

Документ из ИПС "Кодекс"**ПРОИЗВОДСТВО КРЕМНИЕВЫХ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ****David G. Baldwin, James R. Rubin, Afsaneh Gerami****Общие сведения о технологии изготовления кремниевых полупроводниковых приборов**

Описание технологии изготовления кремниевых полупроводниковых приборов - как дискретных схем (полупроводниковых схем, содержащих только один активный прибор, например, транзистор), так и интегральных микросхем (соединенных между собой матриц активных и пассивных элементов на одной полупроводниковой подложке, способных выполнять, по крайней мере, функцию одной электронной схемы) - включает многочисленные высокотехнологические процессы и операции. Цель данной статьи состоит в общем описании и объяснении основных технологических этапов изготовления кремниевых полупроводниковых приборов и соответствующих вопросов охраны окружающей среды, здоровья и безопасности (EHS).

Изготовление интегральных схем (IC) представляет собой цепь технологических процессов, которые могут повторяться много раз. В самых популярных IC применяется 6 и более масок для формирования рисунков, чаще всего от 10 до 24. Изготовление микросхемы начинается с кремниевой пластины, имеющей сверхвысокую чистоту и диаметр от 4 до 12 дюймов. Высокочистый кремний является почти изолятором, но определенные примеси, которые называются легирующими добавками и добавляются в количестве от 10 до 100 частей на миллион, делают кремний способным проводить электричество.

Интегральная схема может содержать миллионы транзисторов (а также диодов, резисторов и конденсаторов) из легированного кремния, соединенных между собой по соответствующей схеме, которые образуют логическую ячейку вычислительной машины, ячейку памяти или схему другого типа. Сотни микросхем могут быть изготовлены на одной пластине.

Для всех кремниевых полупроводниковых приборов существует шесть основных технологических процессов: окисление, литография, травление, легирование, химическое парофазное осаждение и металлизация. Затем следуют процессы сборки, испытания, маркировки, упаковки и отгрузки.

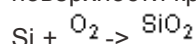
Окисление

Обычно первый этап изготовления полупроводниковых приборов включает окисление внешней поверхности пластины, которое позволяет получить тонкую пленку (около одного микрона) диоксида кремния (SiO_2). Эта пленка защищает поверхность кремния от проникновения посторонних химических веществ и служит маской для последующего процесса диффузии. Возможность создавать ("выращивать") на кремнии химически устойчивую защитную пленку диоксида кремния делает кремниевые пластины наиболее широко применяемыми полупроводниковыми подложками.

Окисление, обычно называемое термическим окислением, представляет собой процесс, который выполняют в высокотемпературных диффузионных печах. Защитная пленка диоксида кремния выращивается в атмосфере, содержащей либо кислород (O_2) (сухое окисление), либо кислород в смеси с водяным паром (H_2O) (жидкостное окисление). Температура в печах поддерживается в диапазоне от 800 до 1300°C. Также могут добавляться хлористые соединения в виде хлористого водорода (HCl) для контроля нежелательных примесей. На современных предприятиях наблюдается тенденция к применению вертикальных печей окисления. Вертикальные печи лучше соответствуют требованиям строгого контроля загрязнений, большему размеру пластин и делают возможной более равномерную технологическую обработку. Они также позволяют экономить драгоценное место чистых помещений.

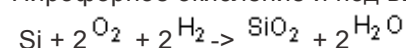
Сухое окисление

Кремниевые пластины, подвергаемые окислению, сначала очищаются с помощью детергента и водного раствора, растворителей с ксилолом, изопропиловым спиртом или других. Очищенные пластины высушиваются и загружаются в кварцевый держатель для пластин, который называется лодочкой. Затем они помещаются в кварцевую трубу или ячейку диффузионной печи с операторского конца (загрузочный конец). Через входной конец трубы (источник) подается высокочистый кислород или смесь кислорода и азота. Поток "сухого" кислорода контролируется в кварцевой трубе и обеспечивает избыток кислорода для выращивания диоксида кремния на поверхности кремниевой пластины. Основная химическая реакция следующая:

**Жидкостное окисление**

Наиболее распространенные способы введения водяного пара, когда вода является окислителем, следующие: пирофорное окисление, под высоким давлением, барботерное и импульсное. Основные химические реакции имеют следующий вид:

Пирофорное окисление и под высоким давлением:



Барботерное и импульсное окисление:



Пирофорное окисление включает введение и горение смеси газа-окислителя кислорода и газообразного водорода. Такие системы обычно называются горящими водородными системами или горелками. Водяной пар образуется, когда необходимое количество водорода и кислорода вводится на входе трубы и вступает в реакцию. Данная смесь должна строго контролироваться, чтобы обеспечивалось надлежащее горение и предотвращалось накопление взрывоопасного газообразного водорода.

Окисление под высоким давлением (HiPox) технически называется системой пиросинтеза воды; водяной пар при этом образуется посредством реакции сверхчистого водорода и кислорода. Затем пар откачивается в камеру высокого давления, в которой создается давление в 10 атмосфер, что ускоряет процесс жидкостного окисления. В качестве источника пара также может применяться деионизованная вода.

При барботерном окислении деионизованная вода подается в контейнер, который называется барботер. В нем поддерживается постоянная температура воды ниже точки кипения (100°C) с помощью нагревательной сетки. Газообразный азот или кислород подается на вход барботера, насыщается водяным паром, когда он поднимается через воду, и выпускается через выход в диффузионную печь. Барботерные системы чаще всего применяются в качестве систем окисления.

При импульсном окислении деионизованная вода непрерывно стекает на поверхность подогреваемого дна кварцевого контейнера. Происходит интенсивное испарение воды при попадании на горячую поверхность. Газообразный азот или кислород течет над испаряющейся водой и переносит водяной пар в диффузионную печь.

Литография

Литография (фотолитография или просто маскирование) - это процесс точного создания рисунков на окисленной поверхности пластины. Микросхема создается слой за слоем; при этом каждый слой получает рисунок от фотошаблона, созданного на этапе схемотехнического проектирования.

В полиграфической промышленности разработаны методы, являющиеся настоящими предшественниками процессов изготовления современных полупроводниковых приборов. Эти методы связаны с изготовлением печатных форм, обычно металлических, на поверхности которых после удаления материала посредством химического травления образуется рисунок. Аналогичный базовый метод применяется при создании эталонных фотошаблонов, используемых при изготовлении каждого слоя микросхемы.

Созданию фотошаблонов предшествует этап автоматизированного схемотехнического проектирования на основе электрической принципиальной схемы. Это позволяет быстро создавать фотошаблоны и облегчает внесение необходимых изменений. Данный метод называется автоматизированным проектированием (CAD). Использование мощных компьютерных алгоритмов системами проектирования в режиме on-line дают разработчику возможность проектировать топологию схемы и модифицировать её непосредственно на экранах дисплеев с интерактивными графическими возможностями.

Окончательный рисунок, или фотошаблон, для каждого слоя схемы создается с помощью фото-графопостроителя, управляемого компьютером, или с помощью генератора изображений. Полученные с помощью фото-графопостроителя рисунки уменьшаются до фактических размеров схемы. Эталонный фотошаблон изготавливается на стеклянной пластине, покрытой пленкой хрома, его рисунок воспроизводится на рабочем фотошаблоне, который служит как для контактной, так и для проекционной литографии на пластине.

Фотошаблоны формируют рисунок проводящих и изолирующих областей, который переносится на пластину с помощью фотолитографии. Большинство фирм не производит собственные фотошаблоны, а применяют поставляемые изготовителями.

Очистка

Так как внешняя поверхность пластины должна быть свободной от посторонних частиц и загрязнений, кремниевые пластины часто подвергаются очистке. Для этого применяются:

- Промывка деионизованной водой и моющими средствами;
- Растворители: изопропиловый спирт (IPA), ацетон, этанол, терпены;
- Кислота: плавиковая (HF), серная (H_2SO_4), перекись водорода (H_2O_2), соляная (HCl), азотная (HNO_3) и их смеси;
- Каустик: гидроксид аммония (NH_4OH).

Нанесение резистов

На поверхность пластины наносят резистивный материал: полимеры на основе растворителей. С помощью центрифуги его распределяют тонким равномерным слоем по поверхности пластины. Затем растворители испаряются, оставляя полимерную пленку. Все резистивные материалы зависят от вызываемых излучением (в основном ультрафиолетовым) изменений в растворимости синтетического органического полимера в специальных

веществах-проявителях. Резистивные материалы могут быть негативными и позитивными в зависимости от того, уменьшается их растворимость в проявителе (негативные) или увеличивается (позитивные) под действием излучения. В таблице 83.1 описан состав различных фоторезистивных материалов.

Таблица 83.1 Фоторезисты

Ультрафиолетовое излучение			
Длина волны (350-450нм)	негативные	PB S D	Алифатический каучук с азидной основой (изопрен). n-бутилацетат, ксилен, n-метил-2-пирролидон, этилбензол. Ксилен, алифатические углеводороды, n-бутил ацетат, растворитель Стоддард (дистиллят нефти)
	позитивные	PB S D	Ортодиазокетон. Монометилловый эфир ацетатпропиленгликоля, этоксипропинат, n-бутилацетат, ксилен, хлортолуол. Гидрат окиси натрия, силикаты, гидрат окиси.
Глубокое Длина волны (200-250)	В основном позитивные резисты		
Электронно-лучевое (около 100 нм)			
	Негативные	PB S D	Сополимер - этилакрилат и глицидил метакрилат (COP). Не имеется. Не имеется.
	Позитивные	PB S D	Полиметилметакрилат, полифторалкилметакрилат, полиалкилальдегид, полицианоэтилакрилат. Моноэтиловый эфир ацетатпропиленгликоля. Щелочь или IPA, этилацетат или метил-Изобутилкетон (MIBK)
Рентгеновское (0.5-5 нм)			
	Негативные	PB S D	Сополимер-этилакрилат и глицидилметакрилат (COP) Не имеется Не имеется
	Позитивные	PB S D	Полиметилметакрилат, ортодиазокетон, поли (гекса-вторбутилметакрилат). Монометилловый эфир ацетатпропиленгликоля Не имеется

PB=полимерная основа; S=растворитель; D=проявитель.

Так как большинство фоторезистов являются чувствительными к ультрафиолету (UV), производственное помещение освещается специальным желтым светом, в котором недостает ультрафиолета (см. рис. 83.4).

Рис. 83.4 Оборудование фотолитографической "желтой комнаты" в современной чистой комнате



В промышленности применяются главным образом негативные и позитивные резисты, на которые воздействуют ультрафиолетом. Резисты, на которые воздействуют электронные и рентгеновские лучи, также пользуются спросом на рынке благодаря более высокой разрешающей способности. Проблемы охраны здоровья на участках литографии связаны главным образом с позитивными резистами, которые могут оказывать вредное воздействие на репродуктивное здоровье работников (например, моноэтиловый эфир ацетат этиленгликоля в качестве носителя). Данные материалы постепенно снимаются с производства. Неприятный запах от негативных резистов (например, ксилена) также вызывает неприятные ощущения у работников. Вследствие этого гигиенисты полупроводниковой промышленности часто берут на анализ пробы во время операций с фоторезистами. Обычно воздействие химических веществ во время при обработке в центрифуге и проявлении составляет менее 5% допустимых доз растворителей для атмосферы рабочих помещений (Scarpace et al. 1989).

Во время операции обработки фоторезистов на центрифуге было обнаружено, что воздействие моноэтилового эфира ацетатэтиленгликоля в течение одного часа равно 6.3 ppm [ppm-одна миллионная часть]. Вредное воздействие в основном вызывается плохой организацией работы при техобслуживании (Baldwin, Rubin and Horowitz 1993).

Сушка и предварительный отжиг

После нанесения резиста пластины переносят вручную или по специальной линии из центрифуги в печь с азотной атмосферой и контролируемой температурой. Умеренная температура (от 70 до 90° C) вызывает затверждение фоторезиста (мягкий отжиг) и испарение остатков растворителей.

