

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра микро- и наноэлектроники

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Методические указания
для студентов специальности I-41 01 02
«Микро- и наноэлектронные технологии и системы»
заочной и дистанционной форм обучения

Минск 2006

УДК 621.315+621.38(075.8)

ББК 32.85 я 73

М 33

Рецензент:

ст. преподаватель кафедры радиоэлектронных средств БГУИР

Н.А. Смирнова

Составители:

С.Н. Кураева, Е.А. Уткина

М 33 I-41 01 02 «Микро- и нанoeлектронные технологии и системы» заочной и дистанционной форм обуч./ Сост. С.Н. Кураева, Е.А. Уткина. – Мн.: БГУИР, 2006. – 24 с.: ил.

В методических указаниях обобщены сведения об основных свойствах материалов микро- и нанoeлектроники. Рабочая программа по данной дисциплине дополнена методическими указаниями к ней, а также к курсу МЭТ приводится тематический перечень лабораторных и курсовых работ; контрольные вопросы и задания сопровождаются соответствующими задачами. Составлен перечень контрольных вопросов и задач по основным разделам курса.

Предназначены для студентов вузов заочной и дистанционной форм обучения по специальности I-41 01 02 и «Микро- и нанoeлектронные технологии и системы».

УДК 621.315+621.38(075.8)

ББК 32.85 я 73

© Кураева С.Н., Уткина Е.А., 2006

© БГУИР, 2006

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ.....	5
1.1. Цель изучения дисциплины	5
1.2. Задачи изучения дисциплины	5
1.3. Предмет и содержание дисциплины.....	5
1.4. Государственные стандарты	5
1.5. Место дисциплины МЭТ в ряду дисциплин, изучаемых студентами специальности I-41 01 02 «Микро- и нанoeлектронные технологии и системы»	6
1.6. Значение дисциплины МЭТ для инженеров электронной техники	6
2. РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЕЁ РАЗДЕЛАМ.....	7
2.1. Введение.....	7
2.2. Физические процессы в диэлектриках и их свойства.....	7
2.2.1. Поляризация диэлектриков	7
2.2.2. Физико-механические, химические и радиационные свойства диэлектриков.....	7
2.3. Диэлектрические материалы.....	7
2.3.1. Органические диэлектрические материалы	8
2.3.2. Неорганические диэлектрические материалы.....	8
2.3.3. Активные диэлектрики	8
2.3.4. Диэлектрики для микро- и нанoeлектроники.....	8
2.4. Проводники.....	9
2.4.1. Основные свойства проводниковых материалов	9
2.4.2. Материалы высокой проводимости	9
2.4.3. Материалы высокого удельного сопротивления	9
2.4.4. Проводниковые материалы в микроeлектронике	9
2.5. Полупроводники.....	9
2.5.1. Основные свойства полупроводников.....	9
2.5.2. Полупроводниковые материалы	10
2.6. Магнитные материалы	10
2.6.1. Основные свойства магнитных материалов.....	10
2.6.2. Магнитомягкие материалы.....	10
2.6.3. Магнитотвердые материалы.....	10
2.6.4. Магнитные материалы в микро- и нанoeлектронике.....	10
2.7. Материалы квантовой eлектроники и оптоeлектроники.....	11
2.7.1. Материалы для лазеров	11
2.7.2. Жидкие кристаллы, люминофоры, стекловолоконистые структуры.....	11
2.8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	11
3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КУРСА МЭТ.....	11
3.1. Методические указания к разделу «Диэлектрики».....	11

3.2. Методические указания к разделу «Полупроводники».....	12
3.3. Методические указания к разделу «Проводники».....	14
3.4. Методические указания к разделу «Магнитные материалы»	15
4. ПЕРЕЧЕНЬ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ.....	16
5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	16
6. ЗАДАЧИ.....	20
7. КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ.....	19
8. ЦЕЛЬ КУРСОВОЙ РАБОТЫ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЕЕ ВЫПОЛНЕНИЮ	21
9. ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ КУРСОВЫХ РАБОТ	22
ЛИТЕРАТУРА.....	23

Библиотека БГУИР

I. ВВЕДЕНИЕ

Основные направления экономического и социального развития Республики Беларусь на 2005–2010 годы в качестве приоритетных направлений развития национальной науки предусматривают ускорение научно-технического прогресса в области наукоемких информационных технологий, осуществление которого невозможно без внедрения новых материалов.

Для получения новых материалов совершенно необходимы глубокие знания основных физико-химических свойств материалов электронной техники, способов их получения, а также применения в микро- и наноэлектронике. Этому способствует курс «Материалы электронной техники» (МЭТ).

1.1. Цель изучения дисциплины

Целью изучения дисциплины является приобретение глубоких знаний по теоретическим основам материаловедения, изучение основных свойств материалов и их классификации.

1.2. Задачи изучения дисциплины

Задачей дисциплины является изучение основных свойств 4-х групп материалов: диэлектриков, полупроводников, проводников и магнитных материалов. Анализ влияния размерных эффектов на свойства материалов и их функциональные характеристики.

1.3. Предмет и содержание дисциплины

В дисциплине МЭТ изучаются материалы, их свойства по отношению к электромагнитному полю и применение в изделиях современной электронной техники, в частности в области микро- и наноэлектроники.

