

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 15.05.2017 01:41:02

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabb73e943df4a4851fda56d089

## МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра нанотехнологий и инженерной физики

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе  
Локтионова  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)  
2017 г.



## ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Методические указания к выполнению практических работ  
для студентов направления подготовки  
28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника»

Курск – 2017

УДК 534.2

Составитель: С.В. Соболев

Рецензент:

д.ф.-м.н., профессор В.М. Полунин

**Физика конденсированного состояния:** методические указания к выполнению практических работ для студентов направления подготовки 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Соболев С.В. Курск, 2017. - 12 с.: Библиогр.: с. 12.

Излагаются методические рекомендации по выполнению практических работ, в которых рассматриваются задания по следующим темам физики конденсированного состояния: магнитные свойства вещества; диэлектрики; кристаллическая решётка; зонная теория твёрдых тел.

Методические указания соответствуют требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования и учебному плану направления подготовки 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника, степень (квалификация) – бакалавр. Предназначены для студентов очной формы обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 10.11.17 Формат 60 x 84 1/16.

Усл. печ. л. 0,7. Уч.-изд. л. 0,63. Тираж 50 экз. Заказ 1800 Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040 Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1

### Задачи

#### Магнитные свойства вещества

1.1. Вычислить индуцированный магнитный момент атома меди  $\Delta\mu$  в магнитном поле с индукцией  $B = 0,1 \text{ Тл}$ . Плотность меди  $\rho = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , молярная масса  $M = 64 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ . Считать, что диамагнитная восприимчивость меди  $\chi = -10^{-6}Z$  ( $Z$  – число электронов в атоме).

1.2. Атом водорода в основном состоянии находится в однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ . Вычислить индукцию магнитного поля  $\vec{B}^*$  в центре атома, обусловленную ларморовской прецессией электронного облака.

1.3. Определить диамагнитную восприимчивость  $\chi$  атомарного водорода при нормальных условиях, атомы которого находятся в состоянии  $1s$ .

1.4. Определить диамагнитную восприимчивость  $\chi$  газообразного гелия при нормальных условиях. Учтёшь, что волновая функция основного состояния атома гелия  $\psi = \frac{Z'^3}{\pi a_1^3} e^{-\frac{Z'(r_1+r_2)}{a_1}}$ ,  $Z' = \frac{27}{16}$ .

1.5. Определить намагничённость  $I$  разреженного газа, молекулы которого обладают магнитными моментами  $\mu_a = 2,5\mu_B$ , помещённого при температуре  $T = 300 \text{ К}$  во внешнее магнитное поле с индукцией  $B = 2 \text{ Тл}$ . Концентрация газа  $n = 10^{20} \text{ м}^{-3}$ .

1.6. Разреженный парамагнитный газ с концентрацией  $n = 10^{10} \text{ м}^{-3}$  находится в магнитном поле с индукцией  $B = 10 \text{ Тл}$  при температуре  $T = 5 \text{ К}$ . Магнитный момент каждого атома  $\mu_a = \mu_B$ . Найти число атомов  $n'$  в единице объёма, магнитные моменты которых образуют с направлением поля углы, не превышающие  $\frac{\pi}{6}$ . Как влияет на число  $n'$  повышение температуры и (или) уменьшение магнитной индукции?

1.7. Вычислить парамагнитную восприимчивость  $\chi$  кислорода при нормальных условиях в слабом магнитном поле. Магнитный момент молекулы кислорода равен  $2,8\mu_B$ .

1.8. С учётом пространственного квантования рассмотреть следующие предельные случаи намагничённости парамагнетика: 1)  $j \rightarrow \infty$  – классический предел, когда магнитный момент атома имеет бесконечное множество

разрешённых ориентаций в магнитном поле  $\vec{B}$ ; 2) квантовый предел при  $j = \frac{1}{2}$  (минимальное значение  $j$ ).

1.9. Одноатомный парамагнитный газ помещён в магнитное поле с индукцией  $B = 2 \text{ Тл}$  при температуре  $T = 300 \text{ К}$ . Рассчитать намагниченность газа  $I$  с концентрацией  $n = 10^{25} \text{ м}^{-3}$ . Атомы находятся в состоянии  ${}^2S_{\frac{1}{2}}$ .

