

Лабораторная работа №204.
Эффект Холла.

$t_0 = 24^\circ\text{C}$; $t = 25^\circ\text{C}$

Протокол.

Приборы и оборудование:

1. Зависимость разности потенциалов U_{56} между контактами 5-6 от величины тока I :

I^+ , мА	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_{56} , В	0,78	1,56	2,33	3,03	3,76	4,46	5,05	5,83	6,28	6,56
I^- , мА	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_{56} , В	-0,7	-1,48	-2,25	-3,04	-3,78	-4,53	-5,47	-5,8	-6,22	-6,83

2. Определение знака холловской разности потенциалов.

3. Зависимость разности потенциалов U_{34} между контактами 3-4 от величины тока I .

B^+ , Гс	i , А	I , мА	U_{34} , В	B^+ , Гс	i , А	I , мА	U_{34} , В	B^+ , Гс	i , А	I , мА	U_{34} , В
1040	0,3		0,1208	1040	0,3		0,0500	1040	0,3		0,1696
1380	0,4		0,1341	1380	0,4		0,0557	1380	0,4		0,1854
1660	0,5		0,1475	1660	0,5		0,0612	1660	0,5		0,2030
2000	0,6		0,1607	2000	0,6		0,0672	2000	0,6		0,2196
2280	0,7	5	0,1719	2280	0,7	2	0,0719	2280	0,7	8	0,2355
2560	0,8		0,1830	2560	0,8		0,0768	2560	0,8		0,2485
2800	0,9		0,1931	2800	0,9		0,0807	2800	0,9		0,2612
0			0,08								
2000	0,6		0,1606								
B^- , Гс	i , А	I , мА	U_{34} , В	B^- , Гс	i , А	I , мА	U_{34} , В	B^- , Гс	i , А	I , мА	U_{34} , В
1040	0,3		0,0403	1040	0,3		0,0178	1040	0,3		0,0161
1380	0,4		0,0246	1380	0,4		0,0126	1380	0,4		0,01428
1660	0,5		0,0145	1660	0,5		0,0073	1660	0,5		0,0252
2000	0,6		0,0042	2000	0,6		0,0018	2000	0,6		0,0080
2280	0,7	5	-0,0087	2280	0,7	2	-0,0028	2280	0,7	8	-0,0080
2560	0,8		-0,0197	2560	0,8		-0,0073	2560	0,8		-0,0216
2800	0,9		-0,0292	2800	0,9		-0,0111	2800	0,9		-0,0332

4. Зависимость

I , мА
U_{34} , В
$B = 0$
U_{34} , В
$B^+ = 2000 \text{ Гс}$
$U_{34} = U_{34}^B - U_{34}$, В
U_{34} , В
$B^+ = 1500 \text{ Гс}$
$U_{34} = U_{34}^B - U_{34}$, В
U_{34} , В
$B^+ = 2400 \text{ Гс}$
$U_{34} = U_{34}^B - U_{34}$, В

4. Зависимость $U_H(J)|_{B=\text{const}}$ (при $B = \text{const.}$)

$J, \mu A$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_{av}, B	J^+	0,0171	0,0341	0,0504	0,0660	0,0794	0,0935	0,1040	0,1151	0,1247	0,1318
$B=0$	J^-	-0,0179	-0,0374	-0,0578	-0,0783	-0,0988	-0,1205	-0,1395	-0,1600	-0,1770	-0,1942
U_{av}, B	J^+	0,0331	0,0684	0,1000	0,1315	0,1591	0,1871	0,2086	0,2320	0,2465	0,2590
$B^+ = 2000 \Gamma e$	J^-	-0,0340	-0,0698	-0,1075	-0,1430	-0,1778	-0,2150	-0,2427	-0,2755	-0,2978	-0,3208
$U_H = U_{av}^+ - U_{av}^-$	J^+	0,0160	0,0323	0,0496	0,0655	0,0797	0,0936	0,1046	0,1169	0,1218	0,1272
B	J^-	-0,0161	-0,0324	-0,0495	-0,0647	-0,0790	-0,0945	-0,1032	-0,1155	-0,1208	-0,1266
U_{av}, B	J^+	0,0267	0,0548	0,0825	0,1095	0,1340	0,1582	0,1784	0,1992	0,2130	0,2270
$B^+ = 1500 \Gamma e$	J^-	-0,0276	-0,0575	-0,0896	-0,1214	-0,1530	-0,1850	-0,2112	-0,2415	-0,2640	-0,2875
$U_H = U_{av}^+ - U_{av}^-$	J^+	0,0096	0,0206	0,0321	0,0435	0,0546	0,0647	0,0744	0,0841	0,0883	0,0952
B	J^-	-0,0097	-0,0201	-0,0318	-0,0431	-0,0542	-0,0645	-0,0717	-0,0815	-0,0870	-0,0933
U_{av}, B	J^+	0,0336	0,0692	0,1045	0,1372	0,1690	0,1988	0,2223	0,2442	0,2630	0,2790
$B^+ = 2400 \Gamma e$	J^-	-0,0346	-0,0722	-0,1120	-0,1497	-0,1876	-0,2264	-0,2536	-0,2862	-0,3132	-0,3370
$U_H = U_{av}^+ - U_{av}^-$	J^+	0,0165	0,0351	0,0541	0,0712	0,0896	0,1053	0,1183	0,1291	0,1383	0,1472
B	J^-	-0,0167	-0,0348	-0,0542	-0,0714	-0,0888	-0,1059	-0,1141	-0,1262	-0,1362	-0,1428

24.09.21 gk

1696
 854
 230
 496
 355
 485
 812

 41 B
 61
 428
 252
 080
 0030
 0218
 937

Отчет по лабораторной работе по физ. Эффект Холла

Цель работы: изучить возникновение эффекта Холла в средах магнитном поле, определить коэффициент Холла для образца, холловскую подвижность, оценить концентрацию свободных носителей в образце.

Аппаратура и оборудование: образцы из германия, миллиамперметр, вольтметр ВДМ-8245, резистор, блок переключения, генератор Б5-8, генератор для питания электромагнита, плата, электромагнит.

