

УДК 004.31 – 181.48

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРОЦЕССОРОВ

Лабецкий Д.И.

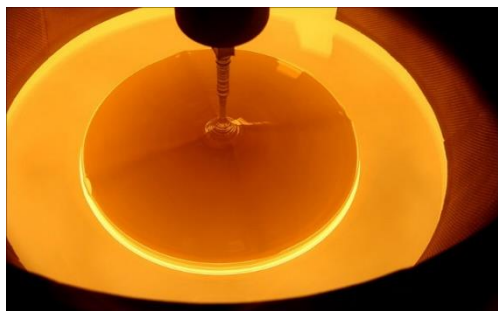
Научный руководитель – старший преподаватель Жуковская Т.Е.

Когда фабрика для производства процессоров по новой технологии построена, у нее есть 4 года на то, чтобы окупить вложенные средства (более \$5млрд) и принести прибыль. Из несложных секретных расчетов получается, что фабрика должна производить не менее 100 работающих пластин в час.

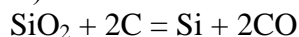
Вкратце процесс изготовления процессора выглядит так: из расплавленного кремния на специальном оборудовании выращивают монокристалл цилиндрической формы. Получившийся слиток охлаждают и режут на «блины», поверхность которых тщательно выравнивают и полируют до зеркального блеска. Затем в «чистых комнатах» полупроводниковых заводов на кремниевых пластинах методами фотолитографии и травления создаются интегральные схемы. После повторной очистки пластин, специалисты лаборатории под микроскопом производят выборочное тестирование процессоров – если все «ОК», то готовые пластины разрезают на отдельные процессоры, которые позже заключают в корпуса.

Уроки химии

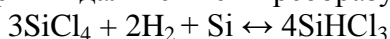
Рассмотрим весь процесс более подробно. Содержание кремния в земной коре составляет порядка 25-30% по массе, благодаря чему по распространённости этот элемент занимает второе место после кислорода. Песок, особенно кварцевый, имеет высокий процент содержания кремния в виде диоксида кремния (SiO_2) и в начале производственного процесса является базовым компонентом для создания полупроводников.



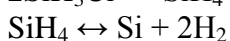
Первоначально берется SiO_2 в виде песка, который в дуговых печах (при температуре около 1800°C) восстанавливают коксом:



Такой кремний носит название «технический» и имеет чистоту 98-99.9%. Для производства процессоров требуется гораздо более чистое сырье, называемое «электронным кремнием» — в таком должно быть не более одного чужеродного атома на миллиард атомов кремния. Для очистки до такого уровня, кремний буквально «рождается заново». Путем хлорирования технического кремния получают тетрахлорид кремния (SiCl_4), который в дальнейшем преобразуется в трихлорсилан (SiHCl_3):



Данные реакции с использованием рецикла образующихся побочных кремнийсодержащих веществ снижают себестоимость и устраняют экологические проблемы:



Получившийся в результате водород можно много где использовать, но самое главное то, что был получен «электронный» кремний (99,9999999%). Чуть позже в расплав такого кремния опускается затравка («точка роста»), которая постепенно вытягивается из тигля. В



результате образуется так называемая «буля» — монокристалл высотой со взрослого человека. Вес соответствующий — на производстве такая дуля весит порядка 100 кг.

Слиток шкурят «нулёвкой» и режут алмазной пилой. На выходе — пластины (кодовое название «вафля») толщиной около 1 мм и диаметром 300 мм (~12 дюймов; именно такие используются для техпроцесса в 32нм с технологией НКMG, High-K/Metal Gate). Когда-то давно Intel использовала диски диаметром 50мм (2"), а в ближайшем будущем уже планируется переход на пластины с диаметром в 450мм — это оправдано как минимум с точки зрения снижения затрат на производство чипов. К слову об экономии — все эти кристаллы выращиваются вне Intel; для процессорного производства они закупаются в другом месте.

Каждую пластину полируют, делают идеально ровной, доводя ее поверхность до зеркального блеска.

Производство чипов состоит более чем из трёх сотен операций, в результате которых более 20 слоёв образуют сложную трёхмерную структуру. Итак. В отшлифованные кремниевые пластины необходимо перенести структуру будущего процессора, то есть внедрить в определенные участки кремниевой пластины примеси, которые в итоге и образуют транзисторы.

