



**А. В. ГРИДЧИН**

**ВВЕДЕНИЕ  
В СОВРЕМЕННУЮ МИКРО-  
И НАНОСИСТЕМНУЮ  
ТЕХНИКУ**

**А. В. ГРИДЧИН**

**ВВЕДЕНИЕ В СОВРЕМЕННУЮ  
МИКРО- И НАНОСИСТЕМНУЮ  
ТЕХНИКУ**

Учебное пособие

Москва Вологда  
«Инфра-Инженерия»  
2024

УДК 621.382  
ББК 32.844.1  
Г83

Рецензенты:

канд. техн. наук, доцент *А. Д. Бялик*;  
канд. техн. наук, доцент *Д. В. Лаптев*

**Гридчин, А. В.**

**Г83** Введение в современную микро- и наносистемную технику : учебное пособие / А. В. Гридчин. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. – 232 с. : ил., табл.

ISBN 978-5-9729-1613-9

Раскрыто основное содержание понятий «микросистема» и «микросистемная техника». В порядке общего ознакомления рассмотрены вопросы проектирования, изготовления и экспериментальной верификации микросистем. Представлен кремний как основной материал современной электроники. Дано последовательное описание технологии производства монокристаллического кремния и изготовления кремниевых пластин. Представлено современное микроэлектронное производство и применяемые на нем стандартные технологические операции. Сделан вывод о применении описанных технологий для изготовления микро- и наносистемной техники.

Для студентов, обучающихся по программам подготовки 12.04.01 «Приборостроение» и 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника», для колледжей микроэлектронного направления и широкого круга читателей.

УДК 621.382  
ББК 32.844.1

ISBN 978-5-9729-1613-9

© Гридчин А. В., 2024  
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2024  
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>От автора</b> .....	3
<b>Глава 0. Философия микросистем</b> .....	6
0.1. Ответ на вопрос «Зачем?» .....	6
0.2. Ответ на вопрос «Почему?» .....	7
0.3. Взгляд на микроэлектронику .....	9
0.4. Терминология микроэлектроники и микросистемной техники .....	11
Список литературы к главе 0 .....	17
<b>Глава 1. Что такое микросистема?</b> .....	18
1.1. Логическая схема микросистемы .....	18
1.2. Структурные элементы микросистем .....	20
1.2.1. Классификация сенсоров .....	20
1.2.2. Классификация актюаторов .....	24
1.2.3. Сигнальный процессор .....	25
1.3. Трансдюсер или микросистема? .....	26
1.4. Выводы .....	28
Список литературы к главе 1 .....	31
<b>Глава 2. Микросистема, от идеи до воплощения</b> .....	32
2.1. Проектирование микросистем .....	32
2.1.1. Подходы к проектированию микросистем .....	32
2.1.2. Виды проектирования микросистем .....	34
2.2. Изготовление микросистем .....	38
2.2.1. Технологический маршрут .....	38
2.2.2. Fables и foundry .....	39
2.2.3. Технологическое оборудование .....	41
2.2.4. Материалы для технологического процесса .....	44
2.2.4.1. Полупроводниковые материалы .....	45
2.2.4.2. Диэлектрики и проводники .....	49
2.2.4.3. Вспомогательные материалы .....	54
2.3. Экспериментальная верификация микросистем .....	58
2.3.1. Измерения на кристалле .....	59
2.3.2. Измерения на измерительном модуле .....	63
2.3.2.1. Измерения на модуле балочного типа .....	63
2.3.2.2. Измерения на модуле мембранного типа .....	67
Список литературы к главе 2 .....	73
<b>Глава 3. Основа современной микроэлектроники</b> .....	74
3.1. Кремний .....	74
3.1.1. Кремний как механический материал .....	75
3.1.2. Кремний как полупроводниковый материал .....	78
3.1.2.1. Начальные сведения из кристаллографии .....	78
3.1.2.2. Зонная структура полупроводников .....	80
3.1.2.3. Примесные полупроводники .....	83
3.1.3. <i>P-n</i> -переход и приборы на его основе .....	85
3.1.3.1. Механизм формирования <i>p-n</i> -перехода .....	85

