

О.М. Жигалина

Материалы микроэлектроники: тонкие пленки для интегрированных устройств

Учебное пособие



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н. Э. Баумана

2017

УДК 539.23+539.24

ББК 32.843.4

Ж68

Издание доступно в электронном виде на портале *ebooks.bmstu.ru*
по адресу: <http://ebooks.bmstu.ru/catalog/46/book1701.html>

Факультет «Машиностроительные технологии»

Кафедра «Материаловедение»

*Рекомендовано Редакционно-издательским советом
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебного пособия*

Рецензенты:

академик РАН *А.С. Сигов*,

член-корреспондент РАН *Н.А. Киселев*

Жигалина, О. М.

Ж68 Материалы микроэлектроники : тонкие пленки для интегрированных устройств / О. М. Жигалина. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. — 121, [3] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4743-5

Изложены основные понятия, относящиеся к науке о строении и свойствах сегнетоэлектрических материалов. Рассмотрены примеры применения и перспективы использования сегнетоэлектрических пленок в интегрированных устройствах современной микроэлектроники, а также основные тенденции развития материалов и технологий в этой области. Подробно рассмотрены вопросы формирования и визуализации структуры многослойных композиций на основе тонких пленок и границ раздела пленка — подложка на атомном уровне с помощью методов электронной микроскопии и моделирования изображений высокого разрешения, а также принципы создания наноструктур в пористых матрицах. Издание иллюстрирует возможности применения методов современного структурного анализа к исследованию и визуализации микро- и наносистем.

Для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов». Пособие может быть полезно аспирантам, научным и инженерно-техническим работникам, специализирующимся в области материаловедения тонкопленочных материалов.

УДК 539.23+539.24

ББК 32.843.4

ISBN 978-5-7038-4743-5

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

© Оформление. Издательство

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Предисловие

Цель изучения дисциплины «Материалы микро- и нанoeлектроники» — освоение общих принципов материаловедения и наукоемких технологий, базирующихся на фундаментальной связи «состав — структура — свойства вещества», для создания новых материалов в микро- и нанoeлектронике.

В процессе изучения дисциплины студенты овладеют базовыми знаниями о принципах формирования, свойствах, возможностях и перспективах применения новых материалов для микро- и нанoeлектроники, методами анализа их структуры и свойств композиций на их основе, способами управления структурой и свойствами, практическими навыками исследования процессов, используемых при создании новых материалов.

Программой дисциплины предусматривается наличие у студентов первоначальных знаний по следующим дисциплинам: «Физика», «Химия», «Физика металлов» (основы кристаллографии, дефекты кристаллического строения), а также «Металлография», «Физика высокопрочного состояния», «Неметаллические и композиционные материалы», «Термодинамика неравновесных процессов», «Современные методы исследования материалов», «Физика и химия поверхности», «Физические свойства и разработка прецизионных сплавов».

Широкое применение сегнетоэлектрических пленок в микро- и нанoeлектронике обуславливает необходимость решения ряда важных задач, к которым относятся оптимизация состава, толщины слоев, выбор материалов и типа систем металлизации, получение пленок высокой однородности. Тонкие пленки цирконата-титаната свинца (ЦТС) и титаната бария-стронция (ТБС) являются важнейшими компонентами в технологии создания интегрированных сегнетоэлектрических устройств. Этим материалам в учебном пособии уделено значительное внимание, представлен обширный иллюстративный материал в виде микрофотографий структур, полученных методами электронной микроскопии, чем продемонстрированы, в том числе, современные возможности исследования объектов микроэлектроники.

Ознакомление с сегнетоэлектрическими материалами в пособии начинается с изучения явления сегнетоэлектричества и фазовых переходов в массивных материалах, в частности перовскитах. Эти вопросы рассмотрены в главе 1. Для усвоения этого материала студентам требуется знание основ кристаллографии, изучаемой на младших курсах.

В главе 2 содержатся сведения о современных методах получения пленок, обсуждаются преимущества и недостатки каждого метода.

В главе 3 подробно рассмотрено влияние различных видов термической обработки на структуру и фазовый состав как самих пленок, так и многослой-

ных композиций на их основе. Особое внимание уделено сопоставлению механизмов кристаллизации пленок ЦТС и ТБС, обуславливающих принципиальные различия в их структуре.

Для успешной работы специалистам-материаловедам необходимы базовые представления о технологиях создания и архитектуре современных интегрированных устройств микроэлектроники. В связи с этим в главе 4 содержатся сведения об основных типах памяти, интегрированных сегнетоэлектрических устройствах, запоминающих устройствах с произвольной выборкой на основе перовскитов, рассмотрены примеры применения активных диэлектриков в устройствах сверхвысокочастотного диапазона.