Теоретическая часть

Элементарная теория эффекта

Электрическое поле $\vec{E}$ создаёт в полупроводнике электрический ток с плотностью:

$$\vec{j} = \hat{\sigma} \vec{E}, \quad (1)$$

где $\hat{\sigma}$ — удельная электрическая проводимость, связанная с удельным сопротивлением ρ соотношением:

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

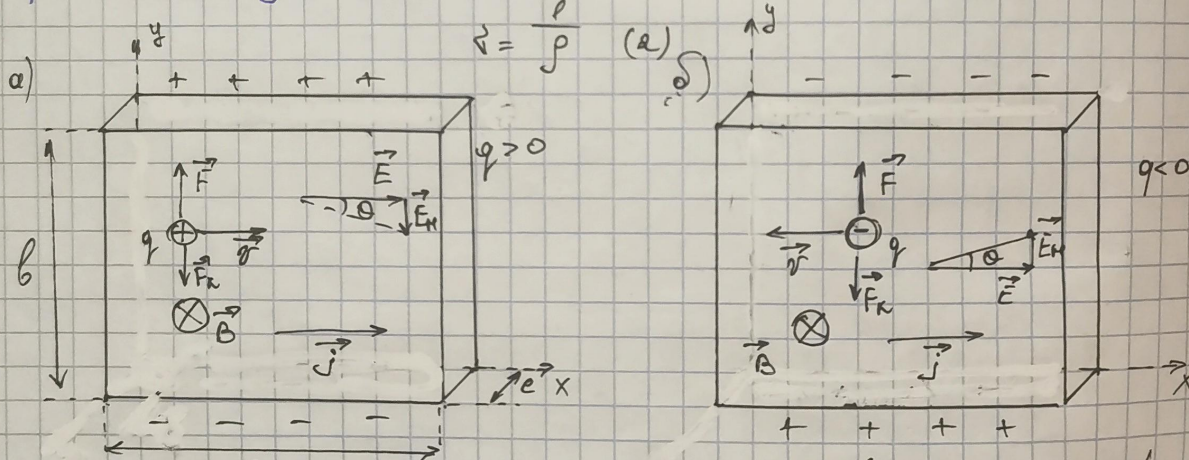


Рис. 1. Возникновение поля Холла в дирионах (а) и электронных проводниках.

С стороны дрейфового поля с вектором индукции $\vec{B}$ на движущиеся носители заряда действует магнитная составляющая силы Лоренца:

$$\vec{F} = q[\vec{v}; \vec{B}] \quad (3)$$

где $\vec{v}$ — скорость заряда (или дрейфовая скорость, т.к. тепловая скорость $\vec{v}_T$ — заряд.

В результате поперечного движения зарядов верхняя и нижняя грани заряжаются, и возникает перпендикулярное к $\vec{E}$ электрическое поле $\vec{E}_H$ — поле Холла (рис. 1). Т.е. на заряд начинают действовать силы Лоренца:

$$\vec{F}_L = q\vec{E}_H \quad (4)$$

Равновесное состояние достигается, когда выполнено равенство:

$$q\vec{E}_H + \vec{F} = 0, \quad (5)$$

тогда:

$$\vec{E}_H = -[\vec{v}, \vec{B}], \quad (6)$$

Так как:

$$I = \frac{dQ}{dt} = qn v S, \quad \text{а } j = \frac{I}{S}, \quad (7)$$

где n - концентрация зарядов по длине.

$$v = \frac{I}{qnS} = \frac{j}{qn} = \frac{QE}{qn} \quad (8)$$

$\Rightarrow v \sim E$, пусть $\mu = \frac{v}{E} = \frac{1}{qn}$ - дрейфовая подвижность.

$$\Rightarrow \vec{v} = \mu \cdot \vec{E} \quad (9)$$

Тогда из (5) и (9) следует

$$\vec{E}_H = -\mu [\vec{E}, \vec{B}], \quad (10)$$

или в скалярном (1):

$$\vec{E}_H = -R [\vec{j}, \vec{B}], \quad (11)$$

где R - коэффициент Холла

$$R = \frac{\mu}{q} \quad (12)$$

Подставив в (4) выраженные для плотности тока

$$\vec{j} = qn \vec{v} \quad (13)$$

с учетом (9) коэффициент Холла можно выразить через заряд и концентрацию:

$$R = \frac{1}{qn} \quad (14)$$

При более строгом выводе, можно получить соотношение:

$$R = \frac{\chi \mu}{q} \quad , \quad R = \frac{\chi}{qn}, \quad (15)$$

где χ - безразмерный коэффициент, называемый холл-фактором. Холл-фактор зависит от величины внешнего поля и от механизма рассеяния свободных носителей зарядов при их взаимодействии с ионами примесей и кристаллической решетки.

Для используемого в данной лабораторной работе чистого слаболегированного германия при комнатной температуре в слабом магнитном поле:

$$\chi = 1,48$$

Сравнивая формулы (14) и (15), можно уточнить значение холловского повышения с учетом холл-фактора, если ввести холловский повышение:

$$\mu_H = \chi / \mu \quad (16)$$

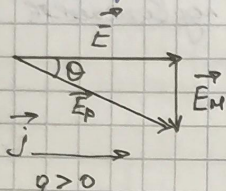
Угол Холла:

Действие магнитного поля $\vec{B}$ равносильно тому, что раздвигаются электрические поле:

$$\vec{E}_p = \vec{E} + \vec{E}_\perp$$

оказывается поворотом на некоторый угол Θ (угла Холла) от оси только вектора плотности тока $\vec{j}$, при этом:

$$\tan \Theta = \frac{E_p}{E}$$



или из (10) и (16) получим:

$$\tan \Theta = -\mu_H B. \quad (17)$$

При слабом магнитном поле:

$$-\mu_H B \ll 1 \quad (18)$$

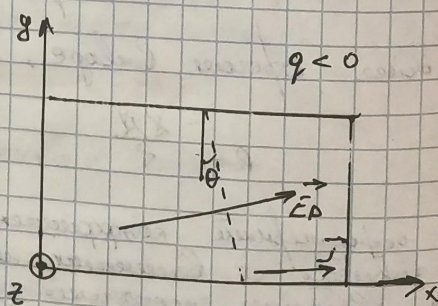
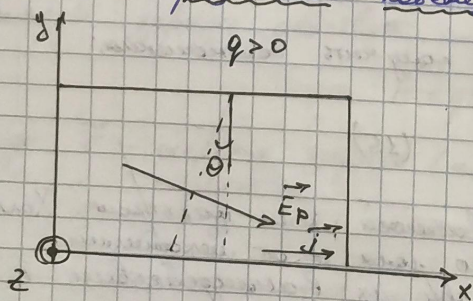
Тогда также приближенно можно записать значение холловского повышения угла:

$$\Theta \approx -\mu_H B_z \quad (19)$$

Холловская разность потенциалов:

Эквипотенциальные поверхности в средней части образцового вытесненного слоя χ образца поворачиваются при включенном магнитном поле $\vec{B}$ на угол Θ относительно их первоначального положения.

Разность в толщине, уменьшающую в одной плоскости, перпендикулярной вектору $\vec{j}$, называется разностью потенциалов U_H , которая называется холловской разностью потенциалов.



--- ~ эквипотенциальная поверхность.

Для образца формулы разности потенциалов в приближении однородного поля Холла эта разность потенциалов будет равна:

$$U_H = B E_H, \quad (20)$$

Для образца мощность тока можно выразить как:

$$j = \frac{I}{S} = \frac{I}{bc} \quad (21)$$

Тогда из соотношения (21) получаем:

$$U_H = \frac{R}{c} I B_z \quad (22)$$

Изобразим:

При изготовлении образца не требуется разрезать его хвостовых контактов параллельно образцу, чтобы они в отсутствие магнитного поля имели на одной эквипотенциальной поверхности.

