

Эффект Холла в металлах

Марк Гончаров

19 ноября 2020 г.

1 В работе используется

Электромагнит с источником питания, источник постоянного тока, микровольтметр Ф116/1, амперметры, измеритель магнитной индукции, Ш1-10, образцы из меди, серебра и цинка

2 Используемая теория

Как мы знаем, сила, действующая на частицу в электромагнитном поле, вычисляется, как

$$F = qE + qu \times B.$$

То есть движение частицы не совпадает в общем случае с E . Возникновение поперечного тока электрического поля в образце, помещенном во внешнее магнитное поле, называют **эффектом Холла**. Для описания плотности тока теперь надо использовать $j = \sigma E$, но σ - **тензор проводимости**, который можно вычислить, как

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{1 + (\mu B)^2} \begin{pmatrix} 1 & \mu B & 0 \\ -\mu B & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Здесь безразмерному параметру μB можно дать смысл, как отношение эффективной длины пробега частиц $l = \frac{um}{q}$ к ларморовскому радиусу кривизны траектории $r_B = \frac{mu}{qB}$. Эту величину l также иногда называют **параметром замагниченности**

3 Экспериментальная установка

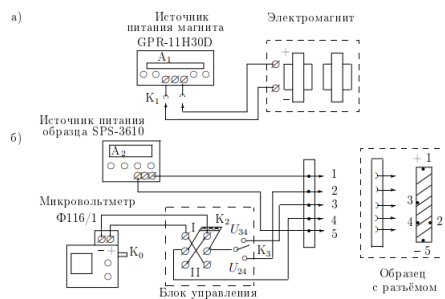


Рис. 1: **Схема установки** для исследования эффекта Холла в металлах

Суть: ток пропускается по плоской прямоугольной металлической пластине, помещенной в перпендикулярное ему магнитное поле. Измеряется разность потенциалов между краями пластины. По этим измерениям мы будем определять константу Холла, тип проводимости (электронный или дырочный), вычислять концентрацию основных носителей заряда.

Измерим ток I в образце и напряжение U_{34} между контактами (из представленного рисунка 1) в отсутствие магнитного поля. И так можем рассчитать проводимость материала в образце

$$\sigma = \frac{IL_{34}}{U_{34}al}.$$

где L_{34} - расстояние между контактами 3, 4, a - толщина образца, l - его ширина

4 Выполнение

1. Сначала проведем градуировку электромагнита, измерим $B(I)$. Имеем таблицу ниже

I, A	1.45	1.25	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0
B, mT	1080	1021	926	797	607	422	212	18

2. Далее проводим эксперименты с образцом. Я выбрал серебро и цинк. Параметры этих образцов:



	$L, 3,5, мм$	$L, мм$	$A, мм$
Серебро	11	15	0.09
Цинк	3.5	9	0.12

б)

Рис. 2: Записанные параметры образцов

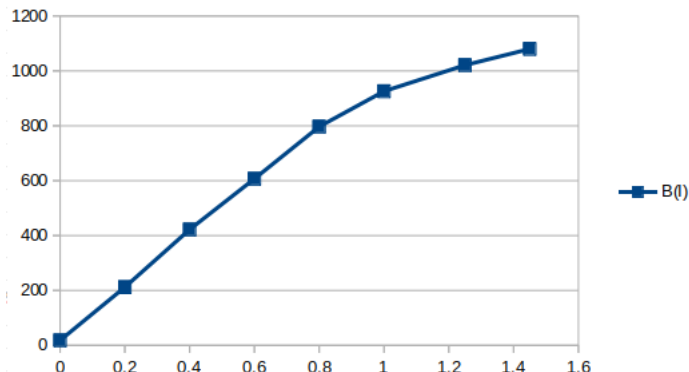


Рис. 3: Градуировка электромагнита

3. Снимем для каждого из образцов зависимость напряжения $U_{24}(I_M)$ через обмотки магнита при фиксированном токе через образец. Для серебра рассмотрим $I = (0.4, 1.4|0.2)A$, обратное направление тока. Для цинка же только ради определения носителей тока сделаем аналогично при $I \approx 1A$, запишем результаты в таблицу ниже.