Для обеспечения адгезии резистивного слоя к пластине на нее наносится вещество для затравки - гексаметилдисилизан (HMDS). Он связывает молекулы воды на поверхности пластины. HMDS наносится либо непосредственно в процессе погружения или обработки на центрифуге, либо посредством испарения, что дает преимущество с точки зрения технологии обработки и стоимости.

Совмещение фотошаблонов и экспонирование

С помощью прецизионной оптико-механической установки фотошаблон и пластина сближаются на очень близкое расстояние, и рисунок фотошаблона совмещается с рисунком, уже существующим на пластине под слоем фоторезиста. Для первого фотошаблона никакого совмещения не требуется. В более старых технологиях совмещение последовательных слоев осуществлялось благодаря использованию бинокулярного микроскопа (с двойными линзами) и методов прецизионного контроля размещения пластины относительно фотошаблона. В

новых технологиях такое совмещение выполняется автоматически с помощью реперных точек на пластинах. После совмещения высокоинтенсивный ультрафиолетовый источник с ртутной дуговой лампой или дуговой лампой светит на фотошаблон, экспонируя резист на участках, не защищенных непрозрачными частями маски.

Различные методы совмещения пластин и экспонирования включают: экспонирование в ультрафиолетовом свете (UV) (контактное или близкое), UV экспонирование с помощью проекционных линз для уменьшения (проекция), UV пошаговое экспонирование с повторным уменьшением (проекция), экспонирование в потоке рентгеновских лучей (близкое) и сканирующее экспонирование под действием электронного луча (прямая запись). Основным методом - UV экспонирование с помощью ртутных дуговых ламп и установок проекционного совмещения. UV резисты разрабатываются либо так, чтобы реагировать на широкий спектр UV длин волн, либо так, чтобы реагировать избирательно на одну или несколько из основных спектральных линий, испускаемых лампой (например, g-линия при 435 нм, h-линия при 405 нм и i-линия при 365 нм). Преобладающая длина волны UV света, применяемая в настоящее время в фотолитографии, равна 365 нм и выше, но спектры UV лампы также содержат значительную энергию при длине волны, вредной для здоровья, в фотохимически активной области ниже 315 нм. При нормальных условиях интенсивность UV излучения, исходящего от оборудования, меньше интенсивности солнечного UV излучения в фотохимически активной области и меньше установленных стандартом допустимых доз промышленного UV облучения. Иногда при техобслуживании нужно зарядить UV лампу энергией вне камеры для оборудования или без стандартных защитных фильтров. Уровень облучения во время этой операции может превышать допустимые пределы, но стандартные атрибуты чистого помещения (например, комбинезоны, виниловые перчатки, защитные маски на лицо и защитные очки из поликарбоната с UV фильтром) обычно помогают ослабить отрицательное воздействие UV излучения (Baldwin and Stewart 1989).

Хотя преобладающая длина волны для ламп с ультрафиолетовым излучением, используемых в фотолитографии, составляет 365 нм и выше, необходимость уменьшения размеров элементов в новых перспективных интегральных схемах обуславливает применение источников экспонирования с меньшей длиной волны, таких как глубокое UV излучение и рентгеновские лучи. С этой целью разработана новая технология, заключающаяся в применении криптон-флюоридных эксимерных лазеров, используемых в установках пошагового экспонирования. В этих установках применяется длина волны 248 нм с высокой выходной мощностью лазера. Как и другое оборудование с мощными лазерными системами, использующееся в полупроводниковом производстве, данная аппаратура создает трудности при необходимости отмены блокировки системы во время фокусировки луча. Мощные лазеры являются одним из самых серьезных источников электрической опасности в полупроводниковой промышленности. Даже после отключения питания существует вероятность значительного удара. Вопросы проектирования и безопасности этих систем рассмотрены такими авторами, как Escher, Weathers and Labonville (1993).

Перспективным источником излучения в литографии являются рентгеновские лучи. Уровень излучения источников при рентгеновской литографии могут давать дозу облучения в 50 миллизивертов (5 бэр) за год в середине оборудования. Для минимизации вредного воздействия рентгеновского излучения рекомендуется ограничивать доступ в помещение с экранированными стенами (Rooney and Leavey 1989).

Проявление

На этапе проявления неполимеризованные участки резиста растворяются и удаляются. Проявитель, основанный на растворителе, наносят на покрытую резистом поверхность пластины посредством погружения, распыления или разбрызгивания. В таблице 83.1 представлены различные проявители. После проявителя обычно применяется растворитель (n-бутиловый ацетат, изопропиловый спирт, ацетон и др.) для удаления остатков материалов. Резист, остающийся после проявления, защищает отдельные слои во время последующей технологической обработки.

Отжиг

После совмещения, экспонирования и проявления резиста пластины переносят в другую печь с контролируемой температурой и азотной атмосферой. Более высокая температура этой печи (от 120 до 135°С) вызывает затверждение фоторезиста и его полную полимеризацию на поверхности пластины (твердый отжиг).

Удаление (обдирка) фоторезиста

После отжига проявленная пластина избирательно протравливается жидкими или сухими химикатами (см. ниже раздел "Травление"). Оставшийся фоторезист удаляется с пластины перед последующей обработкой. Удаление производится путем применения либо жидких химических растворов в ваннах с контролируемой температурой, либо сухих химических веществ, либо с помощью плазменных устройств озонения. В таблице 83.2 показан состав жидких и сухих химических веществ. Ниже следует описание сухого химического плазменного травления, в котором применяется то же самое оборудование и принципы работы, что и при плазменном озонении.

Таблица 83.2 Материалы для удаления фоторезистов

Жидкие химические вещества

Кислоты

Серная кислота (H_2SO_4) и хромовая кислота (CrO_3)

Серная кислота (H_2SO_4) и персульфат аммиака ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$)
Серная кислота (H_2SO_4) и перекись водорода (H_2O_2)

Органические соединения

Фенолы, серная кислота, трихлорбензол, перхлорэтилен
Эфиры гликоля, этаноламин, триэтаноламин
Гидрат окиси натрия и силикаты (позитивные резисты)

Сухие химические вещества

Плазменное сжигание (удаление)

Высокочастотный источник энергии - частота 13.56 Мгц или 2450 Мгц
Газ кислородного источника (O_2)

Системы вакуумных насосов

- масляные вакуумные насосы с ловушкой с жидким азотом (старая технология)
- насосы с текучей средой инертного перфторполиэфира (более новая технология)
- сухой насос (новейшая технология)

Травление

Посредством травления удаляют слои диоксида кремния (SiO_2), металлов и поликремния, а также резисты в соответствии с желаемыми рисунками, сформированными резистом. Существует два основных вида травления: жидкостное и сухое. Чаще применяется жидкостное травление. В основе его лежит использование растворов, содержащих травители (обычно это кислотные смеси) нужной концентрации, которые вступают в химическую реакцию с материалами, подлежащими удалению. Сухое травление включает применение реактивных газов в вакуумной камере с высоким напряжением, что также позволяет удалять слои, не защищенные резистом.

Жидкостное химическое травление

Химические растворы для жидкостного травления помещаются в ванны для травления с контролируемой температурой, изготовленные из полипропилена (поли-про), огнестойкого полипропилена (FRPP) или поливинилхлорида (PVC). Ванны обычно снабжают приточно-вытяжной вентиляцией кольцевого или щелевого типа на задней стороне установки жидкостного химического травления. Через вертикальные колпаки с ламинарным потоком на верхнюю поверхность ванн травления подают отфильтрованный, свободный от посторонних частиц воздух.

В таблице 83.3 представлены химические растворы жидких травителей, в соответствии с поверхностным слоем, который подвергается травлению. Если вертикально смонтированные подающие воздух колпаки используются вместе с разбрызгивающими приспособлениями и вытяжной вентиляцией, могут создаваться области воздушной турбулентности внутри установки жидкостного химического травления. В результате может снижаться эффективность локальной вытяжной вентиляции, удаляющей летучие посторонние вещества, поступающие в воздух от ванн для травления. Главная опасность при жидкостном травлении состоит в возможности попадания концентрированных кислот на кожу. Все применяемые в жидкостном травлении кислоты могут вызывать кислотные ожоги, но особенную опасность представляет фтористоводородная (плавиковая) кислота (HF). Боль может ощущаться по прошествии длительного времени (до 24 часов, если концентрация раствора плавиковой кислоты меньше 20% и от 1 до 8 часов при 20-50% растворов), а запоздалое лечение ведет к более тяжелым ожогам (Hathaway et al. 1991).

Таблица 83.3 Жидкие химические травители

Материал, подвергаемый травлению	Травители
Кремний	
Поликристаллический кремний (Si)	Плавиковая, азотная, уксусная кислота и йод. Гидрат окиси калия. Этилендиамин/катехол. Фторид аммиака, ледяная уксусная и азотная кислота.

Диоксид кремния (SiO_2)	Травление с помощью буферного раствора (BOE) - плавиковой кислоты и фторида аммиака. BOE этиленгликоль, монометил эфир. Плавиковая и азотная кислота (P-травление).	
Нитрид кремния (Si_3N_4)	Фосфорная и плавиковая кислота	
Травление окислов при CVD осаждении или травление контактных площадок	Фторид аммиака, уксусная и плавиковая кислота	
Металлы		
Алюминий (Al)	Фосфорная, азотная, уксусная и соляная кислота. Гидрат окиси натрия, гидрат окиси калия	
Хром-никель (Cr/Ni)	Нитрат аммиака и азотная кислота Соляная и азотная кислота (царская водка)	
Золото (Au)	Соляная и азотная кислота (царская водка) Йодид калия (KI) Цианистый калий (KCN) и перекись водорода (H_2O_2) Хлорное железо (FeCl_3) и соляная кислота	
Серебро (Ag)	Нитрат железа (FeNO_3) и этиленгликоль Азотная кислота	
Соединение	Химическая формула	Стандартная концентрация %
Уксусная кислота	CH_3COOH	36
Фторид аммиака	NH_4F	40
Ледяная уксусная кислота	CH_3COOH	99/5
Соляная кислота	HCl	36
Плавиковая кислота	HF	49
Азотная кислота	HNO_3	67
Фосфорная кислота	H_3PO_4	85

Гидрат окиси калия	KOH	50 или 10
Гидрат окиси натрия	NaOH	50 или 10
Серная кислота	H ₂ SO ₄	96

Риск кислотных ожогов всегда был характерен для полупроводниковой промышленности. Тем не менее, за последние годы число случаев кислотных ожогов кожи значительно сократилось. Это произошло благодаря изменениям в технологии травления: более широкому применению сухого травления, робототехники и автоматизации, установке наливных систем для химических растворов. Снижение уровня кислотных ожогов также связано с более совершенными методами ручного труда, широким применением средств индивидуальной защиты, лучшей подготовкой персонала. Проблема требует постоянного внимания, поскольку уровень кислотных ожогов должен снижаться и дальше (Baldwin and Williams 1996).

Сухое травление

Сухое химическое травление - область повышенного интереса. Технология находит все большее применение благодаря возможности большего контроля процесса травления и снижению уровня загрязнений. Сухое химическое травление позволяет эффективно протравливать нужные слои химически реактивными газами или физической бомбардировкой.

Разработаны системы химически реактивного плазменного травления, эффективного для кремния, диоксида кремния, нитрида кремния, алюминия, тантала, танталовых соединений, хрома, вольфрама, золота и стекла. Применяются два типа реакторных систем плазменного травления: бочкообразная, или цилиндрическая система и система с параллельными пластинами, или планарная. Оба типа систем работают на одних и тех же принципах и отличаются только конфигурацией.

Плазма подобна газу. Они различаются только тем, что некоторые из атомов и молекул плазмы ионизированы и могут содержать значительное число свободных радикалов. Типичный реактор состоит из вакуумной камеры реактора, содержащей пластину, обычно сделанную из алюминия, стекла или кварца: высокочастотного источника энергии - обычно 450 КГц, 13.56 МГц и управляющего модуля для контроля времени обработки, состава реактивного газа, скорости потока газа и уровня мощности высокой частоты. Помимо этого, на одной линии с камерой реактора находится масляный форвакуумный насос (более старая технология) или сухой (более новая технология). Пластины загружают в реактор отдельно или в кассетах, с помощью насоса откачивают газ из камеры и вводят газ-реагент (обычно тетрафторид углерода). Ионизация газа создает плазму травления, которая взаимодействует с пластинами, образуя летучие вещества, откачиваемые насосом. Процесс травления поддерживается введением в камеру свежего газа-реагента. В таблице 83.4 представлены материалы, подвергаемые травлению, и газы применяющиеся для плазменного травления различных слоев.

