

11 класс

11 класс. Задача 1: “Магнитный момент”

Задание: Известно, что сила взаимодействия между магнитами, находящимися на

расстоянии z , существенно большем их размеров, имеет вид $F = a \frac{(p_{m1})^b (p_{m2})^c}{z^d}$, где

b, c, d – целые числа, p_{m1} и p_{m2} – магнитные моменты магнитов, $a = 6 \cdot 10^{-7}$ (ед. СИ) – постоянный коэффициент.

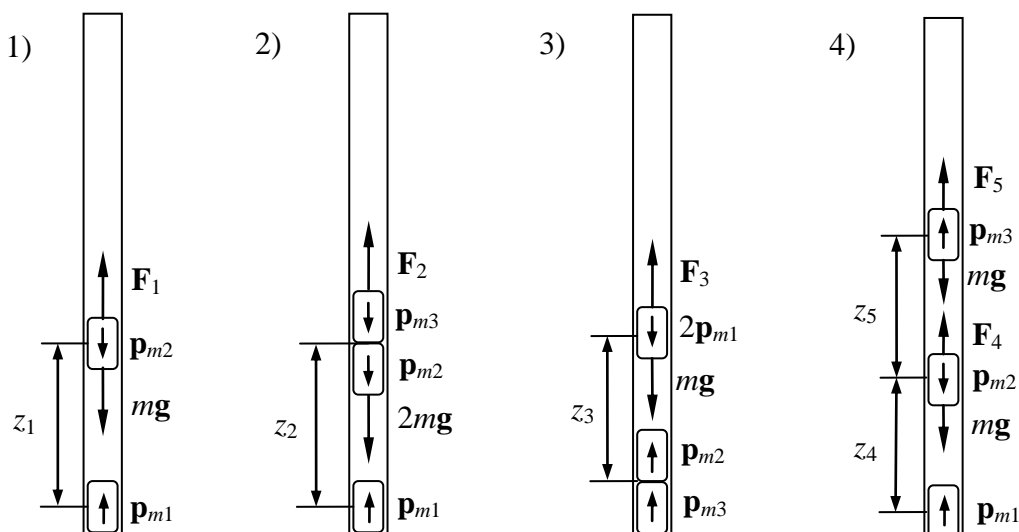
1. Определите параметры b, c, d в зависимости силы взаимодействия двух магнитов от расстояния.
2. Определите магнитный момент постоянного магнита.
3. Выведите теоретическую формулу для магнитного момента и сопоставьте ее с экспериментом.

Оборудование: 3 неодимовых магнита, пластиковая трубка, линейка, электронные весы на преподавательском столе по требованию.

Замечание: класть магнит на электронные весы категорически запрещается!

Решение

1. Для предотвращения переворачивания магнитиков с противоположными магнитными моментами под действием поля помещаем их в диэлектрическую трубку. Взаимодействие магнитов можно реализовать 4 способами:



По третьему закону Ньютона магнитные моменты должны входить в формулу симметричным образом, поэтому $b = c$. Переворачивая трубку в опыте 1) и

последовательно меняя магнитики, убеждаемся, что массы магнитов одинаковы и их магнитные моменты также одинаковы.

$$1) \quad mg = F_1 = a \frac{(p_{m1})^b (p_{m2})^c}{z_1^n} = a \frac{p_m^{2b}}{z_1^n}, \quad (1)$$

$$2) \quad 2mg = F_2 = \frac{(p_{m1})^b (p_{m2} + p_{m3})^b}{z_2^n} = \frac{2^b p_m^{2b}}{z_2^n} \quad (2)$$

$$3) \quad mg = F_3 = \frac{(p_{m1})^b (p_{m2} + p_{m3})^b}{z_3^n} = \frac{2^b p_m^{2b}}{z_3^n} \quad (3)$$

$$4) \quad \begin{cases} mg = F_4 = \left(\frac{(p_{m1})^b (p_{m2})^b}{z_4^n} - \frac{(p_{m2})^b (p_{m3})^b}{z_5^n} \right) = p_m^{2b} \left(\frac{1}{z_4^n} - \frac{1}{z_5^n} \right) \\ mg = F_5 = \left(\frac{(p_{m2})^b (p_{m3})^b}{z_5^n} - \frac{(p_{m1})^b (p_{m3})^b}{(z_4 + z_5)^n} \right) = p_m^{2b} \left(\frac{1}{z_5^n} - \frac{1}{(z_4 + z_5)^n} \right) \end{cases} \quad (4)$$

Из (1) и (2) и равенства $z_1 = z_2 = 3.1 \text{ см}$ следует, что $b = 1$.

