

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

кафедра физики твердого тела

**«ОСНОВЫ МАГНЕТИЗМА»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к практическим занятиям

для студентов направления 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная  
техника» профиля «Компоненты микро- и наносистемной техники»  
очной формы обучения



Воронеж 2021

УДК 539.67  
548:537.621

**Составители:**

*д-р физ.-мат. наук Ю.Е.Калинин*

Основы магнетизма: методические указания к практическим занятиям для студентов направления 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» профиля «Компоненты микро- и наносистемной техники» очной формы обучения / ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: Ю.Е.Калинин. - Воронеж, 2021. 32 с.

В методических указаниях приводятся краткие теоретические сведения, темы практических занятий и задачи для самостоятельных работ.

Издание предназначено для студентов очной формы обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле «МУ ПР Осн\_Магн.pdf».

Ил. 1. Библиогр.: 19 назв.

**Рецензент** – В.А.Макагонов, канд. физ-мат. наук, доц. кафедры физики ВГТУ

*Рекомендовано методическим семинаром кафедры ФТТ и методической комиссией ФРТЭ Воронежского государственного технического университета в качестве методических материалов*

## Введение в физику магнетизма

**Магнетизм** - раздел физики, изучающий форму взаимодействия движущихся электрических зарядов, осуществляемую на расстоянии посредством магнитного поля. Окружающий нас мир велик и разнообразен, наполнен самыми различными предметами и явлениями. Многовековая деятельность человека показала, что все предметы и явления существуют не независимо друг от друга, что между ними имеются вполне определенные связи. Некоторые связи носят весьма общий характер. Так, например, весьма общий характер имеют связи, определяемые силами всемирного тяготения. Согласно закону всемирного тяготения, установленному еще в XVII столетии Ньютоном, между двумя любыми телами существуют силы притяжения, зависящие от масс этих тел, а также от расстояния между ними. Любые два тела на Земле притягиваются друг к другу. Силы всемирного тяготения управляют законами движения небесных тел. Исходя из закона всемирного тяготения, можно объяснить движение планет, определить их массу, указать местоположение любого небесного тела в любой момент времени.

Но силы тяготения не являются единственными силами, обладающими характером общности. Огромный круг явлений природы определяется **магнитными силами**. Магнитные силы являются источником многих явлений микромира, т. е. поведения атомов, молекул, атомных ядер и элементарных частиц – электронов, протонов, нейтронов и пр.; магнитные явления характерны и для огромных небесных тел. Солнце и Земля – это огромные магниты. Половина энергии электромагнитных волн (радиоволн, инфракрасного, видимого и ультрафиолетового излучения, рентгеновых и гамма-лучей) является магнитной.

Немагнитных веществ не существует. Любое вещество всегда магнитно, т. е. изменяет свои свойства в магнитном поле. Иногда эти изменения невелики и обнаружить их можно только с помощью очень совершенной аппаратуры; иногда они весьма значительны и обнаруживаются без особого труда с помощью очень простых средств.

К слабомагнитным веществам относятся медь, алюминий, вода, ртуть и пр., к сильномагнитным или просто магнитным (при обычных температурах) – железо, никель, кобальт, некоторые редкоземельные металлы и сплавы.

**Изучение магнитных явлений** чрезвычайно важно как с теоретической, так и с практической стороны. Современная электротехника весьма широко использует магнитные свойства вещества для получения электрической энергии, для ее превращения в различные другие виды энергии. В аппаратах проводочной и беспроводной связи, в телевидении, автоматике и телемеханике употребляются материалы с определенными магнитными свойствами. Магнитные явления играют существенную роль также в живой природе. Необычайная общность магнитных явлений, их огромная практическая значимость приводят к тому, что учение о магнетизме является одним из важнейших разделов современной физики.

**В теории магнетизма** считается, что электрон обладает квантовым свойством, т.е. спином, вследствие чего ведет себя как стрелка компаса, которая вращается вокруг своей оси и соединяющая южный и северный полюса. Спины электронов могут быть ориентированы в направлениях, которые обычно называют «спин-вверх» (мажорные спины) и «спин-вниз» (минорные спины).

Наблюдения за магнитными действиями тока привели еще в первой половине прошлого века французского физика Ампера к мысли о том, что особого магнитного поля, обусловленного электрическими токами, вообще не существует. Согласно гипотезе Ампера, магнитные свойства вещества обусловлены особыми, текущими внутри молекул вещества молекулярными токами. Эти замкнутые молекулярные токи представляют собой, по мысли Ампера, своеобразные элементарные магнитики.

До тех пор пока наши сведения о строении атомов не стали достаточно полными, гипотеза Ампера не имела под собой твердой опоры. Когда же было установлено, что атом состоит из положительно заряженного ядра и вращающихся во-

круг него электронов, то естественно было предположить, что движущиеся вокруг ядра электроны и представляют собой те самые элементарные токи, которые и являются элементарными носителями магнетизма. Вращающийся по орбите вокруг ядра электрон обладает некоторым магнитным моментом и представляет собой элементарный магнитик.

Как показывают расчеты, величина магнитного момента, обусловленного движением электрона по орбите, кратна некоторой величине, носящей название магнетона Бора. Магнетон Бора  $\mu_B$  есть наименьшее значение магнитного момента, которое может иметь электрон

$$\mu_B = e\hbar/2mc, \quad (1)$$

где  $\hbar$  - постоянная Планка,  $e$  – заряд электрона,  $m$  – его масса,  $c$  - скорость света. Таким образом, орбитальный магнитный момент электрона равен целому числу магнетонов Бора

$$\mu = n\mu_B, \quad (2)$$

где  $n$ -целое число (1,2,3, и т.д.).

Двигаясь по орбите вокруг ядра, электрон обладает также орбитальным механическим моментом  $K$ , Отношение магнитного орбитального момента к механическому орбитальному моменту равно

$$\mu/K=e/2mc, \quad (3)$$

и называется гиромагнитным отношением.

Помимо движения вокруг ядра по орбите электрон вращается еще вокруг собственной оси. Такое вращение приводит также к образованию магнитного момента. Этот магнитный момент, вызванный вращением электрона вокруг своей оси, носит название спинового магнитного момента (от английского *to spin* – вращаться). Величина спинового магнитного момента, или просто спина, равна в точности магнетону Бора.