В зависимости от реакции на внешнее электрическое поле все вещества подразделяются на три группы: диэлектрики, полупроводники и проводники. Особыми свойствами обладают материалы с низкими размерными характеристиками в диапазоне от 1 до 10 нм.

При взаимодействии веществ с магнитным полем проявляются магнитные свойства. Различные магнитные свойства позволяют подразделять вещества на пять подгрупп: диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики.

1.4. Государственные стандарты

При изучении курса МЭТ необходимо пользоваться следующими государственными терминологическими стандартами:

ГОСТ 19880-74 «Электротехника. Основные понятия, термины и определения».

ГОСТ 1494-77 «Электротехника. Буквенные обозначения основных величин».

ГОСТ 8.417-81 «Единицы физических величин».

К этому ГОСТу разработан руководящий нормативный документ РД-50-160-79 «Методические указания. Внедрение и применение СТ СЭВ 1052-78».

ГОСТ 22622-77 «Материалы полупроводниковые. Термины и определения основных электрофизических параметров».

ГОСТ 21515-76 «Материалы диэлектрические. Термины и определения».

ГОСТ 22265-76 «Материалы проводниковые. Термины и определения».

ГОСТ 19693-74 «Материалы магнитные. Термины и определения».

1.5. Место дисциплины МЭТ в ряду дисциплин, изучаемых студентами специальности I-41 01 02 «Микро- и наноэлектронике технологии и системы»

Курс МЭТ базируется на знаниях, которые студенты приобрели, изучая математику, физику, химию, квантовую механику и статистическую физику, физику твердого тела, теоретические основы электротехники и радиотехники.

При изучении дисциплины необходимо понять различие свойств материалов в массивном и тонкопленочном виде.

1.6. Значение дисциплины МЭТ для инженеров электронной техники

Для студентов специальности I-41 01 02 и инженеров электронной техники знание дисциплины МЭТ необходимо как при изучении последующих курсов, так и для будущей инженерной деятельности.

Изделия электронной техники изготавливаются на основе материалов, в которых используется эффект взаимодействия с электромагнитным полем.

Для рационального использования изделий электронной техники необходимо знать свойства материалов, влияние на них внешних факторов, умение выбрать тот или иной материал для работы в конкретных условиях, роль размерных эффектов при создании современных функциональных устройств микро- и наноэлектроники.

При изучении дисциплины МЭТ у студентов формируется научное мировоззрение, которое устанавливает причинно-следственные связи между явлениями: так, в курсе устанавливается связь между основными свойствами материалов, их составом и структурой, а также показаны причины, вызывающие изменение этих свойств в процессе эксплуатации под действием различных внешних факторов.

2. РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЕЁ РАЗДЕЛАМ

2.1. Введение

Задачи и содержание дисциплины. Классификация и требования к материалам.

Основные сведения о развитии науки, материалах и их промышленном производстве в нашей стране и за рубежом. Передовая роль ученых в создании новых материалов и комплектующих изделий. Требования, предъявляемые к материалам в связи с дальнейшей миниатюризацией и интеграцией изделий электронной техники. Нанoeлектроника и ее роль в изучении свойств материалов. Общая классификация материалов.

2.2. Физические процессы в диэлектриках и их свойства

2.2.1. Поляризация диэлектриков

Основные виды поляризации. Зависимость свойств материалов от вида поляризации. Электропроводность диэлектриков. Комплексная диэлектрическая проницаемость. Поляризация диэлектриков в переменном электрическом поле. Диэлектрические потери. Основные виды диэлектрических потерь. Зависимость $tg\delta$ от воздействия внешних факторов (температуры, частоты, напряженности электрического поля). Электрическая прочность диэлектриков. Физико-механические свойства диэлектриков. Особенности свойств тонкопленочных диэлектриков. Микропробой и электрическая прочность тонких пленок.

2.2.2. Физико-механические, химические и радиационные свойства диэлектриков

Отношение диэлектриков к влаге. Гигроскопичность и влагопроницаемость диэлектриков. Влажность материалов. Тепловые свойства диэлектриков. Теплопроводность. Линейное расширение. Понятие температурного коэффициента линейного расширения. Механические свойства диэлектриков. Химические свойства диэлектриков. Радиационные свойства диэлектриков.

2.3. Диэлектрические материалы

Различные принципы классификации диэлектрических материалов. Классификация по химической природе – на органические и неорганические материалы. Классификация по возможности управления свойствами при

воздействию внешних факторов на пассивные и активные диэлектрические материалы. Классификация по значению тангенса угла диэлектрических потерь на высокочастотные и низкочастотные материалы.

2.3.1. Органические диэлектрические материалы

Полиэтилен, полистирол, фторопласт, полиимиды, полиэфирные смолы, эпоксидные смолы, эластомеры. Композиционные порошковые пластмассы. Состав, свойства, использование в изделиях электронной техники

2.3.2. Неорганические диэлектрические материалы

Классификация неорганических диэлектрических материалов. Керамика и стекло. Установочная керамика. Конденсаторная керамика. Электровакуумные стекла. Ситаллы. Состав, основные свойства, применение в электронной технике.

2.3.3. Активные диэлектрики

Классификация активных диэлектриков. Сегнетоэлектрики. Механизм спонтанной поляризации. Пьезоэлектрики. Электреты. Активированные диэлектрики для твердотельных лазеров. Состав, получение, основные свойства, использование в диэлектрических приборах.

