Создаём Внедряем Развиваем

Новые маршруты в Дорожной карте Микроэлектроники

Научно информационный журнал

Техно-Кот

Выпуск №1

Инсайт микроэлектроники
хайтек на пальцах

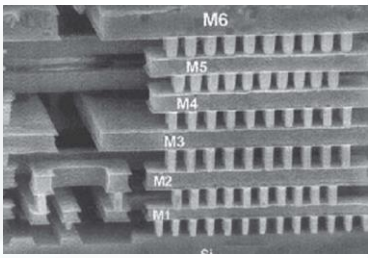


Образовательный курс по технологиям производства микроэлектроники

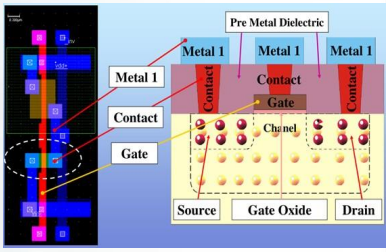
2026г

СОДЕРЖАНИЕ

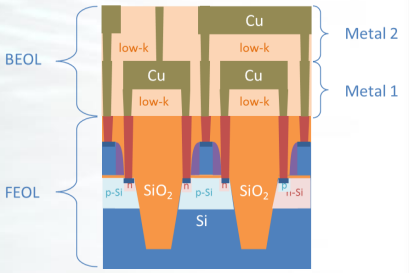
Раздел 1 стр. 3
Введение в технологию производства



Раздел 2 стр. 15
Полупроводниковая технология шаг за шагом



Раздел 3 стр. 21
Технологическая схема производства ИС



Раздел 4 стр. 30
Интеллектуальная собственность



Партнеры: ***www.novatec-group.ru*** **ООО «ТПМ»**
www.mapperllc.ru **ООО «МАППЕР»**

Сноска о товарных знаках и изображениях Все упомянутые в этом журнале названия компаний, продуктов и технологий (в том числе Intel, TSMC, ARM, Qualcomm, NVIDIA, ASML, Synopsys, Texas Instruments и другие), а также логотипы являются товарными знаками и (или) зарегистрированными товарными знаками соответствующих правообладателей. Упоминания носят информационный характер и не означают принадлежности, одобрения или спонсорства со стороны указанных компаний. Иллюстрации журнала либо сгенерированы с помощью нейросетей, либо взяты из открытых источников; исключительные права на них принадлежат их авторам и правообладателям. Журнал распространяется в образовательных целях, без цели извлечения прибыли. Если вы являетесь правообладателем и считаете, что какой-либо материал используется ненадлежащим образом, напишите нам — материал будет исправлен или удалён.

Раздел 1: Введение в технологию производства



Интегральные схемы (ИС) — это крошечные электронные устройства, которые содержат миллионы или даже миллиарды транзисторов, резисторов, конденсаторов и других компонентов на одном кристалле кремния. Они стали основой современной электроники и играют ключевую роль практически во всех аспектах нашей жизни.

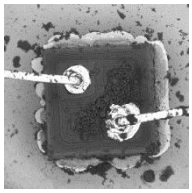
Интегральные схемы лежат в основе всех современных компьютеров и смартфонов. Процессоры, графические карты, оперативная память и другие компоненты всё это ИС. Благодаря им мы можем пользоваться мощными устройствами, которые помещаются в кармане. Современные ИС, такие как графические процессоры и специализированные чипы для искусственного интеллекта (AI – artificial intelligence), позволяют обрабатывать огромные объемы данных и обучать сложные нейронные сети. Еще они используются в маршрутизаторах, модемах, сотовых вышках и других устройствах, обеспечивающих связь. Они позволяют передавать данные на огромные расстояния с высокой скоростью, делая возможным существование интернета, мобильной связи и спутниковой навигации. Игры, фильмы, музыка и другие формы развлечений стали доступны благодаря интегральным схемам. Консоли, телевизоры, наушники, аудиосистемы и даже умные колонки — все они работают благодаря ИС. Практически вся бытовая техника, от стиральных машин и холодильников до микроволновых печей и телевизоров, содержит интегральные схемы. Они делают устройства умнее, энергоэффективнее и удобнее в использовании.

Интегральные схемы используются в системах мониторинга окружающей среды, таких как датчики качества воздуха, воды и почвы. ИС делают образование более доступным и интерактивным. Они используются в компьютерах, планшетах, интерактивных досках и других устройствах, которые помогают учиться и развиваться. В медицине ИС используются в диагностическом оборудовании, таких как МРТ, КТ, УЗИ, а также в имплантируемых устройствах, таких как кардиостимуляторы и слуховые аппараты. Они помогают врачам ставить точные диагнозы и спасать жизни.

В промышленности интегральные схемы используются в системах автоматизации, робототехнике, станках с ЧПУ и других устройствах. Они повышают производительность, точность и безопасность производственных процессов. Современные автомобили, самолеты, поезда и даже космические корабли также оснащены ими. Они управляют системами навигации, двигателями, системами безопасности (например, ABS – anti-lock braking system и подушками безопасности), а также обеспечивают работу автопилотов и систем помощи водителю, помогают исследовать космос, изучать Землю из космоса и обеспечивать связь на больших расстояниях.

Интегральные схемы стали неотъемлемой частью нашей жизни. Они делают технологии быстрее, компактнее, дешевле и доступнее. Без них невозможно представить современный мир, и их влияние будет только расти с развитием новых технологий, таких как квантовые вычисления, интернет вещей (IoT – internet of things) и многих других.

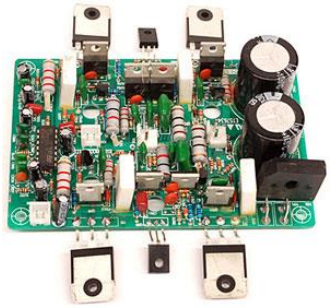
Вначале транзисторы были дискретными элементами



Транзисторный кристалл



Дискретный транзисторный элемент



Печатная плата (PCB) с дискретными элементами

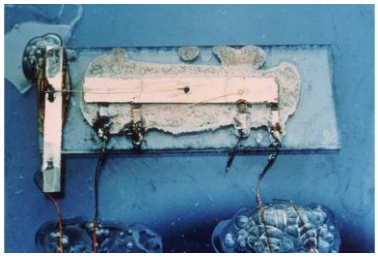
История развития электроники от дискретных транзисторов до печатных плат это увлекательный путь, который отражает эволюцию технологий и инженерной мысли. Давайте рассмотрим ключевые этапы этого процесса.

1. Эпоха дискретных элементов

В 1947 году в Bell Labs был изобретен первый работающий транзистор. Это стало отправной точкой для развития современной электроники. Транзисторы заменили громоздкие и ненадежные электронные лампы, что позволило создавать более компактные и энергоэффективные устройства. В то время электронные устройства собирались из отдельных элементов: транзисторов, резисторов, конденсаторов и диодов. Эти компоненты соединялись вручную с помощью проводов, что было трудоемким и ненадежным процессом, но позволило создать первые радиоприемники, телевизоры и компьютеры (например, IBM 650). *Если собрать современный процессор из дискретных элементов, то он покроет площадь в 1 км^2*

2. Появление интегральных схем

В 1958 году Джек Килби и Роберт Нойс независимо друг от друга разработали первые интегральные схемы. ИС объединяли несколько транзисторов и других компонентов на одном кристалле кремния, что значительно уменьшило размеры устройств и повысило их надежность. Интегральные схемы стали основой для дальнейшей миниатюризации электроники. Это позволило создавать более сложные устройства, такие как калькуляторы и первые микропроцессоры.



Изобретатель: Jack Kilby (Texas Instruments)
Год: 1958
Нобелевская премия: 2000

Содержит несколько транзисторов

3. Развитие печатных плат (PCB)

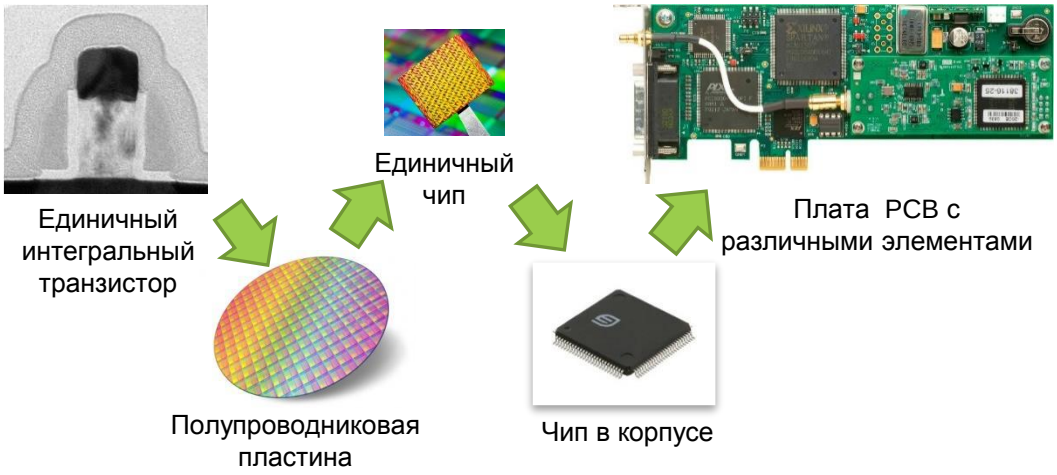
С 1950-х печатные платы (PCB – printed circuit board) стали ключевым элементом в сборке электронных устройств. Они заменили ручную пайку проводов, обеспечивая более надежное и компактное соединение компонентов. На платах из изоляционного материала (например, стеклотекстолита) наносились медные дорожки, которые соединяли компоненты. Это позволило автоматизировать процесс сборки и снизить стоимость производства. В 1960-х годах появились многослойные платы, что позволило увеличить плотность компонентов и сложность устройств.

4. Эпоха микропроцессоров и цифровой электроники (70-е годы)

Создание микропроцессоров (например, Intel 8080) открыло эру цифровой электроники. Это позволило создавать программируемые устройства, такие как персональные компьютеры. С развитием микропроцессоров и интегральных схем печатные платы стали более сложными, с большим количеством слоев и компонентов. Появились первые ПК (Apple II, IBM PC), игровые приставки и бытовая электроника.



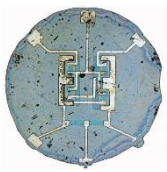
Современные транзисторы интегрированы на одном кристалле (чипе) и образуют ИС.



5. Современная эпоха (начало 1990 г.)

Современные печатные платы используют технологии поверхностного монтажа (SMT – surface mount technology), что позволяет размещать компоненты с высокой плотностью. Появились гибкие печатные платы (Flex PCB) и платы с большим количеством слоев (до 50 и более), что необходимо для сложных устройств, таких как смартфоны и компьютеры. Современные системы автоматизированного проектирования (CAD – computer-aided design, например, Altium Designer, KiCad) позволяют создавать сложные платы с высокой точностью.

Первая коммерческая ИС



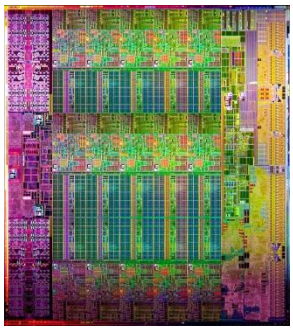
FAIRCHILD

Производитель: Fairchild Semiconductors

Год: 1960

Содержит несколько транзисторов

Современная ИС



intel

Производитель: Intel

Xeon Ivy Bridge

Год: 2014

Содержит 4 млрд транзисторов

Уровень технологии: 22 нм

6. Будущее электроники

Развитие технологий 3D-печати может привести к созданию трехмерных печатных плат, что еще больше увеличит плотность компонентов. Сочетание традиционных PCB с новыми материалами (например, графеном) и технологиями (например, квантовыми вычислениями) откроет новые горизонты для электроники. Уменьшение размеров транзисторов до нанометрового уровня (например, 2 нм технологии) продолжает двигать индустрию вперед.

Производство микросхем — это одна из самых высокотехнологичных отраслей, требующая огромных инвестиций в оборудование и исследования. Современные фабрики (например, TSMC, Intel, Samsung) используют оборудование стоимостью в миллиарды долларов и работают на пределе возможностей современных технологий.

Массовое промышленное производство интегральных схем

В современном производстве особое внимание уделяется созданию чистых комнат, которые обеспечивают соответствующий уровень чистоты и контроля за окружающей средой. Чистые комнаты можно классифицировать по типам в зависимости от их назначения и требуемых стандартов. Классификация делится на несколько категорий, включая фабрики с контролируемыми параметрами (IC FAB) и лаборатории с ламинарным потоком, каждая из которых имеет свои уникальные характеристики и требования.

Коридоры в чистых комнатах играют важную роль в обеспечении бесконтактного передвижения и минимизации рисков загрязнения. Они спроектированы с использованием специальных материалов и технологий, которые позволяют сохранить необходимую герметичность. Буферная зона, служит промежуточным пространством между чистой комнатой и внешней средой. Это пространство помогает минимизировать попадание загрязняющих частиц и обеспечивает безопасность при перемещении оборудования и материалов. Таким образом, четкое проектирование и соблюдение норм в каждом из этих элементов критически важны для успешного функционирования производственных процессов.

Важным аспектом проектирования чистых комнат является система вентиляции, которая обеспечивает необходимый обмен воздуха. Фильтры HEPA (высокоэффективные воздушные фильтры) часто используются для удаления частиц размером до 0,3 микрометра, что позволяет поддерживать нужный уровень чистоты воздуха. Правильное распределение потока воздуха также критично для минимизации зон с высоким уровнем загрязнения и обеспечения равномерного контраста давления. Кроме того, использование специальных покрытий для стен и полов позволяет предотвратить накопление пыли и облегчить уборку. Материалы, обладающие антистатическими и антимикробными свойствами, способствуют созданию безопасной и чистой рабочей среды.

Персонал, работающий в чистых комнатах, обучается соблюдению строгих протоколов, включая ношение защитной одежды и соблюдение процедур входа и выхода, что также крайне важно для минимизации рисков загрязнения. В результате, комплексный подход к проектированию и организации чистых комнат способствует повышению качества продукции и безопасности производственных процессов.

Особенности производства

Высокая производительность: Фабрика может производить миллиарды ИС в год.
Точность: ИС производятся с высочайшим уровнем точности и надежности.
Инновации: Фабрика инвестирует в исследования и разработки для создания новых технологий и продуктов.
Безопасность: Фабрика спроектирована с учетом экологичности и соответствует отраслевым стандартам «безопасность превыше всего» (safety first).
Партнерства: Фабрика сотрудничает с ведущими компаниями-разработчиками и поставщиками отрасли для разработки и производства инновационных решений.

Чистые помещения необходимы для предотвращения загрязнения частицами.



