7 | -1.72 |
| | 0.8 | -0.78 | 0.8 | -1.23 | 0.8 | -1.56 |
| | 0.9 | -0.69 | 0.9 | -1.12 | 0.9 | -1.44 |
| | 1.0 | -0.62 | 1.0 | -1.03 | 1.0 | -1.31 |
| | 1.1 | -0.55 | 1.1 | -0.91 | 1.1 | -1.2 |
| | 1.2 | -0.48 | 1.2 | -0.85 | 1.2 | -1.09 |
| | 1.3 | -0.41 | 1.3 | -0.76 | 1.3 | -1.0 |
| | 1.4 | -0.36 | 1.4 | -0.7 | 1.4 | -0.93 |
| | 1.5 | -0.31 | 1.5 | -0.65 | 1.5 | -0.85 |
| | 1.6 | -0.28 | 1.6 | -0.58 | 1.6 | -0.81 |
| | 1.7 | -0.26 | 1.7 | -0.54 | 1.7 | -0.76 |
| | 1.8 | -0.23 | 1.8 | -0.51 | 1.8 | -0.71 |
| I , мА | 0,60 | | 0,70 | | 0,80 | |
| U_0 , мВ | -4.62 | | -5.27 | | -5.74 | |
| | I_M , А | U , мВ | I_M , А | U , мВ | I_M , А | U , мВ |
| | 0.1 | -4.1 | 0.1 | -4.5 | 0.1 | -5.13 |
| | 0.2 | -3.61 | 0.2 | -4.03 | 0.2 | -4.55 |
| | 0.3 | -3.21 | 0.3 | -3.56 | 0.3 | -4.07 |
| | 0.4 | -2.84 | 0.4 | -3.14 | 0.4 | -3.65 |
| | 0.5 | -2.56 | 0.5 | -2.89 | 0.5 | -3.28 |
| | 0.6 | -2.33 | 0.6 | -2.64 | 0.6 | -3.01 |
| | 0.7 | -2.12 | 0.7 | -2.46 | 0.7 | -2.8 |
| | 0.8 | -1.94 | 0.8 | -2.28 | 0.8 | -2.58 |
| | 0.9 | -1.78 | 0.9 | -2.13 | 0.9 | -2.42 |
| | 1.0 | -1.67 | 1.0 | -1.99 | 1.0 | -2.26 |
| | 1.1 | -1.52 | 1.1 | -1.88 | 1.1 | -2.11 |
| | 1.2 | -1.4 | 1.2 | -1.73 | 1.2 | -1.99 |
| | 1.3 | -1.36 | 1.3 | -1.63 | 1.3 | -1.83 |
| | 1.4 | -1.31 | 1.4 | -1.55 | 1.4 | -1.73 |
| | 1.5 | -1.24 | 1.5 | -1.47 | 1.5 | -1.62 |
| | 1.6 | -1.19 | 1.6 | -1.4 | 1.6 | -1.54 |
| | 1.7 | -1.5 | 1.7 | -1.33 | 1.7 | -1.47 |
| | 1.8 | -1.12 | 1.8 | -1.28 | 1.8 | -1.39 |
| I , мА | 0.85 (flip) | | | | | |
| U_0 , мВ | -6.53 (flip) | | | | | |
| | I_M , А | U , мВ | I_M , А | U , мВ | I_M , А | U , мВ |
| | 0.1 | -7.22 | 0.7 | -10.51 | 1.3 | -12.97 |
| | 0.2 | -7.91 | 0.8 | -10.89 | 1.4 | -13.12 |
| | 0.3 | -8.55 | 0.9 | -11.08 | 1.5 | -13.21 |
| | 0.4 | -9.16 | 1.0 | -11.4 | 1.6 | -13.32 |
| | 0.5 | -9.67 | 1.1 | -11.71 | 1.7 | -13.37 |
| | 0.6 | -10.11 | 1.2 | -11.96 | 1.8 | -13.4 |