Таблица 83.4 Газы для плазменного травления и материалы, подвергаемые травлению

Материал	Газ
Кремний	
Поликремний и кремний	CF ₄ + O ₂ , CCl ₄ или CF ₃ Cl, CF ₄ и HCl
Диоксид кремния	C ₂ F ₆ , C ₃ F ₈ , CF ₄ , C ₅ F ₁₂ , CHF ₃ , CCl ₂ F ₂ , CF ₆ , HF
Нитрид кремния	CF ₄ + Ar, CF ₄ + O ₂ , CF ₄ + H ₂
Металлы	
Алюминий	CCl ₄ или BCl ₃ + He или Ar

Хром	CCl_4
Оксид хрома	$\text{Cl} + \text{Ar}$ или $\text{CCl}_4 + \text{Ar}$
Арсенид галлия	CCl_2F_2
Ванадий	CF_4
Титан	CF_4
Тантал	CF_4
Молибден	CF_4
Вольфрам	CF_4

В настоящее время разрабатывается еще один метод травления - микроволновой, направленный по потоку. В этом методе применяется микроволновой разряд с высокой удельной мощностью для получения метастабильных атомов с большим временем жизни, которые протравливают материал почти так же, как если бы он был погружен в кислоту.

Процессы физического травления похожи на взрыв песка в том смысле, что атомы газа аргона используются для физической бомбардировки слоя, который должен быть подвергнут травлению. Вакуумная насосная система применяется для удаления смещенного материала. Реактивное ионное травление представляет собой комбинацию химического и физического сухого травления.

Процесс распыления - это процесс бомбардировки ионами и переноса энергии. Травление распылением включает систему распыления, в которой пластина, подвергаемая травлению, прикрепляется к отрицательному электроду или мишени в цепи тлеющего разряда. Материал распыляется с пластины при бомбардировке положительными ионами, обычно аргона, при этом атомы на поверхности смещаются. Питание обеспечивается высокочастотным источником с частотой 450 КГц. Для контроля давления и удаления реагентов применяется вакуумная система, находящаяся на одной линии с основной установкой.

Ионно-лучевое травление и дробление - это процесс умеренного травления, в котором используется пучок ионов с малыми энергиями. Ионно-лучевая система состоит из источника, генерирующего пучок ионов; рабочей камеры, в которой осуществляется травление или дробление и имеется зажимное приспособление для того, чтобы держать пластины в пучке ионов; вакуумной насосной системы и вспомогательных электронных приборов. Пучок ионов выводится из ионизованного газа (аргон или аргон/кислорода) или плазмы, образуемой электрическим разрядом. Разряд получают применением напряжения между прямоточным термокатодом, излучающим электроны, и цилиндром анода, расположенным на внешнем диаметре разрядной области.

Ионно-лучевое дробление выполняется в диапазоне малых энергий ионной бомбардировки, где взаимодействия происходят только на поверхности. Ионы с энергией в диапазоне от 500 до 1000 эВ бомбардируют мишень и распыляют атомы на поверхности путем разрушения связей атомов. Ионно-лучевое травление производится при несколько большей энергии ионов, что обуславливает большее смещение атомов на поверхности.

Реактивное ионное травление (RIE) представляет собой комбинацию физического распыления и химического реактивного травления при меньшем давлении. При реактивном ионном травлении используется бомбардировка ионами с целью достижения направленного травления, а также химически реактивный газ - четырехфтористый углерод (CF_4) или четыреххлористый углерод (CCl_4), который обеспечивает избирательность травления. Пластина помещается в камеру с атмосферой химически реактивного газа при низком давлении примерно 0.1

торр (1.3×10^{-4} атмосфер). Электрический разряд образует плазму реактивных "свободных радикалов" (ионов) с энергией в несколько сотен электрон-вольт. Ионы вертикально бомбардируют поверхность пластины, где они взаимодействуют, образуя летучие вещества, которые удаляют с помощью находящейся на одной линии основной установкой вакуумной системы низкого давления. В системах сухого травления для удаления остатков, накапливающихся внутри камер, иногда применяется цикл очистки. Для очистки используются такие соединения: трехфтористый азот (NF_3), гексафторэтан (C_2F_6) и октафторпропан (C_3F_8).

Эти газы, применяемые для очистки, а также многие другие, используемые при травлении, представляют наибольшую опасность для окружающей среды, остро проявившуюся в середине 90-х годов. Установлено, что высокофторированные газы оказывают значительное влияние на глобальное потепление на Земле. (Эти газы также называются фтористыми соединениями PFC). Долгое время жизни в атмосфере, опасность глобального потепления на фоне значительного роста применения фтористых соединений (NF_3 , C_2F_6 , C_3F_8 , CF_4 , трифторметана CHF_3 и гексафторида серы SF_6) поставило проблему поиска способов уменьшения выброса этих веществ в атмосферу. Выбросы фтористых соединений в атмосферу связаны с низкой эффективностью оборудования (во многих установках потребляется только от 10 до 40 % применяемого газа) и очистительных приборов. Жидкие газоочистители неэффективны при удалении PFC. Испытания на установках сгорания обнаружили их низкую разрушающую эффективность для некоторых газов, особенно четырехфтористого углерода CF_4 . Во установках сгорания C_2F_6 и C_3F_8 разлагаются до CF_4 . Кроме того, дороговизна установок, количество потребляемой ими энергии, выделение ими других газов, вызывающих глобальное потепление, и побочные продукты их сгорания, загрязняющие окружающую среду, свидетельствуют, что очистительные установки не являются эффективным методом для контроля выбросов фтористых соединений.

Вопросы более эффективного технологического оборудования, выявления и разработки более благоприятных для окружающей среды газов для сухого травления, восстановления/ вторичной переработки отработанных газов стали центральными экологическими проблемами в связи с сухим травлением, применяемым в технологии изготовления кремниевых полупроводниковых приборов.

С точки зрения гигиены труда основные проблемы связаны с вредным воздействием на персонал, работающий на камерах, насосах и другом оборудовании, в котором могут оставаться продукты реакции. Сложность установок плазменнометаллического травления и трудность характеристики неприятных запахов при техобслуживании обусловили многочисленность исследований по данной проблеме.

Продукты реакции, образующиеся в установках плазменнометаллического травления, представляют собой сложную смесь хлористых и фтористых соединений. Обслуживание установок часто состоит из коротких операций, при которых образуется сильный неприятный запах. Было обнаружено, что гексахлорэтан является основной причиной неприятного запаха в одном типе установки травления алюминия (Helb et al. 1983). В установках другого типа главную проблему представляет хлорид циана: уровень его отрицательного воздействия в 11 раз превышал допустимый предел - 0.3 ppm (Baldwin 1985). Причиной неприятного запаха также может быть хлористый водород - был отмечен максимальный уровень в 68 ppm (Baldwin, Rubin and Horowitz 1993). Дополнительную информацию по этому вопросу можно найти в работе Mueller and Kunesh (1989).

Сложность химических веществ, присутствующих в отработанных продуктах систем плазменнометаллического травления, побудила исследователей разработать экспериментальные методы исследования токсичности этих смесей (Bauer et al. 1992a). Испытание данных методов на грызунах указывает на то, что некоторые из этих химических смесей являются предполагаемыми мутагенами (Bauer et al. 1992b) и репродуктивными токсинами (Schmidt et al. 1995).

Вследствие того, что установки сухого травления работают как закрытые системы, операторы обычно не подвергаются химическому воздействию, если система закрыта. Единственным исключением может быть тот случай, когда цикл очистки более старых установок недостаточен по времени для адекватного удаления газов травителя. Имеются сведения о кратковременных раздражающих воздействиях фтористых соединений, с концентрацией ниже уровня обнаружения при открытых установках. Ситуацию можно исправить простым увеличением продолжительности цикла очистки перед открытием двери камеры травления.

Главная опасность воздействия на оператора высокочастотной энергии связана с процессами плазменного травления и озонения (Cohen 1986; Jones 1988). Как правило, утечка высокочастотной энергии может быть вызвана следующими факторами:

- неправильно подогнанными дверьми
- трещинами и отверстиями в камерах
- металлическими столами и электрическими проводами, выступающими в роли антенн при неправильном заземлении установки травления;
- отсутствием демпфирующего экрана в смотровом окошке установки травления (Jones 1988; Horovitz 1992).

Высокочастотное облучение может также произойти при техобслуживании установок травления, особенно при

снятой камере, в которой находится установка. Например, был обнаружен уровень излучения 12.9 мВ/см^2 на верхней части установки плазменного травления старой модели, когда при снятой для техобслуживания крышке (Hogovitz 1992). Фактическая утечка высокочастотного излучения на участке нахождения оператора обычно меньше $4,9 \text{ мВ/см}^2$.

Легирование

Формирование электрического перехода или границы раздела между областями p- и n- типа на монокристаллической кремниевой пластине - неотъемлемый элемент функционирования всех полупроводниковых приборов. Переходы позволяют электрическому току течь в одном направлении намного легче, чем в другом. Они обеспечивают основу функционирования диодов и транзисторов в полупроводниковых приборах. В интегральной схеме контролируемое число примесей элементов, или добавок, вводится в отдельные протравленные участки кремниевой подложки или пластины. Это может выполняться с помощью диффузии или ионной имплантации. Независимо от применяемого метода для получения полупроводниковых переходов используются одни и те же типы добавок. В таблице 83.5 представлены данные об основных компонентах, используемых для легирования, их физическом состоянии, электрическом типе (p или n) и основном методе, применяемом для получения перехода, - диффузии или ионной имплантации.

Таблица 83.5 Примеси, образующие переходы, для диффузии и ионного легирования

Элемент	Соединение	Формула	Состояние	Метод
n - тип				
Сурьма	Трехокись сурьмы.	Sb_2O_3	Твердое	Диффузия
	Треххлористая сурьма	SbCl_3	Жидкое	Диффузия
Мышьяк	Мышьяковистый ангидрид.	As_2O_3	Твердое	Диффузия
	Мышьяковистый ангидрид.	As_2O_3	Жидкое	Диффузия
	Арсин	AsH_3	Газ	Диффузия и ионное легирование
	Пентафторид мышьяка.	AsF_5	Газ	Ионное легирование
Фосфор	Фосфорный ангидрид.	P_2O_5	Твердое	Диффузия
	Фосфорный ангидрид.	P_2O_5	Жидкое	Диффузия
	Трехбромистый фосфор.	PBr_3	Жидкое	Диффузия
	Треххлористый фосфор.	PCl_3	Жидкое	Диффузия
	Хлорокись фосфора.	POCl_3	Жидкое	Диффузия
	Фосфин.	PH_3	Газ	Ионное легирование
	Пентафторид фосфора.	PF_5	Газ	Ионное легирование
			Газ	Ионное легирование
p-тип				
Бор	Нитрид бора	BN	Твердое	Диффузия
	Трехбромистый бор	BBr_3	Жидкое	Диффузия
	Борный ангидрид	B_2O_3	Твердое	Диффузия
	Борный ангидрид	B_2O_3	Жидкое	Диффузия

	Триэтилборат Тетрабромид кремния Треххлористый бор	$B(COCH_3)_3$ $SiBr_4$ BCl_3 BF_3 B_2H_6	Жидкое Жидкое Жидкое	Диффузия Диффузия Диффузия и ионное легирование
	Трифторид бора Диборан		Газ Газ	Ионное легирование Ионное легирование

Обычное химическое воздействие на операторов диффузионных печей и установок ионного легирования низкое - как правило, ниже допустимых пределов. Озабоченность вызывает вероятность высвобождения токсичных газов. В 70-е годы прогрессивные изготовители полупроводниковых приборов начали устанавливать первые системы непрерывного контроля воспламеняющихся и токсичных газов. Главной целью было обнаружение случайных выбросов наиболее токсичных газов с порогом чувствительности выше допустимых пределов (например, арсин и диборан).

