

МИНИСТЕРСТВО НА ОБРАЗОВАНИЕТО И НАУКАТА
НАЦИОНАЛНА ОЛИМПИАДА ПО ФИЗИКА
НАЦИОНАЛЕН КРЪГ, 4 април 2018 г., Русе
Тема 10.-12. клас (четвърта състезателна група)
Експериментален кръг

Задача 1

Теоретична част

През 1879 г. американският физик Едвин Хол поставя образец от злато в магнитно поле и установява, че при протичането на ток през образца между противоположните му странични стени възниква електрично напрежение. Това явление, свързано с действието на магнитна сила върху движещи се електрични заряди, е наречено ефект на Хол.

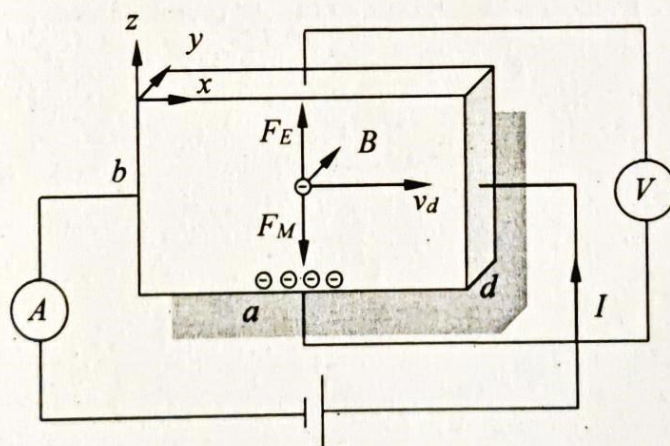
Днес ефектът на Хол се използва, както за изследване на свойствата на материалите, така и за създаването на електронни сензори и уреди за измерване на магнитни полета.

Ефектът на Хол позволява да се определи дали свободните носители на заряд в материала са положителни (дупки) или отрицателни (електрони), т.к. възникналото напрежение, е с различен знак, съответно.

На долната фигура е показана схема за измерване на напрежението на Хол (U_H). За илюстрация са избрани електроните, за свободни носители на заряд. Общоприето е, посоката на тока да съвпада с посоката на движение на положителните заряди. Изследваният материал е с форма на паралелепипед с дължини на ръбовете – a , b , d . Образецът е поставен в магнитно поле B , насочено в посока y . Нека през образца протича ток, който може да се изрази по следния начин:

$$I = qnv_d bd, \quad (1)$$

където q е зарядът на електрона, n концентрацията и v_d дрейфовата скорост на електроните.



При протичането на ток през образца, под действие на магнитната сила F_M по долната стена на образца, започват да се натрупват електрони. При това натрупване възниква електрично поле E , чиято големина може да се изрази, чрез напрежението на Хол:

$$E = \frac{U_H}{b}. \quad (2)$$

Натрупването на заряди продължава, до изравняването на магнитната сила

$$F_M = qv_d B \quad (3)$$

и електричната сила

$$F_E = qE, \quad (4)$$

които действат на подвижните заряди.

Поради неидеалната симетрия на контактите за измерване на напрежението на Хол (не лежат абсолютно точно на права перпендикулярна на токовите линии), върху тези контакти винаги съществува различен от нула пад на напрежение, дори без приложено магнитно поле. В допълнение, за този пад на напрежение се наблюдават бавни флуктуации (промени), породени от промени в температурата на образеца, например поради: отделяне на топлина при протичането на тока, топлообмен между образеца и тяло в контакт с него.

Поради особености в свойствата на контактите на образеца: 1) съпротивлението на образецът не е омово, т.е. зависи от приложеното напрежение; 2) съпротивлението на образецът не е еднакво за различните двойки срещуположни контакти; 3) съпротивлението на образецът, за една двойка срещуположни контакти, не е еднакво в двете посоки на протичане на тока.