В сравнении с магнитными моментами практически используемых магнитов магнетон Бора  $\mu_B$  – величина очень маленькая, равная  $0,927 \cdot 10^{-20}$  абсолютных электромагнитных единиц. Атомы различных веществ имеют разное количество электронов. У изолированного атома в нормальном состоянии число электронов, вращающихся вокруг ядра, равно его порядковому номеру в периодической системе элементов Менделеева. Так, у атома водорода вокруг ядра вращается один электрон, у атома гелия – два, у натрия, стоящего в периодической системе под номером 11, вокруг ядра вращаются одиннадцать электронов.

Ядро атома тоже представляет собой сложную систему, состоящую из частиц двух типов: протонов и нейтронов. Протон – положительно заряженная частица с массой, превышающей массу электрона в 1836,5 раз. Протон, так же как и электрон, обладает некоторым магнитным моментом, т. е. представляет собой маленький магнетик. Магнитный момент протона меньше, чем магнитный момент электрона в 658 раз, а магнитный момент нейтрона – в 960 раз.

Атом в целом представляет сложную магнитную систему. В самом деле, ядро атома состоит из протонов и нейтронов, каждый из которых обладает магнитным моментом, причем эти моменты могут быть ориентированы различно; вокруг ядра атома вращаются электроны, каждый из которых обладает как орбитальным, так и спиновым магнитными моментами. Магнитный момент атома будет суммой этих моментов, причем сумма эта будет не арифметическая, а более сложная, учитывающая не только численные значения магнитных моментов отдельных частиц, но и их направления. Магнитные моменты протонов и нейтронов значительно меньше магнитных моментов электронов, поэтому можно считать, что магнитные свойства атома определяются в основном магнитными свойствами его электронной оболочки.

Так обстоит дело в случае изолированного атома. В случае же твердого тела, представляющего собой коллектив огромного количества атомов, магнитный момент каждого из

них определяется не только частицами, принадлежащими данному атому, но и их взаимодействием с частицами соседних атомов. Все атомы в той или иной степени подвергаются действию магнитного поля, т. е. все они в той или иной степени магнитны. Следовательно, немагнитных веществ также не существует; все тела в той или иной степени магнитны, поскольку магнитны атомы, из которых они состоят. По магнитным свойствам все тела можно отнести к одному из пяти видов: диамагнетикам, парамагнетикам, ферромагнетикам, антиферромагнетикам и ферримагнетикам.

Явление **диамагнетизма** заключается в том, что в веществе, помещенном в магнитное поле, возникает дополнительный магнитный момент, направленный противоположно полю. Тело намагничивается не по полю, а против поля. Это явление – есть следствие электромагнитной индукции, открытой английским физиком Фарадеем в 1831 г. По закону электромагнитной индукции, всякий раз, когда изменяется магнитное поле, пронизывающее замкнутый проводник, в последнем возникают индукционные электрические токи. Петербургский академик Ленц, анализируя различные случаи возникновения индукционных токов, сформулировал правило, согласно которому индукционные токи, всегда имеют такое направление, что противодействуют вызвавшей их причине.

Электроны, вращающиеся вокруг ядра, представляют своеобразные замкнутые токи. Если изменять в пространстве, где расположен атом, магнитное поле, то внутри атома возникают индукционные токи, направление которых, согласно правилу Ленца, должно быть таким, чтобы противодействовать вызвавшей их причине. При наложении на атом возрастающего поля в некотором направлении индукционные токи, возникающие в атоме, будут ослаблять его и в атоме появится добавочный магнитный момент, направленный против поля. Вещество при этом будет намагничиваться против поля, возникает явление диамагнетизма. Явление диамагнетизма вызывается прецессией электронных орбит при наложении магнитного поля. Поскольку электронные орбиты имеются в атоме любого веще-

ства, то диамагнетизм присущ всем без исключения веществам, хотя проявляется он далеко не у всех веществ, так как часто перекрывается более сильным парамагнетизмом. Диамагнетизм проявляется только тогда, когда магнитные моменты всех электронных орбит и всех спинов взаимно скомпенсированы. Поскольку диамагнетики намагничиваются против поля, их намагниченность отрицательна. Отношение намагниченности к напряженности магнитного поля называется магнитной восприимчивостью.

Диамагнетиками являются, например, все инертные газы. Величина диамагнитной восприимчивости растет с увеличением порядкового номера элемента в таблице Менделеева. Это можно объяснить тем, что чем выше порядковый номер элемента, тем больше в атоме электронов и, следовательно, большее число электронных орбит будет прецессировать вокруг направления поля, создавая отрицательную намагниченность. Кроме инертных газов существует много других диамагнитных веществ. В частности, диамагнитными свойствами обладает ряд металлов: медь, серебро, золото, бериллий, цинк, кадмий, ртуть, бор, галлий, свинец, сурьма, висмут и некоторые другие. Диамагнитна вода, а также многие органические соединения.

**Парамагнетики** ведут себя в магнитном поле иначе. Если магнитные моменты частиц, составляющих атом или молекулу, не скомпенсированы, то результирующий магнитный момент атома или молекулы в магнитном поле будет вести себя как магнитная стрелка, стремясь установиться по полю. В отсутствие магнитного поля магнитные моменты отдельных атомов или молекул ориентированы равновероятно по всем направлениям. Конечно, направление магнитного момента какого-либо атома с течением времени не остается неизменным. Вследствие теплового движения, представляющего собой движение беспорядочное (хаотичное), направление магнитного момента непрерывно меняется, но результирующий средний магнитный момент парамагнитного тела в отсутствие поля будет равен нулю.



При наложении магнитного поля возникнут силы, ориентирующие магнитный момент каждого атома по полю. Этой ориентации будет противодействовать дезориентирующее действие теплового движения. В результате этих двух конкурирующих процессов установится некоторое распределение. Магнитные моменты атомов хотя и ориентированы по самым различным направлениям, однако распределение уже не остается равновероятным, а имеется некоторое преимущественное направление, совпадающее с направлением наложенного магнитного поля. Результирующий момент при таком распределении не равен нулю, и тело оказывается намагниченным по полю.

С увеличением напряженности поля большее число магнитных моментов атомов ориентируется вдоль поля, и намагниченность тела растет. Если поле очень велико, то все магнитные моменты атомов будут ориентированы строго по полю. Дальнейший рост поля картины не изменит, так как будет достигнуто так называемое магнитное насыщение. С повышением температуры, при неизменной напряженности поля, возрастает дезориентирующая роль теплового движения молекул и намагниченность убывает.