В реальной образце между контактами расположения контактов 3 и 4, всегда есть небольшое смещение Δx .

При $\vec{B} = 0$ и $I \neq 0$ между этими контактами устанавливается разность потенциалов:

$$U_{34} = R_{34} I, \quad (23)$$

где

$$R_{34} = \rho \frac{\Delta x}{bc} \quad (24)$$

Другие побочные факторы дают вклад в разность потенциалов между контактами 3 и 4, существующую вследствие хвостовой разности потенциалов.

Таким образом, в реальном изомерном образце:

$$U_H = \frac{R}{c} I B_z = U_{34}^B - U_{34} \quad (25)$$

Отсюда видно, что коэффициент Холла R можно быть найден по тангенсу угла наклона линейных участков экспериментально найденных зависимостей $U_H(B)|_{I=\text{const}}$ и $U_H(I)|_{B=\text{const}}$.

Экспериментальная установка.

Общий вид экспериментальной установки схематически изображен на рис. 3. В верхней части показан образец, разрезанный между контактами электромагнита. В нижней части рисунка приведен вид панели с клеммами контактов и подключением прецизионных направленных тока в образце и в электромагните. Схема подключения измерительных приборов и источников напряжения приведена на рис. 4.

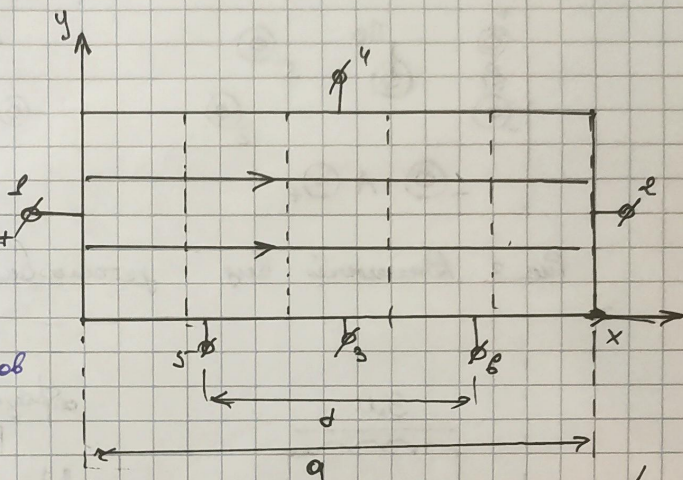


Рис. 3. Расположение контактов на образце. Стрелками показаны линии тока; цифровые - секция эквипотенциальных поверхностей.

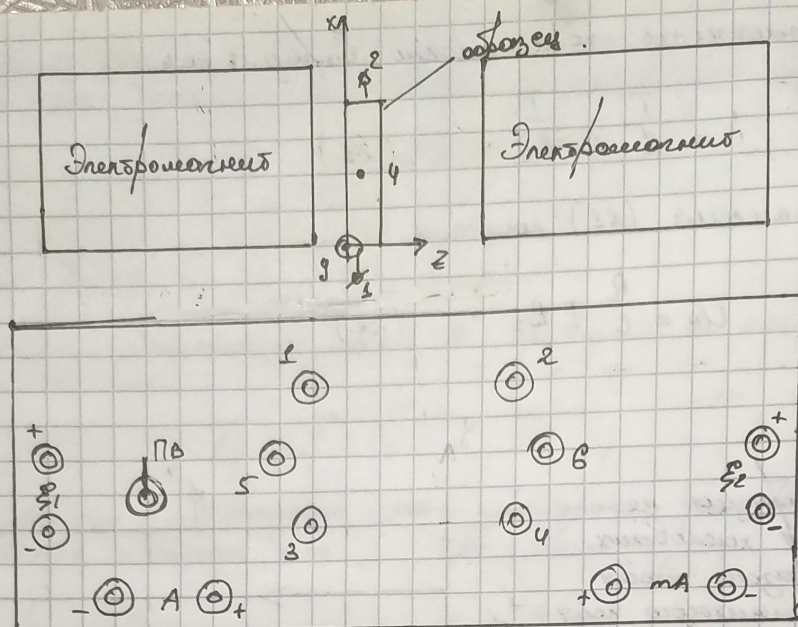


Рис. 3. Внешний вид устройства.

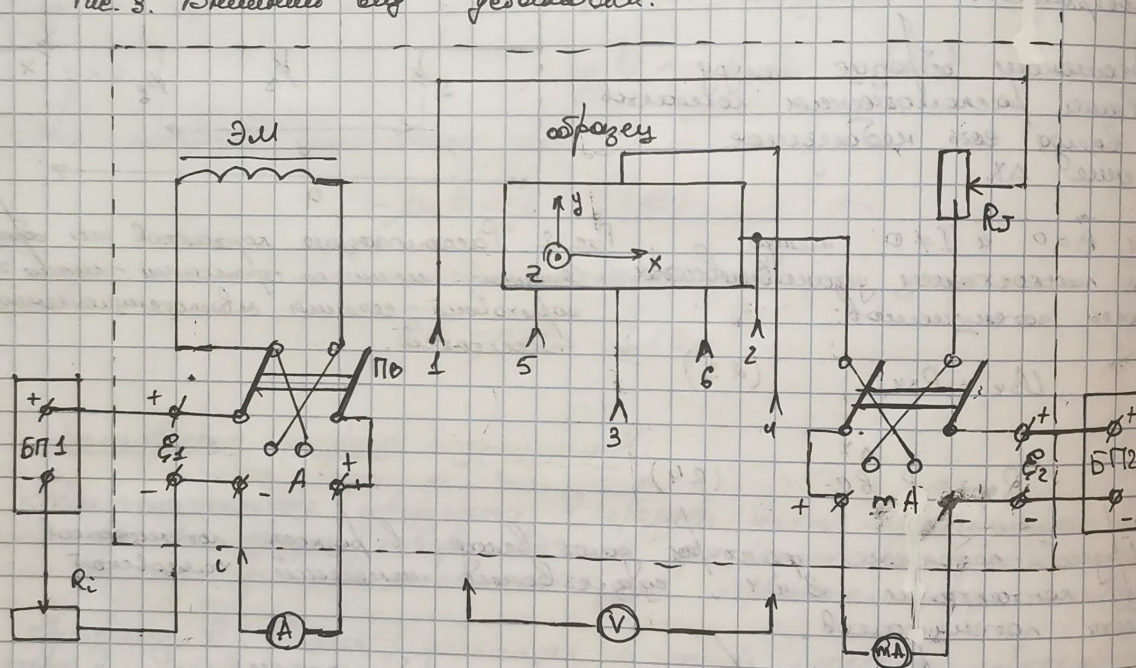


Рис. 4. Схема подключения измерительных приборов.