Фотолитография

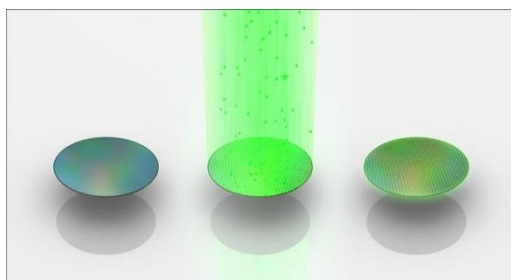
Проблема решается с помощью технологии фотолитографии — процесса избирательного травления поверхностного слоя с использованием защитного фотошаблона. Технология построена по принципу «свет-шаблон-фоторезист» и проходит следующим образом:

— На кремниевую подложку наносят слой материала, из которого нужно сформировать рисунок. На него наносится фоторезист — слой полимерного светочувствительного материала, меняющего свои физико-химические свойства при облучении светом.

— Производится экспонирование (освещение фотослоя в течение точно установленного промежутка времени) через фотошаблон

— Удаление отработанного фоторезиста.

Нужная структура рисуется на фотошаблоне — как правило, это пластинка из



оптического стекла, на которую фотографическим способом нанесены непрозрачные области. Каждый такой шаблон содержит один из слоев будущего процессора, поэтому он должен быть очень точным и практичным.

Иной раз осаждать те или иные материалы в нужных местах пластины просто невозможно, поэтому гораздо проще нанести материал сразу на всю

поверхность, убрав лишнее из тех мест, где он не нужен — на изображении выше синим цветом показано нанесение фоторезиста.

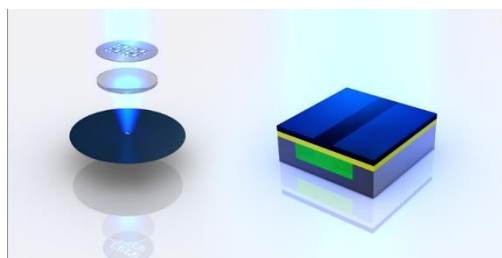
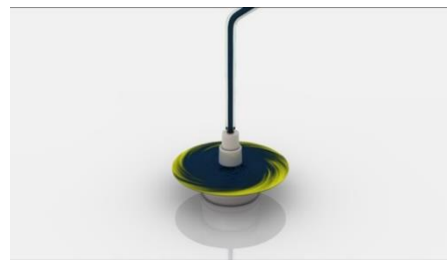
Пластина облучается потоком ионов (положительно или отрицательно заряженных атомов), которые в заданных местах проникают под поверхность пластины и изменяют проводящие свойства кремния (зеленые участки — это внедренные чужеродные атомы).



Как изолировать области, не требующие последующей обработки? Перед литографией на поверхность кремниевой пластины (при высокой температуре в специальной камере) наносится защитная пленка диэлектрика, вместо традиционного диоксида кремния компания Intel стала использовать High-K-диэлектрик. Он толще диоксида кремния, но в

то же время у него те же емкостные свойства. Более того, в связи с увеличением толщины уменьшен ток утечки через диэлектрик, а как следствие – стало возможным получать более энергоэффективные процессоры. В общем, тут гораздо сложнее обеспечить равномерность этой пленки по всей поверхности пластины — в связи с этим на производстве применяется высокоточный температурный контроль.

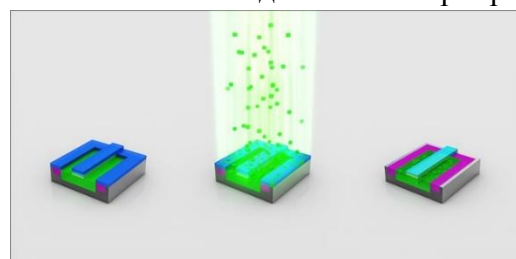
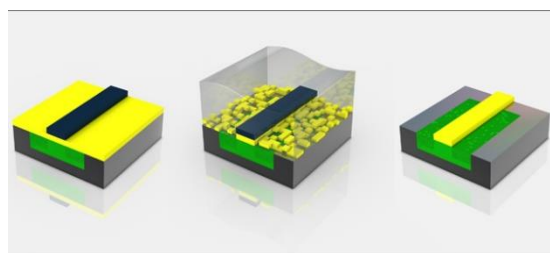
В тех местах, которые будут обрабатываться примесями, защитная пленка не нужна – её аккуратно снимают при помощи травления (удаления областей слоя для формирования многослойной структуры с определенными свойствами). А как снять ее не везде, а только в нужных областях? Для этого поверх пленки необходимо нанести еще один слой фоторезиста – за счет центробежной силы вращающейся пластины, он наносится очень тонким слоем.