Французский физик Пьер Кюри установил закон температурной зависимости магнитной восприимчивости парамагнетиков, согласно которому

$$\chi = C/T, \quad (4)$$

где  $C$  – константа Кюри,  $T$  – абсолютная температура, т. е. температура, отсчитываемая от абсолютного нуля, равного  $-273^\circ$  по Цельсию.

Однако этой простейшей зависимости подчиняется сравнительно небольшое количество парамагнитных веществ; это так называемые нормальные парамагнетики. Вообще же зависимость от температуры магнитной восприимчивости парамагнетиков часто более сложна, а для щелочных металлов восприимчивость вообще не связана с температурой. Посколь-

ку парамагнетики – слабомагнитные вещества, то и восприимчивость их весьма мала – намного меньше единицы. В отличие от диамагнетиков, восприимчивость парамагнетиков имеет всегда положительные значения. Число парамагнитных веществ весьма велико. Парамагнитными являются газы  $O_2$  и  $O$ , платина, палладий, соли редких земель, соли железа, кобальта, никеля, щелочные металлы, а также металлы: магний, кальций, алюминий, хром, молибден, марганец и др.

Рассмотренные выше диамагнитные и парамагнитные вещества относятся к числу слабомагнитных тел. Для обнаружения и изучения их магнитных свойств требуются специальные условия и физическая аппаратура высокой чувствительности. **Ферромагнетики** — тела сильномагнитные. Они сильно намагничиваются даже в слабых магнитных полях, и их намагниченность можно обнаружить с помощью простых средств. Из чистых химических элементов ферромагнитными свойствами обладают железо, никель, кобальт, гадолиний. При очень низких температурах ферромагнитны эрбий, диспрозий, тулий, гольмий и тербий.

Самым распространенным ферромагнитным элементом является железо (от латинского ferrum – железо), отсюда и название – ферромагнитные тела, ферромагнетизм. Несмотря на то, что из чистых химических элементов всего девять обладают ферромагнитными свойствами, число ферромагнитных веществ очень велико. Ферромагнитными могут быть сплавы, как из самих ферромагнитных элементов, так и их сплавы с неферромагнитными элементами. Кроме того, известны ферромагнитные сплавы из неферромагнитных элементов. Такие сплавы носят название «гейслеровых».

В 1928г. Френкель и Гейзенберг предположили, что ферромагнетизм есть особое свойство электростатически взаимодействующих электронов. В результате электростатического взаимодействия между электронами выгодным оказывается состояние с  $\uparrow\uparrow$ -ной ориентацией спинов.

Поскольку элементарными носителями ферромагнетизма являются электронные спины, возникает вполне законный

вопрос; почему же электронные спины создают ферромагнетизм не во всех веществах, а только в некоторых, причем очень немногих? Почему ферромагнитны железо, никель, почему не ферромагнитны медь и серебро? Ведь и в атомах меди электроны вращаются вокруг своей оси и, таким образом, обладают спиновыми магнитными моментами. Ответ следует, очевидно, искать в специфике атомного строения ферромагнитных веществ.

В атоме с достаточно большим порядковым номером вокруг ядра вращается значительное, количество электронов. При вращении вокруг ядра электроны располагаются некоторыми слоями. Максимальное число электронов в слое (оболочке) равно  $2n^2$ , где  $n$  – порядковый номер слоя. Так, например, в первом слое электронов может быть всего 2, во втором слое  $2 \cdot 2^2 = 8$ , а в третьем  $2 \cdot 3^2 = 18$ , в четвертом 32 электрона и т. п. При переходе от одного атома к другому в порядке увеличения его атомного номера сначала нормально заполняются слои электронов с меньшими порядковыми номерами и лишь потом начинают заполняться более отдаленные слои. Так, в атоме водорода всего один электрон, и он будет находиться в первом электронном слое. Атом гелия (его порядковый номер два) имеет два электрона, и они оба находятся в первом слое. У химического элемента лития, имеющего порядковый номер три – 3 электрона. Эти электроны не могут быть размещены в первом слое, поскольку, как указывалось выше максимальное количество электронов, которое может быть в первом слое, равно двум. Следовательно, третий электрон в атоме лития расположен во втором слое. У следующих по порядку элементов – бериллия, бора, углерода и т. д. - будет все больше и больше заполняться второй слой. У неона, имеющего порядковый номер десять, этот слой окажется полностью заполненным. Очевидно у следующего элемента – натрия - начинает заполняться третий слой.

В слоях следует различать подслои. Первый подслой носит название s-подслоя и находящиеся в нем электроны называются s-электронами. Вторым подслоем называется р-подслоем,

третий – d-подслоем, четвертый – f-подслоем. Соответственно этому имеем s, p, d или f-электроны. Согласно квантовой теории, число электронов в каждом подслое также должно быть ограничено. Так, в s-подслое их будет не более двух, в p-подслое – не более 6, в d-подслое – не более 10, в f-подслое число их» не может превышать 14.

Первый слой, содержащий всего 2 электрона, не имеет подслоев. Второй слой, который может иметь 8 электронов, имеет два подслоя: s-подслой (с двумя электронами) и p-подслой (с шестью электронами). Для обозначения того, в каком подслое какого слоя находится электрон, обозначают номер слоя числом, за которым ставят букву, обозначающую подслоя. Например, запись 2s означает, что электрон принадлежит к первому подслою второго слоя, а запись 4d означает, что электрон принадлежит к третьему подслою четвертого слоя.

Последовательный характер заполнения слоев при переходе к химическим элементам с большими порядковыми номерами нарушается в третьем слое. Это значит, что наблюдаются случаи, когда третий слой еще не совсем заполнен, а уже начинает заполняться четвертый слой. Заметим, что у заполненных слоев и подслоев как орбитальные, так и спиновые магнитные моменты оказываются взаимно скомпенсированными, т. е. если направленные в одну сторону спины условно считать положительными, а в противоположную сторону – отрицательными, то число плюс и минус спинов окажется равным.

