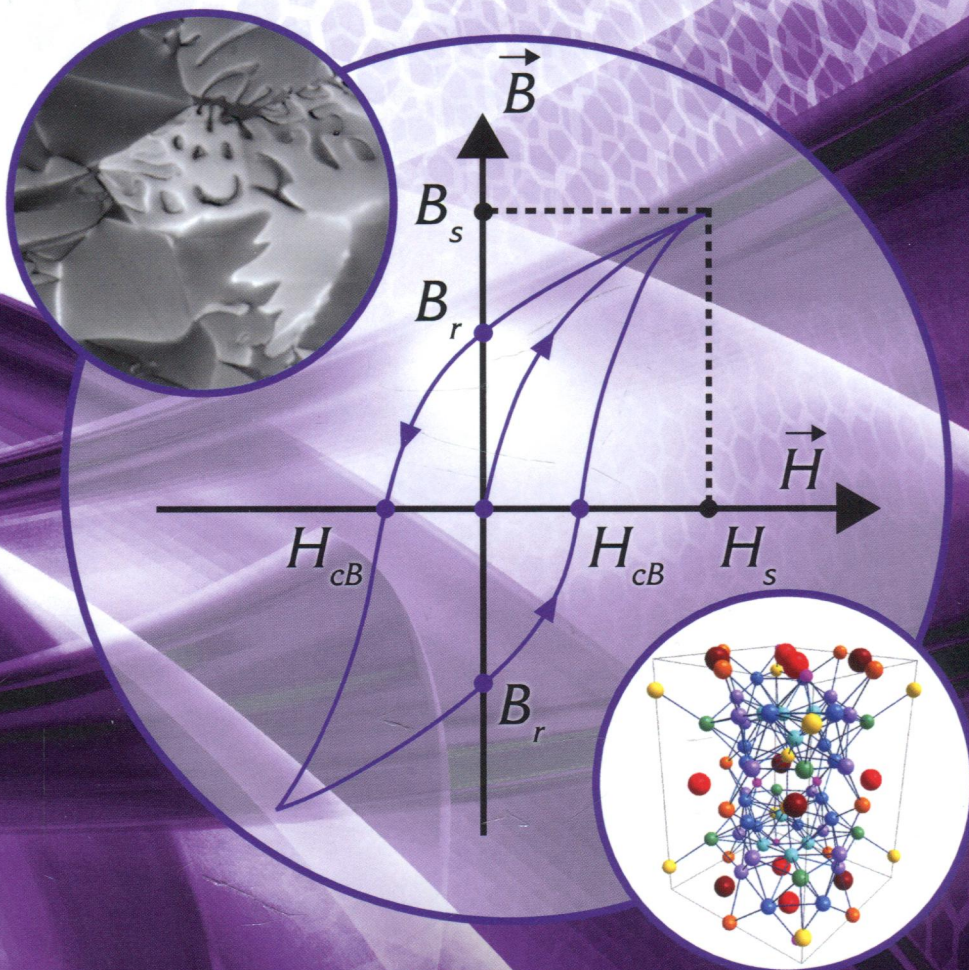


В.П. ПИСКОРСКИЙ, Д.В. КОРОЛЕВ,
Р.А. ВАЛЕЕВ, Р.Б. МОРГУНОВ, Е.И. КУНИЦЫНА



ФИЗИКА И ИНЖЕНЕРИЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

УДК 537.6
ББК 22.334+31.235
Ф50

Рецензенты: главный научный сотрудник лаборатории «Спиновая динамика и спиновый компьютеринг» ИПХФ РАН, академик РАН *А.Л. Бучаченко*; заведующий кафедрой «Динамика, прочность машин и сопротивление материалов» Московского политехнического университета, доктор физико-математических наук *А.А. Скворцов*

Пискорский В.П., Королев Д.В., Валеев Р.А., Моргунов Р.Б., Куницына Е.И.
Ф50 Физика и инженерия постоянных магнитов: учебное пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. – М.: ВИАМ, 2018. – 392 с. : ил.

ISBN 978-5-905217-29-6

В учебном пособии дан анализ современного состояния физики и технологий создания постоянных магнитов. Многообразие технических условий, формирующих энергетическую емкость магнитов, представлено в виде баланса главных факторов: магнитной анизотропии, обменных взаимодействий и деталей зонной структуры магнитов. Приведен учебный материал, описывающий классическую теорию движения доменных стенок и типы магнитного упорядочивания.

Издание предназначено для научных и инженерно-технических работников в области авиационного машиностроения, а также студентов, аспирантов и преподавателей, имеющих отношение к физике магнетизма.