Стандартные фабрики частично автоматизированы

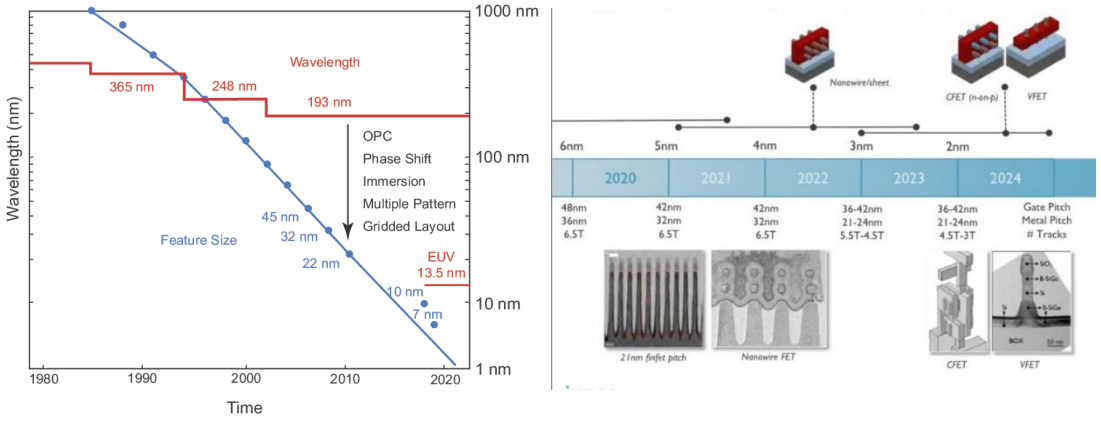


Передовые фабрики полностью автоматизированы

Мировой тренд масштабирования

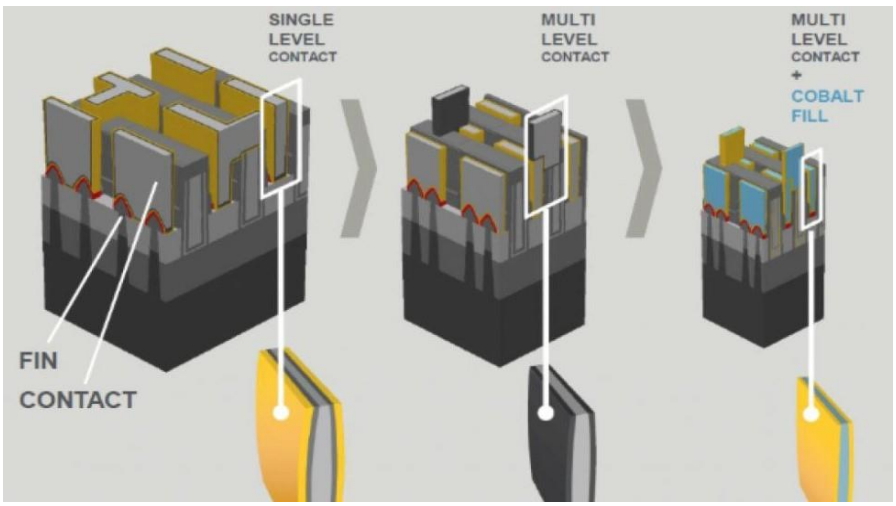
Длительные исследования и разработки в отрасли производства СБИС (сверхбольшая интегральная схема) сохраняют мировой тренд масштабирования. В основном тренд масштабирования определяется по трём продуктам к которым при физическом производстве предъявляются противоречивые требования.

1. Flash – основная особенность скорость работы и низкое энергопотребление, обеспечивает мобильность.
2. MPU – (microprocessor unit) основная особенность минимальный размер, обеспечивает быстродействие
3. DRAM – (dynamic random access memory) основная особенность высокая плотность транзисторов, обеспечивает объём памяти



Термин «технологическая норма» не может четко определить технологический тренд. Существует множество вариантов улучшения характеристик полевых МОП-транзисторов, которые мы называем «планарным» МОП транзистором (MOSFET), мультизатворные транзисторы (FinFET), и МОП-транзистор на КНИ (SOI). При этом остаются многие технологические проблемы в формировании структуры и топологии, использовании передовых сложных многокомпонентных составов материалов, деформации элементов СБИС особенно в не планарных структурах, утечки переходов, и другие проблемы в управлении процессом и технологичности/совместимости методов формирования элементов СБИС. Проблемы также возникают при интеграции систем на чипе (SoC) и систем в корпусе (SiP) КМОП с новыми типами устройств памяти. В процессе обработки необходимо обеспечивать формирование в передовых интегральных схемах топологических слоев одновременно обладающих:

- узкими линиями и пространством,
- изолированными и плотно расположенными структурами,
- контролируемыми профилями поперечного сечения

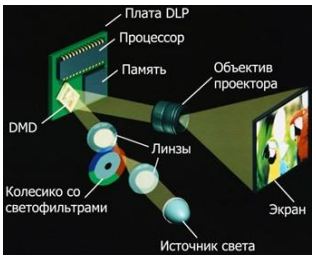


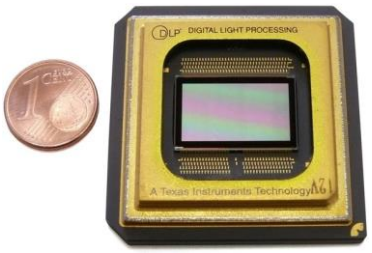
Разница в материалах контактов и межсоединений для 7нм и 5 нм технологии

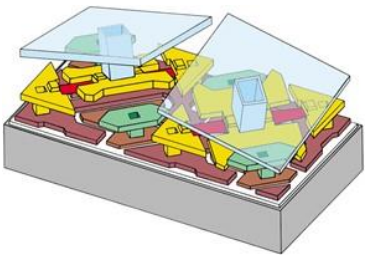
Микроэлектромеханические системы (МЭМС)

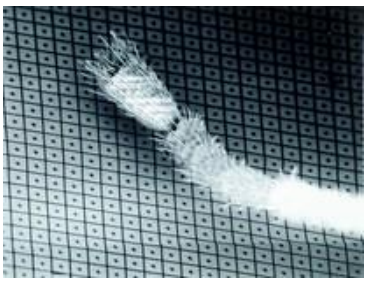
Микроэлектромеханические системы (МЭМС) изготавливаются с использованием технологий, аналогичных тем, которые используются для интегральных схем, для создания механических структур микрометрового размера (подвесные мосты, консоли, мембраны, жидкостные каналы и т. д.), которые часто интегрируются с аналоговыми и цифровыми схемами. МЭМС могут действовать как датчики, получая информацию из своей среды, или как исполнительные механизмы, реагируя на решение от системы управления об изменении среды. Анализ краткосрочных (5-летних) мировых достижений в показателях производительности устройств, проектировании и моделировании, сборке и упаковке, а также тестировании показал что, хотя внутренняя часть производства МЭМС (упаковка и тестирование) потребляет две трети общей стоимости производства и продолжает расти. Практически все инвестиции в НИОКР были направлены на разработку устройств и процессов, которые отвечают критическим производственным потребностям для решения проблем, возникающих на этапе производства МЭМС. Например: одни из самых ярких представителей устройств МЭМС, это DLP-проекторы (DLP – Digital Light Processing) с МЭМС-актуаторами (системы, которые превращают информацию в движение). В основе этих проекторов лежит относительно крупная – по общему размеру готового чипа – микроэлектромеханическая система под названием DMD (Digital Micromirror Device, цифровое микрозеркальное устройство). Это эксклюзивная разработка одного из гигантов полупроводниковой индустрии, компании Texas Instruments.

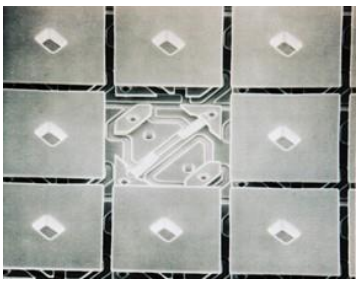
DLP-проектор – с одним DMD-чипом

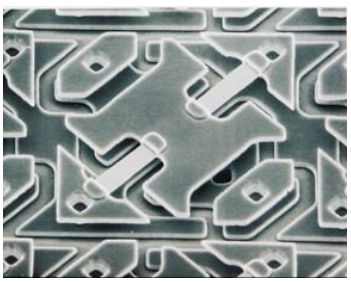












Микрозеркала в DMD-чипах. На фото изображена лапка муравья и одна из старых матриц с размером ячейки 16x16 микрон.

Сложные задачи при интеграции изделий МЭМС

Сборка и упаковка:

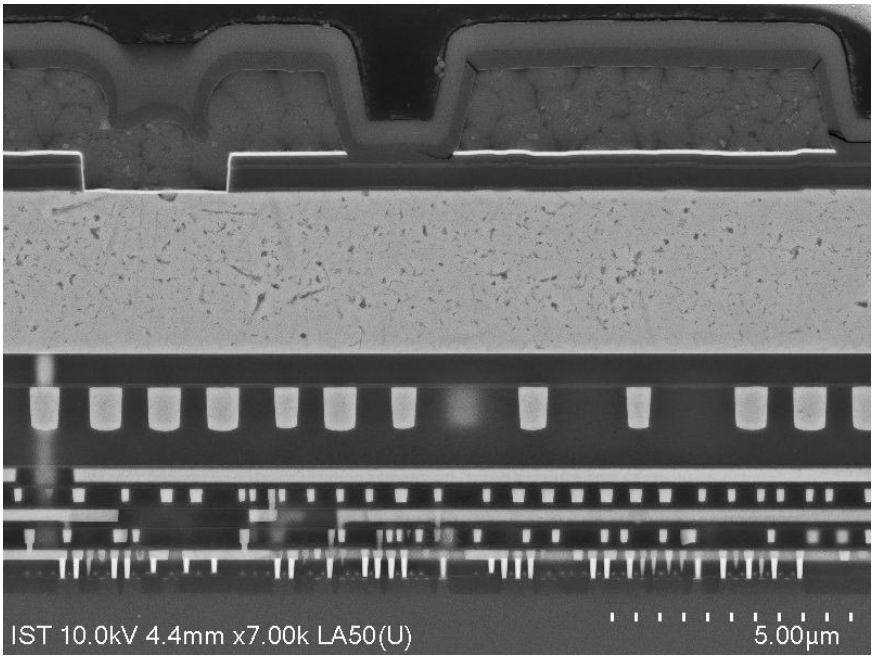
- Стандартизация корпусов МЭМС для поддержки интеграции.
- Разработка корпусов, которые уменьшают или устраняют механическое напряжение и повышают герметичность.
- Сбор статистических данных о корпусе, которые можно использовать для точного прогнозирования влияния корпуса на производительность устройства.

Тестирование устройств:

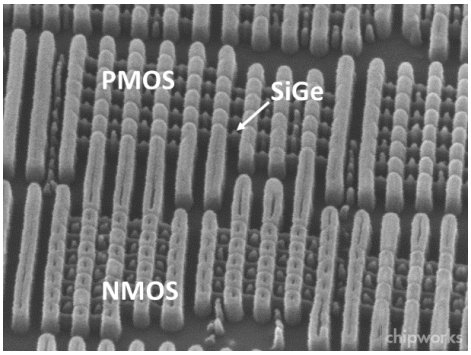
- Переход от тестирования на уровне устройств к большему тестированию на уровне пластин.
- Аттестация инструментов для прогнозирования производительности устройств на основе тестов пластин.
- Разработка методологии «Проектирования для тестирования».

Надежность:

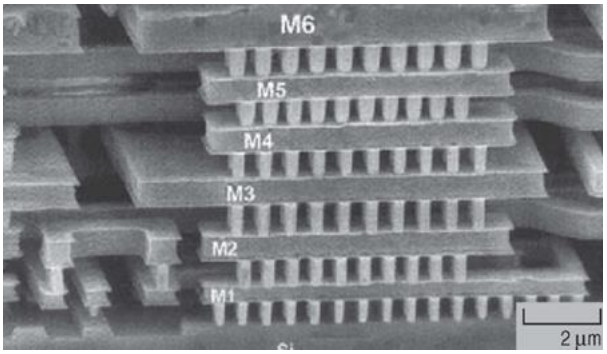
- Для разработки ускоренных испытаний на долговечность требуются дополнительные знания физики отказов.
- Обмен информацией. Отдельные решения существуют, но не обобщаются по всей отрасли.



КМОП-ИС содержит множество соединенных между собой транзисторов.



КМОП логическая ячейка
(технологический узел 22 нм)

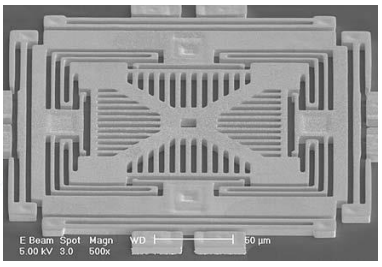


Межсоединение (металлизация) ИС

МЭМС – микро электро-механические системы



Классический гироскоп

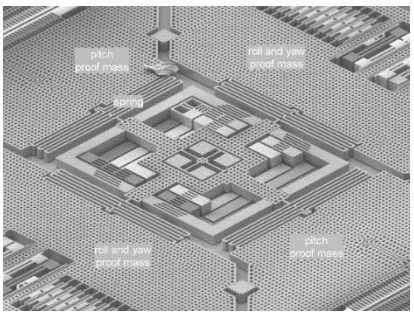




МЭМС-акселерометр



МЭМС-гироскоп



Выход годных

Ограниченный выход годных изделий ИС в промышленном производстве связан с разрушением топологического рисунка, вызванного несбалансированными силами, присутствующими на заключительном этапе релаксации подложки с технологическими слоями стандартного фотолитографического процесса. Основные факторы, влияющие на разрушение топологического рисунка, можно разделить на три группы:

(1) геометрия топологического рисунка;

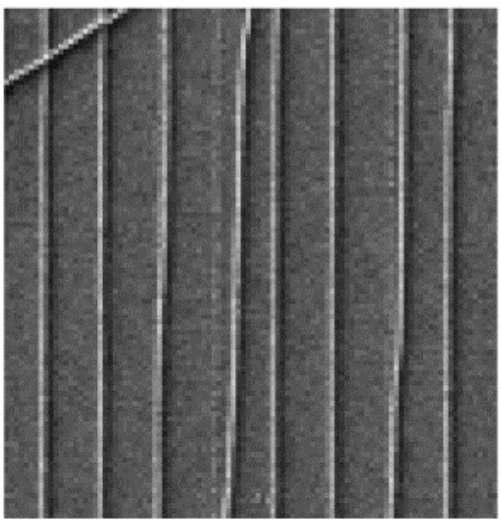
(2) внутренние силы, вызванные физическими свойствами материалов технологических слоев, входящих в стек;

(3) внешние силы, изменения, вызванные окружающей средой и технологическим оборудованием на пластину в кольцевом распределении.

