

### 5.3. СПЕЦИФИКАЦИЯ УЧЕБНЫХ ВИДЕО- И АУДИОМАТЕРИАЛОВ, СЛАЙДОВ, ЭСКИЗОВ ПЛАКАТОВ И ДРУГИХ ДИДАКТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

#### 5.3.1. СПЕЦИФИКАЦИЯ СЛАЙДОВ – КОНСПЕКТОВ ЛЕКЦИЙ

Название раздела	Число слайдо в
1	2
<b>1. Введение в технологические процессы приборостроения</b>	<b>36</b>
1.1. Структура курса. Основная и дополнительная литература. Основные положения. Задачи схмотехнического проектирования. Задачи конструкторского проектирования. Задачи технологического проектирования. Контроль качества. Уровни проектирования	9
1.2. Основные понятия и определения. Интегральная микросхема. Структура микросхемы. Топология микросхемы: общая топология, послойная топология. Интегральная технология. Степень интеграции	11
1.3. Классификация ИС. Виды классификации. Классификация по степени интеграции. Классификация по конструкторско-технологическим признакам. Классификация по функциональному назначению. Классификация по применяемости. Классификация цифровых микросхем по виду логики.	16
<b>2. История развития микроэлектроники</b>	<b>43</b>
2.1. Начало микроэлектроники. Открытие биполярного транзистора. Выбор основного полупроводникового материала. Планарная технология. Открытие полевого транзистора. Борьба за скорость. Вероломная восьмерка и фирма Fairchild	15
2.2. Бурное развитие микроэлектроники в 1960-е. Космическая гонка – стимул для развития микросхем. Выбор логики №1. Решение проблем полевых транзисторов. Закон Мура. Регулярные и нерегулярные структуры. Развитие микросхем памяти. Открытие поликремниевого затвора. Уход вероломной восьмерки из Fairchild и основанные ими фирмы.	15
2.3. Взлет микропроцессоров. Первый микропроцессор. Линейная зависимость основных параметров микросхем. МОП транзисторы против биполярных. Гонка за уменьшение себестоимости микросхем. Появление персональных компьютеров на процессорах x86. Дальнейшее развитие микроэлектроники.	13

1	2
<b>3. Подложки ИС</b>	<b>92</b>
3.1. Классификация подложек. Подложки для полупроводниковых микросхем. Полупроводниковые материалы. Полупроводники р-типа. Полупроводники n-типа. Свойства кремния. Достоинства кремния и кремниевой технологии. Виды кристаллов. Монокремний и поликремний. Индексы Миллера. Получение технического кремния. Физико-химическая очистка кремния. Метод зонной плавки. Выращивание монокристаллического кремния методом Чохральского. Резка кремния на пластины и финальная обработка.	82
3.2. Подложки пленочных и гибридных микросхем. Требования к материалу подложки. Стекланные подложки. Керамические подложки. Ситалловые подложки. Полиимидные пленки. Металлические подложки.	10
<b>4. Основы конструирования ИС</b>	<b>52</b>
4.1. Полупроводниковые транзисторы. Биполярные транзисторы. Методы изоляции между элементами. Структуры на биполярных транзисторах. МОП-транзисторы. Структуры на МОП-транзисторах	25
4.2. Диоды в интегральном исполнении. Полупроводниковые резисторы. Пленочные резисторы. Конденсаторы в интегральном исполнении. Индуктивности. Проводники и контактные площадки.	27
<b>5. Тонкопленочная технология</b>	<b>56</b>
5.1. Схема технологического процесса получения ГИС. Определяющие параметры резистивных, проводящих и диэлектрических пленок. Требования к материалам и пленкам. Особенности технологии. Классификация методов получения тонких пленок	8
5.2. Термическое вакуумное напыление. Установка термического вакуумного напыления. Обеспечение низкого давления. Формирование пленки на подложке. Интенсивность испарения. Методы уменьшения неравномерности толщины пленки на подложке. Виды испарителей. Испарители с резистивным нагревом. Испарители с косвенным нагревом. Проволочные, ленточные, коробчатые и тигельные испарители. Метод взрывного испарения. Электронно-лучевые испарители. Индукционные испарители. Недостатки термического вакуумного напыления.	37
5.3. Распыление ионной бомбардировкой. Особенности процесса. Катодная (диодная) система. Триодная система. Магнетронная система	11
<b>6. Толстопленочная технология</b>	<b>9</b>
6.1. Область применения. Структурная схема цикла. Пасты для толстопленочной технологии. Трафаретная печать. Сушка. Вжигание паст.	9
<b>7. Пленочные элементы ГИС</b>	<b>28</b>
7.1. Пленочные резисторы. Материалы для резисторов. Технологические варианты формирования пленочных резисторов. Структура и топология пленочных резисторов. Проектирование топологии пленочных резисторов. Подгоняемые резисторы. Лазерная подгонка номиналов.	19

