

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
БОРИСОГЛЕБСКИЙ ФИЛИАЛ
(БФ ФГБОУ ВО «ВГУ»)

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ
Избранные вопросы физики твёрдого тела

1. Код и наименование направления подготовки:

44.03.01 Педагогическое образование

2. Профиль подготовки:

Информатика и информационные технологии в образовании

3. Квалификация (степень) выпускника:

Бакалавр

4. Форма обучения:

Заочная

5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины:

Кафедра прикладной математики, информатики, физики и методики их преподавания

6. Составители:

Жиренко Н.Г., кандидат биологических наук, доцент кафедры,

Зюзин С.Е., кандидат физико-математических наук, доцент

7. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Приступая к изучению учебной дисциплины, обучающиеся должны ознакомиться с учебной программой дисциплины. Электронный вариант рабочей программы размещён на сайте БФ ВГУ. Следует обратить особое внимание на:

- основные цели и задачи дисциплины;
- перечень и содержание компетенций, на формирование которых направлена дисциплина;
- систему оценивания учебных достижений;
- распределение видов занятий по разделам дисциплины;
- учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.

В ходе лекций необходимо критически осмысливать предлагаемый материал, задавать вопросы, добиваться полного понимания изучаемых вопросов темы. Для заочной формы обучения на контактную работу отводится всего 2 лекционных часа. В связи с этим лекция имеет обзорный характер. Преподаватель комментирует содержание курса, логику его построения; обозначает вопросы, которые уже знакомы студентам по другим дисциплинам, обращает внимание на новые понятия; рекомендует основную и дополнительную учебную литературу.

Требования к оформлению рефератов и списка цитированных источников соответствуют требованиям к оформлению курсовых работ по кафедре ПМИФимП.

8. Методические материалы для обучающихся по освоению теоретических вопросов дисциплины

№	Тема лекции	Рассматриваемые вопросы
1	Кристаллическая структура твердых тел и её дефекты. Механические свойства твёрдых тел.	Элементы кристаллографии и структура твердых тел. Точечные дефекты и дислокации. Диаграмма «напряжение – деформация». Закон Гука. Пластичность, хрупкость, прочность, твердость. Физические основы методов измерений характеристик твёрдых тел.
2	Металлы	Электропроводность металлов с точки зрения классической и квантовой физики. Зависимость электропроводности от температуры. Контактные явления в металлах (работа выхода, контактная разность потенциалов, термопара).
3	Полупроводники	Собственные, донорные и акцепторные полупроводники. Собственная и примесная электропроводность. Температурная зависимость электропроводности от температуры. Измерение ширины запрещенной зоны. Электронно-дырочный переход и его практическое использование (выпрямление переменного тока, физические основы работы биполярных и полевых транзисторов). Термоэлектрические явления в полупроводниках (эффекты Зеебека, Пельтье) и их практическое использование. Эффект Холла.

) основная литература:

№ п/п	Источник
1	Физика твердого тела : учебное пособие / А.А. Корнилович, В.И. Ознобихин, И.И. Суханов, В.Н. Холявко. - Новосибирск : НГТУ, 2012. - 71 с. - ISBN 978-5-7782-2160-4 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=228969 (21.11.2017).

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
2	Фомин, Д.В. Экспериментальные методы физики твердого тела : учебное пособие / Д.В. Фомин. - Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2014. - 186 с. : ил., схем., табл. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-4475-2829-4 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=259074 (21.11.2017).
3	Гольдаде, В.А. Физика конденсированного состояния : пособие / В.А. Гольдаде, Л.С. Пинчук ; под ред. Н.К. Мышкина. - Минск : Белорусская наука, 2009. - 648 с. ; То же [Электронный ресурс]. - URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=93309 (21.11.2017).