2.3.4. Диэлектрики для микро- и наноэлектроники

Основные требования, предъявляемые к диэлектрикам, которые используются в микроэлектронике. Материалы тонкопленочных гибридных интегральных микросхем:

- материалы для подложек;
- материалы для межслоевой изоляции;
- материалы для тонкопленочных конденсаторов;
- материалы для защитного покрытия интегральных схем.

Материалы для толстопленочных гибридных интегральных микросхем:

- материалы для подложек;
- материалы для толстопленочных конденсаторов;
- материалы для межслоевой изоляции;
- материалы для защитного покрытия интегральных схем.

Влияние размерных эффектов на свойства материалов. Особенности использования диэлектриков в наноэлектронике.

2.4. Проводники

2.4.1. Основные свойства проводниковых материалов

Природа электропроводности металлов и ее связь с надежностью изделий электронной техники. Удельное сопротивление металлов и сплавов. Термоэлектрические свойства проводников. Температурный коэффициент линейного расширения. Особенности свойств металлов в тонких слоях.

2.4.2. Материалы высокой проводимости

Медь, алюминий, серебро, золото. Сплавы на основе меди и алюминия. Сверхпроводящие материалы.

2.4.3. Материалы высокого удельного сопротивления

Материалы высокого удельного сопротивления. Материалы для резисторов; сплавы для термопар, для нагревательных приборов.

2.4.4. Проводниковые материалы в микроэлектронике

Материалы высокой проводимости: алюминий, медь, золото, серебро. Основные требования, предъявляемые к этим материалам в микроэлектронике. Проводники тока, металлизация на основе этих материалов. Основные требования, предъявляемые к электродным материалам в микроэлектронике. Элементы для основы электродных сплавов. Электродные сплавы для *p-n*- переходов. Электродные сплавы для омических контактов. Электроды для тонкопленочных конденсаторов. Металлы с высоким удельным сопротивлением. Сплавы с высоким удельным сопротивлением. Керметы. Основные требования, предъявляемые к этим материалам.

2.5. Полупроводники

2.5.1. Основные свойства полупроводников

Собственные и примесные полупроводники. Основные и неосновные носители заряда. Температурная зависимость концентрации носителей заряда. Механизмы рассеяния и подвижность носителей заряда в полупроводниках. Температурная зависимость удельной проводимости полупроводников. Неравновесные носители заряда и механизмы рекомбинации. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках. Термоэлектрические явления и эффект Холла в полупроводниках. Электропроводность полупроводников в сильном электрическом поле.

2.5.2. Полупроводниковые материалы

Требования, предъявляемые к современным полупроводниковым материалам, которые используются в электронной технике, микро- и наноэлектронике. Германий, кремний, их основные свойства. Методы получения, очистка, применение. Полупроводниковые пленки. Основные свойства соединений материалов группы $A^{III}B^V$ (арсенид галлия, арсенид индия, антимонид фосфора, антимонид галлия, нитрид бора, арсенид бора). Применение этих материалов в электронной технике. Основные свойства соединений материалов группы $A^{II}B^{VI}$ (теллуриды свинца, ртути, кадмия; сульфиды свинца, ртути, кадмия; селениды свинца, ртути, кадмия). Карбид кремния, его основные свойства, методы получения, применение в электронной технике. Аморфные полупроводники.

2.6. Магнитные материалы

2.6.1. Основные свойства магнитных материалов

Классификация веществ по магнитным свойствам. Возникновение магнитных свойств. Доменная структура, магнитная анизотропия, температура Кюри, влияние внешнего магнитного поля, гистерезис, процессы намагничивания, кривая технического намагничивания, магнитные потери.

2.6.2. Магнитомягкие материалы

Общая характеристика и требования, предъявляемые к этой группе материалов. Технически чистое железо. Электротехнические стали. Пермаллой, магнитодиэлектрики. Антиферромагнетики. Магнитомягкие ферриты. Применение их в деталях электронной техники.

2.6.3. Магнитотвердые материалы

Общая характеристика и требования, предъявляемые к этой группе материалов. Сплавы на основе благородных и редкоземельных металлов. Ленты для магнитной записи. Состав, свойства, применение в деталях электронной техники.

2.6.4. Магнитные материалы в микро- и наноэлектронике

Тонкие ферромагнитные пленки. Материалы для устройств на цилиндрических магнитных доменах (ЦМД), их основные свойства. Применение ферромагнитных пленок в современных устройствах записи и хранения информации.

2.7. Материалы квантовой электроники и оптоэлектроники

2.7.1. Материалы для лазеров

Материалы для газовых, жидкостных и твердотельных лазеров (газовые смеси, органические красители, неорганические кристаллы, полупроводниковые химические соединения). Основные свойства, способы получения, применение в электронной технике.

2.7.2. Жидкие кристаллы, люминофоры, стекловолоконистые структуры

Окисные пленки металлов. Стекловолоконистые материалы, люминофоры, жидкие кристаллы. Основные свойства, получение, способы применения в деталях электронной техники.

2.8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные тенденции в развитии производства и применения материалов в микро- и нанoeлектронике. Методика дальнейшего изучения материалов электронной техники в период обучения в вузе и на производственной практике.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КУРСА МЭТ

3.1. Методические указания к разделу «Диэлектрики»

Этому разделу соответствует литература [1,2].

