

Условие

Задание 2. «Гальваномагнитные явления»

В предложенной задаче вам предстоит разобраться с двумя явлениями, связанными с действием магнитного поля на электрические свойства проводников: эффект Холла и магнетосопротивление.

Эффект Холла - возникновение в проводнике с током, помещённом в магнитное поле, электрического поля в направлении, перпендикулярном и вектору плотности тока и вектору индукции магнитного поля.

Магнетосопротивление - изменение удельной проводимости проводника во внешнем магнитном поле.

Как известно, в металлах носителями тока являются свободные электроны (заряд e , масса m). В отсутствие каких либо направленных сил, действующих на электроны, все направления движения последних равновероятны. Т.е. электроны находятся в беспорядочном движении подобно молекулам газа. Соответственно для свободных электронов можно ввести понятие средней длины свободного пробега, средней скорости хаотического движения и среднего времени свободного пробега τ .

Под действием направленной силы на беспорядочное движение электронов накладывается систематическое (дрейфовое) движение. В классическом рассмотрении предполагается, что при наличии внешней силы электрон ускоряется в направлении действия силы в течение времени τ , а затем, испытав соударение (рассеяние), совершенно «забывает» о своей направленной скорости. Это приводит к тому, что электрон медленно движется в направлении действующей силы с некоторой средней скоростью дрейфа v .

Примечание. Для упрощения рассуждений будем считать, что электрон обладает положительным зарядом.

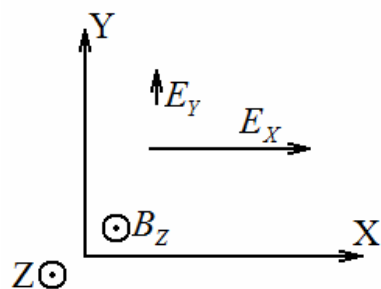
1. Пусть внутри проводника создано постоянное электрическое поле E_X . Определите среднюю скорость дрейфа электронов v_X .

При рассмотрении электрических токов в проводниках удобно пользоваться понятием подвижности. Под действием силы F электрон начинает двигаться со скоростью $v = \mu \cdot \frac{F}{e}$. Коэффициент μ называется подвижностью.

2. Выразите μ через заряд, массу электрона (e и m) и время свободного пробега τ .

3. Считая, что концентрация электронов в металле равна n , определите связь между удельной проводимостью σ_0 и подвижностью электронов μ .

Перейдём к непосредственному изучению гальваномагнитных явлений. Пусть в проводнике создано поле E_X . При помещении его в магнитное поле B_Z электроны уже не будут двигаться строго в направлении оси ОХ. Мы рассмотрим лишь случай **слабого поля**, когда это отклонение невелико. Движение зарядов в направлении оси ОУ приведёт к тому, что на границе проводника будут собираться электроны, что в свою очередь



вызовет появление поля E_Y (эффект Холла) (см. рис. 1. Электроны считаются положительными). Т.к. магнитное поле слабое, то и напряжённость поля E_Y также будет небольшой по сравнению с полем E_X .

4. Пусть v_X и v_Y - проекции дрейфовой скорости электрона на оси ОХ и ОУ. Выразите эти проекции через подвижность μ и составляющие полей E_X , E_Y и B_Z .

Предположим, что каким-либо образом удаётся избежать накопления зарядов на границах образца (например, образец бесконечен вдоль оси ОУ, либо вдоль этой оси

приложено внешнее поле, полностью компенсирующее поле E_Y). В этом случае удельная проводимость образца уменьшится. Это и есть магнетосопротивление, которое принято характеризовать относительным изменением удельной проводимости $\frac{\sigma_0 - \sigma}{\sigma_0} = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_0}$.

5. В нашей модели проводника магнетосопротивление приводит к относительному уменьшению удельной проводимости $\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} \approx (\mu B_Z)^\gamma$. Определите γ .

*Примечание. В дальнейшем следует пренебрегать величиной (μB_Z) в степени большей чем γ .**

6. Под каким углом α к оси ОХ будет направлена дрейфовая скорость электронов? Если позволить зарядам накапливаться на границах образца, то очень быстро установится равновесное значение поля E_Y , при котором прекратится ток вдоль оси ОУ. Будем, для простоты, характеризовать эффект Холла безразмерной постоянной H , которая определяется из соотношения:

$$E_Y = H \mu B_Z E_X.$$

7. Определите постоянную H в данной модели проводника.

8. Покажите, что возникающее в результате эффекта Холла поле E_Y полностью «уничтожает» магнетосопротивление.

Таким образом, при анализе простейшей модели проводника магнетосопротивление наблюдается только при определённых (искусственных) условиях. Если не компенсировать поле E_Y , то эффект Холла приводит к исчезновению магнетосопротивления.

Однако в реальных проводниках, помещённых в магнитное поле, эти два эффекта существуют одновременно. Для более точного расчета необходимо учитывать распределение электронов по скоростям. Скорость беспорядочного движения не одинакова у всех электронов, т.е. не одинаково время свободного пробега, а значит и различна подвижность.

Подробное описание этих явлений крайне проблематично осуществить ученику 11 класса. Однако в самом простейшем случае различие в подвижностях можно учесть следующим образом. Пусть в проводнике существует два типа электронов. Их концентрация одинакова ($n_1 = n_2 = n$), а подвижность одних в два раза больше подвижности других ($\mu_1 = \mu$, $\mu_2 = 2\mu_1 = 2\mu$).

9. Определите удельную проводимость σ_0 в такой модели в отсутствие магнитного поля.

В проводнике создается поле E_X . Проводник помещается в магнитное поле B_Z .

10. Определите возникающую в результате эффекта Холла напряженность E_Y . Определите также постоянную H .
11. Покажите, что в такой модели магнетосопротивление присутствует и $\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} \approx \delta \cdot (\mu B_Z)^\gamma$, где γ имеет значение, уже полученное вами в пункте 5. Определите значение постоянной δ .
12. Качественно опишите, как будут двигаться электроны каждого сорта в проводнике. Под какими углами α_1 и α_2 к оси ОХ будут направлены их дрейфовые скорости?