В атоме железа целиком заполнены первый и второй слои с одинаковым количеством «+» и «-» спинов в каждом. Одинаковое число «+» и «-» спинов находится также во внешнем, четвертом слое. Что же касается третьего слоя, то в нем целиком, с одинаковым числом «+» и «-» спинов, заполнены подслои 3s и 3p, а подслоя 3d не заполнен и содержит 5 положительных спинов и 1 отрицательный. Для других ферромагнетиков также характерно наличие внутренних незаполненных электронных слоев. Для железа, никеля и кобальта незаполненными являются 3d подслоя, для лантанидов подслоя 4f.

Наличие внутренних незаполненных слоев в атоме является необходимым, но еще недостаточным условием для возникновения ферромагнетизма. В самом деле, внутренние незаполненные слои мы встречаем не только у ферромагнитных элементов. Например, незаполненные слои имеют атомы марганца, хрома, ванадия, все лантаниды, а между тем марганец, хром и ванадий не ферромагнитны, так же как и лантаниды (за исключением гадолиния, эрбия, диспрозия, тербия, тулия и гольмия). Кроме того, сами атомы ферромагнитного вещества, будучи изолированными друг от друга, не проявляют никаких ферромагнитных свойств.

Ферромагнитные свойства проявляются только ниже некоторой определенной температуры. Как было показано советским физиком Я. И. Френкелем, ферромагнетизм возникает благодаря особому взаимодействию электронов незаполненных слоев между соседними атомами. Такое взаимодействие называется «обменным», ибо взаимодействующие электроны перестают быть связанными с определенными атомами, а и «коллективизируются»! Электрон, принадлежащий первому атому, оказывается принадлежащим также и второму атому и наоборот. Атомы как бы обмениваются электронами. Поэтому такое взаимодействие, называется обменным. Обменное взаимодействие характеризуется так называемым интегралом обмена, который очень сильно зависит от расстояния между атомами в кристаллической решетке. При значительных расстояниях между атомами это взаимодействие равно нулю. С уменьшением расстояния взаимодействие растет: интеграл обмена положителен. При положительном значении интеграла обмена взаимодействие приводит к параллельной ориентации спинов, что в свою очередь ведет к самопроизвольной или спонтанной намагниченности вещества – основного свойства ферромагнетизма. При дальнейшем уменьшении расстояния интеграл обмена, пройдя максимальное значение, начинает убывать и становится отрицательным. При отрицательном значении интеграла обмена спины электронов самопроизвольно устанавливаются антипараллельно друг другу, что приводит к особому

явлению, называемому **антиферромагнетизмом**. Как показали исследования, интеграл обмена положителен, т. е. вещество обладает ферромагнитными свойствами, если отношение диаметра атома к диаметру незаполненной оболочки больше 1,5.

Таким образом, в простейшем случае **ферромагнетиков** все магнитные моменты параллельны друг другу (рис. 1б) и характеризуются большой и нелинейно зависящей от поля намагниченностью (рис. 1а). Кроме ферромагнетиков, среди магнитоупорядоченных веществ отметим **антиферромагнетики** (рис. 1в) и **ферримагнетики** – ферриты (рис. 1г). Магнитное упорядочение, возникающее в некоторых твердых телах (обладающих, конечно, элементарными магнитными моментами), является коллективным явлением и наблюдается обычно лишь в некоторых интервалах внешних параметров, прежде всего температуры.

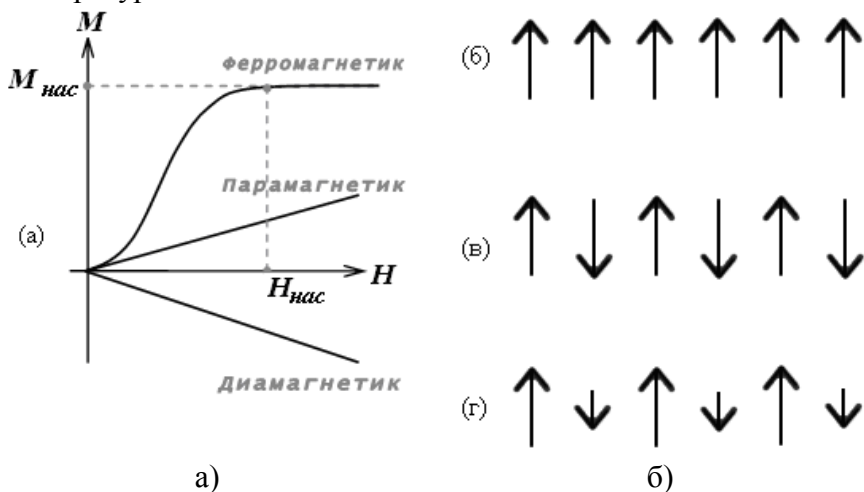


Рисунок 1 - Магнитно-полевые зависимости намагниченности  $M$  для диамагнетиков, парамагнетиков и ферромагнетиков (а) и типы упорядоченного расположения спинов для случаев ферромагнетика (б), антиферромагнетика (в) и ферримагнетика (г)

В заключение отметим, что магнитные свойства вещества определяются как свойствами изолированных атомов, так

и кристаллической решеткой, которую эти атомы образуют при образовании твердого тела. Методические указания к практическим занятиям предназначены для студентов направления 223200.62 «Техническая физика» (профиль подготовки «Физическая электроника») по курсу «Физика магнетизма» и для студентов направления 222900.62 «Нанотехнологии и микросистемная техника» (профиль подготовки «Компоненты микро- и наносистемной техники») по курсу «Основы магнетизма» с целью помочь обучающим закрепить сведения, полученные из лекций и в процессе самостоятельного изучения теоретического материала. Методический материал включает вопросы для практических (семинарских) занятий и задачи для самостоятельной работы по закреплению теоретического материала.

## 2. Вопросы для практических занятий

### Вопросы к занятию по теме "Магнитные свойства атома. Орбитальный и спиновый магнитные моменты".

1. Какие основные виды магнитных материалов существуют?
2. Чем они различаются?
3. Назовите основные носители магнетизма.
4. Опишите основные магнитные характеристики материалов.
5. Опишите основные источники магнетизма в кристаллах.
6. Расскажите о характеристиках магнитного поля  $B$  и  $H$ , в каких единицах они измеряются.
7. Как классифицируются вещества по магнитным свойствам ?
8. Охарактеризуйте 4 квантовых числа, характеризующих свободные атомы.
9. Сформулируйте принцип Паули.
10. Чем определяется магнитный момент изолированного атома ?
11. Рассмотрите заполнение электронных оболочек атомов.

12. Охарактеризуйте намагниченность и восприимчивость вещества.