1.10. Для платины (парамагнетик), атомы которой находятся в состоянии  ${}^3D_3$ , вычислить намагниченность насыщения  $I_s$ . Плотность платины  $\rho = 21,4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , молярная масса  $M = 195 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ .

1.11. Парамагнитный газ, содержащий  $N$  атомов в состоянии  ${}^1P$ , находится при температуре  $T$  в магнитном поле с индукцией  $B$ . С учётом пространственного квантования определить числа атомов  $N_+$ ,  $N_0$  и  $N_-$ , имеющих, соответственно, положительные, нулевые и отрицательные проекции магнитного момента на направление магнитного поля  $B$ . Рассмотреть частный случай, когда  $\alpha = \frac{\mu_B B}{kT} \ll 1$ .

1.12. Вычислить магнитную восприимчивость  $\chi$  электронного газа металла в слабом магнитном поле с концентрацией  $n = 10^{28} \text{ м}^{-3}$ . Энергия Ферми  $E_F = 5 \text{ эВ}$ .

1.13. Найти индукцию  $B$  межмолекулярного поля Вейсса для железа, точка Кюри которого  $T_c = 1043 \text{ К}$ . За магнитный момент иона  $\mu$  принять магнетон Бора  $\mu_B$ .

### Ответы

1.1.  $\Delta\mu = -10^{-6} \frac{ZBM}{\mu_0 \rho N_A} \approx -2,8 \cdot 10^{-35} \text{ (А} \cdot \text{м}^2)$ ,  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $N_A$  – число Авогадро.

1.2.  $\vec{B}^* = -\frac{\sqrt{2}\mu_0 e^2}{16\pi m a_1} \vec{B}$ ,  $a_1$  – первый борковский радиус.

1.3.  $\chi = -\frac{\mu_0 e^2 n Z \cdot a_1^2}{2m} \approx -1,31 \cdot 10^{-9}$ .

1.4.  $\chi = -\frac{\mu_0 e^2 n a_1^2}{m Z^2} \approx -0,92 \cdot 10^{-9}$ .

1.5.  $I = \frac{n\mu_a^2 B}{3kT} \approx 8,65 \cdot 10^{-6} \text{ (А/м)}$ .

$$1.6. n' = n \frac{e^{\eta - e^{\frac{\sqrt{3}}{2}\eta}}}{e^{\eta} - e^{-\eta}} \approx 0,6n = 6 \cdot 10^9 \text{ (м}^{-3}\text{)};$$

$$\text{при } T \rightarrow \infty \text{ и (или) } B \rightarrow 0 \text{ } n' \rightarrow n \frac{(2-\sqrt{3})}{4} \approx 6,7 \cdot 10^8 \text{ (м}^{-3}\text{)}.$$

$$1.7. \chi = \frac{\mu_0 n (2,8\mu_B)^2}{3k \cdot 273,15} \approx 2,01 \cdot 10^{-6}.$$

$$1.8. 1) I = \mu_a n L(\eta); 2) I = \mu_B n t h \frac{\mu_B B}{kT}.$$

$$1.9. I = \mu_B^2 \frac{nB}{kT} \approx 0,42 \text{ (А/м)}.$$

$$1.10. I_s = 3\mu_B g \frac{\rho N_A}{M} \approx 24,4 \cdot 10^5 \text{ (А/м)}, g - \text{множитель Ланде}.$$

$$1.11. N_+ = \frac{Ne^\alpha}{1+2ch\alpha}, N_0 = \frac{N}{1+2ch\alpha}, N_- = \frac{Ne^{-\alpha}}{1+2ch\alpha};$$

$$\text{при } \alpha \ll 1 \text{ } N_+ = \frac{N}{3}(1 + \alpha), N_0 = \frac{N}{3}, N_- = \frac{N}{3}(1 - \alpha).$$

$$1.12. \chi = \frac{\mu_0 \mu_B^2 n}{E_F} \approx 1,35 \cdot 10^{-6}.$$

$$1.13. B = \frac{3kT_c}{\mu_B} \approx 4,66 \cdot 10^3 \text{ (Тл)}.$$

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2

### Задачи

#### Диэлектрики

2.1. В однородном поляризованном диэлектрике с вектором поляризации  $\vec{P}$  и напряженностью электрического поля  $\vec{E}$  вырезана сферическая полость. Найти напряжённость электрического поля  $\vec{E}_D$  в центре сферы.

