

Road to IPhO

Магнетосопротивление

Магнетосопротивление – это изменение характеристик электрического тока, протекающего через проводник, при помещении его в магнитное поле. Рассмотрим некоторые механизмы этого явления.

Часть А. Движение зарядов (2 балла)

Если проводник однородный, то при создании постоянной внешней разности потенциалов носители заряда в течение короткого времени перераспределяются по объему и поверхности проводника, и начинают участвовать в упорядоченном движении. В результате возникает некоторое стационарное состояние, в котором напряженности электрических полей и плотности тока во всех точках проводника поддерживаются постоянными. Работа электрического поля, которое ускоряет носители заряда, в среднем равняется потерям энергии при взаимодействии зарядов с кристаллической решеткой материала. Поскольку частота столкновений с дефектами решетки (и вместе с ней эффективная тормозящая сила) пропорциональна скорости движения носителя заряда, то установившаяся скорость дрейфа $\vec{v}_{\text{др}}$ носителя пропорциональна разгоняющей силе, то есть напряженности электрического поля: $\vec{v}_{\text{др}} = \gamma \vec{E}$. Коэффициент пропорциональности γ называют **подвижностью** носителя заряда, и эта величина зависит именно от структуры решетки проводника. Удельное сопротивление проводника ρ зависит от подвижности и концентрации носителей заряда в проводнике. Протекание тока в объеме проводника описывают вектором плотности тока \vec{j} . Направление этого вектора указывает направление движения заряда (то есть он направлен вдоль скорости носителей с положительным зарядом и противоположно скорости носителей с отрицательным зарядом), а величина \vec{j} численно равна силе тока, проходящей на единицу площади поперечного сечения. Согласно закону Ома в дифференциальной форме, $\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E}$.

- A1** В некотором однородном проводнике носители заряда имеют заряд e , распределены в проводнике с постоянной концентрацией n , и их подвижность равна γ . В ответе запишите формулу, выражающую удельное сопротивление ρ проводника через эти величины. **0.3**

Рассмотрим теперь однородный проводник, для которого удельное сопротивление ρ и подвижность носителей γ являются константами. Пусть в этом проводнике наряду с однородным электрическим полем с напряженностью \vec{E} создано однородное магнитное поле с индукцией $\vec{B} \perp \vec{E}$.

- A2** Под каким углом α к направлению вектора \vec{E} будет течь ток в этом проводнике? В ответе запишите формулу, выразив α через величины, заданные в условии задачи. **0.7**

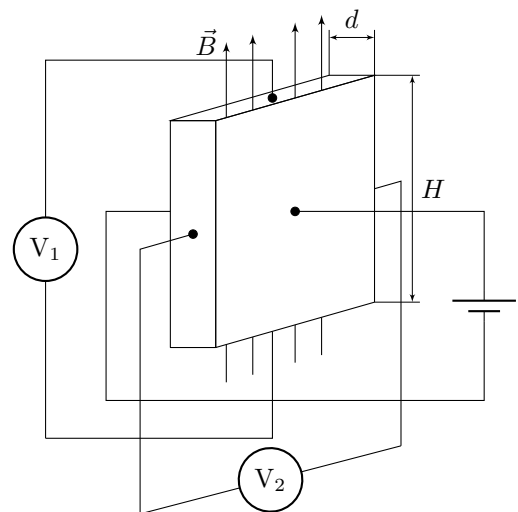
- A3** Как в этом случае величина плотности тока j зависит от величины индукции B магнитного поля? В ответе запишите формулу, выразив j через величины, заданные в условии задачи. **0.7**

- A4** Вычислите величину угла α в случае, когда $\gamma = 10 \frac{\text{м}^2}{\text{В}\cdot\text{с}}$, а $B = 0.1$ Тл. Ответ запишите в градусах, округлив до целого числа. **0.3**

Часть В. Эффект Холла (1.3 балла)

Допустим, что наш проводник имеет достаточно большое удельное сопротивление, равное $\rho = 0.1$ Ом \cdot м, и подвижность носителей заряда (электронов проводимости)

$\gamma = 10 \frac{\text{м}^2}{\text{В}\cdot\text{с}}$. Пусть, кроме того, вещество этого проводника в электрическом поле поляризуется, то есть его можно характеризовать диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3$. Этим материалом заполнили внутренний объем плоского конденсатора, пластины которого квадратные со стороной $H = 10$ см и расположены на малом расстоянии $d = 2$ мм друг от друга. Удельное сопротивление материала пластин на несколько порядков меньше, чем у нашего проводника. Внутри конденсатора создано однородное магнитное поле с индукцией $B = 0.1$ Тл, вектор которой параллелен пластинам и направлен вдоль одной из сторон каждого из квадратов (см. рис.). К пластинам подключен идеальный источник, создающий между ними напряжение $U = 0.1$ В. К центрам противоположных свободных боковых сторон параллелепипеда, который образует наш проводник в конденсаторе, подключены идеальные вольтметры.