### **Вопросы к занятию по темам «Диамagnetизм и парамагнетизм»**

1. Объясните физическую природу диамagnetизма атомов с полностью заполненными внутренними оболочками атомов.
2. Перечислите силы, действующие в магнитном поле на электрон, движущийся по орбите.
3. Приведите формулу для частоты Ларморовой прецессии электронной орбиты вокруг вектора магнитной индукции  $B$ .
4. От каких параметров зависит диамagnetная восприимчивость ?
5. Каков вклад свободных электронов в диамagnetную восприимчивость ?
6. Какие элементы обладают диамagnetной восприимчивостью ?
7. Перечислите основные диамagnetетики.
8. Какова физическая природа Ланжевеновского парамагнетизма.
9. Напишите и дайте объяснение классической функции Ланжевена.
10. Напишите и дайте объяснение квантовой функции Ланжевена.
11. Сформулируйте Закон Кюри.
12. Сформулируйте основные положения модели Паули, объясняющей парамагнетизм коллективизированных электронов.
13. Какие элементы обладают парамагнитной восприимчивостью ?

### **Вопросы к занятию по теме «Ферромагнетизм»**

1. Назовите материалы с магнитным упорядочением.
2. Дайте понятие внутреннего молекулярного поля Вейсса.
3. Какова природа молекулярного поля Вейсса ?



4. Сформулируйте закон Кюри-Вейсса для магнитной восприимчивости ферромагнетиков.
5. Объясните суть эксперимента Эйнштейна-де Гааза. О чем свидетельствует полученный в эксперименте результат?
6. Объясните результат эксперимента Дорфмана.
7. На каких предположениях основана модель Гейзенберга?
8. Дайте понятие обменного интеграла.
9. Приведите зависимость обменного интеграла от отношения расстояния между атомами к радиусу недеформированной оболочки ( $d$  или  $f$ ).
10. Дайте иллюстрацию прямого обмена на примере 3d-металлов.
11. Дайте иллюстрацию косвенного обмена на примере редкоземельных металлов.
12. Дайте иллюстрацию косвенного обмена через электроны анионов или сверхобмена на примере гипотетической решетки из 3 ионов.
13. Приведите возможные типы структур с магнитным упорядочением спинов.
14. Какие магнитные материалы являются ферромагнетиками.
15. Дайте определение антиферромагнетиков.
16. Какова природа антиферромагнетизма.
17. Дайте определение температуры Нееля.
18. Приведите закон Кюри-Вейсса для антиферромагнетиков.
19. Рассмотрите графики температурной зависимости восприимчивости антиферромагнетиков ниже и выше температуры Нееля.
20. Приведите примеры антиферромагнетиков.
21. Дайте определение ферримагнетизму.
22. Сформулируйте условие возникновения ферримагнетизма.

23. Температура Кюри и восприимчивость ферромагнетиков.
24. Приведите температурную зависимость восприимчивости в координатах  $\chi=f(T^{-1})$ .

### **Вопросы к занятию по теме «Домены. Доменные стенки»**

1. Укажите причины разбиения ферромагнетика на домены.
2. Дайте определение магнитостатической энергии.
3. Охарактеризуйте энергию доменных границ.
4. При каких условиях закончится процесс распада на домены ?
5. Изобразите доменную структуру с замкнутым магнитным потоком, теоретически предсказанную Ландау и Лифшицем.
6. Опишите основные типы доменных границ ферромагнетиков.
7. Чем доменная граница Блоха отличается от границы Нееля?
8. Назовите порядок энергии и ширины доменной стенки классических ферромагнетиков.
9. Дайте характеристику доменных границ типа «цепочки» и «колючей проволоки».
10. Приведите примеры сложных конфигураций доменов.
11. Дайте характеристику цилиндрических магнитных доменов.
12. Приведите доменные структуры в пленках с перпендикулярной анизотропией.

### **Вопросы к занятию по теме «Механизмы перемагничивания»**

1. Дайте характеристику процесса намагничивания ферромагнетика путем смещения доменных границ.
2. Охарактеризуйте процесс намагничивания ферромагнетика путем вращения намагниченности.

3. Дайте определение техническому намагничиванию и истинному намагничиванию или парапроцессу.

4. В каких случаях реализуется намагничивание путем вращения?

5. Пусть имеется однодоменная частица с одноосной анизотропией. Под каким углом к ОЛН необходимо ориентировать магнитное поле, чтобы получить необратимую ориентацию при наименьшем значении поля?

6. Изобразите теоретические зависимости намагниченности от поля для одноосного ферромагнетика при приложении поля под различными углами к оси легкого намагничивания.

7. Чему равна работа по смещению доменной стенки в поле  $H$ .

8. Чем определяется равновесное положение доменной стенки в поле  $H$ ? Критическое поле для устранения доменных границ?

9. В каком случае требуется большее поле для насыщения намагниченности, если поле приложено под  $90^\circ$  к ОЛН или под меньшим углом?

10. Изобразите кривые намагничивания и перемагничивания для реального ферромагнетика.

11. Изобразите петли гистерезиса ферромагнетика при различных амплитудах магнитного поля.

12. На каких участках кривой намагничивания возникают обратимое и необратимое движение доменных границ.

13. В чем заключается эффект Баркгаузена.

14. Дайте характеристику параметров кривой намагничивания.

15. Изобразите кривые изменения магнитной проницаемости от напряженности поля.

### **Вопросы к занятию по теме «Магнитная анизотропия»**

1. Поясните понятие магнитной анизотропии.

2. Дайте определение оси легкого намагничивания (ОЛН) ферромагнетика.

3. Дайте определение оси трудного намагничивания (ОТН) ферромагнетика.
4. Дайте определение оси антиферромагнетизма.
5. Дайте понятие кристаллографической магнитной анизотропии.
6. Перечислите основные источники магнитной анизотропии.
7. Дайте определение энергии магнитной анизотропии и энергии магнитной кристаллографической анизотропии.
8. Определите понятие констант магнитной анизотропии.
9. Приведите температурные зависимости констант магнитной анизотропии для основных ферромагнетиков.
10. Поясните методику определения констант магнитной анизотропии из кривых намагничивания монокристалла ферромагнетика вдоль осей ОЛН и ОТН.
11. Дайте понятие наведенной магнитной анизотропии.
12. Поясните понятие однонаправленной магнитной анизотропии.
13. Чем определяется подавление магнитокристаллической анизотропии?
14. Что дает модель хаотической анизотропии для нанокристаллических ферромагнетиков?
15. Методы создания наведенной магнитной анизотропии.
16. Пояснить, что такое обменная длина? Чем определяется подавление магнитокристаллической анизотропии?

