

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ СУБМИКРОННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Под редакцией академика НАН Беларуси
А. П. Достанко

Минск
«Беларуская навука»
2020

Авторы:

А. П. Достанко, С.М. Аваков, Д. А. Голосов, В. В. Емельянов, С. М. Завадский, В.В. Колос, В. Л. Ланин, С.И. Мадвейко, С.Н. Мельников, Ю.В. Никитюк, А.Н. Петлицкий, И. Б. Петухов, В.А. Пилипенко, В.И. Плебанович, В.А. Солодуха, С.И. Соколов, Е.В. Телеш, Е.Б. Шершнев

Инновационные технологии и оборудование субмикронной электроники / А. П. Достанко [и др.] ; под ред. акад. НАН Беларуси А. П. Достанко. – Минск : Беларуская навука, 2020. – 260 с. : ил. – ISBN 978-985-08-2521-6.

Рассмотрены и обобщены результаты исследований и разработок в области инновационных технологий 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.

Рецензенты:

академик, доктор технических наук, профессор

В. А. Лабунюв,

член-корреспондент, доктор технических наук, профессор

Ф. И. Пантелеенко

ISBN 978-985-08-2521-6

© Коллектив авторов

© Оформление. РУП «Издательский дом
Белорусская наука», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	7
ГЛАВА 1: БЕЗМАСКОВАЯ ЛИТОГРАФИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ (Аваков С.М., Плебанович В.И.).....	9
1.1. Виды литографий и экономическая целесообразность безмасковой литографии.....	9
1.2. Принципы построения изображения в многолучевых лазерных генераторах.....	14
1.3. Моделирование процесса литографии для генератора изображения.....	24
1.4. Методика контроля критических параметров изображения в фоторезисте после экспонирования безмасковым методом.....	27
1.5. Технологическое оборудование для безмасковой литографии.....	30.
Список литературы к главе 1.....	32.
ГЛАВА 2: МАГНЕТРОННЫЕ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПЛАНАРНОГО ТИПА ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК МЕТАЛЛОВ.....	35
(Голосов Д.А., Завадский С.М., Мельников С.Н., Колос В.В.)	
2.1. Принцип действия и параметры магнетронных распылительных систем.....	35
2.2. Несбалансированность магнетронных распылительных систем.....	43
2.3. Эффективность использования материала мишени МРС.....	56
2.3. Конструкции магнетронных распылительных систем планарного типа и оценка их эффективности	
2.4. Применение магнетронных распылительных систем в технологических процессах ионно-плазменного нанесения тонких пленок металлов	
Список литературы к главе 2.....	65
ГЛАВА 3: ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИОННО-ЛУЧЕВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ.....	68
(Достанко А.П., Телеш Е.В.)	
3.1. Технология тонкопленочных покрытий из соединений тугоплавких переходных металлов реактивным ионно-лучевым распылением мишеней.....	68
3.1.1. Формирование тонкопленочных покрытий из TiBNi распылением составных мишеней.....	70
3.1.2. Формирование тонкопленочных покрытий из TiBNi и TiBC реактивным ионно- лучевым распылением мишени из диборида титана.....	77
3.1.3. Формирование покрытий ионно-лучевым испарением композиционно мишени TiB ₂ + 20 % TiC.....	81

3.1.4. Исследование термостойкости синтезированных покрытий.....	84
3.2. Формирование оптических покрытий прямым осаждением из ионных потоков, формируемых торцевым Холловским ускорителем.....	85
3.2.1. Процессы формирования оптических покрытий прямым осаждением из высокоэнергетичных ионных потоков.....	89
3.2.2 Формирование декоративных и ориентирующих оптических покрытий.....	93
3.3. Плазменный синтез оптических покрытий из диоксида кремния с использованием ускорителя с анодным слоем.....	96
3.4. Технология функциональных слоев для изделий оптики и оптоэлектроники на полимерных основаниях.....	102
3.4.1. Формирование защитных, декоративных и просветляющих покрытий на поверхности полимерных оптических изделий.....	104
3.4.2. Формирование адгезионных буферных и проводящих слоев на полимерных подложках для гибких ЖК- дисплеев.....	108
3.4.3. Формирование контактных и пассивирующих слоев для органической электроники.....	112
Список литературы к главе 3.....	117