В фотографии свет проходил через негативную пленку, падал на поверхность фотобумаги и менял ее химические свойства. В фотолитографии принцип схожий: свет пропускается через фотошаблон на фоторезист, и в тех местах, где он прошел через маску, отдельные участки фоторезиста меняют свойства. Через маски пропускается световое излучение, которое фокусируется на подложке. Для точной фокусировки

необходима специальная система линз или зеркал, способная не просто уменьшить изображение, вырезанное на маске, до размеров чипа, но и точно спроецировать его на заготовке. Напечатанные пластины, как правило, в четыре раза меньше, чем сами маски.

Весь отработанный фоторезист (изменивший свою растворимость под действием облучения) удаляется специальным химическим раствором – вместе с ним растворяется и часть подложки под засвеченным фоторезистом. Часть подложки, которая была закрыта от света маской, не растворится. Она образует проводник или будущий активный элемент – результатом такого подхода становятся различные картины замыканий на каждом слое микропроцессора.



обрабатывают с помощью устройства, которое называется имплантер — ионы бора с огромной энергией выстреливаются из высоковольтного ускорителя и равномерно распределяются в незащищенных зонах, образованных при фотолитографии.

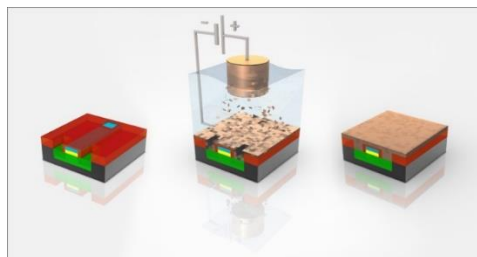
Собственно говоря, все предыдущие шаги были нужны для того, чтобы создать в необходимых местах полупроводниковые структуры путем внедрения донорной (n-типа) или акцепторной (p-типа) примеси. Допустим, нам нужно сделать в кремнии область концентрации носителей p-типа, то есть зону дырочной проводимости. Для этого пластину

обрабатывают с помощью устройства, которое называется имплантер — ионы бора с огромной энергией выстреливаются из высоковольтного ускорителя и равномерно распределяются в незащищенных зонах, образованных при фотолитографии. Там, где диэлектрик был убран, ионы проникают в слой незащищенного кремния – в противном случае они «застревают» в диэлектрике. После очередного процесса травления убираются остатки диэлектрика, а на пластине остаются зоны, в которых локально есть бор. Понятно, что у современных процессоров может быть несколько таких слоев — в таком случае на получившемся рисунке снова выращивается слой диэлектрика и так далее.

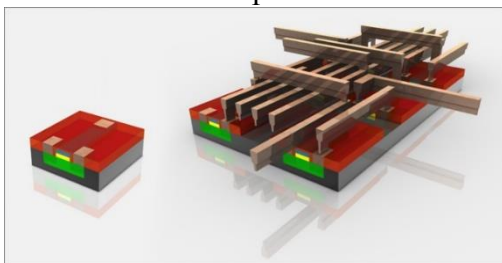
Характерный размер транзистора сейчас — 32 нм, а длина волны, которой обрабатывается кремний — это даже не обычный свет, а специальный ультрафиолетовый эксимерный лазер — 193 нм. Однако законы оптики не позволяют разрешить два объекта,

находящиеся на расстоянии меньше, чем половина длины волны. Происходит это из-за дифракции света. Как быть? Применять различные ухищрения — например, кроме упомянутых эксимерных лазеров, светящих далеко в ультрафиолетовом спектре, в современной фотолитографии используется многослойная отражающая оптика с использованием специальных масок и специальный процесс иммерсионной (погружной) фотолитографии.

Логические элементы, которые образовались в процессе фотолитографии, должны быть соединены друг с другом. Для этого пластины помещают в раствор сульфата меди, в котором под действием электрического тока атомы металла «оседают» в оставшихся «проходах» — в результате этого гальванического процесса образуются проводящие области, создающие соединения между отдельными частями процессорной «логики». Излишки проводящего покрытия убираются полировкой.

