

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список обозначений, сокращений и акронимов	6
Предисловие	8
I. Магнитные свойства. Общая характеристика	9
Введение. Основные магнитные характеристики Восприимчивость диамагнетиков, парамагнетиков, ферромагнетиков и ферримагнетиков. Дифференциальные характеристики.	
Магнитный момент изолированного атома. Правила Хунда. Гамильтониан взаимодействия атомов и молекул с магнитным полем, расщепление уровней. Намагниченность и восприимчивость.	
II. Диамагнетизм	20
Ларморовский диамагнетизм атомов с полностью заполненными внутренними оболочками	
III. Парамагнетизм.	22
Ланжевенский парамагнетизм. Функция Ланжевена. Закон Кюри. Функция Бриллюэна. Парамагнетизм редкоземельных ионов. Парамагнетизм переходных элементов группы железа.	
Природа эффекта замораживания орбитального углового момента. Влияние нецентральности внутрикристаллического поля. Расщепление уровней внутрикристаллическим полем.	
Парамагнетизм Ван Флека. Парамагнитная и диамагнитная восприимчивость электронов проводимости.	
Парамагнетизм Паули. Диамагнетизм Ландау.	
IV. Ферромагнетизм.	32
Внутреннее магнитное поле Вейсса. Закон Кюри-Вейсса. Электростатическая природа поля Вейсса.	
Модель Гейзенберга. Механизмы обмена спинами. Спиновые волны, магноны. Температурная зависимость намагниченности: закон Блоха.	
V. Антиферромагнетизм и ферримагнетизм.	36
Ферримагнетики. Условие ферримагнетизма. Температура Кюри и восприимчивость ферримагнетиков. Закон Кюри для антиферромагнетиков. Температура Нееля. Восприимчивость антиферромагнетиков ниже температуры Нееля.	
VI. Доменная структура.	41
Ферромагнитные домены. Движение границ при намагничивании, эффект Баркгаузена. Параметры кривой намагничивания. Причины образования доменов. Основные компоненты энергии доменов. Границы доменов. Стенки Блоха. Неелевские границы.	
VII. Методы исследования микромагнитных структур.	50
Метод магнитной суспензии (метод порошковых фигур). Магнитооптические методы. Методы просвечивающей электронной микроскопии. Лорентцевская ПЭМ. Электронная голография.	
VIII. Сложные микромагнитные структуры.	63
Страйп-структуры. Цилиндрические магнитные домены. Микромагнетизм одноосных кристаллов. Микромагнитная структура мелких частиц.	
IX. Микромагнетизм нанокристаллических ферромагнетиков.	71
Теория Герцера. Модель хаотической анизотропии. Наведенная магнитная анизотропия. Микромагнитный риппл. Теория Хоффманна. Внутренние поля рассеяния.	
X. Динамика намагничения.	81
Намагничение смещением доменных стенок. Вращение магнитных моментов доменов. Динамические свойства ферромагнетиков. Фактор магнитных потерь. Потери на вихревые токи. Магнитное последствие. Размерный резонанс. Собственный магнитный резонанс. Предел Сноека. Уравнение Ландау-Лифшица. Устойчивая доменная структура в переменных полях.	
XI. Магнитнетизм низкоразмерных структур.	94
Магнитные многослойные системы. Обменное смещение (exchange bias). Обменно-связанные магнитомягкие подслои для сред хранения информации.	
Гигантское магнитное сопротивление. Антиферромагнитная связь. Использование различной коэрцитивности слоев. Обменное смещение-спиновый затвор. Применения GMR.	
Магнитные нанонити (1D системы). Применения.	
XII. Магнитные наноточки (0D системы)	104
Методы получения магнитных наноточек. Метод электрохимического осаждения. Нанолитография с пористой окисью алюминия. Намагниченность наноточек. Теория и численное моделирование микромагнитной структуры наноточек. Теоретическая кривая гистерезиса. Фазовая диаграмма. Магнетизм наночастиц (0D структуры).	
Самоорганизованные суперрешетки магнитных частиц. Магнитные свойства. Суперпарамагнетизм.	
XIII. Спинтроника.	120
Устройства спинтроники.	
Магнитные полупроводники в спинтронике. Переходные металлы в II–VI и III–V полупроводниках. Энергии d-уровней. Обменное взаимодействие между зоной и d-электроном. Замещающий Mn. Полуметаллические ферромагнитные оксиды. Классификация полуметаллов. Методы анализа поляризации. Фотоэмиссия. Магнитные туннельные переходы. Точечный контакт. Сверхпроводящий туннельный переход (метод Тедрова-Месервея). Андреевское отражение в точечном контакте. Эпитаксиальные сплавы Хейслера.	
Инжекция спина и спиновый транспорт в полупроводниковых устройствах спинтроники. Спин-поляризованный полевой транзистор (spin FET).	