Для того чтобы было легче запомнить материал этого раздела, рекомендуем изучить классификацию диэлектрических материалов. Затем необходимо разобраться в более частной классификации на органические и неорганические диэлектрические материалы. Изучить неполярные полимеры [1, 2]. Обратит внимание, что электрические свойства этих материалов очень близки. В них происходит только электронная поляризация, это определяет все их свойства. Так как они имеют малый тангенс угла диэлектрических потерь, их применяют в высокочастотной технике для изготовления конденсаторов, кабелей и изоляционных установочных изделий.

Затем необходимо изучить полярные органические материалы, которые также имеют линейную структуру, но из-за полярности тангенс угла диэлектрических потерь у них в 100 раз больше, чем у неполярных полимеров.

Все прочие органические материалы имеют еще больший тангенс угла диэлектрических потерь и применяются при изготовлении аппаратуры для самых различных целей (пресс-порошки, пропитанные вещества, компаунды, клеи, лаки и т.д.).

При изучении неорганических диэлектрических материалов необходимо помнить, что они подразделяются на монокристаллические и поликристаллические вещества, на природные и получаемые искусственным способом.

При изучении керамики рекомендуем обратиться к ГОСТ 5456-75 «Материалы керамические радиотехнические», освоить принцип классификации радиотехнической керамики, принятый в этом ГОСТе, и соответственно на производстве.

При изучении сегнетоэлектрических материалов следует уяснить вопросы их доменной структуры, нелинейной зависимости диэлектрической проницаемости от напряженности поля. Необходимо понять, почему их называют управляемыми материалами и с какой целью их применяют в микроэлектронике и электронно-вычислительной технике. Особое внимание надо сосредоточить на изучении пьезоэлектриков (монокристалл кварца) и пьезокерамики. Кроме хорошо известных кварцевых пьезоэлементов, сейчас применяют пьезокерамические элементы в качестве резонаторов, трансформаторов, модуляторов и т.д. Тем, кто по условиям работы имеет отношение к применению пьезоэлектриков, рекомендуем ознакомиться с ГОСТ 18669-73. Резонаторы пьезоэлектрические. Термины и определения.

3.2. Методические указания к разделу «Полупроводники»

Этому разделу программы соответствует материал, изложенный в [1,5,6,8].

При изучении раздела «Полупроводниковые материалы» необходимо обратить внимание на следующие вопросы:

1. Какие вещества называются полупроводниками?

Полупроводниками называются вещества, которые по величине удельной проводимости занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Удельная проводимость полупроводниковых материалов лежит в диапазоне от 10^6 до 10^{-8} См/м, что соответствует удельному электрическому сопротивлению от 10^{-6} до 10^8 Ом·м. Удельная проводимость полупроводниковых материалов резко зависит от температуры, освещения, облучения и других внешних факторов.

2. Какие свойства полупроводников являются наиболее важными?

К наиболее важным свойствам полупроводниковых материалов относятся удельная электропроводность, концентрация электронов и дырок, ширина запрещенной зоны, энергия активации донорных и акцепторных примесей, температурные коэффициенты удельной проводимости и удельного сопротивления, коэффициенты диффузии электронов и дырок, диффузионная длина, подвижность носителей, температура плавления и др.

В ряде случаев специального применения добавляются другие свойства, которые характеризуют полупроводник с точки зрения конкретного применения. К ним относятся коэффициент термоэлектродвижущей силы и

коэффициент термоэлектрического эффекта, коэффициент Холла.

3. Какие полупроводниковые материалы используются в настоящее время в электронной технике?

В настоящее время в электронной технике используются две группы материалов:

1. Простые химические элементы.
2. Сложные химические соединения.

Полупроводники – простые химические элементы.

Полупроводниковыми свойствами обладает ряд простых химических элементов: *B, C, Si, P, S, Ge, As, Se, Sb, Te, J*. Из них в элементарном виде используются только *Ge, Si* и *Se*, которые образуют группу простых полупроводников. Остальные полупроводниковые элементы используются как составные части полупроводниковых соединений.

Среди сложных полупроводниковых соединений наибольшее значение в микроэлектронике имеют полупроводники типа $A^{III}B^Y$, $A^{IV}B^{IV}$, $A^{II}B^{VI}$.

Из соединений группы $A^{III}B^Y$ в настоящее время в электронной технике используются арсениды (*GaAs, InAs, AlAs, BaAs*), антимониды (*InSb, AlSb, GaSb, BSb*), фосфиды (*GaP, InP, AlP, BP*) и нитриды (*GaN, InN, AlN, BN*).

Между собой, а также с германием и кремнием эти соединения образуют твердые растворы, в которых можно в определенном диапазоне изменять ширину запрещенной зоны и подвижность электронов.

Важнейшим полупроводниковым соединением из этой группы в настоящее время является арсенид галлия *GaAs*, который по значению уступает только *Ge* и *Si*. Арсенид галлия имеет более широкую область применения, чем германий и кремний (частота до 10^{11} Гц, рабочая температура *p-n*- переходов до 125°C).

Перспективным материалом является соединение типа $A^{IV}B^{IV}$ карбид кремния. Он имеет большую ширину запрещенной зоны $\Delta E \approx 3\text{эВ}$ и в монокристаллическом состоянии является подходящим материалом для изготовления высокотемпературных приборов (рабочая температура *p-n*- переходов - 150°C).

Соединения типа $A^{II}B^{VI}$ (*PbS, PbSe, PbTe, CdSe*) используются главным образом для изготовления фоторезисторов и солнечных батарей.

