

### 3.3.5 (4.11А). ЭФФЕКТ ХОЛЛА В МЕТАЛЛАХ

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ

30-VIII-2016 г.

**В работе используются:** электромагнит с источником питания, источник постоянного тока, микровольтметр Ф116/1, амперметры, измеритель магнитной индукции Ш1-10, образцы из меди, серебра и цинка.

Элементарная теория эффекта Холла изложена во введении к теме. Приведенное там выражение (3.26) для ЭДС Холла было получено для случая, когда поперечная составляющая тока в образце отсутствует. Поэтому измерять разность потенциалов между гранями образца следует при минимальном (в идеале — при нулевом) поперечном токе. Большая концентрация носителей тока в металлах ( $n \simeq 10^{23} \text{ см}^{-3}$ ) приводит к очень малым значениям ЭДС Холла. Оба эти обстоятельства сильно затрудняют измерения: высокая чувствительность по напряжению должна сочетаться с малой величиной тока, потребляемого измерительной схемой. В нашей работе для измерений используется микровольт-микроамперметр Ф116/1, который удовлетворяет этим требованиям: минимальный предел измерения напряжения составляет 1,5 мкВ, а потребляемый ток — всего  $10^{-8} \text{ А}$ .

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

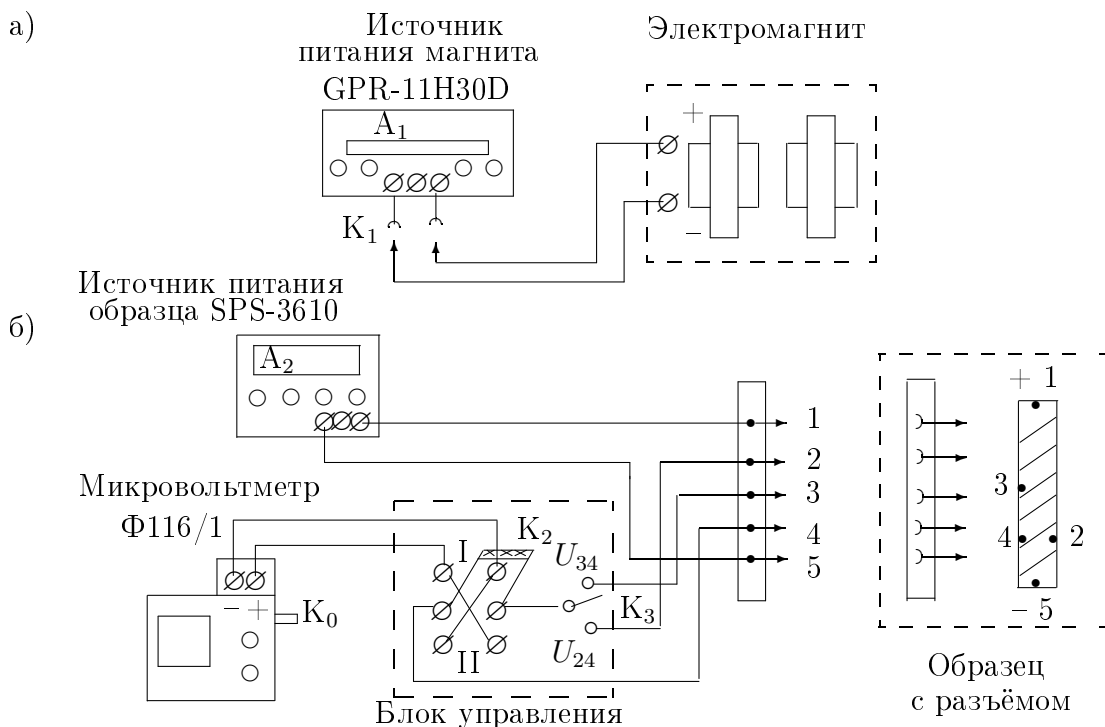


Рис. 1. Схема установки для исследования эффекта Холла в металлах

В зазоре электромагнита (рис. 1а) создаётся постоянное магнитное поле, величину которого можно менять с помощью регуляторов тока источника питания. Ток питания электромагнита измеряется амперметром источника  $A_1$ . Разъём  $K_1$  позволяет менять направление тока в обмотках электромагнита.

Градуировка магнита проводится с помощью измерителя магнитной индукции (описание прибора расположено на установке).