Большинство промышленных систем контроля воздуха в полупроводниковой промышленности применяется для обнаружения утечек воспламеняющихся и токсичных газов. Тем не менее, на некоторых предприятиях используются системы непрерывного контроля для:

- анализа выхода через вытяжную трубу;
- количественного определения концентраций летучих химических веществ в воздухе;
- распознавания и количественного определения неприятного запаха в производственных помещениях.

Для этого типа контроля в полупроводниковой промышленности в основном применяются колориметрические газовые детекторы (например, MDA устройство для непрерывного обнаружения газа), электрохимические сенсорные устройства и инфракрасные детекторы преобразования Фурье (например, Телос ACM) (Baldwin and Williams 1966).

Диффузия

Термин диффузия применяется для описания процесса перемещения примесей из областей высокой концентрации на выходном конце диффузионной печи в области низкой концентрации в кремниевой пластине. Диффузия представляет собой наиболее признанный метод образования переходов.

Этот метод заключается в том, что пластина подвергается воздействию высокой температуры в диффузионной печи. В печи содержатся необходимые добавки (примеси) в парообразном состоянии, и в результате реакций в пластине формируются области с примесной электрической активностью р- или n-типа. Наиболее часто применяемыми примесями являются бор для р-типа и фосфор (P), мышьяк (As) или сурьма (Sb) для n-типа (см. таблицу 83.5).

Обычно пластины укладывают в кварцевый носитель или лодочку и помещают в диффузионную печь. В диффузионной печи имеется длинная кварцевая труба и прибор для точного контроля температуры. Температурный контроль очень важен, поскольку скорость диффузии различных примесей в кремний в основном зависит от температуры. Диапазон применяемых температур колеблется от 900 до 1300°C в зависимости от конкретной примеси и технологии.

Нагревание кремниевой пластины при высокой температуре позволяет атомам примеси медленно диффундировать в кристаллическую структуру. Примеси перемещаются более медленно через диоксид кремния, чем через сам кремний, позволяя тонкой окисной пленке служить в качестве маски и, следовательно, разрешая примесям проникать в кремний только там, где он не защищен. После накопления достаточного количества примесей пластины удаляются из печи, и диффузия завершается.

Для обеспечения максимального контроля в большинстве случаев диффузия проводится в два этапа: предварительного осаждения и загонки. Предварительное осаждение, или диффузия с постоянным источником - это первый этап, который осуществляется в печи, где температура выбирается с целью достижения наилучшего контроля над количеством примесей. Температура определяет растворимость примеси. После сравнительно короткого этапа предварительного осаждения пластину физически перемещают в другую печь, обычно с более высокой температурой, и с помощью второй тепловой обработки примесь загоняется на желаемую глубину диффузии в решетке кремниевой пластины.

Источники примесей, используемые на этапе предварительного осаждения, могут находиться в трех химических состояниях: газообразном, жидком и твердом. В таблице 83.5 представлены различные типы примесей для диффузии по их физическому состоянию.

Газы обычно подаются из баллонов со сжатым газом с контролем давления, регуляторами, запорными клапанами

и различными приспособлениями для продувки и пропускаются через металлическую трубу малого диаметра.

Жидкости, как правило, разливаются из барботеров, которые насыщают поток газа-носителя (обычно это азот) парами жидких примесей, как это описано в разделе о жидкостном окислении. Другой тип разливания жидкостей заключается в применении центрифуги для распределения примеси. В этом случае твердая примесь помещается в раствор с жидким носителем-растворителем, затем раствор наносится на пластину и равномерно распределяется с помощью центрифуги, что аналогично нанесению фоторезистов.

Источник твердых примесей может быть в виде пластины нитрида бора. Пластины укладывают между двумя кремниевыми пластинами, подвергаемыми легированию. Затем их помещают в диффузионную печь. Кроме того, твердые примеси в виде порошка или гранул могут помещаться в камеру кварцевой установки (трехокись мышьяка), вручную выгружаться в выходной конец диффузионной трубы или загружаться в отдельную печь, которая находится на одной линии с основной диффузионной печью.

При отсутствии правильного контроля во время очистки печи для осаждения (Wade et al. 1981) и во время очистки камер источников для установок ионного легирования (MacCarthy 1985; Baldwin, King and Scarpace 1988) в воздухе было зафиксировано содержание мышьяка более 0.01 мг/м^3 . Это произошло из-за несоблюдения мер для ограничения количества пыли в воздухе. Когда остатки материалов увлажняли во время очистки, выделения вредных веществ были намного ниже допустимых пределов.

В более старых диффузионных технологиях существует риск во время снятия, очистки и установки труб печей. Факторы риска включают вероятность порезов разбитыми кварцевыми принадлежностями и кислотных ожогов во время ручной очистки. Новые технологии уменьшают риск благодаря очистке трубы на месте, что дает возможность исключить многие ручные операции.

Операторы диффузионных печей в чистых помещениях подвергаются наибольшему воздействию электромагнитных полей чрезвычайно низких частот (например, от 50 до 60 герц). В литературе сообщалось о средних воздействиях выше 0.5 микротесл (5 миллигаусс) во время непосредственной работы печей (Crawford et al., 1993). В исследовании также отмечалось, что персонал, работающий в чистом помещении в непосредственной близости от диффузионной печи, подвергался значительно большему воздействию, чем другие работники в том же помещении. Этот вывод согласуется с данными Rosenthal and Abdollahzadeh (1991), обнаруживших в непосредственной близости от диффузионных печей (5 см или 2 дюйма) уровень воздействия 10 - 15 микротесл, причем окружающие поля ослабевали с увеличением расстояния. Возле другого оборудования в чистом помещении даже на расстоянии 6 футов от диффузионных печей индукция была от 1.2 до 2 микротесл (Crawford et al., 1993). Этот уровень эмиссии намного ниже допустимых пределов, установленных Всемирной Организацией Здравоохранения и отдельными странами.

Ионное легирование

Ионное легирование - новый метод введения примесей при комнатной температуре в кремниевые пластины для образования переходов. Ионизированные атомы примесей (т.е. атомы, лишенные одного и более электронов) ускоряются до высокой энергии путем пропускания их через разность потенциалов в десятки тысяч вольт. В конце пути атомы бомбардируют пластину и внедряются на разную глубину в зависимости от их массы и энергии. Так же, как при обычной диффузии, окисный слой или фоторезистивная маска избирательно маскируют пластину от ионов. Типичная система ионного легирования состоит из источника ионов (источник газообразных примесей, обычно в небольших бутылках), анализатора, ускорителя, фокусирующих линз, ловушки для нейтрального пучка, камеры сканирующего устройства и вакуумной системы (обычно состоящей из трех отдельных установок, находящихся на одной линии форвакуумных и масляных диффузионных насосов). Поток электронов получают от горячего катода с помощью сопротивления, дугового разряда или электронного луча холодного катода.

Обычно после ионного легирования выполняется этап высокотемпературного отжига при температуре от 900 до 1000°C . Это отжиг, выполняемый с помощью лазерного луча, или импульсный отжиг с источником электронного пучка. Отжиг позволяет уменьшить число дефектов регулярной кристаллической решетки на внешней поверхности легированной пластины, вызванных бомбардировкой ионами примесей. С созданием безопасной системы подачи цилиндров с трехфтористым бором, фосфином и арсином, применяемых в установках ионного легирования, вероятность катастрофических высвобождений этих газов сильно уменьшилась. Небольшие газовые баллоны наполняют соединением, в котором арсин, фосфин и трехфтористый бор адсорбируются. Газы вытягивают из баллонов вакуумом.

Установки ионного легирования представляют собой один из самых значительных факторов электрической опасности в полупроводниковой промышленности. Даже после отключения питания сохраняется вероятность электрического удара, поэтому перед работой внутри установки эту вероятность нужно исключить. Необходимо внимательно изучить операции техобслуживания и факторы риска нового оборудования, особенно установок ионного легирования.

При обслуживании низкотемпературного адсорбционного насоса установки ионного легирования было обнаружено отрицательное воздействие гидридных газов (вероятно, смеси арсина и фосфина) в 60 ppb (Baldwin, Rubin and Horowitz 1993). Кроме того, высокие концентрации арсина и фосфина могут выбрасываться в воздух загрязненными деталями установки ионного легирования, которые снимаются во время предварительного осмотра

(Flipp, Hunsaker and Herring 1992).

Переносные пылесосы с высокоэффективными фильтрами для рассеивания частиц (HEPA) используются для очистки загрязненных мышьяком рабочих поверхностей на участках ионного легирования. Вредные выбросы свыше 1000 мкг/м^3 были зарегистрированы, когда HEPA пылесосы неправильно очищали. Когда HEPA пылесосы опорожняются в рабочем помещении, они также могут распространять характерный неприятный запах гидридов, связанный с очисткой лучевой линии установки ионного легирования (Baldwin, Rubin and Horowitz 1993).

Данных о серьезных утечках газов во время замены масла в вакуумных насосах нет. Возможно, потому что они представляют собой закрытые системы. Отсутствие данных может также быть связано с низким уровнем выделения гидридов из отработанного масла.

Было проведено исследование: нагревалось 700 мл отработанного масла форвакуумного насоса из установки ионного легирования, в которой использовался арсин и фосфин. Гидриды в воздухе около насоса выявлялись только при температуре масла в насосе выше 70°C (Baldwin, King and Scarpace 1988). Так как рабочая температура для механических форвакуумных насосов должна находиться в диапазоне от 60 до 80°C , исследование не выявило значительного риска.

При ионном легировании в соответствии с технологией образуются рентгеновские лучи. Большинство установок ионного легирования экранируется (вокруг источника ионов и примыкающих дверей для доступа в установку помещаются свинцовые пластины) для поддержания уровня излучения ниже 2.5 микросвертс (0.25 миллибэр) в час (Maletskos and Hanley 1993). Тем не менее, в старых моделях установок на поверхности отмечались утечки рентгеновских лучей выше 20 микросвертс в час ($\mu\text{Sv/час}$) (Baldwin, King and Scarpace 1988). Этот уровень был снижен до $2.5 \mu\text{Sv/час}$ и меньше после установки дополнительных свинцовых пластин. В другой установке ионного легирования старой модели была обнаружена утечка рентгеновских лучей около двери доступа (до $15 \mu\text{Sv/час}$) и смотрового окна (до $3 \mu\text{Sv/час}$). Были установлены дополнительные свинцовые экраны, чтобы ослабить возможное облучение (Baldwin, Rubin and Horowitz 1993).

Кроме рентгеновского облучения от установок ионного легирования, существует вероятность образования нейтронов, при работе установки на уровне 8 миллионов электрон-вольт (Мэв) и выше или если в качестве источника ионов применялся газ дейтерий (Rogers 1994). Однако такие установки обычно работают при напряжении намного ниже 8 Мэв, а дейтерий обычно не применяется в промышленности (Baldwin and Williams 1996).

Химическое паровое осаждение

Химическое паровое осаждение (CVD) - это процесс наращивания слоя дополнительного материала на поверхность кремниевой пластины. Как правило, CVD установки химического парового осаждения работают как закрытые системы, благодаря чему химическое воздействие на операторов отсутствует или является незначительным. Тем не менее, кратковременное воздействие HCl свыше 5ppm (ppm-одна миллионная часть) может оказываться при очистке некоторых газоочистителей (Baldwin and Stewart 1989). Применяются два вида CVD осаждения: эпитаксиальное и неэпитаксиальное.

Эпитаксиальное химическое паровое осаждение

Эпитаксиальное выращивание - это процесс упорядоченного осаждения тонкого монокристаллического слоя материала, который повторяет кристаллическую структуру подложки. Этот слой служит матрицей для изготовления полупроводниковых компонентов в последующих операциях диффузии. В большинстве случаев эпитаксиальные пленки выращиваются на подложках из того же материала, например, кремний на кремнии. Этот процесс называется гомоэпитаксией. Но могут применяться и разные материалы с близкой кристаллической структурой, например, пленка кремния на сапфировой подложке. Такой процесс называется гетероэпитаксиальным наращиванием.

