

*Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования*  
**«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**Лабораторная работа № 3.3.5**

по курсу общей физики

на тему:

**«Эффект Холла в металлах»**

*Работу выполнил:  
Баринов Леонид  
(группа Б02-827)*

Долгопрудный  
2019

## 1 Аннотация

В работе будет проведено измерение подвижности и концентрации носителей заряда в металлах.

## 2 Теоретические сведения

Формула проводимости

$$\sigma = enb \quad (1)$$

$b$  – подвижность,  $n$  – концентрация,  $e$  – элементарный заряд, показывает что исследование электрической проводимости проводников позволяет определить произведение  $nb$ . Как мы увидим ниже, исследование эффекта Холла позволяет находить плотность носителей  $n$ , после чего можно найти и их подвижность  $b$ . Таким образом, одновременное исследование электрической проводимости и эффекта Холла позволяет экспериментально находить важнейшие параметры, определяющие состояние электронов в металлах и полупроводниках. Эффект Холла позволяет также определить преобладающий тип проводимости — электронный или дырочный.

Суть эффекта Холла состоит в следующем. Пусть через однородную пластину металла вдоль оси  $x$  течёт ток  $I$  (рис. 1).

Если эту пластину поместить в магнитное поле, направленное по оси  $y$ , то между гранями А и Б появляется разность потенциалов. В самом деле, на электрон, движущийся со скоростью  $\langle \vec{v} \rangle$  в электромагнитном поле, действует сила Лоренца:

$$\vec{F}_\text{л} = -e\vec{E} - e\langle \vec{v} \rangle \times \vec{B} \quad (2)$$

где  $e$  — абсолютная величина заряда электрона,  $E$  — напряжённость электрического поля,  $B$  — индукция магнитного поля. В нашем случае сила, обусловленная вторым слагаемым, направлена вдоль оси  $z$ :

$$F_B = e|\langle v_x \rangle|B$$

Здесь  $|\langle v_x \rangle|$  — абсолютная величина дрейфовой скорости электронов вдоль оси  $x$ , возникающая под действием внешнего электрического поля.

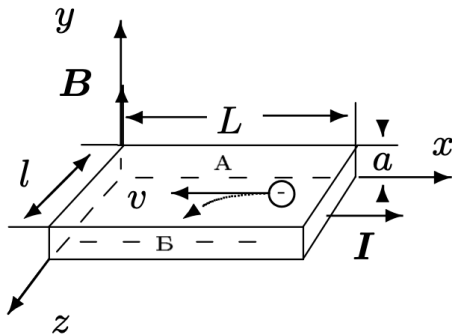


Рис. 1. Образец с током в магнитном поле

Под действием этой силы электроны отклоняются к грани Б, заряжая её отрицательно (для простоты рассматриваем только один тип носителей). На грани А накапливаются нескомпенсированные положительные заряды. Это приводит к возникновению электрического поля  $E_z$ , направленного от А к Б, которое действует на электроны с силой  $F_E = eE_z$ , направленной против силы  $F_B$ . В установившемся режиме сила  $F_E$  уравнивает силу  $F_B$ , и накопление электрических зарядов на боковых гранях пластины прекращается. Из условия равновесия  $F_B = F_E$  найдём

$$E_z = |\langle v_x \rangle|B \quad (3)$$

Поле  $E_z$  даёт вклад в общее поле  $E$ , в котором движутся электроны. С полем  $E_z$  связана разность потенциалов  $U_{AB}$  между гранями А и Б:

$$U_{AB} = -E_z l = -|\langle v_x \rangle| B l \quad (4)$$

В этом и состоит эффект Холла. Второе слагаемое в силе Лоренца (2), с которым связан эффект, часто называют «холловским».

