

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

ТЕХНОЛОГИИ СУБМИКРОННЫХ СТРУКТУР МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Под редакцией
академика НАН Беларуси
А. П. Достанко

Минск
«Беларуская навука»
2017

УДК 621.762.27

ББК 34.55

Авторы:

А. П. Достанко, С. В. Бордусов, Д. А. Голосов, С. М. Завадский, В. В. Колос, А. Н. Купо, В. Л. Ланин, М. С. Лушакова, С. И. Мадвейко, С. Н. Мельников, А. Н. Петлицкий, И. Б. Петухов, В. А. Солодуха, Е. В. Телеш

Технологии субмикронных структур микроэлектроники / А. П.

Достанко [и др.] ; под ред. акад. НАН Беларуси А. П. Достанко. – Минск :
Беларуская навука, 2017. – 327 с. : ил. –

ISBN 985- .

Рассмотрены и обобщены результаты исследований и разработок в области технологии и оборудования для производства и диагностики субмикронных 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 № от .. 2017г.

Рецензенты:

академик НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор **В. А. Лабунюв**,
член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор
Ф. И. Пантелеенко

ISBN 985-

© Коллектив авторов

© Оформление. ИД «Белорусская наука», 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....5

ГЛАВА 1: СВЧ ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ СОЗДАНИИ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ *Ошибка! Закладка не определена.*

- 1.1. Процессы удаления материала с поверхности твердого тела **Ошибка! Закладка не определена.**
- 1.2. Получение тонких пленок на поверхности твердого тела **Ошибка! Закладка не определена.**
- 1.3. Модификация структуры поверхностных слоев твердых тел **Ошибка! Закладка не определена.**
- 1.4. Применение СВЧ энергии при производстве изделий электронной техники и тенденции развития процессов СВЧ плазменной обработки **Ошибка! Закладка не определена.**
- Список литературы к главе 1 **Ошибка! Закладка не определена.**

ГЛАВА 2: ФОРМИРОВАНИЕ ЯЧЕЕК СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ..... *Ошибка! Закладка не определена.*

- 2.1. Свойства сегнетоэлектриков и их использование в технологии ИМС **Ошибка! Закладка не определена.**
- 2.2. Сегнетоэлектрические ячейки памяти FeRAM **Ошибка! Закладка не определена.**
- 2.3. Схема ячейки 1Т/1С **Ошибка! Закладка не определена.**
- 2.4. Схема ячейки 2Т/2С **Ошибка! Закладка не определена.**
- 2.5. Схема ячейки 1Т FeRAM (FeFET) **Ошибка! Закладка не определена.**
- 2.6. Структуры ячеек памяти FeRAM **Ошибка! Закладка не определена.**
- 2.7. Интеграция сегнетоэлектриков в полупроводниковую технологию **Ошибка! Закладка не определена.**
- 2.8. Сегнетоэлектрические материалы конденсаторной структуры **Ошибка! Закладка не определена.**
- 2.9. Методы нанесения сегнетоэлектрических тонких пленок.... **Ошибка! Закладка не определена.**
- 2.10. Кристаллизационный отжиг **Ошибка! Закладка не определена.**
- 2.11. Травление конденсаторных структур..... **Ошибка! Закладка не определена.**
- Список литературы к главе 2 **Ошибка! Закладка не определена.**

ГЛАВА 3: ФОРМИРОВАНИЕ СУБМИКРОННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СЛОЕВ В МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ИЗДЕЛИЯХ *Ошибка! Закладка не определена.*

- 3.1. Формирование тонкопленочных слоев из диборидов циркония и гафния **Ошибка! Закладка не определена.**
- 3.2. Ионно-лучевой синтез гетероструктур «металл – арсенид галлия» **Ошибка! Закладка не определена.**
- 3.3. Ионно-лучевой синтез гетероструктур «диэлектрик – арсенид галлия» **Ошибка! Закладка не определена.**
- 3.4. Формирование межуровневого диэлектрика прямым осаждением из ионных потоков **Ошибка! Закладка не определена.**
- Список литературы к главе 3 **Ошибка! Закладка не определена.**

ГЛАВА 4: БЕССВИНЦОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ИЗДЕЛИЯХ ЭЛЕКТРОНИКИ *Ошибка! Закладка не определена.*

- 4.1. Анализ составов бессвинцовых материалов, применяемых для формирования контактных соединений в изделиях электроники **Ошибка! Залкада не определена.**
 - 4.2. Получение модифицированных бессвинцовых материалов с адгезионно-активными добавками при интенсифицирующих воздействиях **Ошибка! Залкада не определена.**
 - 4.3. Исследование влияния адгезионно-активных добавок на механические и электрофизические свойства бессвинцовых материалов **Ошибка! Залкада не определена.**
 - 4.4. Практическое применение бессвинцовых материалов **Ошибка! Залкада не определена.**
- Список литературы к главе 4 **Ошибка! Залкада не определена.**

ГЛАВА 5: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СБОРКИ МНОГОКРИСТАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ..... Ошибка! Залкада не определена.

- 5.1. Технология сборки многокристалльных гибридных интегральных модулей и систем в корпусе **Ошибка! Залкада не определена.**
 - 5.2. Методика выбора способов контактных межсоединений в многокристалльных модулях **Ошибка! Залкада не определена.**
 - 5.3. Технология Flip-Chip в 2,5D и 3D конструкциях многокристалльных модулей **Ошибка! Залкада не определена.**
 - 5.4. Отечественное и зарубежное оборудование для сборки многокристалльных модулей **Ошибка! Залкада не определена.**
- Список литературы к главе 5 **Ошибка! Залкада не определена.**

ГЛАВА 6: ЛАЗЕРНАЯ АКТИВАЦИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СУБМИКРОННЫХ СТРУКТУР.... Ошибка! Залкада не определена.