в) информационные электронно-образовательные ресурсы:

№ п/п	Источник
4	Влияние механических воздействий на физико-химические процессы в твердых телах / В.А. Полубояров, О.В. Андришкова, И.А. Паули, З.А. Коротаева. - Новосибирск : НГТУ, 2011. - 602 с. - (Монографии НГТУ). - ISBN 978-5-7782-1847-5 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=135593 (21.11.2017).

9. Перечень вопросов для подготовки к занятиям

1. Кристаллические и аморфные тела. Типы кристаллов. Монокристаллы и поликристаллы.
2. Понятие пространственной решётки, элементарной ячейки. Индексы Миллера.
3. Природа сил взаимодействия атомов в кристалле. Виды химической связи. Классификация кристаллов по типу связи.
4. Упругие свойства кристаллов. Деформации сдвига, кручения и изгиба. Закон Гука.
5. Дефекты кристаллической решетки и их влияние на механические свойства кристалла.
6. Дифракция в кристаллах. Условие дифракции. Закон Брэгга.
7. Исследование кристаллов с помощью рентгеновских источников. Современные методы кристаллографии.
8. Микро- и макросостояние. Понятие фазового пространства. Функция распределения в фазовом пространстве.
9. Интеграл состояний и его применение к исследованию термодинамических свойств кристалла. Теплоемкость кристалла.
10. Основные идеи квантовой физики и их применение к расчету теплоемкости кристалла. Теплоемкость по Дебаю и Эйнштейну.

11. Проблема электронного газа в металлах. Квантовые статистики. Вырождение. Применение статистики Ферми к расчету теплоемкости электронного газа.
12. Полярные и неполярные диэлектрики в электрическом поле. Поляризуемость диэлектриков.
13. Электропроводность и закон Ома.
14. Энергетические уровни атома и энергетические зоны в кристалле. Разрешенные и запрещенные зоны.
15. Металл, диэлектрик, полупроводник: зонная структура, энергетические диаграммы.
16. Температурная зависимость концентрации носителей заряда в полупроводнике.
17. Эквивалентная схема и характеристики диода на основе p-n перехода.
18. Основные режимы работы биполярного транзистора, физические процессы в различных областях биполярного транзистора.
19. Гальваномагнитный эффект Холла.
20. Термоэлектрический эффект Пельтье.
21. Термоэлектрический эффект Зеебека.
22. Пара-, диа- и ферромагнетизм. Ферромагнетики в технике.

10. Тематика рефератов/докладов/эссе, методические рекомендации по выполнению контрольных и курсовых работ, иные материалы

Типовые задания для организации индивидуальной работы (индивидуальные задания) по дисциплине «Избранные вопросы физики твёрдого тела»

Темы рефератов

1. Типы межатомных связей. Ван-дер-Ваальсово взаимодействие. Ионная связь.
2. Типы межатомных связей. Ковалентная и водородная связь. Металлическая связь.
3. Кристаллические и аморфные тела.
4. Операции симметрии в кристаллической решетке. Трансляционная симметрия.
5. Решетка Браве. Основные типы трехмерных решеток Браве. Базоцентрированная, объемцентрированная, гранецентрированная решетки.
6. Кристаллографическая плоскость и кристаллографическое направление. Индексы Миллера.
7. Дифракция в кристаллах. Условие Брэгга. Кристаллография.
8. Элементы физической статистики. Фазовое пространство. Распределение Гиббса и Максвелла-Больцмана.
9. Теплоемкость кристаллов. Классическая модель теплоемкости. Теплоемкости кристалла по Эйнштейну и Дебаю.
10. Квантовые статистики Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна.
11. Статистика электронного газа в металле. Теплоемкость электронного газа.
12. Элементы зонной теории кристалла. Уравнение Шредингера для кристалла и его упрощение. Энергетические зоны в кристалле.
13. Модель Кронига-Пенни.

