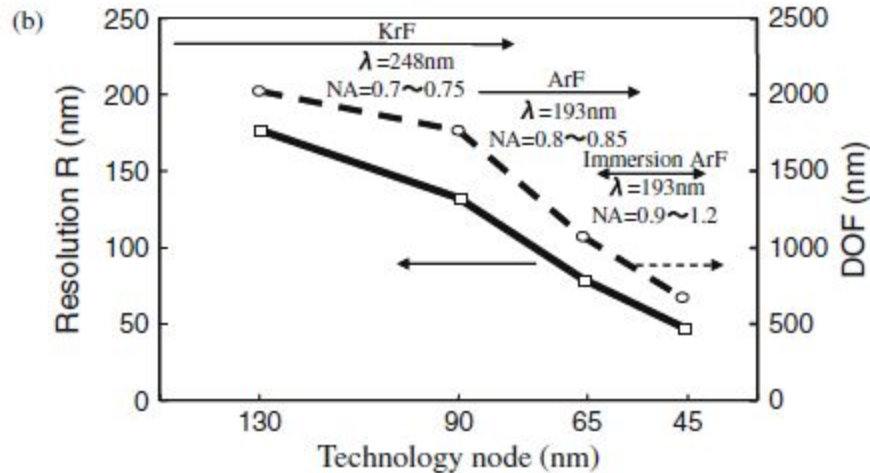
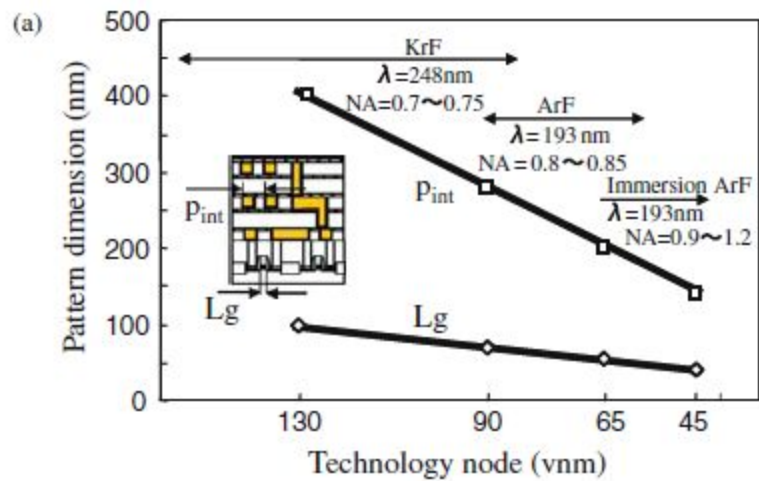
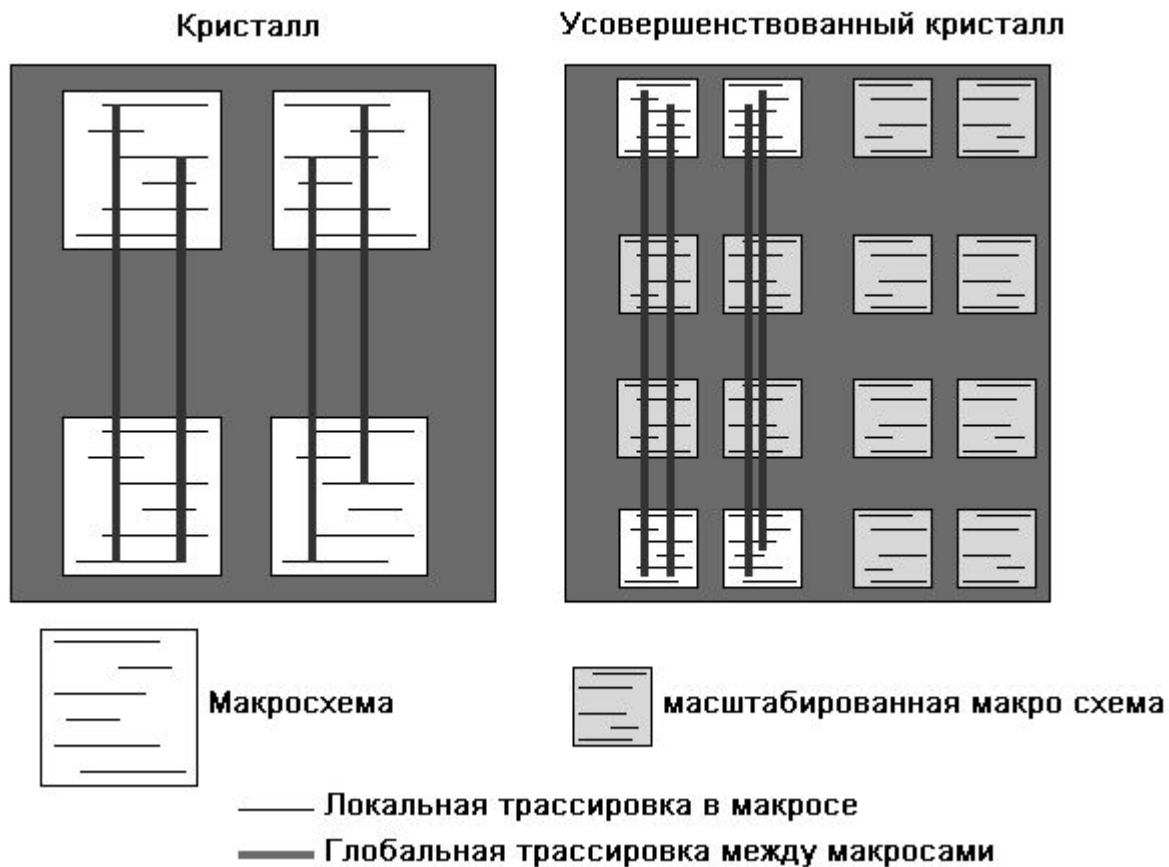


FIGURE 5.6 Typical Al/0.5% Cu metal stacks along with cross-sections.