Для выращивания эпитаксиальных слоев применяются три основных метода: паровая эпитаксия, жидкостная эпитаксия, молекулярно-лучевая эпитаксия. Жидкостная и молекулярно-лучевая эпитаксия используются главным образом при изготовлении полупроводниковых приборов на соединениях типа AIII BV (например, арсенид-галлиевых). Эти виды эпитаксии рассматриваются в статье "Производство полупроводниковых приборов на соединениях типа AIII BV".

Паровая эпитаксия применяется для выращивания пленки посредством CVD осаждения молекул при температуре от 900 до

1300°C . Пары, содержащие кремний и контролируемое количество примесей p- или n- типа в газе - носителе (обычно водород), пропускаются над нагретыми пластинами, чтобы осадить кремниевые слои с введенными примесями. Этот процесс обычно осуществляется при атмосферном давлении.

В таблице 83.6 представлены четыре основных типа паровой эпитаксии, параметры и происходящие химические реакции. Стандартный эпитаксиальный процесс обычно включает следующие операции:

Таблица 83.6 Основные типы парофазной эпитаксии кремния

Параметры	
Давление	Атмосфера
Температура	900-1300° C
Источники кремния	Силан (SiH_4), тетрахлорид кремния (SiCl_4), трихлорсилан (SiHCl_3) и дихлорсилан (SiH_2Cl_2)
Газообразные примеси	Арсин (AsH_3), фосфин (PH_3), диборан (B_2H_6)
Концентрация газообразных примесей	≈ 100 ppm [ppm-одна часть на миллион частей]
Газ для травления	Хлорид водорода (HCl)
Концентрация газа для травления	$\approx 1-4\%$
Газы-носители	Водород (H_2), азот (N_2)
Источник нагрева	Высокочастотный (RF) или инфракрасный (IR)
Типы парофазной эпитаксии	Химические реакции
Взаимодействие водорода с тетрахлоридом кремния (1150-1300° C)	$\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{Si} + 4\text{HCl}$
Пиролитическое осаждение силана (1000-1100° C)	$\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + 2\text{H}_2$
Взаимодействие водорода с трихлорсиланом	$\text{SiHCl}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{Si} + 3\text{HCl}$
Разложение дихлорсилана	$\text{SiH}_2\text{Cl}_2 \rightarrow \text{Si} + 2\text{HCl}$

· очистка подложек: физическая очистка, обезжиривание с помощью растворителей, очистка с помощью кислот (серная, азотная и соляная, и плавиковая - это обычная последовательность) и сушка;

· загрузка пластин;

- нагревание: продувка азотом и нагревание приблизительно до 500°C , затем применяется газообразный водород, и высокочастотные генераторы нагревают пластины;
- травление хлоридом водорода (HCl): в камеру реактора наливается HCl с концентрацией от 1 до 4 %;
- осаждение: источник кремния и газы с примесями дозируются и осаждаются на поверхность пластины;
- охлаждение : газообразный водород вновь заменяется азотом при 500°C ;
- выгрузка.

Неэпитаксиальное химическое парофазное осаждение

Тогда как эпитаксиальное выращивание представляет собой специфический вид CVD осаждения, при котором осаждаемый слой имеет ту же самую кристаллографическую ориентацию, что и подложка, неэпитаксиальное CVD осаждение - это образование устойчивого соединения на нагретой подложке при термической реакции или разложении газообразных соединений.

CVD может использоваться для осаждения многих материалов, но в кремниевой полупроводниковой технологии, помимо эпитаксиального кремния, применяются также другие материалы:

- поликристаллический кремний (поли Si);
- диоксид кремния (SiO_2 - как легированный, так и нелегированный; p- легированное стекло);
- нитрид кремния (Si_3N_4).

Каждый из этих материалов может быть осажден разными способами, и каждый из них имеет много применений. В таблице 83.7 представлены три основные категории CVD с использованием рабочей температуры как механизма дифференциации. Почти во всех типах CVD установок имеются следующие компоненты:

- реакционная камера;
- секция контроля газа;
- секция программного управления и контроля времени;
- источник нагрева для подложек;
- система манипулирования потоком.

Таблица 83.7 Основные типы химического парофазного осаждения кремния

Параметры			
Давление	Атмосферное (APCVD) или низкое давление (LPCVD).		
Температура	500-1100° C		
Источники кремния и нитридов	Силан (SiH_4),тетрахлорид кремния(SiCl_4), аммиак (NH_3), закись азота (N_2O).		
Источники примесей	Арсин (AsH_3), фосфин (PH_3), диборан (B_2H_6).		
Газы-носители	Азот (N_2), водород (H_2).		
Источники нагрева	Система с холодной стеной - высокочастотный (RF) или инфракрасный (IR). Система с горячей стеной - тепловой сопротивление		
CVD тип	Реакция	Газ-носитель	Температура

Средняя температура (≈ <600-1100° C)			
Нитрид кремния (Si ₃ N ₄)	3SiH ₄ +4NH ₃ > Si ₃ N ₄ +12H ₂	H ₂	900-1100° C
Поликремний (поли Si)	SiH ₄ +Heat > Si + 2H ₂	H ₂ N ₂	850-1000° C 600-700° C
Диоксид кремния (SiO ₂)	2H ₂ +SiCl ₄ +CO ₂ > SiO ₂ +4HCl SiH ₄ +4CO ₂ + > SiO ₂ +4CO + 2H ₂ O SiH ₄ +CO+ > SiO ₂ +2H ₂ O	N ₂ H ₂ H ₂	500- 900° C 800-1000° C 600- 900° C
Низкая температура (≈ < 600° C) Силокс, Пирокс, Вапокс и Нитрокс**			
Диоксид кремния (SiO ₂) или SiO ₂ с примесями р- типа			
Силокс	SiH ₄ +2O ₂ +Dopant > SiO ₂ +2H ₂ O	N ₂	200- 500° C
Пирокс	SiH ₄ +2O ₂ +Dopant > SiO ₂ +2H ₂ O	N ₂	< 600° C
Вапокс	SiH ₄ +2O ₂ +Dopant > SiO ₂ +2H ₂ O	N ₂	< 600° C
Нитрид кремния (Si ₃ N ₄)			
Нитрокс	3SiH ₄ +4NH ₃ (илиN ₂ O ⁺) > Si ₃ N ₄ +12H ₂	N ₂	600- 700° C
Низкая температура с плазменным усилением (пассивация)(< 600° C)			
Применение высокочастотного (RF)			

или реактивного распыления			
Диоксид кремния	$\text{SiH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$		
Нитрид кремния	$3\text{SiH}_4 + 4\text{NH}_3 \text{ (или } \text{N}_2\text{O}^*) \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 12\text{H}_2$		

* Примечание: реакции стехиометрически не уравновешены

** торговые марки для CVD реакторных систем.

По существу CVD процесс устанавливает подачу контролируемого количества газообразных источников кремния или нитрида вместе с газами-носителями азотом и/или водородом и газом с примесями для химической реакции в камере реактора. Тепло подается для обеспечения необходимой энергии для химической реакции в дополнение к контролю поверхностных температур реактора и пластин. После завершения реакции непрореагировавший газ источника и газ-носитель вытягиваются через систему манипулирования потоком и выпускаются в атмосферу.

Пассивация - это функциональный тип CVD осаждения. Она включает выращивание защитного окисного слоя на поверхности кремниевой пластины, обычно как последний этап в процессе изготовления. Этот слой обеспечивает электрическую устойчивость путем изоляции поверхности интегральной схемы от электрических и химических воздействий из окружающей среды.

Металлизация

После изготовления приборов на кремниевой подложке они должны быть соединены вместе для выполнения схемных функций. Этот процесс называется металлизацией. Металлизация обеспечивает средство разводки или создание межэлементных соединений самых верхних слоев интегральных схем посредством осаждения сложных рисунков проводящих материалов, которые проводят электрическую энергию в схемах.

Технология металлизации дифференцируется в зависимости от размера и толщины слоев металлов и других осаждаемых материалов:

- тонкие пленки - толщина приблизительно 1 микрон и меньше;
- толстые пленки - толщина 10 микрон и выше;
- гальванические покрытия - толщина варьируется от тонких до толстых, но, как правило, это толстые пленки.

Наиболее часто для кремниевой полупроводниковой металлизации применяются следующие металлы: алюминий, никель, хром или сплав, называемый нихромом, золото, германий, медь, серебро, титан, вольфрам, платина и тантал.

Тонкие или толстые пленки могут также испаряться или осаждаться на различных керамических или стеклянных подложках. Вот некоторые примеры таких подложек: корунд (96% Al_2O_3), окись бериллия, боросиликатное стекло, стеклокерамика (пирокерам) и кварц (SiO_2).

Тонкие пленки

Металлизация тонких пленок часто осуществляется с применением методов высоковакуумного или частично вакуумного осаждения или испарения. Основные типы высоковакуумного испарения: электронно-лучевое, импульсное и резистивное. Частично вакуумное осаждение производится преимущественно распылением.

Для выполнения вакуумной металлизации тонких пленок система должна состоять из следующих базовых компонентов:

- камера, которая может обезгаживаться для обеспечения достаточного вакуума для осаждения;
- вакуумный насос (или насосы) для уменьшения содержания в камере газов из окружающей среды;
- приборы для контроля уровня вакуума и других параметров.

Метод осаждения или испарения слоев металлизующего материала

В электронно-лучевом испарении, часто называемом Е-лучевым, используется сфокусированный пучок электронов для нагревания материала металлизации. Высокоинтенсивный пучок электронов генерируется тем же способом, который применяется в телевизионных кинескопах. Поток электронов ускоряется через электрическое поле от 5 до 10 kV и фокусируется на материале, который нужно выпарить. Сфокусированный пучок электронов расплавляет материал, находящийся в блоке с водяным охлаждением с большим углублением, называемым

очагом. Расплавленный материал затем испаряется в вакуумной камере и конденсируется на холодных пластинах, а также на всей поверхности камеры. После этого выполняются стандартные операции нанесения фоторезиста, экспонирования, проявления и жидкостного или сухого травления для получения сложной электрической схемы с металлизацией.

Импульсное испарение - ещё один метод осаждения тонких металлических пленок. Данный метод применяется, когда смесь двух материалов (сплавов) должна испаряться одновременно. Примерами таких пленок, состоящих из двух компонентов, являются: никель/хром (нихром), хром /моноокись кремния (SiO) и алюминиевый кремний.

При импульсном испарении керамический стержень нагревается с помощью теплового сопротивления и непрерывно подпитываемой катушки проволоки; поток гранул или вибрационно распределенного порошка приводится в контакт с горячим катодом или стержнем. Испаряемые металлы затем покрывают поверхность внутренней камеры и пластины.

Резистивное испарение (также известное как катодное испарение) - это наиболее простой и наименее дорогой тип охлаждения. Испарение происходит путем постепенного увеличения тока, текущего через катод, чтобы сначала расплавить петли материала, который будет испаряться, покрывая катод. После того, как катод покрыт, ток через него увеличивается до тех пор, пока не произойдет испарение. Основным преимуществом резистивного испарения является большое разнообразие материалов, которые могут быть испарены.

Работа по обслуживанию иногда проводится на внутренней поверхности камер осаждения системы электронно-лучевого испарения, называемых колпаками. Когда техники, занимающиеся обслуживанием, засовывают свои головы внутрь этих колпаков, они могут подвергнуться значительному воздействию химических веществ. Удаление остатков металлов, оседающих на внутренней поверхности колпаков, могут привести к серьезному воздействию. Например, при удалении из испарителя остатков используемого для осаждения серебра было зарегистрировано воздействие на техников серебра, намного превышающее допустимые пределы содержания его в воздухе (Болдуин и Стюарт 1989).

