

05.2; 12

© 1992

ИССЛЕДОВАНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ
МЕТОДОМ ПОДВИЖНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В.В. Б и ч е в и н, П.В. Б и ч е в и н

Традиционно основные характеристики носителей тока в твердых телах — знак, концентрацию, подвижность и пр. определяют преимущественно по эффекту Холла, хотя это и не всегда возможно. Ниже описана еще одна возможность, в некотором отношении обратная холловской, но имеющей более широкие возможности и названная нами методом подвижного магнитного поля (ПМП). Идею предлагаемого метода отображает рис. 1.

Если магнит движется относительно проводника с током со скоростью дрейфа электронов V_d , то они оказываются неподвижными относительно магнитного поля, „остановлены“ в нем, и это возможно установить по нулевой поперечной ЭДС или минимуму магнетосопротивления. По известной дрейфовой скорости легко определяются связанные с ней электрофизические величины.

По этой методике исследовалась зависимость холловского поля ряда фольг сечением $40 \times 0,02 \text{ мм}^2$ и $p\text{-Si}$ от скорости движения магнита V . Полученные результаты приведены на рис. 2. В слабом магнитном поле ($B = 0,13 \text{ Т}$) поперечная ЭДС оказалась пропорциональной скорости V при ее изменении в широких пределах. Наклон получаемых регистрограмм зависит только от величины магнитной индукции, а положение в координатной системе — от плотности тока J , природы и физического состояния объекта. Подходящим подбором тока регистрограммы большинства объектов могут быть сведены к двум отрезкам прямых, пересекающих ось ординат при положительном и отрицательном ее значениях. В таком представлении индивидуальность материала проявляется в характерной для него плотности тока при данных T , B и пр. При $V \gg V_d$ поперечная ЭДС определяется законом Фарадея для движущегося в магнитном поле проводника и не зависит от его природы. Поэтому все сведения о носителях тока содержатся в узкой области скоростей V , порядка нескольких V_d .

Очевидная информация содержится в отрезках координат, отсекаемых прямыми, и в наклонах отрезков прямых, отсекаемых координатными осями. Отрезки ординат есть не что иное как обычная холловская ЭДС, а отрезки абсцисс — в существующей интерпретации равны дрейфовым скоростям носителей тока. По ним возможно определить постоянные Холла R для металлов и концентрацию дырок $p\text{-Si}$. Так при плотности тока $3,75 \text{ А/мм}^2$ по дрейфовой скорости дырок w , равной минус $0,35 \text{ мм/с}$, для величины R полу-

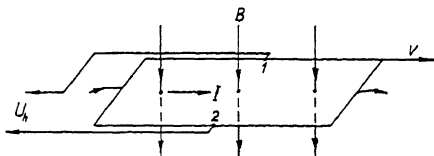


Рис. 1. Проводник с током в подвижном магнитном поле.

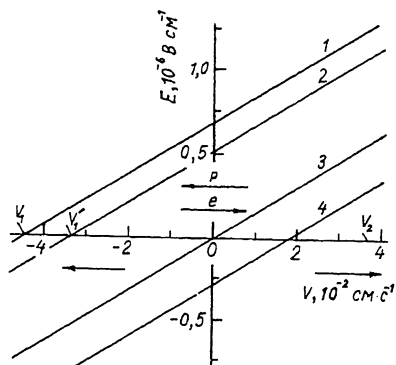


Рис. 2. Зависимость поперечной ЭДС от скорости и направления движения магнита относительно проводника с током. Объекты и плотности токов: 1 - $p-Si - 10^{-3}$ А/мм², 2 - $W - 3.75$ А/мм², 3 - $Si, W, Cu, Al - J = 0$, 4 - $Cu - 4$ А/мм² и $Al - 6.4$ А/мм². Стрелки указывают направление движения магнита и носителей тока.

чаем значение плюс 1.07×10^{-10} м³/Кл, а дрейфовой скорости электронов Cu и Al , равной плюс 0.137 мм/с, соответствуют R минус 0.53×10^{-10} и -0.325×10^{-10} м³/Кл в хорошем согласии с литературными сведениями [1] и нашими данными, полученными для этих же объектов в статическом режиме. Вообще же эти два способа определения R не вполне эквивалентны, т.к. в статическом случае электроны подвижны относительно B , а в динамическом — неподвижны. Концентрация дырок $p-Si$, определенная по дрейфовой скорости, равна 5.8×10^{18} см⁻³.

