

№ 2593

Д.Г. Крутогин

# **Функциональные материалы электроники и их технологии**

Учебное пособие

**№ 2593**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра технологии материалов электроники

Д.Г. Крутогин

# **Функциональные материалы электроники и их технологии**

Учебное пособие

Рекомендовано редакционно-издательским  
советом университета



Москва 2015

УДК 621.318.1  
К84

Рецензенты

д-р физ.-мат. наук, проф. *А.Н. Ковалев*;  
канд. физ.-мат. наук, доц. *М.Д. Малинкович*

**Крутогин Д.Г.**

К84      Функциональные материалы электроники и их технологии : учеб. пособие / Д.Г. Крутогин. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2015. – 98 с.  
ISBN 978-5-87623-907-5

Рассмотрены основные физико-химические свойства материалов, используемых в радиоэлектронной аппаратуре. Для основных четырех групп материалов – полупроводников, металлов, диэлектриков и магнетиков приведены свойства, определяющие их функциональность, и рассмотрены базовые технологии получения.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 222 900 «Нанотехнологии и микросистемная техника» или 210 100 «Электроника и наноэлектроника» в рамках соответствующей дисциплины бакалаврского учебного плана.

**УДК 621.318.1**

ISBN 978-5-87623-907-5

© Д.Г. Крутогин, 2015  
© НИТУ «МИСиС», 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	5
1. Материалы и их важнейшие свойства .....	7
1.1. Понятия и определения науки о материалах .....	7
1.2. Материалы – основы классификации .....	8
1.3. Основы взаимодействия веществ .....	9
1.4. Физико-химические свойства материалов .....	12
1.5. Механические свойства. ....	13
1.6. Теплофизические свойства .....	17
1.7. Электрические свойства материалов .....	20
1.8. Оптические свойства материалов .....	22
2. Полупроводники .....	24
2.1. Собственная проводимость .....	24
2.2. Примесная проводимость .....	26
2.3. Ширина запрещенной зоны .....	28
2.4. Примеси и концентрация носителей заряда .....	30
2.5. Подвижность носителей заряда .....	31
2.6. Время жизни неосновных носителей .....	32
2.7. Кремний – основной материал полупроводниковой электроники .....	34
2.8. Другие полупроводники для РЭА .....	36
2.9. <i>p-n</i> -переход .....	39
2.10. Контакт металл–полупроводник .....	40
3. Проводники .....	42
3.1. Особенности электропроводности металлов .....	42
3.2. Теплопроводность металлов .....	44
3.3. Структура металлов .....	44
3.4. Металлические пленки .....	46
3.5. Резистивные материалы .....	50
3.6. Проводящие материалы для металлизации и коммутации .....	51
3.7. Особенности использования проводников на высоких частотах .....	52
4. Диэлектрики .....	55
4.1. Пьезоэлектрики (пьезоэффект) .....	57
4.2. Спонтанная поляризация .....	59
4.3. Проводимость и пробой диэлектриков .....	61
4.4. Электрическая прочность диэлектриков .....	62

4.5. Диэлектрические потери.....	63
4.6. Технологии диэлектрических материалов .....	65
4.7. Технологии диэлектрических и магнитных керамик.....	65
4.8. Технология монокристаллического кварца.....	68
4.9. Технологии диэлектрических монокристаллов .....	69
4.10. Стекла для РЭА и их технологии .....	70
4.11. Основные применения диэлектриков .....	72
5. Магнитные материалы электроники.....	74
5.1. Магнитомягкие металлические сплавы.....	75
5.2. Магнитотвердые металлические сплавы.....	78
5.3. Магнитотвердые материалы для записи и хранения информации.....	79
5.4. Ферритовые магнитные материалы .....	80
5.5. Основные применения магнитных материалов в РЭА .....	84
6. Сверхпроводящие материалы.....	87
Вопросы для самоконтроля .....	89
Библиографический список .....	92
Глоссарий .....	94

## Введение

Академик Ю.Д. Третьяков, анализируя роль материалов в разных сферах жизнедеятельности человека, использовал схему, приведенную на рисунке. Как видно, материалы делятся на две основные группы: конструкционные и функциональные. Принято считать конструкционными материалы, используемые человеком, чтобы противостоять механическим нагрузкам. Действительно, первые материалы – дерево, кость, кожа (материалы биологического происхождения) и камень применялись, чтобы создать или противостоять механическим воздействиям. Позже людей заинтересовали теплофизические свойства (дом из шкур, из дерева, из кирпича хорошо удерживал тепло), оптические (стекла) и, наконец, в XVIII–XX веках пришел интерес к электрическим свойствам. С развитием машинных технологий совокупность физико-химических свойств некоторых материалов оказалась более важной, чем только механические свойства. Так, медь и ее сплавы (бронзовый век) как конструкционный материал уступили сплавам железа, но как материал высокой электро- и теплопроводности, хорошей коррозионной стойкости медь практически незаменима.