Экспериментальная часть

1. Вольтамперная характеристика между контактами 5-6. ($U_{56}(I)$).

I^+ , мА	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_{56} , В	0,78	1,56	2,38	3,03	3,78	4,48	5,05	5,83	6,28	6,58
ΔU_{56} , В	0,022	0,024	0,027	0,029	0,031	0,034	0,038	0,037	0,039	0,040
I^- , мА	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_{56} , В	-0,70	-1,48	-2,25	-3,04	-3,78	-4,53	-5,17	-5,80	-6,22	-6,83
ΔU_{56} , В	0,022	0,025	0,027	0,029	0,031	0,033	0,035	0,037	0,039	0,040

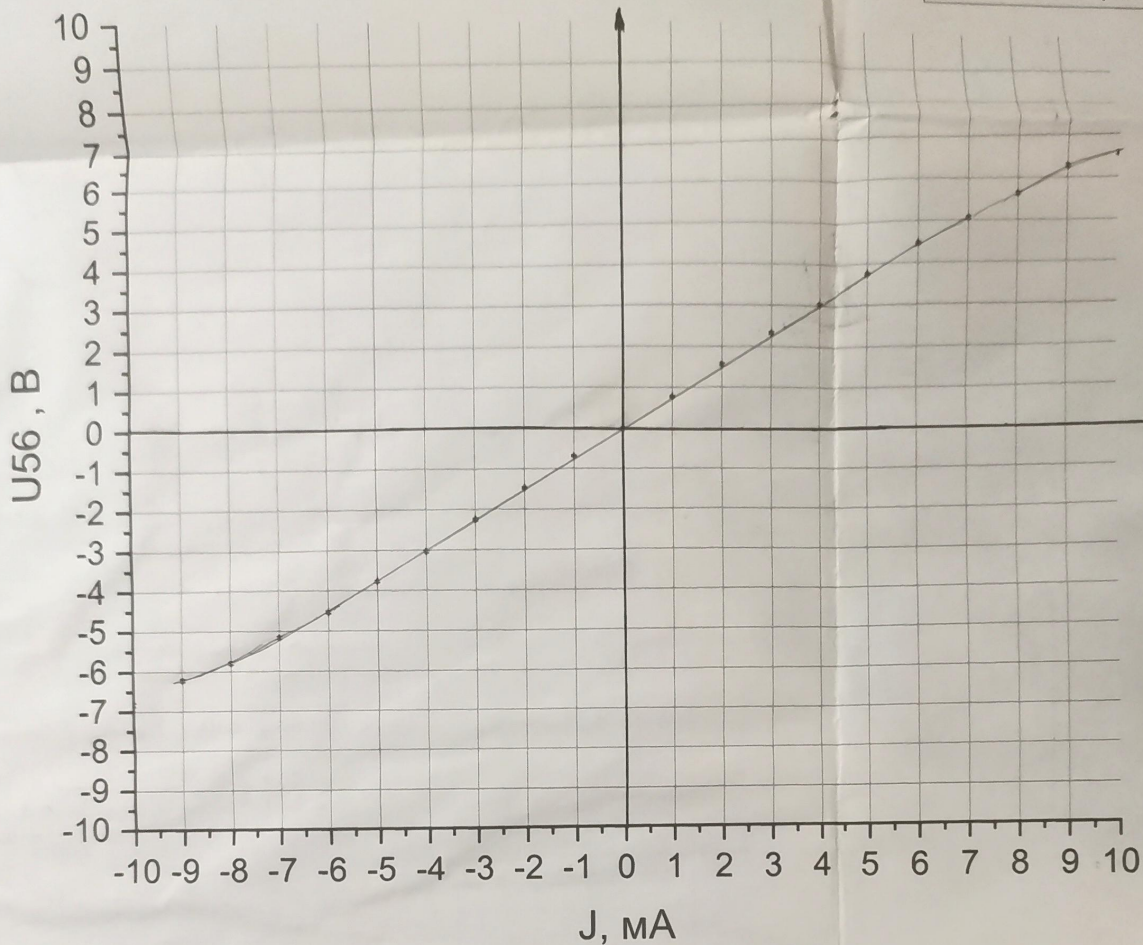
2. Измер

по

R

Соп

U56, В



Расчет погрешностей:

$$\Delta U_{56} = \pm (0,003 \cdot X + k\lambda) \text{ В, где}$$

$k = 0,05$ — значение коэффициента младшего разряда по данным предел измерения;

X — измеренное значение.

Класс точности амперметра: 0,5%

$$\Rightarrow \Delta I = 10 \cdot 0,005 = 0,05 \text{ мА}$$

(10 — максимальное значение амперметра; 0,5% — класс точности).

2. Измерение ρ (удельного сопротивления):

По закону Ома: $R_{56} = \frac{U_{56}}{I}$ что можно определить по коэффициенту угла наклона из графика:

$$R_{56} = \frac{2,3 \text{ В}}{3 \cdot 10^{-3} \text{ А}} \approx 0,78 \text{ кОм} = 780 \text{ Ом.}$$

Сопротивление по определению: $R = \frac{\rho l}{S}$

$l_{56} = 9,6 \text{ мм}$ - расстояние между контактами 5-6.
 $S = b \cdot c$, где $b = 5,1 \text{ мм}$ - ширина образца
 $c = 1 \text{ мм}$ - толщина образца.

$$\Rightarrow \rho = \frac{R \cdot S}{c} = \frac{R_{56} \cdot b \cdot c}{l_{56}} = 41,4345 \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{1}{\rho} \approx 0,024 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{см}}.$$

3. Определение знака холловской разности потенциалов и знака основных носителей заряда в образце:

$$U_{34}^B = U_H + U_{34} \rightarrow U_H = U_{34}^B - U_{34},$$

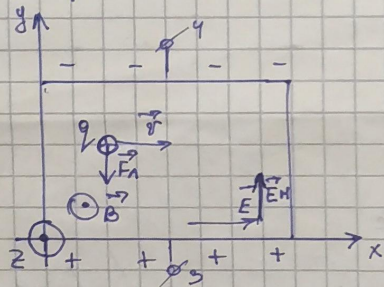
где $U_{34}^B = 0,1807 \text{ В}$ - разность потенциалов между контактами 3-4 при $B = 2000 \text{ Гс} = 0,2 \text{ Тл}$

$U_{34} = 0,08 \text{ В}$ - разность потенциалов между контактами 3-4 при $B = 0$

$$\Rightarrow U_H = 0,1807 - 0,08 = 0,0807 \text{ В} - \text{холловская разность потенциалов}$$

$$U_H > 0 \Rightarrow \vec{E}_H \uparrow \uparrow OY$$

$$(\varphi_3 - \varphi_4) > 0$$



$$\vec{F}_L = q[\vec{v}, \vec{B}]$$

$$\Rightarrow q > 0$$

~ основные носители заряда - "дырки".