1	2
7.2. Пленочные конденсаторы. Конструкции пленочных конденсаторов. Материалы для конденсаторов. Определение емкости пленочного конденсатора. Подгоняемые конденсаторы.	6
7.3. Пленочные индуктивности. Конструкции индуктивных элементов. Определение индуктивности.	3
<b>8. Литография</b>	<b>414</b>
8.1. Основные понятия и положения. Место литографии в структуре производственного цикла. Ключевые факторы процесса литографии. Виды литографии. Последовательность операций. Фотолитография. Разрешающая способность. Искажения при литографии. Знаки совмещения.	27
8.2. Резисты. Развитие резистов и способов литографии. Классификация резистов. Резисты для позитивной литографии. Химически усиленные фоторезисты. Резисты для негативной литографии. Растворители и присадки. Параметры и характеристики резистов. Требования к резистам. Хранение резистов.	35
8.3. Нанесение резиста. Очистка подложки. Грунтовка. Цетрифугирование. Вязкость резистов как фактор управления качеством. Сушка резиста. Регидрация резиста после сушки. Послеэкспозиционная сушка. Задубливание резиста.	44
8.4. Взрывная литография. Область применения. Особенности процесса.	10
8.5. Источники актиничного излучения. Спектральный диапазон фоторезистов. Ртутные и ксеноновые лампы. Эксимерные лазеры.	19
8.6. Экспонирование. Общие понятия. Методы экспонирования. Контактная литография. Литография с зазором. Проекционная литография. Степперы. Сканеры. Проекционные линзы. Система перемещения пластины. Совмещение.	38
8.7. Контроль качества рисунка. Контролируемые параметры. Случаи рассогласования. Минимальные размеры. Результаты контроля.	7
8.8. Автоматизация процесса литографии. Система стекового степпера. Блочный степпер.	15
8.9. Проблемы фотолитографии. Предельные возможности фотолитографии. Искажения при фотолитографии. Вычислительная литография. Коррекция эффекта оптической близости. Влияние дифракции света. Снижение дифракции. Сбор дифрагированного света линзой. Эффект стоячей волны на фоторезисте. Влияние числовой апертуры на изображение. Улучшение разрешающей способности. Влияние глубины резкости на изображение. Требования к гладкости поверхности.	35
8.10. Способы формирования изображений меньше длины волны. Технология двойного фотошаблона. Кратное шаблонирование. Использование внеосевого излучения. Фазосдвигающие маски. Иммерсионная литография.	51

1	2
8.11. Литография экстремального ультрафиолета. Схема установки. Источник излучения. Особенности строения покрытий зеркал и шаблонов.	26
8.12. Электронно-лучевая литография. Общая характеристика. Проекционная электронно-лучевая литография. Сканирующая электронно-лучевая литография. Резисты для электронно-лучевой литографии. Источники электронов. Проблемы электронно-лучевой литографии. Недостатки электронно-лучевой литографии. Использование маски <i>SCALPEL</i> .	36
8.13. Рентгенолитография. Общая характеристика. Шаблоны для рентгенолитографии. Источники рентгеновского излучения. Резисты для рентгенолитографии. Недостатки рентгенолитографии.	16
8.14. Ионно-лучевая литография. Общая характеристика. Достоинства ионно-лучевой литографии. Источники ионов. Проекционная ионно-лучевая литография. Зондовая ионно-лучевая литография. Безрезистная ионно-лучевая литография. Шаблоны для ионно-лучевой литографии. Недостатки ионно-лучевой литографии.	21
8.15. Наноимпринт литография. Общая характеристика. Особенности технологии. Область применения наноимпринт литографии. Виды наноимпринт литографии. Термоконтактная наноимпринт литография. Мягкая наноимпринт литография. <i>S-FIL</i> технология. Обращенный импринтинг.	22
8.16. Другие методы литографии. <i>DIP-PEN</i> литография. Нанолитография. LIGA- процесс	12
<b>9. Термическая диффузия.</b>	<b>51</b>
9.1. Физические основы процесса. Условия возникновения <i>p-n</i> перехода. Первый закон Фика. Коэффициент диффузии. Уравнение Аррениуса. Энергия активации диффузионного процесса. Предельная растворимость примеси. Зависимость коэффициента диффузии от температуры. Второй закон Фика. Диффузия из неограниченного источника. Диффузия из ограниченного источника. Механизмы диффузии.	24
9.2. Проведение диффузии в микроэлектронике. Диффузия в открытой трубе. Рабочая камера диффузионной печи. Диффузия в замкнутом объеме, схема установки.	21
9.3. Диффузенты. Твердые диффузенты. Жидкие диффузенты. Газообразные диффузенты. Стеклообразные диффузенты. Общие недостатки диффузии.	8
<b>10. Ионная имплантация</b>	<b>157</b>
10.1. Общие принципы. Внедрение атомов примеси. Распределение примеси по глубине. Энергия ионного пучка. Доза облучения. Сравнение диффузии и ионной имплантации. Контроль ионной имплантации. Область применения ионной имплантации. Достоинства ионной имплантации. Недостатки ионной имплантации. Особенности формирования глубоких профилей.	15

1	2
10.2. Физические основы процесса. Взаимодействие ионов с подложкой. Ядерное торможение ионов. Электронное торможение ионов. Распределение ионов по глубине. Траектория ионов и глубина легирования. Концентрационный профиль примеси. Эффект каналирования. Каналирование ионов после соударений. Борьба с каналированием. Теневой эффект. Повреждение кристаллической решетки кремния при бомбардировке ионами. Термический отжиг после ионной имплантации. Скоростной термический отжиг. Возможности ионного легирования	45
10.3. Установка для ионной имплантации. Общая схема установки. Варианты компоновки. Газовая система. Электрическая система. Вакуумная система. Система контроля. Система потока ионов. Ионизация газов в плазме. Источники ионов. Экстракция ионов из камеры. Массепаратор. Ускорительная колона. Контроль потока ионов. Электростатическое сканирование ионного луча. Механическое сканирование подложкой. Нейтрализация заряда ионного луча. Система наполнения плазмой. Система «электронный душ». Ловушка для нейтральных атомов. Облучение единичной подложки. Остановка потока ионов. Выходной анализатор. Проблемы ионной имплантации. Эффект загрязнения частицами. Оценка загрязнения частицами. Опасности при работе с имплантером.	91
10.4. Легирование на сверхмалую глубину. Ионная имплантация кислорода для формирования структуры «кремний на изоляторе». Ионная имплантация с помощью погружения в плазму.	6
<b>11. Термическое окисление кремния и другие высокотемпературные процессы</b>	<b>104</b>
11.1. Общие сведения. Требования к оборудованию. Способы окисления. Области применения. Создание экранирующего окисла. Создание боковой изоляции: <i>LOCOS/STI</i> . Применение жертвенного окисла. Применение в качестве подзатворного диэлектрика.	19
11.2. Очистка подложки перед окислением. <i>РСА</i> -очистка. Удаление макрочастиц. Удаление органических частиц. Удаление неорганических частиц. Удаление естественного оксида.	7
11.3. Механизмы оксидирования. Сухое оксидирование. Особенности образования окисной пленки. Модель Дила-Гроува. Темпы роста окисла. Влажное оксидирование. Зависимость скорости оксидирования от температуры. Зависимость скорости оксидирования от ориентации подложки. Зависимость скорости оксидирования от концентрации примесей. Эффекты накопления и истощения примесей при оксидировании. Хлорное окисление.	21
11.4. Оборудование для окисления. Установка для сухого окисления. Типовые операции при окислении. Нарушенные связи и заряд на поверхности раздела. Установка для влажного окисления. Источники водяного пара. Система типа «котел». Система типа «барботер». Система промывки струей воды. Пирогенное окисление. Типовые операции при влажном окислении.	17

