

Московский физико-технический университет
Факультет радиотехники и кибернетики

Лабораторная работа № 3.3.4

(Общая физика: электричество и магнетизм)

Эффект Холла в полупроводниках

Работу выполнил:

Милославов Глеб, группа Б01-103

г. Долгопрудный

2022 год

1 Введение

1.1 Цель работы:

Исследование проникновения переменного магнитного поля в полый медный цилиндр.

1.2 В работе используется:

Генератор звуковой частоты, соленоид, намотанный на полый цилиндрический каркас из диэлектрика, медный экран в виде трубки, измерительная катушка, амперметр, вольтметр, осциллограф.

1.3 Экспериментальная установка:

Схема экспериментальной установки для исследования проникновения переменного магнитного поля в медный полый цилиндр изображена на рис. ???. Переменное магнитное поле создаётся с помощью соленоида, намотанного на полый цилиндрический каркас 1 из поливинилхлорида, который подключается к генератору звуковой частоты. Внутри соленоида расположен медный цилиндрический экран 2. Для измерения магнитного поля внутри экрана используется измерительная катушка 3. Необходимые параметры соленоида, экрана и измерительной катушки указаны на установке. Действующее значение переменного тока в цепи соленоида измеряется амперметром A , а действующее значение напряжения на измерительной катушке измеряет вольтметр V . Для измерения сдвига фаз между током в цепи соленоида и напряжением на измерительной катушке используется двухканальный осциллограф. На вход одного канала подаётся напряжение с резистора R , которое пропорционально току, а на вход второго канала — напряжение с измерительной катушки.

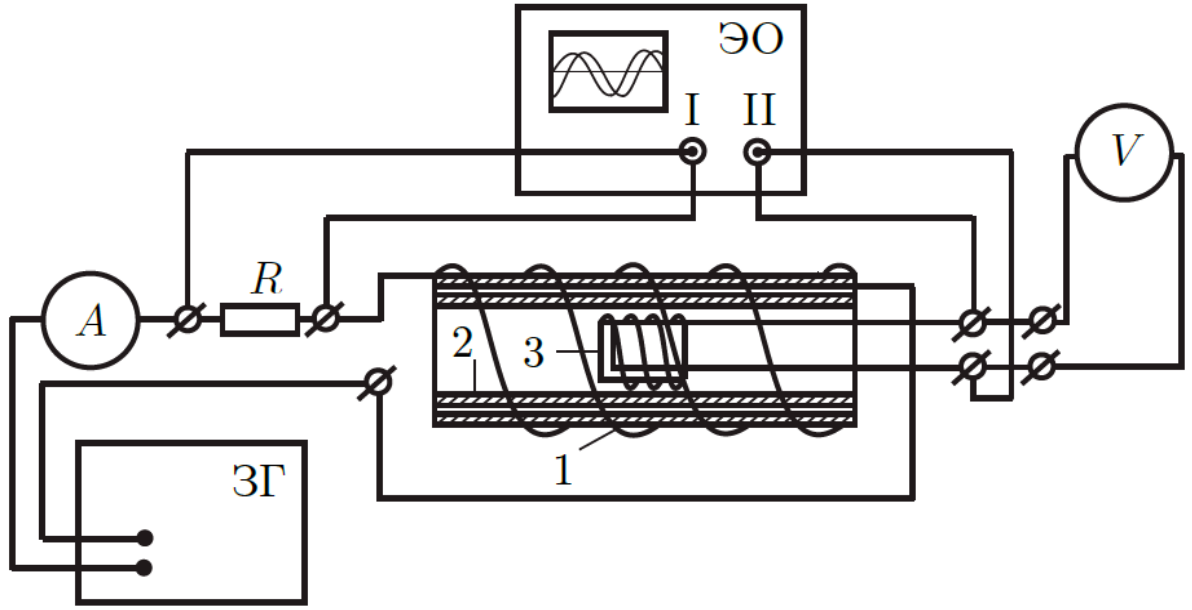


Рис. 1: Экспериментальная установка

Измерение отношения амплитуд магнитного поля внутри и вне экрана. С помощью вольтметра V измеряется действующее значение ЭДС индукции, которая возникает в измерительной катушке, находящейся в переменном магнитном поле $H_1 e^{i\omega t}$. Комплексная амплитуда ЭДС индукции в измерительной катушке равна