14. Статистика электронов в кристалле. Количество мест в зоне. Их заполнение. Проводники, диэлектрики, полупроводники.
15. Диэлектрическая проницаемость твёрдых тел.
16. Явления переноса в твердых телах. Классическая теория электропроводности Друде
17. Собственные и примесные полупроводники. Донорные и акцепторные состояния.
18. Проводимость полупроводников, ее зависимость от температуры.
19. Потенциальный барьер. Работа выхода. Эмиссия электронов с поверхности твердого тела.
20. Контактная разность потенциалов. Контакт металл-металл. Контакт металл-полупроводник.
21. *p-n*-переход. Вольтамперная характеристика *p-n*-перехода. Полупроводниковые приборы.
22. Магнитная восприимчивость и намагниченность.
23. Ферромагнетики. Основные характеристики. Температура Кюри.

Для подготовки к контрольной работе и зачету следует внимательно изучить материал, изложенный в рекомендованных учебных пособиях, ознакомиться с примерами решения задач в данных методических материалах и самостоятельно решить задачи, пользуясь учебной, справочной и учебно-методической литературой.

Система задач для подготовки к контрольной работе

Примеры решения задач

Задача 1. Чему равно число атомов в элементарной ячейке в случае 1) простой, 2) объемноцентрированной и 3) гранецентрированной кубических решеток?

Решение. 1) В простой кубической решетке атомы находятся только в вершинах углов ячейки. Одна вершина принадлежит восьми параллелепипедам кристаллической решетки. Поэтому на каждую вершину одной ячейки приходится одна восьмая часть атома, находящегося в вершине.

Ячейка имеет восемь углов, следовательно, на нее приходится один атом.

2) В объемноцентрированной кубической решетке, кроме атомов, расположенных в углах, элементарной ячейке принадлежит полностью внутренний центральный атом. Таким образом, в объемно-центрированной решетке на каждую ячейку приходится два атома.

3) В гранецентрированной кубической решетке атомы, расположенные в центре граней, принадлежат двум ячейкам. Поэтому число атомов в элементарной ячейке равно четырем.

Задача 2. Определить постоянную решетки кристалла LiJ, если известно, что зеркальное отражение первого порядка рентгеновских лучей с длиной волны $2,10 \text{ \AA}$ от естественной грани этого кристалла происходит при угле скольжения $10^\circ 5'$.

Решение. Постоянную решетки LiJ найдем из формулы Вульфа-Брэгга

$$2d \sin \theta = k\lambda,$$

где d – межплоскостное расстояние в кристалле, θ – угол скольжения рентгеновского луча, k – порядок дифракционного максимума, λ – длина волны рентгеновского излучения;

отсюда

$$d = \frac{k\lambda}{2 \sin \theta}$$

$$d = \frac{2,1}{2 \sin 10^\circ 5'} \approx 6,00 \text{ \AA}$$

Задача 3. Для образования вакансии в алюминии требуется энергия примерно $0,75 \text{ эВ}$. Сколько существует вакансий на один атом кристалла в состоянии термодинамического равновесия при комнатной температуре? При 600°C ?

Решение. Число вакансий в кристалле, содержащем N атомов,

$$n = N e^{-\frac{E}{kT}}.$$

Здесь E – энергия активации вакансии, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

Тогда число вакансий на один атом

$$n' = \frac{n}{N} = e^{-\frac{E}{kT}}.$$

При температуре 300°C

$$n = \exp\left(-\frac{0,75 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}\right) \approx e^{-29} \approx 24,9 \cdot 10^{-14}.$$

При температуре 600°C

$$n \approx 5 \cdot 10^{-7}$$

Задача 4. Удельные теплоемкости свинца и алюминия при постоянном объеме и температуре 200°C составляют соответственно 126 и 896 Дж/(кг К). Вычислить молярные теплоемкости (C_v) для каждого из этих металлов и сравнить со значениями, полученными по закону Дюлонга и Пти. Выполняется ли закон Дюлонга и Пти для них?