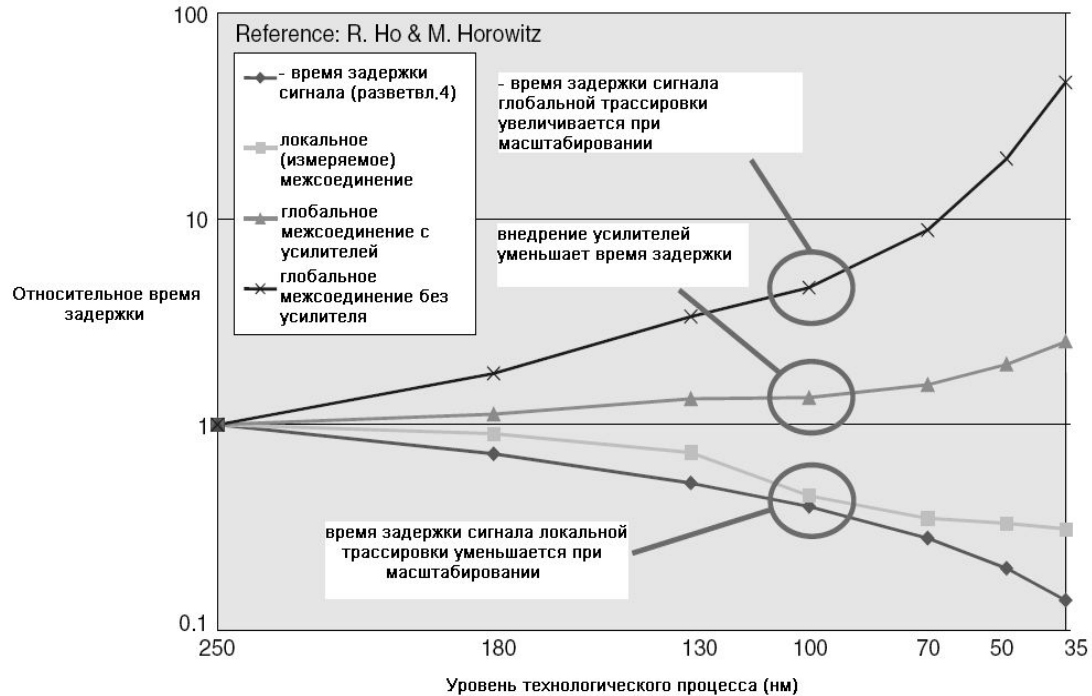
Тенденции в изменении длин затворов и шага металлизации (a) и (b) минимального разрешения и глубины фокуса с использованием KrF или ArF лазеров через оптические линзы с различной числовой апертурой (NA)

В настоящее время локальные и среднего уровня соединения в основном масштабируются по длине, время задержки, в основном, определяется глобальными соединениями, объединяющими крупные функциональные логические блоки



Пример масштабирования глобальных межсоединений в сравнении с локальными: длина глобального межсоединения не масштабируется относительно размера кристалла, в то время как длина локального межсоединения уменьшается коэффициентом масштабирования

Важнейшей тенденцией является увеличение времени RC задержек глобальной разводки



Относительное время задержки логической схемы для локальных и глобальных межсоединений.

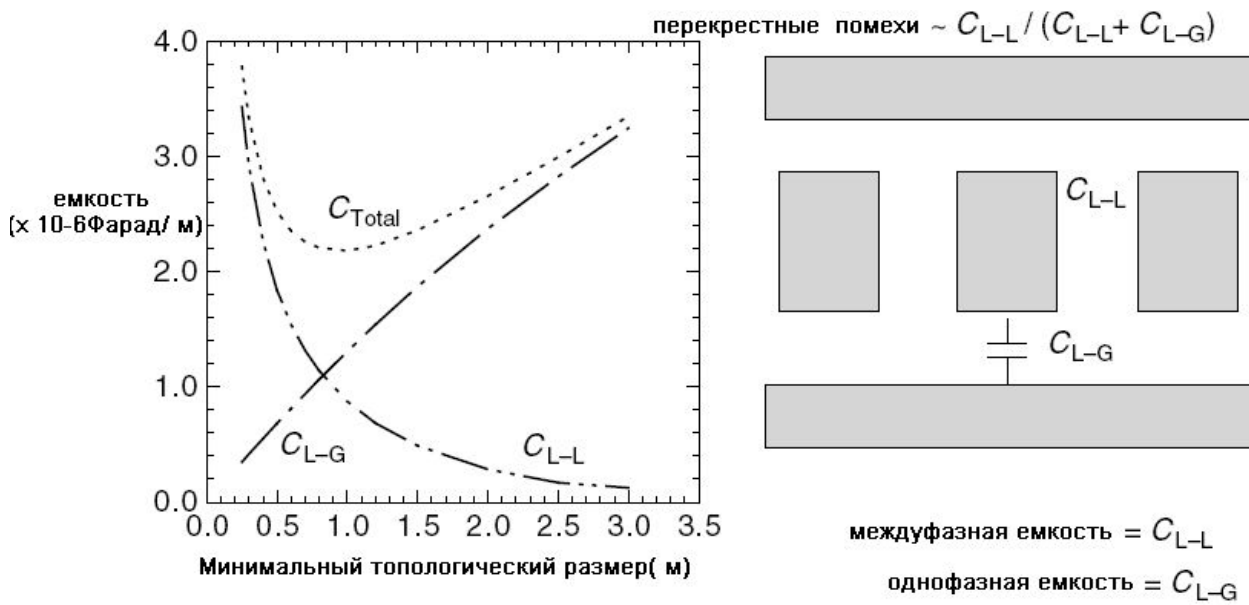
Дальнейшее укрупнение микропроцессорного чипа вызывает серьезные опасения, так как **время задержки пропорционально квадрату длины межсоединений**. Такие проектные решения, как использование промежуточных усилителей или обратное масштабирование в перспективе должно уменьшить время задержки.

Результатом такого подхода в основном является укрупнение чипа и/или большее количество межсоединительных слоев, что в свою очередь приводит к повышению себестоимости схем.