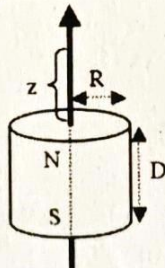
Дефлекционният магнитометър се състои от милиметрова скала, компас и постоянен магнит. Под действието само на земното магнитно поле, стрелката на компаса е в равновесие и се ориентира по него. Под действието на две взаимно перпендикулярни магнитни полета, например, това на Земята (B_H) и друго от постоянен магнит (B), стрелката достига ново равновесно положение при ъгъл θ , спрямо началното равновесно положение. Така стрелката се ориентира по посока на резултантното магнитно поле, като е изпълнено условието:

$$\tan \theta = \frac{B}{B_H}. \quad (5)$$

Големината на магнитното поле, което създава по оста си постоянен магнит, с цилиндрична форма, се дава с изразът:

$$B = \frac{B_r}{2} \left(\frac{D+z}{\sqrt{R^2 + (D+z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{R^2 + z^2}} \right), \quad (6)$$

където B_r е остатъчната магнитна индукция на магнитния материал, z е разстоянието от произволна точка по оста на цилиндъра, и по-близката до нея основа на цилиндъра, R е радиусът, а D е височината на цилиндъра, както е показано на фигурата.



Уреди и материали

- Компас 1 бр.
- Поставка с фиксирана към нея милиметрова линия 1 бр.
- Постоянни магнити 10 бр.
- Метален винт 1 бр.
- Пластмасова линия 1 бр.
- Архивен кашон 1 бр.
- Държател за магнитите със S/N означение 1 бр.
- Мултицет 2 бр.
- Свързващ проводник с накрайници тип крокодил 2 бр.
- Батерия - 9V 1 бр.
- Кутия с 4^{ри} извода, запоени за силициев (Si) монокристал монтиран на платка 1 бр.
- Милиметрова хартия 1 л.

Указания

по отношение на магнитите:

- Внимавайте при работа с магнитите, т.к. са много силни. Не позволявайте слепване на магнитите от голямо разстояние, т.к. при ударът при слепване магнитите се чупят. Не позволявайте също, залепване на магнитите от голямо разстояние по метални части (например от чина). Слелването на два магнита да става, като се държат здраво в ръце. Ръцете се допират една в друга, така че магнитите да са максимално близо, след което бавно се освобождават магнитите.
- При разделянето на магнитите, когато са слепени заедно, е по-лесно да се махат един по един, чрез приплъзване. Също, може да ползвате пластмасовата линия, като бутало за разделянето на магнитите, чрез приплъзване.
- Не поставяйте постоянен магнит на разстояние по-малко от 10 cm от компаса т.к. магнитната му стрелка може да се пренамагнити.
- Измерванията с дефлекционният магнитометър направете върху предоставения архивен кашон, поставен в средата на работната маса, за да не влияят металните й части върху измерванията.
- За по-сигурно, поставяйте магнитите в държателя, когато не ги ползвате.
- При измерванията на напрежението на Хол, магнитите може да поставяте внимателно през пробития отвор в кутията директно върху платката под която е монтиран образецът. Ако се налага да поставяте в отвора малък брой магнити, ползвайте помощния метален винт, като залепите ползваните магнити за него.
- Не разглобявайте кутията.
- Червената част на стрелката на компасът е северния й полюс и се отбелязва с N (north), а южният полюс се означава със S (south).
- Намагнитването на цилиндричните постоянни магнити е двуполусно по оста на цилиндъра

по отношение на мултицетът:

- За измерването на съпротивление в режим на омметър, мултицетът подава различни напрежения на образца, за различните обхвати.

Необходими величини:

- Съгласно информация на международната асоциация на националните центрове за околна среда, данните за индукцията на земното магнитно поле $\vec{B}_E$ при географското положение на гр. Русе са:

- големина на магнитната индукция $B_E = 48.0 \mu T$
- инклинация $\varphi_E = +61^\circ$

Инклинацията е ъгълът, който векторът на магнитната индукция сключва с хоризонтална равнина в даденото географско положение. Ъгълът е положителен, когато земното магнитно поле сочи надолу, към земята.

- Платката, върху която е монтиран силициевия монокристал е с дебелина $z_0 = 2 mm$.
- дебелина на Si монокристал $d = 0.5 mm \pm 5\%$
- заряд на електрона $q = 1.602 \times 10^{-19} C$ (големината на заряда на електрона и дупката е еднаква)

Отбележете на 1^{ва} страница на беловата номерът на кутията, с която работите. Номерируйте страниците на беловата и черновата. Пишете четливо.