Решение. Молярная теплоемкость тела равна удельной теплоёмкости, умноженной на молярную массу

$$C_v = c_v M.$$

Тогда молярная теплоемкость свинца

$$C'_v = 126 \cdot 207,21 \approx 26,1 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}},$$

алюминия

$$C''_v = 896 \cdot 26,98 \approx 24,14 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

По закону Дюлонга и Пти молярная теплоемкость кристалла

$$C_v = 3R = 3 \cdot 8,31 \approx 24,96 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

Таким образом, молярная теплоемкость свинца превышает значение теплоемкости, рассчитанное по закону Дюлонга и Пти, а теплоемкость алюминия близка к значению, полученному по этому закону.

Задача 5. По квантовой теории энергия каждого осциллятора может быть представлена в виде $E = h\nu n$, где n – квантовое число, h – постоянная Планка, ν – частота колебаний. Исходя из того, что распределение осцилляторов по энергиям подчиняется закону Больцмана, и средняя энергия осциллятора имеет вид $E_{\text{cp}} =$

$\frac{\sum_{n=0}^{\infty} h\nu n e^{-\frac{h\nu}{kT}}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{h\nu}{kT}}}$, где k – постоянная Больцмана, а T – абсолютная температура, вычислить

среднюю энергию осциллятора при данной температуре T .

Решение. В формуле для средней величины

$$E_{\text{cp}} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} h\nu n e^{-\frac{h\nu}{kT}}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{h\nu}{kT}}}$$

числитель можно представить как производную знаменателя. Тогда

$$E_{cp} = kT^2 \frac{d}{dT} \ln \left(\sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{hn}{kT}} \right).$$

Под логарифмом стоит сумма бесконечно убывающей геометрической прогрессии

$$\sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{hn}{kT}} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{hv}{kT}}}.$$

Тогда

$$E_{cp} = kT^2 \frac{e^{-\frac{hv}{kT}}}{1 - e^{-\frac{hv}{kT}}} \cdot \frac{hv}{kT^2} = \frac{hv}{e^{\frac{hv}{kT}} - 1}.$$

Задача 6. Показать, что при высоких температурах квантовое выражение для средней энергии осциллятора переходит в классическое.

Решение. При высоких температурах $hv \ll kT$. Тогда $e^{\frac{hv}{kT}}$ можно разложить в ряд по степеням $\frac{hv}{kT}$ и ограничиться двумя первыми членами разложения:

$$E_{cp} = \frac{hv}{e^{\frac{hv}{kT}} - 1} = \frac{hv}{1 + \frac{hv}{kT} + \dots - 1} \approx kT.$$

Задача 7. Определить приближенно скорость звука в алмазе, зная, что дебаевская температура алмаза равна 1860 К и $d=1,54 \text{ \AA}$.

Решение. Определить скорость звука в алмазе можно из следующего соотношения Дебая:

$$\theta = \frac{hv_{max}}{k}.$$

v_{max} можно оценить, если считать, что половина длины волны λ_{min} , соответствующая максимальной частоте, равна параметру кристаллической решетки d . Тогда

$$v_{max} = \frac{v}{\lambda_{min}} = \frac{v}{2d}$$

$$\theta = \frac{hv}{2dk},$$

откуда

$$v = \frac{2k\theta d}{h} = 11,4 \cdot 10^3 \text{ м/с}.$$

Задача 8. Удельное сопротивление собственного германия при 27°C составляет 0,47 Ом·м. Полагая, что подвижности электронов и дырок соответственно равны 0,38 и 0,18 м²/(В·с), вычислить плотности носителей тока при 27°C.

Решение. Электропроводность собственного полупроводника

$$\delta = ne(\mu_e + \mu_p),$$

где n – концентрация носителей заряда, e – элементарный заряд, μ – подвижность носителя заряда.

Отсюда

$$n = \frac{\delta}{e(\mu_e + \mu_p)} = \frac{1}{\rho e(\mu_e + \mu_p)}$$

$$n = \frac{1}{0,47 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} (0,38 + 0,18)} = \frac{10^{19}}{1,6 \cdot 0,47 \cdot 0,56} \approx 2,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}.$$

Задача 9. Определить электропроводность германия, который содержит индий в концентрации $2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ и сурьму в концентрации $1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$.