Ещё одним следствием масштабирования является **увеличение емкости боковых стенок проводников**, так как расстояние между проводниками уменьшается. Хотя толщина металла может быть уменьшена для снижения роста емкости боковых стенок проводников, это приводит к повышению сопротивления и плотности тока. Альтернативные технические решения такие как увеличение расстояния между проводниками и/или дополнительные слои межсоединения согласно упрощенным правилам проектирования, имеют такие недостатки. как уменьшение плотности упаковки и повышение себестоимости. **Использование диэлектрика с НДП обеспечивает материаловедческое** решение проблемы, уменьшающее емкость края/ боковой стенки и предоставляющее больше возможностей оптимизации процесса проектирования ИС.

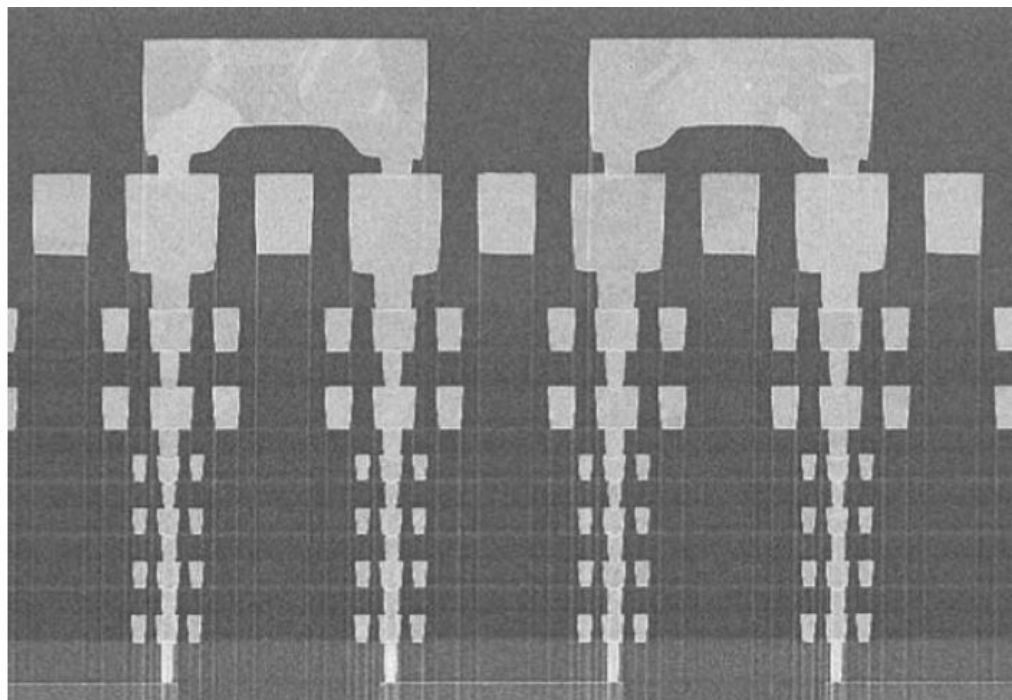
По мере того, как рабочее напряжение транзистора при масштабировании уменьшается, **межсоединительные помехи и уровень шума** также необходимо снижать, дабы избежать нежелательного включения транзистора. Так как перекрестные помехи определяются межсоединительной емкостью (как и общая емкость для минимального размера элемента), решения данной технологической задачи, такие как более тонкий слой металла и/или диэлектрика с НДП, должны быть направлены на обеспечение возможности дальнейшего масштабирования. Это ещё одна причина использования меди и диэлектрика с НДП как основной части механизма масштабирования интегральной схемы.

Рассеяние мощности в системе межсоединений пропорционально **как частоте переключения, так и емкости межсоединений**. Соответственно с ростом рабочей частоты рассеяние мощности в системе межсоединений, занимает значительную долю в общей мощности, рассеянной в чипе, как показано в Таблице . Таким образом, возвращаясь к вопросу о времени задержки, необходимость ограничить рассеяние мощности является, еще одной причиной уменьшения емкости межсоединений.



Моделирование межсоединительной емкости в зависимости от ширины линии, в предположении фиксированной высоты металла и постоянного «шага». **Межшинная емкость доминирует при уменьшении топологического размера.** Перекрестные помехи межсоединений, задаются как межшинная емкость, поделенную на общую емкость. C_{L-G} - межшинная емкость (емкости боковой стенки), C_{L-L} - межсоединительная емкость.

В типичной конструкции с высокими рабочими характеристиками применяется металлизация по иерархическому типу или по схеме так называемого обратного масштабирования. При этом **на высших глобальных межсоединительных и мощностных уровнях используются широко разнесенные плотные соединения с целью минимизировать задержку емкостного сопротивления и спад напряжения.**



Образец иерархической конструкции соединений, применяемой в технологии 90нм процессора цифровой обработки сигналов (digital signal processor - DSP)

Проблемы металлизации, требующие решения

1. Разработка надежных материалов с пониженной диэлектрической проницаемостью (k менее 2,5) - крайне важная задача для повышения надежности интегральных схем из меди с низкой постоянной k .
2. Необходимо разрабатывать барьерные диэлектрики с низким k (k менее 4,0) для понижения итогового значения эффективной диэлектрической постоянной (k_{eff}) до 2,7 и ниже.
3. Более того, химико-механическая полировка с низким давлением должна быть совместима с механическими и химическими свойствами материалов с низким k . Чтобы в конечном счете понизить давление CMP была предложена электро - CMP.
4. Начиная с момента, когда шаг межсоединений стал менее 140 нм за счет использования AgF иммерсионной фотолитографии, были разработаны фоторезисты и твердые маски позволяющие снизить привносимую в low- k диэлектрик дефектность, улучшить воспроизведение критических размеров межсоединений и стоимость процесса.
5. Нелишне отметить, что такие параметры надежности межсоединений, как электромиграция (electromigration EM), пустоты, вызванные напряжением (stress-induced void SIV), зависящий от времени пробой диэлектриков (time-dependent dielectric breakdown (TDDB))* являются наиболее критическими результатами при создании ИС с low- k /Cu разводкой.
6. Также очень важна совместимость процесса с традиционной технологией корпусирования, т.к. механическая прочность материалов с низкой k понижается.