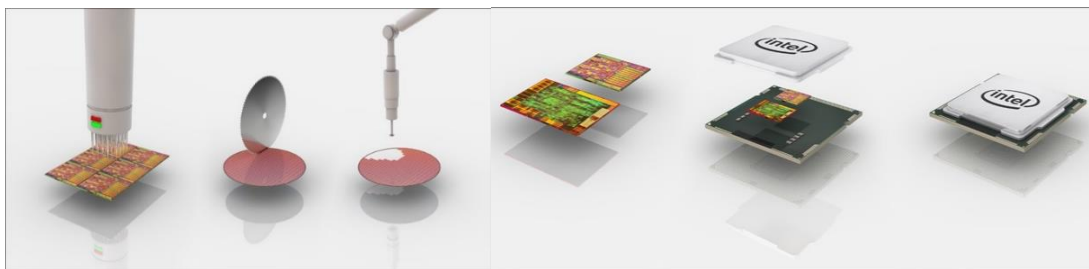


Финишная прямая

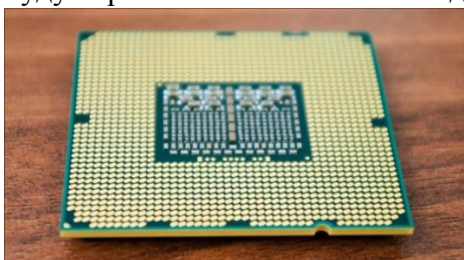


Самое сложное позади. Осталось хитрым способом соединить «остатки» транзисторов — принцип и последовательность всех этих соединений (шин) и называется процессорной архитектурой. Для каждого процессора эти соединения различны — хоть схемы и кажутся абсолютно плоскими, в некоторых случаях может использоваться до 30 уровней таких «проводов».

Когда обработка пластин завершена, пластины передаются из производства в монтажно-испытательный цех. Там кристаллы проходят первые испытания, и те, которые проходят тест (а это подавляющее большинство), вырезаются из подложки специальным устройством.



Подложка, кристалл и теплораспределительная крышка соединяются вместе — именно этот продукт мы будем иметь в виду, говоря слово «процессор». Зеленая подложка создает электрический и механический интерфейс (для электрического соединения кремниевой микросхемы с корпусом используется золото), благодаря которому станет возможным установка процессора в socket материнской платы — по сути, это просто площадка, на которой разведены контакты от маленького чипа. Теплораспределительная крышка является термоинтерфейсом, охлаждающим процессор во время работы — именно к этой крышке будут примыкать система охлаждения, будь то радиатор кулера или здоровый водоблок.



Socket (разъём центрального процессора) — гнездовой или щелевой разъём, предназначенный для установки центрального процессора. Использование разъёма вместо прямого распаивания процессора на материнской плате упрощает замену процессора для модернизации или ремонта компьютера. Разъём может быть предназначен для установки собственно процессора

или CPU-карты (например, в Pegasos). Каждый разъём допускает установку только определённого типа процессора или CPU-карты.

На завершающем этапе производства готовые процессоры проходят финальные испытания на предмет соответствия основным характеристикам – если все в порядке, то процессоры сортируются в нужном порядке в специальные лотки – в таком виде процессоры уйдут производителям или поступят в OEM-продажу. Еще какая-то партия пойдет на продажу в виде BOX-версий – в красивой коробке вместе со стоковой системой охлаждения.



Послесловие

Теперь представьте себе, что компания анонсирует, например, 20 новых процессоров. Все они различны между собой – количество ядер, объемы кэша, поддерживаемые технологии. В каждой модели процессора используется определенное количество транзисторов (исчисляемое миллионами и даже миллиардами), свой принцип соединения элементов. И все это надо спроектировать и создать/автоматизировать – шаблоны, линзы, литографии, сотни параметров для каждого процесса, тестирование. И все это должно работать круглосуточно, сразу на нескольких фабриках. В результате чего должны появляться устройства, не имеющие права на ошибку в работе, а стоимость этих технологических шедевров должна быть в рамках приличия. Почти уверен в том, что вы, как и я, тоже не можете представить себе всего объема прделываемой работы, о которой я и постарался сегодня рассказать.

Литература

1. <http://arxitektura-pk.26320-004georg.edusite.ru/p36aa1.html>
2. <http://www.intel.com/plt/cd/corporate/emea/rus/museum/chips-demo.swf>
3. <https://www.youtube.com/watch?v=aCOyq4YzBtY>