В настоящее время широкое распространение получили аморфные полупроводники. Атомы в аморфных полупроводниках расположены не совсем хаотически, а в определенной закономерности. Однако степень их упорядоченности значительно меньше, чем в кристаллах. Интерес к аморфным полупроводникам особенно возрос в последнее десятилетие, после того как были открыты некоторые явления, позволяющие их применять, а именно эффекты переключения и памяти.

Из бинарных материалов к этой группе относятся: *As₂S₃, As₂Te₃, AsSe₂* и материалы составов *Ge-Se, Ge-Te*.

3.3. Методические указания к разделу «Проводники»

Этому разделу соответствуют литературные источники [1,2,4,8].

Особое внимание следует обратить на изучение основных свойств проводниковых материалов - удельного электрического сопротивления, температурного коэффициента удельного электрического сопротивления, теплопроводности, термоЭДС. При изучении сплавов металлов необходимо понять, как влияет на величину удельного сопротивления процентное соотношение компонентов.

Изучая механические свойства металлов, надо усвоить механические характеристики металлов: твердость, предел упругости, предел текучести, предел прочности и т.д.

Вопрос об электрических свойствах металлов нужно увязать со сведениями об их строении. Так, ссылка на кристаллическую структуру металлов позволяет объяснить, почему наличие примесей, нарушающих кристаллическую решетку, приводит к значительным изменениям электрических и механических характеристик металлов. Необходимо понять, каким образом нарушение структуры кристаллической решетки позволяет объяснить возрастание электрического сопротивления проводника с ростом температуры.

При изучении этого раздела необходимо уяснить, какие материалы относятся к группе материалов высокой проводимости и высокого удельного сопротивления, а также обратить внимание на то, какие требования предъявляются к материалам высокой проводимости и высокого удельного сопротивления в массивном и тонкопленочном виде.

При изучении раздела «Материалы высокой проводимости в микроэлектронике» необходимо обратить внимание на создание сложной системы соединений на сравнительно небольшой площади, которая необходима при создании БИС.

Эта сложная система соединений осуществляется с помощью многослойной коммутации. Технология многослойной коммутации состоит в последовательном нанесении токопроводящих и изолирующих пленок и придании им соответствующей конфигурации.

Одной из важнейших проблем в создании многослойной коммутации – получение проводниковых слоев высокого качества.

Материалы высокой проводимости должны обладать следующими свойствами:

- 1) малой величиной удельного сопротивления ($\rho_{\square} \approx 0,01-0,04 \text{ Ом}/\square$);
- 2) высокой адгезией к подложке и диэлектрическим слоям, на которые они наносятся;
- 3) на границе металл – диэлектрик должны отсутствовать условия для образования интерметаллических Au_3Al , существенно влияющих на величину контактного сопротивления;
- 4) на границе металл – диэлектрик должны отсутствовать приэлектродные реакции;

5) минимальным контактным сопротивлением к резистивным и диэлектрическим материалам.

При изучении раздела «Материалы высокого удельного сопротивления» необходимо знать, что они должны обладать:

- 1) определенной величиной удельного сопротивления;
- 2) минимальным значением ТКС;
- 3) малым уровнем шумов;
- 4) небольшим значением удельной рассеиваемой мощности ($N = 2\text{Вт/см}^2$).

Таким требованиям удовлетворяют 3 группы материалов:

- 1) резистивные материалы на основе чистых металлов;
- 2) резистивные материалы на основе сплавов;
- 3) резистивные материалы на основе керметов.

3.4. Методические указания к разделу «Магнитные материалы»

Данному разделу соответствует материал, изложенный в литературе [1,2,7,8]. При изучении этого материала выясняется, что является причиной возникновения магнитных свойств всех веществ в природе. Причины следует искать, во-первых, в наличии спиновых и орбитальных магнитных моментов у атомов веществ и, во-вторых, во взаимодействии этих атомов внутри вещества.

Магнитный момент любого атома вычисляется как векторная сумма трех моментов: 1) магнитного момента спина электронов, 2) орбитального магнитного момента электронов, 3) магнитного момента атомных ядер. Если при сложении оказывается, что суммарный магнитный момент атома равен нулю, то вещество, состоящее из таких атомов, диамагнитно. Если же суммарные магнитные моменты атомов отличны от нуля, то магнитные свойства веществ зависят от взаимодействия между атомами, а именно: если это взаимодействие очень мало или практически отсутствует, то такие вещества парамагнитны; если между атомами существует сильное электростатическое взаимодействие, то оно приводит к параллельной или антипараллельной ориентации их магнитных моментов. В первом случае речь идет о ферромагнитных веществах, во втором – антиферромагнитных. При этом, если антипараллельные магнитные моменты соседних атомов в антиферромагнетиках неодинаковы по величине, то такие вещества называются ферримагнитными. Только ферромагнитные и ферримагнитные вещества обладают спонтанной намагниченностью и именно они используются в качестве магнитных материалов, так как способны намагничиваться во внешнем поле. Магнитный момент спонтанной намагниченности у них настолько велик, что при помещении во внешнее магнитное поле величина его не может измениться, а меняется только его ориентация: он ориентируется в направлении внешнего поля. Процесс этой ориентации сопровождается потерями энергии и описывается кривой намагничивания, которая является важнейшей технической характеристикой магнитных материалов, так как