Концепция Damascene

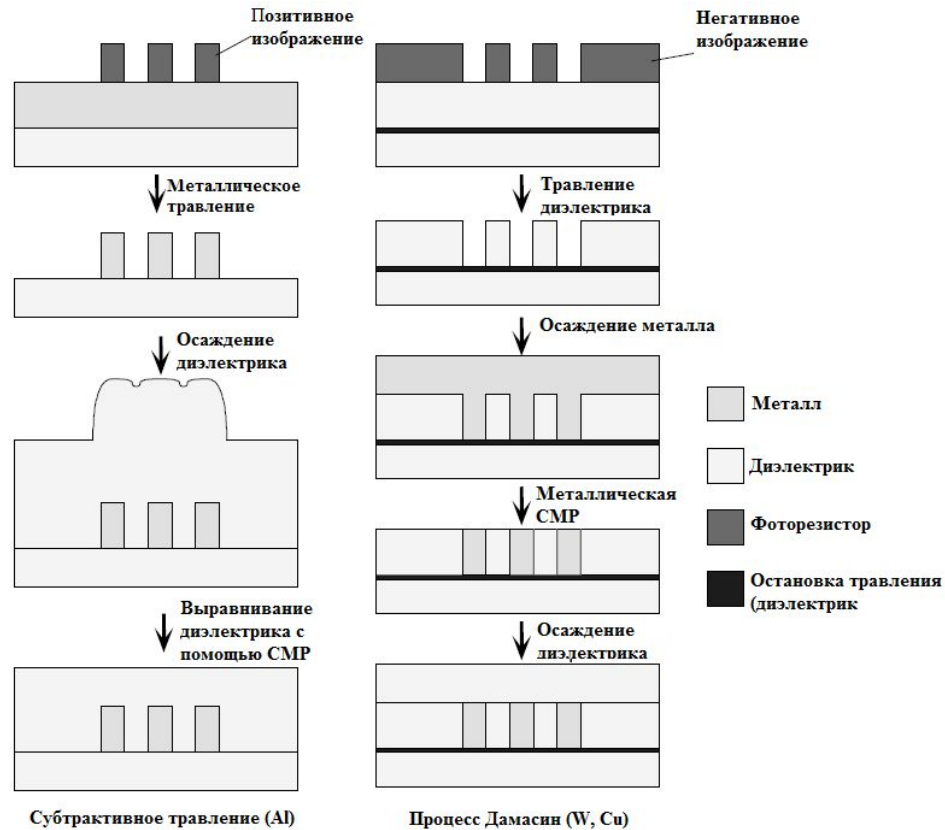
Впервые медные межсоединения были использованы в производстве УБИС в 1997 г.

Замена алюминиевых схем на медные стала очень важным шагом для понижения эффекта электромиграции и снижения сопротивления разводки.

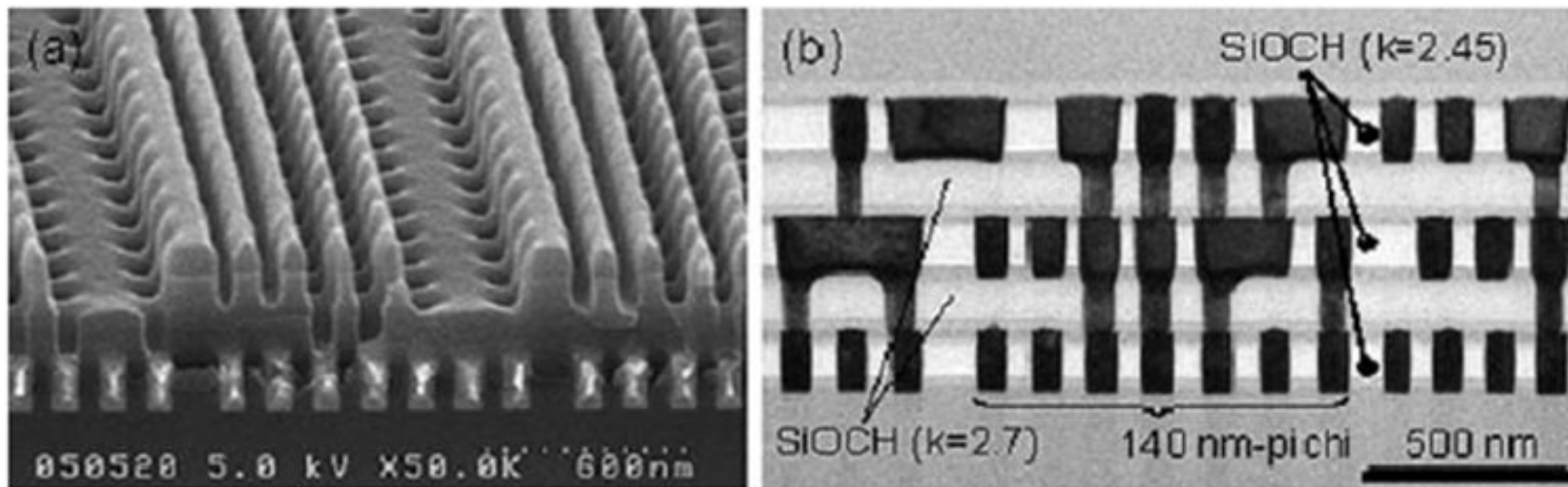
Основная причина разработки Damascene технологии - сложность реализации плазменного травления медных слоев.

Необходимо обеспечить плоскую поверхность слоев при проведении литографии при создании многослойной медной разводки. Также необходимо решить проблемы, связанные с поиском диэлектриков с пониженной диэлектрической проницаемостью (коэффициент k) для уменьшения паразитной емкости разводки медных проводников.