Из (1) и (3) получаем:

$$mg = a \frac{p_m^2}{z_1^n} = a \frac{2p_m^2}{z_3^n}, \quad \left(\frac{z_3}{z_1} \right)^n = 2, \quad n \ln \left(\frac{z_3}{z_1} \right) = \ln 2, \quad n = \frac{\ln 2}{\ln \left(\frac{z_3}{z_1} \right)} = \frac{\ln 2}{\ln \left(\frac{3.7 \text{ см}}{3.1 \text{ см}} \right)} \approx 3.92 \approx 4.$$

Из (4) следует

$$\frac{1}{z_4^4} - \frac{1}{z_5^4} = \frac{1}{z_5^4} - \frac{1}{(z_4 + z_5)^4}, \quad \frac{1}{z_4^4} = \frac{2}{z_5^4} - \frac{1}{(z_4 + z_5)^4}$$

$$z_5^4 (z_4 + z_5)^4 = 2z_4^4 (z_4 + z_5)^4 - z_4^4 z_5^4$$

2. Магнитный момент диполя определяется как $p_m = IS$, где I – круговой молекулярный ток, S – площадь, охватываемая этим током. Магнитное поле, создаваемое круговым током на его оси, по закону Био–Савара–Лапласа может быть найдено как векторная сумма магнитных полей, создаваемая каждым из малых участков тока. Суммарный вектор вследствие симметрии задачи направлен вдоль оси системы (ось z):

$$B_1 = B_z = \int_0^{2\pi R} \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin(\pi/2)}{r^2} \sin \alpha = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I2\pi R}{r^2} \sin \alpha = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi R I}{r^2} \frac{R}{r} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi R^2 I}{r^3}.$$

При малых размерах магнита $z \gg R$ и $r = \sqrt{z^2 + R^2} \approx z$:

$$B_1 = \frac{\mu_0 \pi R^2 I}{2\pi z^3} = \frac{\mu_0 P_{m1}}{2\pi z^3}.$$

Энергия взаимодействия магнитного диполя с магнитным полем может быть найдена как

$$W = p_{m2} B_1 \cos(\mathbf{p}_{m2}, \mathbf{B}_1) = p_{m2} B_1 = \frac{\mu_0 P_{m1} P_{m2}}{2\pi z^3}.$$

При малом перемещении вдоль оси z сила взаимодействия совершит работу

$$A = F dz = -dW.$$

Тогда

$$F = -\frac{dW}{dz} = -\frac{d}{dz} \left(\frac{\mu_0 P_{m1} P_{m2}}{2\pi z^3} \right) = \frac{3\mu_0 P_{m1} P_{m2}}{2\pi z^4}. \quad (5)$$

Альтернативным выводом является использование аналогии между электрическим и магнитным диполями:

$$E = \frac{kq}{z_+^2} - \frac{kq}{z_-^2} = \frac{kq(z_-^2 - z_+^2)}{z_+^2 z_-^2} = \frac{kq(z_- - z_+)(z_- + z_+)}{z_+^2 z_-^2} \approx \frac{2kql}{z^3} = \frac{2kp_e}{z^3},$$

$$F = q(E_- - E_+) = -q \left(2kp_e \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{z^3} \right) l \right) = -2kp_{e1} p_{e2} \left(-\frac{3}{z^4} \right) = \frac{6kp_{e1} p_{e2}}{z^4}.$$

В случае электрического поля $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$. В случае магнитного поля $k = \frac{\mu_0}{4\pi}$. Тогда

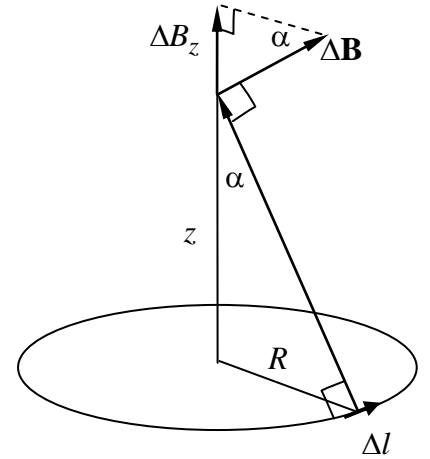
$$F = \frac{6\mu_0 P_{m1} P_{m2}}{4\pi z^4} = \frac{3\mu_0 P_{m1} P_{m2}}{2\pi z^4},$$

что совпадает с (5).

3. Из (1) и (5) следует $mg = \frac{3\mu_0 P_m^2}{2\pi z_1^4}$, $\frac{2\pi z_1^4 mg}{3\mu_0} = P_m^2$, $P_m = \sqrt{\frac{2\pi z_1^4 mg}{3\mu_0}}$.

