

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

А. П. Казанцев, В. И. Пачинин, П. П. Стешенко

***Материалы и компоненты электронной техники***

Программа, методические указания и контрольные задания  
для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника»  
вечерней и заочной формы обучения

УДК 621.315.5(076)  
ББК 32.843я7  
К14

Рецензент  
профессор кафедры микро- и наноэлектроники  
Белорусского государственного университета  
информатики и радиоэлектроники,  
кандидат технических наук  
Б.С.Колосницын

Казанцев А.П.  
Пачинин В.И.  
Стещенко П.П

ISBN 978-985-488-696-1

К14 Казанцев А.П.  
Материалы и компоненты электронной техники:  
учеб.-метод. пособие / А.П.Казанцев, В.И.Пачинин, П.П.Стещенко.-  
Минск: БГУИР, 2010

ISBN 978-985-488-696-1

## **1. Цель и задачи дисциплины и её место в учебном процессе**

### **1.1. Цель преподавания дисциплины**

Целью курса является изучение свойств основных классов материалов, применяемых в изделиях электроники, их количественных параметров, областей применения, а также получение навыков по использованию материалов для изготовления изделий и компонентов электронных приборов и устройств.

### **1.2. Задачи изучения дисциплины**

Основными задачами курса являются изучение физических явлений и процессов, определяющих свойства материалов, и использование полученных знаний при разработке и эксплуатации изделий промышленной электроники, а также изучение физических принципов построения и основных технологических методов изготовления современного класса компонентов электроники – интегральных микросхем (ИМС).

## **2. Содержание дисциплины и объём в часах:**

1.	Введение	2 ч.
2.	Диэлектрики, диэлектрические материалы и компоненты на их основе	14 ч.
3.	Полупроводники, полупроводниковые материалы и дискретные компоненты на их основе	12 ч.
4.	Интегральные микросхемы	10 ч.
5.	Магнетизм, магнитные материалы и изделия из магнетиков	10 ч.
6.	Проводники, проводниковые материалы, их применение	4 ч.

### **3. Наименование тем, их содержание, методические рекомендации и вопросы для самопроверки**

#### **Тема 1. Введение (2 ч.)**

Предмет и содержание курса. Значение курса в плане подготовки специалистов в области электроники. Энергетический спектр электронов в твёрдых телах и классификация материалов на основе особенностей энергетического спектра. Энергетические диаграммы проводников, полупроводников и диэлектриков.

Литература: [1, с.5 - 121, 2, с. 7 - 38; 3, с.19 - 29;].

#### **Методические рекомендации**

Необходимо уяснить, что все свойства веществ определяются энергетическим спектром электронов. При объединении изолированных атомов и образовании твёрдого тела дискретные уровни электронов этих атомов расщепляются и образуют чередующиеся энергетические зоны, разрешённые и запрещённые. Поскольку свойства веществ определяются валентными электронами, рассматривают только валентную и свободную зоны разрешённых энергий электронов а также (если есть) запрещённую зону между ними. Такую часть энергетического спектра принято называть энергетической диаграммой. Следует обратить внимание, что классификация веществ по электропроводности определяется видом энергетической диаграммы и шириной запрещённой зоны при её наличии.

#### **Вопросы для самопроверки**

1. Дайте определение электротехнических материалов.
2. Каков характер энергетического спектра электронов в твёрдых телах?
3. Почему при анализе свойств веществ рассматривается не весь, а только часть энергетического спектра электронов в твердом теле?
4. Нарисуйте энергетические диаграммы основных классов материалов.
5. На какие классы делятся материалы по отношению к электромагнитному полю?
6. В чём отличие энергетических диаграмм проводников, полупроводников и диэлектриков?

#### **Тема 2. Физические процессы в диэлектриках, основные свойства и количественные параметры (6 ч.)**

Поляризация диэлектриков, механизмы или виды поляризации. Диэлектрическая проницаемость, её физический смысл и численные значения для диэлектриков различных областей применения. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости.

Электропроводность диэлектриков. Токи, протекающие в диэлектриках. Объёмное и поверхностное удельные сопротивления твёрдых диэлектриков.

Потери в диэлектриках. Причины возникновения потерь в диэлектриках. Эквивалентные схемы замещения диэлектриков. Тангенс угла диэлектрических потерь и его частотная зависимость.

Пробой диэлектриков, виды и механизмы пробоя. Электрическая прочность диэлектриков.

Литература: [1, с. 25 – 39; 2, с. 39 - 105; 3, с. 182 - 224].

#### Методические рекомендации

Свойства веществ определяются физическими процессами, происходящими в них под действием внешних факторов, таких как электромагнитное поле, излучение, температура, механические воздействия и т. д. Поэтому необходимо понять физические процессы, которые определяют наблюдаемые свойства.

Основным свойством диэлектриков, выделяющим их среди других классов материалов, является способность поляризоваться. Следует обратить внимание, что в изучаемом курсе для характеристики диэлектриков, как и других классов материалов, выделяются четыре основных электрофизических свойства, каждое из которых характеризуется определённым количественным параметром.

Необходимо чётко уяснить, что является свойством, в чём оно проявляется и каким количественным параметром оно характеризуется. Следует понять, что количественные параметры позволяют сравнивать вещества по свойствам и определять их возможные области применения. Четыре основных свойства диэлектриков: способность поляризоваться, способность проводить электрический ток, способность нагреваться в электрическом поле и способность образовывать канал с высокой проводимостью под действием высокого напряжения или при высоких электрических полях.

Соответствующими этим свойствам параметрами являются: диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ , удельные объёмное  $\rho_v$  и поверхностное  $\rho$  сопротивления, тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$ , электрическая прочность  $E_{\text{пр}}$ .

#### Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение диэлектрика.
2. Что является количественной характеристикой (мерой) способности диэлектрика поляризоваться?
3. Что такое поляризация и в чём она проявляется?
4. Какие существуют механизмы поляризации?
5. Как связана частотная зависимость  $\epsilon$  с механизмами поляризации?
6. Что является количественной мерой электропроводности?
7. Какими параметрами пользуются на практике для характеристики электропроводности?
8. Дайте определение подвижности носителей зарядов.
9. Какие токи протекают в диэлектрике?
10. Дайте определение  $\rho_v$  и  $\rho_s$ . В каких единицах они измеряются?

11. Как понимать потери в диэлектриках и в чём выражается это явление?
12. Назовите причины возникновения потерь в диэлектриках.
13. Что является количественным параметром, характеризующим потери в диэлектрике?
14. Что такое угол и тангенс угла диэлектрических потерь?
15. Изобразите схемы замещения диэлектриков и соответствующие им векторные диаграммы токов и напряжений.
16. Назовите условия эквивалентности схем замещения реальным диэлектрикам.
17. Для чего используются схемы замещения?
18. Что такое пробой диэлектрика? Дать определение.
19. Перечислите и охарактеризуйте механизмы пробоя диэлектриков.
20. Что является количественным параметром, характеризующим явление пробоя и в каких единицах он измеряется?

### Тема 3. Диэлектрические материалы (6 ч.)

Классификация диэлектрических материалов по агрегатному состоянию, поведению в электрическом поле, применению.

Основные характеристики газообразных и жидких диэлектрических материалов. Особенности и области применения. Достоинства и недостатки.

Твёрдые диэлектрические материалы и их деление на органические и неорганические. Методы получения органических термопластичных и термореактивных материалов. Сравнительные характеристики этих классов материалов. Фторсодержащие и кремнийорганические соединения, материалы и области их применения. Пластмассы, методы их получения и изделия из пластмасс. Эластомеры, лаки, клеи, компаунды, области их применения. Волокнистые диэлектрические материалы и слоистые пластики. Основные характеристики и области применения.