Road to IPhO

B1 Найдите величину напряжения, которую показывает вольтметр V_1 при установившемся режиме протекания тока. Ответ запишите в вольтах, округлив до целого числа. **0.3**

B2 Исследуйте зависимость напряжения, которое показывает вольтметр V_2 в установившемся режиме протекания тока, от величины индукции магнитного поля B . В ответе запишите формулу, выразив U_2 через величины, заданные в условии задачи. **0.4**

B3 Вычислите величину напряжения, которую показывает вольтметр V_2 в установившемся режиме протекания тока. Ответ запишите в вольтах, округлив до целого числа. **0.3**

B4 Найдите величину силы тока, протекающего через источник в установившемся режиме. Ответ запишите в амперах, округлив до целого числа. **0.3**

Часть С. Цилиндрический конденсатор (3 балла)

Пусть теперь нашим проводником (все его характеристики имеют ту же величину, что и в предыдущем случае) заполнили внутренний объем цилиндрического конденсатора высотой H . Диаметр его внутренней обкладки равен d , внешней обкладки – $2d$, а удельное сопротивление обкладок вновь на несколько порядков меньше ρ . Внутри проводника может быть создано однородное магнитное поле с индукцией $B = 0.1$ Тл, вектор которой параллелен оси цилиндра, а между обкладками цилиндра подано постоянное напряжение $U = 0.1$ В.

C1 Найдите величину силы тока I , протекающего через источник в установившемся режиме в отсутствие магнитного поля ($B = 0$). Ответ запишите в амперах, округлив его до сотых долей. **0.5**

C2 Найдите величину силы тока I , протекающего через источник в установившемся режиме при включенном магнитном поле. Ответ запишите в амперах, округлив его до сотых долей. **0.8**

C3 Как зависит электрическое сопротивление R «цилиндрического резистора», сделанного из нашего проводника, от величины индукции B магнитного поля? Сопротивление измеряется между обкладками цилиндра. В ответе запишите формулу для R , выразив сопротивление через B , характеристики проводника (ρ и γ) и геометрические параметры. **0.7**

C4 Найдите мощность P тепловыделения в нашем «цилиндрическом резисторе» при включенном магнитном поле. Ответ запишите в милливаттах, округлив до десятых долей. **1.0**

Road to IPhO

Часть D. Неоднородный проводник (3.7 балла)

В предыдущей установке (в цилиндрическом конденсаторе) наш проводник заменили на другой. Новый проводник является неоднородным. Его диэлектрическая проницаемость и концентрация электронов проводимости постоянны и по величине такие же, как у рассмотренного выше однородного материала. А подвижность электронов проводимости из-за изменения свойств кристаллической решетки изменяется в направлении вдоль радиуса r цилиндрического слоя проводника по закону $\gamma(r) = \gamma_0 \frac{d}{2r}$, где $\gamma_0 = 10 \frac{\text{м}^2}{\text{В}\cdot\text{с}}$

D1 Найдите величину силы тока, протекающего через источник в установившемся режиме при включенном однородном магнитном поле с индукцией $B = 0.1$ Тл. Ответ запишите в амперах, округлив до сотых долей. **1.0**

Внутри неоднородного проводника в процессе установления стационарного режима протекания тока накапливается электрический заряд.

D2 Получите формулу, описывающую зависимость $\rho_{\text{el}}(r)$ объемной плотности этого заряда в цилиндрическом слое неоднородного проводника от радиуса r . В ответе запишите формулу для $\rho_{\text{el}}(r)$. В нее должны входить величина индукции магнитного поля B , сила I тока через проводник, характеристики проводника (диэлектрическая проницаемость ε , удельное сопротивление ρ_0 вблизи внутренней обкладки, подвижность γ_0 электронов проводимости у внутренней обкладки), электрическая постоянная ε_0 и геометрические параметры. **1.0**

D3 Постройте схематически график зависимости объемной плотности ρ_{el} электрического заряда, накопившегося внутри неоднородного проводника при установлении стационарного протекания тока, от радиуса r . Отметьте на графике характерные точки: значения на краях интервала, при наличии – нули, максимальные и минимальные значения. За единицу масштаба на вертикальной оси примите значение $\rho_{\text{el}}(d)$. **1.7**