XIV. Современные магнитные носители информации.	135
Современные тенденции в развитии накопителей на жестких дисках.	
Магнитооптические носители информации. Недостатки МО-записи.	
Магнитная память произвольной адресации (MRAM). Принцип действия.	
XV. Высокочастотные магнитные устройства.	147
Интегрированные индукторы в РЧ –области. Микроиндукторы для DC-DC конверторов. ВЧ-сенсоры магнитного поля.	
Литература	154
Список основной литературы	154
Список цитированной литературы	154

Список обозначений, сокращений и акронимов.

A - атомный вес

$A=JS^2/a$ – плотность (константа жесткости) обменной энергии

AC (DC) - переменное (постоянное) поле, напряжение, ток.

ВЧ (HF), РЧ (RF), СВЧ- высокие, радио- и сверхвысокие частоты

гцк, гпу, оцк – гранецентрированная кубическая, гексагональная плотноупакованная и объемоцентрированная кубическая (решетки).

ДС, ДГ – доменная структура, граница

(Л)ПЭМ – (лорентцевская) просвечивающая электронная микроскопия

РЗ- редкоземельные (металлы)

ММС – микромагнитная структура

МСМ (СМСМ, ДМСМ) –магнитосиловая (статическая, динамическая) микроскопия

н.т.д. – условия с нормальной температурой и давлением

ФМР –ферромагнитный резонанс

↑↑ –параллельно ориентированные (моменты/спины/..)

↑↓ - антипараллельно ориентированные(моменты/спины/..)

α - направляющий косинус (магнитного момента)

β -силовая постоянная

$\beta = 1/k_B T$

$\gamma = g\mu_B$ - гиромагнитное отношение (IV)

δ - толщина стенок доменов

$\delta_0=(A/K_1)^{1/2}$ -обменная длина (VIII)

λ, Λ - длина свободного пробега

λ_S - константа магнитострикции

μ, μ - магнитный момент диполя (вектор); магнитная проницаемость (скаляр)

$\mu_B = e\hbar/(2m) = 9.27 \cdot 10^{-24} \text{А} \cdot \text{м}^2$ (СИ), $\mu_B = e\hbar/(2mc) = 0.927 \cdot 10^{-20} \text{эрг} \cdot \text{Гс}^{-1}$ (СГСМ) –магнитный момент Бора (I)

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} (\text{Гн м})^{-1}$ (СИ) = 1 (СГСМ) (VI)

ρ - удельное сопротивление [$\rho, \text{мкОмсм}$] = $10^{18}[\rho, \text{с}]$

ρ - также объемная плотность заряда

σ - удельная электропроводность,

σ_0 – поверхностная плотность энергии (стенок доменов)

τ - время жизни, релаксации

χ -магнитная проницаемость

$\Phi(R)$ – межатомный потенциал взаимодействия

$\Phi_0 = h/2e = 2.06783461 \cdot 10^{-15} \text{Вб}$

$a_0 = \hbar^2/me^2 = 0.529 \cdot 10^{-8} \text{см}$ - боровский радиус

$\mathbf{a}_j, \mathbf{b}_j$ – вектора прямой и обратной решеток

\mathbf{B} –вектор магнитной индукции

$B = |\mathbf{B}|$, также модуль всестороннего сжатия,

c -скорость света,

$e \approx 1.6 \cdot 10^{-19} \text{Кл}$ - заряд электрона (абсолютное значение), ($e^2 \approx 1.44 \text{эВ} \cdot \text{нм}$)

E - энергия (электрона);

\mathbf{E} - напряженность электрического поля

\mathbf{H} - напряженность магнитного поля

H – гамильтониан; энтальпия

$\hbar = 1.0546 \cdot 10^{-34} \text{Дж с} \approx 6.6 \cdot 10^{-16} \text{эВ с}$ - постоянная Планка

\mathbf{G} – вектор обратной решетки

F – свободная энергия, сила(f)

G - свободная энергия Гиббса

g – гиромагнитный фактор

g_J – фактор Ланде (I)

$g(E)$ – плотность электронных состояний

$I(I_S)$ – намагниченность (в насыщении)

J – обменный интеграл; интеграл перекрытия; полный угловой момент

\mathbf{j}, j - вектор и величина тока, квантовое число полного орбитального момента,

K_n - константы (кристаллической) анизотропии

\mathbf{k} - волновой вектор

k, k_B - константа Больцмана ($= 1.38 \cdot 10^{-23} \text{Дж/К} \approx 8.6 \cdot 10^{-5} \text{эВ/К}$)

\mathbf{L} - момент сил; орбитальный момент

M – магнитный момент (намагниченность)

M –масса (атома)

$m = 9.109534 \cdot 10^{-31} \text{кг}$ - масса покоя электрона,

n - объемная плотность электронов
 $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$ - число Авогадро
 N_F - размагничивающий фактор
 P, p - угловой момент, давление
 \mathbf{p} - импульс, $p = |\mathbf{p}|$
 \mathbf{q} - (квази)волновой вектор, $q = |\mathbf{q}|$
 $R_H = E_y / H_j_x$ - коэффициент Холла
 \mathbf{S}, S, s - спин; энтропия
 T - температура,
 U - потенциальная, свободная энергия
 U^{eq} - потенциальная энергия в равновесии
 V - объем, потенциал
 W - вероятность (столкновений)