2.2. У некоторых твёрдых и жидких неполярных диэлектриков диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon \gg 1$ . Зная, что поляризуемость частицы диэлектрика  $\alpha = 5 \cdot 10^{-40} \frac{\text{Кл} \cdot \text{м}^2}{\text{В}}$ , оценить размер частицы  $d$ .

2.3. Переход от жидкого кислорода к газообразному (неполярный диэлектрик) сопровождается уменьшением его плотности в  $a = 800$  раз. Диэлектрическая проницаемость жидкого кислорода  $\varepsilon_{\text{ж}} = 1,5$ . Вычислить диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon_{\text{г}}$  газообразного кислорода.

2.4. Диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  водорода при нормальных условиях равна 1,00026. Найти дипольный момент молекулы  $p$  в электрическом поле с напряженностью  $E = 10^4 \text{ В/м}$ .

2.5. При нормальных условиях диэлектрическая проницаемость водорода  $\varepsilon_1 = 1,00026$ , а гелия  $\varepsilon_2 = 1,000074$ . Чему равна диэлектрическая проницаемость смеси  $\nu_1 = 2$  моль водорода и  $\nu_2 = 5$  моль гелия?

2.6. Плоская монохроматическая электромагнитная волна с частотой  $\omega$  падает по нормали из вакуума на плоскую поверхность диэлектрика с показателем преломления  $n_0$ . Найти разность фаз  $\Delta\varphi$  между волной в диэлектрике и волной, которая была бы в том же месте в отсутствие диэлектрика, как функцию расстояния  $x$  от его поверхности.

2.7. Найти концентрацию частиц  $n'$  неполярного диэлектрика, если для рентгеновских лучей с длиной волны  $\lambda = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$  показатель преломления  $n_0 = 0,99999$ .

### Ответы

$$2.1. \vec{E}_D = \vec{E} + \frac{\vec{P}}{3\varepsilon_0}.$$

$$2.2. d = \sqrt[3]{\frac{2\alpha}{\pi\varepsilon_0}} \approx 3,2 \cdot 10^{-10} \text{ (м)}.$$

$$2.3. \varepsilon_r = \frac{2b+1}{1-b} \approx 1,00054, \text{ где } b = \frac{1}{a} \frac{\varepsilon_{ж}-1}{\varepsilon_{ж}+2} = \frac{1}{5600}.$$

$$2.4. p = \frac{3\varepsilon_0 RT}{N_A p^*} \frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+2} E \approx 8,56 \cdot 10^{-37} \text{ (Кл}\cdot\text{м)}; p^* - \text{давление газа}.$$

$$2.5. \varepsilon = \frac{2a+1}{1-a} \approx 1,000127, \text{ где } a = \frac{\nu_1}{\nu_1+\nu_2} \frac{\varepsilon_1-1}{\varepsilon_1+2} + \frac{\nu_2}{\nu_1+\nu_2} \frac{\varepsilon_2-1}{\varepsilon_2+2}.$$

$$2.6. \Delta\varphi = -\frac{\omega}{c} (n_0 - 1)x.$$

$$2.7. n' = \frac{8\pi^2 m \varepsilon_0 c^2}{e^2 \lambda^2} (1 - n_0) \approx 2 \cdot 10^{29} \text{ (м}^{-3}\text{)}.$$

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3

### Задачи

#### Кристаллическая решётка

3.1. Какой потенциальной энергией  $U$  обладает точечный электрический диполь с моментом  $\vec{p}$  в электрическом поле с напряженностью  $\vec{E}$ ?

3.2. Чему равна потенциальная энергия  $U$  взаимодействия двух нейтральных атомов, обладающих электрическими дипольными моментами  $\vec{p}_1$  и  $\vec{p}_2$ . Положение второго диполя относительно первого характеризуется радиус-вектором  $\vec{r}$ . Рассмотреть простейшие частные случаи.

3.3. По какой формуле рассчитывается равновесная энергия ионной связи?

3.4. Определить в единицах параметров решетки отрезки, которые отсекает на осях решётки плоскость (345).