Неорганические диэлектрические материалы: слюда, стёкла, ситаллы, керамика. Основные характеристики. Области применения. Типы технических стекол. Методы получения изделий. Виды керамики по назначению. Методы получения изделий из керамики. Активные диэлектрики, области их применения. Материалы квантовой электроники.

Литература: [1, с. 39 - 57; 2, с. 105 - 230; 3, с. 225 - 259; 13, с. 228 - 255].

#### Методические рекомендации

Деление диэлектрических материалов осуществляется по различным классификационным признакам, которые следует усвоить.

Для газообразных диэлектриков характерно использование в электрических изделиях под давлением с целью повышения электрической прочности. Следует обратить внимание, что газообразные диэлектрики обладают высокими значениями  $\rho_v$  и малыми значениями  $\epsilon$ ,  $\text{tg } \delta$ , а также обладают способно-

стью восстановления электрической прочности после снятия пробивного напряжения.

Для жидких диэлектриков на основе нефтяных масел характерны разнообразные области применения. Основными их достоинствами являются высокая теплопроводность и способность к погашению дугового разряда. Применение синтетических жидкостей для пропитки волокнистых материалов позволяет повысить их электрическую прочность, получить слоистые пластики и лакоткани.

При получении твёрдых органических диэлектрических материалов необходимо понять, что полимеризацией получают термопластичные материалы, а поликонденсацией – терморезистивные. Особенности получения и химического состава определяют свойства и области применения этих групп материалов для изоляции и в конструкционных изделиях. Необходимо запомнить технические названия основных полимерных материалов и ориентироваться в областях их применения.

Следует знать методы получения изделий из пластмасс и пенопластов, ориентироваться в видах изделий из них и областях их применения.

Необходимо разобраться, для чего используют эластомеры и компаунды, по какому признаку классифицируют лаки и клеи, ориентироваться в областях их применения, достоинствах и недостатках.

Основным недостатком волокнистых диэлектрических материалов является их пористость, поэтому с целью повышения их электрической прочности и получения хороших механических свойств выполняют их пропитку, сушку, прессование. Следует запомнить технические названия непропитанных волокнистых материалов, лакотканей и слоистых пластиков, а также знать области их применения.

Неорганические диэлектрические материалы подразделяют на три класса, названия которых следует запомнить. Необходимо знать области применения различных типов слюды и названия типов технических стёкол. Следует обратить внимание, что основным электрофизическим параметром стёкол, применяемых в электротехнических и электровакуумных изделиях, является температурный коэффициент линейного расширения.

Ситаллы и специальные виды керамики используют для изготовления подложек интегральных микросхем, благодаря их особым свойствам, на которые следует обратить внимание.

Существует большое количество типов керамики, но для электротехнических целей используют только отдельные ее виды, названия которых следует запомнить. Керамические диэлектрические материалы делятся на пассивные и активные. В свою очередь, по назначению пассивные материалы делятся на установочные и конденсаторные виды керамики, отличающиеся численным значением диэлектрической проницаемости, на что следует обратить внимание.

Необходимо запомнить названия активных диэлектрических материалов, разобраться в физических явлениях, обеспечивающих специфические свойства и области их применения.

Материалы квантовой электроники выделяют в отдельный класс в связи с особым их применением. Следует запомнить названия основных материалов, применяемых в изделиях квантовой электроники.

Заканчивая изучение темы, следует усвоить, что диэлектрические материалы используют для электрической изоляции, в конденсаторах и в конструкционных изделиях. При этом один и тот же материал может применяться в любой из этих областей.

#### Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение термина «диэлектрические материалы» (ДМ).
2. Как подразделяются ДМ по агрегатному состоянию?
3. Назовите достоинства газообразных ДМ и области их применения.
4. Перечислите классы основных жидких ДМ.
5. Каковы методы получения полимерных ДМ?
6. Перечислите основные полимерные термопластичные ДМ.
7. Где в основном применяют полимерные термореактивные материалы?
8. Какими свойствами и параметрами отличаются термопластичные и термореактивные ДМ?
9. Каковы области применения пластмасс, пенопластов, эластомеров, компаундов?
10. Как классифицируются лаки по применению?
11. Перечислите основные типы волокнистых ДМ.
12. Каков основной недостаток волокнистых ДМ и как он устраняется?
13. Что такое слоистые пластики, как они называются и получают?
14. Перечислите основные классы неорганических ДМ.
15. Где применяются слюдяные ДМ?
16. Перечислите типы технических стёкол.
17. Что такое ситаллы и где они применяются?
18. Какие типы керамики используются в электротехнических изделиях и для чего?
19. Какие типы керамики выделяют по применению и по какому параметру их подразделяют?
20. Каковы основные операции процесса изготовления керамических изделий?
21. Перечислите наиболее известные типы активных ДМ.
22. Какие материалы и для чего используются в квантовой электронике?

#### **Тема 4.** Компоненты электроники на основе диэлектрических материалов (2 ч.)

Конденсаторы постоянной и переменной ёмкости, номинальные значения ёмкости. Типы конденсаторов постоянной ёмкости: бумажные, металлобумажные, слюдяные, полистирольные, керамические дисковые и трубчатые, стеклоэмалевые, плёночные, электролитические. Номиналы, рабочие напря-



жения. Материалы диэлектриков для конденсаторов. Конструкционные изделия на основе ДМ.

Литература: [14, с. 5 - 18, с. 125 - 169]

#### Методические рекомендации

Следует чётко различать применение ДМ для изоляции в конденсаторах и конструкционных изделиях. Для изоляции обмоточных проводников применяют в основном жидкие диэлектрические материалы в виде лаков и масел, текстильные и полимерные материалы – для изоляции гибких проводов различного назначения. В конденсаторах применяют ДМ, соответствующие названиям типов конденсаторов. Существует очень большой набор типов конденсаторов. Поэтому необходимо запомнить названия наиболее широко применяемых типов конденсаторов, иметь представление об их конструктивных особенностях, типоразмерах, диапазонах номиналов, рабочих напряжениях и предпочтительных частотных диапазонах применения.

Применение ДМ для конструкционных изделий весьма разнообразно. Поэтому необходимо запомнить наиболее распространённые ДМ, в том числе из пластмассовых материалов и слоистых пластиков.

#### Вопросы для самопроверки

1. Для каких целей применяются твердые и жидкие диэлектрические материалы?
2. Чем изолируются обмоточные провода?
3. Чем изолируются гибкие монтажные провода?
4. Какие ДМ используют в качестве диэлектриков для конденсаторов?
5. Какие существуют типы бумажных конденсаторов?
6. На какие номиналы рассчитаны бумажные и металлобумажные конденсаторы?
7. Какие существуют типоразмеры слюдяных конденсаторов и каков диапазон их номиналов?
8. Перечислите наиболее распространённые типы электролитических конденсаторов. Из каких материалов они изготавливаются?
9. Каков диапазон номиналов электролитических конденсаторов?
10. Какие ДМ используют для конструкционных изделий?
11. Перечислите основные конструкционные изделия из ДМ.

#### **Тема 5. Полупроводники: свойства и количественные параметры (6 ч.)**

Собственные и примесные полупроводники. Энергетические диаграммы, типы носителей зарядов.

Уровень Ферми, концентрация носителей зарядов, энергетическое положение электронов примесных атомов. Электропроводность полупроводников. Удельная проводимость собственных и примесных полупроводников,

подвижность носителей заряда. Основные количественные параметры, определяющие способность полупроводников проводить электрический ток.