### **Вопросы к занятию по теме «Магнитострикция»**

1. Дайте определение физическому явлению «Магнитострикция».
2. Охарактеризуйте линейную и объемную магнитострикцию.
3. Каков механизм возникновения магнитострикции ?
4. Дайте определение константы магнитострикции.
5. Охарактеризуйте константы магнитострикции переходных d-металлов.
6. Дайте характеристику магнитострикция редкоземельных металлов и сплавов.

7. Охарактеризуйте магнитную анизотропию, вызванную магнитострикцией.

8. Приведите примеры практического применения магнитострикции.

### **Вопросы к занятию по теме «Динамические процессы намагничивания ферромагнетиков в переменных полях.»**

1. В чем заключается так называемый перминвар - эффект ?  
2. Изобразите перетянутую или двойную петлю гистерезиса для этого случая.

3. Дайте определение магнитному последствию.

4. Чем вызывается магнитное последствие?

5. Как оно зависит от температуры?

6. Охарактеризуйте явление дезаккамадации магнитной проницаемости.

7. Изобразите частотные зависимости действительной и мнимой части комплексной магнитной проницаемости ферритов для случая резонанса и релаксации.

8. Перечислить виды магнитных потерь: вихревые токи, магнитное последствие, размерный резонанс, собственный магнитный резонанс.

9. Охарактеризуйте потери на вихревые токи.

10. Как зависят потери на вихревые токи от частот.

11. Что описывает уравнение Ландау-Лифшица?

12. Что такое размерные потери?

13. Что такое собственный магнитный резонанс.

14. Дайте характеристику динамических свойств ферромагнетиков.

15. Какова динамика доменной структуры.

16. Дайте определение глубины скин-слоя.

17. В чем состоит и какова природа обменного смещения?

### **Вопросы к занятию по теме «Зависимость коэрцитивной силы от размера зерна для поли- и нанокристаллических ферромагнетиков»**

1. Охарактеризуйте микромагнитную структуру мелких частиц.
2. Дайте характеристику микромагнетизма нанокристаллических ферромагнетиков.
3. Изобразите вид зависимости коэрцитивной силы от размера зерен в ферромагнетике?
4. Чем определяется подавление магнитокристаллической анизотропии?
5. Чем определяется внутреннее поле рассеяния в нанокристаллических ферромагнетиках?
6. Что такое обменная длина?
7. Что дает модель хаотической анизотропии для нанокристаллических ферромагнетиков?
8. Перечислите методы создания наведенной магнитной анизотропии.

### 1. Задачи для самостоятельной работы студентов

1. Рассмотреть электрон, движущийся по круговой орбите вокруг ядра с зарядом  $+e$ . Используя формулу для силы Лоренца, получить выражение для силы, действующей на электрон в присутствии магнитного поля  $H_0$  и показать, что круговая частота электрона равна

$$\omega = -\frac{eH}{2mc} \pm \left[ \left( \frac{eH}{2mc} \right)^2 + \frac{e^2}{mr^3} \right]^{1/2}.$$

Оценить величину каждого из слагаемых правой части уравнения и сделать соответствующие приближения для расчета ларморовской частоты.

2. Рассчитать диамагнитную восприимчивость моля газообразного гелия в основном состоянии. Использовать атомную волновую функцию

$$\Psi(r_1, r_2) = \frac{Z'^3}{\pi a_0^3} \exp\left(-\frac{Z'(r_1 + r_2)}{a_0}\right).$$

3. Записать классическую статистическую сумму  $Z$  для электронного газа в виде интеграла и показать, что по классической теории магнитная восприимчивость такого газа равна нулю.
4. Рассмотреть парамагнитный газ, состоящий из одинаковых молекул, в предположении, что каждая молекула обладает постоянным магнитным моментом  $\mu$  и что при наложении магнитного поля  $H$  возможны любые ориентации магнитного момента относительно направления поля. Рассчитать намагниченность в общем случае и в случае, когда выполняется условие  $\mu H/kT \ll 1$ .
5. Показать, что магнитная восприимчивость порошка, состоящего из ориентированных произвольным образом кристаллов, описывается формулой

$$\chi = \frac{1}{3} (\chi_1 + \chi_2 + \chi_3),$$

где  $\chi_1, \chi_2, \chi_3$  - главные восприимчивости кристалла.

6. Исходя из модели молекулярного поля, построить теорию ферромагнетизма полуклассическим путем, т. е. воспользоваться функцией Ланжевена  $L(y)$ . Показать, что для  $T/T_c < 1$  (где  $T_c$  — температура Кюри) состояние, для которого выполняется соотношение  $M(T)/M(0) \neq 0$ , является стабильным.

6. Показать, что в случае  $J = \frac{1}{2} \quad g = 2$  удельная теплоемкость в интервале температур  $0 < T < T_c$  связана со спонтанной намагниченностью соотношением

$$C_{sp} = \frac{\left[ \frac{M(T)}{M(0)} \right]^2 \left\{ 1 - \left[ \frac{M(T)}{M(0)} \right]^2 \right\}}{\frac{T}{T_c} \left\{ \frac{T}{T_c} - \left[ 1 - \left( \frac{M(T)}{M(0)} \right)^2 \right] \right\}}.$$

Исходя из этого, показать, что вблизи точки Кюри ( $T \approx T_c$ )

$$C_{sp} = \frac{3}{2} \left( 3 - \frac{2T_c}{T} \right) Nk.$$

8. Пусть магнитно-мягкий ферромагнетик содержит немагнитные включения в форме сфер радиуса  $r$ , располагающихся в узлах простой кубической решетки с постоянной решетки  $l$ . Когда доменная граница пересекает включение, площадь границы, а следовательно, и ее энергия уменьшаются. Рассчитать начальную магнитную восприимчивость материала, если плоскость  $180^\circ$ -ной границы располагается параллельно поверхности решетки включений.