Очистка остатков материалов на колпаках органическими очищающими растворителями может также привести к сильному воздействию растворителей. Во время очистки такого типа было зафиксировано воздействие метанола свыше 250 ppm. Воздействие на персонал можно исключить посредством использования вместо метанола воды в качестве растворителя (Baldwin and Stewart 1989).

Процесс осаждения распылением производится в атмосфере газа низкого давления или частичного вакуума с использованием либо постоянного электрического тока (DC, или катодное распыление) либо высокочастотных (RF) напряжений в качестве источника высокой энергии. При распылении ионы инертного газа аргона вводятся в вакуумную камеру после достижения нужного уровня вакуума с помощью форвакуумного насоса. Электрическое поле создается подачей высокого напряжения, обычно 5000 V, между двумя противоположно заряженными пластинами. Разряд высокой энергии ионизирует атомы газа аргона и заставляет их двигаться и ускоряться в направлении одной из пластин в камере, которая называется мишенью. Когда ионы аргона бомбардируют мишень из осаждаемого материала, они выбивают или распыляют эти атомы или молекулы. Выбитые атомы материала металлизации затем осаждаются тонкой пленкой на кремниевых подложках, которые повернуты к мишени.

Обнаружено, что во многих старых установках распыления высокочастотные утечки с боковых и задних сторон превышали допустимые пределы в промышленности (Baldwin and Stewart 1989). Большинство утечек вызвано трещинами в корпусах из-за частого снятия с панелей. В новых моделях прежних изготовителей конструкция панелей с проволочными сетками вдоль швов позволяет предотвращать серьезные утечки. Старые распылительные установки могут модифицироваться с помощью проволочных сеток или, в качестве альтернативы, применяется медная лента для покрытия швов с целью уменьшения утечек.

Толстые пленки

Структура и размер большинства толстых пленок несовместимы с металлизацией кремниевых интегральных схем, в основном из-за ограничений размеров. Толстые пленки применяются главным образом для металлизации гибридных электронных структур, таких как структуры, используемые при изготовлении жидкокристаллических индикаторов LCD.

Основным методом нанесения толстых пленок является процесс шелкографии. Обычно для толстых пленок применяются следующие материалы: палладий, серебро, двуокись титана со стеклом, золото-платина со стеклом, двуокись титана с серебром-стеклом.

Резистивные толстые пленки обычно осаждаются и наносятся на керамическую подложку с использованием метода шелкографии. Металлокерамика (кермет) - это тип резистивных толстых пленок, состоящих из взвеси частиц проводящего металла на керамической матрице с органической смолой в качестве наполнителя. Типичные металлокерамические структуры состоят из хрома, серебра или окиси свинца на матрице из монооксида или двуоксида кремния.

Химическое осаждение

При нанесении металлических пленок на полупроводниковые подложки применяются два основных метода осаждения: электролитическое с применением электрического тока и осаждение без применения электрического

тока. Электролитическое осаждение производится в электролитических ваннах, где подложка, на которую должно быть нанесено покрытие, помещается у катода, или отрицательно заряженной клеммы и погружается в электролитический раствор. Электрод, который выполнен из материала осаждаемой пленки, служит анодом (положительно заряженной клеммой). При пропускании постоянного тока через раствор положительно заряженные ионы металла, растворяющиеся в анодном растворе, мигрируют и осаждаются на катоде (подложке). Этот метод осаждения применяется при образовании проводящих пленок из золота или меди.

При осаждении без применения электрического тока одновременное восстановление и окисление осаждаемого металла используется для образования свободных атомов и молекул металлов. Поскольку для этого метода не требуется электрическая проводимость во время осаждения, он может использоваться с подложками изолирующего типа. Никель, медь и золото - это металлы, которые наиболее часто осаждаются таким способом.

Сплавление и отжиг

После того, как металлизированные межсоединения осажжены и протравлены, можно перейти к заключительному этапу сплавления и отжига. Сплавление заключается в помещении металлизированных подложек, обычно с алюминием, в низкотемпературную диффузионную печь, чтобы обеспечить контакт с низким сопротивлением между металлом алюминия и кремниевой подложкой. В заключение на этапе сплавления либо сразу после него пластины часто подвергаются воздействию газовой смеси, содержащей водород, в диффузионной печи при t от 400 до 500°С. Отжиг предназначен для оптимизации и стабилизации характеристик прибора посредством соединения водорода с несвязанными атомами на или около границы раздела кремний-диоксид кремния.

Притирание и металлизация задней стороны пластины

Существует также дополнительный (необязательный) этап металлизации. Он заключается в том, что задняя сторона пластины может быть притерта или заземлена с помощью жидкого абразивного раствора и давления. Металл, например золото, осаждается на задней стороне пластины путем распыления. Это облегчает прикрепление отдельного кристалла к корпусу на этапе заключительной сборки.

Сборка и испытания

После изготовления и металлизации пластины с интегральными схемами необходимо провести сборку [монтаж] корпуса, присоединение выводов, герметизацию и испытания схем. Как правило, эти операции выполняются на предприятиях, сосредоточенных в Южно-Азиатском регионе, где рабочая сила намного дешевле. Кроме того, требования к вентиляции в ходе технологического процесса и концентрации посторонних частиц в воздухе при таких операциях, как правило, отличаются от требований к чистым помещениям. Заключительные этапы производственного процесса включают пайку, обезжиривание, испытание с помощью химических и радиационных источников, подстройку и маркировку с помощью лазеров.

Пайка при изготовлении полупроводниковых приборов, как правило, не связана с воздействием свинца. Для предотвращения термического повреждения интегральной схемы температура припоя поддерживается ниже температуры, при которой может произойти образование значительных испарений от расплавленного свинца (430°C). Тем не менее, очистка оборудования для пайки путем обдирки или очистки щетками остатков, содержащих свинец, может привести к воздействию свинца свыше $50\text{ }\mu\text{г}/\text{м}^3$ (Baldwin and Stewart 1989). Более того, воздействие свинца в $200\text{ }\mu\text{г}/\text{м}^3$ происходит при неправильном удалении шлака во время операций пайки волной (Baldwin and Williams 1996).

Пайка связана с растущей озабоченностью случаями раздражения респираторной системы и астматических проявлений под воздействием продуктов пиролиза паяльных флюсов. Особенно это проявляется при ручной пайке или исправлении небольших дефектов, когда по какой-либо причине локальная вытяжная вентиляция не применяется (в отличие от пайки волной, которые в последние десятилетия обычно проводятся в вытяжных шкафах). (Goh and Ng1987). Более подробную информацию по этому вопросу можно найти в статье [Монтаж печатных плат и сборка компьютеров](#).

Так как канифоль в паяльном флюсе является сенсibilизатором, ее испарения должны быть снижены до минимума, независимо от результатов анализа воздуха. Новые устройства для пайки должны иметь локальную вытяжную вентиляцию, особенно когда пайку требуется производить в течение продолжительного периода времени (например, свыше двух часов).

При ручной пайке испарения поднимаются вертикально по тепловым потокам, входя в зону дыхания работника, когда он находится в наклоненном положении над предметом пайки. Контроль обычно достигается средствами эффективной локальной вытяжной вентиляции малого объема и высокой скорости на конце паяльника.

Приборы, которые возвращают отфильтрованный воздух в рабочее помещение, в том случае, если эффективность фильтрации неадекватна, могут вызвать вторичное загрязнение воздуха, которое может оказать вредное воздействие на других людей в рабочем помещении, не занимающихся пайкой. Отфильтрованный воздух не должен возвращаться в рабочее помещение, если объем выполняемой пайки большой и если в комнате нет хорошей общей вентиляции.

Сортировка и испытание схем на пластине

После того, как изготовление пластины закончено, каждая готовая пластина подвергается сортировке, причем проводятся испытания функциональной способности каждой интегральной схемы и измеряются её электрические параметры. Испытания проводятся с помощью управляемых компьютером зондовых пробников, конструкция которых позволяет установить контакт со всеми контактными площадками схем. Одна пластина может содержать от ста до многих сотен отдельных матриц, или кристаллов, подлежащих испытанию. После завершения испытаний кристаллы физически маркируются с помощью автоматически разливаемой однокомпонентной эпоксидной смолы. Красным и синим цветом помечаются кристаллы, которые не отвечают требованиям электрических спецификаций. После скрайбирования они отбраковываются.

Разделение пластин на кристаллы

После того, как компоненты или схемы на пластине испытаны, промаркированы и отсортированы, пластины должны быть физически разделены на отдельные кристаллы. Разработан ряд методов разделения пластин на кристаллы: скрайбирование с помощью алмазного резца, скрайбирование с помощью лазерного луча и распиливание с помощью алмазного диска.

Скрайбирование с помощью алмазного резца - это самый старый из применяемых методов. Он заключается в том, что скрайбирующий тонкий алмазный резец движется по поверхности пластины вдоль линии скрайбирования или "улицы", разделяющей отдельные кристаллы на поверхности пластины, и наносит на ней тонкие царапины. Вызванный скрайбированием дефект в кристаллической структуре позволяет сгибая разломить пластину по линии скрайбирования.

Скрайбирование с помощью лазерного луча - сравнительно новый метод разделения пластин на кристаллы. Лазерный луч генерируется импульсным неодим-иттриевым лазером высокой мощности. Он позволяет делать глубокие канавки в кремниевой пластине вдоль линий скрайбирования. Канавки служат линиями, по которым пластина разламывается.

При разделении пластин также широко применяется метод жидкого распиливания, т.е. резка подложек по линиям скрайбирования с помощью высокоскоростной циркулярной алмазной пилы. При этом можно либо частично надрезать (разметить), либо полностью разделить (разрезать) кремниевую подложку на кристаллы. При распиливании образуется жидкая суспензия материала, удаляемого с линий скрайбирования.

Монтаж кристаллов в корпусах и присоединение выводов

Отдельная матрица или кристалл должны быть прикреплены к корпусу-носителю и металлической рамке с выводами. Носители, как правило, изготавливаются из изоляционного материала: керамики или пластмассы.

Материалы керамических носителей обычно изготавливаются из корунда (Al_2O_3), но могут также состоять из окиси бериллия (BeO) или стеатита (MgO -

SiO_2). Материалы пластмассовых носителей представляют собой термопластическую или термореактивную пластмассу.

Установка отдельного кристалла в корпус обычно осуществляется с помощью одного из трех типов присоединения: эвтектического, с помощью преформы и эпоксидного. При эвтектическом присоединении кристалла применяется твердый припой, который представляет собой эвтектический сплав, например, сплав золото-кремний. Слой металла (золота) предварительно осаждается на обратную сторону кристалла. Соединение образуется путем нагревания корпуса выше эвтектической температуры (370°C для сплава золото-кремний) и помещения кристалла на него между кристаллом и корпусом.

Соединение с помощью преформы заключается в использовании небольшого куска материала со специальным составом, который способен прилипать как к кристаллу, так и к корпусу. Преформа помещается на участок корпуса, к которому прикрепляется кристалл, и расплавляется. Затем прикрепляется кристалл. После этого корпус охлаждается.

Эпоксидное соединение предполагает применение эпоксидного клея для прикрепления кристалла к корпусу. Капля эпоксидного клея наносится на корпус и кристалл, помещенный на его верхней части. Возможно, корпус понадобится подвергнуть термической обработке при высокой температуре, чтобы эпоксидная смола хорошо затвердела.

После монтажа кристалла в корпусе необходимо соединить контактные площадки кристалла с выводами корпуса. Соединение золотых и алюминиевых проволочных выводов с контактными площадками на кремниевых кристаллах осуществляется с использованием методов термокомпрессии, ультразвуковой и термозвуковой сварки.

Метод термокомпрессии часто применяется для золотых проволочек. Вывод соединяется с контактной площадкой без применения припоя и без плавления, только путем одновременного воздействия повышенной температуры и давления. Корпус при этом нагревается приблизительно до 300°C . Высокая температура при термокомпрессии увеличивает пластичность металла в момент соприкосновения электрода с контактной площадкой. Применяются два основных метода термокомпрессии: термокомпрессия с образованием шарика и термокомпрессия клином. При термокомпрессии с образованием шарика (только с золотой проволочкой) проволочка подается через капиллярную трубочку, сжимает её, а затем пламя водородной горелки расплавляет проволочку. Кроме того,

образуется новый шарик на конце проволоочки для следующего цикла соединения. Термокомпрессия клином заключается в применении клиновидного электрода и микроскопа для точного размещения кремниевого кристалла и корпуса над контактной площадкой. Процесс осуществляется в атмосфере инертного газа.