описывает их поведение во внешнем магнитном поле. По этой кривой определяют их основные характеристики: магнитную проницаемость, индукцию насыщения, остаточную индукцию, коэрцитивную силу, магнитные потери. По форме кривые намагничивания одинаковы для магнитомягких и магнитотвердых материалов; эти материалы отличаются друг от друга по количественным характеристикам: у магнитомягких высокая магнитная проницаемость, малые потери на перемагничивание, малая коэрцитивная сила; у магнитотвердых – низкая магнитная проницаемость, большие потери на перемагничивание, большая коэрцитивная сила. Такая разница объясняется различием в ходе процесса намагничивания у этих двух групп материалов: у магнитомягких – преобладают процессы смещения границ доменов, происходящие с меньшими затратами энергии; у магнитотвердых – процессы вращения (ориентации) векторов магнитных моментов, требующие больших затрат энергии.

При изучении раздела «Материалы для магнитных пленок с цилиндрическими магнитными доменами» необходимо уяснить основные требования, предъявляемые к этим материалам, изучить материалы с ЦМД:

- 1) редкоземельные ортоферриты со структурой перовскита;
- 2) редкоземельные ферриты со структурой граната;
- 3) аморфные магнитные пленки с ЦМД;
- 4) ферромагнетики с гексагональной структурой.

4. ПЕРЕЧЕНЬ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Изучение электропроводности диэлектрических материалов.
2. Изучение зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь от частоты и температуры.
3. Исследование магнитомягких материалов на промышленной частоте.
4. Исследование высокочастотных магнитных материалов и постоянных магнитов.
5. Исследование электрофизических параметров проводниковых материалов.
6. Исследование электропроводности и термоЭДС полупроводниковых материалов.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие материалы называются диэлектрическими?
2. Как классифицируются диэлектрики по строению молекул?
3. Что называется электрической поляризацией диэлектриков?
4. Как классифицируется поляризация по времени ее установления?

5. Что такое абсолютная и относительная диэлектрическая проницаемость?
6. Что называется электронной поляризацией?
7. Что называется ионной поляризацией?
8. Что такое спонтанная поляризация?
9. Какое явление называется пьезоэлектрическим эффектом?
10. Что называется миграционной поляризацией?
11. Что происходит в диэлектрике в условиях воздействия постоянного напряжения?
12. Что называется электропроводностью вещества?
13. Что такое удельная проводимость?
14. Электропроводность воздуха.
15. Электропроводность твердых диэлектриков.
16. Что называют диэлектрическими потерями?
17. Что такое угол диэлектрических потерь?
18. Что характеризует $tg \delta$?
19. Какие вы знаете эквивалентные схемы замещения диэлектрика?
20. Что такое пробой диэлектриков?
21. Пробой воздуха.
22. Пробой газа в однородном и неоднородном электрических полях.
23. Какие вы знаете механизмы пробоя твердых диэлектриков?
24. Электрическая прочность тонких диэлектрических пленок.
25. Что такое гигроскопичность и влагопроницаемость диэлектриков?
26. Явления микропробоя в тонких диэлектрических пленках.
27. Какие свойства диэлектриков относятся к тепловым?
28. Материалы с малыми диэлектрическими потерями (неполярные диэлектрики)
29. Материалы с повышенными диэлектрическими потерями (полярные диэлектрики).
30. Пьезоэлектрические материалы.
31. Сегнетоэлектрики.
32. Стекла.
33. Ситаллы.
34. Керамика.
35. Диэлектрики в микроэлектронике.
36. Диэлектрики для тонкопленочных конденсаторов.
37. Диэлектрики для межслоевой изоляции интегральных схем.
38. Диэлектрики для подложек ИС.
39. Диэлектрики для защитного покрытия ИС.
40. Какие материалы называют проводниковыми?
41. Электропроводность проводниковых материалов.
42. Объяснить, почему температурный коэффициент электропроводности металлов положительный.
43. Для каких целей подбирают проводниковые материалы с большим по

величине, постоянным в широком температурном диапазоне и стабильным во времени коэффициентом термоЭДС?

44. Объяснить физический смысл коэффициента теплопроводности металлов.

45. Какие требования предъявляются к материалам высокой проводимости?

46. Какие требования предъявляются к материалам высокого удельного сопротивления?

47. Перечислите основные требования, которые предъявляются к материалам высокой проводимости, используемым в микроэлектронике. Назовите эти материалы, опишите их достоинства и недостатки.

48. Перечислите основные требования, предъявляемые к резистивным материалам, которые используются в микроэлектронике. Опишите основные свойства резистивных материалов на основе чистых металлов, сплавов и керметов.

49. Какие материалы называются полупроводниковыми?

50. Проанализировать зависимость удельной проводимости полупроводников от температуры, от напряженности электрического поля при различных температурах, от освещенности. В каких приборах находят применение эти свойства полупроводников?

51. Как влияют примеси на удельную проводимость полупроводников?

52. Полупроводники – простые химические элементы.

53. Опишите структуру, методы получения, основные свойства и области применения германия, кремния, селена.

54. Укажите рабочую температуру p - n -переходов для каждого материала.

55. Полупроводники – сложные химические соединения.

56. Опишите структуру, методы получения, основные свойства и области применения соединений группы $A^{III}B^{V}$ (нитридов, фосфидов, арсенидов и антимонидов).

57. Укажите рабочую температуру p - n -перехода для приборов на основе арсенида галлия.