Замечая, что сила тока

$$I = ne|\langle v_x \rangle| l \cdot a, \quad (5)$$

и объединяя (3) и (5), найдем ЭДС Холла:

$$\mathcal{E}_x = U_{AB} = -\frac{IB}{nea} = -R_x \cdot \frac{IB}{a} \quad (6)$$

Константа  $R_x$  называется постоянной Холла. Как видно из (6):

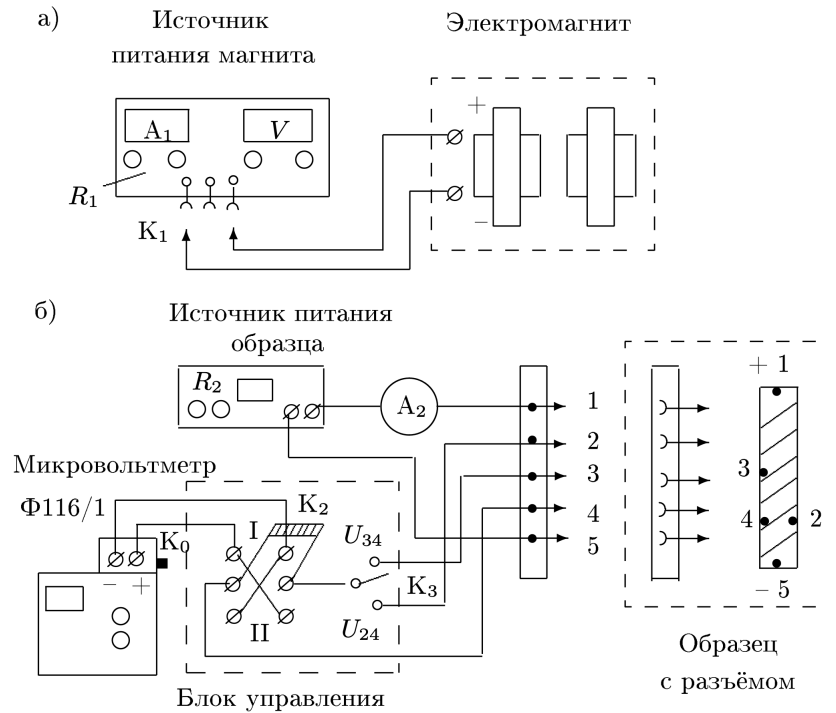
$$R_x = \frac{1}{ne}$$

### 3 Оборудование

**В работе используются:** электромагнит с источником питания, источник постоянного тока, микровольтметр Ф116/1, амперметры, милливеберметр, образцы из меди и цинка.

#### Экспериментальная установка

Электрическая схема установки для измерения ЭДС Холла представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Схема установки для исследования эффекта Холла в металлах

В зазоре электромагнита (рис. 2а) создаётся постоянное магнитное поле, величину которого можно менять с помощью источника питания электромагнита. Разъём  $K_1$  позволяет менять направление тока в обмотках электромагнита. Ток питания электромагнита измеряется амперметром  $A_1$ . Градуировка магнита проводится с помощью милливеберметра.

Металлические образцы в форме тонких пластинок, смонтированные в специальных держателях, подключаются к блоку питания через разъём (рис. 2б). Ток через образец регулируется реостатом  $R_2$  и измеряется амперметром  $A_2$ .

Для измерений ЭДС Холла используется микровольтметр Ф116/1, в котором высокая чувствительность по напряжению сочетается с малой величиной тока, потребляемого измерительной схемой: минимальный предел измерения напряжения составляет 1,5 мкВ, а потребляемый ток — всего  $10^{-8}$  А.

В образце с током, помещённом в зазор электромагнита, между контактами 2 и 4 возникает холловская разность потенциалов, которая измеряется с помощью микровольтметра, если переключатель  $K_3$  подключён к точке 2 образца. При подключении  $K_3$  к точке 3 микровольтметр измеряет омическое падение напряжения  $U_{34}$ , вызванное основным током через образец. При нейтральном положении ключа входная цепь микровольтметра разомкнута.

Ключ  $K_2$  позволяет менять полярность напряжения, поступающего на вход микровольтметра.

Иногда контакты 2 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.