При ультразвуковом методе присоединения выводов используется импульс ультразвуковой высокочастотной энергии, который пластически деформирует поверхность раздела между проволочкой и контактной площадкой, образуя большую поверхность контакта. При этом ультразвук также удаляет окисные пленки и образует прочную межмолекулярную связь между свариваемыми деталями. Ультразвуковое соединение выполняется главным образом с алюминиевыми проволочками и часто оказывается предпочтительней термокомпрессии, так как в этом случае соединение образуется без нагрева кристалла. Термозвуковой метод присоединения выводов - недавнее технологическое новшество в присоединении золотых проволочек. Используется сочетание ультразвуковой и тепловой энергии и требуется меньше нагревания, чем при термокомпрессии.

Герметизация

Главная цель герметизации - поместить интегральную схему в корпус, соответствующий электрическим, термическим, химическим и физическим требованиям для конкретной области применения интегральной схемы. Наиболее широко применяются следующие типы корпусов: с радиальными выводами, планарные (с выводами в плоскости корпуса) и двойные на линии (DIP). Корпуса с радиальными выводами изготавливают в основном из ковара, который представляет собой сплав железа, никеля и кобальта со стеклянными спаем и выводами из ковара. В планарных корпусах применяются рамки с металлическими выводами, обычно изготовленными из алюминиевого сплава в сочетании с керамическими, стеклянными и металлическими компонентами. Наиболее часто применяются параллельные корпуса из керамики или отливаемой пластмассы.

Корпуса из отливаемой пластмассы изготавливаются двумя способами: литье с переносом и литье с впрыскиванием. Литье с переносом - основной метод герметизации в пластмассовых корпусах. Кристаллы устанавливают на рамки с неготовыми выводами, а затем партию загружают в формы. Порошкообразные или гранулированные термореактивные пластические соединения расплавляются в нагретом баке и под давлением переносятся в загрузаемые формы. Порошкообразные и гранулированные пластические отливаемые соединения могут использоваться с эпоксидной, кремнийорганической или кремнийорганической/эпоксидной смолой. Обычно они состоят из смеси:

- термореактивных смол: эпоксидной, кремнийорганической или кремнийорганической/эпоксидной;
- отвердителей: эпоксидные фенолформальдегидные смолы (новолак) и эпоксидные ангидриды;
- наполнителей: кварцевое стекло или кристаллический диоксид кремния (SiO_2) и окись алюминия (Al_2O_3) - как правило, от 50 до 70% веса;
- замедлителей оплавления: трехокись сурьмы (Sb_2O_3) - как правило, от 1 до 5 % веса.

При литье с впрыскиванием применяется термопластическое или термореактивное соединение, которое нагревается до точки плавления в цилиндре при контролируемой температуре и под давлением через насадку впрыскивается в форму. Смола быстро затвердевает, форма открывается, и корпус выбрасывается. При этом виде литья применяются различные соединения пластмасс. Эпоксидная и полифенилсульфидная смола (PPS) - это новые материалы, используемые в производстве корпусов.

Корпуса кремниевых полупроводниковых приборов можно классифицировать в соответствии со стойкостью к утечкам или способностью изолировать интегральную схему от окружающей среды. Они могут быть герметичными и негерметичными.

Испытания на герметичность и высокотемпературная выдержка

Испытание на герметичность - это процедура проверки герметичности прибора в корпусе. В связи с высокой чувствительностью полупроводниковых приборов к влаге и загрязнению поверхности, обнаружение течей стало одним из важнейших испытаний приборов на надежность. Наиболее распространенными методами проверки герметичности являются обнаружение течей с помощью гелия и радиоактивных изотопов.

При испытаниях с помощью гелия интегральные схемы помещают на определенный период времени в гелиевую атмосферу под давлением. Гелий обладает способностью проникать через дефекты (мельчайшие отверстия) в корпус. После удаления из гелиевой камеры высокого давления схема переносится в камеру масс-спектрометра и проверяется на утечки гелия через дефекты корпуса.

Во втором методе испытания на герметичность гелий заменяется газом радиоактивных изотопов, обычно это криптон - 85 (Kr-85). Измеряется радиоактивный газ, вытекающий из корпуса. При нормальных условиях воздействие на персонал во время этого процесса меньше 5 миллизивертс (500 миллибэр) в год (Baldwin and Stewart 1989). Меры контроля при работе на этих системах включают:

- ограничение доступа в помещение посторонних лиц;
- предупредительные таблички о радиации на дверях комнат, в которых содержится Kr-85 ;
- устройства непрерывного контроля радиации с сигнализацией и автоматическим отключением/изоляция;
- специальные системы вытяжной вентиляции и комнаты отрицательного давления;
- контроль излучения с помощью личных дозиметров;

- регулярное обслуживание системы сигнализации и внутренней блокировки;
- регулярные проверки утечек радиоактивных материалов;
- обучение мерам безопасности операторов и техников;
- обеспечение воздействия радиации на самом низком уровне, который возможен при работе такого рода.

Кроме того, перед удалением из контролируемого помещения проверяется уровень радиации материалов, которые были в контакте с Kг-85 (например, прошедшие испытания интегральные схемы, отработанное масло насосов, клапаны и О-образного кольца), так как в них могут быть остатки газа. Leach- Marshal (1991) представляет подробную информацию о системах обнаружения утечек с помощью Kг-85, уровне излучения и методах контроля.

Высокотемпературная выдержка - процедура температурного и электрического напряжения, предназначенная для определения надежности законченного, вмонтированного в корпус прибора. Приборы помещаются в печь с контролируемой температурой на длительный период времени с использованием атмосферы окружающей среды или атмосферы инертного газа-азота. Температура колеблется в диапазоне от 125°С до 200°С (t 150°С является средней), а продолжительность выдержки варьируется от нескольких часов до 1000 часов (в среднем 48 часов).

Окончательные испытания

Для окончательного описания характеристик кремниевого полупроводникового прибора производят заключительные электрические испытания. Вследствие необходимости проведения множества испытаний и их сложности проверка многочисленных параметров, важных для функционирования прибора, осуществляется с помощью компьютера.

Маркировка и упаковка

Физическая идентификация установленного в корпус прибора осуществляется с помощью различных систем маркировки. Основными видами маркировки компонентов являются контактная и неконтактная печать. При контактной печати применяется метод роторного офсета с использованием типографской краски на основе растворителей. Неконтактная печать, при которой знаки переносятся без физического контакта, представляет собой струйную (с разбрызгиванием красителя) печать с использованием типографской краски на основе растворителей или лазерной маркировки.

Растворители, применяемые в качестве носителя для типографской краски и средства предварительной очистки, как правило, состоят из смеси спирта (этанола) и сложных эфиров (этилацетата). В большинстве систем маркировки компонентов за исключением лазерной маркировки, применяется типографская краска, для которой требуется дополнительная обработка. Она включает обработку воздухом, горячую обработку (термическую или инфракрасную) и обработку ультрафиолетом. Краска, обрабатываемая ультрафиолетом, не содержит растворителей.

В системах лазерной маркировки применяются мощные лазеры на двуокиси углерода (CO_2) или неодим - иттриевые лазеры. Как правило, эти лазеры встраиваются в оборудование и у них имеются шкафы с внутренней блокировкой, которые ограждают траекторию пучка и точку, в которой луч контактирует с мишенью. Благодаря этому во время нормальной работы исключается вероятность опасности от лазерного луча, но когда блокировка безопасности нарушена, возникает риск. Наиболее типичная операция при удалении ограждения луча и нарушении блокировки - фокусировка лазерного луча.

При обслуживании идеальным является вариант, когда из помещения, в котором находится лазер, эвакуируют весь персонал, за исключением техников по обслуживанию, а двери в помещение закрывают и вывешивают таблички, предупреждающие о лазерной опасности. Однако мощные лазеры, применяемые в полупроводниковом производстве, часто размещают в больших, открытых производственных помещениях, что делает невозможным эвакуацию персонала, не занятого обслуживанием лазерной системы. В этих случаях устанавливается зона временного контроля. Обычно зоны временного контроля ограждаются лазерными завесами или защитными сварочными экранами, способными выдерживать прямой контакт с лазерным лучом. Доступ в зону временного контроля осуществляется через сложный вход, на котором вывешивают предупредительную табличку, если внутренняя блокировка лазера не работает. Другие меры предосторожности во время фокусировки луча аналогичны мерам при работе мощного лазера с открытым лучом (техническое обучение, защита глаз, письменные инструкции и т.д.).

Мощные лазеры также являются одним из самых значительных источников электрической опасности в полупроводниковой промышленности. Даже после отключения питания сохраняется вероятность электрического удара, и мощность должна быть рассеяна до работы внутри камеры.

Помимо факторов лучевой и электрической опасности, при работе с системами лазерной маркировки существует вероятность химического загрязнения от подавителя огня - трехокси сурьмы и бериллия (керамические корпуса, содержащие это соединение, помечаются). При маркировке мощными лазерами могут образовываться испарения, а остатки материалов оседать на поверхности оборудования и фильтров, на которых осаждаются копоть.

В прошлом для очистки полупроводниковых приборов перед нанесением на них идентификационных кодов применялись обезжиривающие растворители. Если голова оператора находится под охлаждающим змеевиком,

который вызывает реконденсацию паров, когда оператор пытается найти упавшие детали или когда техник очищает остатки со дна установки, допустимый уровень воздействия растворителей может быть превышен. (Baldwin and Stewart 1989). Применение обезжиривающих растворителей сильно снизилось в полупроводниковой промышленности из-за ограничений, предъявляемых к применению веществ, истончающих озоновый слой, таких как хлорфторуглероды и хлорированные растворители.

Анализ отказов и обеспечение надежности

Лаборатории, занимающиеся анализом отказов и проверкой надежности, выполняют различные операции по гарантии надежности приборов. Некоторые из операций могут оказывать вредное воздействие на персонал, в частности:

- испытание маркировки с применением растворителей и коррозионных смесей в нагретых химических стаканах на небольших газовых или электрических плитках. Для контроля эмиссии летучих веществ необходима локальная вытяжная вентиляция (LEV) в виде металлического колпака с соответствующей скоростью вытяжки. Растворы моноэтаноламина могут вызывать превышение допустимой концентрации этого вещества в воздухе (Baldwin and Williams 1996);
- испытания на герметичность с применением фторуглеродов с высоким молекулярным весом;
- рентгеновские установки для испытания корпусов.

Для проверки способности интегральных схем противостоять воздействию гамма - излучения при использовании в космической и военной промышленности, в облучателях применяется кобальт-60 (до 26000 кюри). При нормальных условиях доза облучения персонала от этой операции менее 5 миллизивертов (500 миллибэр) в год (Baldwin and Stewart 1989). Меры контроля при частично специализированной операции те же, что и меры предосторожности при работе с системами проверки герметичности с применением криптона-85 (kr-85): изолированные помещения, устройства непрерывного контроля радиации, контроль излучений с помощью личных дозиметров и т.д.

Для анализа отказов применяются небольшие источники альфа-излучения, выполненные по "особой лицензии" (например, микро- и милликюри Америция-241). Эти источники в защитном покрытии имеют отверстие, называемое окном, через которое интегральная схема бомбардируется альфа-частицами и при этом проверяется ее способность функционировать. Как правило, источники периодически проверяются (например, 1 раз в полгода) на утечку радиоактивного вещества, которые могут произойти при повреждении защитного покрытия. При обнаружении утечки источник возвращается изготовителю.

Кабинетные рентгеновские системы используются для проверки толщины металлических покрытий и выявления дефектов (например, воздушных пузырьков в корпусах из отливаемой пластмассы). Эти устройства периодически (например, ежегодно) проверяются с помощью ручного рентгенометра и осматриваются, чтобы гарантировать правильную блокировку дверей.