4. Зависимость $U_{34}(B) \big|_{I=\text{const}}$:

а) $I^+ = 5 \text{ мА}$ - ток через образец ($\vec{I} \uparrow \uparrow OX$):

$U_{34}^B, \text{В}$	0,1208	0,1345	0,1475	0,1607	0,1713	0,1830	0,1931
$B^+, \text{Гс}$	1040	1380	1660	2000	2280	2560	2800
$\Delta U_{34}^B, \text{В}$	0,0005	0,0006	0,0006	0,0008	0,0007	0,0007	0,0007

$U_{34}, \text{В}$	0,0403	0,0276	0,0145	0,0022	-0,0087	-0,0197	-0,0292
$B^-, \text{Гс}$	1040	1380	1660	2000	2280	2560	2800
$\Delta U_{34}, \text{В}$	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002

a) $I^+ = 2 \text{ mA}$:

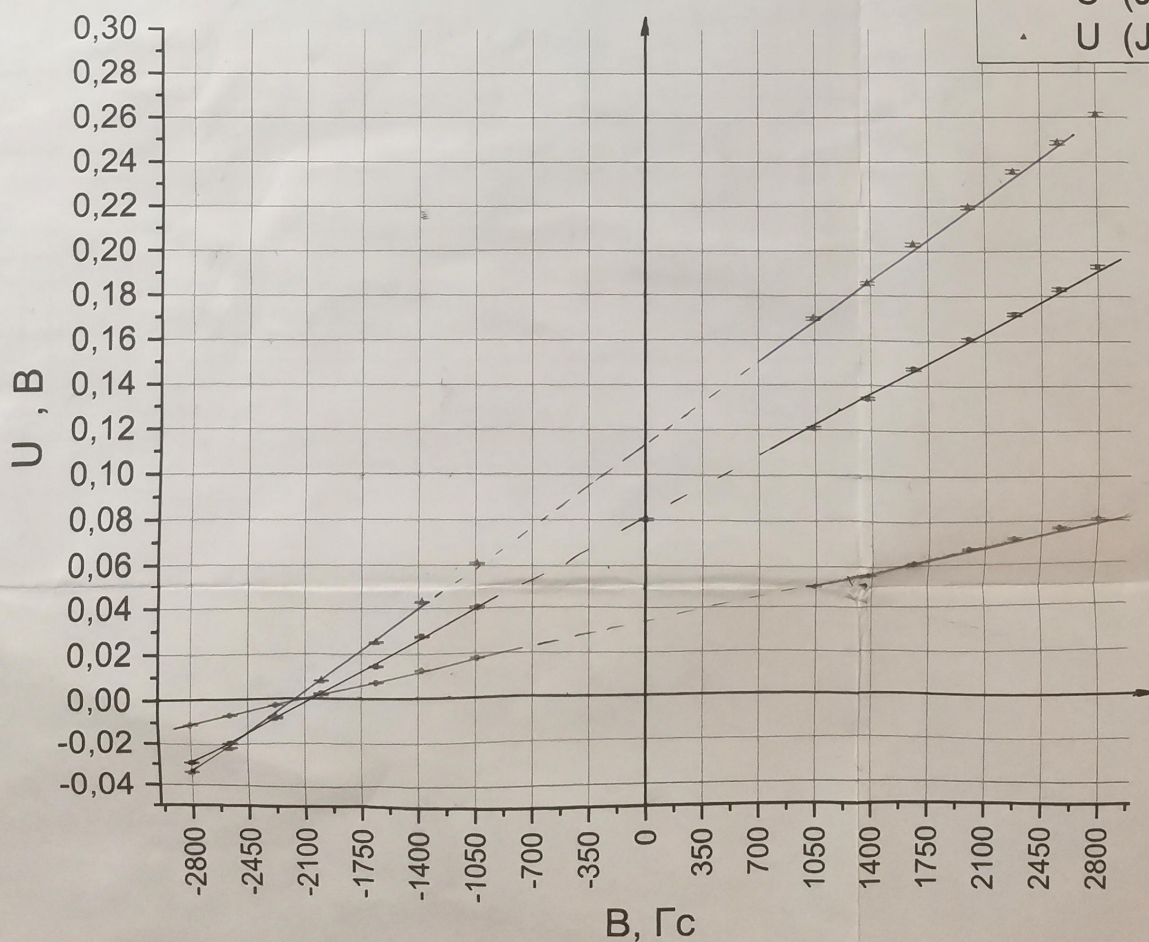
U_{34}^B, B	0,0500	0,0557	0,0612	0,0672	0,0719	0,0768	0,0807
B^+, Γ_c	1040	1380	1660	2000	2280	2580	2800
$\Delta U_{34}^B, \text{B}$	0,0003	0,0003	0,0003	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004

U_{34}^B, B	0,0448	0,0426	0,0073	0,0048	0,0028	-0,0073	-0,0443
B^-, Γ_c	1040	1380	1660	2000	2280	2580	2800
$\Delta U_{34}^B, \text{B}$	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002

b) $I^+ = 8 \text{ mA}$:

U_{34}^B, B	0,1836	0,1854	0,2030	0,2196	0,2365	0,2485	0,2612
B^+, Γ_c	1040	1380	1660	2000	2280	2580	2800
$\Delta U_{34}^B, \text{B}$	0,0007	0,0007	0,0008	0,0008	0,0009	0,0009	0,0009

U_{34}^B, B	0,0640	0,0428	0,0252	0,0080	-0,0080	-0,0218	-0,0537
B^-, Γ_c	1040	1380	1660	2000	2280	2580	2800
$\Delta U_{34}^B, \text{B}$	0,0003	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0003



Расчет погрешностей:

$$\Delta U_{34}^B = \pm (0,003 \cdot X + 2 \cdot \kappa) B, \text{ где}$$

$\kappa = 0,0002$ - значение единиц измеренного разряда на данной предель измерения;

X - измеренное значение.

5. Определение коэффициента Хомса (R):

$$U_H = \frac{R}{C} I B_2 = U_{34}^B - U_{34}$$

$$\rightarrow U_{34}^B = \frac{R}{C} I B_2 + U_{34}$$

$$\Rightarrow \frac{R}{C} I = R - \text{коэффициент наклона прямой на графике}$$

из графиков: $\frac{R}{C} I = \frac{\Delta U_{34}^B}{\Delta B_2} \rightarrow R = \frac{\Delta U \cdot C}{\Delta B_2 \cdot I}$,

где $C = 2 \text{ мВ}$ - ток через образца;
 I - ток через образцы.

