1. ЭФФЕКТ ХОЛЛА, ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА

Эффект Холла заключается в появлении поперечной по отношению к направлению электрического тока разности потенциалов в образце, который помещен в поперечное магнитное поле.

Пусть по полупроводниковому образцу, имеющему форму прямоугольного параллелепипеда, протекает электрический ток силой I (от контакта 1 к 2), поддерживаемый источником ЭДС $\mathcal{E}$ (рис.1.1). Выберем на нижней и верхней гранях образца точки 3 и 4, лежащие напротив друг друга. Припаяем к ним измерительные зонды, к которым подключим вольтметр. Поместим образец в поперечное магнитное поле, как показано на рис.1.1. Теперь на движущиеся носители заряда будет действовать сила Лоренца, отклоняющая их в поперечном направлении. В результате грань образца, которой принадлежит точка 3, получит избыточный заряд одного знака, а грань с точкой 4 – другого. Между этими противоположно заряженными гранями возникнет электрическое поле (холловское поле) и, следовательно, поперечная разность потенциалов. Эта разность потенциалов U_X также называется холловской, а само явление – поперечным эффектом Холла.

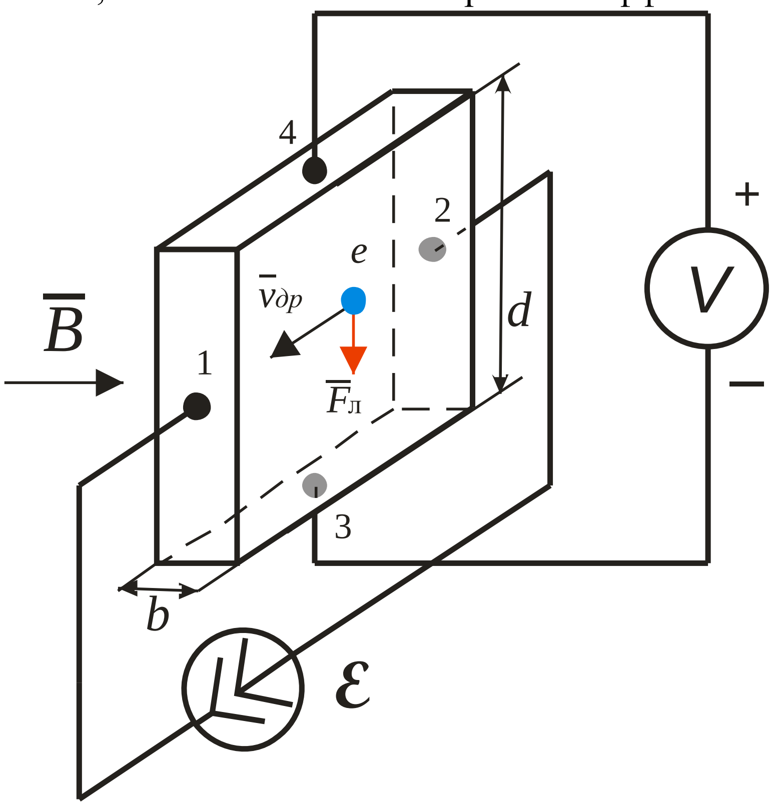

Рис.1.1

Опыт показывает, что холловская разность потенциалов равна

$$U_X = R_X \frac{I \cdot B}{b}, \qquad (1.1)$$

где I - сила тока, протекающего по образцу;

B - индукция магнитного поля;

b - толщина образца (размер по магнитному полю);

$R_{\text{Х}}$ - постоянная Холла, зависящая от рода вещества.

Рассмотрим механизм появления поперечной разности потенциалов.

Как известно, на движущийся со скоростью $\vec{v}$ заряд q в магнитном поле с индукцией $\vec{B}$ действует сила Лоренца. Эта сила перпендикулярна как направлению движения заряда, так и направлению магнитной индукции и равна

$$\vec{F}_{\text{Л}} = q \cdot [\vec{v}, \vec{B}].$$

В ситуации, которая изображена на рис.1.1 и соответствует образцу, изготовленному из донорного полупроводника, сила Лоренца будет смещать свободные электроны к нижней грани образца (точка 3), в результате чего эта грань получит избыточный отрицательный заряд. На верхней грани за счет оттока от нее электронов возникнет нескомпенсированный положительный заряд ионов донорной примеси. Перераспределение заряда приведет к появлению в пространстве между гранями поперечного электрического поля, вектор напряженности которого $\vec{E}_{\text{Х}}$ направлен от положительно заряженной грани к грани заряженной отрицательно. Отрицательно заряженные электроны будут испытывать со стороны этого электрического поля действие силы, направленной против вектора $\vec{E}_{\text{Х}}$:

$$\vec{F}_{\text{ЭЛ}} = q\vec{E}_{\text{Х}}.$$

Для акцепторного полупроводника, основными носителями заряда в которых являются положительно заряженные дырки, при заданном направлении тока в образце, направление силы Лоренца не изменится. В результате нижняя грань образца получит избыточный положительный заряд, а верхняя – отрицательный. Направление электрического поля $\vec{E}_{\text{Х}}$ изменится на противоположное.

