

ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.П. Пискорский, Д.В. Королев, Р.А. Валеев,  
Р.Б. Моргунов, Е.И. Куницына

# ФИЗИКА И ИНЖЕНЕРИЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Под общей редакцией  
академика РАН, профессора Е.Н. Каблова

Допущено Федеральным Учебно-методическим объединением  
по укрупненной группе специальностей и направлений  
22.00.00 «Технологии материалов» в качестве учебного пособия  
при подготовке бакалавров, магистров, аспирантов,  
обучающихся по направлению «Материаловедение и технологии материалов»

МОСКВА  
ВИАМ  
2018

УДК 537.6  
ББК 22.334+31.235  
Ф50

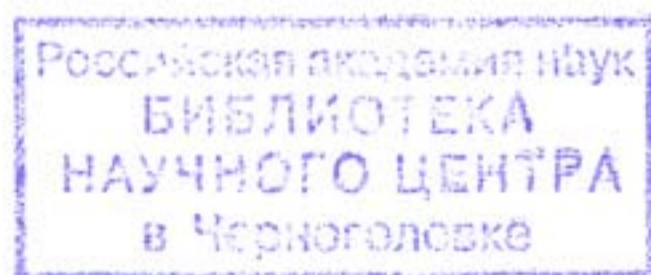
Рецензенты: главный научный сотрудник лаборатории «Спиновая динамика и спиновый компьютеринг» ИПХФ РАН, академик РАН *А.Л. Бучаченко*; заведующий кафедрой «Динамика, прочность машин и сопротивление материалов» Московского политехнического университета, доктор физико-математических наук *А.А. Скворцов*

**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
<b>Глава 1. Индустрия магнитов – проблемы и достижения .....</b>	<b>13</b>
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
<b>Литература</b> .....	<b>42</b>
<b>Вопросы к главе</b> .....	<b>49</b>
<b>Глава 2. Фундаментальные физические характеристики и процессы, происходящие в редкоземельных магнитах .....</b>	<b>51</b>
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 $(RE^1, RE^2)_2(Fe, Co)_{14}B$ ( $RE^1$ : 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
<b>Глава 3. Атомная и электронная структура магнитов.</b> . . . . .	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
<b>Глава 4. Технологии изготовления постоянных магнитов</b> . . . . .	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 ми магнитов . . . . .	225
Литература . . . . .	230
Вопросы к главе . . . . .	237

<b>Глава 5. Будущее магнитов на основе ансамблей микро- и наночастиц.</b> . . . .	239
5.1. Коэрцитивная сила в композитах магнитных сплавов. . . . .	256
5.2. Проблемы ансамблей магнитных микро- и наночастиц. Текстурированные магниты . . . . .	263
5.3. Приборы наноманитной 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

<b>Глава 6. Методы исследования магнитных свойств</b> . . . . .	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–В . . . . .	333
<i>Лабораторная работа № 4</i>	
Контроль совершенства текстуры материала радиальных кольцевых магнитов системы Nd–Fe–В . . . . .	337
<i>Лабораторная работа № 5</i>	
Контроль температурного коэффициента индукции материалов системы Nd–Fe–В . . . . .	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
<b>Литература</b> . . . . .	355
<b>Приложение</b> . . . . .	357