Задачи:

1. Определяне на остатъчната магнитна индукция B_r на материала на магнитите, чрез дефлекционният магнитометър.
 - 1.1. Опишете накратко как определяте полюсите на 10 елементния постоянен магнит. [0.5 т.]
 - 1.2. Опишете чрез какви зависимости, данни и измерване ще определите B_r . [1.5 т.]
 - 1.3. Начертайте схема на опитната постановка, която ще използвате за определянето на B_r . Представете положението на магнитната стрелка преди и след доближаването на магнита. Представете векторите на полето на земята и на постоянния магнит. [1 т.]
 - 1.4. Направете нужното измерване и пресметнете големината на B_r , като представите и данните за пресмятането. [2.5 т.]
2. Определяне на вида свободни носители на заряд в Si монокристал. Изследване на зависимостта на напрежението на Хол от големината на външното магнитно поле $U_H(B)$.
 - 2.1. Получете израз за зависимостта $U_H(B)$, така че да е права линия, от която да може да се определи концентрацията на свободните носители на заряд n в предоставения материал. [1 т.]
 - 2.2. Преценете, при какво свързване на контактите на образца в схемата за измерване, ще се получи максимален сигнал. Обосновете преценката си с представяне на подходящи данни. [1 т.]
 - 2.3. Начертайте схема на свързването на образца, като отбележите номерата на ползваните контакти и цвета на сондите на волтметърът. [1 т.]
 - 2.4. Определете дупки или електрони са свободните носители на заряд в изследвания материал. Обосновете заключението, което сте направили, с измерените напрежения и ползваното магнитно поле. [1 т.]
 - 2.5. Обосновете какви мерки ще вземете за да намалите влиянието на температурата върху измерваните напрежения от образца. [1 т.]
 - 2.6. Получете експериментално зависимостта на напрежението на Хол от магнитната индукция на полето $U_H(B)$. Представете данните таблично, като представите и изходните величини за определянето на B и U_H . (Използвайте предоставения лист за таблицата) [3 т.]
 - 2.7. Използвайте експерименталните данни от задача 2.6 и представете зависимостта $U_H(B)$ графично. [3 т.]
 - 2.8. Пресметнете наклона на правата от задача 2.7 и точността с която е определен. Представете резултата по подходящ начин, чрез абсолютната и относителна процентна грешки. [1.5 т.]
 - 2.9. Пресметнете концентрацията на свободните носители на заряд n , в изследвания материал и процентната точност с която е определена. [2 т.]

Отбележете на 1^{ва} страница на беловата номерът на кутията с която работите. Номерируйте страниците на беловата и черновата. Пишете четливо.

Задачи:

1. Определяне на остатъчната магнитна индукция B_r на материала на магнитите, чрез дефлекционният магнитометър.

1.1. Опишете накратко как определяте полюсите на 10 елементния постоянен магнит.

[0.5 т.]

Доближаваме постоянния магнит към компаса, и определяме полюса му сочещ компаса от правилото, че противоположните магнитни полюси се привличат. (0.5 т.)

1.2. Опишете чрез какви зависимости, данни и измерване ще определите B_r . [1.5 т.]

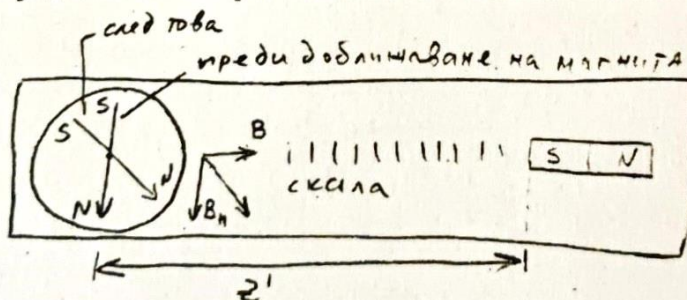
Като знаем големината B_E и инклинацията φ_E на земното магнитно поле, можем да пресметнем хоризонталната му компонента $B_H = B_E \cdot \cos \varphi_E$ (0.5 т.). Поставяме постоянния магнит на разстояние z' от компаса, така че на мястото на компаса магнитните полета на земята и постоянния магнит да са перпендикулярни, и измерваме ъгъла на отклонение θ на магнитната стрелка от равновесното ѝ положение. От зависимостта (5) определяме големината на магнитното поле на постоянния магнит на разстояние z' от него.