1	2
11.5. Скоростное термическое оксидирование. Влияние давление на скорость процесса оксидирования. Установка для окисления под высоким давлением.	7
11.6. Процессы отжига. Послеимплантационный отжиг. Возбуждающий отжиг. Получение силицида титана. Повторное оплавление. Скоростная термическая обработка. Отжиг и перераспределение примеси из-за диффузии. Термическая нитридизация.	33
<b>12. Нанесение слоев химическим испарением (CVD)</b>	<b>180</b>
12.1. Общие сведения. Область применения в микроэлектронике. Суть метода. Технические возможности интенсификации. Сравнение выращенного окисления оксида с оксидом, полученным CVD.	8
12.2. Принцип CVD. Схема установки для CVD. Химические процессы и реакции при CVD. Кинетика CVD. Формирование пленок. CVD при атмосферном давлении. CVD при пониженном давлении. PECVD, интенсификация плазмой. Покрытие выступов и конформность. Достигаемые углы. Процесс образования пустот. Заполнение пор и пустот. Физическая сорбция и хемосорбция частиц на поверхности. Газы, используемые при CVD. Моносилан и TEOS. Система доставки газов.	51
12.3. Варианты CVD в производстве. Применение диэлектрических тонких пленок. Формирование щелевой изоляции. Формирование боковых участков (спейсеров). Осаждение барьерного слоя при формировании первого слоя металлизации (PMD). PE-TEOS процесс. O <sub>3</sub> -TEOS процесс. Использование плазмы высокой плотности. Пассивация. Характеристики диэлектрических тонких пленок. Определение толщины диэлектрических тонких пленок. Очистка камеры после проведения CVD.	121
<b>13. Эпитаксия</b>	<b>56</b>
13.1. Основные понятия. Область применения. Методы эпитаксии. Механизмы наращивания эпитаксиальных пленок.	7
13.2. Эпитаксия из газовой среды. Типовые операции при эпитаксии. Причины очистки водородом. Газы, используемые при эпитаксии. Легирование эпитаксиальных слоев. Химические реакции и кинетика. Формирование пленки кремния на поверхности. Механизм встраивания примеси при росте пленки. Реакторы для газофазной эпитаксии. Дефекты эпитаксиальных пленок и пути их снижения. Получение поликремния. Влияние температуры процесса на кристаллическую структуру осажденного кремния. Схема установки.	42
13.3. Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ). Сущность процесса. Схема реактора для МЛЭ. Область применения.	7
<b>14. Травление</b>	<b>60</b>
14.1. Сущность процесса. Методы травления. Основные понятия. Профили травления. Дефекты травления. Жидкостное травление. Этапы травления. Область применения.	15

1	2
14.2. Сухое травление. Сущность процесса. Ионно-плазменное травление. Ионно-лучевое травление. Реактивное ионное травление. Плазмохимическое травление. Сравнение методов сухого травления. Требования к процессу глубокого плазмохимического травления. Оборудование для плазмохимического травления.	45
<b>15. Химико-механическая планаризация (ХМП)</b>	<b>78</b>
15.1. Общие сведения. Сущность процесса. Область применения. Планаризация поверхности. Примеры использования метода.	24
15.2. Физические основы процесса. Аппаратное обеспечение ХМП. Схема установки для ХМП. Состав суспензий. Параметры ХМП. Селективность процесса. Эрозия при ХМП. Тарельчатый эффект. Частицы и дефекты. Детектирование частиц.	39
15.3. ХМП меди (дамасский процесс). Основные операции. Определение момента окончания процесса ХМП. Достоинства процесса ХМП.	15
<b>16. Последовательность создания основных структур ИС</b>	<b>160</b>
16.1. Структуры на биполярных транзисторах. Диффузионно-планарная структура. Эпитаксиально-планарная структура. Структура с диэлектрической изоляцией. Изопланарная структура. Полипланарная структура.	55
16.2. Структуры на МОП-транзисторах. КМОП структура с защитными кольцами. КМОП структура без защитных колец. Проблемы классических КМОП структур. Способы борьбы с эффектом защелкивания. LOCOS транзисторы. МОП транзисторы с щелевой изоляцией (STI). КНС структура. КНИ структура. Технология напряженного кремния. НКМГ транзисторы. FinFET транзисторы. Дальнейшая эволюция FinFET транзисторов.	105
<b>17. Проектирование топологии ИС</b>	<b>37</b>
17.1. Структуры на биполярных транзисторах. Расчет размеров эмиттерного контакта и области эмиттера. Расчет размеров контакта кбаза области базы. Расчет размеров контакта к коллектору и области коллектора. Варианты топологической реализации полосковых биполярных транзисторных структур. Транзисторные структуры средней мощности	26
17.2. Структуры на МОП-транзисторах. Определение длины канала. Определение длины тонкого окисла. Определение длины затвора. Определение ширины канала, тонкого окисла и затвора. Определение длины истока и стока. Определение размеров $p$ -кармана. Примеры топологической реализации МОП-транзисторов. Реализация схемы защиты.	11
<b>18. Разделение пластин на кристаллы</b>	<b>35</b>
18.1. Способы разделения пластин. Разрезка пластин диском с наружной алмазной режущей кромкой (ДАР). Конструкция современных ДАР. Алмазное скрайбирование. Лазерное скрайбирование. Электронолучевое скрайбирование. Разламывание пластин на кристаллы. Разделение подложек ГИС.	35

