

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

№ 822

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ИНСТИТУТ СТАЛИ и СПЛАВОВ
Технологический университет



Кафедра технологии материалов электроники

Материалы и элементы электронной техники

Курс лекций

Рекомендовано редакционно-издательским
советом института

Москва Издательство «УЧЕБА» 2006

УДК 621.318
М33

Рецензент
д-р физ.-мат. наук, проф. *В.В. Гераськин*

Автор-составитель Д.Г. Крутогин

Материалы и элементы электронной техники: Курс лекций. –
М33 М.: МИСиС, 2006. – 73 с.

Рассмотрены основные свойства и области применения электронных материалов – полупроводников, проводников и диэлектриков.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальностям 210104 (2001), 140400 (5531), 210100 (5507) в рамках курса «Материалы и элементы электронной техники».

© Московский государственный институт
стали и сплавов (технологический
университет) (МИСиС), 2006

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	4
1. Материалы и их важнейшие свойства	5
1.1. Сущность, свойство, качество материала	5
1.2. Материалы – основа классификации	6
1.3. Основы взаимодействия веществ.....	7
1.4. Свойства материалов.....	9
1.5. Механические свойства	11
1.6. Теплофизические свойства	14
1.7. Электрические свойства материалов	16
1.8. Оптические свойства материалов	18
2. Полупроводники	21
2.1. Собственная и примесная проводимости	21
2.2. Ширина запрещенной зоны E_g	25
2.3. Примеси и концентрация носителей заряда.....	27
2.4. Подвижность носителей заряда.....	28
2.5. Время жизни неосновных носителей τ	29
2.6. Кремний – основной материал полупроводниковой электроники.....	30
2.7. Другие полупроводники для РЭА.....	33
2.8. p - n -переход	35
2.9. Контакт металл – полупроводник	36
2.10. Граница полупроводник – диэлектрик	38
3. Проводники	39
3.1. Особенности электропроводности металлов	40
3.2. Структура металлов.....	42
3.3. Металлические пленки.....	44
3.4. Резистивные материалы	48
3.5. Проводящие материалы для металлизации и коммутации.....	49
3.6. Особенности использования проводников на высоких частотах (скин-эффект).....	50
4. Диэлектрики	52
4.1. Пьезоэлектрики (пьезоэффект)	54
4.2. Спонтанная поляризация	56
4.3. Проводимость диэлектриков	58
4.4. Электрическая прочность диэлектриков	59
4.5. Диэлектрические потери.....	60
4.6. Основные применения диэлектриков	61
Приложение.....	64
Вопросы экзаменационных билетов	69
Библиографический список.....	72

Предисловие

Первый раздел пособия посвящен основным свойствам, характеризующим любой материал, далее следуют разделы, в которых рассматриваются три основных класса электронных материалов: полупроводники, проводники, диэлектрики. Опыт показал, что на некоторые важные, актуальные, но частные проблемы материаловедения радиотехники и электроники (стекла и стеклокомпозиты, сверхпроводники, в том числе высокотемпературные, магнитные материалы, материалы квантовой оптики и т.п.) в установленном объеме курса не хватает времени. Поэтому краткие сведения по этим материалам приведены в приложении.

В основу данного курса лекций положена выборка из основных разделов учебного пособия, составленного авторским коллективом преподавателей МАИ под редакцией В.М. Андреева «Материалы и компоненты микроэлектроники».

1. МАТЕРИАЛЫ И ИХ ВАЖНЕЙШИЕ СВОЙСТВА

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 это вещество, а стальная проволока, стальной лист – материалы. Часто материал уже в наименовании несет целевое назначение, так, «солнечный кремний», «электронный кремний» предназначены для электроники.

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

Материаловедение – наука о связи: состав (вещества) – структура – свойства (материала).

Здесь понятие «структура» характеризует пространственное расположение атомов. Только за счет изменений состава или только управляя структурой свойства материала не оптимизируешь. Надо изучать и учитывать взаимосвязь этих факторов.

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... + 120 °С) 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 необходимо говорить о старении материалов, как о закономерном процессе изменения их свойств.

1.1. Сущность, свойство, качество материала

Сущность вещества и материала – его 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.

Эффективность того или иного материала часто определяется его универсальностью, т.е. пригодностью для многих назначений, форм, условий.

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.

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

В тонких пленках металлов и полупроводников исследователи обнаружили ряд отличий от объемных свойств тех же веществ:

- размерные эффекты (зависимость некоторых свойств от толщины пленки);
- механические напряжения на границе пленка – подложка;
- неравномерность химического состава по толщине и площади, электромиграцию и электродиффузию.

Потребовалось создание теории тонких пленок для объяснения выявленных особенностей таких материалов.

1.2. Материалы – основа классификации

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

Классификация материалов представлена на рис. 1.1.

Данная классификация полезна, но не безусловна. Реально химические связи чаще всего «гетеродесмические»; например к ионным и металлическим связям всегда подмешивается доля ковалентных. А свойства материалов наследуются от связей. Поэтому вопреки принятым обобщениям есть достаточно хрупкие металлы, вырожденные (похожие на металл) полупроводники.

Обобщенно можно утверждать, что монокристаллическое состояние наиболее важно для полупроводников, аморфное – благоприятно для диэлектриков, поликристаллическое – для металлов.



Рис. 1.1. Классификация материалов электронной техники по составу, структуре и электропроводности

1.3. Основы взаимодействия веществ

Многие материалы состоят из нескольких химических элементов. Смешение веществ A , B , C , и т.д. легко реализуется в газах (идеально) – образуется раствор, труднее, но часто возможно, в жидкостях.

Рассмотрим некоторые результаты смешения элементов (веществ).

Разнородные атомы в реальности не те инертные разноцветные шарики, которые демонстрируются на кристаллографических моделях. Сближаясь при упорядочении в структуру твердого тела атомы проявляют определенное химическое родство (или несродство) друг к другу. Поэтому возможны разные результаты смешения. Например, олово и свинец – близкие по свойствам (тяжелые, мягкие, легкоплавкие) металлы IV группы Периодической системы элементов Менделеева (ПС). При совместной кристаллизации расплава их атомы проявляют странное несродство: а именно стремятся выстраивать связи с себе подобными. В результате получившийся сплав представляет твердую смесь микрокристаллов свинца и олова (кстати, это необходимый материал электроники – припой).

Другой возможный вариант смешения: атомы $A \leftrightarrow B$ проявляют сильное родство друг к другу. Происходит химическая реакция, в результате которой образуется новая кристаллическая решетка, у нового вещества имеется собственная температура плавления и, естественно, свой набор свойств, отличных от свойств исходных A и B . Пример сильного химического родства элементов той же IV группы ПС: $Si + C = SiC$ (карбид кремния).

Третий, весьма распространенный, вариант смешения: при плавлении A растворяется в B или B растворяется в A (неограниченно или частично, до некоторой степени), при затвердевании расплава получается