Можно исключить влияние омического падения напряжения иначе, если при каждом токе через образец измерять напряжение  $U_0$  между точками 2 и 4 в отсутствие магнитного поля. При фиксированном токе через образец это дополнительное к ЭДС Холла напряжение остаётся неизменным. От него следует (с учётом знака) отсчитывать величину ЭДС Холла:

$$\mathcal{E}_x = U_{24} \pm U_0 \quad (7)$$

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  $U_{34}$  между контактами 3 и 4 в отсутствие магнитного поля, можно, зная параметры образца, рассчитать проводимость материала образца по очевидной формуле:

$$\sigma = \frac{IL_{34}}{U_{34}al}, \quad (8)$$

где  $L_{34}$  — расстояние между контактами 3 и 4,  $a$  — толщина образца,  $l$  — его ширина.

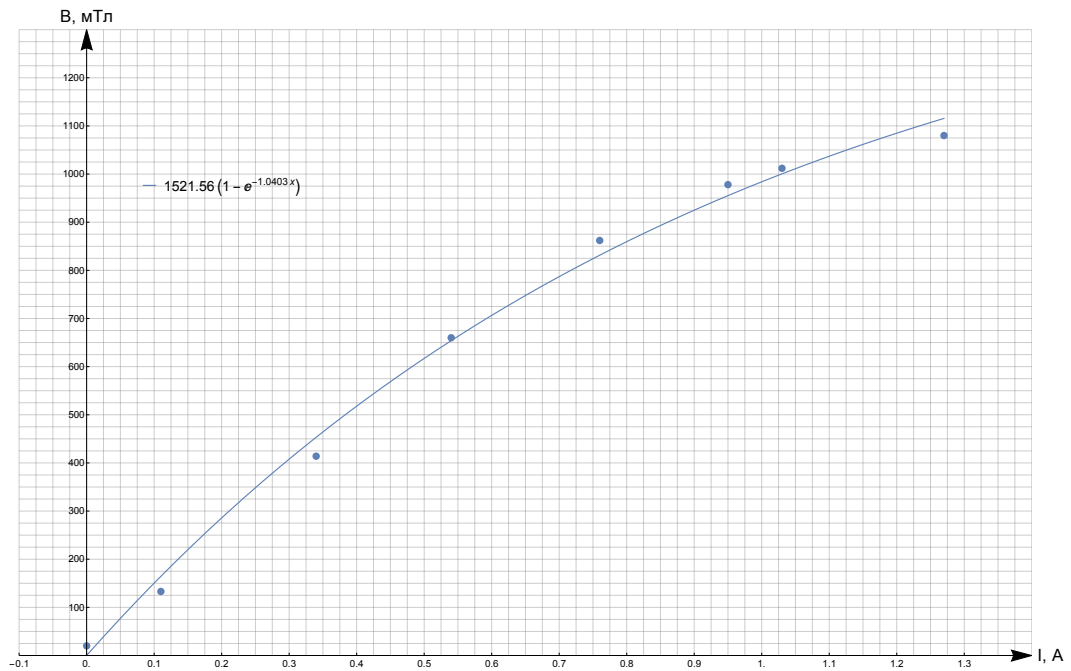
## 4 Результаты измерений и обработка результатов

Снимем зависимость индукции магнитного поля от тока через магнит:

$I_M, \text{ A}$	0	0,11	0,34	0,54	0,76	0,95	1,03	1,27
$B, \text{ мТл}$	20	133	414	660	862	978	1012	1080