$$U = -SN \frac{dB_1(t)}{dt} = -i\omega\mu_0 SBH_1 e^{i\omega t} \quad (1)$$

где SN — произведение площади витка на число витков измерительной катушки. Показания вольтметра, измеряющего это напряжение:

$$U = \frac{SN\omega}{\sqrt{2}} \mu_0 |H_1| \quad (2)$$

Видно, что модуль амплитуды магнитного поля внутри экрана $|H_1|$ пропорционален U и обратно пропорционален частоте сигнала $\nu = \omega/2\pi$:

$$|H_1| \propto \frac{U}{\nu} \quad (3)$$

При этом поле вне экрана $|H_0|$ пропорционально току I в цепи соленоида, измеряемому амперметром A :

$$|H_0| \propto I \quad (4)$$

Следовательно:

$$\frac{|H_1|}{|H_0|} = const \cdot \frac{U}{\nu I} \quad (5)$$

Таким образом, отношение амплитуд магнитных полей снаружи и вне экрана (коэффициент ослабления) может быть измерено по отношению $U/\nu I$ при разных частотах. Неизвестная константа может быть определена по измерениям при малых частотах $\nu \rightarrow 0$, когда $|H_1|/|H_0| \rightarrow 1$.

Определение проводимости материала экрана. В установке в качестве экрана используется медная труба промышленного производства. Технология изготовления труб оказывает заметное влияние на электропроводимость. Из-за наличия примесей проводимость меди нашей трубы отличается от табличного значения (в меньшую сторону). Для определения σ нашего экрана предлагается использовать частотную зависимость фазового сдвига между магнитными полями внутри и вне экрана при высоких частотах. в области больших частот $\omega \gg 1/(\hbar^2 \sigma \mu_0)$ зависимость $\psi(\sqrt{\omega})$ аппроксимируется прямой, проходящей через точку $\psi(0) = \pi/4$. По наклону этой прямой можно вычислить проводимость материала экрана.

Процедура измерения разности фаз с помощью осциллографа подробно описана в работе 3.2.1.

Заметим, что на схеме, изображённой на рис. 3, на входной канал II осциллографа подаётся сигнал с измерительной катушки, который пропорционален не полю внутри экрана, а его *производной по времени*, а это означает, что появляется дополнительный сдвиг по фазе на $\pi/2$. Поэтому измеренный по экрану осциллографа сдвиг по фазе между двумя синусоидами будет на $\pi/2$ больше фазового сдвига между магнитными полями вне и внутри экрана.

2 Ход работы

2.1 Зависимость $\xi = \frac{U}{\nu I}$ от частоты ν

Оценим $\nu_h = \frac{1}{\sigma \mu \mu_0 \pi \delta^2} \approx 2250$ Гц

В области низких частот – от $0.01\nu_h$ до $0.1\nu_h$ – получим зависимость $\xi = \frac{U}{\nu I}$, где все три величины в формуле – результаты прямых измерений. Также вычислим $f(\nu^2) = \frac{1}{\xi^2}$ и занесём данные в таблицу:

| ν , Гц | U, мВ | I, мА | ξ | $f = 1/(\xi)^2$ | ν^2 , Гц ² |
|------------|-------|-------|-------|-----------------|---------------------------|
| 23 | 195 | 465 | 0,018 | 3008 | 529 |
| 46 | 368 | 444 | 0,018 | 3080 | 2116 |
| 69 | 512 | 428 | 0,017 | 3327 | 4761 |
| 92 | 626 | 414 | 0,016 | 3702 | 8464 |
| 115 | 712 | 398 | 0,016 | 4132 | 13225 |
| 138 | 777 | 386 | 0,015 | 4700 | 19044 |
| 161 | 824 | 375 | 0,014 | 5369 | 25921 |
| 184 | 860 | 366 | 0,013 | 6132 | 33856 |
| 207 | 886 | 358 | 0,012 | 6996 | 42849 |
| 230 | 907 | 351 | 0,011 | 7922 | 52900 |

Рис. 2: Измерения в области низких частот

Будем считать систематическую погрешность генератора звуковых частот, вольтметра и амперметра как половина от цены деления шкалы при снятии измерений (класс точности приборов не удалось найти):

$$\sigma_\nu = 0,5 \text{ Гц} ; \quad \sigma_U = 0,5 \text{ мВ} ; \quad \sigma_I = 0,5 \text{ мА}$$