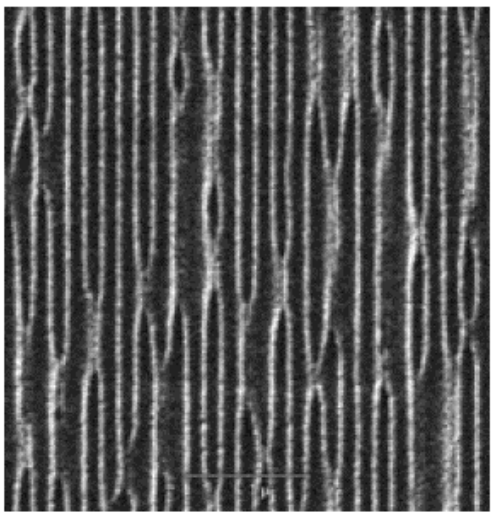
Конкретная интересующая геометрия топологического рисунка обычно может быть охарактеризована высотой линии, шириной линии и промежутком между линией и прилегающими элементами, при этом все эти свойства определяются комбинацией структуры слоя устройства, на которой сформирован топологический рисунок, для последующей обработки. Изменение геометрии топологического рисунка для смягчения разрушения топологического рисунка не является вариантом. Во-вторых, физические свойства материалов топологического слоя, которые важны в контексте механического разрушения топологического рисунка, включают модуль Юнга, предел текучести и прочность взаимодействия с подложкой и др. Один из подходов к уменьшению разрушения, вызванного механическим разрушением (например, модуль Юнга, предел текучести и т. д.), заключается в разработке новых материалов с целью увеличения механической прочности. Для обеспечения прочности взаимодействия с подложкой наиболее распространенными методами улучшения адгезии в промышленности является предобработка «мокрая» в жидких химических реагентах или «сухая» плазменные методы, а также нанесение функционального подслоя на подложку, разработанного с учетом энергии поверхности раздела, чтобы увеличить прочность сцепления.

Комплексная модель физического разрушения топологического рисунка должна учитывать каждый из параметров в этих трех группах и уметь определять его влияние на поведение топологического рисунка технологического слоя на пластине в кольцевом распределении. Прогнозы модели выхода годных в зависимости от разрушения элементов топологического рисунка делаются для эффективной оценки статистических данных производственных процессов и определения наиболее критических узлов в процессе формирования СБИС в реальном массовом производстве ИС.

Разрушение топологического рисунка



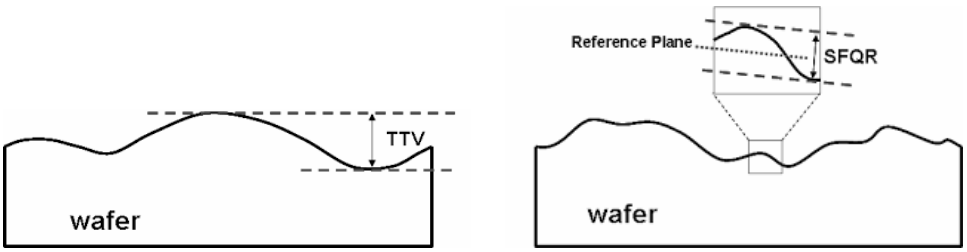
Отрыв линий



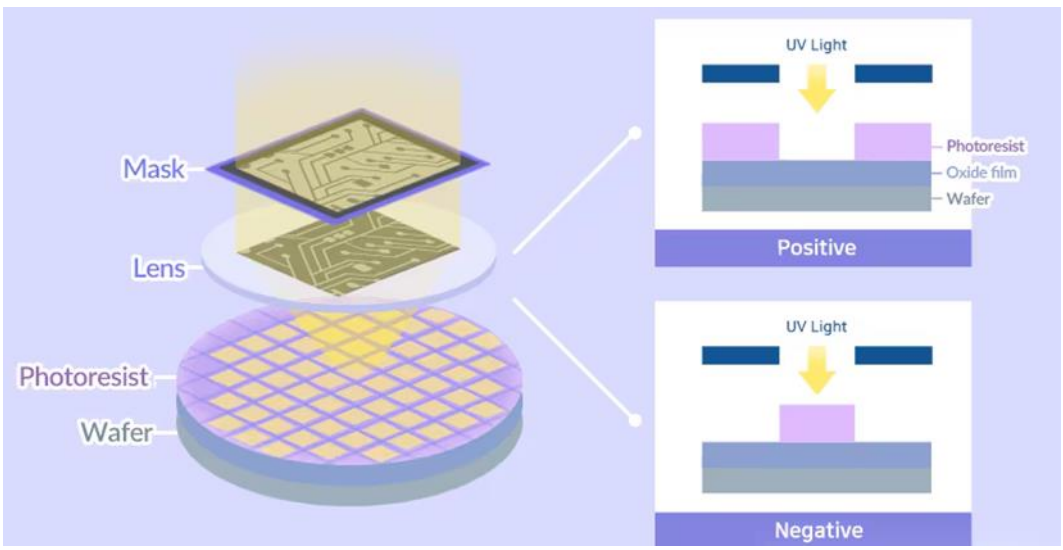
Смыкание, искривление линии

Плоскостность пластины

Наиболее часто используемый в промышленности параметр плоскостности пластины - это TTV (total thickness variation) изменение общей толщины, который представляет собой диапазон толщины пластины между самой толстой и самой тонкой частями пластины. SFQR (site flatness front-surface least-squares fit range) диапазон наименьших квадратов плоскостности площадки - еще один параметр плоскостности пластины, который представляет собой диапазон толщины конкретного размера площадки (размер области должен быть определен, обычно кадр) и максимальное значение этого измерения на пластине.



Инструмент литографии (сканер) имеет возможность измерять расстояние между линзой сканера и поверхностью пластины, и он может регулировать настройки фокуса на каждом этапе сканирования экспозиции, поэтому глобальная плоскостность не становится критической проблемой, пока она соответствует определенные характеристики, например, TTV должно быть меньше 2 мкм. Однако современный сканер может отрегулировать настройки фокуса за один шаг сканирования в пределах определенной площадки, который в настоящее время имеет размер области 26 мм x 8 мм или размер кадра 26 мм x 32 мм. Таким образом, если есть изменение толщины пластины в этой области больше определенного диапазона (указывается в характеристиках инструмента), это создает пятно расфокусировки и может привести к дефектам литографии, что очень критично для элементов с минимальным размером CD (critical dimension). Следовательно, с точки зрения процесса литографии, SFQR является более важным параметром по сравнению с TTV и имеет гораздо большее значение для фактических характеристик процесса, поскольку в этом случае изменение общей толщины пластины может быть гораздо выше 2 мкм, особенно в случае МЭМС производства или использования регенерированных пластин после брака.



Требования плоскостности кремниевой пластины стали более строгими из-за понижения класса правил проектирования устройств. Ежегодно обновляется международная технологическая дорожная карта для полупроводников (ITRS), чтобы обеспечить улучшение характеристик интегральных схем. Эта дорожная карта является результатом совместных усилий мировых производителей и поставщиков отрасли, государственных организаций, консорциумов и университетов.

Рабочие пластины

Полупроводниковые пластины или подложки в полупроводниковой индустрии являются основным материалом, на котором изготавливаются ИС и другие микроэлектронные устройства. Эти пластины служат физической основой для создания полупроводниковых компонентов, таких как транзисторы, диоды и резисторы. Наиболее распространённым материалом для рабочих пластин является кремний (Si), но также используются другие материалы, такие как арсенид галлия (GaAs), карбид кремния (SiC) и сапфир (Al_2O_3).

Материалы:

Кремний (Si): Наиболее широко используемый материал благодаря его доступности, стабильным свойствам и хорошей способности к формированию оксидного слоя (SiO_2), который используется в качестве изолятора.

Арсенид галлия (GaAs): Используется в высокочастотных устройствах, таких как микроволновые транзисторы, благодаря его высокой подвижности электронов.

Карбид кремния (SiC): Применяется в устройствах, работающих при высоких температурах и напряжениях, например, в силовой электронике.

Сапфир (Al_2O_3): Используется в светодиодах (LED) и некоторых типах датчиков.

КНИ (кремний на изоляторе): Широко используется в аэрокосмической и военной промышленности, так как изолирующий слой защищает устройства от воздействия радиации.

КНИ (SOI — Silicon On Insulator) — это технология изготовления полупроводниковых пластин, которая используется для создания высокопроизводительных и энергоэффективных интегральных схем. В отличие от традиционных кремниевых пластин, в КНИ-пластинах между тонким слоем кремния и подложкой находится изолирующий слой, обычно из диоксида кремния (SiO_2). Эта структура позволяет улучшить характеристики микросхем, снизить энергопотребление и уменьшить паразитные эффекты.

Существует несколько технологий создания КНИ-пластин:

SIMOX (Separation by IMplantation of OXygen): В кремниевую подложку имплантируют ионы кислорода, которые затем образуют изолирующий слой SiO_2 после высокотемпературного отжига.

Smart Cut: На поверхность кремниевой пластины наносится изолирующий слой, затем с помощью ионной имплантации создаётся ослабленный слой. После этого верхний слой кремния переносится на другую подложку, а исходная пластина может быть использована повторно.

Wafer Bonding: Две кремниевые пластины склеиваются вместе, причём одна из них имеет изолирующий слой. Затем верхняя пластина истончается до нужной толщины.

КНИ-технология продолжает развиваться, особенно в области высокопроизводительных вычислений, IoT и силовой электроники. С развитием новых материалов, таких как карбид кремния (SiC) и нитрид галлия (GaN), КНИ-пластины могут стать ещё более востребованными. Кроме того, ожидается снижение стоимости производства благодаря совершенствованию технологий.

Восстановленные пластины

Восстановленные пластины широко используются в полупроводниковой промышленности в течение многих лет из-за того, что кремниевые пластины являются самым крупным источником затрат для завода по производству ИС. Сокращение использования первичных кремниевых пластин и вместо этого использование как можно большего количества регенерированных пластин является одним из наиболее экономически эффективных решений для производственного предприятия. Тем не менее, количество процессов, в которых могут использоваться восстановленные пластины, исторически ограничивалось простыми приложениями для мониторинга процесса, такими как мониторинг толщины пленки или проверка частиц, поскольку требования к этим типам пластин для мониторинга защитной пленки (на пластины не наносится топографический рисунок) менее строгие, чистота только от частиц и металлических загрязнений. Чтобы увеличить количество процессов, в которых регенерированные пластины могут использоваться на заводе-изготовителе, например, соединить между собой пластины для мониторинга вскрытия контактов или любые пластины для аттестации процесса, на которых необходимо напечатать небольшие образцы элементов топологии; эти восстановленные пластины должны соответствовать определенным требованиям к плоскостности пластины, потому что плоскостность пластины влияет на один из наиболее важных полупроводниковых процессов - «литографию». Доказано, что ухудшение плоскостности пластин вызывает проблемы с расфокусировкой литографии и дефекты рисунка.

Инструменты



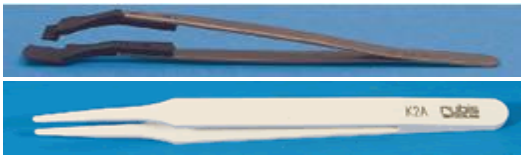


Наборы стандартных инструментов

Всем известны и знакомы стандартные инструменты различного назначения, но для производства продукции необходимы высокотехнологичные инструменты описанные ниже.

Инструменты для перемещения полупроводниковых пластин

В производстве используется множество типов пинцетов. Необходимо выбрать пинцет в соответствии с предполагаемой целью использования.



Ручной механический пинцет

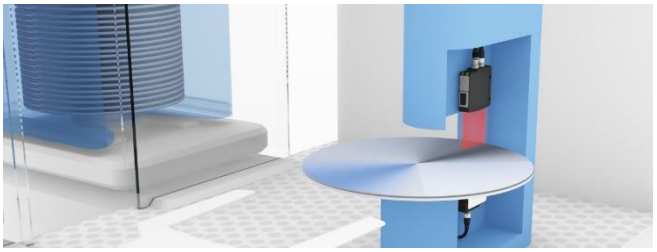


Ручной вакуумный пинцет

Выравниватель пластин используется для безопасного перемещения пластин внутри слотов.



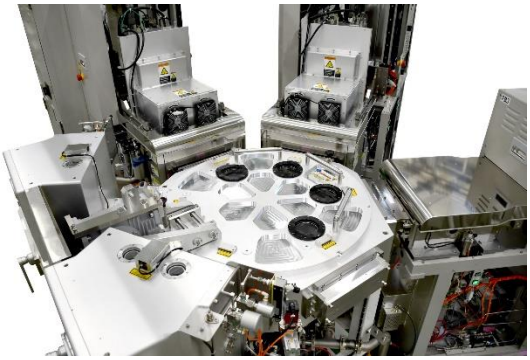
Ручной выравниватель пластин



Автоматический выравниватель пластин

Инструменты для обработки полупроводниковых пластин

Производственные процессы в области микроэлектроники являются ключевыми для создания полупроводниковых устройств и интегральных схем. Обработка полупроводниковых пластин является сложным процессом, требующим специализированного оборудования. Это оборудование используется для создания транзисторов, интегральных схем (ИС) и других электронных компонентов. Также инструменты для измерения и контроля параметров пластин используется на протяжении всего процесса обработки. Поставщиками оборудования для обработки полупроводниковых пластин являются такие компании, как ASML, Tokyo Electron, Applied Materials и KLA и др.





КОНСПЕКТ
Введение в технологию производства микроэлектроники

- Интегральные схемы делают технологии быстрее, компактнее, дешевле и доступнее.
- Производство микросхем — это одна из самых высокотехнологичных отраслей, требующая огромных инвестиций в оборудование и исследования.
- Персонал, работающий в чистых комнатах, обучается соблюдению строгих протоколов работы, включая ношение защитной одежды и соблюдение процедур входа и выхода.
- Термин «технологическая норма» не может четко определить технологический тренд масштабирования. Мировой тренд масштабирования определяется по трём продуктам Flash, MPU и DRAM.
- Микроэлектромеханические системы изготавливаются с использованием технологий и инструментов, аналогичных тем, которые используются для производства интегральных схем.
- Выход годных ИС в промышленном производстве связан с разрушением топологического рисунка. Основные факторы, влияющие на разрушение топологического рисунка:
  (1) геометрия топологического рисунка;
  (2) внутренние силы, вызванные физическими свойствами материалов технологических слоев;
  (3) внешние силы, вызванные окружающей средой и технологическим оборудованием.
- Модели выхода годных делаются на статистических данных для эффективной оценки производственных процессов и определения наиболее критических узлов в процессе формирования ИС в массовом производстве.
- Полупроводниковые подложки (пластины) служат физической основой, на которой изготавливаются ИС и другие микроэлектронные устройства.
- В КНИ-пластинах между тонким слоем кремния и подложкой находится изолирующий слой.
- Использование как можно большего количества регенерированных подложек является одним из наиболее экономически эффективных решений для производственного предприятия.
- Ухудшение плоскостности пластин вызывает брак, проблемы с расфокусировкой фотолитографии и дефекты рисунка топологического слоя.
- Для производственного предприятия, с точки зрения процесса литографии, SFQR является более важным параметром плоскостности по сравнению с TTV.
- Инструменты для обработки полупроводниковых пластин представляют специализированное высокотехнологичное оборудование. Наиболее известные производители инструментов для обработки полупроводниковых пластин являются такие компании, как ASML, Tokyo Electron, Applied Materials и KLA.