58. Опишите структуру, методы получения, основные свойства и области применения соединений группы $A^{II}B^{VI}$ (теллуридов, селенидов, сульфидов).

59. Опишите структуру, методы получения, основные свойства и области применения соединений группы $A^{IV}B^{IV}$ (карбида кремния).

60. Укажите рабочую температуру полупроводниковых приборов на основе карбида кремния.

61. Дайте общую классификацию веществ по магнитным свойствам.

62. Перечислите основные особенности магнитных материалов.

63. Опишите процесс намагничивания магнитного материала во внешнем постоянном магнитном поле.

64. Что такое относительная магнитная проницаемость?

65. Что такое магнитные потери?

66. Начертите общую таблицу с классификацией магнитных материалов.

Объясните разницу между магнитомягкими и магнитотвердыми материалами.

67. Что такое магнитомягкие материалы?
68. Назовите основные сорта железа, применяемого в качестве магнитного материала.
69. Что такое кремнистая электротехническая сталь?
70. Что такое пермаллой?
71. Что такое альсифер?
72. Что такое высокочастотные магнитомягкие материалы?
73. Что такое магнитодиэлектрики?
74. Что такое ферриты?
75. Опишите основные свойства магнитомягких ферритов низкой частоты (НЧ) и высокой частоты (ВЧ).
76. Опишите свойства ферритов сверхвысокой частоты (СВЧ).
77. Перечислите магнитные материалы специального назначения.
78. Опишите свойства и область применения ферритов и металлических сплавов с прямоугольной петлей гистерезиса.
79. Тонкие пленки магнитных материалов.
80. Какова толщина и особенности доменной структуры тонких магнитных пленок? Где они могут быть использованы?
81. Что такое цилиндрические магнитные домены (ЦМД)? Как они образуются, в каких материалах наблюдаются?
82. Для каких устройств могут применяться пленки с ЦМД?
83. Опишите свойства магнитотвердых ферритов.
84. Опишите материалы, применяемые для целей звукозаписи.
85. Опишите новые сплавы на основе редкоземельных металлов. Каковы их преимущества перед ранее существовавшими?

6. ЗАДАЧИ

Задача 1. Каковы удельные диэлектрические потери в плоском конденсаторе из пленки полистирола толщиной 20 мкм, если на конденсатор подано напряжение 2 В частотой 2 МГц (для полистирола $\epsilon = 2,5$; $\operatorname{tg} \delta = 2 \cdot 10^{-4}$)?

Задача 2. Определить заряд на обкладках пленочного конденсатора площадью $0,25 \text{ см}^2$ при напряжениях 10, 20, 30, 40 и 50 В и построить зависимость $Q = f(U)$ для этих конденсаторов.

Варианты задачи: 1) пленка монооксида кремния;

2) пленка окиси алюминия;

3) пленка двуоксида кремния.

Задачу решить для двух толщин пленок и сравнить полученные результаты.

Числовые данные для ϵ и d взять в табл. 6.1, 6.2 [1].

Задача 3. Рассчитать концентрацию электронов и дырок проводимости в германии p -типа с удельным сопротивлением $0,05 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при 300 К, если подвижность электронов и дырок при этой температуре равна соответственно

$0,39 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, $0,18\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, а собственная концентрация носителей заряда составляет $n_i = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Задача 4. Красная граница фотопроводимости чистого полупроводника $\lambda_{\text{кр}}=1,7 \text{ мкм}$. Определить температурный коэффициент удельного сопротивления материала при комнатной температуре.

Задача 5. Сопротивление провода из константана при 20°С равно 500 Ом . Чему будет равно сопротивление этого провода при 450°С , если для константана (при 20°С) $\alpha_p = -15 \cdot 10^{-6}$, а температурный коэффициент линейного расширения составляет $\alpha_l = 10^{-5} \text{ К}^{-1}$?

Задача 6. На диэлектрическую подложку нанесена металлическая пленка толщиной $0,1 \text{ мкм}$, имеющая форму прямоугольника со сторонами $2 \times 3 \text{ мм}$. Сопротивление пленки, замеренное при приложении напряжения к противоположным малым сторонам прямоугольника оказалось равным 90 Ом . Чему будет равно сопротивление этой пленки при приложении напряжения к большим сторонам прямоугольника? Определить сопротивление на квадрат (ρ_{\square}) этой пленки.

Задача 7. Рассчитать индукцию насыщения для никелевого феррита, элементарная ячейка которого содержит 8 форельных единиц состава NiFeO_4 . Период идентичности кристаллической решетки принять равным $0,83 \text{ нм}$. При расчете учесть, что спиновый магнитный момент электрона равен магнетону Бора μ_B , а магнитные моменты катионов железа (M_{Fe}) и никеля (M_{Ni}), входящих в решетку феррита, составляют соответственно, $5\mu_B$ и $2\mu_B$ (магнетон Бора $\mu_B = 9,25 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}$).

Задача 8. Оцените максимально возможную плотность записи информации (бит/см^2) в устройстве на цилиндрических магнитных доменах (ЦМД) на пленке феррограната толщиной $h=12 \text{ мкм}$, если минимальный диаметр доменов $d_{\text{min}}=3 \text{ мкм}$. В процессе управления перемещением ЦМД их диаметр может изменяться в три раза. Для исключения взаимного влияния соседних ЦМД расстояние между ними должно быть не менее $4d$. Чему равен магнитный момент ЦМД минимального и максимального размеров, если индукция насыщения феррограната $B_s=45 \text{ мТл}$?