Температурная зависимость уровня Ферми в собственных и примесных полупроводниках. Температуры истощения примесей и перехода к собственной проводимости. Температурные зависимости концентрации, подвижности, собственной и примесной проводимости. Энергии активации собственной и примесной проводимости, являющиеся количественными параметрами полупроводников.

Фотопроводимость полупроводников. Энергетическая диаграмма полупроводника и механизм генерации фотоносителей. Спектральная характеристика фотопроводимости и красная граница внутреннего фотоэффекта. Основные закономерности внутреннего фотоэффекта.

Электропроводность полупроводников в сильных электрических полях: основные закономерности.

Литература: [1, с.58 - 65; 2, с. 293 - 330; 3, с. 90 - 119; 5, с. 27 - 47; 6, с.105 – 169].

#### Методические рекомендации

При анализе энергетических диаграмм, необходимо чётко понимать откуда и за счёт чего в полупроводниках появляются свободные носители заряда. В собственных полупроводниках свободными носителями являются электроны зоны проводимости и дырки валентной зоны, которые принадлежат собственным атомам. По этой причине полупроводник называют собственным. В примесных полупроводниках свободными носителями могут быть либо свободные электроны донорных атомов, примеси, перешедшие в свободную зону, либо дырки собственных атомов, которые появились в валентной зоне за счёт захвата валентных электронов собственных атомов акцепторными атомами примеси. Примесные полупроводники по типу носителей заряда принято разделять на электронные, или n-типа и дырочные, или p-типа, а по типу примесных атомов – на донорные или акцепторные, соответственно.

Концентрация носителей заряда – один из основных параметров, определяется шириной запрещённой зоны  $\Delta E_g$  в собственном полупроводнике. В примесном полупроводнике она определяется энергией активации примесных носителей заряда  $\Delta E_D$  или  $\Delta E_A$  и уровнем генерации носителей заряда, в частности, температурой.

Электропроводность полупроводников определяется концентрацией и подвижностью носителей заряда, энергией активации собственной или примесной проводимости и температурой. Поэтому, изучая электропроводность полупроводников, следует разобраться, как указанные факторы влияют на величину удельной проводимости. Следует также учесть, что в примесных полупроводниках с узкой запрещённой зоной в диапазоне рабочих температур могут появиться собственные носители заряда, что привело к введению понятий «основных» и «неосновных» носители заряда.

Следует уяснить, что основными количественными параметрами полупроводников являются: ширина запрещённой зоны  $\Delta E_g$ , энергия активации примесной проводимости  $\Delta E_D$  или  $\Delta E_A$ , концентрация носителей зарядов  $n_i$ ,  $N_D$ ,  $N_A$ , подвижность носителей зарядов  $\mu_n$ ,  $\mu_p$ .

При изучении температурной зависимости уровня Ферми следует обратить внимание, что его положение в собственном полупроводнике определяется соотношением эффективных масс электронов и дырок (см. формулу (4.88), [6]) и для широкозонных полупроводников в рабочем интервале температур изменением положения уровня Ферми можно не учитывать.

Для примесных полупроводников температурная зависимость уровня Ферми более сложная, но по этой зависимости определяются аналитически температура истощения примеси  $T_s$  и температура перехода к собственной проводимости  $T_i$  (см. формулы (4.116), (4.118), [6]). При достижении  $T_s$  все атомы донорной примеси отдают электроны в свободную зону, а все атомы акцепторной примеси захватывают электроны из валентной зоны. В обоих случаях концентрация свободных носителей численно равна концентрации введённых в полупроводник атомов примеси. И поскольку  $T_i \gg T_s$ , а диапазон рабочих температур  $\Delta T_p$  находится в пределах  $\Delta T_s \ll \Delta T_p \ll T_i$ , следовательно, в примесных полупроводниках концентрация носителей заряда и, соответственно, удельная проводимость будут определяться только количеством примесных атомов, введённых по «заказу» на стадии изготовления полупроводниковых приборов и изделий.

При изучении фотопроводимости полупроводников следует учесть, что фотоносители появляются за счёт полного поглощения энергии квантов падающего света. И если этой энергии достаточно для перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости, тогда возникает (генерируется) свободная электронно-дырочная пара носителей заряда.

Рассматривая закономерности фотоэффекта, необходимо обратить внимание, что в соответствии со спектральной характеристикой не каждый падающий фотон возбуждает фотоэлектрон, что и является основой введения коэффициента, называемого квантовым выходом. Кроме того, возникновение фотоносителей возможно только при длинах волн света, меньших величины  $\lambda_k$ , называемой красной границей фотоэффекта, определенной для каждого вещества. Следует разобраться, для каких практических целей необходим этот параметр.

Полупроводниковые приборы часто работают в сильных электрических полях. Поэтому необходимо разобраться в особенностях поведения полупроводников в этих условиях и, в частности, проанализировать зависимость удельной проводимости полупроводников от напряжённости внешнего электрического поля, а также выяснить в каких приборах используется это явление.

### Вопросы для самопроверки:

1. Что такое полупроводник? Определение.
2. Что такое собственный, примесный полупроводник?
3. Нарисуйте энергетические диаграммы собственных и примесных полупроводников.
4. Какими носителями заряда обеспечивается электропроводность собственных и примесных полупроводников?
5. Что такое основные и неосновные носители зарядов в полупроводниках?
6. Что такое подвижность носителей заряда и в каких единицах она измеряется?
7. Какие существуют основные механизмы рассеяния носителей заряда и как зависит подвижность носителей зарядов от температуры?
8. Напишите формулы для расчёта удельной проводимости собственных и примесных полупроводников.
9. Что такое уровень Ферми и где он расположен на энергетической диаграмме для собственных и примесных полупроводников при  $T = 0^\circ\text{K}$ ?
10. Почему энергетическое положение электронов примесных атомов изображается на энергетической диаграмме в виде отдельного уровня, а не энергетической зоной?
11. Изобразите температурную зависимость уровня Ферми для собственного полупроводника.
12. Как следует понимать термины «температура истощения примеси  $T_s$ » и «температура перехода к собственной проводимости  $T_i$ »?
13. Что такое энергия активации собственной и примесной проводимости? Чему равны эти энергии?
14. Что такое фотопроводимость полупроводников и за счёт чего появляются фотоносители?
15. Чему равна энергия активации фотоносителей в собственном полупроводнике?
16. Как зависит фототок насыщения от интенсивности светового потока?
17. Что такое квантовый выход фотоэлектронов?
18. Объясните, почему зависимость фототока от напряжения между электродами нелинейна?
19. Что такое красная граница фотоэффекта?
20. Как влияет электрическое поле на электропроводность полупроводников?
21. В каких приборах используется явление электропроводности полупроводников под действием внешнего электрического поля?

### **Тема 6. Полупроводниковые материалы и способы получения монокристаллов (2 ч.)**

Простые полупроводники и полупроводниковые химические соединения. Основные свойства Ge, Si, GaAs, SiC. Методы получения монокристал-

лов из расплава, раствора и газовой фазы. Достоинства и недостатки методов. Методы очистки монокристаллов.

Литература: [1, с. 65 - 74; 2, с. 330 - 350; 3, с. 133 - 180; 13, с. 146 - 181].

#### Методические рекомендации

Следует запомнить основные типы простых полупроводников, используемых для изготовления полупроводниковых приборов и способы их получения. Следует обратить внимание на особенности методов получения монокристаллов и запомнить, какие материалы получают, используя тем или иным методом. Для сравнительных оценок свойств необходимо запомнить значение ширины запрещенной зоны Ge, Si, GaAs, SiC, типы химических элементов, используемых в качестве атомов примеси в германии и кремнии, значения энергии активации примесных носителей заряда, а также возможные значения концентраций примесных атомов. Следует уяснить, почему необходима очистка монокристаллов, какими способами она проводится и на каком физическом принципе осуществляется зонная плавка.