Допустим, что ток в образце обусловлен сразу двумя типами носителей – электронами и дырками [2].

Из выражения (1.1) выразим постоянную Холла:

$$R_{\text{Х}} = \frac{U_{\text{Х}} \cdot b}{I \cdot B}. \qquad (1.2)$$

Учтём, что величина холловской разности потенциалов связана с напряженностью холловского электрического поля формулой $U_{\text{Х}} = \left|\vec{E}_{\text{Х}}\right| \cdot d$, а сила тока I с вектором плотности тока $\vec{j}$ формулой $I = \left|\vec{j}\right| b \cdot d$. При этом вектор $\vec{j}$ по закону Ома связан с напряженность продольного (тянущего) электрического поля $\vec{E}_0$ формулой $\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}_0$.

Подставляя в (1.2), получим

$$R_{\text{Х}} = \frac{\left|\vec{E}_{\text{Х}}\right| \cdot d \cdot b}{\sigma \cdot \left|\vec{E}_0\right| b \cdot d \cdot B} = \frac{\left|\vec{E}_{\text{Х}}\right|}{\sigma \cdot \left|\vec{E}_0\right| \cdot B}. \qquad (1.3)$$

Здесь σ - удельная электропроводность материала образца.

При помещении образца в магнитное поле стационарное состояние наступает тогда, когда перестаёт изменяться с течением времени избыточный заряд на его гранях. То есть стационарное состояние возникает при условии, что поперечный ток, созданный электронами, компенсируется поперечным током дырок:

$$|\vec{j}_n| = |\vec{j}_p|. \tag{1.4}$$

Учтём, что согласно закону Ома в локальной (дифференциальной) форме векторы плотности тока электронов и дырок равны соответственно $\vec{j}_n = \sigma_n \cdot \vec{E}_n$, $\vec{j}_p = \sigma_p \cdot \vec{E}_p$. Здесь $\vec{E}_n$ и $\vec{E}_p$ можно рассматривать как силы, действующие на единичный отрицательный и положительный заряды в поперечном направлении. Электронная и дырочная электропроводности равны $\sigma_n = en\mu_n$, $\sigma_p = ep\mu_p$, где n и p - концентрации электронов и дырок соответственно, а μ_n и μ_p - подвижности этих носителей заряда. Тогда условие стационарности (1.4) принимает вид

$$n\mu_n E_n = p\mu_p E_p. \tag{1.5}$$

Как электроны, так и дырки в образце находятся в одном и том же поперечном электрическом поле $\vec{E}_X$. Запишем выражения для $\vec{E}_n$ и $\vec{E}_p$ в проекциях на ось y, направленную от верхней к нижней грани образца, при этом вектор напряженности $\vec{E}_X$ считаем направленным вдоль оси y:

$$E_n = \frac{e\mu_n\left|\vec{E}_0\right|B - eE_X}{e}; \quad E_p = \frac{e\mu_p\left|\vec{E}_0\right|B + eE_X}{e}.$$

Здесь e - элементарный заряд.

Подставляя $\vec{E}_n$ и $\vec{E}_p$ в (1.5) получим условие стационарности в виде

$$n\mu_n\left(\frac{e\mu_n\left|\vec{E}_0\right|B - eE_X}{e}\right) = p\mu_p\left(\frac{e\mu_p\left|\vec{E}_0\right|B + eE_X}{e}\right).$$

Выразим из этого равенства отношение напряженностей:

$$\frac{E_X}{E_0} = \frac{\left(n\mu_n^2 - p\mu_p^2\right)B}{n\mu_n + p\mu_p}.$$

Подставляя это выражение в (1.3) и учтя, что $\sigma = \sigma_n + \sigma_p$, для постоянной Холла R_X получаем

$$R_X = \frac{n\mu_n^2 - p\mu_p^2}{e\left(n\mu_n + p\mu_p\right)^2}. \tag{1.6}$$

Рассмотрим важный частный случай донорного полупроводника, для которого $n \gg p$ и знак основных носителей отрицательный $q_e < 0$. Тогда из (1.6) получим

$$R_X = \frac{1}{q_e n} \tag{1.7}$$

При выводе формул (1.6) и (1.7) не учитывалось статистическое распределение свободных носителей по скоростям и то, что при высоких температурах рассеяние носителей происходит в основном на фононах, а при низких температурах – на ионах примеси. Для учета этих особенностей вводится коэффициент A, равный $\sim 1{,}2$ для низких и $\sim 1{,}9$ для высоких температур. В результате формулы (1.6) и (1.7) приобретают вид

$$R_{\text{X}} = A\frac{n\mu_n^2 - p\mu_p^2}{e\left(n\mu_n + p\mu_p\right)^2};$$

$$R_X = A\frac{1}{q_e n}. \tag{1.8}$$

Для акцепторного полупроводника ($n \ll p, \quad q > 0$) выражение для постоянной Холла имеет вид

$$R_X = A\frac{1}{q \cdot p}. \tag{1.9}$$

Покажем, что эффект Холла можно использовать для определения электрофизических характеристик полупроводников.

