

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

**КОНТАКТНО-БАРЬЕРНЫЕ СТРУКТУРЫ
СУБМИКРОННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Под редакцией академика НАН Беларуси А. П. Достанко и
доктора технических наук В. Л. Ланина

Минск
«Бестпринт»
2021

Контактно-барьерные структуры субмикронной электроники / А. П. Достанко [и др.] ; под ред. акад. НАН Беларуси А. П. Достанко и д-ра техн. наук В. Л. Ланина. – Минск : Бестпринт, 2021. – 270 с. : ил. – ISBN 978-985-7267-10-1.

В издании рассмотрены и обобщены результаты исследований и разработок в области формирования контактно-барьерных структур в изделиях субмикронной электроники и оборудования для микроэлектронного производства и диагностики структур полупроводниковой микроэлектроники.

Предназначена для инженерно-технических работников предприятий электронной и других отраслей промышленности, специалистов научно-исследовательских институтов, аспирантов, магистрантов и студентов старших курсов технических вузов.

Рекомендовано к изданию Советом БГУИР, протокол № 1 от 24.09.2021

Авторы:

А. П. Достанко, Н. В. Богущ, С. В. Бордусов, В. П. Василевич,
Д. В. Гульпа, М. Е. Збышинская, Н. С. Ковальчук, И. И. Кузьмар, Л. К. Кушнер,
В. Л. Ланин, С. И. Мадвейко, А. Н. Петлицкий, И. Б. Петухов, Я. А. Соловьев,
Е. В. Телеш, О. И. Тихон

Рецензенты:

академик НАН Беларуси, доктор физико-математических наук,
профессор *С. Я. Килин*;
член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук,
профессор *В. А. Пилипенко*

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
Глава 1. Формирование трехмерных токопроводящих микроструктур методом нестационарного электролиза (Кузьмар И.И., Богуш Н.В., Кушнер Л.К., Гульна Д.В.)	9
1.1. Формирование контактных структур импульсным осаждением сплавов олова	9
1.2. Закономерности формирования и свойства композиционных электрохимических покрытий.....	20
1.3. Электрохимическое формирование трехмерных медных микроструктур при создании токопроводящих межсоединений	33
1.3.1 Исследование влияния состава электролита и режима электролиза на закономерности электрохимического меднения	34
1.3.2. Электрохимическое заполнение TSV-отверстий в условиях нестационарного электролиза при формировании межсоединений	41
Литература.....	47
Глава 2. Формирование прозрачных контактов и диэлектрических слоев с низкой диэлектрической проницаемостью в микроэлектронных структурах (Телеш Е.В., Достанко А.П.)	52
2.1. Формирование прозрачных проводящих контактных слоев с низким электрическим сопротивлением	52
2.1.1 Формирование прозрачных токопроводящих покрытий на основе оксида индия ионно-лучевым распылением керамических мишеней	53
2.1.2. Формирование прозрачных контактов на полимерных подложках ионно-лучевым распылением керамических мишеней	57
2.1.3. Прозрачные контакты с использованием тонких пленок серебра	60
2.1.4. Прозрачные контакты с использованием тонких пленок меди	64
2.2. Плазменный синтез изолирующих диэлектрических слоев из SiOF	65
2.3. Плазменный синтез изолирующих диэлектрических слоев из SiOC	69