Рассмотрим информацию, содержащуюся в наклонах отрезков. При движении магнитного поля относительно обесточенного проводника со скоростью V (рис. 1) в нем возникает ЭДС, определяемая законом Фарадея: $\Sigma = -VB$. Ей соответствует прямая 3 рис. 2. Холловская ЭДС дается аналогичным соотношением

$$\Sigma = RJB \equiv V_d B \quad (1)$$

или с учетом холл-фактора r [2-4]

$$\Sigma' = rRJB = rV_d B, \quad (2)$$

где $R = 1/ne$; $J = neV_d$; e, n - заряд и концентрация электронов, а V_d - дрейфовая скорость носителей тока относительно проводника или покоящегося магнитного поля. При движении магнита со скоростью V в направлении переноса электронов их дрейфовая скорость относительно силовых линий уменьшается на величину V и для учета этого в выражениях (1), (2) V_d следует заменить на $V_d - V$. Новые равенства $\Sigma = B(V_d - V)$ и $\Sigma' = rB(V_d - V)$ дают теоретическую зависимость поперечной ЭДС для проводника с током в подвижном магнитном поле. Производные $d\Sigma/dV$ определяют наклоны прямых, выражающих зависимости Σ от V . Наклон прямой $3 d\Sigma/dV = -B$ следует из закона Фарадея. Такое же значение $d\Sigma/dV = -B$ дает исходное равенство (1), а в случае (2) - $d\Sigma'/dV = -rB$. Сравнивая эти производные, замечаем, что величина r может быть определена из отношения наклонов регистрограмм, полученных для проводника с током ($\tan \alpha_1$) и без тока ($\tan \alpha_2$).

$$r = \tan \alpha_1 / \tan \alpha_2. \quad (3)$$

Легко видеть, что этот способ определения r является более прямым по сравнению с известным [4].

В эксперименте (рис. 2) прямые 2, 3 и 4 оказались в пределах погрешности параллельными, следовательно, холл-факторы Al , Cu и W с такой же точностью равны единице. Величина r р-Si на участке OV_1 несколько отличалась от единицы ($r = 0.94$), но этот результат не перепроверен на других объектах.

Выше пересечения прямых 1 и 2 (рис. 2) с осью абсцисс явно сопоставлялось с „остановкой“ дырок в магнитном поле. Это, в согласии с существующими представлениями о Холл-эффекте в проводниках р-типа, подтверждается совпадением постоянной R вольфрама, определенной по дрейфовой скорости дырок V_1' , с ее табличным значениям. Но сам рисунок при более внимательном его изучении опровергает такую интерпретацию. Дырки могут быть неподвижными только при неподвижных электронах, когда электронная подсистема проводника не переносит заряда относительно магнитного поля. Такая возможность может реализоваться только при некоторой скорости магнита V_2 , равной дрейфовой скорости электронов с отрицательной массой и расположенной в правой полуплоскости рисунка. Это сразу же выявляет первую трудность - невозможность объяснения с позиции существующих представлений наличия поперечной ЭДС при неподвижных относительно магнитного поля носителях тока, если также не считать трудностью особое правило сложения скоростей дырок и магнита при определении их относительного движения. Вторая трудность, в своем проявлении противоположная первой, связана с отсутствием поперечного поля в точках V_1 и V_1' , где скорости электронов относительно магнитного поля равны $V_1 + V_d$ и $V_1' + V_d'$.

В заключение отметим, что обнаруженное нами отсутствие поперечного поля при подвижных относительно магнитного поля электронах и его наличие при неподвижных – экспериментальные факты, в принципе одного порядка с положительным Холл-эффектом, дополняют его и, безусловно, вызваны одной и той же причиной, т.к. являются только особыми точками зависимости $\Sigma = f(V, B)$. Интерпретация этих явлений с позиций дырочного тока натолкнулась на непреодоленные нами затруднения и мы предприняли поиск дополнительных предположений, о чем намерены сообщить в следующей публикации.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Таблицы физических величин. Справочник. / Под ред. И.К. Ки-коина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
- [2] С м и т Р. Полупроводники. М.: ИЛ, 1962. 467 с.
- [3] К у ч и с Е.В. Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования. М.: Радио и связь, 1990. 264 с.
- [4] S t i l l m a n G.E., W o l f e C.M., D i m-
m o k J.O. // J. Phys. Chem. Solids. 1970. V. 31.
P. 1198.

Институт физики
АН Эстонии, Тарту

Поступило в Редакцию
29 июля 1992 г.