УДК 537.6
ББК 22.334+31.235

ISBN 978-5-905217-29-6

© ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

От издателя	9
Введение	11
Глава 1. Индустрия магнитов – проблемы и достижения	13
1.1. Применение, экономические аспекты и ретроспектива технологий изготовления магнитов	15
1.2. Физические и технические требования к магнитам	17
1.3. Химический и фазовый состав, кристаллическая структура супермагнитов	21
1.3.1. Соединения гомологического ряда $RE_{n+1}TM_{3n+5}B_{2n}$	22
1.3.2. Свойства соединений $RETM_4B$ ($n=1$)	23
1.3.3. Свойства соединения $RE_3Co_{11}B_4$ ($n=2$)	27
1.3.4. Свойства соединения $RE_2Co_7B_3$ ($n=3$)	29
1.3.5. Свойства соединения $RECo_3B_2$ ($n=\infty$)	29
1.3.6. Свойства соединения $RETM_2$	30
1.3.7. Свойства соединения $RETM_3$	36
1.3.8. Свойства соединения $RETM_2B_2$	38
1.4. «Белые пятна» в физике магнитов	39
Литература	42
Вопросы к главе	49
Глава 2. Фундаментальные физические характеристики и процессы, происходящие в редкоземельных магнитах	51
2.1. Взаимодействия, управляющие свойствами постоянных магнитов	68
2.1.1. Диполь-дипольное взаимодействие	68
2.1.2. Спин-орбитальное взаимодействие	72
2.2. Обменные взаимодействия	79
2.2.1. Обменное взаимодействие между магнитными моментами	80
2.2.2. Простые комплексы магнитных частиц. Димеры. Спиновые цепочки и лестницы	87
2.2.3. Спиновые цепочки. Лестничные структуры	94
2.2.4. Дальний магнитный порядок. Пять основных типов магнитных состояний твердых тел	98

2.2.5. Расчет температурной зависимости намагниченности насыщения в приближении молекулярного поля соединений $(RE^1, RE^2)_2(Fe, Co)_4B$ (RE^1 : Nd, Pr; RE^2 : Dy, Gd)	120
2.2.6. Конкуренция обменных взаимодействий магнитных подрешеток	131
2.3. Конкуренция магнитной анизотропии магнитных подрешеток	138
2.4. Магнитные флуктуации и процессы спонтанного размагничивания	148
2.5. Размерные эффекты и размагничивающие факторы	151
Литература	159
Вопросы к главе	163
Глава 3. Атомная и электронная структура магнитов.	165
3.1. Спиновая поляризация и зонная структура в сплавах RE–TM и RE–TM–B	165
3.2. Данные нейтронографии	174
3.3. Мессбауэровская спектроскопия	178
3.4. Механизмы перемагничивания: баланс пиннинга доменных стенок и нуклеации фазы обратной намагниченности	180
3.4.1. Механизм магнитного гистерезиса, обусловленный смещением доменных границ (механизм пиннинга).	183
3.4.2. Механизм магнитного гистерезиса, обусловленный зародышеобразованием фазы обратной намагниченности (механизм нуклеации)	185
3.4.3. Магнитный шум при конкуренции механизмов перемагничивания.	187
3.5. Роль диффузионной подвижности бора в магнитах RE–TM–B.	192
Литература	198
Вопросы к главе	202
Глава 4. Технологии изготовления постоянных магнитов	203
4.1. Критический сравнительный анализ технологий изготовления постоянных магнитов	203
4.1.1. Фазовая диаграмма системы Nd–Fe–B	204

4.1.2. Фазовая диаграмма системы RE–Fe–Co–B	205
4.1.3. Основные технологические операции и их характеристики	206
4.1.4. Технология сплавов-добавок	215
4.2. Технологические факторы усовершенствования магнитов . .	221
4.3. Механические свойства и коррозионная стойкость магнитов.	223
4.4. Многофакторные закономерности управления свойствами магнитов	225
Литература	230
Вопросы к главе	237
Глава 5. Будущее магнитов на основе ансамблей микро- и наночастиц . .	239
5.1. Коэрцитивная сила в композитах магнитных сплавов.	256
5.2. Проблемы ансамблей магнитных микро- и наночастиц. Текстурированные магниты	263
5.3. Приборы наномагнитной логики	272
5.4. Магнитогальванические эффекты. Гигантское магнитосопротивление	277
5.5. Слоистые магнитные гетероструктуры и тонкие пленки на основе сплавов RE–TM–B и RE–TM.	285
Литература	294
Вопросы к главе	297
Глава 6. Методы исследования магнитных свойств	299
6.1. Силовые методы исследования магнитных свойств.	299
6.2. Индукционные методы исследования магнитных свойств . .	301
6.3. СКВИД-магнитометрия.	307
6.4. Магнитно-силовая микроскопия	309
6.5. Влияние скорости развертки поля на измерения	310
6.6. Лабораторный практикум	313
<i>Лабораторная работа № 1</i> Калибровка и аттестация СКВИД-магнитометра	313
<i>Лабораторная работа № 2</i> Контроль временной стабильности магнитотвердых материалов системы RE–TM–B ускоренным методом магнитной вязкости	324

<i>Лабораторная работа № 3</i>	
Контроль максимальной рабочей температуры $T_{\text{раб}}$ магнитотвердых материалов системы Nd–Fe–B	333
<i>Лабораторная работа № 4</i>	
Контроль совершенства текстуры материала радиальных кольцевых магнитов системы Nd–Fe–B	337
<i>Лабораторная работа № 5</i>	
Контроль температурного коэффициента индукции материалов системы Nd–Fe–B	341
<i>Лабораторная работа № 6</i>	
Расчет величины температурного коэффициента индукции в зависимости от состава магнитного материала	345
<i>Лабораторная работа № 7</i>	
Измерение магнитных характеристик постоянного магнита в замкнутой и открытой цепях	348
Литература	355
Приложение	357