Обычное плазменное травление, используемое в производстве межсоединений на основе алюминия, непригодно для производства межсоединений на основе меди, из-за недостаточной испаряемости галоидных соединений меди при умеренных температурах. Поэтому в производстве медных межсоединений необходимо применять процесс Дамаскин, при котором металлизация включена в параметры топологии межсоединений, которые трансформируются в требуемый диэлектрик.



Сравнение протекания процессов производства структур межсоединений в процессе Дамаскин и в субтрактивном процессе.



СКАН фотография (a) вскрытого образца с канавками для шин и переходными отверстиями в диэлектрике с малым K (пленка SiOCH) и (b) трехслойная медная разводка, выполненная по DD технологии для межсоединений для 45 нм УБИСс минимальным шагом разводки и диаметром переходных отверстий соответственно 140 нм и 70 нм.

Существует два типа Damascene – технологии:

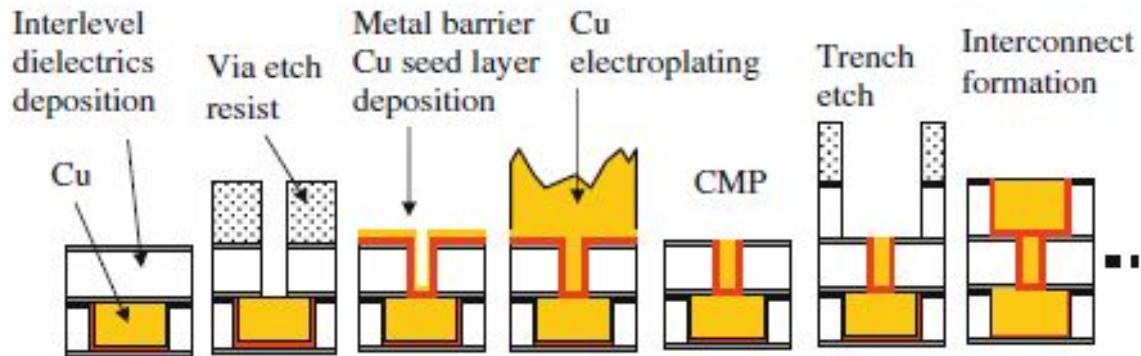
Простая и сдвоенная (SD и DD).

В простом процессе переходные окна и канавки травятся последовательно, а в сдвоенном техпроцессе – одновременно.

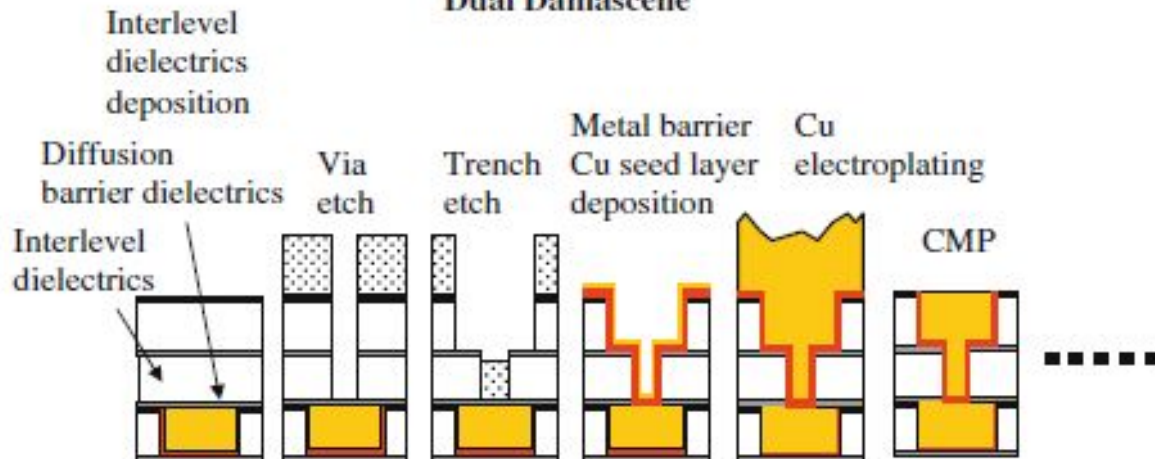
Меньшее количество операций делает сдвоенный Damascene техпроцесс более приемлемым для производства.

Также существует два метода, применяемые во время параллельного процесса: 1) сначала формируется сквозное отверстие для контактов; 2) сначала формируется канавка. Выбор метода зависит от литографической маски, материала, из которого изготовлен межуровневый диэлектрик, и от некоторых других факторов.

