



В. В. Мартынов
Я. И. Тоцицкий

**ТЕХНОЛОГИЯ СВЕРХБОЛЬШИХ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ
И ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКОЕ
ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ**

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ

В. В. Мартынов, Я. И. Точицкий

**ТЕХНОЛОГИЯ
СВЕРХБОЛЬШИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ
И ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ**

Минск
«Беларуская навука»
2018

Мартынов, В. В. Технология сверхбольших интегральных схем и оптико-механическое оборудование для микро- и наноэлектроники : [монография] / В. В. Мартынов, Я. И. Точицкий ; Национальная академия наук Беларуси. — Минск : Беларуская навука, 2018. — 466, [1] с. : ил. — Библиогр. : с. 458—461.

УДК 621.382.049.771.16:681.7.07

ББК 31

Чит. зал №1 — 1 экз.

Монография описывает планарную технологию изготовления сверхбольших интегральных схем, проектирование и применение прецизионного оптико-механического СТО оборудования для генерации топологии СБИС и ее формирования на полупроводниковых пластинах. В первой части издания раскрываются особенности формирования топологии как основного процесса в маршруте технологических процессов при производстве СБИС. Вторая часть посвящена СТО оборудованию, разрешение и точность которого определили все параметры современных СБИС и их дальнейшее развитие. Показана зависимость параметров СБИС от метрологической точности геометрических размеров топологии и ее элементов, которые обеспечивает СТО оборудование при последовательном формировании слоев микро- и наноэлектронных изделий.

Адресуется инженерам, специалистам предприятий и научных организаций, а также студентам, магистрантам и аспирантам, изучающим микро- и наноэлектронику.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
ЧАСТЬ ПЕРВАЯ. Технология СБИС-микрoeлектроники	
Глава 1. Основные технологические принципы микрoeлектроники.	8
1.1. Транзистор и планарная технология. История возникновения и развитие.	8
1.2. Интеграция	18
1.2.1. Интеграция на уровне кристалла.	19
1.2.2. Интеграция на уровне технологической обработки пластин	19
1.3. Масштабирование (пропорциональная миниатюризация)	20
1.4. Интегрированные технологические системы	22
1.5. Обеспечение технологической чистоты в производстве субмикронных СБИС	29
Глава 2. Базовые технологические процессы микрoeлектроники	32
2.1. Кремний	32
2.1.1. Получение монокристаллов кремния	34
2.1.2. Получение технического кремния.	35
2.1.3. Газовая очистка кремния.	36
2.1.4. Производство монокристаллов кремния.	37
2.1.5. Бестигельная зонная плавка	39
2.1.6. Получение пластин кремния	40
2.2. Диэлектрические пленки.	42
2.2.1. Технологическое назначение пленок	46
2.2.2. Термическое окисление кремния.	47
2.2.3. Пиролитическое осаждение SiO ₂	50
2.2.4. Плазмохимическое осаждение SiO ₂	50
2.2.5. Пленки нитрида кремния	51
2.2.6. Методы получения пленок нитрида кремния	52
2.3. Структура пленок поликристаллического кремния	53
2.3.1. Методы получения пленок поликристаллического кремния.	54
2.3.2. Механические напряжения в диэлектрических и поликристаллических кремниевых пленках	54
2.4. Химическая очистка.	56
2.5. Диффузия.	57
2.5.1. Маскирование слоями SiO ₂	60
2.5.2. Измерение параметров диффузионных слоев	62
2.6. Сборка и корпусирование – установка кристалла в корпус	66
Глава 3. Методы изготовления интегральных схем.	71
3.1. Маршрут технологических процессов изготовления СБИС.	71
3.1.1. Изоляция элементов и технологические маршруты реализации изоляции	74
3.1.1.1. Параметры изоляции	74
3.1.1.2. Полная диэлектрическая изоляция	75
3.1.1.3. Изоляция кремний на сапфире.	77
3.1.1.4. Структура кремний на изоляторе	77
3.1.1.5. Структура SOI.	78
3.1.1.6. Изоляция биполярных транзисторных структур при помощи p–n-переходов	80
3.1.1.7. Комбинированная изоляция структур «Изопланар»	81
3.2. Стимулированная диффузия.	83