Зададим $f = \frac{1}{\xi^2}$, посчитаем погрешности по формулам:

$$\sigma_\xi = \xi \sqrt{\left(\frac{\sigma_U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\nu}{\nu}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_I}{I}\right)^2}$$

$$\sigma_f = \sigma_\xi \frac{df}{d\xi} = 2 \frac{\sigma_\xi}{\xi^3} ; \quad \sigma_{\nu^2} = \sigma_\nu \frac{d\nu^2}{d\nu} = 2\nu\sigma_\nu$$

Рис. 3: Погрешности

| σ_ξ | σ_f | σ_{ν^2} , Гц ² |
|--------------|------------|------------------------------------|
| 0,00040 | 131,9 | 23 |
| 0,00020 | 67,8 | 46 |
| 0,00013 | 49,3 | 69 |
| 0,00009 | 41,6 | 92 |
| 0,00007 | 37,9 | 115 |
| 0,00006 | 36,7 | 138 |
| 0,00005 | 36,9 | 161 |
| 0,00004 | 38,0 | 184 |
| 0,00003 | 39,8 | 207 |
| 0,00003 | 42,1 | 230 |

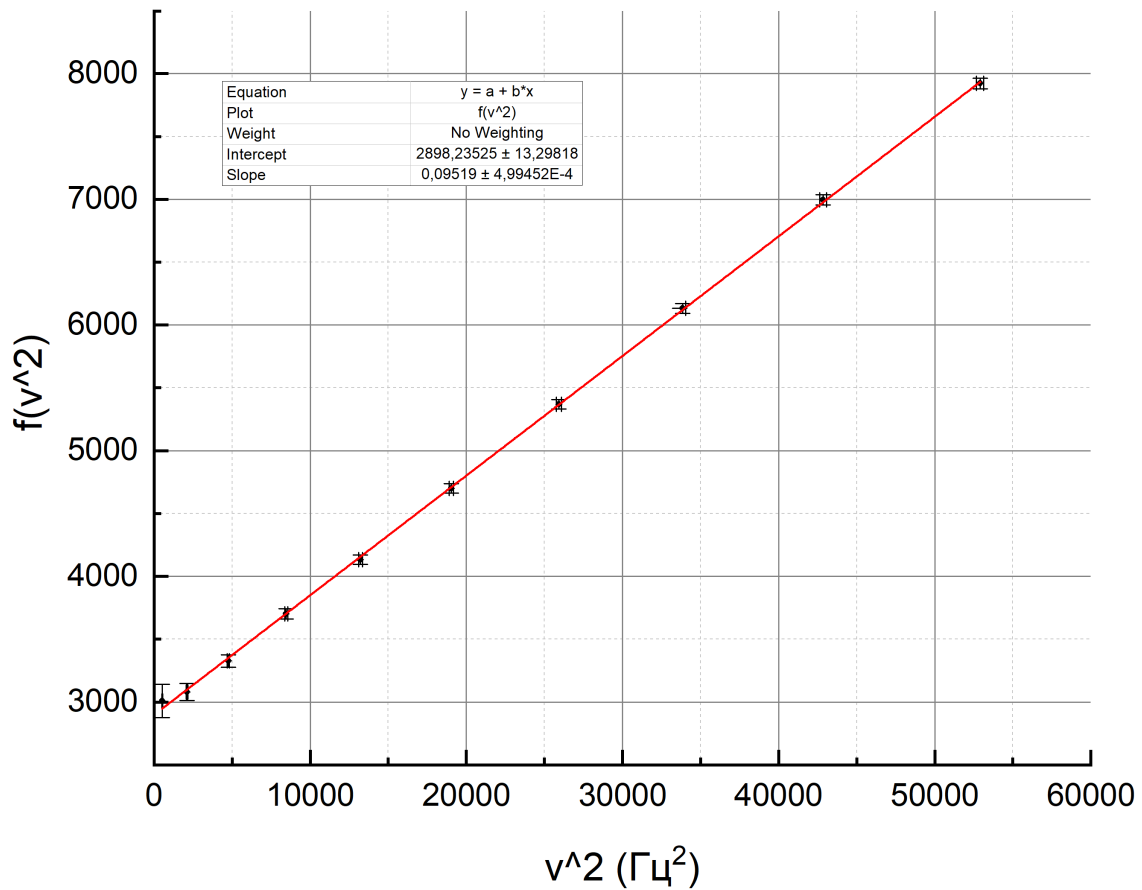


Рис. 4: График $f(\nu^2)$ и его линейная аппроксимация

Данные линейной аппроксимации:

$$y = a + bx \ ; \ a = 2898 \pm 13 \ ; \ b = 0,0952 \pm 0,0005$$

Видно, что точки с высокой точностью ложатся на аппроксимирующую прямую в пределах крестов погрешностей. Также, при $\nu = 0$, $f(\xi) = f(\xi_0)$. Тогда:

$$\xi_0 = 0,0186 \pm 0,0004$$

Посчитаем проводимость меди: $\sigma = (43,2 \pm 0,7) \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1}$

2.2 Зависимость сдвига фаз ψ от частоты ν

В области низких частот – от $0.05\nu_h$ до $0.5\nu_h$ – получим зависимость $\psi(\nu)$, также найдём $\tan \psi$ занесём данные в таблицу:

| ν , Гц | U, мВ | I, мА | $\Delta\tau$, дел | k, мс/дел | $\Delta\tau$, мс | ψ , рад | $\operatorname{tg}\psi$ |
|------------|-------|-------|--------------------|-----------|-------------------|--------------|-------------------------|
| 115 | 710 | 398 | -3,0 | 1,0 | -3,00 | -3,74 | -0,68 |
| 138 | 770 | 384 | -2,6 | 1,0 | -2,60 | -3,83 | -0,81 |
| 161 | 820 | 374 | -2,3 | 1,0 | -2,30 | -3,90 | -0,94 |
| 184 | 860 | 365 | -2,1 | 1,0 | -2,10 | -4,00 | -1,15 |
| 207 | 880 | 357 | -1,9 | 1,0 | -1,90 | -4,04 | -1,26 |
| 230 | 910 | 350 | -1,7 | 1,0 | -1,70 | -4,03 | -1,22 |
| 345 | 950 | 330 | -2,0 | 0,5 | -1,00 | -3,74 | -0,68 |
| 460 | 960 | 179 | -2,0 | 0,5 | -1,00 | -4,46 | -3,89 |
| 575 | 940 | 309 | -1,6 | 0,5 | -0,80 | -4,46 | -3,89 |
| 690 | 940 | 300 | -3,2 | 0,2 | -0,64 | -4,35 | -2,60 |
| 805 | 920 | 291 | -3,1 | 0,2 | -0,62 | -4,71 | -176,84 |
| 920 | 890 | 282 | -2,7 | 0,2 | -0,54 | -4,69 | -49,73 |
| 1035 | 870 | 274 | -2,5 | 0,2 | -0,50 | -4,82 | 9,06 |
| 1150 | 840 | 266 | -2,1 | 0,2 | -0,42 | -4,61 | -9,33 |

Рис. 5: Измерения в области низких частот

где значения сдвига фаз были посчитаны по формуле:

$$\psi = 2\pi\nu\Delta\tau - \frac{\pi}{2}$$

Вычислим погрешности:

$$\sigma_\psi = \psi \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\Delta\tau}}{\Delta\tau}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\nu}{\nu}\right)^2}$$

$$\sigma_{\tan \psi} = \sigma_\psi \frac{d \tan \psi}{d\psi} = \frac{\sigma_\psi}{\cos^2 \psi}$$

Построим график зависимости $\tan \psi = f(\nu)$, исключим точки, полученные при приближении к $0.5\nu_h$ и аппроксимируем оставшиеся прямой.