**Таблица 1.** Зависимость индукции магнитного поля  $B$  от тока через магнит  $I_M$

По результатам в таблице 1 построим график  $B = f(I_M)$



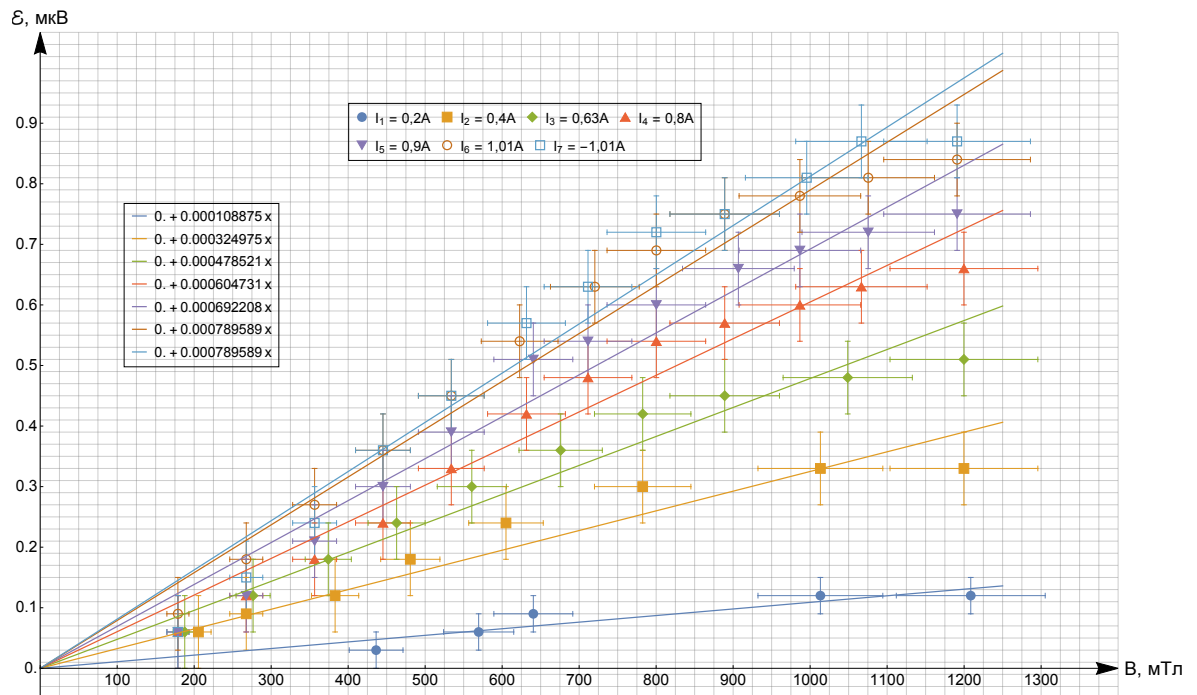
**Рис. 3.** График зависимости индукции магнитного поля  $B$  от тока через магнит  $I_M$

Рассчитаем ЭДС Холла и построим семейство характеристик  $\mathcal{E} = f(B)$  при разных значениях тока  $I$  через образец из меди.

$I, \text{ A}$	$B, \text{ мТл}$	$\mathcal{E}, \text{ мкВ}$	$I, \text{ A}$	$B, \text{ мТл}$	$\mathcal{E}, \text{ мкВ}$	$I, \text{ A}$	$B, \text{ мТл}$	$\mathcal{E}, \text{ мкВ}$
0,2	436,31	0,03	0,8	178,87	0,06	1,01	178,87	0,09
	569,47	0,06		267,64	0,12		267,64	0,18
	640,49	0,09		356,42	0,18		356,42	0,27
	1013,33	0,12		445,19	0,24		445,19	0,36
	1208,63	0,12		533,96	0,33		533,96	0,45
0,4	205,50	0,06	0,8	631,61	0,42	1,01	622,73	0,54
	267,64	0,09		711,50	0,48		720,38	0,63
	383,05	0,12		800,28	0,54		800,28	0,69
	480,70	0,18		889,05	0,57		889,05	0,75
	604,98	0,24		986,70	0,6		986,70	0,78
	782,52	0,3		1066,59	0,63		1075,47	0,81