Раздел 2: Полупроводниковая технология шаг за шагом

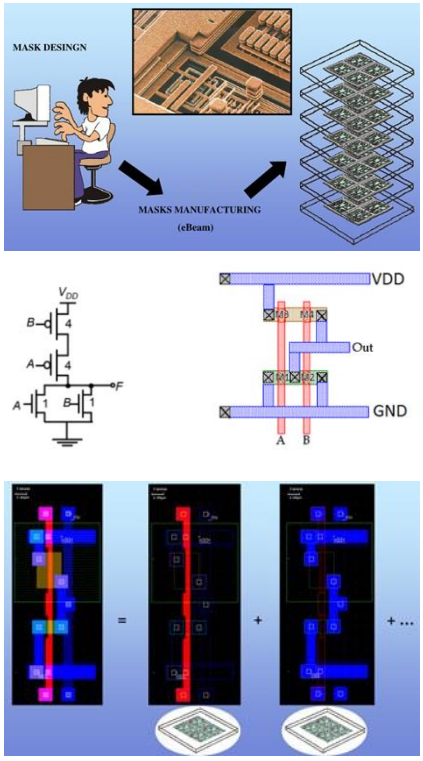


Дизайн ИС



Производство ИС

Проектирование и реализация интегральной схемы

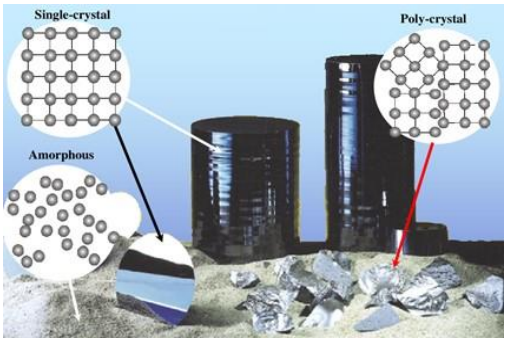


Дизайн ИС это соединение отдельных транзисторов в единую систему, сборка множества МОП-транзисторов, план формирования всех элементов одновременно по уровням. Это по сути набор масок, поэтому цена разработки нового изделия в основном определяется стоимостью разработки и создания масок. Процесс проектирования ИС напоминает создание виртуального макета города. Сначала инженеры придумывают, что должна делать схема, и разбивают её на блоки. Потом они "рисуют" электрические схемы, где каждый транзистор и проводник занимает своё место. А затем с помощью специальных программ создают "чертёж" — маску, которая используется для изготовления реальной микросхемы, при этом учитываются физические ограничения процесса изготовления (например, минимальный размер транзистора, допустимая ширина проводников). Для этого используются мощные компьютеры и специализированные программы, которые помогают проверить, что всё будет работать правильно. Это как симулятор города, где можно заранее увидеть, как будут ездить машины и течь реки, чтобы избежать пробок и наводнений. В результате всех этих усилий на крошечном кусочке кремния рождается сложная система, которая может выполнять миллионы операций в секунду. Это может быть процессор вашего компьютера, память смартфона или микроконтроллер в «умном» чайнике.

Транзисторы — это основные элементы, из которых строится любая современная электроника. Они могут быть двух типов: n-типа и p-типа, как два разных вида рабочих, которые выполняют противоположные задачи. Вместе они образуют пары, которые работают как крошечные переключатели, управляющие потоком электрического тока. Именно эти переключатели лежат в основе всей цифровой логики. Представьте, что транзисторы — это участники командной игры. Когда они объединяются определённым образом, они создают логические вентили — простейшие "правила игры". Например, вентиль И (AND) говорит: "Если все входы включены, то и выход будет включён". А вентиль НЕ (NOT) работает как отрицание: "Если вход включён, то выход выключен, и наоборот". Эти вентили — как буквы в алфавите. Из них можно составлять "слова" — более сложные схемы, такие как сумматоры или мультиплексоры. А из "слов" уже строятся "предложения" — функциональные блоки, которые выполняют конкретные задачи, например, складывают числа или управляют памятью. Теперь их нужно соединить так, чтобы они работали как единое целое. Это как собрать огромный пазл, где каждый кусочек должен идеально подходить к другому. Для этого инженеры используют специальные "дорожки" — металлические проводники, которые связывают транзисторы и блоки между собой.

Но просто соединить их недостаточно. Нужно сделать так, чтобы система работала быстро, потребляла мало энергии и занимала как можно меньше места. Это как планировка города: нужно разместить дома, дороги и коммуникации так, чтобы жителям было удобно, а город функционировал эффективно.

Полупроводниковый кристалл (подложка).



Всё начинается с тонкого кристалла очищенного кремния. Это как фундамент дома, только вместо бетона — полупроводник. Кремний — особый материал: он может проводить ток, но только при определённых условиях. Чтобы придать ему нужные свойства, его "легируют", т.е. добавляют крошечные примеси других элементов. Так в кремнии появляются области с разной проводимостью: одни любят "отпускать" электроны (n-тип), а другие "ловить" их (p-тип).

Легирование кремния — это процесс добавления в его структуру примесей, которые изменяют его электрические свойства. Эти примеси могут быть донорными n-тип (например, фосфор или мышьяк,) или акцепторными p-тип (например, бор,). При этом кремний никогда нельзя полностью очистить от бора.

Представь, что кремний — это огромный город, где каждый атом занимает своё место в идеальной кристаллической решётке. Этот город должен быть чистым и аккуратным, чтобы электроны могли свободно перемещаться по его улицам. Но, как и в любом городе, здесь есть "незваные гости" — примеси, которые случайно попадают в структуру кремния, и одна из самых коварных таких примесей это бор.

Бор — это как тот сосед, который всегда оказывается там, где его не ждут. Он очень маленький и юркий, поэтому легко проникает в кристаллическую решётку кремния и устраивается там, как дома. Бор — акцепторная примесь, то есть он "крадёт" электроны у кремния, создавая дырки — положительные заряды. Это может быть полезно, если нужно создать p-тип проводимости, но в большинстве случаев бор — нежеланный гость. Попробуем представить, что мы хотим очистить кремний от бора. Это как попытка выгнать того самого соседа из города. Но тут возникают проблемы. Первая проблема в том, что Бор слишком хорошо «спрятан», он образует прочные связи с кремнием, как будто он встроился в фундамент здания. Чтобы его удалить, нужно буквально "разрушить" часть города. Вторая проблема в том, что Бор имеет высокую температуру плавления и низкую летучесть, а это значит, что даже если нагреть кремний до очень высоких температур, бор останется на месте, как упрямый житель, который отказывается покидать свой дом, даже во время пожара. И третья проблема в том, что Бор присутствует в природном кремнии, с которого всё начинается. Даже после сложных процессов очистки, таких как зонная плавка или метод Чохральского, следы бора остаются.

Но самое интересное в том, что бор полезен и не стоит тратить силы на полную очистку кремния от бора. Представь, что ты пытаешься удалить каждую пылинку из огромного города. Это потребует невероятных усилий и ресурсов, при этом остатки пыли после уборки не мешают нам передвигаться по своим ежедневным делам. К тому же, в большинстве случаев небольшое количество бора не мешает работе устройств. Современные технологии позволяют контролировать его концентрацию на таком низком уровне, что он практически не влияет на свойства кремния.

Когда бор полезен?

Например, если нужно создать p-тип проводимость в кремнии, бор добавляют специально. Он становится "полезным соседом", который помогает управлять электрическими свойствами материала. В слаболегированном кремнии его концентрация настолько мала, что он не мешает, а в сильнолегированных областях он вообще становится важным элементом конструкции.

1. Слаболегированный кремний: концентрация примесей: от 10^{15} до 10^{15} атомов на кубический сантиметр. Используется в областях, где требуется высокая чистота материала, например, в подложках для создания высококачественных транзисторов. Такой кремний имеет высокое удельное сопротивление.

2. Умеренно легированный кремний: концентрация примесей: от 10^{15} до 10^{18} атомов на кубический сантиметр. Применяется для создания областей с определённой проводимостью в транзисторах и других элементах интегральных схем.

3. Сильнолегированный кремний: концентрация примесей: выше 10^{18} атомов на кубический сантиметр. Используется для создания контактных областей с низким сопротивлением, например, в эмиттерах транзисторов или в металлических соединениях.

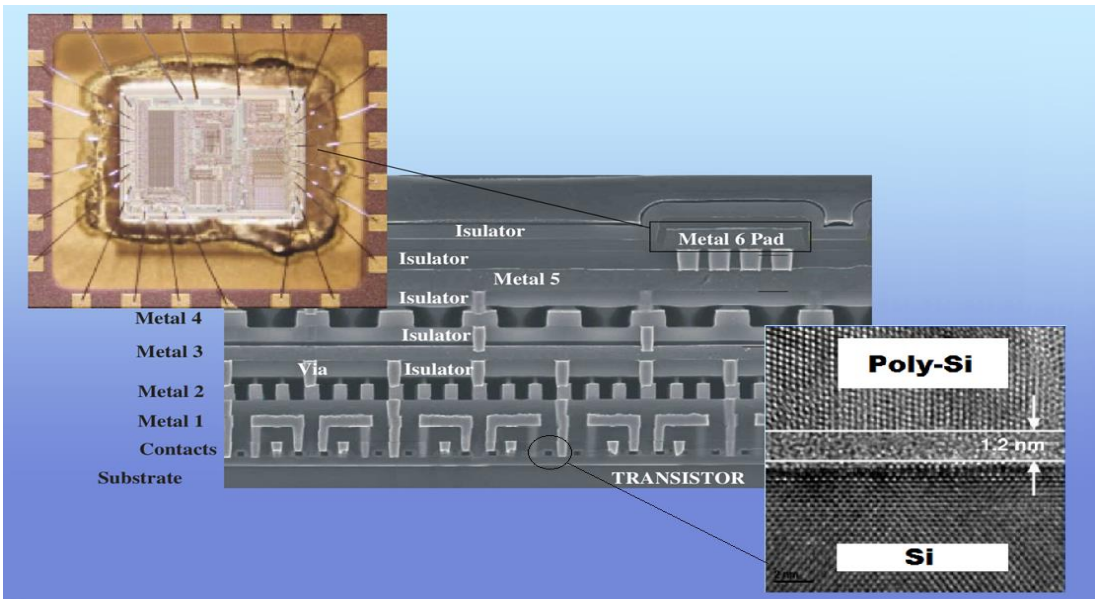
Бор — это как тот самый сосед, которого нельзя полностью выгнать из города. Он всегда где-то рядом, но в большинстве случаев его присутствие незаметно. И хотя полное удаление бора из кремния невозможно, современные технологии позволяют жить с этим "соседом" в мире и гармонии. Ведь даже в мире полупроводников иногда приходится мириться с небольшими несовершенствами, чтобы достичь больших целей.

Структура интегральной схемы.

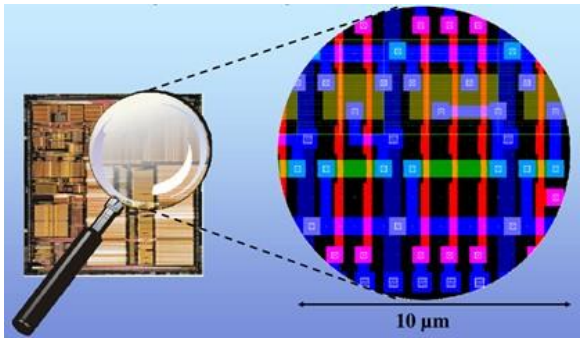
Транзисторы — крошечные переключатели, которые управляют током. В современных микросхемах таких транзисторов миллиарды! Они настолько малы, что их можно увидеть только под мощным микроскопом. Каждый транзистор — это как кирпичик, из которых строится вся схема. Рядом с ними появляются диоды для управления направлением тока, и эти элементы создаются путем легирования определенных областей кристалла и формирования слоев оксидов и металлов. Но это не единственные жители этого микроскопического города.

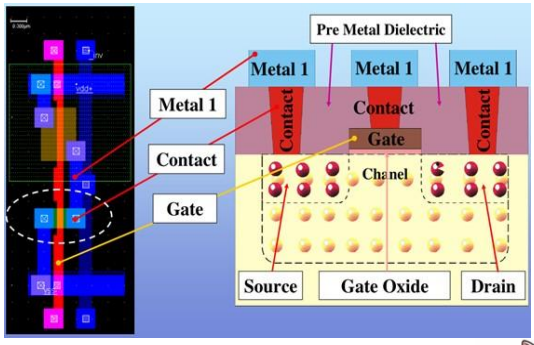
Другие элементы резисторы, которые ограничивают ток, и конденсаторы, которые накапливают заряд. Всё это — как улицы и здания, которые соединяются между собой тончайшими металлическими дорожками. Эти дорожки — словно провода, только толщиной в несколько нанометров. Они уложены в несколько слоёв, чтобы не пересекаться и не мешать друг другу. Между всеми этими элементами лежат изоляционные слои — что-то вроде "воздушных подушек", которые не дают электричеству перескакивать туда, куда не нужно. А сверху всё это накрывается защитным слоем, как крышей, чтобы пыль и влага не повредили хрупкую структуру.

На поверхности кристалла есть специальные контактные площадки — это как двери, через которые интегральная схема "общается" с внешним миром. Эти площадки соединяются с выводами корпуса, в который помещается кристалл. Корпус — это как броня, которая защищает хрупкий кремний от ударов и царапин.



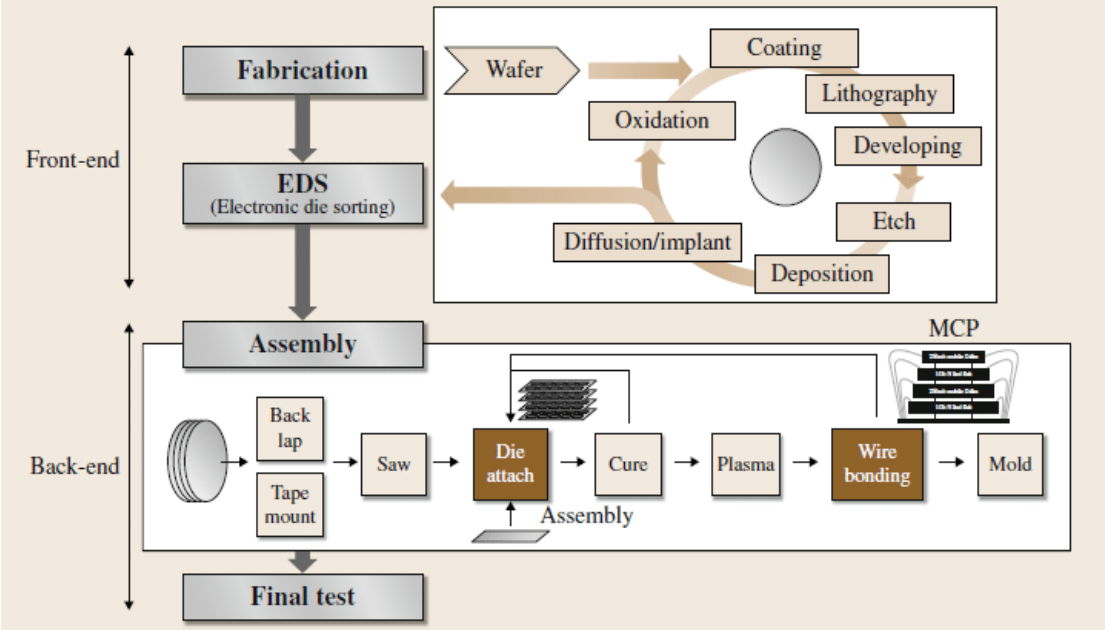
Интегральная схема — это не просто кусочек кремния, а настоящее чудо инженерной мысли. Это целая вселенная, где каждый элемент играет свою роль. Транзисторы переключаются с невероятной скоростью, резисторы и конденсаторы помогают управлять током, а металлические дорожки связывают всё в единое целое. Всё это работает вместе, чтобы выполнять сложные задачи: от простого сложения чисел до управления искусственным интеллектом. И самое удивительное — что всё это умещается на площади меньше ногтя. Каждый раз, когда ты включаешь телефон или компьютер, ты используешь результат труда тысяч инженеров, которые создали эти крошечные, но невероятно мощные устройства. Интегральная схема — это не просто технология, это настоящее искусство, которое изменило наш мир.