Задача 9. Выведите выражение, позволяющее рассчитать тангенс угла диэлектрических потерь сегнетоэлектрика по известной площади петли гистерезиса, полученной на экране осциллографа.

Задача 10. Определить подвижность и концентрацию электронов в кремнии n -типа. Удельное сопротивление которого $\rho=1,8 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, а коэффициент Холла $R_H=2,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{Кл}$.

7. КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

В таблице дано 10 вариантов контрольного задания. В каждом варианте контрольного задания 4 вопроса и две задачи. Здесь указываются порядковые номера вопросов (разд. 4) и задач (разд. 5).

Варианты контрольного задания

вариантов	Номера					задач
	вопросов					
1	2	43	44	54	56	1,3
2	10	41	45	55	64	2,4
3	3	42	46	56	69	1,5
4	14	40	47	57	68	1,7
5	10	41	48	58	81	2,6
6	22	42	49	59	82	2,8
7	12	43	50	60	83	1,4
8	16	40	51	61	84	3,5
9	20	41	52	62	76	10,4
10	18	32	53	58	72	7,9

8. ЦЕЛЬ КУРСОВОЙ РАБОТЫ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЕЕ ВЫПОЛНЕНИЮ

Целью курсовой работы является возможность использования полученных знаний при изучении курса «Материалы электронной техники» для самостоятельного анализа конкретной проблемы в области материалов электронной техники с использованием новейших достижений науки и техники.

Курсовая работа должна состоять из следующих разделов:

1. Введение (актуальность темы).
2. Классическое рассмотрение данного вопроса.
 - 2.1. Основные свойства данного материала.
 - 2.2. Технология получения данного материала.
 - 2.3. Применение данного материала в электронной технике.
3. Новые достижения в науке и технике по этому материалу (обзор-сообщение по реферативным журналам за последние 2–3 года).
 - 3.1. Новые свойства материала.
 - 3.2. Новые методики для исследования свойств этого материала.
 - 3.3. Новые технологические методы получения данного материала.
 - 3.4. Новые применения данного материала в электронной технике.

Каждый из пп. 3.1 – 3.4 содержит выводы, в которых подчеркивается самое интересное сообщение по свойствам, методикам, технологиям и применениям материала в электронной технике.

4. Углубленное изучение конкретного вопроса.

В этом разделе на основе выводов пп. 3.1–3.4 рассматривается более

подробно то новое, что вызывает интерес по этому материалу.

5. Заключение.

Общий вывод по конкретному материалу. Сравнение данных по классической литературе и того нового, что появилось за последние 2–3 года. Перспективы использования данного материала в электронной технике.

9. ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ КУРСОВЫХ РАБОТ

1. Диэлектрические материалы для подложек интегральных схем.
2. Диэлектрические материалы для межслоевой изоляции интегральных схем.
3. Диэлектрические материалы для тонкопленочных конденсаторов.
4. Диэлектрические материалы тонкопленочной микроэлектроники.
5. Диэлектрические материалы для защитного покрытия интегральных схем.
6. Кремний, его основные свойства, методы получения, применение.
7. Германий, его основные свойства, методы получения, применение.
8. Арсенид галлия в микроэлектронике, методы получения, применение.
9. Магнитные пленки с цилиндрическими магнитными доменами.
10. Полупроводниковые соединения группы $A^{III}B^{VI}$.
11. Полупроводниковые соединения группы $A^{IV}B^{VI}$.
12. Карбид кремния, его основные свойства, методы получения, применение.
13. Материалы высокой проводимости в микроэлектронике.
14. Резистивные материалы микроэлектроники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. Серия: Учебники для вузов. Специальная литература. – СПб.: Лань, 2001. – 368 с.
2. Антипов Б. Л., Сорокин В. С., Терехов В. А. Вопросы, задачи по курсу «Материалы электронной техники». – СПб.: Лань, 2001. – 208 с.
3. Справочник по электротехническим материалам/ Под ред. Ю.В. Корицкого. – М.: Энергоатомиздат. Т. 1,2,3, 1986.
4. Антипов Б.Л., Сорокин В.С., Терехов В.А. Материалы электронной техники: Задачи и вопросы. – СПб.: Гардарика, 2001.
5. Таиров Ю.М., Цветков В.Ф. Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов. – СПб.: Лань, 2002.
6. Айвазов А.А., Будагян Б.Г., Вихров С.П., Попов А.И. Неупорядоченные полупроводники: Учеб. пособие – М.: Высш. шк., 1995. – 352 с.
7. Летюк Л.М. Технология производства материалов магнитоэлектроники: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1994.
8. Золотухин И.В., Калинин Ю.Е., Стогней О.В. Новые направления физического материаловедения: Учеб. пособие. – Воронеж: ВГУ, 2000.

Учебное издание

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Методические указания
для студентов специальности I-41 01 02
«Микро- и наноэлектронные технологии и системы»
заочной и дистанционной форм обучения

Составители:
Кураева Светлана Николаевна
Уткина Елена Аполлинарьевна

Редактор Т.П. Андрейченко
Корректор Е.Н. Батурчик

Подписано в печать
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. 1,2.

Формат 60x84 1/16.
Печать ризографическая.
Тираж 50 экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л.
Заказ № 704.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131518 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6