1	2
<b>19. Корпуса интегральных микросхем</b>	<b>57</b>
19.1. Общие сведения о корпусах. Варианты исполнения корпусов. Шаг выводов корпусов. Материалы корпусов. Эволюция корпусов ИС. Классификация корпусов по виду выводов. Классификация корпусов по расположению выводов.	8
19.2. Корпуса с периферийным расположением выводов. Общие сведения. Конструкции планарных периферийных выводов. Корпуса <i>DIP</i> . Корпуса <i>PLCC</i> и <i>CLCC</i> . Корпуса <i>QFP</i> . Планарные корпуса с двухрядным расположением выводов.	19
19.3. Корпуса с матричным расположением выводов. Общие сведения. Конструкции выводов в матричной системе. Достоинства и недостатки матричной системы выводов. Корпуса <i>PGA</i> . Корпуса <i>BGA</i> . Корпуса <i>CCGA</i> . Корпуса <i>CSP</i> .	24
19.4. Российские корпуса. Типы корпусов. Шаг выводов. Обозначение корпусов	6
<b>20. Монтаж кристаллов ИС в корпуса</b>	<b>40</b>
20.1. Общие сведения. Размещение кристаллов в корпусе. Контактные площадки. Конструкции выводов для соединения с контактными площадками.	8
20.2. Монтаж кристаллов с проволочными выводами. Монтаж кристаллов с паучковыми выводами. Монтаж кристаллов с балочными выводами. Конструкция шариковых выводов. Метод перевернутого кристалла ( <i>Flip Chip</i> ).	18
20.3. Монтаж кристаллов непосредственно на плату. Технология «кристалл-на-плате» ( <i>COB</i> ). Технология «кристалл-на-стекле» ( <i>COG</i> ). Технология «кристалл-на-полимере» ( <i>COF</i> )	7
20.4. Многокристальные модули ( <i>MCM</i> ). Общие сведения. Стапеллирование <i>MCM</i> . Варианты монтажных оснований <i>MCM.MCM</i> на гибкой основе.	7
<b>21. Герметизация ИС</b>	<b>64</b>
21.1. Бескорпусная герметизация. Достоинства и недостатки. Материалы. Герметизация методом обволакивания. Метод свободной заливки во вспомогательные формы. Метод свободной заливки в корпуса. Компрессионное прессование. Литьевое (трансферное) прессование. Шовноклеевая герметизация.	32
21.2. Корпусная герметизация. Достоинства. Особенности корпусов. Требования к корпусам. Герметизация корпусов пайкой. Герметизация корпусов холодной сваркой. Герметизация корпусов аргонно-дуговой сваркой. Герметизация корпусов лазером. Герметизация корпусов контактной (роликовой) сваркой.	25
21.3. Контроль герметичности. Общие сведения. Масс-спектрометрический метод. Вакуумно-жидкостной метод. Пузырьковый метод.	7

1	2
<b>22. Перспективы развития электронной компонентной базы</b>	<b>128</b>
22.1. Проектная норма. Виды технорм. Лямбда-система. Альфа-правило. Соотношение технормы и длины затвора полевого транзистора. Эффективная и топологическая длина канала. Короткоканальные эффекты. Токи утечки в субмикронных транзисторах. Физические ограничения по размерам транзисторов. Определение технормы исходя из площади. Способы снижения токов утечки. Граница закона Мура. Технологические особенности техпроцесса 22/14/10 нм. Современное состояние микроэлектроники. Техпроцессы 7/5/3/2/1 нм. Трехмерные микросхемы.	72
22.2. Развитие наноэлектроники. Транзисторы на основе арсенида индия-галлия и фосфида индия. Влияние эффекта квантования электрического заряда в нанокластерах. Магические кластерные конфигурации. Фуллерены. Углеродные нанотрубки. Транзисторы на основе углеродных нанорубок. Графен. Вертикальный полевой туннельный транзистор на основе графена. Жидкие нанотранзисторы. Биологические транзисторы (транскрипторы).	56

### **5.3.2. ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ ДИДАКТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПО ЛЕКЦИЯМ**

В разделе приведен типовой пример оформления дидактического материала по дисциплине – конспект материалов лекций, содержащий основные определения, теоретические основы и физические принципы, а также примеры, иллюстрирующие принципы действия и области использования технологического оборудования.

Методологически дисциплина строится на основе оптимального соотношения теоретических и прикладных вопросов с реализацией проектных методов обучения. Структура материала отличается реализацией блочно-вариативной концепции внедрением проектных методов подготовки специалистов по «Приборостроения».

Типовая структура слайда содержит: название дисциплины, название (тему) лекции, название кафедры, ее электронный адрес и название университета.

На первом лекционном слайде отображается название лекции, ее цель и краткая характеристика содержания. Далее следуют слайды, иллюстрирующие содержание лекционного материала.

Заключительный слайд содержит выводы по теме лекции и информацию об условиях использования представленных презентационных материалов студентами, преподавателями и сторонними лицами.

## Технологические процессы в приборостроении

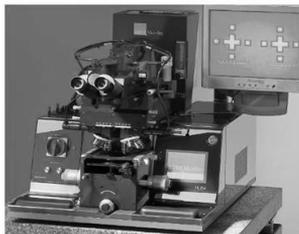
- Цель дисциплины: обучить студентов современным технологиям производства интегральных микросхем.
- Решаемые задачи:
  - принципы построения современных интегральных микросхем;
  - основные элементы, из которых состоят микросхемы;
  - основные технологические операции, используемые при производстве микросхем;
  - особенности оборудования, используемого при производстве микросхем;
  - методики расчета элементов микросхем.
- Программа курса:
  - лекции: 51 час;
  - 3 домашних задания:
    - проектирование топологии тонкопленочных резисторов;
    - расчет параметров диффузии областей КМОП транзистора;
    - проектирование топологии МОП транзистора;
  - лабораторные работы: 17 часов;
  - курсовой проект: 104 часа.

Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства ЭС»

МГТУ  
им. Н.Э. Баумана

### Введение

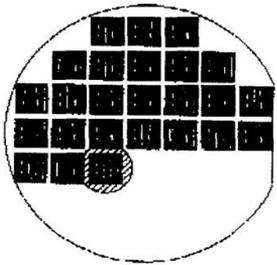
За прошедшие 30 лет размеры топологических элементов при производстве СБИС неуклонно уменьшались. Сейчас дальнейшее уменьшение топологии связано с решением большого круга проблем, начиная от квантовых взаимодействий и кончая точностью оборудования.



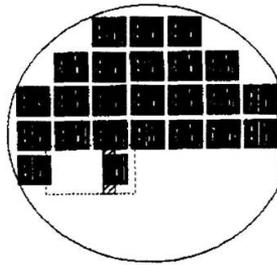
Установка совмещения и экспонирования Suss MJ134

МГТУ  
им. Н.Э. Баумана

## Степперы и сканеры



Степпер



Сканер




## Оптическая схема степпера



Light source



Condensor lens



Reticle



Objective lens

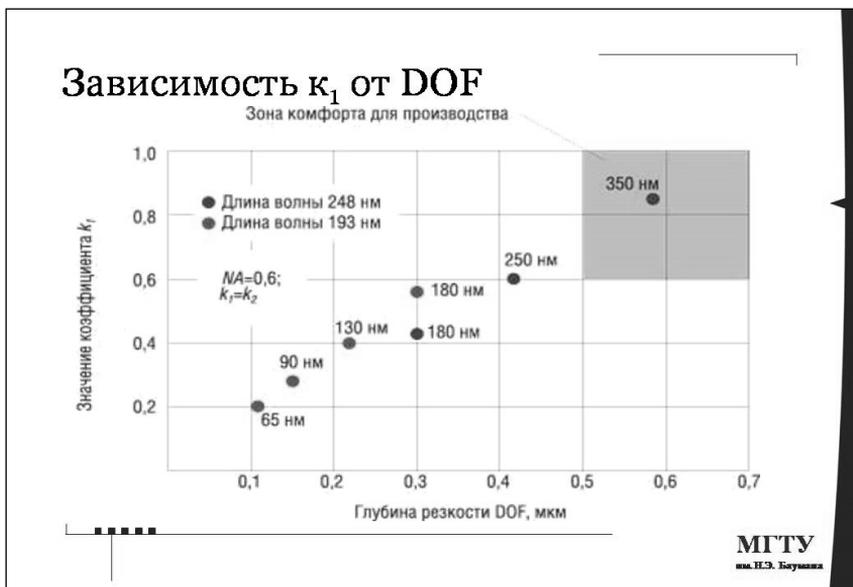


Wafer

*Упрощенная оптическая модель степпера*

$NA = \sin\Theta_0$  – числовая апертура оптической системы



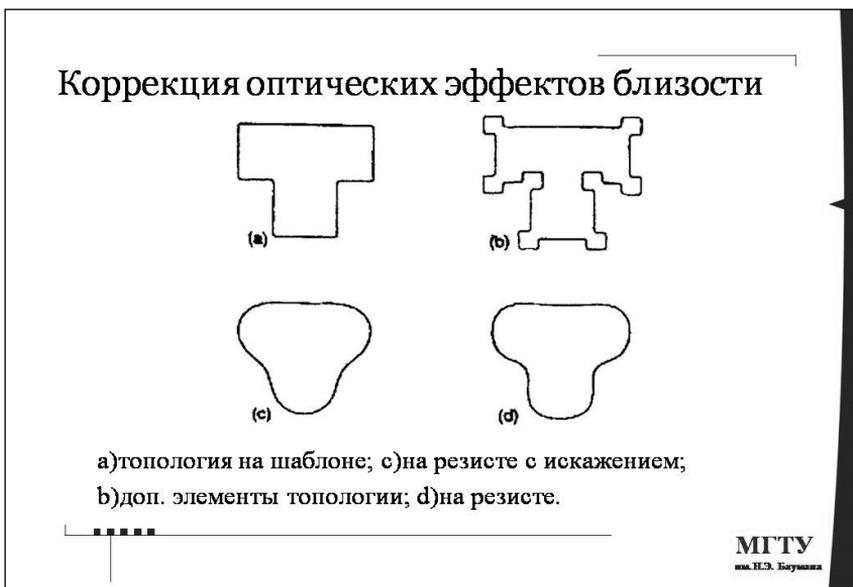
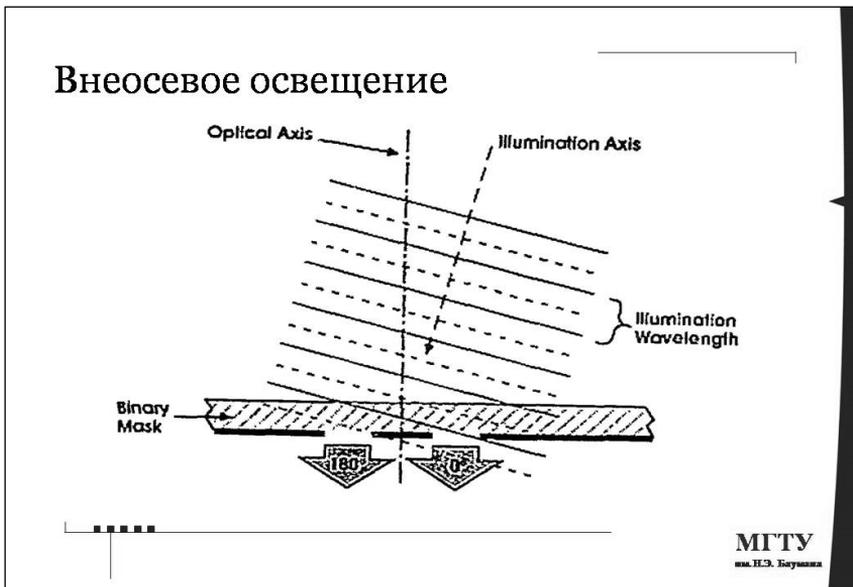