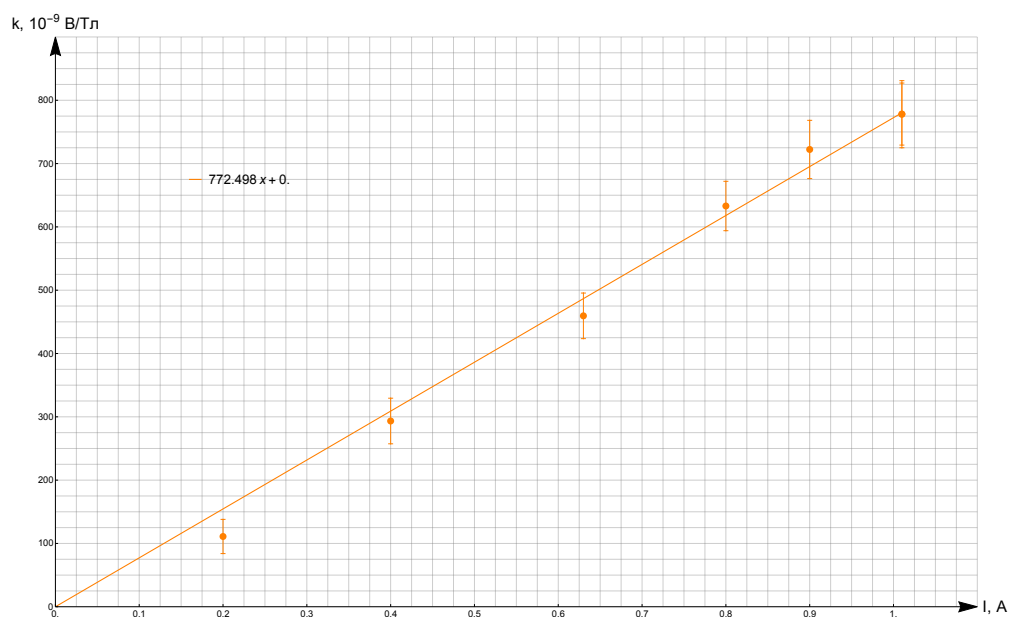
$I, \text{ A}$	$B, \text{ мТл}$	$\mathcal{E}, \text{ мкВ}$	$I, \text{ A}$	$B, \text{ мТл}$	$\mathcal{E}, \text{ мкВ}$	$I, \text{ A}$	$B, \text{ мТл}$	$\mathcal{E}, \text{ мкВ}$
0,63	1013,33	0,33	0,9	1199,75	0,66	1,01	1190,87	0,84
	1199,75	0,33		178,87	0,06		178,87	0,06
	187,75	0,06		267,64	0,12		267,64	0,15
	276,52	0,12		356,42	0,21		356,42	0,24
	374,17	0,18		445,19	0,3		445,19	0,36
	462,94	0,24		533,96	0,39		533,96	0,45
	560,59	0,3		640,49	0,51		631,61	0,57
	675,99	0,36		711,50	0,54		711,50	0,63
	782,52	0,42		800,28	0,6		800,28	0,72
	889,05	0,45		906,80	0,66		889,05	0,75
	1048,84	0,48		986,70	0,69		995,57	0,81
	1199,75	0,51		1075,47	0,72		1066,59	0,87
				1190,87	0,75		1190,87	0,87

**Таблица 2.** Зависимость тока  $I$  через образец от магнитной индукции  $B$  магнитного поля, в котором находится образец



**Рис. 4.** Семейство характеристик  $\mathcal{E} = f(B)$  при разных значениях тока  $I$  через образец

Определим угловые коэффициенты  $k(I) = \Delta\mathcal{E}/\Delta B$  полученных прямых. Построим график  $k = f(I)$

