

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ
СУБМИКРОННОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ**

Под редакцией доктора технических наук В.Л. Ланина

Минск
Бестпринт
2024

УДК 621.3.049.77

ББК 32.844.1

Т 38

Авторы:

Буслюк В.В., Видрицкий А.Г., Голосов Д.А., Емельянов В.В.,
Завадский С.М., Ланин В.Л., Мадвейко С.И., Петухов И.Б., Соловьев Я.А.,
Телеш, Е.В., Юник А.Д.

Технологические аспекты производства изделий субмикронной электроники / В.В. Буслюк [и др.] ; под ред. д-ра техн. наук В.Л. Ланина. – Минск : Бестпринт, 2024. – 266 с. : ил. – ISBN 978-985-7267-34-7

Рассмотрены и обобщены результаты исследований и разработок в области формирования тонкопленочных слоев с высокой диэлектрической проницаемостью в субмикронных КМОП интегральных схемах, активных компонентов интегральных схем селективным реактивно-ионным травлением многоуровневой металлизации, омических контактов к субмикронным структурам, ионно-пучкового синтеза функциональных тонкопленочных покрытий, вакуумного монтажа кристаллов и герметизации изделий субмикронной электроники.

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 № 12 от 21.06.2024

Р е ц е н з е н т ы:

академик НАН Беларуси, академик РАН, доктор технических, профессор *В.А. Лабунув*,
член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор *В.А. Пилипенко*

ISBN 978-985-7267-34-7

© Коллектив авторов

© Оформление «Бестпринт», 2024

Содержание

Введение	7
Глава 1. Тонкопленочные слои с высокой диэлектрической проницаемостью в субмикронных КМОП интегральных схемах (Голосов Д.А., Завадский С.М., Мадвейко С.И.).....	9
1.1 Проблемы масштабирования КМОП транзисторов.....	9
1.2. Альтернативные диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью.....	14
1.3. Структура диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью.....	21
1.4. Диэлектрические характеристики пленок high-k диэлектриков на основе простых оксидов.....	29
1.4.1 Диэлектрические характеристики пленок оксида алюминия.....	30
1.4.2 Диэлектрические характеристики пленок оксида титана.....	32
1.4.3 Диэлектрические характеристики пленок оксида циркония.....	35
1.4.4 Диэлектрические характеристики пленок оксида гафния.....	37
1.4.5 Диэлектрические характеристики пленок оксида тантала.....	40
1.4.6 Сравнение диэлектрических характеристик простых оксидов.....	42
1.5. Диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью на основе сложных оксидов.....	43
1.5.1 Влияние легирования алюминием на диэлектрические характеристики пленок оксида титана.....	47
1.5.2 Влияние легирования цирконием на диэлектрические характеристики пленок оксида титана.....	52
1.5.3 Влияние легирования алюминием на диэлектрические характеристики пленок оксида тантала.....	55
1.5.4 Влияние легирования цирконием на диэлектрические характеристики пленок оксида гафния	59
Заключение	62
Литература	63
Глава 2. Формирование активных субмикронных компонентов селективным реактивно-ионным травлением (Емельянов В.В.).....	72
2.1. Формирование межкомпонентной изоляции на тонком диоксиде кремния.....	72

2.2. Повышение селективности травления нитрида кремния к диоксиду кремния ИК-обработкой.....	82
2.3. Реактивно-ионное травление при формировании многоуровневой металлизации.....	86
2.4. Пассивирующий слой нитрида титана.....	92
Заключение.....	99
Литература.....	100

Глава 3. Технология формирования омических контактов к субмикронным слоям гетероструктур на основе нитрида галлия

(Соловьев Я.А. Юник А.Д.)..... 102

3.1 Теоретические основы формирования омических контактов к субмикронным слоям гетероструктур на основе нитрида галлия..... 102

3.2. Методы формирования и исследования омических контактов к субмикронным слоям гетероструктур на основе нитрида галлия..... 111