## Методы экстенсивной литографии

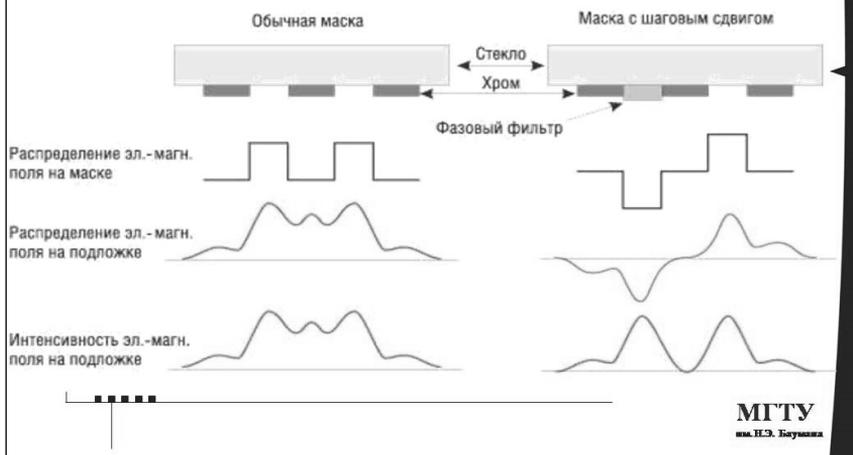
*Совершенствование процесса фотолитографии за счет  $k_1$  получило название «экстенсивная фотолитография»*

Способы понижения коэффициента  $k_1$ :

- ✘ Внеосевое освещение;
- ✘ Коррекция оптических эффектов близости;
- ✘ Шаблоны с фазовым сдвигом.



## Шаблоны с фазовым сдвигом



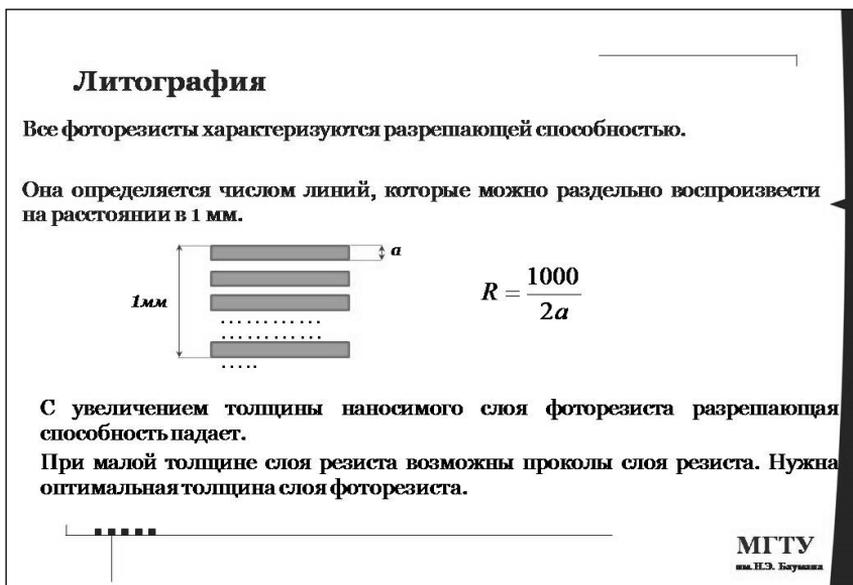
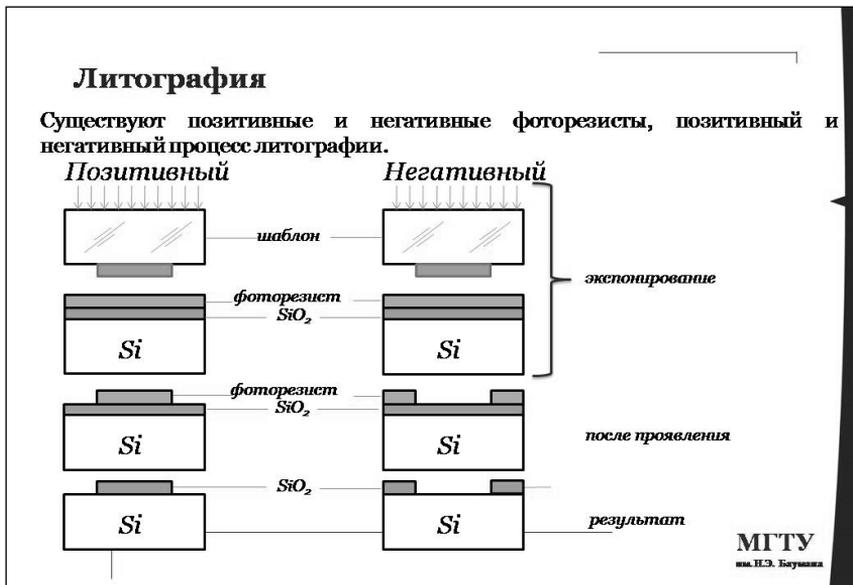
## Литография

Это совокупность операций технологического цикла производства интегральных микросхем, имеющее конечной целью создание на поверхности пластины защитной пленки фоторезиста (фотомаски), форма которого повторяет рисунок шаблона. С помощью процесса литографии обеспечивается получение конфигурации и необходимых компонентов ИМС.

С помощью процесса литографии обеспечивается получение конфигурации и необходимых компонентов ИМС. Суть состоит в переносе рисунка фотошаблона без искажения на поверхность пластины, покрытой фоторезистом (специальным светочувствительным слоем).

Фоторезисты – светочувствительные и устойчивые к воздействию агрессивных сред вещества, предназначенные для создания защитного рельефа требуемой конфигурации от последующих агрессивных воздействий (физических, химических и прочих).





## Операции литографии

Состоит из:

1. Подготовка поверхности пластины к нанесению слоя резиста.
2. Нанесение слоя резиста.
3. Совмещение.
4. Экспонирование.
5. Проявление скрытого изображения.
6. Задубливание.
7. Травление.
8. Удаление слоя резиста.
9. Отмывка поверхности пластины от остатков резиста.