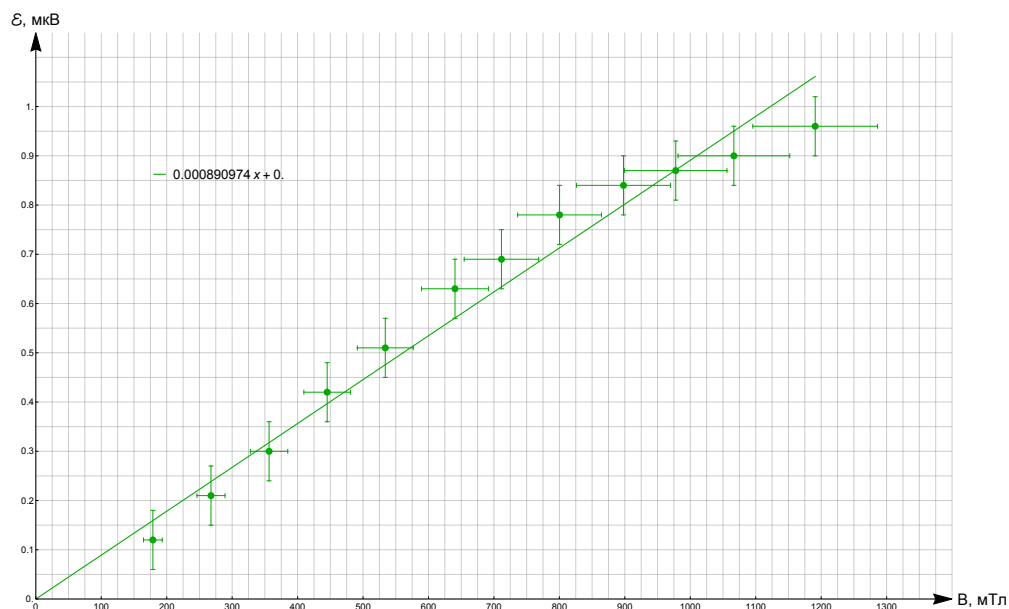


**Рис. 5.** График зависимости углового коэффициента  $k = \Delta \mathcal{E} / \Delta B$  от тока через образец  $I$

Вычислим постоянную Холла по углу наклона графика на рис. 5.  $R_x = -a \cdot t$ , где  $t$  – тангенс угла наклона графика  $k = f(I)$ ;  $a$  – толщина образца из меди. ( $a = 0,05 \text{ мм}$ )

$$R_x^{\text{медь}} = -(0,42 \pm 0,08) \cdot 10^{-10} \text{ м}^3/\text{Кл}$$

Повторим измерения для образца из цинка. Построим график зависимости  $\mathcal{E}_x = f(B)$  и по наклону прямой рассчитаем постоянную Холла  $R_x = -\mathcal{E}_x a / (BI)$  ( $a = 0,12 \text{ мм}$ ,  $I = 1 \text{ А}$ )



**Рис. 6.** График зависимости ЭДС Холла  $\mathcal{E}$  от магнитной индукции  $B$  для образца из цинка

$$R_x^{\text{цинк}} = (1,07 \pm 0,06) \cdot 10^{-10} \text{ м}^3/\text{Кл}$$

Для определение удельной проводимости определим значение  $U_{34}$  при токе  $I = 1 \text{ А}$

$$U_{34}^{\text{медь}} = 240 \pm 15 \text{ мкВ}$$

$$U_{34}^{\text{цинк}} = 300 \pm 15 \text{ мкВ}$$

Для обоих образцов рассчитаем концентрацию  $n$  носителей тока  $n = 1/(R_x e)$ . Также вычислим удельную проводимость  $\sigma$  материала образцов по формуле (8). По результатам рассчитаем подвижность  $b$  носителей тока.

Металл	$n, (\text{м}^3)^{-1}$	$\sigma, (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$	$b, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$
Медь	$1,5 \pm 0,3 \cdot 10^{29}$	$7,8 \pm 0,5 \cdot 10^7$	$33 \pm 7$
Цинк	$6,0 \pm 0,1 \cdot 10^{29}$	$1,1 \pm 0,1 \cdot 10^7$	$11,4 \pm 1,2$

**Таблица 3.** Плотность заряда  $n$ , электропроводность  $\sigma$  и подвижность носителей тока  $b$  для образца из меди и цинка

## 5 Обсуждение результатов и выводы

Результаты занесены в таблицу.

Металл	$R_x$ $10^{-10} \text{ м}^3/\text{Кл}$	Табл. $R_x$ , $10^{-10} \text{ м}^3/\text{Кл}$	Знак носит.	$n$ $10^{29} (\text{м}^3)^{-1}$	$\sigma$ , $10^7 (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$	$b$ , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$
Медь	$-(0,42 \pm 0,08)$	$-0,53$	$-$	$1,5 \pm 0,3$	$7,8 \pm 0,5$	$33 \pm 7$
Цинк	$1,07 \pm 0,06$	$1,04$	$+$	$6,0 \pm 0,1$	$1,1 \pm 0,1$	$11,4 \pm 1,2$

**Таблица 4.** Постоянная Холла  $R_x$ , плотность заряда  $n$ , электропроводность  $\sigma$  и подвижность носителей тока  $b$  для образца из меди и цинка