Металлические образцы в форме тонких пластинок, смонтированные в специальных держателях, подключаются к блоку питания через разъём (рис. 1б). Ток через образец регулируется ручками источника и измеряется амперметром источника  $A_2$ .

В образце с током, помещённом в зазор электромагнита, между контактами 2 и 4 возникает холловская разность потенциалов, которая измеряется с помощью микровольтметра Ф116/1, 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 между точками 2 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:  $\mathcal{E}_x = U_{24} \pm U_0$ . 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:

$$\sigma = I \cdot L_{34} / (U_{34} \cdot a \cdot l), \quad (2)$$

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

## ЗАДАНИЕ

В работе предлагается исследовать зависимость ЭДС Холла от величины магнитного поля при различных токах через образец для определения константы Холла; определить знак носителей заряда и проводимость различных металлических образцов. Образец из меди ИЛИ серебра исследуется подробно; образец из цинка — по нескольким параметрам.

## I. Подготовка приборов к работе

1. Перед началом измерений отключите микровольтметр от измерительной цепи, установив ключ  $K_3$  на блоке управления в нейтральное положение. Переключатель микровольтметра «РОД РАБОТЫ» поставьте в положение «Нуль», переключатель «ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЯ» — на 3 мкВ. Включите прибор в сеть и дайте ему прогреться.
2. Пока микровольтметр выходит на стационарный режим, проверьте работу цепи питания образца.

Установите все 4 регулировочных ручки источника SPS-3610 на минимум тока (крайнее левое положение) и включите прибор в сеть.

Ручку «FINE» регулятора тока «CARRENT» установите на максимум, ручкой «FINE» «VOLTAGE» установите напряжение  $V = 0,8$  В. Поверните ручку «FINE» «CARRENT» влево до упора.

Определите максимальный ток через образец: для этого подключите к разъёму блока управления один из образцов — медный ИЛИ серебряный, НЕ трогая ручек «VOLTAGE», ручками «CARRENT», сначала «FINE» (точно), затем «COARSE» — грубо, определите предельное значение тока. Если ток  $> 1,2$  А, уменьшите его ручкой «FINE» «VOLTAGE». Ток не должен превышать 1,2 А. В дальнейшем регулируйте ток только ручками «CARRENT» (пользуйтесь ручкой «COARSE» только, когда «FINE») установлена на максимум).

3. Проверьте работу цепи магнита: поставьте разъём  $K_1$  на источнике питания магнита в положение I; убедитесь, что все регуляторы источника выведены на минимум (крайнее левое положение) и включите источник в сеть; пользуясь сначала ручкой «FINE», затем «COARSE», установите ток и напряжение на максимум; определите предельное значение силы тока через электромагнит и уберите ток до нуля сначала ручкой регулировки тока «COARSE», затем — «FINE», при этом регуляторы напряжения остаются на максимуме.
4. После 10-минутного прогрева установите стрелку микровольтметра на нуль с помощью корректора  $K_0$ , расположенного на боковой стенке прибора (ключ  $K_3$  — в среднем положении).

## II. Градуировка электромагнита

5. Ознакомьтесь с устройством и принципом работы измерителя магнитной индукции Ш1-10 (описание расположено на установке).
6. С помощью прибора Ш1-10 исследуйте зависимость индукции  $B$  магнитного поля в зазоре электромагнита от тока через магнит.

Проведите измерения магнитной индукции  $B$  для 6–8 значений тока через электромагнит  $I_M$  (вплоть до максимального  $I_M$ ).

Закончив градуировку, уберите ток  $I_M$  до минимума.

### III. Измерение ЭДС Холла

7. Вставьте держатель с образцом в зазор электромагнита.

Переведите переключатель «РОД РАБОТЫ» микровольтметра в положение « $U$ » (режим измерения напряжений). Поставьте ключ  $K_3$  в положение «ЭДС», а ключи  $K_1$  и  $K_2$  — в положение I.

Установите по амперметру  $A_2$  минимальное значение тока через образец ( $\simeq 0,2$  А). При правильной работе установки в отсутствие магнитного поля стрелка микровольтметра должна находиться вблизи нуля (в пределах 10-ти малых делений на шкале 3 мкВ). Это напряжение  $U_0$ , вызванное несовершенством контактов 2,4 и наводками, при фиксированном токе через образец остаётся неизменным. Значение  $U_0$  с учётом знака следует принять за нулевое. При отклонении стрелки вправо полярность подаваемого на вольтметр напряжения соответствует полярности, указанной на входных клеммах вольтметра (см. рис. 1).