2.3.1. Исследование процессов формирования пленок SiOC реактивным ионно-лучевым распылением мишеней из диоксида кремния и кремния	69
2.3.2. Синтез покрытий SiOC реактивным ионно-лучевым распылением составной мишени SiO ₂ /C	73
Литература	78
Глава 3. Формирование контактно-барьерных структур кремниевых диодов Шоттки диффузионным синтезом силицидов быстрой термообработкой (Соловьёв Я.А.)	80
3.1. Структуры кремниевых диодов Шоттки для силовой электроники и предъявляемые к ним требования.....	80
3.2. Управление электрофизическими свойствами контактно-барьерных структур.....	87
3.3. Методы формирования силицидов для контактно-барьерных структур кремниевых диодов Шоттки	90
3.4. Особенности диффузионного синтеза силицидов быстрой термообработкой.....	94
3.5. Влияние условий быстрой термообработки структур Cr/Si, Ni/Si, Ni- Pt- V/Si на параметры силицидных слоев.....	97
3.5.1. Контактно-барьерные структуры, полученные БТО пленок хрома на кремнии	97
3.5.2. Контактно-барьерные структуры, полученные БТО пленок никеля на кремнии	103
3.5.3. Контактно-барьерные структуры, полученные БТО пленок сплава Ni- Pt-V на кремнии	109
Литература.....	113
Глава 4. Электрометрические методы контроля параметров барьерных полупроводниковых структур (Петлицкий А.Н.)	117
4.1. Бесконтактная характеристика пластин со структурой кремний-диэлектрик с помощью коронного разряда и регистрации потенциал поверхности.....	117
4.1.1 Модель формирования потенциального рельефа пластины со структурой кремний-диэлектрик при воздействии коронного разряда	117

4.1.2. Формирование области пространственного заряда в структуре осажденный заряд-диэлектрик-полупроводник	117
4.1.3. Бесконтактное измерение времени жизни неравновесных носителей заряда	133
4.1.4. Измерение длины диффузии неравновесных носителей заряда....	138
4.1.5. Определение концентрации железа в кремнии.....	140
4.1.6. Измерение параметров тонкого диэлектрика	141
4.2. Оборудование для контроля параметров барьерных полупроводниковых структур электрометрическими методами.....	146
Литература	151
Глава 5. Наноразмерные диэлектрические структуры в субмикронной микроэлектронике (Ковальчук Н.С.)	154
5.1. Технологический процесс формирования оксида быстрым термическим отжигом (БТО).....	155
5.2. Формирование наноразмерных слоев оксида кремния методом БТО	162
5.3. Формирование мемристорных структур	173
Литература.....	181
Глава 6. СВЧ разрядная технологическая система для межоперационной очистки субмикронных структур изделий электронной техники (Бордусов С.В., Мадвейко С.И., Тихон О.И.).....	184
6.1. Особенности процессов плазмохимической обработки материалов в проточном туннельном реакторе СВЧ плазмотрона резонаторного типа при низком вакууме	184
6.2. Распределение СВЧ энергии в объеме крупногабаритной плазменной камеры СВЧ плазмотрона резонаторного типа.....	192
6.3. Временные нестабильности пульсирующего СВЧ разряда в объеме крупногабаритной плазменной камеры СВЧ плазмотрона резонаторного типа.....	202
Литература.....	212
Глава 7. Формирование шариковых выводов припоя лазерным нагревом при сборке 3Dэлектронных модулей (Ланин В.Л., Петухов И.Б.).....	217

7.1. Особенности 3D электронных модулей и технологии их производства	217
7.2. Выбор источника лазерного излучения и методы управления мощностью при лазерной пайке.....	223
7.3. Формирование микровыводов из шариков припоя для 3D-сборки электронных модулей	225
7.4 Современное лазерное оборудование для формирования шариковых выводов припоя	229
7.5 Моделирование процесса формирования шариков припоя с использованием лазерного нагрева.....	235
7.6 Оптимизация технологических режимов лазерной пайки бессвинцовых припойных шариков в 3D структурах микроэлектроники	239
Литература.....	244

Глава 8. Суперконденсаторные структуры для накопителей энергии в составе автономной фотоэлектрической системы (Василевич В.П., Збышинская М.Е.) 246

8.1. Факторы нестабильности работы возобновляемых источников электрической энергии.....	246
8.2. Контроллеры заряда аккумуляторных и емкостных накопителей энергии.....	252
8.3. Накопители электроэнергии на основе суперконденсаторов	255
8.4. Гибридные аккумуляторно-емкостные накопители энергии.....	261
Литература.....	268

ВВЕДЕНИЕ

В современной микроэлектронике наблюдается тенденция прогрессирующей интеграции и миниатюризации изделий, а также повышения функциональности микросистем (например, интеграция механической, оптической и электронной систем), улучшение их характеристик и снижение стоимости. Перспективным направлением дальнейшего развития микроэлектроники является трехмерная (3D) интеграция. По мере роста интеграции микроэлектронных приборов растет количество их внешних выводов компонентов, что приводит к увеличению плотности монтажа. Технология монтажа кристаллов на шарики припоя позволила существенно уменьшить габариты изделий и улучшить характеристики за счет значительного снижения омического сопротивления и индуктивности контактных соединений. Формирование шариковых выводов из припоя представляет сложный технологический процесс, для реализации которого необходимо выбрать материалы микровыводов и способы нагрева, обеспечивающие локализацию нагрева и малую зону термического влияния.