$$B(z') = B_H \tan \theta \quad (0.5 \text{ т.})$$

От ур. (6) пресмятаме B_r :

$$B_r = \frac{2B(z')}{\left(\frac{D+z'}{\sqrt{R^2 + (D+z')^2}} - \frac{z'}{\sqrt{R^2 + z'^2}} \right)} \quad (0.5 \text{ т.})$$

- 1.3. Начертайте схема на опитната постановка, която ще използвате за определянето на B_r . Представете положението на магнитната стрелка преди и след доближаването на магнита. Представете векторите на полето на земята и на постоянния магнит. [1 т.]



(1 т.)

- 1.4. Направете нужното измерване и пресметнете големината на B_r , като представите и данните за пресмятането. [2.5 т.]

Хоризонталната компонента на земното магнитно поле е:

$$B_H = B_E \cdot \cos(\varphi) = 48 \mu T \times \cos(61^\circ) = 23.3 \mu T$$

На разстояние магнит – компас $z' = 0.300 \text{ m}$, ъгълът на отклонение на магнитната стрелка е:

$$\theta = 44^\circ. (0.5 \text{ т.})$$

Магнитната индукция на 30 cm от магнита е:

$$B(z') = B_H \tan \theta = 23.3 \mu T \times \tan(44^\circ) = 22.5 \mu T \quad (0.5 \text{ т.})$$

Измерваме височината на 10 елементния магнит $D = 0.02 \text{ m}$, радиуса на основата му $R = 0.0075 \text{ m}$ (0.5 т.) и от (6) пресмятаме:

$$B_r = \frac{2B(z')}{D + z' - \frac{z'}{\sqrt{R^2 + (D + z')^2}}} = \frac{2B}{A - B} \approx \frac{2 \times 22.5 \times 10^{-6}}{37.8 \times 10^{-6}} = \frac{45}{37.8} = 1.19 \text{ T} \quad (1 \text{ т.})$$

$$A = 0.999725455; \quad B = 0.999687646$$

2. Определяне на вида свободни носители на заряд в Si монокристал. Изследване на зависимостта на напрежението на Хол от големината на външното магнитно поле $U_H(B)$.

2.1. Получете израз за зависимостта $U_H(B)$, така че да е права линия, от която да може да се определи концентрацията на свободните носители на заряд n в предоставения материал. [1 т.]

От уравнения (1), (2), (3) и (4), предвид че електричната и магнитната сили, които действат на подвижните заряди се изравняват получаваме търсената зависимост:

$$U_H(B) = \frac{I}{qnd} B \quad (1 \text{ т.})$$

2.2. Преценете, при какво свързване на контактите на образеца в схемата за измерване, ще се получи максимален сигнал. Обосновете преценката си с представяне на подходящи данни. [1 т.]

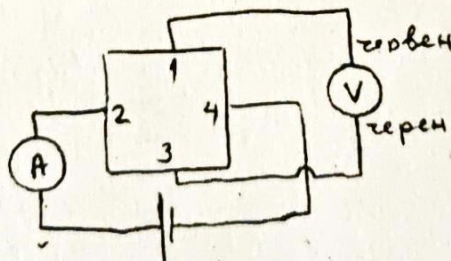
От получената зависимост $U_H(B)$ се вижда, че максимален сигнал за напрежението на Хол ще се получи при максимален ток през образецът.

Поради неомовите контакти на образеца пропускането на максимален ток не е подходящо да се оценя, чрез измерване на съпротивлението на контактите с мултицета в режим на омметър. Подходящо е да се измери токът за всяка двойка срещуположни контакти и в двете посоки, при подаване на работното напрежение 9V от батерията. (0.5 т.)

$$I_{13} = 0.31 \text{ mA}; \quad I_{31} = 3.03 \text{ mA}; \quad I_{24} = 4.94 \text{ mA}; \quad I_{42} = 0.27 \text{ mA} \quad (0.5 \text{ т.})$$

Най-подходящи токови контакти за измерването са 2-4, т.к. тогава токът е максимален.