3.3 Формирование омических контактов к субмикронным слоям гетероструктур на основе нитрида галлия..... 115

3.3.1 Омические контакты Ti/Al/Ni/Au к гетероструктуре типа GaN/AlGaN с двумерным газом..... 115

3.3.2. Влияние условий быстрого термического отжига на величину удельного контактного сопротивления омических контактов металлизации Ti/Al/Ni к гетероструктуре GaN/AlGaN..... 117

3.3.3 Уменьшение микрорельефа поверхности контактов к гетероструктуре GaN/AlGaN 119

3.3.4. Селективное травление p-GaN при формировании омических контактов к гетероструктуре GaN/AlGaN нормально-закрытых транзисторов с высокой подвижностью электронов..... 121

Заключение..... 125

Литература..... 126

Глава 4. Технология вакуумного монтажа кристаллов и герметизации при сборке приемников инфракрасного излучения

(Видрицкий А.Е., Ланин В.Л.)	131
4.1. Проблемы сборки микроболометрических приемников.....	131
4.2. Выбор типа припоя для монтажа кристаллов и герметизации микроболометров.....	133
4.3. Моделирование механических напряжений в кристалле микроболометра при монтаже на припой.....	135
4.4. Технология вакуумной пайки при герметизации микроболометров.	143
4.5. Основные дефекты паяных соединений при монтаже кристаллов и герметизации микроболометров.....	155
Заключение.....	158
Литература.....	159

Глава 5. Технология изготовления шумовых полупроводниковых диодов с управляемым уровнем дефектности кремниевых структур

(Буслук В.В.).....	161
5.1. Технологические и конструкционные методы совершенствования шумовых диодов.....	161
5.2. Основные причины микроплазменного шума в шумовых диодах отечественного производства.....	168
5.3. Лазерная технология создания структурных дефектов в кремнии.....	174
5.4. Технология среднетемпературного отжига высоколегированных структур шумовых диодов.....	187
Заключение.....	195
Литература.....	196

Глава 6. Ионно-пучковый синтез функциональных тонкопленочных покрытий (Телеш Е.В.).....

6.1. Применение ионных пучков инертных и активных газов для формирования покрытий из нитридов и фторидов углерода.....	200
6.1.1. Исследование процессов плазменного синтеза покрытий из нитрида углерода реактивным ионно-лучевым распылением графитовой мишени.....	201
6.1.2. Исследование процессов плазменного синтеза фторуглеродных покрытий ионно-лучевым распылением мишеней из политетрафторэтилена и	

графита.....	
208	
6.2. Формирование фторуглеродных тонкопленочных покрытий ионно-лучевым распылением составной мишени «политетрафторэтилен-графит».....	222
6.3 Синтез функциональных тонкопленочных покрытий прямым осаждением из ионных пучков, формируемых торцевым холловским ускорителем.....	
..	228
6.4 Применение вторичных ионных пучков в ускорителе с анодным слоем для синтеза функциональных тонкопленочных покрытий.....	
232	
Заключение.....	237
Литература.....	237
Глава 7. Технология и оборудование для производства изделий силовой электроники (Петухов И.Б.).....	241
7.1. Монтаж кристаллов силовой электроники.....	241
7.2 Ультразвуковой монтаж проволочных и ленточных выводов повышенного сечения.....	243
7.3. Оборудование монтажа кристаллов силовой электроники.....	252
7.4. Оборудование монтажа межсоединений в изделиях силовой электроники.....	
...	256
Заключение.....	264
Литература.....	265

ВВЕДЕНИЕ

Последние годы отмечены бурным развитием микроэлектроники, которое происходит в направлении повышения степени интеграции полупроводниковых интегральных схем (ИС) с целью достижения максимальной плотности компоновки, максимального быстродействия и минимальной потребляемой мощности. До недавнего времени увеличение производительности и уменьшение энергопотребления интегральных схем ИС достигались за счет уменьшения топологических размеров элементов и снижения рабочего напряжения транзисторов. При этом использовался принцип масштабирования, который подразумевает уменьшение геометрических размеров элементов с сохранением некоторых функциональных и параметрических инвариантов. Масштабирование элементов преследует две цели: увеличение плотности упаковки элементов и улучшение электрических параметров при снижении стоимости функциональной операции в расчете на кристалл.