8. Снимите зависимость напряжения  $U_{24}$  (включая  $U_0$ ) от тока  $I_M$  через обмотки магнита при фиксированном (минимальном) токе через образец.

Измерения следует проводить при *медленном* увеличении магнитного поля. Резкие изменения магнитного поля наводят ЭДС индукции в подводящих проводах и вызывают большие отклонения стрелки микровольтметра. Отсчёт следует производить только после успокоения стрелки. Положение ключа  $K_2$  всегда следует выбирать так, чтобы стрелка прибора отклонялась вправо.

Закончив измерения при выбранном токе через образец, плавно уменьшайте ток через электромагнит до минимума.

9. Повторите измерения  $U = f(I_M)$  при постоянном токе через образец (всего 6–8 серий для токов в интервале 0,2–1,2 А). При каждом новом значении тока через образец величина  $U_0$  будет иметь своё значение.

10. При максимальном токе через образец проведите измерения  $U = f(I_M)$  при другом направлении магнитного поля (разъём  $K_1$  — в положении II).

11. Для образца из цинка снимите зависимость  $U = f(I_M)$  при одном значении тока через образец ( $I \simeq 1$  А).

### IV. Определение характера проводимости

12. Для определения знака носителей необходимо знать направление тока через образец, направление магнитного поля и знак ЭДС Холла.

Направление тока в образце показано знаками «+» и «-» на рис. 1. Направление тока в обмотках электромагнита — при установке разъёма  $K_1$  в положение I — показано стрелкой на торце магнита.

Зарисуйте в тетради образец. Укажите на рисунке направление тока, магнитного поля (положение разъёма  $K_1$ ) и положение ключа  $K_2$  (I или II) при отклонении стрелки вольтметра вправо.

Определите (по правилам векторного произведения) номер клеммы, к которой движутся холловские частицы. Для определения знака носителей проследите по рис. 1 путь от выбранной клеммы до входа в микровольтметр.

Определите знак носителей заряда для каждого из двух исследованных образцов.

## V. Определение удельной проводимости

13. Выключите источник питания электромагнита и удалите держатель с образцом из зазора. Установите переключатель микровольтметра «ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЯ» на 750 мкВ. Ключ  $K_3$  поставьте в положение  $U_{34}$ .
14. При токе через образец  $\simeq 1$  А измерьте падение напряжения между контактами 3 и 4 для каждого из двух образцов.
15. Запишите характеристики приборов и параметры образцов  $L_{34}, a, l$ , указанные на держателях.

### Обработка результатов

1. Постройте график зависимости индукции магнитного поля от тока через магнит:  $B = f(I_M)$ .
2. Рассчитайте ЭДС Холла и построьте на одном листе семейство характеристик  $\mathcal{E}_x = f(B)$  при разных значениях тока  $I$  через образец (для меди или серебра). Определите угловые коэффициенты  $K(I) = \Delta\mathcal{E}/\Delta B$  полученных прямых.  
Постройте график  $\mathcal{E}_x = f(I)$ . Рассчитайте угловой коэффициент прямой и определите величину постоянной Холла  $R_x$ .
3. Для цинка изобразите на графике зависимость  $\mathcal{E}_x = f(B)$  и по наклону прямой рассчитайте постоянную Холла.
4. Для обоих образцов рассчитайте концентрацию  $n$  носителей тока. Оцените погрешности и сравните результаты с табличными.
5. Рассчитайте удельную проводимость  $\sigma$  материала образцов.
6. Используя найденные значения концентрации  $n$  и проводимости  $\sigma$ , рассчитайте подвижность  $b$  носителей тока в общепринятых для этой величины внесистемных единицах: размерность напряжённости электрического поля  $[E] = [U/L] = \text{В/см}$ , размерность скорости  $[v] = \text{см/с}$ , поэтому размерность подвижности  $[b] = \text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ .
7. Оцените погрешности и сведите результаты измерений в таблицу:

Металл	$R_x \pm \Delta R_x$	Табл. $R_x$ , $10^{-10} \text{ м}^3/\text{Кл}$	Знак носит.	$n \pm \Delta n$ $(\text{м}^3)^{-1}$	$\sigma \pm \Delta\sigma$ $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$	$b$ , $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$

Сравните результаты со справочными.

Исправлено: 30-VIII-2016 г.