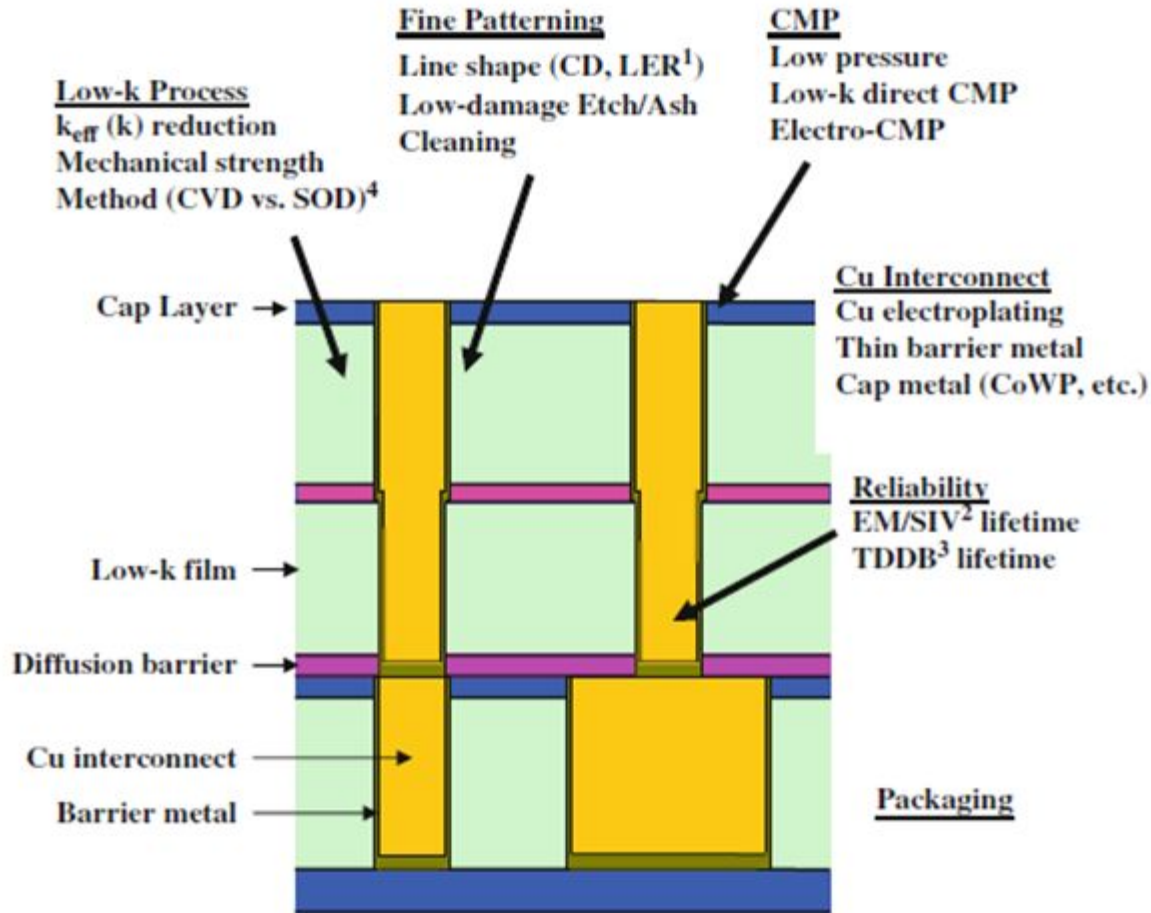
Single Damascene



Dual Damascene



Медные межсоединения, сформированные в SD процессе, когда шины и контакты формируются отдельно, легче контролируются по геометрии и электрическим свойствам. В целом, надежность контактов по таким параметрам, как электромиграция (EM) и индуцированные напряжением пустоты (stress-induced voiding (SiV)) лучше для SD по сравнению с DD маршрута, благодаря наличию неоднородности между шинами и контактом за счет наличия тонкого барьерного металла такого как NiN/Ta. С другой стороны медные соединения DD маршрута имеют пониженное сопротивление контакта и меньше технологических этапов изготовления — значительно меньшая стоимость техпроцесса.



Технологические проблемы создания медных межсоединений 65 нм технологии и ниже

В целом решаются следующие проблемы:

1. CD: воспроизведение критических размеров,
2. LER: неровность края линий (line edge roughness)
3. EM: Проблемы электромиграции,
4. SIV: образование вызванных напряжением пустот (stress-induced void)
5. TDDB: зависящий от времени пробой диэлектриков (time-dependent dielectric breakdown)
6. SOD: (spin on dielectrics (A spin-on dielectric for use in manufacturing semiconductors is produced. The dielectric is a siloxane polymer wherein each silicon atom is bonded to a polarization reducing group, and to three oxygen atoms each of which is bonded to one other silicon atom.)).
7. Использование барьерных металлов

Low Dielectric Constant (Low-k) Materials

Oxide Derivatives

F-doped oxides (CVD) $k = 3.3-3.9$

C-doped oxides (SOG, CVD) $k = 2.8-3.5$

H-doped oxides (SOG) $k = 2.5-3.3$

Organics

Polyimides (spin-on) $k = 3.0-4.0$

Aromatic polymers (spin-on) $k = 2.6-3.2$

Vapor-deposited parylene; parylene-F $k \sim 2.7$; $k \sim 2.3$

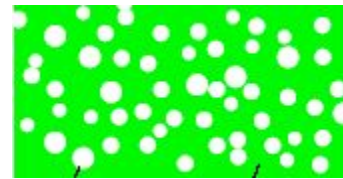
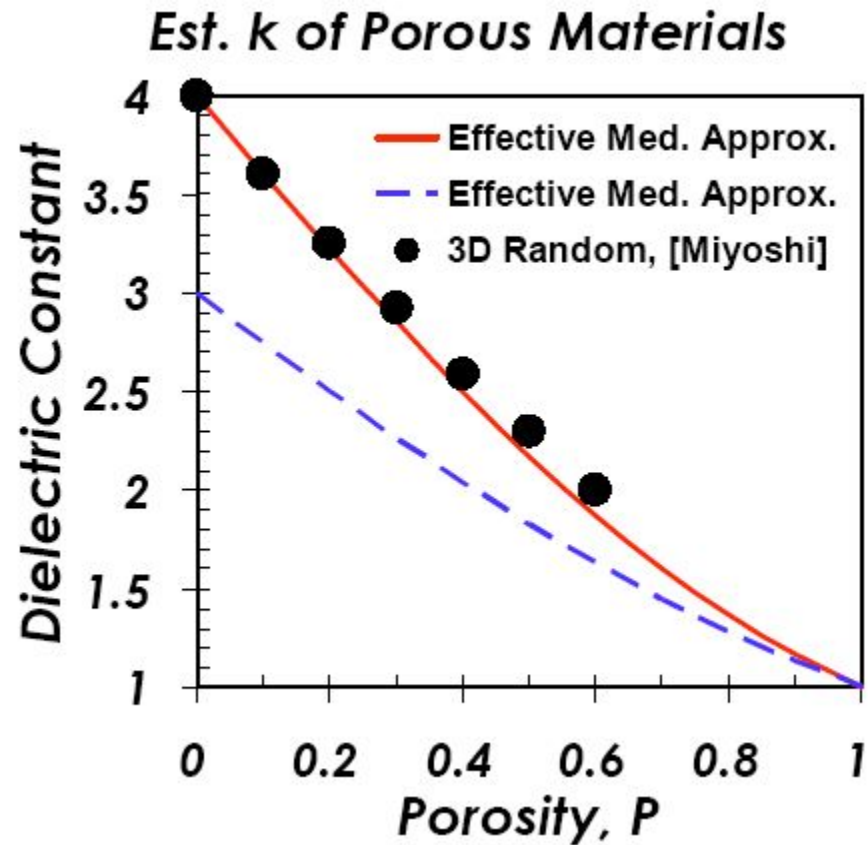
F-doped amorphous carbon $k = 2.3-2.8$