Массу магнита найдем путем взвешивания на весах линейки или трубки с двумя магнитами по краям, а затем вычитания массы трубки и деления на 2.

$$P_m = \sqrt{\frac{2\pi (3.2 \cdot 10^{-2} \text{ м})^4 \cdot 1.27 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot 9.8 \text{ м/с}^2}{3 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}}} \approx 0.15 \text{ А} \cdot \text{м}^2$$



Разбалловка:

- | | |
|--|---------|
| 1. Описан метод определения показателей степеней | 2 балла |
| 2. Получены формулы для определения показателей степеней | 2 балла |
| 3. Найдены значения показателей степеней | 2 балла |
| 4. Получены формула для нахождения силы (5) | 2 балла |
| 5. Получена формула для нахождения p_m | 2 балла |
| 6. Определена масса магнита | 2 балла |
| 7. Найдено значение магнитного момента | 2 балла |
| 8. Оценена погрешность | 2 балла |

11 класс. Задача 2: “Вентильный фотоэффект и закон Малюса”

Задание:

1. Снимите, постройте и проанализируйте зависимость напряжения на светодиоде от интенсивности I падающего света.
2. Определите показатели степенной зависимости нормированного напряжения при малых и больших освещенностях светодиода. Определите диапазоны, при которых верны данные законы.
3. Определите зависимость нормированной фоточувствительности светодиода от освещенности. Фоточувствительность определяется как отношение напряжения на фотодиоде к интенсивности падающего света $S = \frac{U}{I}$.
4. Дайте объяснение возникновению напряжения на светодиоде под действием света.
5. Дайте объяснение возникновению нелинейности характеристики фоточувствительности светодиода.

Оборудование: лазерная указка, 2 поляризатора, транспортир, красный светодиод, макетная плата, мультиметр, провода, крокодилы (2), штатив с 2 лапками, скотч по требованию, миллиметровка, маркер стирающийся.

Решение

1. Согласно закону Малюса интенсивность поляризованного света, прошедшего через поляризатор, может быть найдена как

$$I = I_0 \cos^2 \alpha,$$

где I_0 – интенсивность падающего света.

Для создания поляризованного света используем луч лазерной указки, прошедший через поляризатор. Поскольку луч лазерной указки сам является частично поляризованным, подбираем такую ориентацию первого поляризатора, чтобы интенсивность прошедшего через него света была бы максимальной. Поворачивая второй поляризатор относительно первого на различные углы, получим источник света с регулируемой интенсивностью. Углы можно задавать с помощью транспортира, отметив направление пропускания поляризатора на пластинке маркером или карандашом.

Таким образом, для получения искомой зависимости необходимо провести замеры

напряжения U и построить зависимость $\frac{U}{U_{\max}}$ от $\cos^2 \alpha$.

2. Характер степенной зависимости можно установить путем логарифмирования напряжения и интенсивности и построения графика в логарифмических координатах.

3. Фоточувствительность определяется как отношение напряжения на фотодиоде к интенсивности падающего света $S = \frac{U}{I}$.

4. Вентильный фотоэффект – возникновение э.д.с. (фото-э.д.с.) при освещении контакта двух полупроводников с различной проводимостью или полупроводника и металла при отсутствии источника внешнего напряжения.

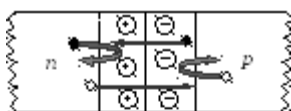


Рис. 1

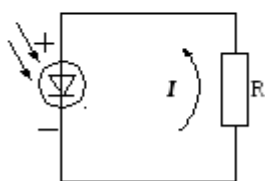


Рис. 2

Сущность этого явления заключается в следующем: при контакте полупроводников р- и n- типа создается контактная разность потенциалов, которая препятствует дальнейшему переходу основных носителей через контакт: дырок – в n-область и электронов – в р-область. При освещении р–n-перехода и прилегающих к нему областей в полупроводниках наблюдается внутренний фотоэффект, т.е. образуются электронно-дырочные пары. Под действием электрического поля р–n-перехода образовавшиеся заряды разделяются: неосновные носители проникают через переход, а основные задерживаются в своей области, в результате чего накапливаются заряды и на р–n-переходе создается добавочная разность потенциалов, которую называют фото-э.д.с. (рис. 1). Значение фото-э.д.с. может достигать десятых долей вольта. При подсоединении такого полупроводника к сопротивлению (рис. 2) в цепи возникает фототок.

5. Одновременно с процессом фотогенерации свободных электронов идет процесс рекомбинации электронов и дырок, т. е. возвращение электронов из зоны проводимости на свободные места в валентной зоне. Рекомбинация электронов и дырок сопровождается уменьшением концентрации свободных носителей зарядов. Скорость рекомбинации пропорциональна числу дырок и числу свободных электронов и усиливается с ростом количества выбитых светом электронов, что порождает нелинейность зависимости.

Разбалловка:

- | | |
|--|---------|
| 1. Описан метод | 1 балл |
| 2. Проведены измерения для разных углов, данные в таблице | 2 балла |
| 3. Построена зависимость $\frac{U}{U_{\max}}$ от $\cos^2 \alpha$ | 2 балла |
| 4. Найдены показатели степеней в зависимости | 2 балла |
| 5. Найдено значение фоточувствительности | 2 балла |
| 6. Оценена погрешность | 2 балла |
| 7. Объяснено возникновение фото-э.д.с. | 2 балла |

8. Объяснено возникновение нелинейности.

2 балла