I, A	0.4	0.6	0.8	1	1.2	Обратно, 1.2	Цинк, 1
0.2	0.08	0.11	0.14	0.2	0.22	-0.2	0.24
0.4	0.16	0.22	0.31	0.41	0.46	-0.44	0.48
0.6	0.23	0.34	0.47	0.6	0.7	-0.66	0.72
0.8	0.33	0.44	0.62	0.78	0.9	-0.82	0.92
1	0.42	0.52	0.72	0.92	1.06	-0.94	1.1
1.25	0.52	0.59	0.8	1.04	1.18	-1.04	1.22
1.45	0.6	0.64	0.88	1.1	1.26	-1.14	1.3

Рис. 4: $U_{24}(I_M)$

5 Обработка результатов

1. Угловые коэффициенты **прямых** при разных токах, протекающих через образец $y = \varepsilon/B$

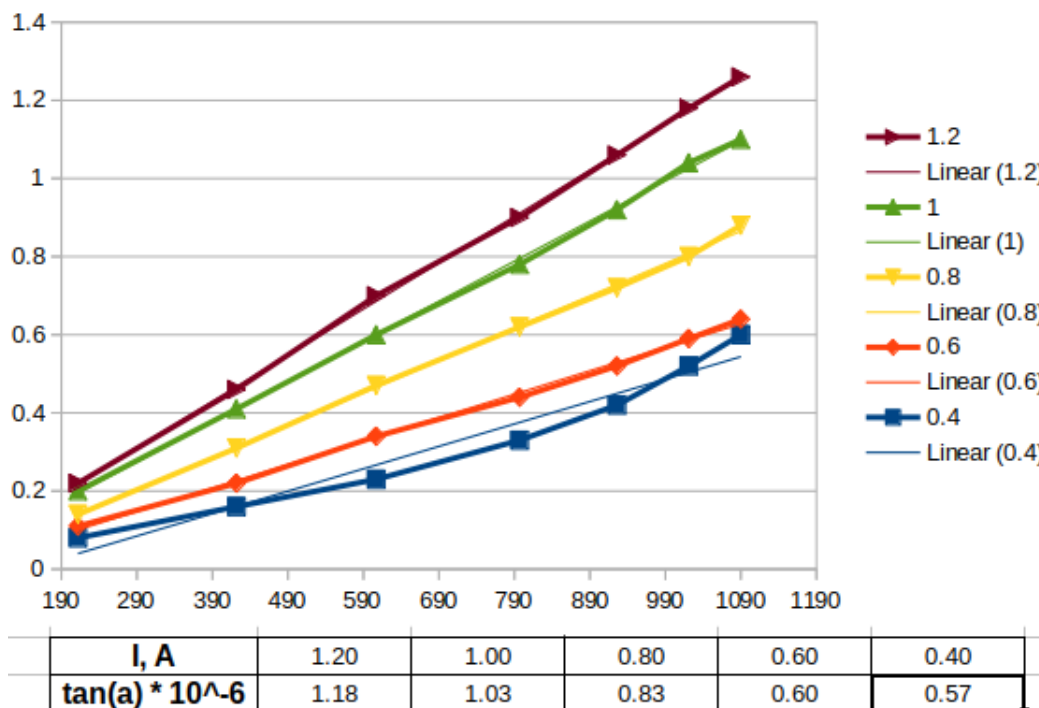


Рис. 5: E(B)

2. Как и ожидалось, даже при $I = 0.4\text{A}$ получаем далеко **не идеальную** зависимость, которую не буду рассматривать, так как погрешность этого измерения слишком велика. Для расчёта постоянной Холла необходимо построить и вычислить **коэффициент наклона прямой** $K(I)$:

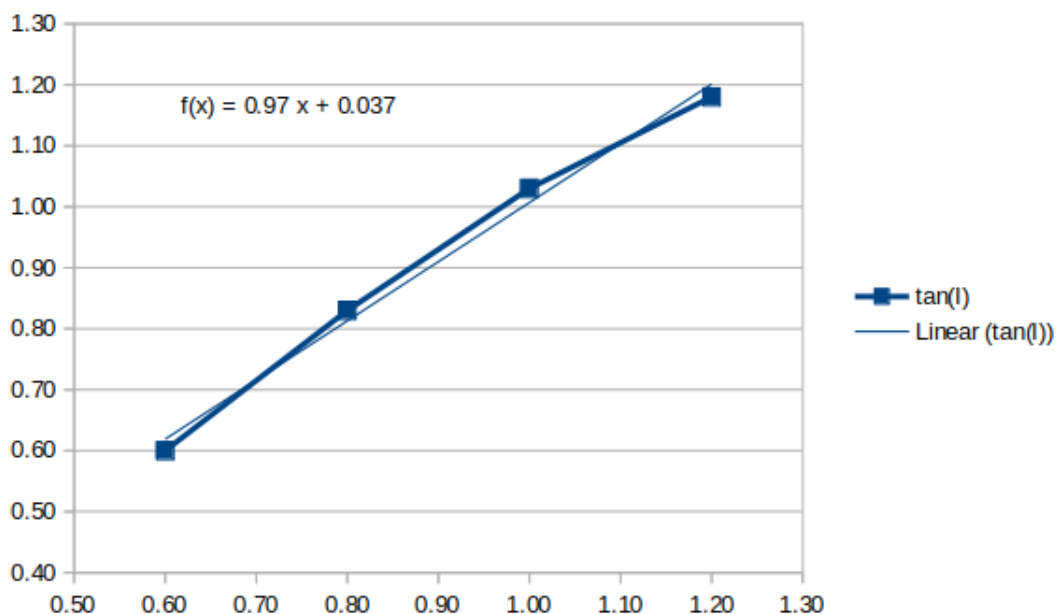


Рис. 6: $\tan(I)$

3. Уже будем пользоваться использующимся МНК программой. Главная наша задача - попытаться оценить погрешности всех этих измерений