Teflon/PTFE (spin-on) $k = 1.9-2.1$

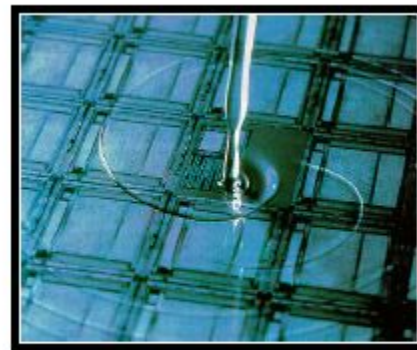
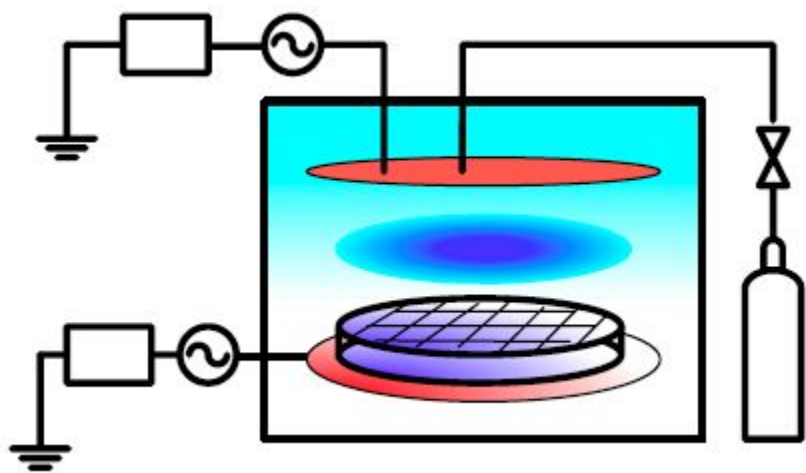
Highly Porous Oxides

Xerogels/Aerogels $k = 1.8-2.5$

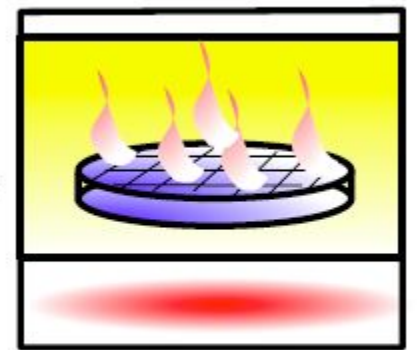
Air $k = 1$



Dielectric constants can be lowered via porosity (air = 1).

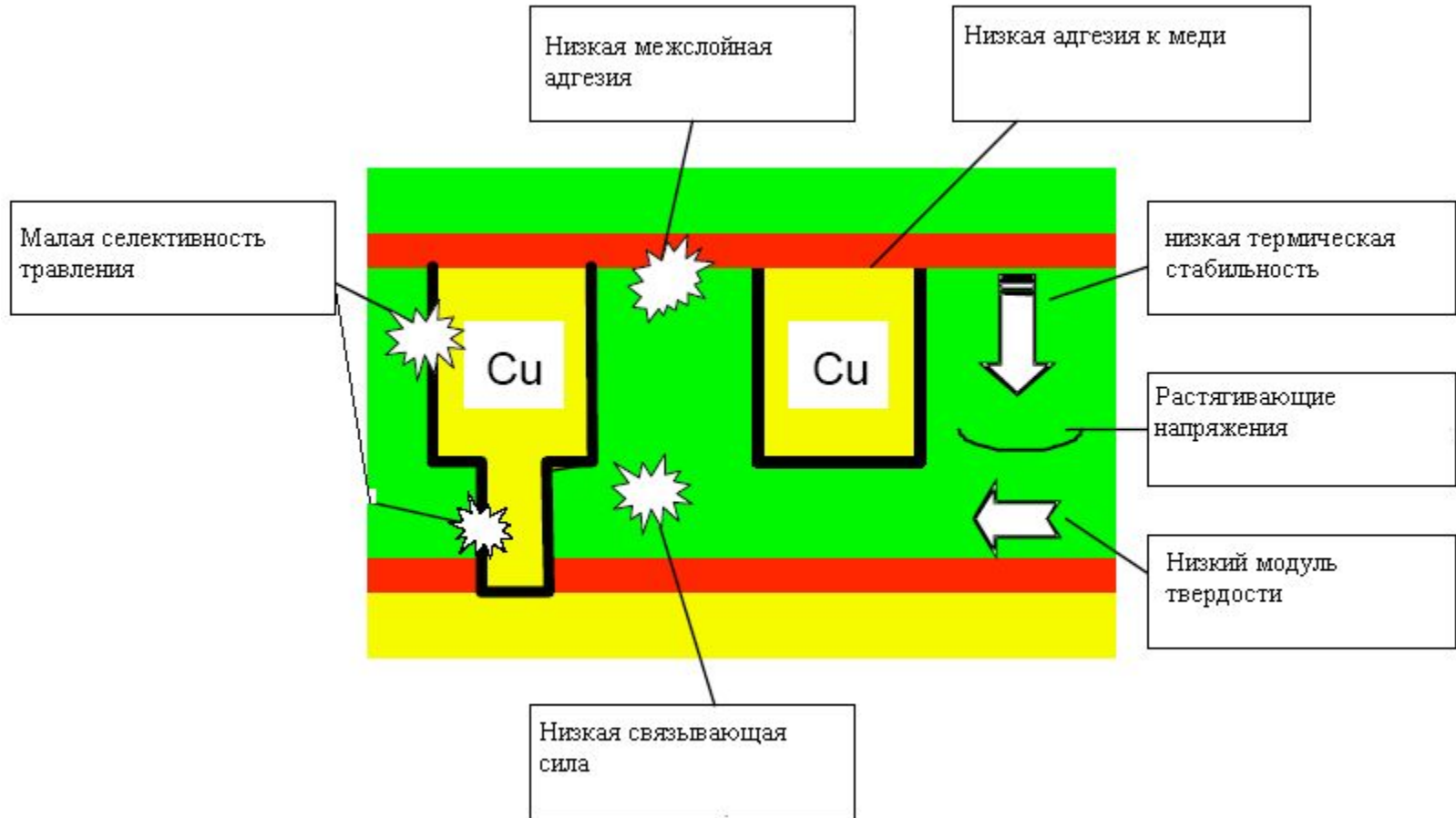


Spin



Cure/(Bake)