Полупроводниковое производство

Производство полупроводниковых интегральных схем (ИС) — это сложный многоэтапный процесс, который можно разделить на фронтенд (front-end) и бэкенд (back-end) процессы. Эти этапы включают в себя создание кристалла и его последующую подготовку к использованию в конечных устройствах.



Фронтенд-процессы (Front-end)

Фронтенд-процессы связаны с созданием полупроводникового кристалла (чипа) на кремниевой пластине. Они включают в себя следующие ключевые этапы:

1. Подготовка кремниевой пластины. Всё начинается с обычного песка. Но не простого, а особого — из него добывают кремний, который после долгой очистки превращается в идеальный монокристалл. Этот кристалл нарезают на тонкие пластины, похожие на зеркальные диски. Их поверхность полируют до блеска, чтобы ни одна пылинка не помешала будущему шедевру.

2. Фотолитография. Наступает время волшебства. На пластину наносится светочувствительный материал — фоторезист. С помощью специальной маски и ультрафиолетового света на пластине "рисуют" узоры будущих транзисторов и соединений. Это как фотография, только вместо пейзажа — схемы, которые станут основой чипа. После этого незасвеченные участки фоторезиста смываются, открывая дорогу для следующего этапа.

3. Травление и Ионная имплантация. Теперь настаёт время для "скульптуры". Незащищённые участки пластины подвергаются травлению — лишние материалы удаляются, оставляя только нужные структуры. Затем, с помощью ионной имплантации, в кремний вводятся примеси, которые создают области с разными свойствами. Это как добавить специи в блюдо, чтобы оно приобрело нужный вкус.

4. Термическая обработка. После имплантации проводится отжиг для активации примесей и восстановления кристаллической структуры кремния.

5. Формирование слоев транзистора. На пластину наносятся тонкие слои различных материалов (оксиды, нитриды, металлы) с помощью методов химического осаждения из газовой фазы (CVD) или физического осаждения (PVD).

6. Формирование межсоединений ИС. Создаются металлические соединения (обычно из алюминия или меди) между различными элементами ИС с помощью процессов металлизации. Слои диэлектриков и металлов наносятся один за другим, создавая сложную сеть соединений. Каждый слой — это новый уровень сложности, как этажи в небоскрёбе.

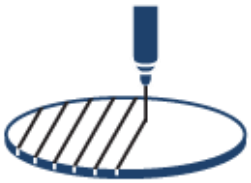
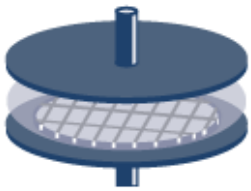
7. Тестирование на пластине. Когда чипы на пластине готовы, их проверяют. Специальные зонды касаются каждого кристалла, тестируя его на функциональность. Те, кто не прошёл испытание, остаются на пластине, а лучшие отправляются в следующее путешествие.

Бэкенд-процессы (Back-end)

Бэкенд-процессы начинаются после завершения фронтенд-этапов и включают в себя подготовку чипов к использованию в конечных устройствах.

1. **Разделение пластины на чипы.** Пластина, усыпанная чипами, похожа на шоколадную плитку. Её аккуратно разрезают на отдельные кусочки — кристаллы.

Technologies for semiconductor wafer dicing

Method	Blade	Laser	Plasma
Schematic			
Procedure	Cuts thorough wafer using abrasive blade	Creates cracks using laser heat to split wafer	Etches away wafer using chemical reaction
Speed	✕ Tens of millimeters per second	△ Hundreds of millimeters per second	○ Entire wafer processed all at once
Chip fracture toughness	✕ Mechanically damaged	✕ Mechanically damaged	○ No mechanical damage
Dryness	✕ Uses water for cutting	○ Dry process	○ Dry process

2. Монтаж чипа в корпус. Каждый чип монтируется в корпус (например, BGA, QFN, DIP), который обеспечивает механическую защиту и электрические соединения с внешними устройствами. Обычно используются методы wire bonding (проволочное соединение), это когда тонкие золотые или алюминиевые проволочки соединяют чип с выводами корпуса, как мосты между островами. Более продвинутый метод flip-chip (перевернутый чип).

3. Герметизация. Корпус герметизируется для защиты чипа от внешних воздействий, чтобы ни пыль, ни влага не смогли ему навредить.

4. Финальное тестирование. Готовые микросхемы тестируются на соответствие техническим характеристикам (функциональность, скорость, энергопотребление и т.д.). После финального тестирования на корпус наносится маркировка (название модели, партия, дата производства), чипы упаковывают и отправляют в путь — туда, где они станут частью компьютеров, смартфонов, автомобилей и даже космических кораблей.

Ключевые различия между фронтендом и бэкендом

Аспект	Фронтенд	Бэкенд
Цель	Создание кристалла	Подготовка чипа к использованию
Основные процессы	Фотолитография, травление, имплантация	Монтаж, герметизация, тестирование
Материалы	Кремний, оксиды, металлы	Пластик, керамика, металлы
Оборудование	Фотостепперы, CVD, PVD	Резаки, монтажные станции

Технологические вызовы

- Фронтенд: Требуется высокая точность (нанометровый уровень), чистота процессов и контроль качества.
- Бэкенд: Необходимо обеспечить надежность соединений, минимизировать тепловыделение и механические напряжения.

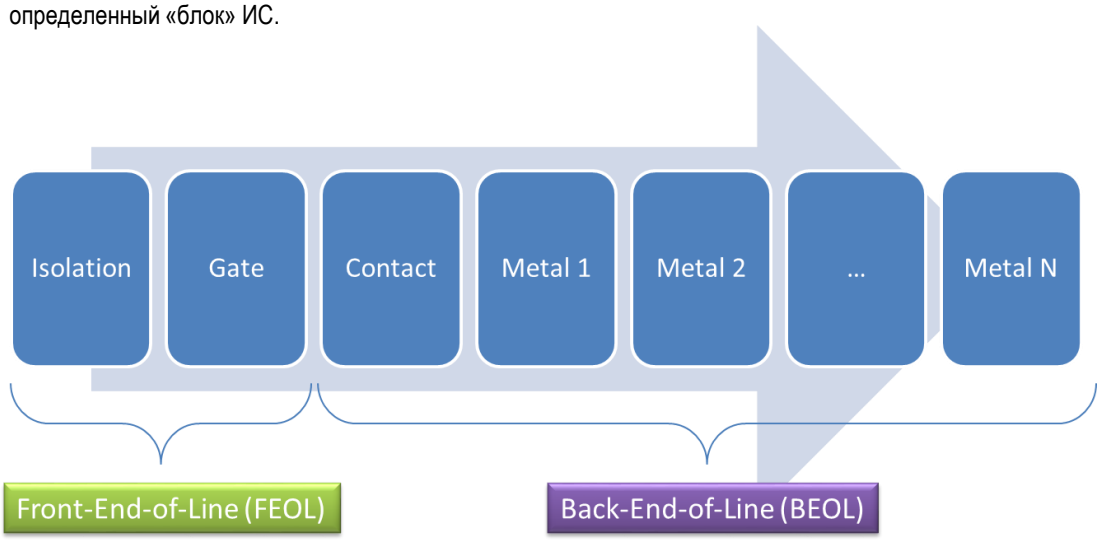
КОНСПЕКТ
Полупроводниковая технология шаг за шагом

- Дизайн интегральной схемы = соединение транзисторов
- Маска, которая используется для изготовления реальной микросхемы, должна учитывать физические ограничения процессов физического производства и возможности оборудования, инструментов обработки в цехе (например, минимальный размер транзистора, допустимая ширина проводников).
- Легирование кремния — это процесс добавления в его структуру примесей, которые изменяют его электрические свойства.
- Транзисторы переключаются с невероятной скоростью, резисторы и конденсаторы помогают управлять током, а металлические дорожки связывают всё в единое целое.
- Фотолитография - это ключевой процесс, который определяет структуру будущего чипа.
- Фронтенд: Требуется высокая точность (нанометровый уровень), чистота процессов и контроль качества.
- Бэкенд: Необходимо обеспечить надежность соединений, минимизировать тепловыделение и механические напряжения.

Раздел 3: Технологическая схема производства ИС

Маршрут технологического производства

Маршрут технологического производства ИС представляет собой последовательность всех шагов физического формирования топологических структур, необходимых для изготовления ИС. Для удобства из нескольких последовательных шагов состоит «модуль», а объединение модулей составляют определенный «блок» ИС.

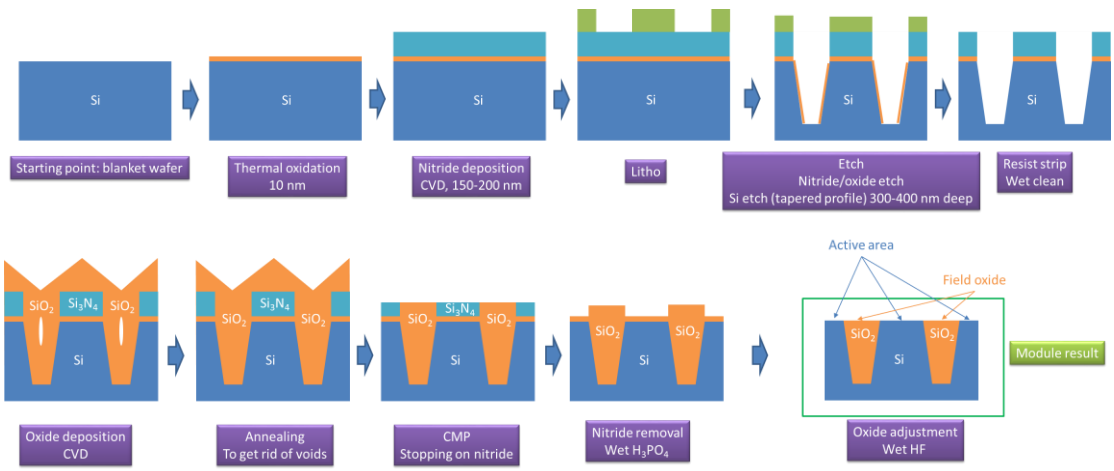


Теперь поговорим о ключевых этапах технологического процесса КМОП-логики. Это основа современной микроэлектроники, и понимание этих процессов крайне важно для тех, кто хочет работать в области проектирования и производства интегральных схем. Начинается всё с кремниевой пластины. Это основа, на которой мы будем строить нашу схему. Пластина должна быть идеально чистой, поэтому её тщательно очищают от любых загрязнений и оксидных слоев — чистота подложки критически важна.

- **Формирование изоляции активных областей друг от друга**

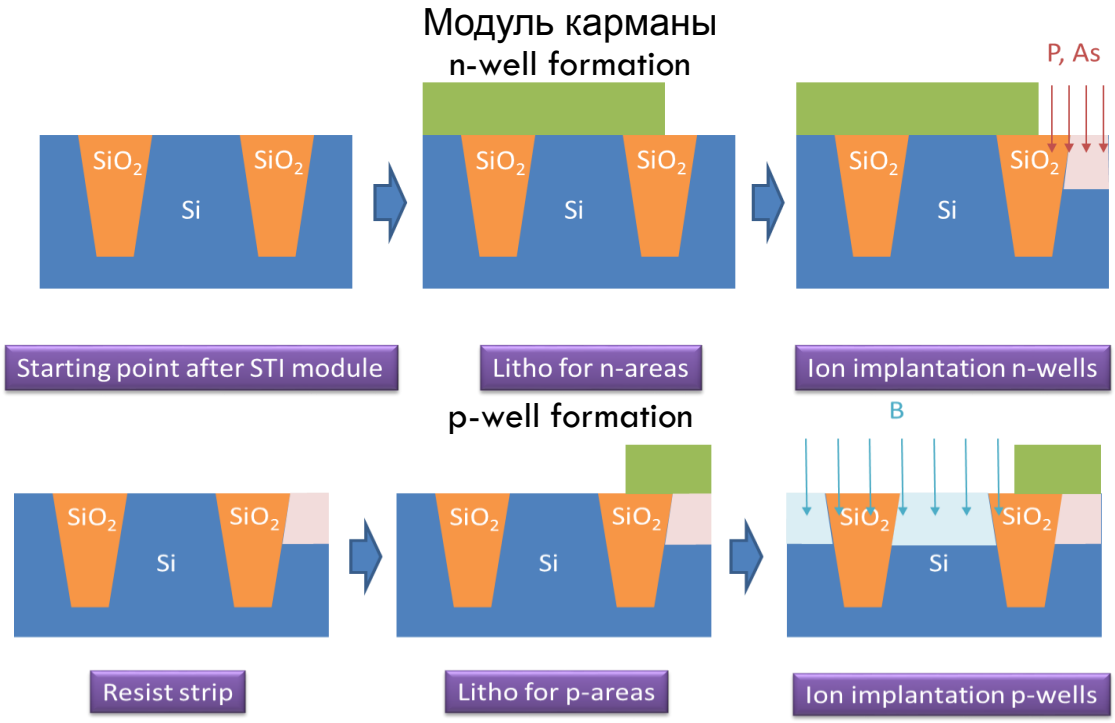
Мы создаем активные области, где будут располагаться транзисторы. Для этого используется либо локальное окисление (LOCOS), либо более современный метод — изоляция траншеей (STI). Это как разметка на холсте: мы определяем, где будут находиться ключевые элементы нашей схемы. Современные технологии предпочитают STI, так как это позволяет уменьшить размеры элементов и повысить плотность транзисторов.