Принято считать, что существует два основных принципа создания микро- и наноструктур. Принцип «сверху вниз» означает миниатюризацию традиционных микроэлектронных схем и микроэлектромеханических устройств вплоть до размеров 1...100 нм с помощью усовершенствованных методов и процессов, используемых в технологии, новых нетрадиционных процессов, новых материалов и новых физических эффектов. Этот принцип, рассмотренный в главе 5, лежит в основе создания, например, тонких пленок и наноструктур в пористых матрицах. Принцип «снизу вверх» означает создание наноприборов и наноустройств, собранных из молекул и атомов. Второй принцип остается за рамками учебного пособия.

Дисциплина «Материалы микро- и нанoeлектроники» включает три модуля, изучаемых последовательно в течение одного семестра.

Модуль 1 «Материалы микроэлектроники» содержит информацию о классификации микро- и наноструктурных материалов, перспективах развития нового поколения устройств приема, обработки и хранения информации на основе сегнетоэлектрических пленок, о физических и химических методах получения тонких пленок. Особое внимание уделено принципам формирования структурного состояния перовскитов — ЦТС и ТБС, кристаллизованных в виде пленок или структур в каналах пористых матриц.

Модуль 2 «Материалы нанoeлектроники» содержит сведения о полупроводниковых гетероструктурах, сверхрешетках, ферромагнитных материалах, мультиферроиках и композитах на основе углеродных наноматериалов, а также о методах их формирования и устройствах на их основе.

Модуль 3 «Методы визуализации и исследования структуры материалов для микро- и нанoeлектроники» содержит информацию о методах подготовки материалов для структурных исследований, а также современных методах электронной кристаллографии, электронной микроскопии для исследования структуры материалов микро- и нанoeлектроники с субангстремным разрешением.

Материал, рассмотренный в учебном пособии, в полном объеме соответствует первому модулю дисциплины «Материалы микро- и нанoeлектроники». После изучения первого модуля студенты смогут выбрать метод получения пленок и нанесения их на подложку, способы и режимы термической обработки для формирования оптимальной структуры сегнетоэлектрических пленок с высокими электрофизическими свойствами; обобщить

и проанализировать информацию о современном состоянии и перспективах развития тех или иных материалов микроэлектроники; представить результаты работы с информацией в виде аналитических обзоров и презентаций; назвать и объяснить понятия и термины, в том числе на английском языке, описывающие виды интегрированных устройств микроэлектроники, методы создания многослойных композиций на основе тонких пленок, структурные особенности материалов микроэлектроники, указать их назначение и выполняемые функции.

Для успешного освоения курса студентам рекомендуется следующая методика проработки материала:

первая неделя — получение учебного материала по тематике модуля, вводная лекция, постановка целей и задач, представление основных ресурсов Интернета для расширения области поиска информации, получение задания на самостоятельную домашнюю проработку учебного материала;

вторая и третья недели — проработка по презентации и раздаточным материалам ключевых положений, понятий и терминов, получение задания на поиск и обобщение информации с использованием рекомендованной литературы и сети Интернет;

четвертая неделя — консультация по проработанному материалу, обсуждение результатов подготовки рефератов по тематике модуля, обсуждение вопросов предстоящего теста;

пятая неделя — контрольное мероприятие по оценке освоения модуля: письменное задание по проработанному материалу, сдача рефератов по тематике модуля.

В пособии используется большое число сокращений, принятых в специальной литературе по изучаемой тематике, которые могут быть незнакомы студентам, поэтому аббревиатуры объединены в список и помещены в начале изложения. В этом же списке имеются англоязычные эквиваленты, которые необходимы при чтении специальной литературы и в сфере профессиональных коммуникаций. В конце каждой главы приведены контрольные вопросы, в конце пособия дан поглавный перечень основной и дополнительной литературы. В приложениях можно найти некоторые примеры применения сегнетоэлектрических микро- и наноструктур в микроэлектронике (приложение 1), словарь терминов (приложение 2), а также фонд оценочных средств для проведения аттестации (приложение 3).

Учебное пособие по курсу «Материалы микро- и нанoeлектроники» предназначено для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов». Рассмотренный в пособии материал может быть полезен магистрантам при выполнении курсовых и дипломных проектов, проведении научно-исследовательской работы. Пособие также будет интересно аспирантам и молодым специалистам, работающим в области материаловедения современных тонкопленочных материалов.

Автор благодарен профессорам К.А. Воротилову, В.М. Мухортову, Е.Д. Мишиной, кандидатам технических наук Д.С. Серегину, Н.М. Котовой, кандидату

физико-математических наук Н.Б. Дьяконовой, коллегам из отдела «Электронная кристаллография» ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН — кандидатам физико-математических наук Д.Н. Хмеленину, А.Н. Кусковой, Р.В. Гайнутдинову за многолетнее плодотворное сотрудничество в области исследования сегнетоэлектрических материалов для микро- и наноэлектроники. Особую признательность хотелось бы выразить академику РАН А.С. Сигову, члену-корреспонденту РАН Н.А. Киселеву и кандидату технических наук Р.С. Фахуртдинову за поддержку и ценные советы при подготовке пособия.

