

УДК 621.38 (075.8)

ББК 32.845я73

К289

*Печатается по решению кафедры радиотехнических  
и телекоммуникационных систем Института радиотехнических систем  
и управления Южного федерального университета  
(протокол № 11 от 14 апреля 2021 г.)*

**Рецензенты:**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиоэлектроники  
Донского государственного технического университета *А. В. Елисеев*

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информатики  
и информационных таможенных технологий Ростовского филиала  
Российской таможенной академии *П. Н. Башлы*

**Касьянов, А. О.**

К289 Приборы, устройства и методы функциональной электроники : учебное пособие / А. О. Касьянов ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2021. – 123 с.

ISBN 978-5-9275-3987-1

Излагаются физические основы описания электромагнитных явлений, происходящих в материалах в сверхпроводящем состоянии. Описаны радиофизические измерительные устройства, построенные на эффектах, связанных со сверхпроводимостью. В учебном пособии также рассматриваются элементы физики ЦМД, а именно: дается понятие о доменной границе, рассматриваются возникновение и устойчивость цилиндрических магнитных доменов, критические поля и динамика ЦМД, магнито-статические колебания в ЦМД. И, наконец, в настоящем учебном пособии рассматриваются вопросы экспериментального исследования характеристик твердотельных фильтров СВЧ на поверхностных магнито-статических волнах. Большинство вопросов, подробно рассмотренных в данном пособии, ранее в учебной литературе не рассматривались и освещались лишь в периодических изданиях и трудах научных конференций, которые были практически недоступны студентам.

Целесообразность издания настоящего пособия, имеющего междисциплинарный характер, обусловлена необходимостью обеспечения учебного процесса по образовательным программам бакалавриата и специалитета по дисциплинам «Электроника» и «Специальные радиоэлектронные устройства».

Пособие предназначено для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» и студентов направления подготовки 11.05.02 «Инфокоммуникационные технологии».

УДК 621.38 (075.8)

ББК 32.845я73

ISBN 978-5-9275-3987-1

© Южный федеральный университет, 2021

© Касьянов А. О., 2021

© Оформление. Макет. Издательство

Южного федерального университета, 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ПРИНЯТЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ .....	5
ВВЕДЕНИЕ .....	6
1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В СВЕРХПРОВОДНИКАХ .....	8
1.1. Понятие о сверхпроводимости .....	8
1.2. Бозон .....	8
1.3. Ток сверхпроводимости .....	9
1.4. Элементы квантовой механики. Уравнение Шредингера .....	10
1.4.1. Корпускулярно волновой дуализм .....	10
1.4.2. Уравнение Шредингера. Физический смысл волновой функции	12
1.5. Квантование магнитного потока в сверхпроводящем кольце ...	14
1.6. Сверхпроводящий туннельный ток и эффекты Джозефсона ...	17
1.7. Макроскопическая квантовая интерференция .....	23
1.8. Сквид постоянного тока (ПТ-сквид) .....	24
1.9. Высокочастотный сквид (ВЧ-сквид) .....	27
1.10. Способы увеличения чувствительности сквидов .....	33
1.11. Трансформатор потока .....	33
1.12. Сравнительная характеристика ПТ- и ВЧ-сквидов .....	36
Выводы .....	38
2. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ДОМЕНОВ .....	39
2.1. Магнитные материалы .....	39
2.1.1. Понятие о ЦМД в тонких магнитных пленках .....	39
2.1.2. Доменная структура .....	40
2.1.3. Междоменные границы .....	40
2.2. Цилиндрические магнитные домены .....	42
2.2.1. Магнитные материалы с ЦМД .....	42
2.2.2. Возникновение ЦМД .....	43
2.2.3. Уединенный ЦМД .....	45
2.2.4. Динамика цилиндрического магнитного домена .....	54
2.2.5. Наблюдение и регистрация ЦМД .....	56

## Содержание

2.3. Магнитостатические колебания в ЦМД .....	57
2.3.1. Постановка задачи .....	57
2.3.2. Уравнение движения намагниченности .....	58
2.3.3. Уравнение Эйлера .....	60
2.3.4. Спектр собственных магнитостатических колебаний в ЦМД .....	64
Выводы .....	65
<b>3. ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ФИЛЬТРЫ СВЧ НА</b>	
<b>ПОВЕРХНОСТНЫХ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ .....</b>	<b>67</b>
3.1. Общие сведения о твердотельных устройствах функциональной электроники .....	67
3.2. Полосно-заграждающий фильтр СВЧ на ПМСВ .....	69
3.2.1. Общие сведения .....	69
3.2.2. Конструкция и принцип работы твердотельного полосно-заграждающего фильтра СВЧ на поверхностной МСВ .....	69
3.2.3. Экспериментальное исследование характеристик полосно-заграждающего фильтра СВЧ на поверхностной МСВ .....	71
3.2.4. Методика экспериментального определения добротности фильтра .....	81
3.3. Полосно-пропускающий фильтр СВЧ на ПМСВ .....	83
3.3.1. Конструкция и принцип работы твердотельного полосно-пропускающего фильтра СВЧ на поверхностной МСВ .....	83
3.3.2. Экспериментальное исследование характеристик полосно-пропускающего фильтра СВЧ на поверхностной МСВ .....	85
Выводы .....	89
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>90</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>92</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>95</b>