ГЛАВА 4: ТЕХНОЛОГИЯ УСКОРЕННОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ (Солодуха В.А., Пилипенко В.А.).....121

4.1. Моделирование равномерности облучения и нагрева кремниевой пластины при ускоренной термообработке.....	121
4.2. Установка ускоренной термообработки полупроводниковых пластин.....	128
4.2. Морфология и структура поверхностного слоя кремния после ускоренной термообработки.....	135
4.3. Влияние термообработки кремниевых пластин на процесс их пирогенного окисления.....	147
4.4. Электрофизические свойства двуокиси кремния после ускоренной термообработки.....	151
4.5. Список литературы к главе 4.....	157

ГЛАВА 5: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СБОРКИ 2,5 И 3D МНОГОКРИСТАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ (Петухов И.Б.).....158

5.1 Методы монтажа кристаллов в 2,5 и 3 D конструкциях электронных модулей с элементами технологии Flip-Chip.....	158
5.2. Технологии формирования межсоединений в многокристалльных и многоуровневых электронных модулях.....	160

5.3. Зарубежное и отечественное оборудование для сборки многокристалльных модулей.....	166
Список литературы к главе 5.....	174

ГЛАВА 6: ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ КВАРЦА ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ (Емельянов В.А., Шершнев Е.Б., Никитюк Ю.В.,

Соколов С.И.....	175
6.1. Особенности лазерной обработки кристаллического кварца.....	176
6.1.1. Лазерное термораскалывание кварца стандартных первоначальных ориентаций.....	177
6.1.2. Лазерное термораскалывание кварца АТ- и ВТ-срезов.....	186
6.2. Моделирование процесса лазерного термораскалывания кварца.....	190
6.3. Исследование двулучевой сварки кварцевого стекла.....	198
6.4. Исследование лазерной полировки кварцевого стекла.....	204
6.5. Двулучевая лазерная сепарация кварцевого сырья.....	210
Список литературы к главе 6.....	216

ГЛАВА 7: ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ 3D СТРУКТУР ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ (Ланин В.Л.).....

7.1. Возможности лазерного излучения при формировании внутренних и внешних межсоединений в 3D структурах.....	221
7.2. Моделирование процессов лазерного воздействия на металлические и неметаллические материалы в 3D структурах.....	229
7.3. Исследование процессов формирования контактных соединений под воздействием лазерного излучения в 3D структурах.....	237
7.4. Технологическое оборудование лазерной обработки материалов.....	239
Список литературы к главе 7.....	249

ГЛАВА 8: ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И СТРУКТУР (Петлицкий А.Н.).....

8.1. Методы и оборудование спектральной эллипсометрии для анализа многослойных структур в нанометровом диапазоне.....	251
8.2. Электронная микроскопия в производстве полупроводниковых структур	
8.3. Масс спектрометрия полупроводниковых материалов и структур	
8.4. Рентгеновские методы и оборудование в производстве изделий микроэлектроники	

8.5. Методы зондовой электрометрии для бесконтактных неразрушающих измерений полупроводниковых материалов и изделий в области современных "высоких" технологий

Список литературы к главе 8

ВВЕДЕНИЕ

Предсказанные законом Мура экспоненциальные достижения в электронике изменили не только уровень микроэлектронных технологий, но и существующий мир. Так, по оценкам исследовательской фирмы IHS Technology, добавленная стоимость, непосредственно внесенная в мировой ВВП микроэлектроникой за последние 20 лет, составила 3 трлн. долл. Показатели сопоставимы с совокупным ВВП таких стран, как Франция, Германия, Италия и Великобритания [1]. Непрерывные инновации, открытия и инвестиции в сферу высоких технологий будут продолжаться, оказывая большое влияние на экономическое и социальное развитие.