4. Для постоянной Холла известно соотношение из законов Ньютона:

$$E_X = \frac{R_X I_{\text{com}} B}{a},$$

где a - толщина образца. В нашем случае серебра $a = 0.09 \text{ мм}$.

Так как $R_X = \frac{a \tan(\alpha_1)}{I_{\text{com}}}$, то $R_X = a \tan(I) \approx 8.7 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{С}}$

5. Концентрацию теперь легко найти:

$$n = \frac{1}{R_X e}.$$

$$n \approx 7.17 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$$

6. **ПЕРЕПРОВЕРИТЬ** Повторяя работу еще раз, только теперь без построения графика $\tan(I)$, рассчитываем сопротивление Холла для цинка, также учитывая, что теперь $a = 0.12 \text{ мм}$ для моего образца. Получаем $R_X \approx 7.3 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{С}}$, концентрация $n \approx 8.52 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$

7. Теперь исследуем **погрешности для этих измерений**:

Обработка погрешностей:

1) Для $\tan\left(\frac{E}{B}\right)$: $\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{5} \left[\frac{\langle y^2 \rangle - \langle y \rangle^2}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} - k^2 \right]}$

I	0,6	0,8	1	1,2
σ_k	0,3	0,4	0,5	0,5

На самом деле это огромные погрешности, ведь $\tan \in [0,6, 1,2]$. Если еще учитывать 0,2; 0,4, то погрешности будут почти 100% (отн.), поэтому их мы не учитываем

2) Для $\tan\left(\frac{E}{B}\right)$: аналогично: $\sigma_k \approx 0,6$ - огромная погрешность в $\approx 60\%$ примерно. Да, 4 точки с очень неточными данными...

3) $R_X = a \frac{E_X}{I_B}$, считая $\sigma_a \approx 10^{-2}$ (дано где то же цифрой на установке) $\Rightarrow \sigma_a \ll \sigma_{\tan}$

$\Rightarrow \sigma_{R_X} = \sigma_{\tan} \Rightarrow \underline{\sigma_{R_X} \approx 0,6 R_X}$

4) $n = \frac{1}{R_X e} \Rightarrow \sigma_n = \sigma_{R_X} \approx 0,6$

Рис. 7: Оценка погрешностей

8. Теперь для образцов в отсутствии поля при $I = 1 \pm 0.01 \text{ A}$ измерим напряжения: Серебро $U = 470 \pm 5 \mu\text{V}$, цинк $U = 380 \pm 5 \mu\text{V}$, погрешность была 0.5 от деления (делений 75), причем масштаб 750 мкВ.

Проводимость этих образцов, очевидно $G_{\text{sil}} \approx 2,13 * 10^3 \Omega^{-1}$, $G_z \approx 2.63 * 10^3 \Omega^{-1}$. Относительная погрешность этих измерений есть сумма относительных I , U , то есть 0.02, поэтому третий знак учитываем.

9. Удельная проводимость в нашем случае, зная все параметры наших образцов, есть

$$\sigma = \frac{GL}{al},$$

где L - длина, l - ширина (в таблице $L_{3,5}$), a - толщина. Подставляем имеющиеся на установке значения:

$\sigma_{\text{sil}} \approx 3,23 * 10^7 (\Omega * \text{m})^{-1}$, $\sigma_z \approx 0.85 * 10^7 (\Omega * \text{m})^{-1}$, причем считая относительные погрешности измерений параметров образца за 0.01 (даны две значимые цифры), имеем погрешность 0.05, то есть учитываем только два знака, третий уже не имеет значимости.