9. Пусть в магнитном материале имеются внутренние напряжения  $\sigma_i$ , причем  $\lambda_s \sigma_i > 0$ , где  $\lambda_s = \delta l / l$  - магнитострикция насыщения,  $\delta l$  - относительное изменение длины образца в магнитном поле при насыщении. Предположим, что направления приложенного внешнего напряжения  $\sigma$  и магнитного поля  $H$  составляют угол  $\varphi$  с направлением внутренних напряжений  $\sigma_i$ ; распределение внутренних напряжений предполагается однородным в пределах каждого домена. Рассчитать производную  $\partial M_r / \partial \sigma_i$ , где  $M_r$  - остаточная намагниченность, для случая одного домена и для случайного распределения внутренних напряжений в материале.

10. Представьте для кубического кристалла энергию магнитной анизотропии как функцию угла  $\theta$ , т. е. угла отклонения вектора спонтанной намагниченности от оси  $[001]$ , если этот вектор лежит в плоскости  $(210)$ . При этом члены, начиная с  $K_2$ , можно опустить.

11. Какова напряженность поля магнитной анизотропии в том случае, когда направление вектора  $I_s$  близко к оси  $c$  в кобальте, если  $I_s = 1,79$  Тл,  $K_{U1i} = 4,1 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>?

12. Пусть  $q = 3 \cdot 10^{25}$  Дж. Вычислите в модели спиновой пары константу  $/K_1$  магнитокристаллической анизотропии ферромагнетика, имеющего о. ц. к. решетку, если постоянная решетки  $3 \text{ \AA}$ .

13. Как должно выглядеть выражение для энергии анизотропии, если температурное изменение константы анизотропии



пропорционально температурному изменению спонтанной намагниченности? При решении воспользуйтесь теорией Карра.

14. Рассчитайте по теории Нееля отношение констант наведенной магнитной анизотропии, возникающей при охлаждении с магнитном поле монокристаллического образца двойного сплава, представляющего собой твердый раствор с о. ц. к. решеткой, для трех направлений магнитного поля при охлаждении: (100), (110), (111); учтите, что энергия анизотропии измеряется в плоскости (110).

15. Образец двойного сплава, представляющего собой твердый раствор и относящегося к кубической кристаллической системе, охлажден в магнитном поле, направленном по оси [110]. Если определять константу наведенной одноосной магнитной анизотропии путем измерений механического момента в плоскостях (001) и (110), получатся разные значения. Вычислите их отношение для случаев простой кубической, о.ц.к. и г.ц.к. решеток.

16. Пусть при пластической деформации монокристаллического образца двойного сплава, представляющего собой твердый раствор с г.ц. к. решеткой, в результате скольжения по плоскости (111) в направлении  $\mathbf{110}$  создалась деформация скольжения. Напишите выражение для энергии анизотропии в плоскости (111).

17. Пусть в магнетике, обладающем сильной магнитокристаллической анизотропией и характеризующем константами магнитострикции  $\lambda_{100}$  и  $\lambda_{111}$  в размагниченном состоянии имеется только два типа доменов: домены [100] и домены  $\bar{1}00$ . Найдите зависимость относительного растяжения в направлении [010] от величины намагниченности  $I$  при намагничивании в этом направлении.

18. Пусть при насыщении магнитострикция имеет порядок  $10^{-5}$ . Оцените, исходя из этого, порядок величины дипольного взаимодействия  $N1$ .

19. Какова величина магнитострикции по направлениям [100] и [001] при намагничивании до насыщения в поле определенной

величины монокристалла магнетика, характеризуемого константами магнитострикции  $h_1, h_2, h_3$ , если вектор поля лежит в плоскости (001) и составляет с осью [100] угол  $\theta$ ?

20. Получите выражения для энергии магнитных доменов трех типов в случае, когда к магнитному кристаллу кубической системы в направлении [123] приложено растягивающее напряжение  $\sigma$ . Считайте, что  $K_1 > 0$ ,  $\lambda_{100}\sigma \ll K_1$ .

21. Выведите формулу для поверхностной энергии доменной стенки, образующейся в случае, когда к образцу, обладающему изотропной магнитострикцией (константа магнитострикции равна  $\lambda$ ), приложено растягивающее напряжение  $\sigma$ . Считайте, что магнитокристаллической анизотропией можно пренебречь.

22. Найдите  $\gamma_{100}$  и  $\gamma_{110}$  для 180-градусной доменной стенки в веществе, обладающем магнитной анизотропией с константами  $K_1 = 0, K_2 > 0$ .

23. О ферромагнетике, обладающем о.ц.к. решеткой, известно, что  $S = 1/2$ , постоянная решетки составляет 3 А, точка Кюри равна 527 °С. Какова энергия 180-градусной доменной стенки, параллельной плоскости (100), приходящаяся на единицу площади, если константа магнитокристаллической анизотропии  $K_1 = 6 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>3</sup>?

24. Бесконечно длинный х-домен, имеющий форму четырехугольного столбика, окружен у-доменами. Каковы в случае наиболее устойчивой ориентации доменных стенок, окружающих х-домен, внутренние углы четырехугольника, который образуется в перпендикулярном сечении столбика? Считайте, что объем х-домена фиксирован, влиянием магнитострикции можно пренебречь и магнитокристаллическая анизотропия определяется только константой  $K_1$ .

25. Имеется монокристаллическая пластина из ферромагнетика, обладающего одноосной магнитной анизотропией с константой  $K_U$ . Как зависит от  $K_U$  ширина доменов плоскопараллельной конфигурации в следующих двух случаях: 1) легкая ось перпендикулярна поверхности, 2) легкая ось составляет с поверхностью очень малый угол  $\theta$ ? Считайте, что  $I^2/\mu_0 \gg K_U$ .

26. Вычислите ширину доменов в тонкой пластинке из монокристаллического кобальта толщиной 1 см для случая, когда ось с наклонена к кристаллической поверхности под углом  $\theta = 0,1$  (радиан) и  $K_U = 4,1 \cdot 10^5$  Дж/м<sup>3</sup>,  $I_S = 1,8$  Тл,  $\gamma = 1,5 \cdot 10^{-2}$  Дж/м<sup>2</sup>.

27. Какой должна быть величина кристаллических зерен в поликристаллическом железе для того, чтобы каждое зерно обладало однодоменной структурой? Считайте, что кристаллические зерна в целом имеют сферическую форму.

28. На плоской поверхности хаотично рассыпаны микроскопические ферромагнитные частицы игольчатой формы. Определите для совокупности этих частиц отношение остаточной намагниченности к намагниченности насыщения.