Решение. Известно, что для германия и кремния сурьма является донором, а индий – акцептором. При наличии доноров и акцепторов

$$\delta = e(\mu_e n_e + \mu_p n_p),$$

где μ_e , μ_p - подвижности электронов и дырок соответственно. Так как $\mu_e = 0,38 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\mu_p = 0,18 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, то

$$\delta = 1,6 \cdot 10^{-19} (0,38 \cdot 10^{21} + 0,18 \cdot 2 \cdot 10^{22}) \approx 474 \text{ См/м}.$$

Задача 10. Образец из полупроводника прямоугольной формы размерами $0,2 \times 0,2 \times 0,05 \text{ см}$ имеет 10^{21} свободных зарядов в 1 м^3 при 20°C . К двум противоположным узким граням приложено напряжение 20 В . Вычислить величину тока, полагая подвижность носителей зарядов равной $0,03 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Решение. Плотность тока $j = ne\mu E$. Напряженность электрического поля $E = \frac{U}{d}$, где d – поперечный размер образца. Тогда $j = ne\mu \frac{U}{d}$, а сила тока в образце $I = ne\mu \frac{U}{d} S = ne\mu \frac{U}{d} dh = ne\mu Uh = 4,8 \cdot 10^{-2} \text{ А}$.

Задачи для самостоятельного решения

1. Доказать, что в кубическом кристалле любое направление $[hk\ l]$ перпендикулярно к плоскости (hkl) с теми же значениями индексов Миллера.
2. Вычислить угол между двумя прямыми $[101]$ и $[012]$ в ромбической решетке медного купороса с параметрами решетки $a=4,88 \text{ \AA}$, $b=6,66 \text{ \AA}$, $c=8,32 \text{ \AA}$.
3. Определить угол между телесной диагональю и ребром куба.
4. Появятся ли на рентгенограмме линии, возникшие в результате отражения от плоскостей (200) и (101) гранецентрированной кубической решетки?
5. При съемке дебаеграммы серебра при температурах 18 и 630°C интересующая нас линия появилась при углах $80^\circ 9'$ и $76^\circ 54'$. Вычислить коэффициент термического расширения серебра.
6. Показать, что при определении коэффициента термического расширения рентгеновским методом более точные результаты получаются при измерениях на линиях с большими брегговскими углами.

7. При рентгеновском изучении деформированной стали установлено, что относительное изменение параметров решетки составляет 0,2%. Чему равны внутренние напряжения в стали, если модуль Юнга $21\ 000\ \text{кГ/мм}^2$, коэффициент Пуассона 0,28?

8. Рассчитать отношение числа дефектов по Шоттки к числу дефектов по Френкелю при комнатной температуре, если энергия для образования вакансии 0,75 эВ, а для образования дефекта внедрения 3 эВ.

9. Согласно теории теплоемкости Эйнштейна молярная теплоемкость кристалла описывается выражением

$$C_v = 3R \frac{\left(\frac{\theta}{T}\right)^2 e^{\frac{\theta}{T}}}{\left(e^{\frac{\theta}{T}} - 1\right)^2}, \text{ где } \theta = \frac{h\nu}{k}.$$

Показать, что при высоких температурах теплоемкость подчиняется закону Дюлонга и Пти.

10. Показать, что при низких температурах теплоемкость по теории Дебая пропорциональна кубу абсолютной температуры.

11. Пусть энергия, требуемая для перемещения атома натрия из внутренней части кристалла на поверхность, равна 1 эВ. Вычислить теплоемкость одного моля металла при комнатной температуре, обусловленную наличием в нем дефектов Шоттки.

12. Кремний и германий имеют структуру алмаза. Чему равно среднее число атомов Si и Ge в объеме a^3 (a — ребро элементарного куба)?