а) $I = 5 \text{ мА}$.

$$R_1 = \frac{(0,1343 - 0,1203) \cdot 10^{-3}}{(1380 - 1040) \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^{-3}} \approx 0,0482353 \frac{\text{мВ}^3}{\text{Кл}} = 48235,3 \frac{\text{мВ}^3}{\text{Кл}}$$

$$R_2 = \frac{(0,0405 - 0,0248) \cdot 10^{-3}}{(1380 - 1040) \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^{-3}} \approx 44405,9 \frac{\text{мВ}^3}{\text{Кл}}$$

$$R_a = \frac{R_1 + R_2}{2} \approx 46470,6 \frac{\text{мВ}^3}{\text{Кл}}$$

б) $I = 2 \text{ мА}$.

$$R_1 = \frac{(0,0557 - 0,05) \cdot 10^{-3}}{(1380 - 1040) \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^{-3}} \approx 83823,5 \frac{\text{мВ}^3}{\text{Кл}}$$

$$R_2 = \frac{(0,0278 - 0,0226) \cdot 10^{-3}}{(1380 - 1040) \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^{-3}} \approx 78470,6 \frac{\text{мВ}^3}{\text{Кл}}$$

$$R_b = \frac{R_1 + R_2}{2} \approx 80147 \frac{\text{мВ}^3}{\text{Кл}}$$

в) $I = 8 \text{ мА}$:

$$R_1 = \frac{(0,1854 - 0,1696) \cdot 10^{-3}}{(1380 - 1040) \cdot 10^{-4} \cdot 8 \cdot 10^{-3}} \approx 58088,2 \frac{\text{мВ}^3}{\text{Кл}}$$

$$R_2 = \frac{(0,061 - 0,0423) \cdot 10^{-3}}{(1380 - 1040) \cdot 10^{-4} \cdot 8 \cdot 10^{-3}} \approx 66911,8 \frac{\text{мВ}^3}{\text{Кл}}$$

$$R_b = \frac{R_1 + R_2}{2} \approx 62500 \frac{\text{мВ}^3}{\text{Кл}}$$

$$R_{\text{ср.}} = \frac{R_a + R_b + R_b}{3} \approx 43039 \frac{\text{мВ}^3}{\text{Кл}}$$

Расчет погрешностей:

$$R = \frac{\Delta U \cdot e}{\Delta B_2 \cdot I}$$

$$\Delta R = \delta R \cdot R$$

$$R_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{N} ; \quad \Delta R = \max \{ \Delta R_i \} \quad (i = \overline{1, n})$$

$$\delta R = \delta(\Delta U) + \delta(I) = \frac{\Delta(\Delta U)}{\Delta U} + \frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta(U_2) + \Delta(U_1)}{\Delta U} + \frac{\Delta I}{I}$$

$$a) \delta R_1 = \frac{0,0005 + 0,0002}{0,0133} + \frac{0,05}{5} \approx 0,09$$

$$\Delta R_1 = 0,09 \cdot 48235,3 \approx 4041,177 \frac{\text{cell}^3}{\text{Kl}}$$

$$\delta R_2 = \frac{0,0002 + 0,0002}{0,0405 - 0,0248} + 0,01 \approx 0,04$$

$$\Delta R_2 = 0,04 \cdot 44705,9 \approx 2988,236 \frac{\text{cell}^3}{\text{Kl}}$$

$$b) \delta R_1 = \frac{2 \cdot 0,0003}{0,0537 \cdot 0,05} + \frac{0,05}{2} \approx 0,1$$

$$\Delta R_1 = 0,1 \cdot 83823,5 \approx 8382,35 \frac{\text{cell}^3}{\text{Kl}}$$

$$\delta R_2 = \frac{0,0004}{0,0052} + 0,025 \approx 0,08$$

$$\Delta R_2 = 0,08 \cdot 76440,6 \approx 6114,6 \frac{\text{cell}^3}{\text{Kl}}$$

$$b) \delta R_1 = \frac{0,0014}{0,0158} + \frac{0,05}{8} = \frac{0,0014}{0,0158} + 0,00625 \approx 0,08$$

$$\Delta R_1 = 0,08 \cdot 58088,2 = 4647,056 \frac{\text{cell}^3}{\text{Kl}} \quad \checkmark$$

$$\delta R_2 = \frac{0,0006}{0,0387} + 0,00625 \approx 0,1$$

$$\Delta R_2 = 0,1 \cdot 62500 = 6250 \frac{\text{cell}^3}{\text{Kl}}$$

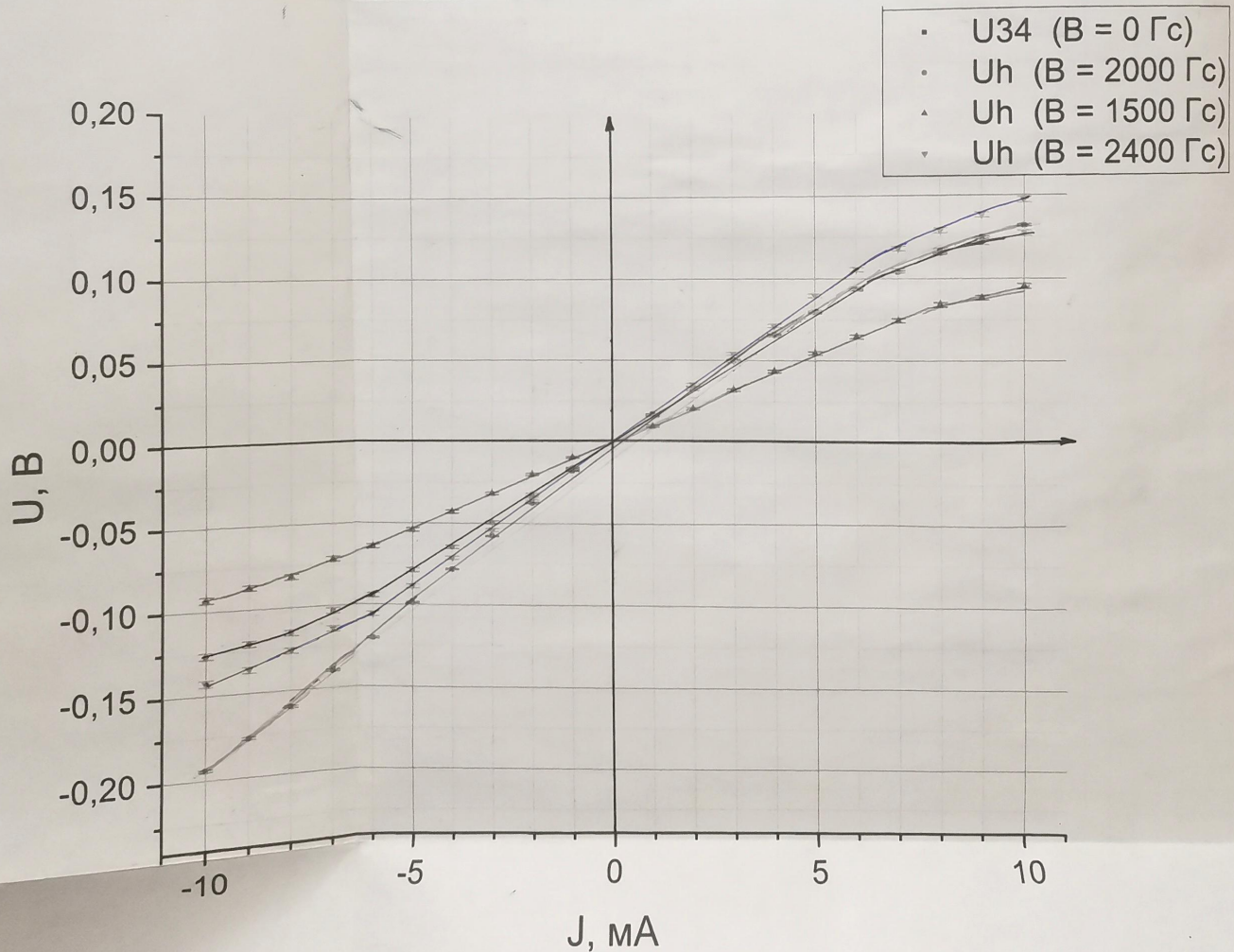
$$\Rightarrow \Delta R = \max \{ \Delta R_i \} \quad (i = \overline{1, n}) \rightarrow \Delta R = 8382,35 \frac{\text{cell}^3}{\text{Kl}}$$