МГТУ  
им. Н.Э. Баумана

## Подготовка поверхности пластины

При нанесении резистивного слоя на поверхность пластины основная задача – обеспечить адгезию наносимого слоя и однородность толщины слоя. С этой целью проводят подготовку поверхности пластины к нанесению слоя, которая заключается в удалении адсорбированных молекул воды, жировых плёнок и других жировых загрязнений. Молекулы воды удаляются термическим прогревом пластин при  $T=700-8000C$  около 10 минут. Жировые пятна и органические загрязнения удаляют в деметилформамиде и ацетоне.



МГТУ  
им. Н.Э. Баумана

### Нанесение слоя резиста

Неравномерность слоя резиста в случае контактной литографии, неравномерность дает неровное прилегание, что ухудшает разрешающую способность резиста. А поры и инородные частицы приводят на этапе травления приводят к проколам. Поэтому резист обязательно фильтруют. Наносят и сушат в беспылевой атмосфере.

Существует 2 метода нанесения резиста:

- Центрифугирование.
- Распыление.

Недостаток слоя резиста, нанесённого методом центрифугирования, - резист находится в напряжённом состоянии. Также с увеличением толщины резиста уменьшается разрешающая способность.

Недостатки центрифугирования: трудность получения плёнок в несколько мкм (из-за плохой растекаемости вязкого резиста), напряженное состояние пленки (может порваться), наличие краевого утолщения как следствие повышения вязкости в процессе растекания резиста, трудность организации одновременной обработки нескольких пластин.

МГТУ  
им. Н.Э. Баумана

### Совмещение

При контактной литографии операция совмещения выполняется в 2 этапа: грубое и точное совмещение. Точное совмещение выполняют с помощью специальных меток совмещения. Метки бывают светлыми и темными. Первый и последний шаблоны имеют по 1 метки, а промежуточные по 2.

При проекционной литографии используют установку пошагового проекционного репродуцирования (УППР).

### Экспонирование

Контактная литография выполняется на УПСЭ-4 (800 кг, ртутные лампы высокого давления, 0,5 кВт), время экспонирования несколько секунд. Установка состоит из микроскопа, осветителя и блок механических перемещений установки.

МГТУ  
им. Н.Э. Баумана

## Проявление

Негативные фоторезисты проявляются в органических растворителях (диоксан, толуол, трихлорэтилен).

Позитивные фоторезисты проявляются неорганическими проявителями с щелочными свойствами (KOH, NaOH, тринатрийфосфат  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ).

Точность рисунка зависит от температуры, времени проявления, концентрации проявителя, времени экспонирования.

## Задубливание (сушка)

Цель – удаление влаги чтобы повысить кислотоустойчивость (стойкость слоя к проявителям). Производят в термошкафах при  $T=120-180^\circ\text{C}$  в пределах часа.



МГТУ  
им. Н.Э. Баумана

## Удаление слоя резиста

Негативные фоторезисты (маска) удаляются под воздействием смеси серной кислоты  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и  $\text{H}_2\text{O}_2$  в соотношении 3:1.

Маски из позитивных резистов удаляются растворением в чистом ацетоне.

Существует сухой метод удаления обоих типов фоторезиста – плазмохимическим методом, путем обработки фотомаски кислородосодержащей плазмой без электродного высокочастотного разряда. Эта операция выполняется на установке Плазма-600 (200 пластин/час, 100 мм).



МГТУ  
им. Н.Э. Баумана

Текст лекции, ее длительность, язык и насыщенность фактами и аргументами должны учитывать возрастной и социальный состав аудитории. Не рекомендуется писать весь материал лекции дословно. Бывает, что перед самым началом лекции приходится вносить срочные изменения, и

сделать их, конечно, легче в конспекте, чем в дословном тексте. При подготовке текста особенное внимание рекомендуется уделять его началу и окончанию. Начало не должно быть слишком затянутым, не надо начинать с общих, всем известных фраз. Необходимо сразу заинтересовать слушателей, зацепить, что называется, за «живое», показать связь предмета лекции с реальными, известными из повседневной жизни событиями и объектами.

При выступлении необходимо стремиться избегать всяческих канцеляризмов, сорных слов типа «значит», «так сказать» и т. д., жаргонных выражений. Живости, ясности выступления способствуют народные поговорки и пословицы, цитаты из литературных произведений и «крылатые слова» великих людей. Но и здесь необходимо знать меру. Считается, что при получасовом выступлении возможно использование 2–3 цитат и 5 округленных цифр. Текст выступления рекомендуется подготавливать за 2–3 дня до выступления в черновом варианте, а затем снова вернуться к нему.

Психологи отмечают, что внимание аудитории к лектору постепенно начинает снижаться уже через 15 минут после начала. В связи с этим не рекомендуется слишком затягивать свое выступление. Доказано также, что восприятие материала возрастает при комплексности воздействия на органы чувств человека. Поэтому желательно демонстрировать на лекции цветные слайды, видеофильмы, образцы, красочные плакаты и т. п.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплект учебно-методического обеспечения по дисциплине «Технологические процессы изготовления электронной компонентной базы приборостроения» подготовлен на основе единой концепции создания учебных пособий и методических материалов, входит в комплекс дисциплин подготовки бакалавров и магистров по программам высшего профессионального образования по направлению подготовки 12.03.01 «Приборостроение» (уровень бакалавриата).

Конспект лекций по дисциплине содержит рекомендации по организации и проведению лекционных и семинарских занятий, перечень слайдов, типовых плакатов и другие дидактические материалы, необходимые профессорско-преподавательскому составу для ее преподавания.

Структура и состав учебно-методического обеспечения соответствуют требованиям федеральных законов от 10.07.1992 г. № 3266-1-ФЗ «Об образовании» (с изменениями и дополнениями) и от 22.08.1996 г. № 125-ФЗ «О высшем и послевузовском профессиональном образовании» (с изменениями и дополнениями), Типового положения об образовательном учреждении высшего профессионального образования (высшем учебном заведении), утвержденного постановлением Правительства РФ от 14 февраля 2008 г. № 71.