2.3. Начертайте схема на свързването на образеца, като отбележите номерата на ползваните контакти и цвета на сондите на волтметърът. [1 т.]



2.4. Определете дупки или електрони са свободните носители на заряд в изследвания материал. Обосновете заключението, което сте направили, с измерените напрежения и ползваното магнитно поле. [1 т.]

При начертаната схема на свързване, при доближаване на северният полюс N на 10 елементния магнит към образеца напрежението на волтметърът нараства от +33.6 mV до +40.4 mV, следователно напрежението на Хол $U_H = +6.8 \text{ mV}$ е положително и свободните носители на заряд в изследвания материал са дупки. (1 т.)

2.5. обосновете какви мерки ще вземете за да намалите влиянието на температурата върху измерваните напрежения от образца. [1 т.]

Основни мерки: Измервам напрежението на контактите за Хол, преди и след поставянето на магнитите върху образца. Т.к. промените на напрежението с температурата са бавни, измерванията със и без магнит правя максимално бързо, за да се намали това влияние. Допълнителни мерки: Изчаквам малко време след пускането на тока през образца, за да се термализира. Магнита не го държа постоянно в ръка, че да се нагрее до температурата на тялото ми. Държа магнитите чрез помощния винт залепен за тях, така намалява топлообмена с ръката ми. (1 т.)

2.6. Получете експериментално зависимостта на напрежението на Хол от магнитната индукция на полето $U_H(B)$. Представете данните таблично, като представите и изходните величини за определянето на B и U_H . (Използвайте предоставения лист за таблицата) [3 т.]

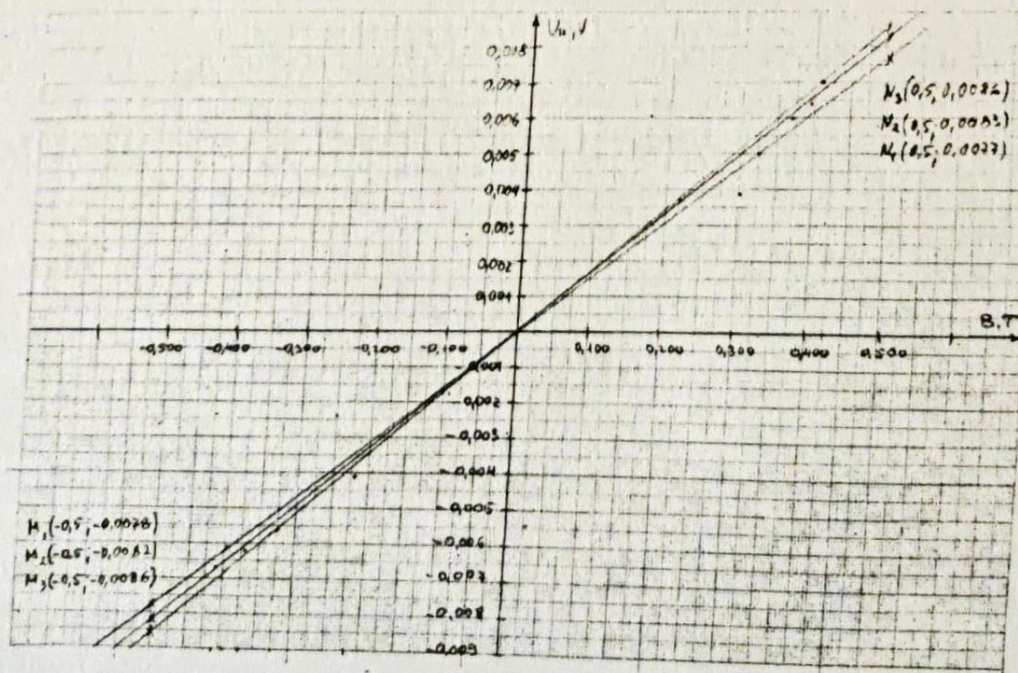
Разстояние магнит-образец $z = 0.002 \text{ m}$ (дебелина на платката).