#### Вопросы для самопроверки

1. Перечислите химические элементы, являющиеся простыми полупроводниками.
2. Назовите наиболее известные полупроводниковые химические соединения.
3. Дайте сравнительную характеристику свойств германия и кремния.
4. В чем сущность метода выращивания монокристаллов из расплава?
5. Перечислите методы выращивания монокристаллов из газовой фазы.
6. Для чего нужна очистка монокристаллов полупроводников и как она осуществляется?

#### **Тема 7. Компоненты электроники на основе полупроводниковых материалов (4 ч.)**

Полупроводниковые диоды на основе германия и кремния. Типы диодов для маломощных и мощных выпрямителей. Стабилитроны. Транзисторы типа n-p-n и типа p-n-p. Материалы, используемые для получения p-n переходов. Маломощные, мощные и СВЧ-транзисторы.

Приборы на основе зависимости электропроводности от температуры, электрического поля, электромагнитного излучения, механических нагрузок.

Литература: [5, с. 102 – 106, с. 134 - 137; 8; 15].

#### Методические рекомендации

Основными материалами для полупроводниковых приборов являются германий (Si) и кремний (Ge), полупроводниковые химические соединения типа  $A^{III}B^V$ ,  $A^{II}B^{IV}$  и  $A^{IV}B^V$ . Кремний используют для изготовления мощных диодов, транзисторов, тиристоров, интегральных микросхем, солнечных бата-

рей и т. д. Германий применяют для изготовления ВЧ- и СВЧ-транзисторов, фотодиодов, фототранзисторов, различных датчиков. Полупроводниковые химические соединения используют для изготовления фотоэлементов, дозиметров, лазеров, фото- и тензорезисторов, датчиков различного назначения.

Следует обратить внимание на то, что в зависимости от внешнего фактора, влияющего на электропроводность, изготавливают различные компоненты электронной техники: термисторы, варисторы, фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, тензорезисторы и т. д.

Изучая типы полупроводниковых приборов, следует уяснить себе их основные достоинства и преимущества по сравнению с другими элементами электроники.

#### Вопросы для самопроверки

1. Назовите наиболее известные полупроводниковые приборы.
2. Какие полупроводниковые материалы используют для изготовления мощных диодов и транзисторов?
3. Какие материалы используют для изготовления ВЧ- и СВЧ-транзисторов?
4. Какие элементы электроники изготавливают на основе полупроводниковых химических соединений?
5. В каких приборах используется SiC?
6. Что такое интегральная микросхема?
7. Изобразите типовой профиль биполярного транзистора.
8. Какие существуют типы биполярных транзисторов?
9. Изобразите профиль МДП-транзистора.

#### Тема 8. Интегральные микросхемы (10 ч.)

Групповой метод и планарная технология изготовления интегральных микросхем (ИМС). Классификация ИМС по конструктивно-технологическому признаку. ИМС на биполярных транзисторах, на МДП-транзисторах. Типовые профили полупроводниковых ИМС. Пленочные ИМС на основе тонких и толстых пленок. Гибридные ИМС. Достоинства и особенности ИМС различных типов. Подложки ИМС.

Степень интеграции и классификация ИМС по этому признаку. Типы ИМС по функциональному назначению. Понятие о микропроцессорах.

Основы технологии изготовления ИМС различных типов. Формирование тонких пленок термическим напылением, катодным распылением и ионно-плазменным осаждением. Методы получения тонких оксидных пленок кремния. Окисление кремния в сухом и влажном кислороде. Термическая диффузия. Ионная имплантация. Эпитаксия. Травление в электролитах и плазменно-химическое травление. Формирование топологии с помощью масок. Литография как основной способ формирования топологии ИМС. Фотошаблоны.

Литература: [5, с. 6 - 18; с. 155 - 193].

## Методические рекомендации

Необходимо разобраться, в чем заключается сущность группового метода изготовления ИМС и что представляет собой планарная технология. Существующие ИМС принято классифицировать по различным классификационным признакам, поэтому следует усвоить эти признаки и соответствующие им классы ИМС, а также их сравнительные характеристики. Необходимо запомнить, что в качестве подложки полупроводниковых ИМС используют монокристаллическую полупроводниковую пластину, а для пленочных и гибридных ИМС – подложки из диэлектрических материалов: стекла, ситалла или специальных типов керамики.

По конструктивно-технологическому признаку ИМС делят на полупроводниковые, пленочные и гибридные. По степени интеграции признаку их подразделяют на простые, средние, большие и сверхбольшие ИМС, а по – функциональному на аналоговые, цифровые, аналого-цифровые и цифроаналоговые. В особый класс выделяют наиболее современные ИМС – микропроцессоры.

При изучении ИМС необходимо уметь изображать профили типовых структур на основе биполярных и МДП-транзисторов. При этом следует помнить, что основным элементом полупроводниковых ИМС является транзистор, на основе которого могут быть получены полупроводниковые диоды, резисторы, конденсаторы.

Изучая основные технологические приемы изготовления ИМС, следует обратить особое внимание на способы создания полупроводниковых слоев с различным типом проводимости путем диффузии, имплантации и эпитаксии, а также на способы создания топологического рисунка ИМС. Необходимо иметь представление о методах получения тонких пленок на основе проводниковых, резистивных и диэлектрических материалов.

## Вопросы для самопроверки

1. В чем достоинства группового метода и планарной технологии изготовления ИМС?
2. На какие классы делят ИМС по конструктивно-технологическому признаку?
3. Какие материалы используют в качестве подложек ИМС?
4. Что такое степень интеграции и на какие классы делят ИМС по этому признаку?
5. Что такое плотность упаковки и что она характеризует?
6. Изобразите типовой профиль биполярного транзистора, полупроводникового резистора и конденсатора полупроводниковых ИМС.
7. Какие существуют способы создания полупроводниковых слоев с различным типом проводимости?
8. В чем сущность термической диффузии?
9. В чем заключается ионная имплантация и для чего она необходима?
10. Перечислите способы создания топологического рисунка ИМС.

11. Что такое фотошаблоны и какими они бывают по назначению?
12. Перечислите методы получения тонких пленок на основе проводниковых, резистивных и диэлектрических материалов.

### **Тема 9. Магнетики, основные свойства и количественные параметры (6 ч.)**

Природа магнетизма. Магнитный атомный порядок. Классификация магнетиков по способности намагничиваться. Основные характеристики ферро-, антиферро- и ферримагнетиков. Процесс намагничивания и кривая первоначального намагничивания. Магнитная проницаемость  $\mu$  и ее зависимость от напряженности внешнего магнитного поля  $H$  и температуры  $T$ .

Намагничивание в переменном магнитном поле. Гистерезис. Основная кривая намагничивания. Предельная петля гистерезиса и количественные параметры магнетиков. Магнитные потери и причины их возникновения. Зависимость магнитных потерь от частоты и пути их снижения.

Литература: [1, с. 75 - 81; 2, с. 353 - 363; 3, с. 296 - 324; 4, с. 29 - 40; с. 58 - 93; 9, с. 240 - 251].

#### **Методические рекомендации**

Магнитные свойства веществ определяются магнитными моментами электронов, находящихся на не полностью заполненных внутренних орбитах атомов. Поэтому в зависимости от природы вещества способности к намагничиванию будут разными. На основании этого все вещества делятся на пять магнитных классов. Три из них используются в технике всилу их особых магнитных свойств. Все эти три класса обладают схожими свойствами, которые следует усвоить.