Отгрузка

Отгрузка - последний этап работы большинства изготовителей кремниевых полупроводниковых приборов. Некоторые изготовители полупроводниковых приборов продают свои изделия другим изготовителям конечных продуктов, другие используют их для собственных конечных продуктов.

Исследование влияния производственных факторов на здоровье

На каждом технологическом этапе изготовления полупроводниковых приборов применяются определенные химические реактивы, материалы и оборудование, в связи с чем возникают вопросы охраны окружающей среды, здоровья и безопасности. Помимо проблем, связанных с конкретными технологическими операциями изготовления кремниевых полупроводниковых приборов, было проведено эпидемиологическое исследование о влиянии производственных факторов полупроводниковой промышленности на здоровье персонала (Schenker et al. 1992). См. также статью [Влияние на здоровье и профессиональные заболевания](#).

Главный вывод исследования заключался в том, что работа на участках изготовления полупроводниковых приборов вызывает у работниц выкидыши. Было изучено примерно одинаковое число беременностей среди женщин, занятых на технологических участках (447) и женщин, работающих на других, не связанных с производством, участках (444). На технологических участках было зарегистрировано большее число выкидышей (n=67), чем на других участках (n=46). После корректировки некоторых факторов, которые могли бы вызвать отклонения (возраст, этнический состав, курение, стрессы, социально-экономический статус и характер протекания беременности), коэффициент риска для работниц производственных участков по отношению к работницам непромышленных участков составил 1.43 (95% доверительный интервал = 0.95-2.09).

Исследователи связывают повышенный уровень выкидышей с воздействием на здоровье работниц эфиров гликоля на этиленовой основе, применяемых в производстве полупроводниковых приборов. Были проанализированы эфиры гликоля, которые, как предполагается, оказывают вредное воздействие на репродуктивное здоровье женщин:

- 2 - метоксиэтанол (CAS 109-86-4)
- 2 - метоксиэтилацетат (CAS 110-49-6)
- 2 - этоксиэтилацетат (CAS 111-15-9)

Известно, что два других гликольных эфира, применяющихся в промышленности (2 - этоксиэтанол (CAS 110-80-5) и диметилвый эфир диэтиленгликоля (CAS 111-96-6)), хотя они и не были предметом исследования, оказывают аналогичный токсический эффект. Их применение запрещено некоторыми изготовителями полупроводниковых приборов.

Помимо вывода о повышенном уровне выдыхаемых под воздействием некоторых гликольных эфиров, исследование также показало:

- необоснованность связи между воздействием фтористых соединений (при травлении) с выдыхаемыми;
- отмечаемый работницами стресс является сильным фактором риска самопроизвольного прерывания беременности;
- работницам на производственных участках было труднее забеременеть, чем работницам непромышленных участков.
- на производственных участках отмечалось больше респираторных заболеваний (раздражение глаз, носоглотки, хрип, одышка) по сравнению с непромышленными участками.
- с работой на производственных участках вызывает боль в верхних конечностях (руках, запястьях, локтевом суставе, предплечьях)
- среди работников производственных участков чаще отмечались дерматиты и облысение.

Оценка оборудования

Сложность оборудования полупроводниковой промышленности и постоянные технологические инновации делают очень важным вопрос предварительной оценки нового оборудования с целью минимизации факторов риска для окружающей среды, здоровья и безопасности. Существует два способа, чтобы убедиться в соответствии нового оборудования для изготовления полупроводниковых приборов требованиям охраны окружающей среды, здоровья и безопасности. Это CE маркировка и стандарты Semiconductor Equipment and Materials International (SEMI).

CE маркировка - это декларация изготовителя оборудования о соответствии его всем требованиям Директив Европейского Союза (EU). Прежде всего, имеются в виду Директива по машинному оборудованию (MD), Директива по электромагнитной совместимости (EMC) и Директива по низкому напряжению (LVD).

Чтобы проверить соответствие оборудования директиве, необходимо обратиться за помощью к компетентной организации (официально уполномоченной страной - членом Европейского Союза) для определения требований к испытаниям и подтверждения результатов проверки. Оценка соответствия MD и LDV директивам может быть дана как самим изготовителем, так и уполномоченной организацией, официально назначаемой страной-членом Европейского Союза. Независимо от способа оценки (самим предприятием-изготовителем или третьей стороной) именно импортеры ответственны за наличие на изделии CE маркировки. Они могут воспользоваться услугами третьей стороны или использовать данные самостоятельной оценки, чтобы гарантировать соответствие оборудования требованиям соответствующих директив. В конечном итоге составляется декларация о соответствии и ставится CE клеймо.

Semiconductor Equipment and Materials International - международная торговая ассоциация поставщиков полупроводникового и индикаторного оборудования и материалов, используемых в полупроводниковой промышленности. Одним из направлений ее деятельности является разработка технических стандартов, которые представляют собой соглашения между поставщиками и заказчиками и предназначены для улучшения качества и надежности изделий при приемлемой цене и стабильных поставках.

Два стандарта SEMI содержат требования к новому оборудованию с точки зрения экологии, здоровья и безопасности. Это стандарты SEMI S2 и SEMI S8. Стандарт SEMI S2-93, Safety Guidelines for Semiconductor Manufacturing Equipment [Инструкция по безопасности оборудования, используемого для изготовления полупроводниковых приборов] представляет собой минимальный набор требований с точки зрения экологии, здоровья и безопасности к оборудованию, используемому в производстве полупроводниковых приборов. В стандарте SEMI S8-95 Supplier Ergonomic Success Criteria User's Guide [Руководство пользователя по критериям эргономического успеха поставщика] расширен раздел эргономики стандарта SEMI S2.

Многие изготовители полупроводниковых приборов требуют сертификации нового оборудования на соответствие требованиям стандарта SEMI S2 третьей стороной. Руководство по интерпретации стандартов SEMI S2-93 и SEMI S8-95 содержится в публикации промышленного консорциума SEMATECH (SEMATECH 1996). Дополнительную информацию о SEMI можно получить в Интернете.

Работа с химическими веществами

Разлив жидкостей

После распространения систем автоматического разлива химических растворов количество химических ожогов среди персонала уменьшилось. Тем не менее, системы автоматического разлива химических растворов требуют оснащения специальными предохранительными приспособлениями:

- приспособлением для обнаружения течей и автоматического отключения источника и распределительных коробок;

- двойная герметизация линий, если химическое вещество является опасным материалом;
- датчиками высокого уровня на оконечных точках (ванна или бак);
- нормированным отключением насоса (позволяет откачивать только определенное количество перед тем, как насос автоматически выключается).

Подача и распределение газа

В последние годы произошли значительные улучшения в подаче и распределении газа с точки зрения безопасности благодаря применению новых типов клапанов цилиндров, встраиванию в цилиндры ограничивающих поток отверстий, автоматических панелей для продувки газа, оборудования для обнаружения высокого расхода и отключения и более сложных устройств для обнаружения утечек. Из-за свойства самовоспламеняться и широкого применения в качестве основной смеси самую серьезную опасность представляет кремневодородный газ как взрывоопасное вещество. Тем не менее, инциденты, связанные с кремневодородным газом, стали более предсказуемыми благодаря новому исследованию, проведенному Factory Mutual и SEMATECH. Благодаря применению отверстий, уменьшающих поток (RFO), правильному давлению подачи и скорости вентиляции большинство причин взрывов было исключено (SEMATECH 1995).

В последние годы произошло несколько инцидентов в связи с неконтролируемым смешиванием несовместимых газов, поэтому изготовители полупроводниковых приборов стали часто проверять линии подачи газа и распределительные коробки, чтобы проверить, не происходит ли неправильного смешивания и /или обратного течения газа.

Работа с химическими веществами обычно вызывает самое серьезное внимание. Тем не менее, большинство травм и случаев со смертельным исходом в полупроводниковой промышленности происходит не из-за опасных химических веществ.

Электрическая безопасность

Существует много факторов риска, связанных с электрооборудованием. Важную роль для электрической безопасности играет защитная блокировка, но техники, занимающиеся обслуживанием оборудования, часто пренебрегают ею. Значительный объем работ по обслуживанию оборудования обычно выполняется под напряжением или при частично обесточенном оборудовании. Наибольшую электрическую опасность представляют установки ионного легирования и источники лазерной энергии. Даже после отключения энергии существует вероятность электрического удара. Поэтому перед работой внутри оборудования нужно рассеять мощность. Обязательная оценка оборудования на соответствие стандарту SEMI S2 в Соединенных Штатах и маркировка CE в Европе помогли значительно улучшить электрическую безопасность нового оборудования, но остаются еще операции по обслуживанию оборудования, не всегда проводящиеся в соответствии с требованиями. Для любого вновь установленного оборудования необходимо тщательное изучение операций обслуживания и факторов электрической опасности.

Второе место среди факторов электрической опасности занимает оборудование, генерирующее энергию высокой частоты, которое используется при травлении, распылении и очистке камер. Необходимо надлежащее экранирование и заземление для минимизации риска высокочастотных ожогов.

Все эти факторы электрической опасности, а также обслуживание неотключенных установок требуют соблюдения техниками по обслуживанию оборудования процедур выключения/разъединения. Электрическая опасность не устраняется отключением источника энергии. К другим источникам энергии относятся, линии, находящиеся под давлением, которые могут содержать опасный газ или жидкость, и системы пневматического управления. Устройства отключения этих источников энергии должны находиться в доступном месте: на производственном или испытательном участке работы, а не в тех местах, куда неудобно подходить.

Эргономика

В результате взаимодействия между работником и оборудованием по-прежнему случаются травмы. Распространенными травмами являются растяжение мышц, суставов, связок, особенно среди техников по обслуживанию оборудования. Доступ к насосам, крышкам камер и т.д. при технологических операциях и размещении оборудования часто бывает неудобным. Насосы должны иметь колеса и размещаться на выдвижных ящиках или поддонах. Для выполнения многих операций требуются подъемные механизмы.

Обычная ручная обработка пластин может стать причиной эргономической опасности, особенно на старых предприятиях. На более новых предприятиях обычно работают с пластинами большего размера, поэтому требуется больше автоматизированных систем, на многих из которых применяется робототехника. Поэтому вопросы безопасности этих систем должны рассматриваться при проектировании и установке (ANSI 1986).

Пожарная безопасность

Кроме кремневодородного газа, о котором говорилось выше, значительную пожароопасность представляет газообразный водород. Тем не менее, с этим газом умеют обращаться, поэтому в полупроводниковой промышленности не было случаев серьезных пожаров, связанных с водородом. В настоящее время наиболее серьезная пожароопасность связана с ваннами для травления. Типичный пластмассовый материал, используемый в них (поливинилхлорид, полипропилен и огнестойкий полипропилен), всегда загорается при пожарах на производственных участках. Источником возгорания могут быть нагреватель в ванне для травления или нанесения покрытий, электрические приборы, установленные непосредственно на пластмассовом оборудовании или по

соседству с ним. Если загорается пластмассовое оборудование, вредные вещества и коррозионные продукты сгорания распространяются по всему производственному помещению. Экономические потери при возгораниях и пожарах велики, так как требуется много времени для приведения помещения и оборудования в соответствие со стандартами чистоты. Часто дорогостоящее оборудование невозможно очистить от копоти и приходится приобретать новое. Таким образом, очень важны как мероприятия, направленные на предупреждение пожаров, так и противопожарная защита.

С целью предупреждения пожаров следует использовать различные негорючие материалы. Предпочтение отдается нержавеющей стали, но часто для технологического процесса не подходит оборудование из металла. Существует пластмасса с меньшей степенью возгорания или задымления, но она ещё не прошла все испытания на совместимость с технологией изготовления полупроводниковых приборов. Для противопожарной защиты такое оборудование снабжается спринклерными противопожарными системами, доступ к которым должен быть свободен. Размещение HEPA фильтров над стендами часто блокирует спринклерные головки. В этом случае устанавливают дополнительные спринклерные головки под фильтрами. Многие компании также требуют установки систем обнаружения и подавления пожара внутри отверстий приточной вентиляции на оборудовании, где часто начинается пожар.