напрежения: U_1 -без маг. поле, U_2 -с маг. поле, n – брой магнити (1 т.)

#	n	$D, \text{ m}$	$D+z, \text{ m}$	$U_1, \text{ mV}$	$U_2, \text{ mV}$	$B(z=2 \text{ mm}), \text{ T}$	$U_H, \text{ V}$	
1	10	0,020	0,022	33,0	40,0	0,410	0,0070	N
2	8	0,016	0,018	32,3	38,7	0,396	0,0064	
3	6	0,012	0,014	32,0	38,0	0,371	0,0060	
4	4	0,008	0,01	30,3	35,3	0,323	0,0050	
5	2	0,004	0,006	32,7	36,4	0,218	0,0037	
6	2	0,004	0,006	32,4	28,3	-0,218	-0,0041	S
7	4	0,008	0,01	31,0	25,4	-0,323	-0,0056	
8	6	0,012	0,014	32,0	25,8	-0,371	-0,0062	
9	8	0,016	0,018	30,4	24,3	-0,396	-0,0061	
10	10	0,020	0,022	32,2	25,5	-0,410	-0,0067	

При 6 и повече измервания # (2 т.)

2.7. Използвайте експерименталните данни от задача 2.6 и представете зависимостта $U_H(B)$ графично. [3 т.]



Точки за графиката се дават ако:

- използвана е цялата площ на листа милиметрова хартия; (0.5 т.)
- по осите на графиката са означени съответните величини; (0.25 т.)
- отбелязани са мерните единици на величините; (0.25 т.)
- нанесени са 6 и повече точки от табличните данни; (1.5 т.)
- зависимостта е от вида $y = ax$ и построената права задължително трябва да минава през точката с координати (0.0, 0.0). (0.5 т.)

2.8. Пресметнете наклона на правата от задача 2.7 и точността с която е определен. Представете резултата по подходящ начин, чрез абсолютната и относителна процентна грешки. [1.5 т.]

Наклона a може да се определи от права максимално близко да всички данни.

$$a = \frac{N_{2y} - M_{2y}}{N_{2x} - M_{2x}} = \frac{(8.3 + 8.2) \times 10^{-3}}{0.5 + 0.5} = 16.5 \times 10^{-3} \frac{V}{T} \quad (0.5 \text{ т.})$$

Точността на наклона може да се определи, чрез прекарване на допълнителни прави с максимален и минимален наклон през данните.

$$a_{\max} = \frac{N_{3y} - M_{3y}}{N_{3x} - M_{3x}} = \frac{(8.6 + 8.6) \times 10^{-3}}{0.5 + 0.5} = 17.2 \times 10^{-3} \frac{V}{T}$$

$$a_{\min} = \frac{N_{1y} - M_{1y}}{N_{1x} - M_{1x}} = \frac{(7.7 + 7.8) \times 10^{-3}}{0.5 + 0.5} = 15.5 \times 10^{-3} \frac{V}{T}$$

За абсолютната грешка получаваме:

$$\Delta a = \frac{a_{\max} - a_{\min}}{2} = 0.9 \times 10^{-3} \frac{V}{T} \quad (0.5 \text{ т.})$$

$$a = (16.5 \pm 0.9) \times 10^{-3} \frac{V}{T} \quad (0.5 \text{ т.})$$

$$a = 16.5 \times 10^{-3} \frac{V}{T} \pm 5\%$$

2.9. Пресметнете концентрацията на свободните носители на заряд n , в изследвания материал и процентната точност с която е определена. [2 т.]

$$n = \frac{I}{qad} = \frac{4.94 \times 10^{-3}}{(1.602 \times 10^{-19})(16.5 \times 10^{-3})(0.5 \times 10^{-3})} = 0.374 \times 10^{22} \text{ m}^{-3} \quad (1 \text{ т.})$$

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta d}{d} = \frac{0.005 \text{ mA}}{4.94 \text{ mA}} 100\% + 5\% + 5\% \approx 10\% \quad (1 \text{ т.})$$