Процесс намагничивания при различных значениях напряженности внешнего магнитного поля происходит за счет разных механизмов ориентации магнитных моментов доменов. На это следует обратить внимание. При этом анализировать процесс намагничивания удобно по кривой первоначального намагничивания или при перемагничивании в переменном магнитном поле – по основной кривой намагничивания.

Количественной мерой способности вещества намагничиваться является относительная магнитная проницаемость  $\mu$ , значение которой можно определить по основной кривой намагничивания, используя простую формулу, связывающую индукцию  $B$  и напряженность внешнего магнитного поля  $H$ . Формулу следует запомнить.

Магнитные свойства также характеризуются начальной магнитной проницаемостью, которая отражает магнитное состояние материала после снятия внешнего магнитного поля и наличие остаточной индукции  $B_r$ . Определение начальной магнитной проницаемости  $\mu_{нач}$  и формулу для расчета ее значения также следует запомнить.



При перемагничивании вещества в переменном магнитном поле наблюдается гистерезис – отставание изменения индукции  $B$  от изменения напряженности поля  $H$ . За счет этого явления перемагничивание происходит по петле, называемой петлей гистерезиса. Следует обратить внимание, что различают динамические петли гистерезиса, вершины которых лежат на основной кривой намагничивания, и предельную петлю гистерезиса, по которой определяют основные количественные параметры магнитных материалов –  $B_{\max}$ ,  $B_r$ ,  $H_c$ .

Как и диэлектрики в электрическом поле, так и магнетики в магнитном поле нагреваются, т. е. наблюдаются магнитные потери. Необходимо разобраться, по каким причинам возникают магнитные потери, почему их величина зависит от частоты и каковы возможные пути снижения магнитных потерь.

#### Вопросы для самопроверки

1. Дать определение термина «магнетик».
2. Перечислите известные классы магнетиков по способности к намагничиванию.
3. Каковы основные свойства магнетиков, используемых в промышленных изделиях?
4. Изобразите схематично магнитный атомный порядок ферро-, ферри- и антиферромагнетиков.
5. Что такое первоначальная (основная) кривая намагничивания и для чего она нужна?
6. Что является количественной мерой способности веществ к намагничиванию и по какой формуле она рассчитывается?
7. Дайте определение основной кривой намагничивания.
8. Что такое начальная магнитная проницаемость, что она характеризует и по какой формуле рассчитывается?
9. Что такое предельная петля гистерезиса? Каким критериям она должна соответствовать?
10. Что такое магнитные потери? Объясните причины их возникновения.
11. Перечислите основные количественные параметры магнитных материалов.
12. Что представляет собой остаточная индукция  $B_r$  и коэрцитивная сила  $H_c$ ?

#### Тема 10. Магнитные материалы (4 ч.)

Классификация магнитных материалов. Классификационные признаки. Магнитно-мягкие материалы (МММ) и основные требования к ним. Основные характеристики МММ – углеродистых и кремнистых сталей, пермаллоев, альсиферов, ферритов и магнитодиэлектриков. Достоинства и недостатки этих материалов. Изделия из МММ и основные области применения.

Магнитно-твердые материалы (МТМ). Кривая размагничивания. Основные количественные параметры МТМ. Свойства и области применения магнитно-твердых сплавов, порошковых МТМ и мартенситных сплавов. Области применения МТМ.

Материалы специального назначения. Основные характеристики и области применения.

Литература: [1, с.81 - 92; 2, с. 364 - 396; 3, с. 325 - 358; 4, с. 95 - 226; 9, с.250-289].

#### Методические рекомендации

Следует обратить внимание на то, что при делении магнитных материалов на группы и внутри групп используется большое количество классификационных признаков: по значению  $H_c$ , по способу получения и химическому составу, по назначению или применению и т. д.

Необходимо запомнить требования, которым МММ должны соответствовать и уметь назвать основные достоинства и недостатки сталей, пермаллоев, ферритов и т. д. Для сравнительных характеристик лучше пользоваться количественными параметрами, приводимыми в таблицах. Следует обратить внимание на порядок численных значений величин  $\mu_{нач}$ ,  $\mu_{max}$ ,  $B_s$ ,  $H_c$  для сравниваемых материалов, на области их применения, частотный диапазон работы и виды изделий из конкретных материалов.

Магнитно-твердые материалы характеризуются особыми свойствами, количественными параметрами и областями применения. Основные количественные параметры и названия групп МТМ необходимо запомнить.

Изучая магнитные материалы специального назначения, необходимо обратить внимание на группу ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса и тонкие магнитные пленки, так как они широко используются в приборах вычислительной техники и магнитной микроэлектроники, СВЧ-приборах.

#### Вопросы для самопроверки:

1. По какому количественному параметру магнитные материалы подразделяют на МММ и МТМ? Каковы значения этого параметра?
2. Перечислите основные требования к МММ.
3. Какие группы материалов на основе железа относятся к МММ?
4. Что такое пермаллой и где они применяются?
5. Каков порядок численных значений  $\mu_{нач}$  и  $\mu_{max}$  для материалов на основе железа и пермаллоев?
6. Что такое ферриты и в чем их основные достоинства?
7. На какие группы делятся ферриты по составу, свойствам и областям применения?
8. Перечислите основные количественные параметры МТМ.
9. Какие существуют группы МТМ, разделяемые по составу и способу получения?

10. Перечислите группы магнитных материалов специального назначения.

**Тема 11.** Проводники, проводниковые материалы, применение, компоненты (4 ч.)

Проводники. Электропроводность металлов. Зависимость электропроводности металлов и сплавов от температуры. Удельное сопротивление  $\rho$  и его температурный коэффициент  $TK_{\rho}$ . Температурный коэффициент линейного расширения  $\alpha_l$ . Особенности проводниковых материалов в пленочном виде.

Классификация проводниковых материалов по агрегатному состоянию и по применению в электротехнических изделиях. Основные количественные параметры проводниковых материалов. Основные электрофизические параметры проводниковых материалов. Материалы с высокой проводимостью, высоким удельным сопротивлением. Характеристики и области применения. Резистивные материалы. Металлы и сплавы различного назначения, сверхпроводниковые материалы. Электрорадиоэлементы на основе проводниковых материалов. Материалы для постоянных переменных резисторов. Типы резисторов.

Литература: [1, с. 13 - 24; 2, с. 230 - 292; 3, с. 27 - 89; 9, с. 39 - 84; 14, с. 73 - 124].

Методические рекомендации

Следует уяснить связь электропроводности веществ с их строением и энергетическим спектром электронов в металлах. Количественным параметром проводников в инженерной практике является удельное сопротивление  $\rho$  и его температурный коэффициент  $TK_{\rho}$ . Существенны также механические свойства проводников. Однако для электротехнических применений наиболее важным является удлинение при изменении температуры, поэтому одним из количественных параметров проводников является температурный коэффициент линейного расширения  $\alpha_l$ .

При работе проводников в контакте с другими материалами возникает контактная разность потенциалов, определяемая значениями работы выхода  $\phi$  контактирующих веществ. Поэтому этот параметр относится к одним из наиболее важных для характеристики электрофизических свойств проводников, проводниковых материалов и изделий на их основе.

При изучении проводниковых материалов следует усвоить, что наиболее применяемые проводниковые материалы – это медь и алюминий, никель, серебро, золото, платина.

Большое значение в технике играют проводниковые материалы и материалы с высоким удельным сопротивлением. Поэтому необходимо знать названия таких материалов и области их применения, а также основные материалы применяемые для изготовления резисторов.