Из формул (1.8) и (1.9) видно, что, определив с помощью опыта и уравнения (1.1) постоянную Холла для образца, изготовленного из примесного полупроводника, можно найти концентрацию основных носителей заряда в этом образце при определённой температуре.

Поскольку при заданном направлении тока (см. рис. 1.1), знак избыточного заряда нижней грани образца является отрицательным для донорного и положительным для акцепторного полупроводника, то по знаку холловской разности потенциалов U_{X} можно определить тип примесного полупроводника.

Покажем, что с помощью эффекта Холла можно определить и подвижность основных носителей заряда.

Рассмотрим, например, донорный полупроводник. Учтём, что

$$\left|\vec{j}\right| = \sigma \cdot \left|\vec{E}_0\right|,$$

$$\left|\vec{E}_0\right| = \frac{U_{12}}{L},$$

$$\sigma_n = en\mu_n,$$

$$\left|\vec{j}\right| = \frac{I}{b \cdot d}.$$

Из этой системы уравнений выразим μ_n:

$$\mu_n = \frac{1}{e \cdot n} \cdot \frac{I \cdot L}{b \cdot d \cdot U_{12}} = R_{\text{X}} \cdot \frac{I \cdot L}{b \cdot d \cdot U_{12}}.$$

Здесь L продольный размер образца.

Из (1.1) видно, что измерив холловскую разность потенциалов U_{X} и силу тока I в образце, зная постоянную Холла и геометрические размеры образца, можно измерить индукцию магнитного поля B, в котором находится образец. Такое устройство называется датчиком Холла [1].

Поскольку любой проводник с током I создает магнитное поле, пропорциональное этому току ($B \sim I$), датчик Холла, помещенный в это магнитное поле, может являться бесконтактным датчиком тока [1]. При этом важно, чтобы зависимость $B(I)$ была известна. Для этого датчик помещают, например, в непосредственной близости от токопровода в виде шины с известной шириной, либо внутрь специально включенного в цепь бесконечного соленоида.

Датчик Холла может использоваться для измерения активной и реактивной мощности P [1]. В случае измерения активной мощности датчик подключается по схеме, изображенной на рисунке 1.2.

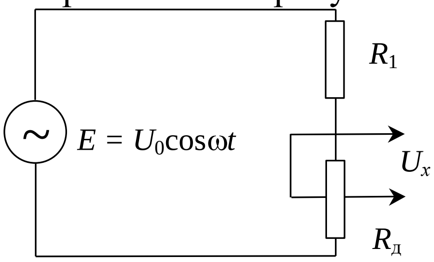

Рис. 1.2

Здесь балластный резистор R_1 и датчик Холла с сопротивлением $R_{д}$ включены между токопроводами, идущими дальше к потребителю. При этом датчик располагают так же как датчик тока.

Для измерения реактивной мощности используют датчик Холла, включенный по схеме рис. 1.3.

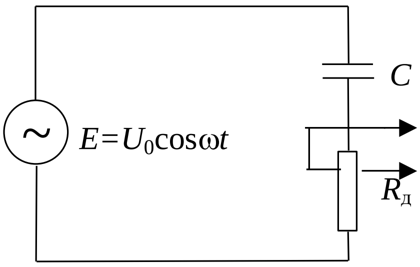

Рис. 1.3

Если дополнить схему, представленную на рис. 1.2 или 1.3, интегратором и усилителем с коэффициентом усиления $K_{у}$ (рис. 1.4), то получим [1]

$$U_{вых} = \alpha_{р} P,$$

где $\alpha_p = \frac{1}{2}\frac{KK_{у}R_x}{R_1 d}$ – для датчика активной мощности и $\alpha_{р} = \frac{\omega CKK_{у}R_x}{2d}$ – для датчика реактивной мощности. Здесь коэффициент $K = \frac{\mu_0}{2h}$ для шины шириной h или $K = \frac{\mu_0}{d_{пр}}$ для соленоида (провода диаметром $d_{пр}$).

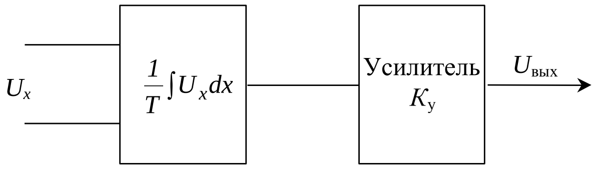

Рис. 1.4

Литература

1. Физические основы электроники. Методические указания к расчетно-графической работе для студентов дневного отделения ЭМФ по теме «Расчет датчика мощности». Составители: А.М. Погорельский, О.Ю. Рубцова, В.В. Христофоров. Новосибирский государственный технический университет. Новосибирск,2008

2. Физика твёрдого тела. Методические указания к лабораторным работам № 40 – 43. Составители: А.Н. Поддымников, Д.Д. Березиков, Л.А. Сакс, Г.А. Шейнман. Новосибирский электротехнический институт. Новосибирск,1986