В заключение авторы выражают надежду на то, что представленные материалы будут полезны при подготовке к лекционным и семинарским занятиям и тем представителям профессорско-преподавательского состава высших учебных заведений, которые уже освоили преподавание указанной дисциплины, и тем его представителям, которым еще предстоит это сделать.

Данный УМК разработан сотрудниками кафедры ИУ4 «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» и кафедры ИУК1 «Проектирование и технология производства электронных приборов» Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана в соответствии с самостоятельно устанавливаемым образовательным стандартом (СУОС), основной профессиональной образовательной программой и учебным планом МГТУ им. Н.Э. Баумана по направлению подготовки 12.03.01 «Приборостроение» (уровень бакалавриата).

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Парфенов О. Д.* Технология микросхем : учеб. пособие для вузов / Парфенов О. Д. - М. : Высш. шк., 1986. - 318 с. : ил. - Библиогр.: с. 317.
2. *Варламов П. И., Елсуков К. А., Макарчук В. В.* Технологические процессы в нанотехнологии : учеб. -метод. комплекс по тем. направлению деятельности ННС "Нанотехнологии" : учеб. пособие для вузов / Варламов П. И., Елсуков К. А., Макарчук В. В. ; ред. Шахнов В. А. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. - 175 с. : ил. - (Библиотека "Нанотехнологии" : в 17 кн. ; кн. 2). - Библиогр.: с. 173. - ISBN 978-5-7038-3493-0.
3. *Королёв М. А.* Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем : в 2 ч : учебное пособие / М. А. Королёв, Т. Ю. Крупкина, М. А. Ревелева; под редакцией Ю. А. Чаплыгина. — 4-е изд. — Москва : Лаборатория знаний, 2020. — 400 с. — ISBN 978-5-00101-814-8. — Текст : электронный// Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/151589>
4. *Макарчук В. В., Родионов И. А., Цветков Ю. Б.* Методы литографии в нанотехнологии : учеб. -метод. комплекс по тем. направлению деятельности ННС "Нанотехнологии" : учеб. пособие для вузов / Макарчук В. В., Родионов И. А., Цветков Ю. Б. ; ред. Шахнов В. А. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. - 175 с. : ил. - (Библиотека "Нанотехнологии" : в 17 кн. ; кн. 9). - Библиогр.: с. 171. - ISBN 978-5-7038-3500-5.
5. *Панфилов Ю. В., Моисеев К. М., Михайлов В. П.* Высоковакуумные технологические процессы в нанотехнологии : учеб. -метод. комплекс по тем. направлению деятельности ННС "Нанотехнологии" : учеб. пособие для вузов / Панфилов Ю. В., Моисеев К. М., Михайлов В. П. ; ред. Шахнов В. А. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. - 191 с. : ил. - (Библиотека "Нанотехнологии" : в 17 кн. ; кн. 3). - Библиогр.: с. 167. - ISBN 978-5-7038-3494-7.
6. *Макарчук В. В., Родионов И. А.* Проектирование электронной электронной компонентной базы наносистем : учеб. -метод. комплекс по тем. направлению деятельности ННС "Нанотехнологии" : учеб. пособие для вузов / Макарчук В. В., Родионов И. А. ; ред. Шахнов В. А. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. - 156 с. : ил. - (Библиотека "Нанотехнологии" : в 17 кн. ; кн. 5). - Библиогр.: с. 154. - ISBN 978-5-7038-3496-1.

7. *Андреев В. В., Столяров А. А.* Физические основы наноинженерии : учеб. -метод. комплекс по тем. направлению деятельности ННС "Наноинженерия" : учеб. пособие для вузов / Андреев В. В., Столяров А. А. ; ред. Шахнов В. А. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. - 223 с. : ил. - (Библиотека "Наноинженерия" : в 17 кн. ; кн. 16). - Библиогр.: с. 219-220. - ISBN 978-5-7038-3507-4.
8. *Мурога С.* Системное проектирование сверхбольших интегральных схем: в 2 кн. / Пер. с англ. – М.: Мир, 1985.
9. *Пирс К., Адамс А., Цай Дж., Сейдел Т., Макгиллис Д.* Технология СБИС. В 2-х кн., Кн.1. Пер. с англ. Под ред. С.Зи. – М.: Изд-во «Мир», 1986. – 404 с.: ил.
10. *Парфенов О.Д.* Конструирование полупроводниковых интегральных схем: Методические указания по курсовому проектированию по курсу «Конструирование и технология микросхем». – М.: МВТУ, 1984. – 27 с.: ил.
11. *Парфенов О.Д.* Расчет и конструирование интегральных резисторов: метод.указания по курсовому проектированию по курсу "Микроминиатюризация электронно-вычислительных средств". – М.: Изд-во МГТУ, 1994. – 27 с.: ил.
12. *Парфенов О.Д.* Расчет и конструирование интегральных транзисторов. /Методические указания по курсовому проектированию. – М.: Изд-во МГТУ, 1997. – 19.с.: ил.
13. *Макарчук В.В.* Проектирование топологии биполярного планарно-эпитаксиального транзистора: Методические указания к курсовому проектированию по курсу «Технологические процессы микроэлектроники». – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 20 с.: ил.
14. *Красников Г.Я.* Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов – М.: Техносфера, 2011. - 800 с.
15. *Рабаи Ж.М., Чандракасан А., Николич Б.* Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования. / 2-е изд, пер. с англ. – М.: Вильямс, 2007. — 912 с.
16. *Уэйкерли Дж.Ф.* Проектирование цифровых устройств: в 2-х томах. – М.: Изд-во «Постмаркет», - 2002. – 544 с.: ил.
17. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники: В 3-х томах / Пер. с англ. – 4-е изд. перераб. и доп. -М.: «Мир», 1993. – 413 с.: ил.
18. *Красников Г.Я., Горнев Е.С., Матюшкин И.В.* Общая теория технологий и микроэлектроника. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. — 434 с.