Модуль изоляции STI



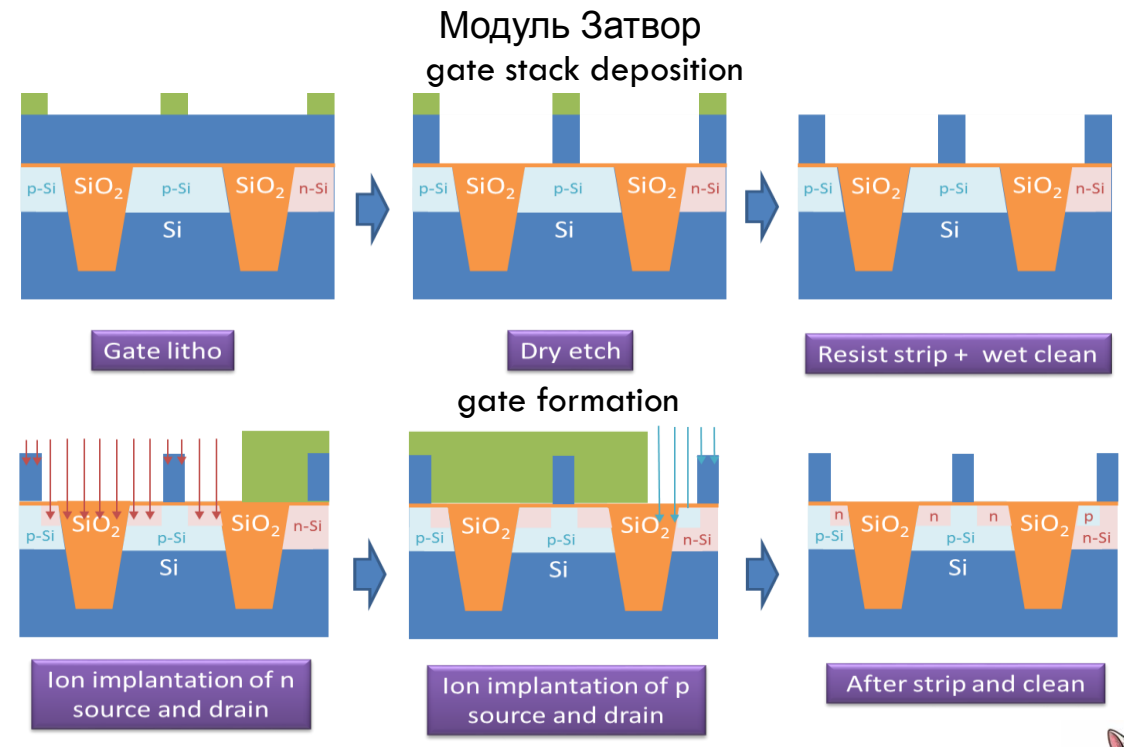
- **Формирование карманов**

Карманы (wells) — это области в кремниевой подложке, которые формируются путем легирования и определяют тип проводимости (n-тип или p-тип) активных областей транзисторов.



- **Формирование затворов**

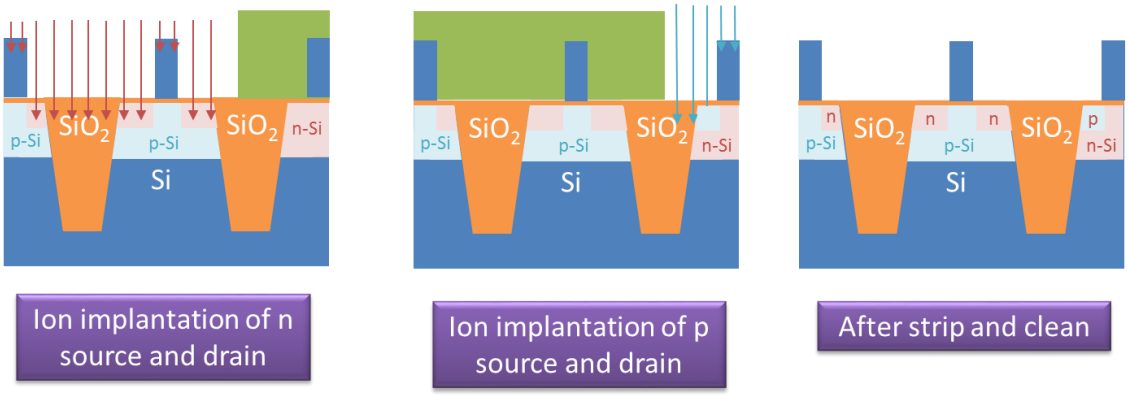
Теперь переходим к созданию затворов транзисторов. Сначала наносится тонкий слой оксида кремния — это будет изолятор между затвором и каналом транзистора. Затем наносится слой поликремния, который структурируется с помощью фотолитографии. Поликремний легируется для улучшения проводимости в открытых от фоторезистивной маски местах. Затвор — это, можно сказать, 'рубильник' транзистора, который управляет потоком тока.



- **Формирование активных областей**

Теперь переходим к созданию активных областей транзистора, истоков и стоков. Это области, через которые ток входит и выходит из транзистора. Для этого используется ионная имплантация — процесс, при котором ионы бора или фосфора 'вбиваются' в кремний. После этого проводится высокотемпературный отжиг, чтобы активировать примеси и 'залечить' повреждения кристаллической решетки.

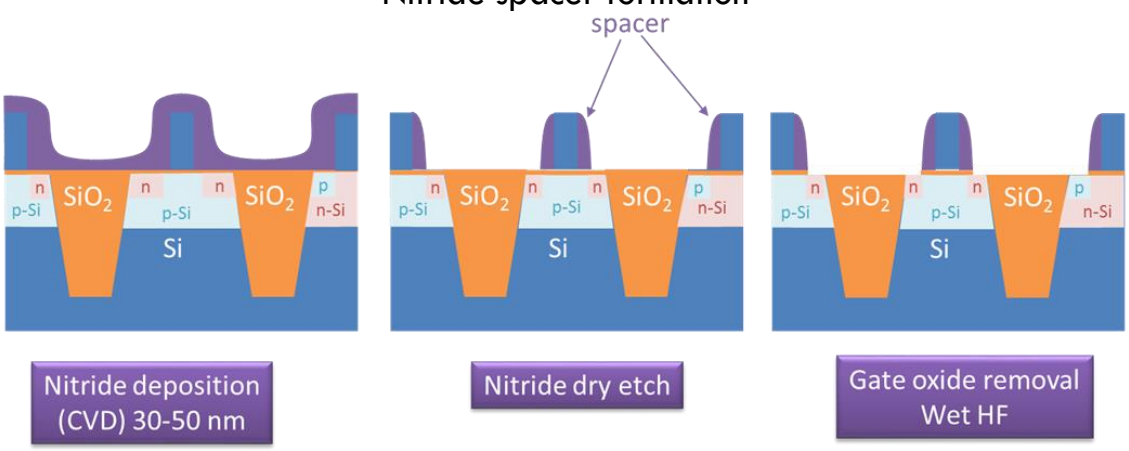
Модуль активные области
source and drain formation



- **Формирование спейсера**

Модуль спейсер (Spacer) — это важный этап в современном технологическом процессе производства КМОП-транзисторов, особенно в технологиях с малыми технологическими нормами. Этот модуль используется для формирования боковых изоляционных структур вокруг затвора транзистора, что позволяет улучшить его характеристики и уменьшить паразитные эффекты. В современных FinFET-транзисторах (которые используются в технологиях 22 нм и менее) спейсеры играют еще более важную роль. Они формируются вокруг трехмерного "плавника" (fin) транзистора и обеспечивают изоляцию между затвором и истоком/стоком в трехмерной структуре.

Модуль спейсер
Nitride spacer formation



Таким образом, спейсер, как топологический элемент, позволяет достичь ряд преимуществ:

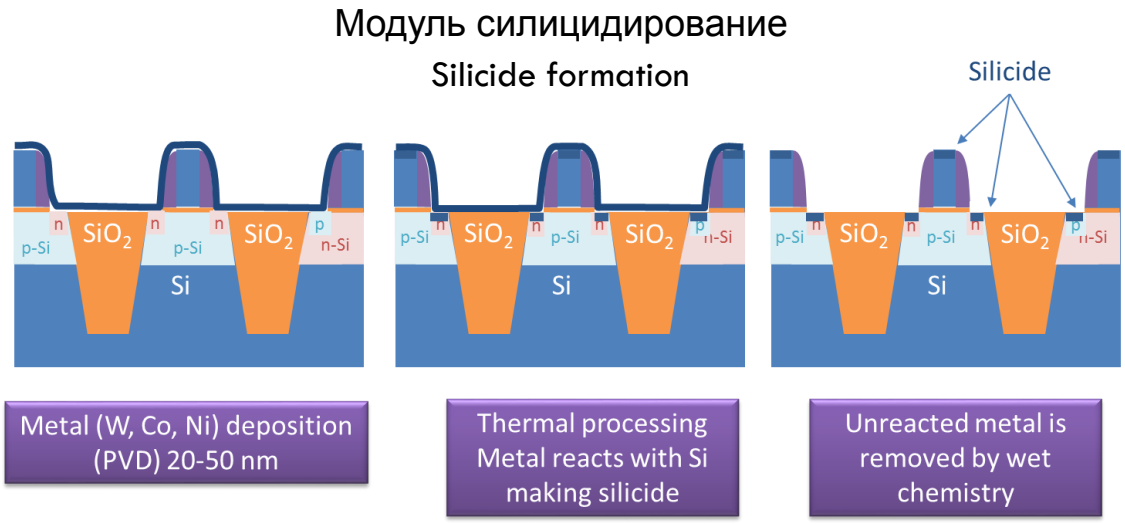
Уменьшение паразитных емкостей. Спейсеры изолируют затвор от истока и стока, что снижает паразитные емкости и улучшает быстродействие транзистора.

Контроль длины канала. Спейсеры помогают точно контролировать длину канала транзистора, что особенно важно в современных технологиях с малыми размерами.

Улучшение надежности. LDD-области, формируемые с помощью спейсеров, уменьшают электрическое поле в канале, что снижает вероятность пробоя и увеличивает срок службы транзистора.

- **Формирование силицида**

Формирование силицида — это важный этап в производстве КМОП-микросхем, который используется для снижения сопротивления контактов и улучшения электрических характеристик транзисторов. Силициды — это соединения металлов с кремнием, которые обладают высокой электропроводностью и позволяют создавать низкоомные контакты к истоку, стоку и затвору транзистора. Без силицидов было бы невозможно достичь тех высоких характеристик, которые мы видим в современных процессорах и памяти. Этот процесс требует точного контроля температуры, времени отжига и используемых материалов, но результат того стоит — низкое сопротивление контактов и высокая производительность микросхем.



Для отжига силицидов используются установки быстрого термического отжига (RTA — Rapid Thermal Annealing). Эти установки позволяют быстро нагревать и охлаждать образцы, что минимизирует диффузию примесей и повреждения кристаллической решетки. В зависимости от используемого металла силициды могут иметь разные свойства:

$TiSi_2$ (силицид титана): Широко использовался в старых технологических процессах. Обладает низким сопротивлением, но требует высоких температур для формирования. Отжиг при температуре 600–800 °C.

$CoSi_2$ (силицид кобальта): Используется в более современных процессах. Обладает хорошей стабильностью и низким сопротивлением. Отжиг при температуре 500–700 °C.

NiSi (силицид никеля): Наиболее популярный материал в современных технологиях (например, 28 нм и менее). Обладает низким сопротивлением и формируется при относительно низких температурах. Однако NiSi менее стабилен при высоких температурах, что требует тщательного контроля процесса. Отжиг при температуре 400–500 °C.

Отжиг силицидов — это критически важный этап в производстве современных КМОП-микросхем. Он позволяет создавать низкоомные контакты, которые улучшают производительность и надежность транзисторов. Однако этот процесс требует точного контроля температуры, времени и используемых материалов. Современные технологии, такие как NiSi, позволяют формировать силициды при относительно низких температурах, что делает их идеальными для процессов с малыми нормами.

Чтобы обеспечить формирование качественного силицида с низким сопротивлением необходимо:

Контроль фазы силицида. Неправильный отжиг может привести к образованию нежелательных фаз с высоким сопротивлением.

Контроль температурного режима. Слишком высокая температура может вызвать деградацию силицида, а слишком низкая — неполное формирование.

Контроль толщины. В современных технологиях с малыми нормами (например, 22 нм и менее) требуется тщательный контроль толщины слоев. В FinFET-транзисторах из-за трехмерной структуры "плавника", необходимо обеспечить равномерное формирование силицида на всех поверхностях.

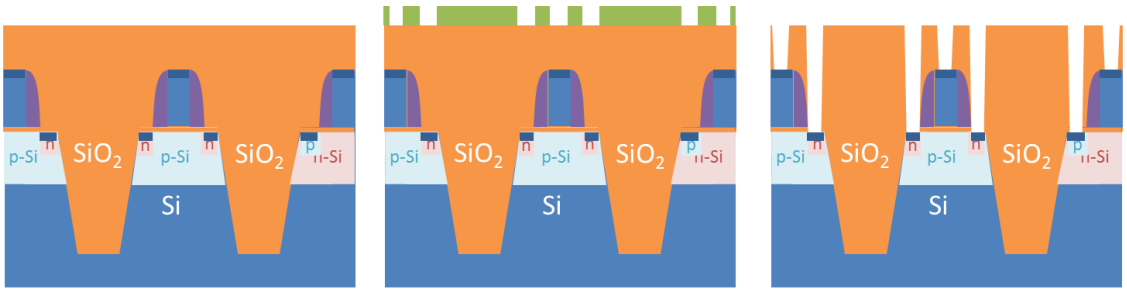
- **Формирование контактов**

Формирование контактов — это важный этап в производстве КМОП-микросхем, который обеспечивает электрическое соединение между активными элементами транзисторов (истоком, стоком и затвором) и металлическими межсоединениями. Это промежуточный слой металлизации (блок Middle-End-Of-Line), который используется для соединения элементов внутри одной ячейки транзистора до формирования основных металлических слоев. Процесс формирования требует высокой точности и контроля, особенно в современных технологиях с малыми размерами. Качество контактов напрямую влияет на производительность и надежность микросхемы.

Контактный модуль включает в себя создание контактных отверстий (контактов) и их заполнение проводящим материалом (обычно вольфрамом или медью). После заполнения контактных отверстий излишки металла удаляются с помощью химико-механической полировки (CMP — Chemical Mechanical Polishing). Это обеспечивает плоскую поверхность для последующих этапов металлизации.