10. Подвижность носителей тока ищем, как

$$b = \frac{\sigma}{ne}.$$

Все данные уже имеются, просто подставляем значения: $b_{\text{sil}} \approx 2.8 * 10^{-3} \frac{\text{m}^2}{\text{V} * \text{s}}$, $b_z \approx 0.97 * 10^{-3} \frac{\text{m}^2}{\text{V} * \text{s}}$

11. Для этого измерения оценим также погрешность

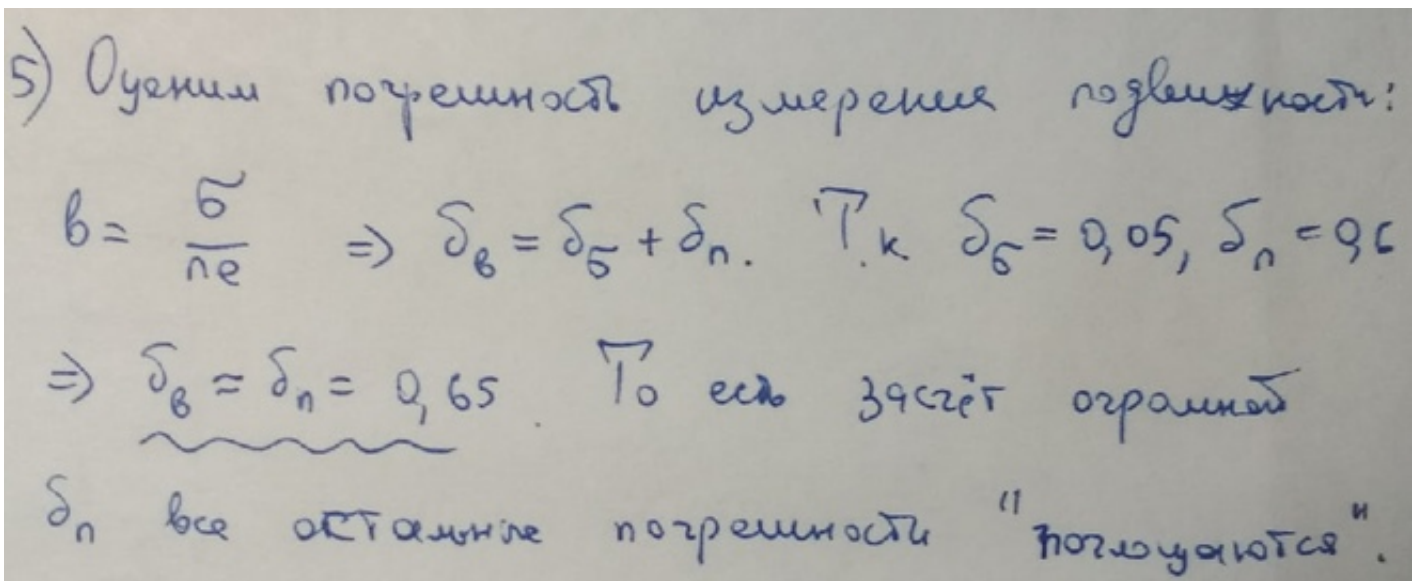
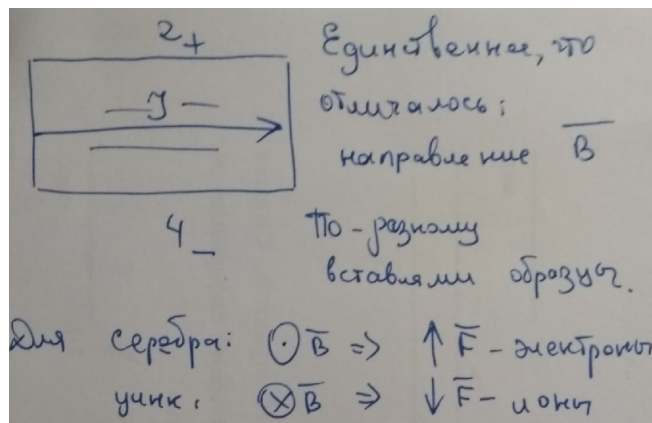


Рис. 8: Оценка погрешностей

12. Для обобщения всех полученных результатов построим таблицу

Металл	R_X , $\text{м}^3 / \text{Кл}$	Табл R_X	Знак носителя	$N * 10^{28}$, м^{-3}	$\text{Sigma} * 10^7$, $1/(\Omega * \text{м})$	b , $\text{см}^2 / (\text{В} * \text{с})$
Серебро	-8.7	-9	-	7.17	3.23	28
Цинк	7.3	5.5	+	8.52	0.85	9.7

13. Также вспомнил, как мы определяли характер проводимости



6 Вывод

Мы научились анализировать характер проводимости металла, вычислять основные характеристики, такие как константа Холла, удельная проводимость, концентрация, подвижность. Более того, научились это делать довольно близко к табличным значениям. Однако имели очень большие погрешности, что связано с большой систематической погрешностью вольтметра, малым кол-вом снятых точек. Если воспользоваться цифровым вольтметром, снять зависимость для 10 токов через образец, то в итоговую погрешность войдут также погрешности измерения параметров образца, поэтому данного кол-ва точек хватит для проведения этого эксперимента с получением качественного результата.