Рис. Материалы, используемые человеком [1]

Вот об этих свойствах или их совокупности мы говорим как о функциональных (служебных), т.е. оптимальным образом отвечающих особенностям применения. Следовательно, функциональные материалы можно определить как материалы, обладающие специфическими, максимальными параметрами для тех или иных технических применений. При этом конструкционные характеристики функциональных материалов сохраняют значимость, но как бы отходят на второй план. Применительно к задачам электронной техники из 88 металлов Периодической системы функциональными материалами можно считать медь (высокая проводимость), алюминий (высокая проводимость и хорошая испаряемость), золото (уникальная пластичность, высокая проводимость и коррозионная стойкость). А вот набор конструкционных материалов для электроники гораздо шире – тут и алюминий, и пластмассы, и стекло, и композитные слоистые пластики.

Сопутствующими и важными факторами оценки материалов являются технологические (пригодность к обработке) и потребительские качества.

Функциональные материалы электроники различаются главным образом по электрическим свойствам: полупроводники, металлы, диэлектрики. В ряде устройств электроники существенным оказываются магнитные свойства металлических сплавов или магнитных диэлектриков и, следовательно, эти свойства становятся функциональными. Для оптоэлектронных устройств функциональными являются оптические или электрооптические.

Цель настоящего пособия – рассмотрение основных функциональных свойств, востребованных современной радиоэлектроникой, и важнейших групп материалов, проявляющих такие свойства, т.е. функциональных материалов электронной техники.

# 1. МАТЕРИАЛЫ И ИХ ВАЖНЕЙШИЕ СВОЙСТВА

## 1.1. Понятия и определения науки о материалах

Отметим различия между веществом и материалом.

*Вещество* – совокупность связанных атомов, молекул или ионов. Форма веществу не присуща.

*Материал* – продукт частичной переработки вещества в изделие, отвечающий потребностям производства. Материал имеет определенный состав, структуру и внешнюю форму. Например, сталь – вещество, а стальная проволока – материал, который может использоваться непосредственно или, скажем, для изготовления гвоздей или скрепок. Часто материал уже в наименовании несет целевое назначение. Например, «солнечный» кремний (материал для солнечных батарей), «электронный» кремний (материал для электронных приборов и микросхем).

В ряде случаев понятие «материал» совмещено с понятием «изделие», например, *эпитаксиальная структура*.

**Материаловедение – наука о взаимосвязях в триаде: состав (вещества) – структура – свойства (материала).**

Здесь понятие «структура» характеризует размещение атомов в веществе. Только за счет изменений состава или только управляя структурой свойства материала не оптимизируешь.

Далее будут использованы только отдельные понятия материаловедения.

Основное свойство материала – *стабильность*, поэтому газы и жидкости, которым не свойственна стабильная форма, рассматриваются не как материалы, а как вещества, хотя некоторые газы и жидкости применяются в компонентах электронных устройств (например, газовые среды плазменных дисплеев, жидкие кристаллы индикаторных панелей и дисплеев).

*Стабильность* – сохранение строения и формы материала в некоторых пределах изменения внешних условий (например, в интервале температур  $-60^{\circ} \dots + 120^{\circ} \text{C}$ ) и в течение длительного времени.

Изменчивость свойств материалов абсолютна, а стабильность материала относительна. Движение носителей заряда, диффузия и миграция атомов, дефекты структуры, их накопление и взаимодействие друг с другом обуславливают непреодолимую изменчивость свойств



материалов. В некоторых случаях нам приходится говорить о старении материалов, как о закономерном процессе изменения их свойств.

Сущность вещества и материала – его атомный (химический) состав и тип химических связей в нем. Свойство – практически важная сторона сущности. Свойство – черта именно данного материала. Мерило свойства – параметр – выраженное численно, измеренное определенным (общепринятым) образом значение свойства.

Для характеристики вещества достаточно свойств. Для технического материала нужно качество. *Качество* – способность материала выполнять в изделии заданные функции. Качество всегда относят к изделию, но с оговорками и к материалу. Для некоторых приборов данный материал обладает высоким качеством, но для других приборов этого недостаточно.

Рассматривая упомянутый выше пример с солнечным кремнием, отметим, что качественный солнечный кремний, как правило, совершенно не пригоден для изготовления микроприборов.

Ценность того или иного материала часто определяется его универсальностью, т.е. пригодностью для многих назначений. Далее будет показано, что этим и хорош, например, кремний для электроники.

Электроника впервые как отрасль техники сделала ставку на *монокристаллы*, как основной тип структурного состояния материала. Именно монокристаллы обеспечивают однородность свойств в разных частях материала, их воспроизводимость, применимость теоретических моделей формирования нужных свойств к реальным объектам. Поэтому в большинстве случаев технология электроники включает в себя технологию получения и обработки монокристаллов.

Управление свойствами за счет структуры достигает иногда такого совершенства, что, например, кремний удается получить в виде полупроводника, проводника или изолятора только путем формирования в нем разных типов и концентрации примесных и структурных дефектов.

## **1.2. Материалы – основы классификации**

В принципе в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) важнейшие используемые свойства материалов – электрические и связанные с ними: электрооптические, магнитоэлектрические, акустоэлектрические и т.п.

Основы классификации, привязанной к типу химической связи и структурному состоянию иллюстрирует схема на рис. 1.1.