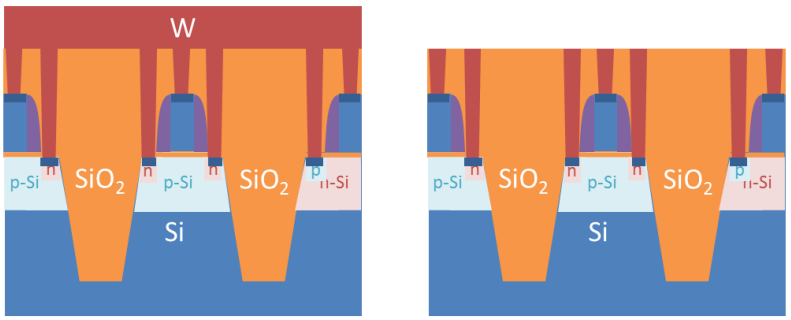
Модуль контакты

Contact hole (LIL) formation



SiO_2 deposition (PECVD) | Contact litho | Dry etch and strip

W plug formation



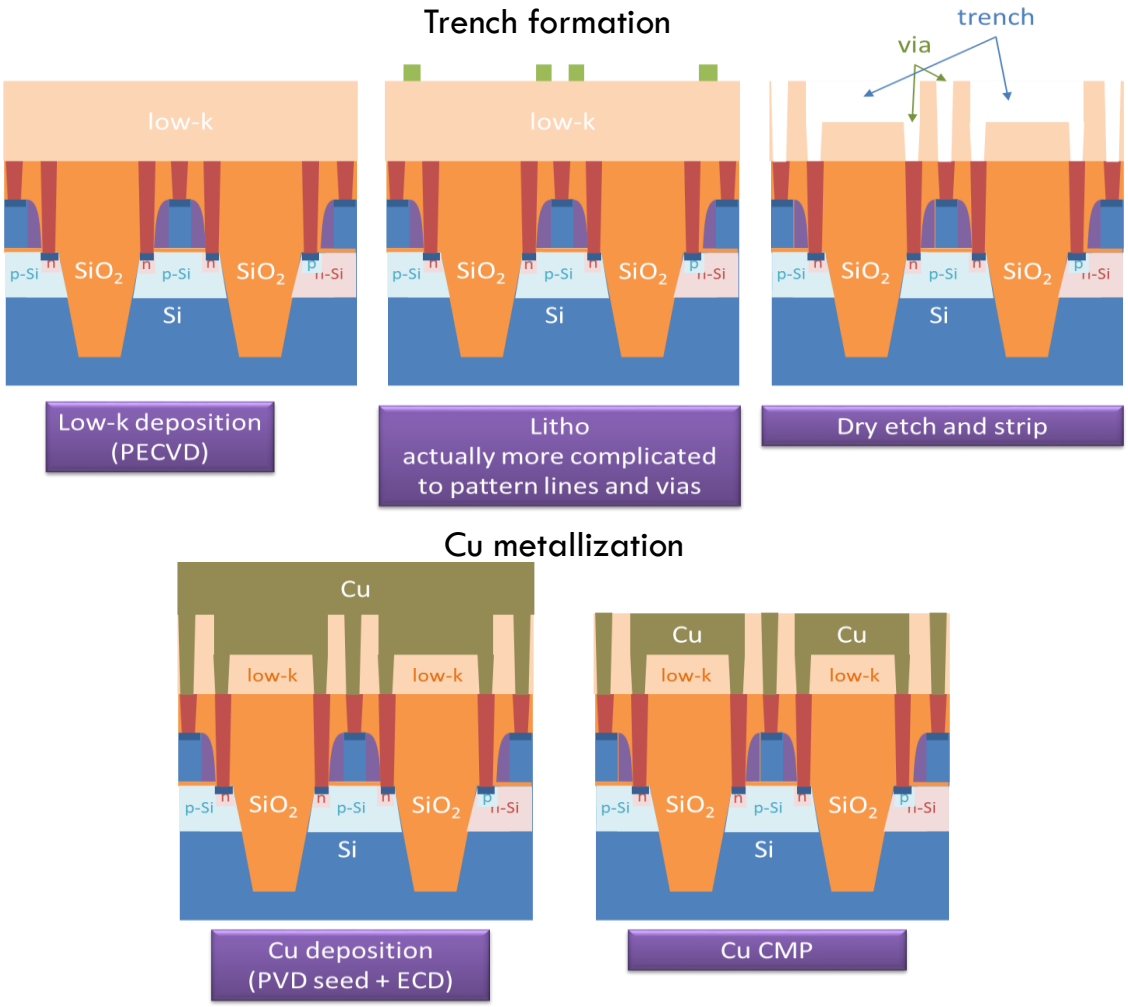
W deposition (CVD) | W polishing (CMP)

LIL и SAC — это две важные технологии формирования контактов, которые используются в современных КМОП-процессах для повышения плотности элементов, уменьшения паразитных эффектов и улучшения производительности микросхем. LIL (Local Interconnect Layer) — это технология, которая позволяет создавать локальные соединения между элементами транзистора (например, между истоком, стоком и затвором) на самом раннем этапе формирования транзистора. SAC (Self-Aligned Contact) — это технология формирования контактов, которая позволяет создавать контактные отверстия с высокой точностью, используя самосовмещение. Контактные отверстия формируются с использованием спейсеров (боковых изоляционных стенок) и других структур транзистора, что позволяет достичь высокой точности без необходимости точного совмещения маски (FinFET, <10 нм). Обе технологии играют ключевую роль в развитии микроэлектроники.

- **Формирование металлизации (Cu/low-k)**

Формирование металлизации с использованием меди (Cu) в сочетании с низко-диэлектрическими материалами (low-k) необходимо, чтобы уменьшить паразитные емкости и улучшить быстродействие микросхем в производстве современных КМОП-микросхем, но требует тщательного контроля и использования передовых технологий, таких как «Дамасцен» .

Модуль металлизации (Cu/low-k)



Первый этап — это нанесение изолирующего слоя с низкой диэлектрической проницаемостью (low-k). Обычно это материалы на основе оксида кремния (SiO_2) с добавлением углерода или фтора, которые уменьшают диэлектрическую проницаемость. Чем ниже значение k, тем меньше паразитные емкости между проводниками.

С помощью фотолитографии и травления в диэлектрике создаются отверстия (via) и траншеи (trench). Отверстия используются для вертикальных соединений между слоями, а траншеи — для горизонтальных проводников.

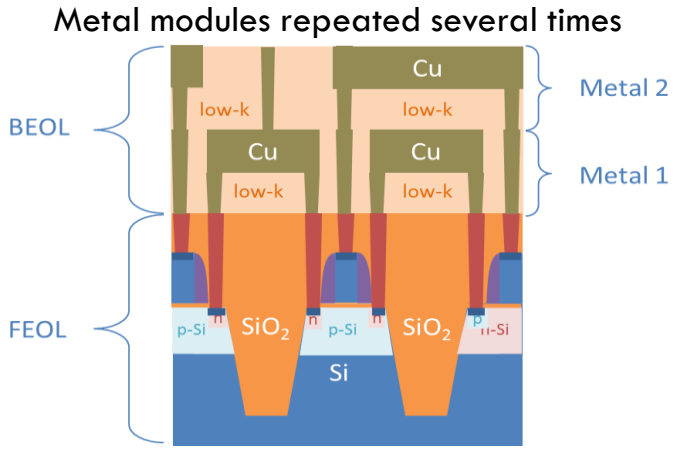
Чтобы предотвратить диффузию меди в диэлектрик и улучшить адгезию, на стенки отверстий и траншей наносится барьерный слой. Обычно это тонкий слой тантала (Ta) или нитрида тантала (TaN). Этот слой играет роль 'прокладки', которая защищает диэлектрик и улучшает контакт.

Затем отверстия и траншеи заполняются медью. Медь используется благодаря своему низкому удельному сопротивлению, что позволяет уменьшить задержки сигналов и повысить быстродействие микросхемы. Заполнение происходит с помощью электрохимического осаждения (ECD — Electrochemical Deposition).

После заполнения медью излишки металла удаляются с помощью химико-механической полировки (CMP — Chemical Mechanical Polishing). Это обеспечивает плоскую поверхность для последующих слоев металлизации.

- **Формирование многослойной металлизации**

В современных технологиях с нормами менее 10 нм модуль металлизации становится еще более сложным. Используются многослойные структуры с десятками слоев металлизации, а также новые материалы и методы, такие как воздушные зазоры (air gaps) для дальнейшего уменьшения диэлектрической проницаемости.



- **Формирование контактных площадок (Al Pad)**

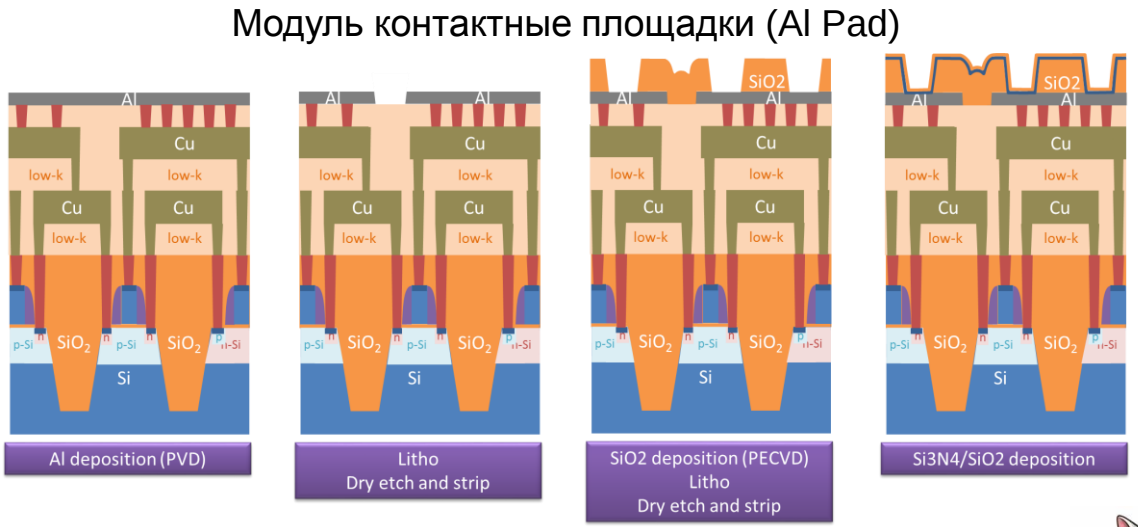
Алюминиевая контактная площадка (Al Pad) — это металлическая площадка на поверхности кристалла, которая используется для подключения микросхемы к внешним выводам. Это ключевой элемент, который обеспечивает электрическое соединение между внутренними элементами микросхемы и внешним миром. В современных технологиях Al Pad используется в сочетании с другими материалами (например, медью) для улучшения характеристик. Также могут использоваться дополнительные слои (например, барьерные слои из титана или тантала) для предотвращения диффузии и улучшения адгезии.

Сначала на поверхность наносится толстый слой алюминия (обычно толщиной 1–2 мкм). Это делается с помощью методов напыления, таких как PVD (Physical Vapor Deposition — физическое осаждение из паровой фазы). С помощью фотолитографии на алюминий наносится фоторезистивная маска, которая определяет форму и размеры Al Pad. Затем выполняется плазмохимическое травление, в ходе которого удаляются излишки алюминия, и формируются контактные площадки. Чтобы защитить Al Pad от коррозии и механических повреждений, на его поверхность наносится защитный слой (обычно нитрид кремния Si_3N_4 или оксид кремния SiO_2). Этот слой также предотвращает окисление алюминия. После в защитном слое создаются отверстия, которые открывают доступ к Al Pad. Эти отверстия используются для подключения проволочных соединений или шариковых выводов.

Формирование Al Pad — это сложный процесс, который сталкивается с несколькими вызовами:

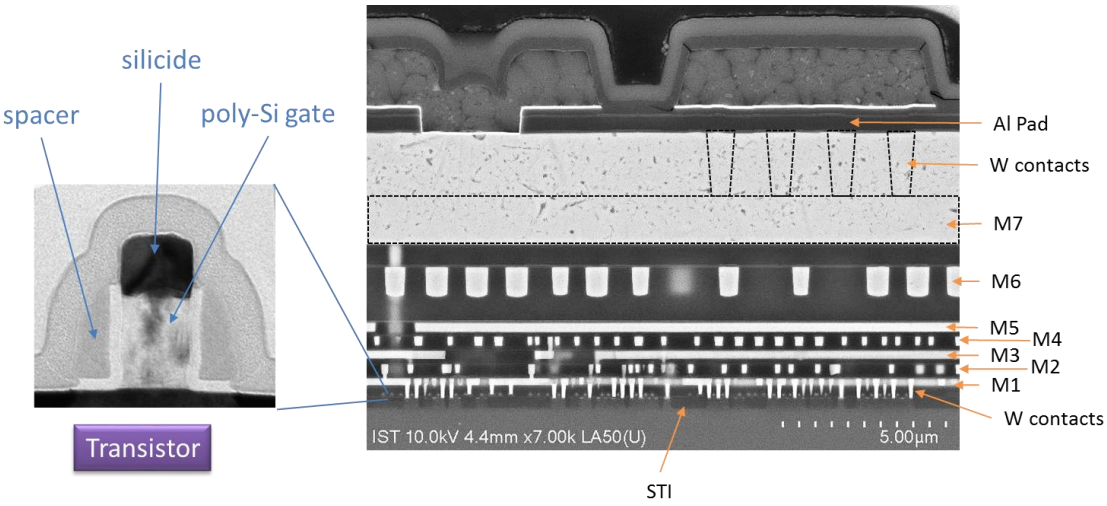
Коррозия. Алюминий подвержен окислению, поэтому требуется нанесение защитного слоя.

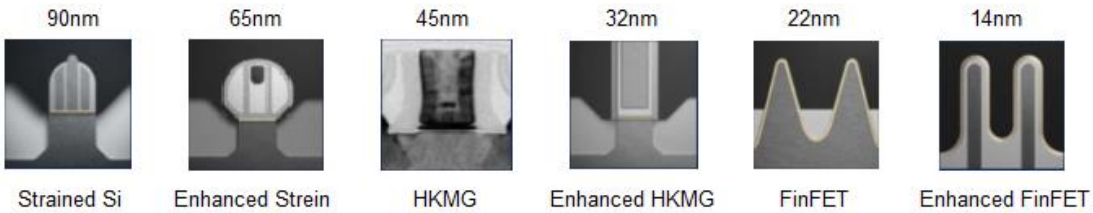
Электромиграция. При высоких плотностях тока алюминий может мигрировать, что приводит к разрыву соединений. Для предотвращения этого используются легирующие добавки (медь или кремний).



- **Кристальное производство ИС**

Кристальное производство ИС — это сложный и многоэтапный процесс, который требует использования передовых технологий и оборудования. Он лежит в основе создания современных электронных устройств, от процессоров и памяти до датчиков и микроконтроллеров. Благодаря постоянному развитию технологий (например, переход на EUV-литографию и использование новых материалов) кристальное производство продолжает двигаться в сторону уменьшения размеров элементов и увеличения производительности чипов.





Объединяя различные модули, отдельные операции и процессы в технологический маршрут (поток операций), можно изготовить любую ИС:

v Формирование активных элементов (Front-End-of-Line, FEOL)

Окисление: На поверхности пластины создается слой диоксида кремния (SiO_2) для изоляции и защиты.

Фотолитография: Нанесение фоторезиста (светочувствительного материала) на пластину. Экспонирование через фотошаблон с использованием ультрафиолетового света для создания рисунка **схемы.**

Травление слоев: Для создания рисунка схемы в материале через резистивную маску удаляются лишние участки материала.

Легирование: Введение примесей (бор, фосфор) для создания областей с разными электрическими свойствами (p-n-переходы). Это может выполняться методом ионной имплантации или диффузии.

Термическая обработка: Активация примесей и восстановление кристаллической структуры.

Нанесение слоев: Добавление диэлектриков и проводящих материалов с использованием методов химического осаждения из газовой фазы (CVD) или физического осаждения из паровой фазы (PVD).

v Формирование межсоединений (Back-End-of-Line, BEOL)

Металлизация: Создание проводящих слоев (алюминий, медь) для соединения элементов схемы.

Планаризация: Выравнивание поверхности с помощью химико-механической полировки (CMP).

Многослойная структура: Повторение процессов литографии, травления и металлизации для создания многоуровневой структуры чипа.

v Тестирование и контроль качества

Метрология: Результаты выполненных операций контролируются метрологически в процессе производства.

Электрическое тестирование: Проверка параметров чипов на пластине после производства ИС.