$$\Rightarrow R_{cp} = (43039 \pm 8382,35) \frac{\text{cell}^3}{\text{Kl}}$$

6. Зависимость $U_3(I)|_{B=\text{const}}$ и $U_{34}(I)|_{B=0}$:

I, mA	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_{34}, B	$J^+ =$	0,0171	0,0341	0,0504	0,0660	0,0794	0,0935	0,1040	0,1151	0,1247	0,1318
$B = 0$	$J^- =$	-0,0179	-0,0374	-0,0578	-0,0783	-0,0988	-0,1205	-0,1395	-0,1600	-0,1770	-0,1942
$\Delta U_{34}, \text{B}$	$J^+ =$	0,0002	0,0003	0,0003	0,0003	0,0004	0,0005	0,0006	0,0006	0,0007	0,0007
U_h, B	$J^+ =$	0,0180	0,0323	0,0496	0,0655	0,0747	0,0936	0,1046	0,1169	0,1218	0,1272
$B = 2000 \text{ Гс}$	$J^- =$	-0,0181	-0,0324	-0,0495	-0,0647	-0,0780	-0,0945	-0,1032	-0,1155	-0,1208	-0,1268
$\Delta U_h, \text{B}$	$J^+ =$	0,0005	0,0007	0,0008	0,0009	0,001	0,0012	0,0013	0,0014	0,0015	0,0015
$B = 1500 \text{ Гс}$	$J^- =$	0,0005	0,0007	0,0008	0,001	0,0012	0,0014	0,0015	0,0017	0,0018	0,0019
U_h, B	$J^+ =$	0,0096	0,0206	0,0323	0,0435	0,0546	0,0647	0,0744	0,0841	0,0883	0,0952
$B = 1000 \text{ Гс}$	$J^- =$	-0,0097	-0,0201	-0,0318	-0,0431	-0,0542	-0,0645	-0,0717	-0,0815	-0,0870	-0,0933
$\Delta U_h, \text{B}$	$J^+ =$	0,0005	0,0006	0,0007	0,0009	0,001	0,0013	0,0014	0,0016	0,0017	0,0018
$B = 500 \text{ Гс}$	$J^- =$	0,0005	0,0006	0,0008	0,0009	0,001	0,0013	0,0014	0,0016	0,0017	0,0018
U_h, B	$J^+ =$	0,0165	0,0353	0,0543	0,0712	0,0896	0,1053	0,1183	0,1291	0,1383	0,1472
$B = 2400 \text{ Гс}$	$J^- =$	-0,0167	-0,0348	-0,0542	-0,0714	-0,0888	-0,1059	-0,1141	-0,1262	-0,1362	-0,1428
$\Delta U_h, \text{B}$	$J^+ =$	0,0003	0,0007	0,0008	0,0011	0,0011	0,0012	0,0013	0,0014	0,0015	0,0016
$B = 2000 \text{ Гс}$	$J^- =$	0,0005	0,0007	0,0009	0,001	0,0012	0,0014	0,0015	0,0017	0,0018	0,0019

$$\Delta I = 0,05 \text{ mA}$$



Расчет погрешностей:

$$\Delta U_{34} = \pm (0,003 \cdot X + 2\kappa) \text{ В}, \text{ где}$$

X - измеренная величина

$\kappa = 0,0001$ - значение единицы младшего разряда на данном пределе измерения

$$\Delta U_M = \Delta U_{34} + \Delta U_{34}^B, \text{ где}$$

$$\Delta U_{34}^B = \pm (0,0003 \cdot X + 2\kappa) \text{ В} \quad (\text{получается по той же формуле, что и } \Delta U_{34})$$

$$\Delta I = 10 \cdot 0,005 = 0,05 \text{ мА}, \text{ где}$$

$0,005 = 0,5\%$ - класс точности миллиамперметра.

10 - максимальное значение шкалы миллиамперметра.

7. Определение коэффициента Холла (R):

$$U_M = \frac{R}{C} B_z I = U_{34}^B - U_{34}$$

коэффициент холла графика

$$U_{34}^B = \frac{R}{C} B_z I + U_{34}$$

$$\frac{R}{C} B_z = \frac{\Delta U_{34}^B}{\Delta I} \rightarrow R = \frac{\Delta U_{34}^B \cdot C}{B_z \cdot \Delta I} = \frac{\Delta U_{34}^B \cdot C}{B \cdot \Delta I}$$

а) $B = 2000 \text{ Гс}$:

$$I^+: R_1 = \frac{(0,0323 - 0,016) \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \approx 81500 \frac{\text{сел}^3}{\text{Кл}}$$

$$I^-: R_2 = \frac{(-0,0163 + 0,0324) \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \approx 81500 \frac{\text{сел}^3}{\text{Кл}}$$

$$\Rightarrow R_H = 81500 \frac{\text{сел}^3}{\text{Кл}}$$

б) $B = 1500 \text{ Гс}$:

$$I^+: R_1 = \frac{(0,0201 - 0,0036) \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \approx 43333 \frac{\text{сел}^3}{\text{Кл}}$$

$$I^-: R_2 = \frac{(0,0201 - 0,0067) \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \approx 43333 \frac{\text{сел}^3}{\text{Кл}}$$

$$R_H = \frac{R_1 + R_2}{2} \approx 43333,2 \frac{\text{сел}^3}{\text{Кл}}$$

в) $B = 2000 \text{ Гс}$:

$$I^+: R_1 = \frac{(0,0351 - 0,0165) \cdot 10^{-3}}{2,4 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \approx 44500 \frac{\text{сел}^3}{\text{Кл}}$$

$$I^-: R_2 = \frac{(0,0342 - 0,0167) \cdot 10^{-3}}{2,4 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \approx 45416,7 \frac{\text{сел}^3}{\text{Кл}}$$

$$R_H = \frac{R_1 + R_2}{2} \approx 46458,3 \frac{\text{сел}^3}{\text{Кл}}$$

$$R_{\text{ср.}} = \frac{R_a + R_b + R_b}{3} = 48430,5 \frac{\text{см}^3}{\text{кг}}$$