29. При измерении начальной магнитной восприимчивости монокристаллического кобальта в направлении оси с получено при комнатной температуре значение  $\chi_a = 20$ , а при изменении в направлении, перпендикулярном оси с,—значение  $\chi_a = 5$ . Какова величина  $\chi_a$  в направлениях, составляющих с этой осью углы  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ? Какую величину имеет  $\chi_a$  поликристаллического кобальта?

30. На плоскости ху в хаотичном беспорядке рассыпаны продолговатые частицы цилиндрической формы, обладающие однодоменной структурой (оси частиц принимают всевозможные направления в указанной плоскости). К частицам прикладывают довольно большое по сравнению с величиной  $H = I_S/4\mu_0$  внешнее магнитное поле, направленное вдоль оси х. Это поле, уменьшаясь, начинает поворачиваться, проходя последовательно направления х, у, -х, -у и снова х. За полный оборот оно снижается до нуля. Каковы в данном случае величина и направление остаточной намагниченности?

31. Магнетик намагничивается в переменном поле, амплитуда которого лежит в рэлеевской области. Как меняется в этом случае средняя магнитная восприимчивость с ростом амплитуды поля?

32. В момент времени  $t = 0$  вектор намагниченности образца, намагниченного до насыщения в направлении  $[010]$  и хранив-

шегося в этом состоянии длительное время, был повернут в направлении [100]. Рассчитайте в предположении о диффузионном последствии дальнейшее изменение магнитной анизотропии во времени при условии, что  $l_c < kT$ .

33. Пусть в некотором объеме, содержащем ферромагнитные микрочастицы игольчатой формы, распределенные более или менее хаотично по направлениям, устанавливается единая ориентация частиц и происходит их намагничивание в данном направлении. После этого в противоположном направлении прикладывается магнитное поле, в первом случае составляющее по величине 98 % от порогового поля  $H_0$ , а во втором 90 % от  $H_0$ . При этом из-за последствий, обусловленного тепловыми флуктуациями, возникает изменение намагниченности. Во сколько раз скорость изменения намагниченности в первом случае больше, чем во втором?

34. Имеется тонкая ферромагнитная пластинка, обладающая удельным сопротивлением  $\rho$ , намагниченностью насыщения  $I_s$  и толщиной  $d$ . Ось легкого намагничивания этой пластинки лежит в ее плоскости. С одной поверхности пластинки в сторону противоположной поверхности со скоростью  $v$  движется 180-градусная доменная стенка, параллельная плоскости пластинки. Найдите зависимость возникающих в этом случае потерь на вихревые токи от положения доменной стенки.

35. Имеется магнетик, который характеризуется следующими величинами: частота релаксации  $1 \cdot 10^8$  Гц, намагниченность насыщения 1 Тл, магнитная анизотропия отсутствует. Какое время необходимо, чтобы в поле  $H_g = -1 \cdot 10^2$  А/м первоначальная намагниченность такого магнетика довернулась от направления, образующего с осью  $+Z$  угол  $60^\circ$ , к направлению, образующему с осью  $+Z$  угол  $120^\circ$ ? Сколько оборотов совершит при этом вокруг оси  $Z$  вектор намагниченности? При решении положите  $g = 2$ .

36. Какое расстояние пройдет после внезапного выключения магнитного поля доменная стенка, двигавшаяся до этого со скоростью 10 м/с? При решении частоту релаксации положите равной  $1 \cdot 10^8$  Гц.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Боков В.А. Физика магнетизма: учеб. пособие для вузов / ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. – СПб.: Невский Диалект: БХВ-Петербург, 2002. – 272 с.
2. С. Тикадзуми. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические приложения. - М., Мир, 1987.– 419 с.
3. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела, - М: Высшая школа, 2000. – 494 с.
4. Кринчик Г.С. Физика магнитных явлений. – М.: Изд-во МГУ, 1985. - 336 с.
5. Вонсовский С.И. Магнетизм. - М., 1971. – 103 2 с.
6. Бозорт Р. Ферромагнетизм. – М.: Изд-во ин. литературы, 1956. - 784 с.
7. Чеченин Н.Г. Основы квантовой физики металлов. Москва, Гл.13. 2004
8. Анималу А.. Квантовая теория кристаллических твердых тел. - М.: Мир, 1981. - с.
9. Белов К.П. Магнотриксционные явления и их технические приложения. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. - 160 с.
10. Постников В.С. Физика и химия твердого состояния. – М.: Металлургия, 1978. – 544 с.
11. Кекало И.Б., Самарин Б.А. Физическое металловедение прецизионных сплавов. – М.: Металлургия, 1989. – 496 с.
12. Чечерников В.И. Магнитные измерения. – М.: МГУ, 1969.- 388 с.
13. Звездин А.К., Котов В.А. Магнитооптика магнитных пленок. – М.: МГУ, 1988. –
14. Котов Е.П., Руденко М.И. Носители магнитной записи. Справочник. – М.: Радио и связь, 1990. – 384 с.
15. Золотухин И.В. Новые направления физического материаловедения: учеб. пособие / И.В. Золотухин, Ю.Е. Калинин, О.В. Стогней - Воронеж: Изд-во ВГУ, 2000. - 360 с.

16. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев - М.: Физматлит, 2009. - 410 с.

17. Гриднев С.А., Калинин Ю.Е., Ситников А.В., Стогней О.В. Нелинейные явления в нано- и микрогетерогенных системах. М.: Бинوم, лаборатория знаний, 2012.- 352 с.

18. Мишин Д.Д. Магнитные материалы. – М.Высшая школа, 1981. – 335 с.

19. Кекало И.Б., Самарин Б.А. Физическое материаловедение прецизионных сплавов. Сплавы с особыми магнитными свойствами. – М.: Металлургия, 1989. – 496 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение в физику магнетизма	1
1. Вопросы для практических занятий	15
2. Задачи для самостоятельной работы студентов	23
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	29

# **ОСНОВЫ МАГНЕТИЗМА**

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению самостоятельных работ  
для обучающихся по направлению 28.03.01 «Нанотехнологии и  
микросистемная техника», профиль «Компоненты микро- и наносистемной  
техники» очной формы обучения

Составитель:

Калинин Юрий Егорович

В авторской редакции

Уч.-изд. л. 1,5.

ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический университет"  
394026 Воронеж, Московский просп., 14