Таблица 2: Измерение ЭДС Холла

| $I, \text{ мА}$ | 0,30 | | 0,40 | | 0,50 | |
|-----------------|------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|
| | $B, \text{ мТл}$ | $\mathcal{E}_x, \text{ мВ}$ | $B, \text{ мТл}$ | $\mathcal{E}_x, \text{ мВ}$ | $B, \text{ мТл}$ | $\mathcal{E}_x, \text{ мВ}$ |
| | 74.667 | 0.4 | 74.667 | 0.36 | 74.667 | 0.43 |
| | 133.333 | 0.77 | 133.333 | 0.71 | 133.333 | 0.84 |
| | 186.667 | 1.03 | 186.667 | 1.02 | 186.667 | 1.24 |
| | 246.667 | 1.24 | 246.667 | 1.26 | 246.667 | 1.51 |
| | 306.667 | 1.43 | 306.667 | 1.49 | 306.667 | 1.78 |
| | 377.333 | 1.56 | 377.333 | 1.65 | 377.333 | 1.98 |
| | 426.667 | 1.69 | 426.667 | 1.8 | 426.667 | 2.15 |
| | 484.0 | 1.8 | 484.0 | 1.93 | 484.0 | 2.31 |
| | 540.0 | 1.89 | 540.0 | 2.04 | 540.0 | 2.43 |
| | 588.0 | 1.96 | 588.0 | 2.13 | 588.0 | 2.56 |
| | 645.333 | 2.03 | 645.333 | 2.25 | 645.333 | 2.67 |
| | 693.333 | 2.1 | 693.333 | 2.31 | 693.333 | 2.78 |
| | 732.0 | 2.17 | 732.0 | 2.4 | 732.0 | 2.87 |
| | 773.333 | 2.22 | 773.333 | 2.46 | 773.333 | 2.94 |
| | 800.0 | 2.27 | 800.0 | 2.51 | 800.0 | 3.02 |
| | 825.333 | 2.3 | 825.333 | 2.58 | 825.333 | 3.06 |
| | 853.333 | 2.32 | 853.333 | 2.62 | 853.333 | 3.11 |
| | 866.667 | 2.35 | 866.667 | 2.65 | 866.667 | 3.16 |
| $I, \text{ мА}$ | 0,60 | | 0,70 | | 0,80 | |
| | $B, \text{ мТл}$ | $\mathcal{E}_x, \text{ мВ}$ | $B, \text{ мТл}$ | $\mathcal{E}_x, \text{ мВ}$ | $B, \text{ мТл}$ | $\mathcal{E}_x, \text{ мВ}$ |
| | 74.667 | 0.52 | 74.667 | 0.77 | 74.667 | 0.61 |
| | 133.333 | 1.01 | 133.333 | 1.24 | 133.333 | 1.19 |
| | 186.667 | 1.41 | 186.667 | 1.71 | 186.667 | 1.67 |
| | 246.667 | 1.78 | 246.667 | 2.13 | 246.667 | 2.09 |
| | 306.667 | 2.06 | 306.667 | 2.38 | 306.667 | 2.46 |
| | 377.333 | 2.29 | 377.333 | 2.63 | 377.333 | 2.73 |
| | 426.667 | 2.5 | 426.667 | 2.81 | 426.667 | 2.94 |
| | 484.0 | 2.68 | 484.0 | 2.99 | 484.0 | 3.16 |
| | 540.0 | 2.84 | 540.0 | 3.14 | 540.0 | 3.32 |
| | 588.0 | 2.95 | 588.0 | 3.28 | 588.0 | 3.48 |
| | 645.333 | 3.1 | 645.333 | 3.39 | 645.333 | 3.63 |
| | 693.333 | 3.22 | 693.333 | 3.54 | 693.333 | 3.75 |
| | 732.0 | 3.26 | 732.0 | 3.64 | 732.0 | 3.91 |
| | 773.333 | 3.31 | 773.333 | 3.72 | 773.333 | 4.01 |
| | 800.0 | 3.38 | 800.0 | 3.8 | 800.0 | 4.12 |
| | 825.333 | 3.43 | 825.333 | 3.87 | 825.333 | 4.2 |
| | 853.333 | 3.12 | 853.333 | 3.94 | 853.333 | 4.27 |
| | 866.667 | 3.5 | 866.667 | 3.99 | 866.667 | 4.35 |
| $I, \text{ мА}$ | 0.85 (flip) | | | | | |
| | $B, \text{ мТл}$ | $\mathcal{E}_x, \text{ мВ}$ | $B, \text{ мТл}$ | $\mathcal{E}_x, \text{ мВ}$ | $B, \text{ мТл}$ | $\mathcal{E}_x, \text{ мВ}$ |
| | 74.667 | -0.69 | 426.667 | -3.98 | 732.0 | -6.44 |
| | 133.333 | -1.38 | 484.0 | -4.36 | 773.333 | -6.59 |
| | 186.667 | -2.02 | 540.0 | -4.55 | 800.0 | -6.68 |
| | 246.667 | -2.63 | 588.0 | -4.87 | 825.333 | -6.79 |
| | 306.667 | -3.14 | 645.333 | -5.18 | 853.333 | -6.84 |
| | 377.333 | -3.58 | 693.333 | -5.43 | 866.667 | -6.87 |

Таблица 3: Результаты вычислений