3.1.3.2. Приборы на основе $p$ - $n$ -перехода .....	87
3.2. Рождение и эволюция кремния .....	92
3.2.1. Выплавка кремния из кварцевого песка .....	92
3.2.2. Очистка кремния от примесей и его восстановление .....	94
3.2.3. Выращивание слитков кремния .....	98
3.2.4. Изготовление кремниевых пластин .....	102
3.3. Чистота и микроэлектроника .....	106
3.3.1. Чистые комнаты и климат в них .....	107
3.3.2. Загрязнения и способы борьбы с ними .....	113
3.4. Создание вакуума .....	117
3.4.1. Виды вакуума и его применение .....	117
3.4.2. Оборудование для создания вакуума .....	119
3.4.2.1. Форвакуумные насосы .....	119
3.4.2.2. Диффузионные насосы .....	121
3.4.2.3. Магниторазрядные и турбомолекулярные насосы .....	123
Список литературы к главе 3 .....	127
<b>Глава 4. Экскурсия на полупроводниковое производство .....</b>	<b>129</b>
4.1. Фотолитография .....	129
4.1.1. Идея фотолитографии .....	129
4.1.1.1. Фотолитография «на коленке» .....	129
4.1.1.2. Излучение и его источники .....	130
4.1.1.3. Фотошаблоны, их изготовление и применение .....	132
4.1.1.4. Фотопечать .....	134
4.1.2. Фоторезист, его нанесение и удаление .....	136
4.1.2.1. Нанесение фоторезиста .....	137
4.1.2.2. Сушка поверхности пластины .....	138
4.1.2.3. Удаление фоторезиста .....	141
4.1.3. Проявление фоторезиста .....	142
4.1.4. Альтернативные виды литографии .....	144
4.2. Травление .....	147
4.2.1. Жидкостное химическое травление .....	147
4.2.1.1. Основная идея жидкостного химического травления .....	147
4.2.1.2. Параметры, характеризующие процесс травления .....	148
4.2.1.3. Изотропное и анизотропное травление .....	150
4.2.2. Сухое травление в плазме .....	153
4.2.2.1. Идея сухого травления в плазме .....	153
4.2.2.2. Травление при помощи ионов .....	155
4.2.2.3. Травление при помощи радикалов .....	157
4.2.2.4. Реактивное ионное травление .....	159
4.2.2.5. Глубокое многостадийное травление .....	161
4.3. Термическое окисление .....	161
4.3.1. Идея термического окисления .....	162
4.3.2. Механизм термического окисления .....	164
4.3.2.1. Окисление в сухом и влажном кислороде .....	164
4.3.2.2. Окисление в присутствии галогенов .....	

4.3.2.3. Влияние параметров режима окисления.....	165
4.3.2.4. Технологическое оборудование для окисления.....	168
4.4. Термическая диффузия.....	170
4.4.1. Цель, смысл и общая суть термической диффузии.....	171
4.4.2. Практическая реализация термической диффузии.....	172
4.4.2.1. Физико-математическая картина термической диффузии.....	173
4.4.2.2. Технологические особенности термической диффузии.....	176
4.5. Ионная имплантация.....	178
4.5.1. Установка для ионной имплантации.....	179
4.5.1.1. Источник ионов и ускорительная система.....	180
4.5.1.2. Вакуумная система и контроль энергии ионов.....	182
4.5.1.3. Управление траекторией движения ионов.....	184
4.5.1.4. Система контроля и обратной связи.....	186
4.5.2. Ионное легирование.....	188
4.5.3. Технологии SIMOX и Smart-Cut.....	190
4.5.3.1. Технология SIMOX.....	190
4.5.3.2. Технология Smart-Cut.....	192
4.6. Осаждение.....	194
4.6.1. Химическое осаждение из газовой фазы.....	195
4.6.1.1. Стандартные методы осаждения.....	195
4.6.1.2. Плазмохимическое осаждение.....	197
4.6.2. Свойства осаждаемых пленок.....	198
4.6.2.1. Двуокись кремния.....	198
4.6.2.2. Нитрид кремния.....	200
4.6.2.3. Карбид кремния.....	201
4.6.2.4. Алмазоподобные пленки.....	201
4.6.2.5. Поликремний.....	203
4.6.3. Прочие методы осаждения.....	203
4.6.3.1. Атомно-слоевое осаждение.....	203
4.6.3.2. Электростимулированное осаждение металлов.....	205
4.7. Эпитаксия.....	206
4.7.1. Эпитаксия из газовой фазы.....	208
4.7.2. Молекулярно-лучевая эпитаксия.....	209
4.8. Создание металлизации.....	212
4.8.1. Эволюция металлизации.....	212
4.8.1.1. Немного истории.....	212
4.8.1.2. Элементы Plug и Via.....	214
4.8.2. Технологии напыления.....	216
4.8.2.1. Вакуумное напыление.....	216
4.8.2.2. Электронно-лучевое испарение.....	218
4.8.2.3. Магнетронное распыление.....	219
Список литературы к главе 4.....	221
<b>Заключение.....</b>	<b>224</b>