Введение

Необходимость решения проблемы микроминиатюризации изделий электронной техники является мощным стимулом для поиска новых материалов — носителей информации. С этой точки зрения интеграция сегнетоэлектрических материалов и технологий микроэлектронного производства открывает возможность создания в современной электронике нового поколения элементной базы.

В последние годы вырос интерес к исследованию наноструктурированных тонких поликристаллических и эпитаксиальных пленок (сегнетоэлектриков, ферромагнетиков, мультиферроиков и др.). Использование материалов в микроэлектронике в значительной мере определяется уровнем технологии создания их в пленочном виде. Различие свойств пленочных материалов и массивных образцов можно объяснить тремя основными факторами: размерными эффектами, плотностью структурных дефектов и характером взаимодействия пленки с подложкой. Так, использование сегнетоэлектрических пленок в качестве активного элемента в электронных устройствах обусловило появление комплекса проблем, которые можно объединить под названием «пленочное материаловедение сложных оксидов».

Огромный потенциал этой области деятельности стал понятен около двух десятилетий назад, что нашло отражение в появлении нового междисциплинарного направления — «интегрированные сегнетоэлектрики». В настоящее время фактически совершается переход от цифровой интегральной микроэлектроники к функциональной, в которой динамические неоднородности (в нашем рассмотрении — сегнетоэлектрические домены) используются в качестве носителей информации.

Однако практическое применение сегнетоэлектрических пленок в микроэлектронике ограничивается отсутствием совместимых технологий получения тонкопленочных сегнетоэлектрических материалов высокого качества с воспроизводимыми свойствами. Использование в технологиях многокомпонентных соединений (перовскитов) с высокими температурой кристаллизации, скоростью диффузии и реакционной способностью компонентов значительно усложнило технологический процесс и привело к необходимости разработки десятков новых технологических операций. В последние годы удалось добиться контролируемой совместимости тонких слоев сегнетоэлектриков с полупроводниковыми коммутационными матрицами в рамках планарной технологии полупроводниковых приборов.

Создание интегральных схем (ИС) с элементами субмикронных размеров (в десятки нанометров) обусловило необходимость не только вовлечения в микро- и наноэлектронику новых материалов, но и использования оборуду-

Оглавление

Предисловие	3
Введение	7
Список сокращений	9
1. Общие сведения о сегнетоэлектриках	11
1.1. Поляризация сегнетоэлектриков	11
1.2. Фазовые переходы в сегнетоэлектриках	13
1.3. Феноменологическая теория сегнетоэлектриков	15
1.4. Структура перовскитов	19
1.5. Фазовые переходы на примере титаната бария	21
1.6. Другие соединения сегнетоэлектриков	23
Контрольные вопросы	25
2. Методы получения пленок и механизмы их роста	26
2.1. Механизмы роста пленок	26
2.2. Физические методы получения пленок	27
2.3. Химические методы получения пленок	32
Контрольные вопросы	38
3. Формирование структуры многослойных композиций на основе сегнетоэлектрических пленок	40
3.1. Многослойные композиции на основе пленок цирконата-титаната свинца	40
3.2. Формирование структуры слоев металлизационной системы	56
3.3. Легирование пленок цирконата-титаната свинца лантаном	59
3.4. Структура пленок титаната бария и титаната бария-стронция	62
3.5. Механизмы кристаллизации пленок цирконата-титаната свинца и титаната бария-стронция	68
3.6. Сегнетоэлектрические пленки на диэлектрических подложках	72
3.7. Влияние лазерного отжига на структуру пленок цирконата-титаната свинца и титаната бария-стронция	73
3.8. Эпитаксиальные ультратонкие пленки для устройств сверхвысокочастотного диапазона	75
Контрольные вопросы	82
4. Применение сегнетоэлектрических пленок в составе интегрированных запоминающих устройств	84
4.1. Основные типы памяти	84
4.2. Энергонезависимые перепрограммируемые запоминающие устройства на основе пленок цирконата-титаната свинца	85
4.3. Запоминающие устройства с произвольной выборкой на основе пленок титаната бария-стронция с высокой диэлектрической проницаемостью	91
Контрольные вопросы	96
5. Сегнетоэлектрики в каналах пористых матриц	97
Контрольные вопросы	103
Литература	104
<i>Приложение 1. Применение сегнетоэлектрических микро- и наноструктур в микроэлектронике</i>	<i>109</i>
<i>Приложение 2. Словарь терминов</i>	<i>116</i>
<i>Приложение 3. Фонд оценочных средств для проведения текущей и промежуточной аттестации студентов по первому модулю дисциплины «Материалы микро- и нанoeлектроники»</i>	<i>119</i>