Рис. 6: Погрешности

| $\sigma\Delta\tau$, мс | $\sigma\psi$ | $\sigma\operatorname{tg}\psi$ |
|-------------------------|--------------|-------------------------------|
| 0,1 | 0,13 | 0,18 |
| 0,1 | 0,15 | 0,25 |
| 0,1 | 0,17 | 0,32 |
| 0,1 | 0,19 | 0,44 |
| 0,1 | 0,21 | 0,55 |
| 0,1 | 0,24 | 0,59 |
| 0,05 | 0,19 | 0,27 |
| 0,05 | 0,22 | 3,61 |
| 0,05 | 0,28 | 4,51 |
| 0,02 | 0,14 | 1,06 |
| 0,02 | 0,15 | 4748,96 |
| 0,02 | 0,17 | 430,00 |
| 0,02 | 0,19 | 16,02 |
| 0,02 | 0,22 | 19,30 |

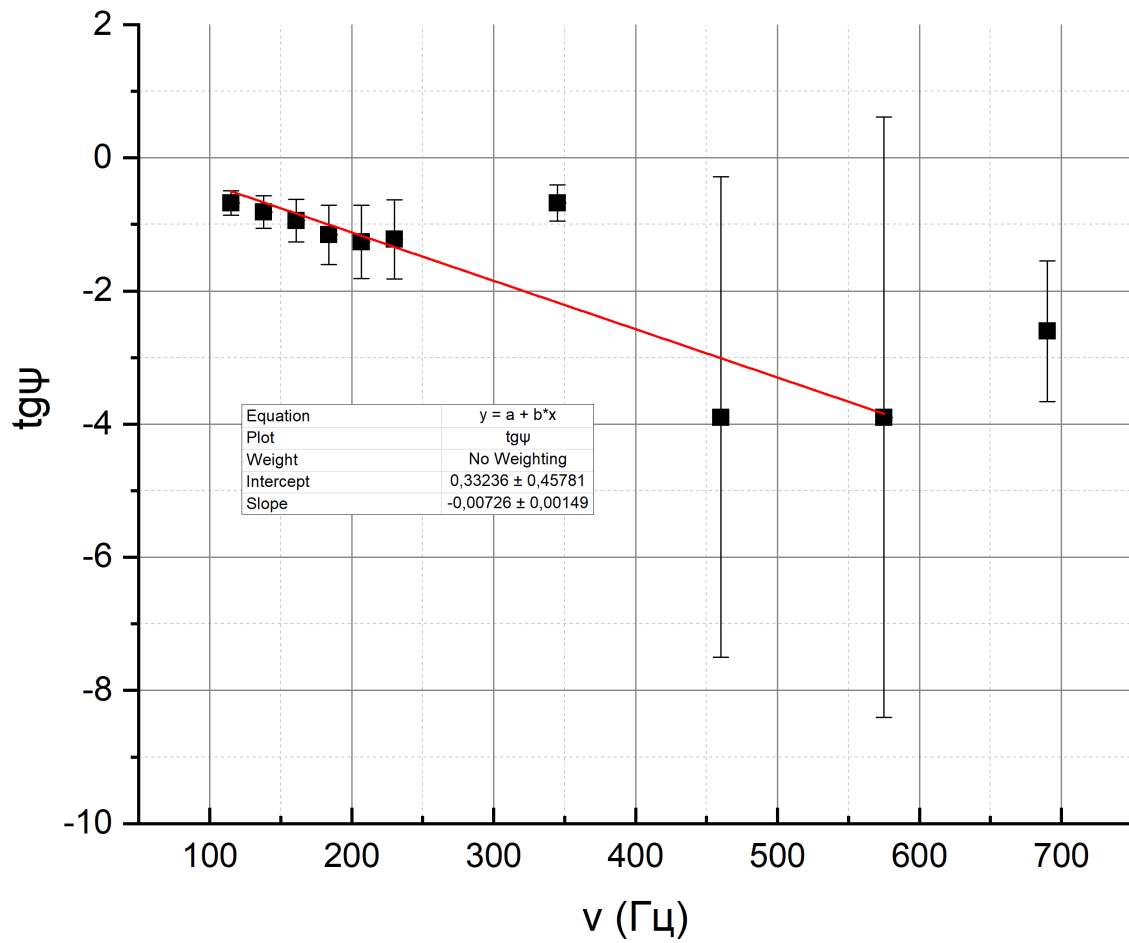


Рис. 7: График $\tan \psi = f(\nu)$ и его линейная аппроксимация

Данные линейной аппроксимации:

$$y = a + bx \quad ; \quad a = 0,33 \pm 0,4 \quad ; \quad b = 0,007 \pm 0,001$$

Тогда из формул $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu_0}}$ и $\tan \psi = \frac{ah}{\delta^2}$ следует, что