13. Вычислить скорость дрейфа электронов и дырок в германии при комнатной температуре в поле напряженностью 1000 В/м.

14. Образец германия n-типа толщиной 1 мм с концентрацией электронов $10^{20}\ \text{м}^{-3}$ помещен в магнитное поле с индукцией 0,1 Вб/м². Определить величину ЭДС Холла при токе 1 мА, протекающем через образец.

15. Удельная проводимость и коэффициент Холла арсенида индия соответственно равны $4 \cdot 10^2\ \text{См/м}$ и $10^{-2}\ \text{м}^3/\text{К}$ соответственно. Считая, что проводимость осуществляется зарядами одного знака, определить их концентрацию и подвижность.

16. Вывести общее выражение для постоянной Холла полупроводника. Как упростится это выражение для собственного полупроводника?

17. Сколько электронов и дырок образуется в кристалле при поглощении им 10^{-4} Дж световой энергии с длиной волны 2000 \AA ? Какой заряд (в кулонах) потечет по внешней цепи кристалла, если приложенное к нему электрическое поле достаточно сильно, чтобы доставить все свободные носители заряда к электродам? Квантовый выход равен 1.

18. В настоящее время изготавливаются мощные германиевые выпрямители с искусственно созданной дырочной или электронной проводимостью. Как можно создать у германия ту или другую проводимость?

19. Удельное сопротивление монокристалла кремния р-типа при комнатной температуре (300°K) составляет $9 \cdot 10^{-4}$ Ом м. Чему должен равняться коэффициент Холла, если подвижность дырок $0,04 \text{ м}^2/(\text{В с})$?

20. Концентрация акцепторов в полупроводнике 10^{18} см^{-3} . Энергетический уровень этих акцепторов на $0,5 \text{ эВ}$ выше, чем потолок валентной зоны. Вычислить электропроводность материала при комнатной температуре (300 K) и при температуре жидкого кислорода (90 K), если подвижность дырок в валентной зоне кристалла $100 \text{ см}^2/(\text{В с})$. Собственной проводимостью полупроводника пренебречь.

Вопросы к зачету по дисциплине «Избранные вопросы физики твёрдого тела»

1. Элементы кристаллографии и структура твердых тел.
2. Точечные дефекты и дислокации.
3. Диаграмма «напряжение – деформация». Закон Гука. Пластичность, хрупкость, прочность, твердость.
4. Физические основы методов измерений характеристик твёрдых тел.
5. Химическая связь в кристаллах.
6. Основные положения квантовой физики. Электронный газ в металлах. Функция Ферми.
7. Зонная теория твёрдых тел. Металлы, диэлектрики и полупроводники в свете зонной теории твёрдых тел.
8. Виды и строение диэлектриков. Диэлектрики в электрическом поле. Поляризационные явления: Диэлектрическая проницаемость. Электрический пробой твёрдых диэлектриков. Пьезоэлектрики. Диэлектрики в технике.
9. Электропроводность металлов с точки зрения классической и квантовой физики. Зависимость электропроводности от температуры.
10. Контактные явления в металлах (работа выхода, контактная разность потенциалов, термопара).
11. Собственные, донорные и акцепторные полупроводники. Собственная и примесная электропроводность. Температурная зависимость электропроводности от температуры.
12. Измерение ширины запрещенной зоны.
13. Электронно-дырочный переход и его практическое использование (выпрямление переменного тока).
14. Физические основы работы биполярных и полевых транзисторов).

15. Термоэлектрические явления в полупроводниках (эффекты Зеебека, Пельтье) и их практическое использование.
16. Эффект Холла.
17. Природа магнетизма: пара-, диа- и ферромагнетизм. Домены, петля гистерезиса, температура Кюри.
18. Характеристики магнитотвердых и магнитомягких материалов.
19. Структура ферритов; области их использования.
20. Использование магнитных материалов в компьютерной технике.