Среди материалов различного назначения для электротехнических применений необходимо знать сплавы для термопар и типы технических припоев, температурные диапазоны их работы и пайки.

#### Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение термина «проводник».
2. Что является количественной мерой электропроводности и какой параметр для ее характеристики используется в инженерной практике?
3. Запишите и поясните формулу для расчета температурного коэффициента удельного сопротивления.
4. Запишите и поясните формулу для расчета температурного коэффициента линейного расширения.
5. Что такое работа выхода и как она отображается на энергетической диаграмме проводника?
6. Перечислите проводниковые материалы с высокой удельной проводимостью.
7. Каков порядок величины удельной проводимости меди, алюминия, серебра?
8. Перечислите материалы, применяемые для изготовления постоянных резисторов.
9. Перечислите наиболее применимые типы постоянных резисторов, и какова область номиналов таких резисторов.
10. Какие существуют марки припоев, и при каких температурах производится пайка?
11. Что такое термопара? Перечислите наиболее известные материалы для термопар.

#### 4. Перечень лабораторных работ

1. Электропроводность диэлектрических материалов.
2. Изучение основных свойств диэлектриков. Измерение зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь от частоты.
3. Исследование магнитно-мягких материалов на промышленной частоте.
4. Определение энергетических параметров полупроводниковых материалов.

#### Методические указания

Все перечисленные лабораторные работы и методические рекомендации к ним изложены в лабораторном практикуме [11].

## **5. Методические рекомендации к выполнению контрольной работы**

Итоговая контрольная работа (КР) предусматривает не только тематический и итоговый контроль знаний, но и способствовать более глубокому усвоению материала изучаемой дисциплины.

В контрольной работе необходимо выполнить письменно следующие контрольные задания; ответить:

1. На три вопроса для самопроверки по указанным темам (например Т3-4, Т6-5, Т9-10);

2. На вопрос контрольного задания, соответствующий номеру раздела 7 настоящего пособия (например: 4),

3. Решить две задачи для определённого номера и варианта (например: 14-2, 14-8) (раздел 8).

Варианты контрольной работы и соответствующие им контрольные задания приведены в таблице 6.1, а их номер должен определяется по двум последним цифрам шифра зачетной книжки студента.

Все решения готовы на [www.reshuzadachi.ru](http://www.reshuzadachi.ru)

## **6. Требования к оформлению контрольной работы**

Итоговая контрольная работа (КР) должна содержать все указанные выше контрольные задания. КР должна быть представлена в установленные деканатом сроки и оформлена либо на листах формата А4, либо в тетради.

По структуре КР должна содержать ответы на вопросы для самопроверки по заданным темам, ответ на основной вопрос (раздел 7) и решение задач (раздел 8). Обязательно записывать формулировки вопросов, а затем ответы на них, условия задачи и решения. Нумерация страниц обязательна. В конце КР следует привести список использованных литературных источников.

Таблица 6.1

## Номера вариантов контрольной работы

Номер варианта КР	Номер вопроса для самопроверки по темам (Т)	Номер 1 вопроса контрольного задания (п.7)	Номер и вариант задачи (п.8)
1	T2-9, T6-4, T10-9	4	3-1, 3-5
2	T1-2, T4-5, T7-6	5	14-3, 14-8
3	T2-3, T8-5, T11-4	33	7-1, 7-4
4	T1-4, T4-10, T11-2	7	10-1, 10-4
5	T2-10, T6-6, T10-8	6	12-1, 12-3
6	T3-4, T5-8, T9-6	2	15-1, 15-2
7	T2-6, T5-2, T10-8	15	6-1, 6-3
8	T3-5, T5-14, T9-11	26	17-1, 17-4
9	T2-5, T5-13, T11-11	12	9-1, 9-3
10	T2-18, T5-20, T9-10	3	13
11	T3-10, T6-1, T9-5	1	11-1, 11-4
12	T2-7, T5-6, T10-7	23	8-1, 8-2
13	T4-1, T7-9, T11-8	27	3-2, 3-4
14	T2-11, T5-5, T9-3	16	1-3, 3-3
15	T1-6, T4-11, T10-1	28	1-1, 1-2
16	T3-17, T5-17, T10-5	10	16-1, 16-2
17	T3-11, T6-3, T9-10	19	17-2, 17-3
18	T2-2, T5-3, T9-4	18	12-1, 12-2
19	T2-13, T5-4, T9-9	29	16-3, 16-4
20	T2-19, T5-7, T9-8	20	2-1, 2-2
21	T3-12, T7-2, T10-4	9	10-2, 10-3
22	T3-13, T5-18, T11-3	22	6-2, 6-4
23	T3-6, T8-3 T10-1	21	5-1, 5-2
24	T2-4, T6-5, T9-7	30	14-1, 14-9
25	T4-3, T8-2, T9-5	24	9-2, 9-4
26	T2-15, T5-12, T10-2	5	12-3, 12-4
27	T3-19, T5-15, T11-3	7	7-2, 7-3
28	T3-14, T5-19, T11-5	33	8-1, 8-4
29	T2-8, T5-9, T11-6	37	11-2, 11-3
30	T2-12, T5-21, T11-7	34	12-3, 12-4
31	T3-15, T7-3, T11-9	36	4-1, 4-3
32	T4-2, T7-7, T9-7	25	5-3, 5-4
33	T3-3, T8-5, T11-3	31	4-2, 4-4
34	T4-8, T8-10, T10-4	17	2-3, 4-5
35	T3-20, T8-12, T9-11	11	3-5, 16-5

## 7. Контрольные вопросы

1. Электро-технические материалы. Определение. Классификация ЭТМ по группам и подгруппам.
2. Виды химической связи атомов веществ и их краткая характеристика.
3. Энергетическая структура материалов и деление веществ на классы. Энергетические диаграммы.
4. Проводники и их количественные характеристики.
5. Проводниковые материалы с высокой проводимостью и высоким удельным сопротивлением. Их применение.
6. Резистивные материалы и сплавы различного назначения.
7. Диэлектрики. Основное свойство диэлектриков и количественный параметр основного свойства.
8. Виды поляризации диэлектриков. Время установления поляризации. Дисперсия диэлектрической проницаемости.
9. Электропроводность диэлектриков. Токи в диэлектрике. Удельная проводимость, удельное сопротивление (объёмное и поверхностное).
10. Потери и причины возникновения потерь в диэлектриках. Векторная диаграмма напряжения и токов в диэлектрике, тангенс угла диэлектрических потерь.
11. Схемы замещения диэлектриков. Условия эквивалентности схемы замещения реальному диэлектрику.
12. Пробой диэлектриков и виды пробоя. Количественный параметр пробоя.
13. Диэлектрические материалы. Классификация по существующим признакам.
14. Газообразные диэлектрические материалы. Основные параметры. Применение.
15. Жидкие диэлектрические материалы. Области их применения.
16. Твёрдые диэлектрические материалы. Классификация. Методы получения полимерных материалов.
17. Материалы для изоляции проводников и их сравнительные характеристики.
18. Пластмассы, пенопласты, эластомеры. Применение.
19. Лаки, клеи, компаунды. Применение.
20. Волокнистые диэлектрические материалы. Характеристики. Применение.
21. Слоистые пластики. Типы. Применение.
22. Неорганические диэлектрические материалы. Классы. Области применения.
23. Стёкла. Классификационные признаки. Типы стёкол по техническому применению.
24. Керамика. Типы керамических изделий по применению. Ситаллы.
25. Полупроводники собственные и примесные. Энергетические диаграммы.
26. Подвижность носителей заряда. Температурная зависимость подвижности.