Благодаря бурному развитию микроэлектроники вычислительные средства трансформировались из редких и достаточно дорогих в приемлемые по цене средства повседневного использования. В свою очередь, это обеспечило базу для развития сети Интернет, социальных медиасредств, современного анализа данных и т.п. В настоящее время полупроводниковые приборы все шире используются в таких областях, как здравоохранение, транспорт, средства сбора/преобразования энергии, при построении управляющей информационной системы "интеллектуальный город", в учебных процессах и т.д. В микроэлектронном производстве прилагаются серьезные усилия по размерному масштабированию до топологий 14, 10 и 7 нм и менее. Однако этот процесс масштабирования вошел в фазу торможения и возникла новая тенденция снижения компонентных издержек и повышения уровня интеграции при одновременном продолжении использования 28-нм технологического уровня. Новая тенденция масштабирования обусловлена совершенствованием текущего процесса, применением методов 2,5D- и 3D-интеграции. Факторы, определяющие инновационное развитие микроэлектроники: увеличение площади кристалла и плотности расположения элементов; повышение интеллектуальности приборов; повышение эффективности производства, обеспечиваемое за счет увеличения диаметра пластин от 100 до 300 мм и применением новейшего технологического оборудования.

Технология 2,5D интеграции оказалась эффективна при монтаже кристаллов с 28-нм нормами на пассивную кремниевую монтажную подложку с большим числом жестко организованных выводов. По плотности выводов кремниевая промежуточная монтажная плата в 20 раз, превосходила керамические платы в электронных модулях. Важным достоинством 2,5D технологии явилось сокращение межсоединений микросхем и снижение энергопотребления. Эта технология позволит плавно перейти от

современных планарных модулей к будущим трехмерным конструкциям для создания многофункциональных микросхем высокого технического уровня.

Для производства многокристалльных модулей с субмикронными топологическими нормами инновационным решением является бесмасковая фотолитография, для которой не нужны промежуточные шаблоны. Это позволяет ускорить изготовление первых образцов микросхем, экономя значительные денежные средства (до 100 000 долл.) на освоение каждого нового изделия.

Для нанесения сложно компонентных пленок разработаны методы магнетронного распыления, что обусловлено растущим спросом на функциональные высококачественные покрытия в разнообразных секторах рынка. Пленки, полученные методом магнетронного распыления, превосходят по качеству пленки нанесенные другими методами физического осаждения. Магнетронные распылительные системы (МРС) допускают широкое разнообразие форм распыляемой мишени, пространственного расположения и методов перемещения подложек в процессе нанесения пленок. Эмиссионные характеристики МРС очень медленно меняются во времени в результате постепенной эрозии материала мишени в зоне интенсивного распыления. Это позволяет строить на основе МРС установки непрерывного действия, производя ионную очистку, травление и осаждение материала в едином вакуумном цикле, необходимом для гибкого автоматизированного производства.

Предварительная ускоренная термообработка кремниевых пластин улучшает электрофизические параметры, выращиваемых на их поверхности слоев двуокиси кремния: увеличивает пробивное напряжение, уменьшает ток утечки, снижает заряд на границе раздела кремний-двуокись кремния, снижает разброс и величину поверхностного потенциала по площади пластины.

В производстве 3D микросборок перспективным способом формирования отверстий в кристаллических подложках и резов без изменения физических свойств кристалла является лазерная микрообработка с помощью пикосекундного лазера. Лазерные технологии обработки изделий из кварца найдут применение в современной микро - и оптоэлектронике для изготовления таких изделий, как фотошаблоны, кварцевые резонаторы, датчики электромагнитного излучения, фотоэлектронные умножители и оптические компоненты для фотолитографии.

1.Макушин, М. Новые аспекты развития современной микроэлектроники / М. Макушин, В. Мартынов // Электроника. Наука, Технология. Бизнес, 2016. – № 3 (00153). – С. 110–123