Для решения проблем интеграции необходимо в субмикронных интегральных структурах формирование тонкопленочных слоев с высокой диэлектрической проницаемостью на основе оксидов гафния, циркония, титана и тантала, применение селективного реактивно-ионного травления при формировании многоуровневой металлизации, создание омических контактов к субмикронным слоям гетероструктур на основе нитрида галлия, применение вакуумной технологии монтажа кристаллов и герметизации изделий.

Существует ряд задач электроники, требующих генерации шума в широком диапазоне частот с заданными спектральными характеристиками. К ним относятся оценка качества приемо-передающих устройств и цифровых каналов передачи информации, маскирование побочных электромагнитных излучений электронно-вычислительной техники, а также генерация случайных числовых последовательностей в аппаратно-программных комплексах защиты информации. В качестве источников физического шума используются различные полупроводниковые приборы, в том числе шумовые диоды, диоды-генераторы шума, лавинно-пролетные диоды, стабилитроны. Такие диоды в режиме обратного смещения генерируют широкополосный шум с высокой спектральной плотностью.

Воспроизводимость электрофизических параметров шумовых диодов зависит от ряда конструктивно-технологических факторов, в том числе концентрации основных примесей и примесей чужеродных элементов, наличия и концентрации неоднородностей и несовершенств кристаллической решетки, вакансионно-кислородных комплексов, динамики процессов

преципитации и геттерирования, а также от технологических режимов легирования и отжига структур. Исследование преимущественных причин, влияющих на отклонение этих параметров от оптимальных, является ключевой задачей повышения качества и надежности шумовых диодов.

В последние годы в микроэлектронной технике наблюдается значительное увеличение интереса к созданию тонких диэлектрических покрытий, характеризующихся низким значением диэлектрической проницаемости, малыми диэлектрическими потерями и сравнительно высокой температурной стабильностью. Одним из наиболее перспективных материалов, обладающим уникальным комплексом физико-химических свойств, является фторуглеродные пленки. К их основным достоинствам относятся низкие значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь в широком диапазоне радиочастот, температурная стабильность, химическая пассивность, экстремально низкий коэффициент трения и ярко выраженная гидрофобность.

Для формирования таких пленок используется метод ионно-лучевого распыления, в котором плазма отделена от подложки и осуществляется локальное воздействие ионного пучка как инструмента на распыляемую мишень. В качестве источников ионных потоков используются торцевой холловский ускоритель и плазмотрон на основе ускорителя с анодным слоем, который работает как в обычных условиях, так и в режиме ионно-пучкового фокуса.

Наблюдаемый в последние годы устойчивый рост использования возобновляемых источников электрической энергии в совокупности со стремлением к снижению удельной энергоемкости в промышленности и на транспорте вызывает большой спрос на компоненты силовой электроники, необходимые для создания вторичных источников питания в промышленных приводах, управляемых инверторах, оборудовании солнечных, приливных и ветряных станций, электротранспорте. Особенностью изделий современной силовой электроники являются работа при больших значениях коммутируемого тока до 100 А, питающих напряжениях в диапазоне 600-1200 В, повышенных температурах полупроводниковых кристаллов до 200 °С. Решить такие технические задачи на сегодняшний день способны относительно новые полупроводниковые материалы на основе SiC и GaN. Коммутируемые изделия на их основе позволяют существенно уменьшить массогабаритные параметры и повысить надежность в условиях радиационного излучения.