27. Температурная зависимость удельной проводимости примесных полупроводников.
28. Фотопроводимость полупроводников.
29. Полупроводниковые материалы. Получение монокристаллов из расплава.
30. Выращивание монокристаллов из жидкой и газовой фазы. Эпитаксия.
31. Основные характеристики кремния, германия, арсенида галлия, карбида кремния. Применение.
32. Магнетики. Классификация. Магнитный атомный порядок.
33. Процесс намагничивания. Магнитная проницаемость и её зависимость от напряжённости внешнего поля.
34. Намагничивание в переменном магнитном поле. Количественные параметры магнетиков.
35. Магнитные материалы: классификация магнитных материалов.
36. Магнитомягкие материалы, свойства, применение.
37. Ферриты: метод получения, свойства, применение.
38. Магнитные материалы специального назначения. Применение.
39. Магнитотвердые материалы: характеристики, применение.

## **8. Варианты контрольных задач и методические указания к их решению**

При составлении задач использовались материалы из методических пособий [16,17].

Решение любой задачи, начинается с определения того, к какому разделу изучаемого курса она относится, и нахождения формулы, при подстановке в которую некоторых промежуточных формул, а затем и числовых значений соответствующих величин можно получить искомый ответ.

При выполнении контрольной работы условие задачи следует записать, а искомые величины поставить под знаком вопроса. Проводя численные расчёты, следует пользоваться правилами приближенных вычислений, т.е. округлять числа до второго знака после запятой и для больших и очень малых чисел пользоваться сомножителем  $10$  в соответствующей степени.

### **Задача №1**

Для плоского конденсатора с диаметром электродов  $D = 10$  мм, толщиной диэлектрика  $d = 0,01$  м при напряжении на электродах  $U = 100$  В рассчитать заряд  $Q$ , который будет на электродах конденсатора при заданном материале диэлектрика и напряжении  $U$  на обкладках.

#### Варианты диэлектриков:

1. Вакуум, полистирол
2. Воздух, фторопласт-4
3. Слюда, полиэтилен.



При решении задачи следует воспользоваться рис. 2.1 из [2], значение  $\epsilon$  найти в соответствующих таблицах [1, 2].

### **Задача №2.**

Определить ёмкость плоского конденсатора с площадью обкладок  $S = 100 \text{ мм}^2$ , толщиной диэлектрика  $d = 0,02 \text{ м}$ , проанализировать результаты и записать ответ на вопрос, какую роль играет материал диэлектрика для значения ёмкости конденсатора заданного размера. Значение  $\epsilon$  найти в соответствующих таблицах [1, 2].

Варианты диэлектриков:

1. Вакуум, слюда
2. Воздух, полиэтилен
3. Слюда, фторопласт-3.

### **Задача №3**

Определить заряд  $Q$  на обкладках плёночного конденсатора с площадью  $S = 0,25 \text{ см}^2$  при напряжениях  $U(10, 20, 30, 40, 50) \text{ В}$  и построить зависимость  $Q = f(U)$  для двух толщин конденсаторов. Числовые значения  $\epsilon$  и  $d$  взять в табл. 3.16 из [2].

Варианты диэлектриков:

1. Плёнка  $\text{SiO}_2$
2. Плёнка  $\text{SiO}$
3. Плёнка  $\text{Ta}_2\text{O}_5$
4. Плёнка  $\text{Si}_3\text{N}_4$
5. Плёнка  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

### **Задача №4.**

Цилиндрический образец диэлектрика диаметром  $D = 20 \text{ мм}$  и длиной  $l = 15 \text{ мм}$  торцами подключен к источнику питания с напряжением  $U = 100 \text{ В}$ . Определить ток, протекающий через образец, и возникающие при этом диэлектрические потери.

Варианты диэлектриков:

1. Полиэтилен
2. Полистирол
3. Фторопласт-4
4. Капрон.

Для решения задачи следует использовать справочные данные, в частности из табл. 3.1 и 3.3 в [2].

Для решения задач № 5 - 12 необходимо найти соответствующую формулу из [6] (с. 113 – 175) и при необходимости воспользоваться значениями параметров из таб. 4.1. в [1].

### Задача №5

Найти эффективную плотность состоящей из  $N_C$  зоны проводимости и  $N_V$  валентной зоны полупроводника при 300 К.

Варианты полупроводников:

1. Ge
2. GaAs
3. InP
4. CdTe.

### Задача №6

Рассчитать равновесные концентрации электронов  $n_0$  и дырок  $p_0$  невырожденного полупроводника при комнатной температуре.

Варианты полупроводников:

1. Si
2. InAs
3. InP
4. CdS.

### Задача №7

Найти положение уровня Ферми в собственном полупроводнике при комнатной температуре, оценить процентное отклонение от полуширины запрещенной зоны.

Варианты полупроводников:

1. Si
2. GaP
3. InAs
4. InSb.

Оцените влияние температуры на относительное изменение положения уровня Ферми для узко- и широкозонных полупроводников.

### Задача №8

Рассчитать температуру истощения примеси  $T_S$  по величине энергии активации примесных носителей заряда  $\Delta E_D$ ,  $\Delta E_A$  и концентрации примеси  $N_D$ ,  $N_A$ , считая, что плотность состояний в зонах  $N_C$ ,  $N_V$  не зависит от температуры.

Варианты материалов, энергий активации проводимости и концентраций примесных атомов:

1. Ge,  $\Delta E_A = 0,05$  эВ,  $N_A = 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$
2. Si,  $\Delta E_D = 0,045$  эВ,  $N_D = 5 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$
3. GaSb,  $\Delta E_A = 0,03$  эВ,  $N_A = 5 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$
4. InP,  $\Delta E_D = 0,008$  эВ,  $N_D = 5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ .

### Задача №9

Определить температуру перехода к собственной проводимости  $T_i$  по известной концентрации примеси  $N_D$ ,  $N_A$ , считая, что плотность состояний в зонах  $N_C$ ,  $N_B$  не зависит от температуры

Варианты материалов и концентраций примеси:

1. GaP,  $N_D = 5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$
2. InSb,  $N_A = 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$
3. CdTe,  $N_D = 3 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$
4. PbS,  $N_A = 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ .

### Задача №10.

Рассчитать удельную проводимость  $\sigma_n$ ,  $\sigma_p$  примесного полупроводника по заданной концентрации примеси  $N_D$ ,  $N_A$ . Сравнить полученные значения, считая примесь донорной, а затем акцепторной. Объяснить разницу полученных значений  $\sigma_n$ ,  $\sigma_p$ .

Варианты материалов и концентраций примеси:

1. GaAs,  $N = 5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$
2. InSb,  $N = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$
3. CdS,  $N = 2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$
4. CdTe,  $N = 5 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ .

### Задача №11

Определить концентрацию носителей заряда в собственном полупроводнике  $n_i$ , если известно его удельное сопротивление  $\rho$ .

Варианты материалов и значений  $\rho$ :

1. Ge,  $\rho = 0,62 \text{ Ом}\cdot\text{м}$
2. Si,  $\rho = 4,2 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$
3. GaP,  $\rho = 4,4 \cdot 10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{м}$
4. PbS,  $\rho = 8,8 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

### Задача №12

Определить красную границу внутреннего фотоэффекта для указанных полупроводников.