3.5. Найти символы плоскости, отсекающей на осях координат отрезки  $4a$ ,  $3b$ ,  $2c$ .

3.6. Найти символ плоскости, параллельной осям  $X$  и  $Z$  и отсекающей 3 единицы на оси  $Y$ .

3.7. Написать индексы Миллера для плоскостей, содержащих узлы с кристаллографическими индексами  $[[111]]$ ,  $[[1\bar{1}2]]$ ,  $[[10\bar{1}0]]$ , а также отрезки, отсекаемые этими плоскостями на осях координат.

3.8. Длина ребра  $a$  кубического кристалла с примитивной ячейкой равна  $2 \cdot 10^{-10}$  м. Чему равно расстояние между соседними параллельными плоскостями, одна из которых отсекает на осях декартовой системы координат отрезки  $A = a$ ,  $B = 2a$ ,  $C = \frac{1}{3}a$ ?

3.9. Определить угол  $\varphi$  между плоскостями (201) и (310) в ромбической системе с параметрами решетки,  $a = 10,437 \cdot 10^{-10}$  м,  $b = 12,845 \cdot 10^{-10}$  м,  $c = 24,369 \cdot 10^{-10}$  м.

3.10. Найти угол  $\varphi$ , образуемый гранями (100) и (010) кубического кристалла.

3.11. Какой угол  $\varphi$  в кубическом кристалле направление  $[m\ n\ p]$  образует с плоскостью  $(m\ n\ p)$ ?



3.12. Чему равен угол  $\varphi$  между вектором обратной решётки  $\vec{N}^* = h\vec{a}^* + k\vec{b}^* + l\vec{c}^*$  и плоскостью  $(h k l)$ ? Рассмотрение ограничить ромбической, тетрагональной и кубической системами.

3.13. Объём элементарной ячейки кристалла  $V_0 = \vec{a}(\vec{b} \times \vec{c})$ . Чему равен объём элементарной ячейки  $V_0^*$  обратной решётки?

3.14. Какой будет решётка, обратная кубической объёмноцентрированной?

3.15. Элементарная ячейка магния принадлежит к гексагональной системе и имеет параметры  $a = 3,20 \cdot 10^{-10}$  м и  $c = 5,20 \cdot 10^{-10}$  м. Определить векторы обратной решетки  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $c^*$ .

3.16. Период решетки  $a$  одномерного кристалла равен  $3 \cdot 10^{-10}$  м. Определить максимальную энергию  $E_{max}$  фононов, распространяющихся вдоль этой цепочки атомов. Скорость звука в кристалле  $\vartheta = 5000$  м/с.

3.17. Длина волны фонона  $\lambda$ , соответствующего частоте  $\omega = 0,01\omega_{max}$ , равна 52 нм. Определить характеристическую температуру Дебая  $\theta$ , если скорость звука в кристалле  $\vartheta = 4,8$  км/с.

3.18. Характеристическая температура Дебая для вольфрама равна  $\theta = 310$  К. Определить длину волны  $\lambda$  фононов, соответствующих частоте  $\omega = 0,1\omega_{max}$ .

### ОТВЕТЫ

$$3.1. U = - (\vec{p} \vec{E}).$$

$$3.2. U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{(\vec{p}_1 \vec{p}_2)}{r^3} - \frac{3}{r^5} (\vec{p}_1 \vec{r})(\vec{p}_2 \vec{r}) \right].$$

$$3.3. U_{ионн} = - \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r_0} \left( 1 - \frac{1}{n} \right).$$

$$3.4. A = 20, B = 15, C = 12.$$

$$3.5. (hkl) = (346).$$

$$3.6. (hkl) = (010).$$

$$3.7. (\bar{1}24); \text{отрезки на осях: } 4a; 2b; 1c.$$

$$3.8. d = \frac{a}{\sqrt{41}} \approx 0,31 \cdot 10^{-10} \text{ (м)}.$$

3.9.  $\varphi = 17^\circ$ .

3.10.  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ .

3.11.  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ .

3.12.  $a^* = 7,5 \text{ нм}^{-1}$ ;  $b^* = 7,5 \text{ нм}^{-1}$ ;  $c^* = 4,0 \text{ нм}^{-1}$ .