В современной микроэлектронной аппаратуре используется большое количество подвижных и неподвижных электрических контактных соединений, от надежности которых зависит работа устройства или системы. Гальванические покрытия применяют для придания хорошей электропроводимости поверхности контактов, для улучшения их смачиваемости припоем и надежности соединений, а также в технологии посадки кристаллов в корпус, в производстве печатных плат и др. Нестационарные режимы осаждения обеспечивают формирование покрытий с заданными электрофизическими свойствами.

В настоящее время актуально использование прозрачных тонких электропроводящих пленок в качестве электродов на поверхности полимеров при разработке гибких ЖК и электрохромных дисплеев, электронной бумаги, органических светодиодных панелей, солнечных элементов на полимерных подложках и т.п. Такие электроды должны иметь минимальное удельное поверхностное сопротивление и высокое оптическое пропускание. Распыление порошковых оксидных мишеней из $\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2$ вместо сплавных позволяет лучше контролировать стехиометрию прозрачных электродов, избавляет от термической обработки после нанесения, что важно при использовании полимерных подложек.

Широкое разнообразие изделий силовой электроники опирается на совокупность микроэлектронных устройств, представляющих элементную базу. Диоды Шоттки в силовой электронике широко используются в качестве выпрямителей тока в схемах управления электропитанием и по сравнению с традиционными p-n диодами характеризуются меньшим

падением напряжения при прямом смещении и лучшим быстродействием, обусловленным отсутствием неосновных носителей. Электрические параметры кремниевых диодов Шоттки регулируются контактно-барьерными свойствами выпрямляющего контакта металл-полупроводник, ключевым из которых является высота барьера Шоттки.

Нитрид кремния применяется в микроэлектронике на протяжении десятилетий в качестве пассивирующих и изолирующих слоев, подзатворного диэлектрика, а также в качестве запоминающей среды в приборах флеш памяти. Структуры с чередующимися слоями оксида и нитрида кремния представляют практический интерес для создания эффективных источников света на базе кремниевой технологии. Для создания эффективных светоизлучателей на базе слоистых диэлектрических композиций $(\text{SiO}_2/\text{SiN}_x)_n/\text{Si}$ необходимы исследования о процессах их деградации. Активно разрабатывается новый тип полупроводниковой энергонезависимой памяти – мемристоры. Использование оксида и нитрида кремния в качестве диэлектрика, обладающего свойствами резистивного переключения, позволяет решить проблему совместимости мемристоров с традиционной кремниевой микроэлектронной технологией.

Плазма СВЧ разряда позволяет реализовать все виды физико-химического взаимодействия энергетических и химически активных частиц с поверхностными атомами или молекулами обрабатываемого материала, поэтому она применяется для проведения практически всех процессов вакуумного газоплазменного удаления материалов, используемых в производстве кремниевых микроэлектронных приборов. Наиболее глубоко изучены и разработаны процессы СВЧ плазменной обработки материалов в условиях высокого вакуума применительно к разрядам на эффекте электронного циклотронного резонанса. В тоже время, в литературе практически не освещены вопросы теоретического анализа процессов СВЧ плазменного удаления материалов в низком вакууме, а также технологические характеристики этих процессов применительно к конструкциям плазмотронов резонаторного типа с реакционно-разрядными камерами значительных объемов.

Емкостные накопители электроэнергии на базе суперконденсаторов или ионисторов в будущем могут вытеснить электрохимические аккумуляторы или стать их полноценным дополнением в составе систем энергоснабжения, бесперебойного питания. Эти накопители, выполняющие функции регулируемого аккумулирования энергии и её раздачи по мере необходимости особенно перспективны в автономных фотоэлектрических системах (ФЭС) солнечной энергетики.