

УЧЕБНИК ДЛЯ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

**В. Е. Борисенко, А. Л. Данилюк, Д. Б. Мигас**

# СПИНТРОНИКА

2-е издание, электронное

Утверждено

Министерством образования Республики Беларусь  
в качестве учебного пособия для студентов и магистрантов  
учреждений высшего образования по специальностям  
микро- и наноэлектронной техники



Москва  
Лаборатория знаний  
2021

УДК 621.382(075.8)  
ББК 22.31+32.844.1+32.85+32.843я73  
Б82

*Серия основана в 2009 г.*

Рецензенты:

кафедра физической электроники и нанотехнологий  
Белорусского государственного университета,  
чл.-корр. НАН Беларуси д-р ф.-м. н., проф.  
Ф. Ф. Комаров;  
академик НАН Беларуси, д-р ф.-м. н., проф.  
С. В. Гапоненко

**Борисенко В. Е.**

Б82 Спинтроника : учебное пособие / В. Е. Борисенко, А. Л. Данилюк, Д. Б. Мигас. — 2-е изд., электрон. — М. : Лаборатория знаний, 2021. — 232 с. — (Учебник для высшей школы). — Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10". — Загл. с титул. экрана. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-93208-558-5

В данном учебном пособии обобщены теоретические представления и фундаментальные закономерности явлений, лежащих в основе спинтроники. Также рассмотрены принципы функционирования и конструкции спинтронных элементов и систем для обработки информации. Издание подготовлено на основе материала курса лекций и практических занятий, проводимых по дисциплине «Спинтроника» для студентов первой ступени высшего образования и магистрантов, обучающихся по специальностям «Микро- и наноэлектронные технологии и системы», «Квантовые информационные системы», «Нанотехнологии и наноматериалы (в электронике)» в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники.

Для студентов и магистрантов учреждений высшего образования по специальностям микро- и наноэлектронной техники, а также для всех интересующихся новейшими материалами и электронными технологиями.

УДК 621.382(075.8)  
ББК 22.31+32.844.1+32.85+32.843я73

**Деривативное издание на основе печатного аналога:** Спинтроника : учебное пособие / В. Е. Борисенко, А. Л. Данилюк, Д. Б. Мигас. — М. : Лаборатория знаний, 2017. — 229 с. : ил. — (Учебник для высшей школы).

ISBN 978-5-906828-49-1.

**В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации**

ISBN 978-5-93208-558-5

© Лаборатория знаний, 2017

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Об авторах</b> .....	<b>5</b>
<b>Введение</b> .....	<b>7</b>
<b>Глава 1. Спин электронов, ядер и атомов</b> .....	<b>10</b>
1.1. Спин квантовых частиц .....	10
1.2. Разрешенные энергетические состояния электронов в твердом теле .....	14
1.3. Обменное взаимодействие .....	17
1.4. Спин-орбитальное взаимодействие .....	22
1.5. Электронно-ядерное спиновое взаимодействие .....	26
1.6. Взаимосвязь между спиновыми взаимодействиями и магнитными свойствами твердых тел .....	29
<b>Глава 2. Магнитные и спиновые свойства объемных материалов, тонких пленок и наноразмерных частиц</b> .....	<b>37</b>
2.1. Классификация материалов по их магнитным свойствам .....	37
2.2. Параметры, характеризующие магнитные и спиновые свойства материалов ..	44
2.3. Магнитные проводящие материалы .....	48
2.4. Магнитные полупроводники .....	50
2.5. Диэлектрики .....	55
2.6. Тонкие пленки магнитных материалов .....	58
2.7. Наноразмерные частицы из магнитных материалов .....	62
<b>Глава 3. Спиновые эффекты в твердотельных структурах</b> .....	<b>70</b>
3.1. Гигантское магнитосопротивление .....	70
3.2. Туннельное магнитосопротивление .....	76
3.3. Передача спинового момента от свободных носителей заряда магнитным атомам .....	83
3.4. Спиновый эффект Холла .....	86
3.5. Тепловые спиновые эффекты .....	90
3.6. Эффект Кондо .....	97
<b>Глава 4. Инжекция спин-поляризованных носителей заряда в твердотельные структуры</b> .....	<b>102</b>
4.1. Инжекция через невыпрямляющий контакт .....	103

4.2. Туннелирование через потенциальный барьер . . . . .	109
4.3. Спиновая фильтрация носителей заряда с использованием низкоразмерных структур . . . . .	113
<b>Глава 5. Перенос спин-поляризованных носителей заряда в полупроводниках . . . . .</b>	<b>116</b>
5.1. Изменение ориентации спина электронов по механизму Эллиотта–Яфета . . . . .	117
5.2. Изменение ориентации спина электронов по механизму Дьяконова–Переля . . . . .	122
5.3. Изменение ориентации спина электронов по механизму Бира–Аронова–Пикуса . . . . .	124
5.4. Изменение ориентации спина электронов в результате их сверхтонкого взаимодействия с ядрами атомов . . . . .	127
5.5. Эффективность проявления механизмов релаксации спина электронов в полупроводниках . . . . .	133
5.6. Особенности релаксации спина электронов в низкоразмерных структурах . . . . .	138
<b>Глава 6. Определение спиновых характеристик свободных носителей заряда в твердотельных структурах . . . . .</b>	<b>143</b>
6.1. Оптические методы . . . . .	143
6.2. Электрические методы . . . . .	156
<b>Глава 7. Элементы обработки информации на спиновых эффектах . . . . .</b>	<b>163</b>
7.1. Датчики магнитных полей . . . . .	163
7.2. Считывающая магнитная головка на эффекте гигантского магнитосопротивления . . . . .	168
7.3. Спиновые транзисторы . . . . .	169
7.4. Энергонезависимая память на эффекте гигантского магнитосопротивления . . . . .	179
7.5. Энергонезависимая память на основе спин-зависимого туннелирования . . . . .	181
7.6. Спиновая логика . . . . .	188
<b>Глава 8. Квантовая обработка информации с использованием спинов ядер атомов и электронов в твердотельных структурах . . . . .</b>	<b>193</b>
8.1. Основы квантовой обработки информации . . . . .	194
8.2. Квантовый бит информации . . . . .	195
8.3. Квантовый компьютер . . . . .	201
8.4. Материалы элементов для квантовой обработки информации на спинах электронов и ядер атомов . . . . .	204
8.5. Элементы для квантовой обработки информации на спинах ядер атомов . . . . .	210
8.6. Элементы для квантовой обработки информации на спинах электронов в квантовых точках . . . . .	216
<b>Рекомендуемая литература . . . . .</b>	<b>223</b>
<b>Обозначения и величины наиболее часто встречающихся фундаментальных констант . . . . .</b>	<b>224</b>
<b>Предметный указатель . . . . .</b>	<b>225</b>