3.13.  $V_0^* = \frac{1}{V_0}$ .

3.14. *Кубической гранецентрированной.*

3.16.  $E_{max} = \frac{\pi \hbar \vartheta}{a} \approx 5,5 \cdot 10^{-21} \text{ (Дж)}$ .

3.17.  $\theta = \frac{2\pi \vartheta \hbar}{0,01 \lambda k} \approx 443 \text{ (K)}$ .

3.18.  $\lambda = \frac{2\pi c \hbar}{0,1 k \theta} \approx 4,8 \text{ (нм)}$ .

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4

### Задачи

#### Зонная теория твёрдых тел

4.1. Вычислить значение обменной энергии  $D_d$  для  $s$ -зоны электронного состояния, если известно, что у дна этой зоны эффективная масса электрона  $m_{\text{эфф}} = 0,01m$ . Постоянная решётки кристалла  $a = 5 \cdot 10^{-10}$  м.

4.2. С каким ускорением  $w$  движется электрон в кристалле под действием электрического поля с напряжённостью  $\varepsilon = 10$  В/м, если он находится на энергетическом уровне у вершины  $p$ -зоны, где обменная энергия  $D_B = 1$  эВ, постоянная решётки  $a = 6 \cdot 10^{-10}$  м.

4.3. Чему равна эффективная масса электрона  $m_{\text{эфф}}$ , находящегося у дна  $s$ -зоны в периодическом поле кристалла с обменной энергией  $D_d = 1$  эВ и постоянной решётки  $a = 5 \cdot 10^{-10}$  м?

4.4. Найти классическую скорость дрейфа  $v_d$  свободных электронов в металлическом натрии под действием электрического поля с напряжённостью  $E = 50$  В/м, а также его удельную электропроводность  $\sigma$ . Время релаксации электронов  $\tau$  принять равным  $10^{-14}$  с, а концентрацию электронов  $n = 5 \cdot 10^{28}$  м<sup>-3</sup>.

### Ответы

$$4.1. D_d = \frac{\hbar^2}{2m_{\text{эфф}}a^2} \approx 13,9 \text{ (эВ)}.$$

$$4.2. w = 2D_B \frac{e\varepsilon}{\hbar^2} a^2 \approx 13 \cdot 10^{12} \text{ (м/с}^2\text{)}.$$

$$4.3. m_{\text{эфф}} = \frac{\hbar^2}{2D_d a^2} \approx 1,3 \cdot 10^{-31} \text{ (кг)}.$$

$$4.4. v_d = \frac{eE\tau}{m} \approx 8,8 \text{ (см/с)}; \sigma = \frac{ne^2\tau}{m} \approx 1,4 \cdot 10^7 \text{ (Ом}^{-1}\text{·м}^{-1}\text{)}.$$

### Список использованных источников:

1. Беллюстин С.В. Классическая электронная теория. – М.: Высшая школа. – 1971.
2. Винтайкин Б.Е. Физика твёрдого тела. Учеб. пособие для вузов. – СПб: Лань. – 2008.
3. Гинзбург И.Ф. Введение в физику твёрдого тела. – СПб: Лань. – 2007.
4. Епифанов Г.И. Физика твердого тела. – СПб: Лань. – 2010.
5. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. – М.: Наука. – 1978.
6. Киттель Ч. Элементарная физика твердого тела. – М.: Наука. – 1965.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Статистическая физика. Теория конденсированного состояния. Т.9, ч.2. – М.: Физматлит. – 2004.
8. Левич В.Г. Введение в статистическую физику. – М.: Гостеориздат. – 1954.
9. Несис Е.И., Скибин Ю.Н. Электронная теория магнетизма. – Ставрополь: Изд-во СГУ. – 1998.
10. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа. – 2000.
11. Свирский М.С. Электронная теория вещества. – М.: Просвещение. – 1980.
12. Физика твердого тела: Учебник для вузов / Под ред. И.К. Верещагина/. – М.: Высшая школа. – 2001.
13. Физика микромира. Маленькая энциклопедия. (Гл. ред. Широков Д. В.). – М.: Советская энциклопедия. – 1980.
14. Физический энциклопедический словарь (Гл. ред. А.М. Прохоров). – М.: Советская энциклопедия. – 1983.