- 6.1. Методы и устройства лазерной электрохимической обработки **Ошибка! Залкада не определена.**
 - 6.2. Моделирование тепловых и фотохимических процессов лазерной активации электрохимической обработки **Ошибка! Залкада не определена.**
 - 6.3. Экспериментальное исследование электрохимических процессов формирования субмикронных структур с лазерной активацией **Ошибка! Залкада не определена.**
 - 6.4. Области применения лазерных электрохимических процессов **Ошибка! Залкада не определена.**
- Список литературы к главе 6 **Ошибка! Залкада не определена.**

ГЛАВА 7: ДИАГНОСТИКА СУБМИКРОННЫХ СТРУКТУР ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ.. Ошибка! Залкада не определена.

- 7.1. Измерение удельного сопротивления и концентрации легирующей примеси в полупроводниковых материалах и структурах **Ошибка! Залкада не определена.**
 - 7.2. Измерение подвижности носителей заряда **Ошибка! Залкада не определена.**
 - 7.3. Определение времени жизни неосновных носителей заряда **Ошибка! Залкада не определена.**
 - 7.4. Определение заряда, плотности поверхностных состояний, толщины диэлектрика в МДП структурах **Ошибка! Залкада не определена.**
 - 7.5. Измерение электрических характеристик базовых элементов субмикронных микросхем **Ошибка! Залкада не определена.**
- Список литературы к главе 7 **Ошибка! Залкада не определена.**

Введение

Применение субмикронных сверхбольших интегральных схем (СБИС) в микропроцессорной технике позволяет существенно увеличить рабочие частоты компьютеров. При минимальных размерах элементов 0,18 мкм тактовая частота составляет 1,5 ГГц, а при размерах 0,13 мкм – более 2 ГГц. Проектирование и производство субмикронных СБИС связано с решением многих технических и экономических проблем. Прежде всего – это проблемы субмикронной технологии. При переходе к размерам элементов диапазона 1–0,1 мкм требуется смена практически всего технологического оборудования и использование новых процессов. Стоимость комплекта технологического оборудования для производства субмикронных СБИС на пластинах диаметра 300 мм чрезвычайно высока. При проектировании и производстве субмикронных СБИС приходится учитывать многие физические процессы и явления, которые были несущественными при больших размерах элементов.

Новые задачи и высокие требования субмикронной микроэлектроники стимулируют поиск новых способов направленного плазменного и ионно-лучевого воздействия на обрабатываемые материалы. Ввиду специфических особенностей плазменного сверхвысокочастотного (СВЧ) разряда обработка материалов неравновесной плазмой находит все более широкое применение в промышленных технологиях. СВЧ энергия применяется в производстве микроструктур в процессах плазменного травления, очистки, модификации поверхностных слоев материалов, а также нанесения на их поверхности пленок других материалов.

Актуальной проблемой является получение субмикронных гетероструктур «металл–арсенид галлия», которые могли бы обеспечить стабильные и воспроизводимые характеристики приборов после выдержки при высоких температурах до 1173 К. Для этого предложено использовать дибориды тугоплавких переходных металлов для формирования контактного слоя методом ионно–лучевого распыления.

Для формирования контактных площадок и проводящих структур субмикронных размеров предложена лазерная активация процессов гальванического осаждения функциональных покрытий. Варьируя в широких пределах параметры лазерного излучения можно получать разнообразные по стехиометрическому составу, структуре и морфологии покрытия.

Сборка субмикронных СБИС в корпусах типа BGA позволяет увеличить плотность компоновки элементов и за счет сокращения длины выводов значительно

повысить быстродействие электронной схемы. Для пайки корпусов BGA на контактных площадках платы необходимо сформировать матрицу шариковых выводов из бессвинцовых припоев. Однако замена свинецсодержащих припоев бессвинцовыми сплавами вызвала проблемы в области металловедения, связанных с образованием пластинчатых интерметаллидов, оказывающих негативное воздействие на усталостные процессы в соединениях.

Создание субмикронных СБИС позволило перейти к производству 2,5 и 3D структур в многокристальных модулях. Одним из способов достижения высокой воспроизводимости сварных соединений при сборке приборов с повышенной плотностью монтажа и использованием золотой проволоки уменьшенного диаметра ≤ 25 мкм является применение ультразвуковых систем повышенной частоты ≥ 100 кГц.

Методы контроля и диагностики субмикронных структур должны учитывать диффракционные ограничения, сложности контактных измерений параметров элементов, наличие дополнительных механизмов рассеяния зарядов в приповерхностных слоях, ухудшение параметров, вызванное неконтролируемым загрязнением кремниевых структур рекомбинационно-активными примесями, что является актуальной проблемой в производстве субмикронных СБИС.

В монографии обобщены результаты научных исследований и практических разработок авторов из Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины, ОАО «ПЛАНАР-СО», ОАО «ИНТЕГРАЛ»,

Приведенные в монографии научные и практические результаты получены при выполнении Государственных программ научных исследований: «Фотоника, опто- и микроэлектроника», подпрограмма «Микро- и наноэлектроника», «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограммы «Плазменные и пучковые технологии», «Материалы в технике» в 2016–2017 гг.

Участие авторов выразилось следующим образом: глава 1 – С.В.Бордусов, С.И. Мадвейко, М. С. Лушакова, глава 2 – А.П. Достанко, Д.А. Голосов, С.И. Завадский, В.В. Колос, С.Н. Мельников, В.А. Солодуха, глава 3 – Е.В. Телеш, глава 4 – В.Л. Ланин, глава 5 – И.Б. Петухов, глава 6 – А.Н. Купо, глава 7 – А.Н. Петлицкий.