3.3. Эпитаксия	84
3.4. Легирование	85
3.5. Травление	87
3.6. Металлизация (формирование разводки)	91
3.6.1. Системы нанесения металлизации	92
3.6.2. Формирование контактов	94
3.6.3. Многоуровневая металлизация	95
3.6.4. Технология многослойной металлизации на основе меди «двойной дамасский узор»	96
3.7. Радиационно-стойкие интегральные схемы	100
3.7.1. Технологические приемы повышения радиационной стойкости ИС	102
3.7.2. Схемотехнические приемы повышения радиационной стойкости	102
Глава 4. Современная технология фотолитографии в производстве СБИС	105
4.1. Основы теории и действующие факторы	106
4.2. Степперы и сканеры	109
4.2.1. Источники актиничного излучения	115
4.3. Фоторезисты и их обработка	117
4.4. Несколько замечаний о процессе проявления	123
4.5. Технология изготовления и контроля шаблонов	124
4.5.1. Генерация изображения	125
4.6. «Виртуальный степпер»	132
4.7. Предотвращение влияний интерференционных явлений в многослойных структурах	134
4.8. Контроль процесса литографии	139
4.9. Следующее поколение литографии	146
4.9.1. Фотолитография	146
4.9.2. Рентгенолитография	148
4.9.3. Электронная проекционная литография	149
4.9.4. Ионная проекционная литография	150
4.9.5. Комбинированная литография	151
4.10. Развитие NGL-метода	153
Глава 5. Субмикронные структуры	154
5.1. Субмикронные МОП-транзисторы технологического уровня 0,5–0,13 мкм	154
5.1.1. Общие положения	154
5.1.2. Конструкции МОП-транзисторов	155
5.2. Транзисторы нанометрового диапазона	165
5.3. Проблема тока утечки	170
Глава 6. Развитие микроэлектроники	172
6.1. Дальнейшее развитие технологий	172
6.2. Мировая микроэлектроника развивается по долгосрочному плану	177
6.3. Главные тенденции развития технологий микроэлектроники	183
ЧАСТЬ ВТОРАЯ. Оптико-механическое оборудование для микро- и нанoeлектроники	
Глава 7. Значение оптико-механического оборудования для микро- и нанoeлектроники (краткая история микролитографии и СТО оборудования)	200
Глава 8. Фотошаблон – основной инструмент фотолитографии	211
8.1. Виды фотошаблонов	211
8.2. Шаблоны для экстремальной литографии	218

Глава 9. Генераторы изображения	220
9.1. Лазерные генераторы изображения	220
9.2. Электронно-лучевые генераторы изображения	239
Глава 10. Установки совмещения и экспонирования контактным (теневым) методом	248
Глава 11. Проекционное оптико-механическое литографическое оборудование	261
11.1. Проекционные объективы	261
11.1.1. Изготовление проекционных объективов	276
11.1.2. Перспективы развития проекционных объективов	282
11.2. Осветительные системы для фотолитографии	285
11.3. Моделирование процесса формирования топологии «виртуальный степпер»	294
11.3.1. Моделирование изображения фотошаблона на поверхности подложки	296
11.3.2. Построение скрытого изображения в пленке фоторезиста	297
Глава 12. Проекционные мультипликаторы – степперы и сканеры	309
12.1. Загрузка и ориентация пластин и фотошаблонов	312
12.2. Координатный стол и основная координатная система степпера, сканера	314
12.3. Системы совмещения	322
12.4. Системы автоматической фокусировки	333
12.5. Системы управления мультипликатором	337
12.6. Степперы с фотомонтажом, сканирующие мультипликаторы, сканеры	338
Глава 13. Широкоформатные и малоформатные мультипликаторы	350
13.1. Мультипликаторы для дисплеев и печатных плат высокой плотности	351
13.2. Мини-мультипликатор (мини-степпер) для изготовления МЭМС	357
13.3. Мини-мультипликатор для двухсторонней фотолитографии	359
13.4. Рабочий цикл мультипликатора	362
Глава 14. Точность (метрология) мультипликаторов	368
Глава 15. Оборудование для контроля и исправления фотошаблонов	383
15.1. Оборудование для контроля фотошаблонов	383
15.2. Ремонт (ретушь) фотошаблонов	398
Глава 16. Оборудование для контроля топологии на подложке	402
Глава 17. Альтернативные методы литографии	419
17.1. Установки для электронной и ионной литографии	419
17.2. Рентгено- и синхротронная литография	423
17.3. Импринт-литография	425
17.4. Вакуумная «сухая» фотолитография	428
17.5. Фотостимулированные процессы формирования топологии – безмасочная литография	432
Глава 18. Перспективы развития фотолитографии и фотолитографического (СТО) оборудования	436
18.1. Перспективы технологии фотолитографии и СТО оборудования для нее	436
18.2. Экономика фотолитографии и фотолитографического оборудования	453
Список использованных источников	458
Перечень принятых сокращений	462