КОНСПЕКТ
Технологическая схема производства ИС

- Кристальное производство ИС — это сложный и многоэтапный процесс, который требует использования передовых технологий и оборудования.

Front-End-Of-Line:
- Современные технологии STI позволяют уменьшить размеры элементов и значительно повысить плотность транзисторов.
- Длительный отжиг после формирования карманов проводится при высоких температурах (900–1100 °C) для активация примесей и восстановления кристаллической решетки в карманах.
- После ионной имплантации температура пластины в процессе обработки не должна превышать 400°C.
- От качества затвора зависят ключевые характеристики транзистора: скорость переключения, энергопотребление и надежность.
- После формирования истока и стока проводится короткий высокотемпературный отжиг (900–1100 °C минуты или секунды в RTA), чтобы активировать примеси.
- LDD-области формируются с помощью спейсеров.

Middle-End-Of-Line :
- Для отжига силицидов используются специальные установки быстрого термического отжига (RTA).
- LIL и SAC — это две важные технологии формирования контактов, которые используются в современных КМОП-процессах для повышения плотности элементов, уменьшения паразитных эффектов и улучшения производительности микросхем.

Back-End-Of-Line:
- Al металлизация использует процессы плазмохимического травления в Cl-содержащей плазме
- Медь не травиться плазмохимическими методами, используется метод «Дамасцен». После заполнения медью канавок в диэлектрике излишки металла удаляются с помощью химико-механической полировки (CMP — Chemical Mechanical Polishing).
- Чтобы защитить Al Pad от коррозии и механических повреждений, на его поверхности находится защитный слой, который удаляется непосредственно перед распайкой проволочных соединений или шариковых выводов в корпус.

Раздел 4: Интеллектуальная собственность

Интеллектуальная собственность

Интеллектуальная собственность в сфере микроэлектроники играет ключевую роль в защите инноваций, технологий и разработок, которые являются результатом интеллектуального деятельности (РИД). Защита интеллектуальной собственности окупать затраты на исследования и разработки, что способствует дальнейшему прогрессу.

Основные типы защиты интеллектуальной собственности в микроэлектронике:

Патенты: Патенты являются основным инструментом защиты инноваций в бизнесе связанном с микроэлектроникой. Они предоставляют исключительные права на изобретения, такие как новые методы (например: Bosch process) производства, архитектуры микросхем и изделия (патенты на процессоры, память (DRAM, NAND), сенсоры), технологии уменьшения размеров транзисторов (например, FinFET, GAAFET), а также уникальные узлы и алгоритмы технологического оборудования (например: технологии литографии (EUV)) и др.

Топологии интегральных схем (маски) и программное обеспечение, используемое для проектирования микросхем (например, CAD-системы), защищаются отдельно в соответствии с международными соглашениями (например, Договором ВОИС по интеллектуальной собственности в отношении интегральных схем).

Торговые секреты (ноу-хау): Многие компании в микроэлектронике предпочитают защищать свои технологии как коммерческую тайну внутри компании или регистрировать закрытый от общего пользования «ноу-хау» на территории определенного государства, особенно если патентование может раскрыть ключевые аспекты их разработок или составлять гостайну (например: технологии производства, рецепты процессов, специфические методы обработки).

Товарные знаки: Товарные знаки защищают бренды и названия продуктов, что важно для идентификации продукции на рынке. Например, названия процессоров (Intel Core, AMD Ryzen) или технологий (NVIDIA DLSS, TSMC N3E).

Промышленные образцы: В микроэлектронике промышленные образцы могут защищать дизайн корпусов микросхем или других визуально значимых элементов.

Примеры компаний, активно использующих интеллектуальную собственность:

Intel: Лидер в области процессоров, владеет патентами на архитектуры и технологии производства.

TSMC: Крупнейший контрактный производитель полупроводников, свои технологии производства.

ARM: Разработчик архитектуры процессоров, зарабатывает на лицензировании своих технологий.

Qualcomm: Известен патентами в области мобильных технологий и чипсетов.

Synopsys: Программное обеспечение, инструменты для проектирования, верификации и симуляции цифровых и аналоговых схем.

ASML: Специализируется на производстве оборудования для полупроводниковой промышленности, в частности, на разработке и производстве литографических систем, которые используются для создания интегральных схем по всему миру, является единственным производителем оборудования для EUV-литографии, которое позволяет создавать чипы с технологическими нормами 7 нм и менее.

- Интеллектуальная собственность как инструмент бизнеса в высокотехнологичной отрасли.

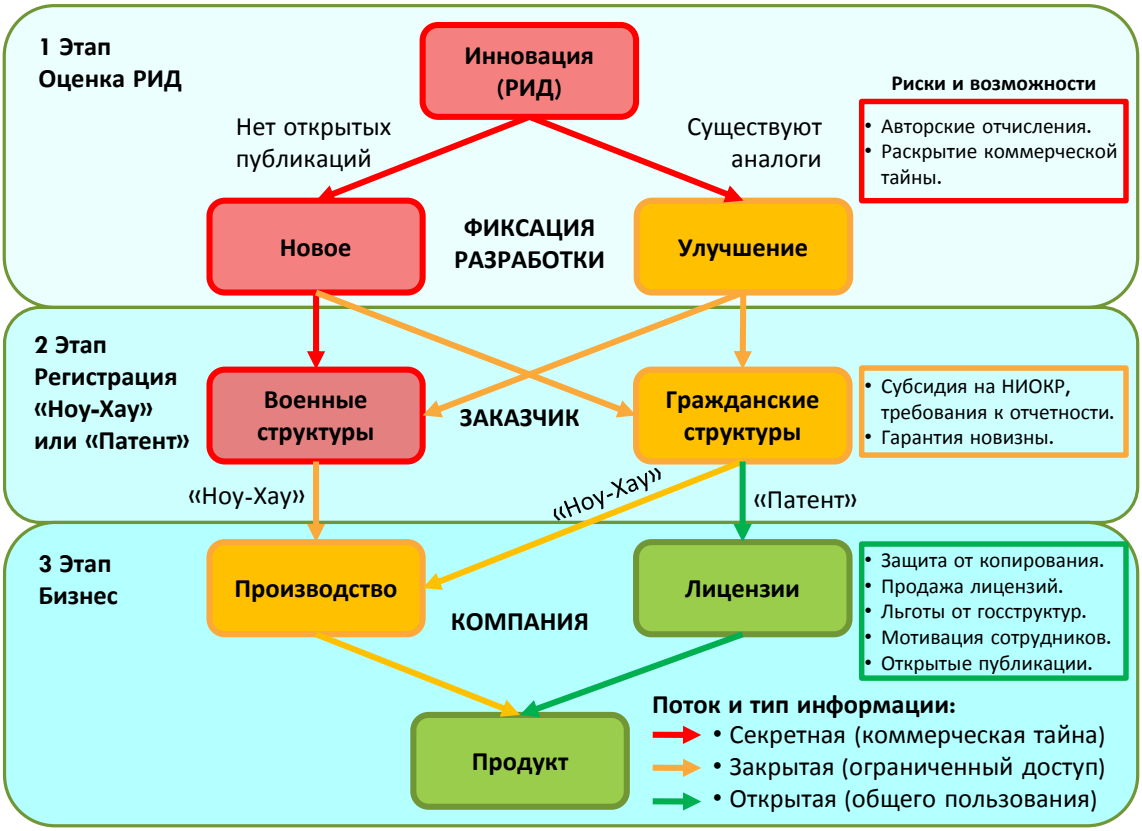
Патенты обеспечивают монопольное право на использование изобретения в течение определенного срока (обычно 20 лет), позволяя компаниям удерживать лидерство на рынке. Многие компании зарабатывают на лицензировании своих технологий другим производителям. Например, ARM лицензирует архитектуру процессоров множеству компаний. Интеллектуальная собственность позволяет бороться с копированием и незаконным использованием технологий правовыми методами.

- Проблемы защиты и международного регулирования.

Микроэлектроника особенно уязвима к обратному инжинирингу, что требует дополнительных мер защиты. Разные страны имеют разные стандарты защиты интеллектуальной собственности, что усложняет международную торговлю, особенно в сфере технологического оборудования из-за возможностей производства изделий двойного назначения. Из-за высокой сложности и скорости развития технологий в микроэлектронике патентование на разные страны может быть дорогостоящим и длительным процессом. Крупные международные компании, такие как Intel, Samsung, TSMC, Qualcomm и другие, часто вовлечены в судебные споры по поводу нарушения патентов.

Результат интеллектуальной деятельности - не материальные активы

РИД становятся нематериальными активами, когда они признаются на балансе компании и могут быть оценены в денежном выражении. Однако управление РИД требует значительных усилий, включая защиту прав, оценку и коммерциализацию. В условиях глобальной конкуренции и быстрого развития технологий РИД становятся ключевым фактором успеха для развития компаний, поскольку от наличия РИД растет репутация и уменьшается риск для инвесторов.



- Преимущества РИД как нематериальных активов

РИД могут приносить доход через продажу продукции, созданной с использованием РИД, лицензирование, продажу прав на РИД. Позволяют компаниям выделяться на рынке за счет уникальных технологий, брендов или продуктов. РИД могут использоваться в качестве залога для получения кредитов или привлечения инвесторов. РИД повышают стоимость компании, так как они представляют собой долгосрочные активы, способные генерировать доход.

1. Отсутствие физической формы: РИД не имеют материального выражения, но при этом обладают стоимостью.
2. Исключительные права: Владелец РИД имеет исключительные права на их использование, что позволяет контролировать их применение и получать доход.
3. Долгосрочная ценность: РИД могут приносить доход в течение длительного времени (например, патенты действуют 20 лет, авторское право — 70 лет после смерти автора).
4. Возможность передачи прав: РИД могут быть проданы, переданы по лицензии или использованы в качестве залога.

- Рыночная стоимость РИД определяется на основе:

1. Доходного подхода (оценка будущих доходов от использования РИД).
2. Затратного подхода (оценка затрат на создание или воспроизводство РИД).
3. Сравнительного подхода (анализ аналогичных сделок на рынке).

Интеллектуальная собственность путь технологического прогресса и коммерческого успеха или способ монополизации технологий и большой политики.

Всем известен закон «Мура», но что же реально обеспечивает его исполнение, на физическом уровне. Как устроена мировая индустрия производства микроэлектронных компонентов и причем здесь интеллектуальная собственность.

Как было описано выше, для физического производства любой микросхемы, а тем более для промышленного производства по передовым нормам, помимо знаний, физически необходим комплект специализированного технологического оборудования.

Рынок высокотехнологического оборудования жестко поделен между основными игроками, поскольку производство полупроводников очень дорогой процесс, и только в промышленных масштабах является рентабельным. При этом основную роль играют возможности производственного оборудования по поддержанию высокой равномерности и воспроизводимости параметров обработки и соответственно выход годных по площади пластины.

Американские компании LAM и AMAT являются мировыми лидерами в своих нишах в производстве высокотехнологичного вакуумно-плазменного оборудования (травление и нанесение тонких пленок), при этом производят почти весь спектр вакуумно-плазменного оборудования, что дает возможность обхода антимонопольного законодательства США, и инвестировать в новые разработки оставаясь пионерами в отрасли.

Специализация Lam Research (LAM) : Оборудование для травления и очистки кремниевых пластин. Ключевые РИД: Патенты на технологии травления (например, для 3D NAND и DRAM), методы плазменной обработки, а также ноу-хау в области производства.

Специализация Applied Materials (AMAT): Оборудование для нанесения тонких пленок, химико-механической полировки (CMP) и других процессов. Ключевые РИД: Патенты на технологии нанесения материалов, методы CMP, а также уникальные решения для производства передовых чипов.

Обе компании активно поставляют своё оборудование в научно-технологические центры, для создания РИД, путем разработки и отработки технологических процессов для новых микросхем и приборов. Ежегодно растущий мировой спрос на полупроводники разных типов (для AI, 5G и IoT) увеличивает потребность в оборудовании LAM и AMAT, что повышает стоимость их РИД. Наличие конкурентов (например, японская компания Tokyo Electron, мировой лидер в поставке фотолитографических трэков) создает риски, но лидерство LAM и AMAT и протекция американских компаний на территории Европы и США, снижает их влияние в нише вакуумно-плазменного оборудования.

- Санкции и их влияние на микроэлектронику

Интеллектуальная собственность и санкции играют важную роль в производстве микроэлектроники, поскольку эта отрасль высокотехнологична и зависит от инноваций, патентов и международного сотрудничества. Санкции, вводимые государствами или международными организациями, могут существенно повлиять на производство микроэлектроники, особенно в условиях глобализации цепочек поставок.

Ограничения на экспорт технологий: Страны, такие как США, вводят ограничения на экспорт высокотехнологичного оборудования (например, литографических машин ASML) и программного обеспечения для проектирования чипов (например, CAD-систем). Это делается для ограничения доступа определенных стран (например, Китая и России) к передовым технологиям.

Эмбарго на поставки: Санкции могут включать запрет на поставку микроэлектроники и компонентов определенным компаниям или странам. Например, санкции против России после 2022 года ограничили поставки чипов для военных и промышленных нужд.

Ограничения на использование ИС: Санкции могут запрещать передачу лицензий на использование интеллектуальной собственности. Например, компании могут быть лишены права использовать запатентованные технологии или программное обеспечение.

Влияние на глобальные цепочки поставок: Микроэлектроника производится в глобальной сети, где разные этапы (проектирование, производство, сборка) распределены между странами. Санкции могут нарушить эти цепочки, увеличивая стоимость и сроки производства.

Ответные меры: В условиях ужесточения санкций и геополитической напряженности страны и компании вынуждены адаптироваться, развивая собственные технологии и снижая зависимость от внешних поставщиков. страны развивают собственные технологии (например Китай, процессоры на архитектуре LoongArch) и оборудование для снижения зависимости от западных технологий.

КОНСПЕКТ
Интеллектуальная собственность

- Патенты обеспечивают монопольное право на использование изобретения в течение определенного срока (обычно 20 лет), или зарабатывать на лицензировании своих технологий другим производителям.
- Ноу-хау это зарегистрированная коммерческая тайна компании, закрытая от общего и коммерческого использования третьими лицами.
- РИД становятся нематериальными активами, когда они признаются на балансе компании и могут быть оценены в денежном выражении.
- РИД могут приносить доход через продажу продукции, созданной с использованием РИД, лицензирование, продажу прав на РИД.
- Оценка РИД на основе доходного подхода показывает, что уникальные технологии, защищенные патентами и ноу-хау, делают РИД ключевым нематериальным активом, который влияет на ценность и будущий рост компании.
- Рынок высокотехнологического оборудования жестко поделен между основными игроками, поскольку производство полупроводников очень дорогой процесс, и только в мировых промышленных масштабах является рентабельным.

Санкции:
- Ограничения на экспорт технологий через ограничения на экспорт высокотехнологичного оборудования и программного обеспечения для проектирования чипов.
- Эмбарго на поставки могут включать запрет на поставку микроэлектроники и компонентов определенным компаниям или странам.
- Ограничения на использование ИС могут запрещать передачу лицензий на использование интеллектуальной собственности.