Варианты полупроводниковых материалов:

1. GaAs
2. CdS
3. CdSe
4. InSb.

### Задача №13.

Построить по данным таблицы 8.1 основную кривую намагничивания  $B = f(H)$  для электротехнической стали и по этой кривой рассчитать и занести в таблицу значения  $\mu$ , построить зависимость  $\mu = f(H)$ . Какой точке кривой намагничивания соответствует  $\mu_{\max}$

Таблица 8.1

Исходные данные для расчета

H [А/м]	3	5	10	20	50	70	100	200	500	1000
B [Тл]	0,02	0,055	0,42	1,02	1,38	1,47	1,52	1,58	1,67	1,7
$\mu$										

При построении графика учесть, что относительная магнитная проницаемость  $\mu$  определяется по формуле

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H},$$

где  $B$  – индукция [Тл];

$H$  – напряжённость внешнего магнитного поля [А/м];

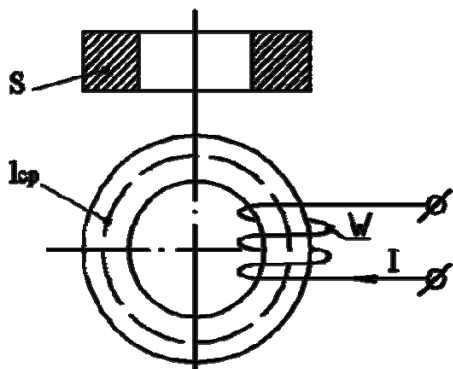
$\mu_0$  – магнитная постоянная [Гн/м].

При решении задачи можно воспользоваться материалом [2] (с. 355).

### Задача №14

Вычислить величину индуктивности обмотки и магнитный поток  $\Phi$  в кольцевом сердечнике из магнетика с размерами: площадь сечения  $S = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ , длина средней силовой линии  $l_{\text{ср}} = 0,2 \text{ м}$ , число витков обмотки  $W = 100$ , ток намагничивания в обмотке  $I = 1 \text{ А}$ .

Индуктивность обмотки вычисляется по формуле:



$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot S \cdot W^2}{l_{\text{ср}}} \quad [\text{Гн}]$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Следует учесть, что магнитный поток  $\Phi$  определяется по формуле:

$$\Phi = L \cdot I \quad [\text{Вб}],$$

где  $L$  – индуктивность [Гн], а  $I$  – ток намагничивания в [А].

Значения относительной магнитной проницаемости  $\mu$  для различных материалов пронумерованы и даны в табл. 8.2. Следует решить задачу для двух образцов из варианта задания и объяснить, как влияет величина  $\mu$  на индуктивность  $L$  и магнитный поток  $\Phi$ .

Таблица 8.2

Значение магнитной проницаемости материалов

№ образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\mu$	50	55	60	65	150	1500	2000	3000	8000	60000
Материал	Магнитодиэлектрики				Магнитомягкие ферриты			Электро-техн. сталь	Пермаллой	

**Задача №15**

Определить работу выхода электронов  $\phi$  из металла, если известна длина волны  $\lambda_k$  красной границы внешнего фотоэффекта.

Варианты материала проводника:

1. Вольфрам,  $\lambda_k = 275$  нм
2. Натрий,  $\lambda_k = 500$  нм.

При решении задачи следует учесть, что работа выхода  $\phi$  [эВ] равна энергии фотона  $E_\phi$ , которая определяется длиной волны  $\lambda_k$ , соответствующей красной границе внешнего фотоэффекта.

**Задача №16**

Нагревательный прибор из проволоки с высоким удельным сопротивлением и мощностью  $W = 600$  Вт работает при напряжении  $U = 220$  В и рабочей температуре  $t = 700$  °С.

Рассчитать длину провода по заданному материалу и диаметру проволоки  $d$ .

Варианты материала и диаметра проволоки:

1. Нихром,  $d = 0,5$  мм
2. Нихром,  $d = 0,4$  мм
3. Нихром,  $d = 0,3$  мм
4. Фехраль,  $d = 0,5$  мм
5. Фехраль,  $d = 0,4$  мм
6. Фехраль,  $d = 0,3$  мм.

Необходимые данные по значениям удельного сопротивления и температурному коэффициенту  $TK_p$  взять из табл. 4.10 из [2] или табл. 2.2 из [1].

**Задача №17.**

Определить абсолютное приращение удельного сопротивления  $\rho$  металла при изменении температуры от  $20$  до  $220$  °С. Сравнить эти величины для двух металлов.

Варианты металлов:

1. Медь, алюминий
2. Медь, железо
3. Золото, платина
4. Серебро, алюминий.

Необходимые данные взять из табл. 11.1 из [2].

## 9. Литература (основная)

1. Казанцев, А. П., Электротехнологические материалы: учеб. пособие / А. П. Казанцев. – Мн.: Дизайн ПРО, 1988, 2001 г.
2. Пасынков, В. В., Материалы электронной техники: учеб. пособие / В. В. Пасынков – М.: ВШ., 1980 г.
3. Пасынков, В. В. Материалы электронной техники / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин, – М., ВШ., 1986 г., «Лань», 2003 г.
4. Преображенский, А. А. Магнитные материалы и элементы / А. А. Преображенский – М.: ВШ., 1976 г.
5. Степаненко, И. П. Основы микроэлектроники / Степаненко И. П. – М., Сов. радио, 1980 г., М.: 2003 г.
6. Шалимова, К. В. Физика полупроводников / К. В. Шалимова – М.: Энергия, 1976 г., М.: Энергоатомизд, 1985г.

## Дополнительная

7. Березин, А. С. Технология и конструирование интегральных микросхем / А. С. Березин, О. Р. Мочалнина – М.: «Радиосвязь», 1983 г.
8. Журавлёва, Л. В. Электроматериаловедение / Л. В. Журавлёва – М.: 2004 г.
9. Калинин, Н. Н. Электрорадио-материалы / Н. Н. Калинин, Г. Л. Скобинский, П. П. Новиков – М.: ВШ., 1981 г.
10. Казанцев, А. П. Радиотехнические материалы: метод. пособие, / А. П. Казанцев – Мн.: МРТИ, 1993 г.
11. Казанцев, А.П. Радиотехнические материалы: лабораторный практикум / А. П. Казанцев – Мн: БГУИР, 2003 г.
12. Курносков, А. И. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / А. И. Курносков, В. В. Юдин. – М.: ВШ, 1976 г.
13. Таиров, Ю. М. Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов / Ю. М. Таиров, В. Ф. Цветков – М.: ВШ., 1983 г.
14. Рычина, Т. А. Электрорадиоэлементы / Т. А. Рычина – М.: Сов. радио, 1976 г.
15. Петров, К. С. Радиоматериалы, радиокомпоненты, электроника / К. С. Петров СПб.: 2004 г.
16. Воробей, З.Ф. Радиотехнические материалы и радиодетали: метод. пособие / З.Ф. Воробей, С.Н. Кураева, Л.М. Раткевич – Мн.: МРТИ, 1983 г.
17. Воробей, З.Ф. Физика полупроводников и диэлектриков: метод. пособие и контрольные задания / З.Ф. Воробей, А.П. Казанцев, И.Н. Лещенко – Мн.: МРТИ, 1984 г.

*Учебное издание*  
**Казанцев** Анатолий Петрович  
**Пачинин** Виталий Иванович  
**Стешенко** Павел Павлович.

## ***Материалы и компоненты электронной техники***

Программа, методические указания и контрольные задания  
для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника»  
вечерней и заочной формы обучения

Редактор Г. С. Корбут  
Корректор Г. С. Корбут  
Компьютерная верстка

---

Подписано в печать . . . . .2010. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.  
Печать ризографическая. Гарнитура "Таймс". Усл. печ. л.  
Уч.-изд. л.. Тираж 50 экз. Заказ 100.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Учреждение образования  
"Белорусский государственный университет информатики и радиоэлек-  
троники".

Лицензия  
Лицензия

220013, Минск, П. Бровки, 6