Расчет погрешностей:

$$R = \frac{\Delta U \cdot c}{b \cdot \Delta T}$$

$$\delta R = \frac{\Delta(U_a) + \Delta(U_b)}{\Delta U} + \frac{2 \Delta T}{\Delta T}$$

$$\Delta R = \delta R \cdot R \rightarrow \Delta R = \max \{ \Delta R_i \}, \quad i = 1, 2$$

$$a) \delta R_1 = \delta R_2 = \frac{0,0012}{0,0307} + \frac{2 \cdot 0,05}{1} \approx 0,13$$

$$\Delta R_1 = \Delta R_2 = 0,13 \cdot 48430,5 = 6295,96 \frac{\text{см}^3}{\text{кг}}$$

$$b) \delta R_1 \approx \delta R_2 = \frac{0,004}{0,011} + 0,1 = 0,2$$

$$\Delta R_1 \approx \Delta R_2 \approx 0,2 \cdot 48430,5 = 9686,1 \frac{\text{см}^3}{\text{кг}}$$

$$c) \delta R_1 \approx \delta R_2 = \frac{0,0012}{0,0156} + 0,1 \approx 0,16$$

$$\Delta R_1 \approx \Delta R_2 = 0,16 \cdot 48430,5 = 7748,88 \frac{\text{см}^3}{\text{кг}}$$

$$\Delta R = \max \{ \Delta R_i \} = 9686,1 \frac{\text{см}^3}{\text{кг}}$$

$$\Rightarrow R = (48430,5 \pm 9686,1) \frac{\text{см}^3}{\text{кг}}$$

8. Расчет сопротивления R_{34} :

По закону Ома: $R = \frac{U}{I}$

$$\rightarrow R_{34} = \frac{U_{34}}{I} \quad (\text{коэффициент при наклоне})$$

$$I^+: (R_{34})_1 = \frac{0,0344 \text{ В}}{2 \cdot 10^{-3} \text{ А}} = 17,2 \text{ Ом}$$

$$I^-: (R_{34})_2 = \frac{0,0374 \text{ В}}{2 \cdot 10^{-3} \text{ А}} \approx 18,7 \text{ Ом}$$

$$(R_{34})_{\text{ср.}} = \frac{(R_{34})_1 + (R_{34})_2}{2} \approx 17,95 \text{ Ом}$$

9. Вычисление сечения Δx у контактов 3-4:

$$R_{34} = \rho \frac{\Delta x}{b \cdot c} = \frac{\Delta x}{\sigma \cdot b \cdot c} \Rightarrow \Delta x = R_{34} \cdot \sigma \cdot b \cdot c$$

$$b = 5,1 \text{ мм} = 0,51 \text{ см} \quad - \text{ширина образца}$$

$$c = 1 \text{ мм} = 0,1 \text{ см} \quad - \text{толщина образца}$$

$$\Delta x \approx 17,95 \cdot 0,51 \cdot 0,1 \cdot 0,024 \approx 0,022 \text{ см} = 0,2 \text{ мм}$$

10. Вычисление холловской подвижности (μ_H):

$$R = \frac{R_H}{I} = \frac{\mu_H}{I} \rightarrow \mu_H = R \cdot I, \text{ где}$$

$$I = 0,024 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$$

$$R_1 = R_{ф.1} = 46430,5 \frac{\text{см}^3}{\text{Кл}}$$

$$R_2 = R_{ф.2} = 43420,6 \frac{\text{см}^3}{\text{Кл}}$$

$$\Rightarrow R = \frac{R_1 + R_2}{2} = 44950,55 \frac{\text{см}^3}{\text{Кл}}$$

~ усредненное значение коэффициента Холла

$$\Rightarrow \mu_H = R \cdot I = 44950,55 \cdot 0,024 \approx 1078,8 \frac{\text{см}^2}{\text{Ом} \cdot \text{Кл}}$$

11. Проверка условия слабого магнитного поля:
Вычисление угла Холла при $B^* = 1000 \text{ Гс}$

а) Условие слабого магнитного поля: $\mu_H \cdot B_z \ll 1$

$$B_z = 0,2 \text{ Тл}$$

$$\mu_H = 1078,8 \cdot 10^{-10} \frac{\text{м}^2}{\text{Ом} \cdot \text{Кл}} \rightarrow \mu_H \cdot B_z \approx 0,036 \ll 1$$

$\Rightarrow$ условие слабого магнитного поля выполнено

б) Угол Холла: $\Theta \approx -\mu_H B_z$

$$\Rightarrow \Theta \approx -0,036 \text{ рад}$$

12. Оценка концентрации основных носителей заряда в образце:

$$R = \frac{1}{q \cdot n} \rightarrow n = \frac{1}{q \cdot R}$$

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$R = 44950,55 \frac{\text{см}^3}{\text{Кл}} \approx 0,0449 \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$$

$$n \approx \left(\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,0449}{1,18} \right)^{-1} \approx 9,846 \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{м}^3}$$

Вывод: 1) Выполнен лабораторный расчет, определен тип основных носителей заряда в образце: "дырки".

2) Построены графики зависимостей $U_H(B) |_{I=\text{const}}$ и $U_H(I) |_{B=\text{const}}$ и определен по ним коэффициент Холла:

$$а) R = (43039 \pm 8382,35) \frac{\text{см}^3}{\text{Кл}}$$

$$б) R = (46430,5 \pm 14266,64) \frac{\text{см}^3}{\text{Кл}}$$

3) Проводимость образца:

$$\bar{g} \approx 0,024 \frac{1}{\text{см} \cdot \text{см}}$$

4) Вычислим значение Δx между пикетажами 3-4:

$$\Delta x \approx 0,2 \text{ мм.}$$

5) Определим хамовскую подвижность:

$$\mu_H \approx 5498,8 \frac{\text{см}^2}{\text{сек} \cdot \text{Кл.}}$$

6) Вычислим угол Холла, при $B^* = 10000 \text{ Гс}$:

$$\theta \approx -0,036 \text{ рад}$$

а также проверим условие слабого магнитного поля

7) Определим концентрацию носителей заряда:

$$n \approx 5,846 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$$

15.10.21