Проблемы использования Low-k материалов



В производстве может использоваться несколько вариантов сдвоенного техпроцесса:

1. сначала формируют переходные контактные отверстия или
2. сначала формируют канавки.

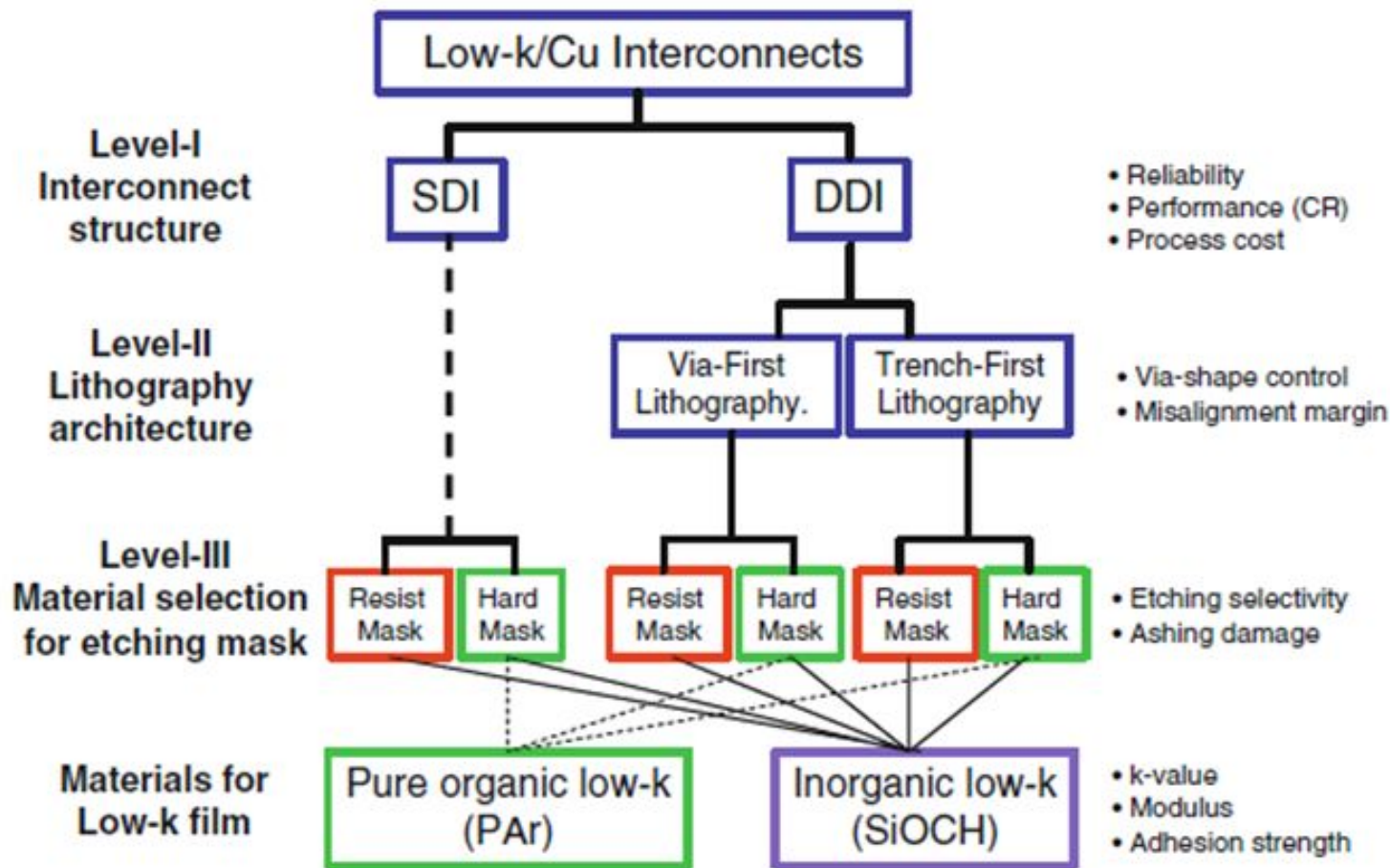
Выбор метода зависит от типов литографической маски, межслойного диэлектрика и др. факторов. Типичная последовательность операций с первичным формированием переходных окон следующая:

Dual Damascene (DD):

1. Осаждение пленок межслойного и диффузионного барьерного слоев
2. Формирование переходных контактных окон в межслойном диэлектрике и сухое травление.
3. Формирование канавок в межслойном диэлектрике при заполненных резистом переходных контактных окнах.
4. Осаждение барьерных металлических пленок (Ta/TaN, и т.п.) и зерен (затравок) меди с использованием физического распыления, ионного распыления и т.д.
5. Заполнение медью канавок и переходных контактных окон с использованием электролитических методов;
6. Удаление ненужных слоев меди вокруг областей канавок методом химико-механического полирования (ХМП) и
7. осаждение пленок межслойного диэлектрика и диффузионного барьерного диэлектрика (В данном случае диэлектрик состоит из двух слоев: межслойного диэлектрика и диэлектрического слоя, предотвращающего диффузию меди в область транзистора. Диэлектрическая проницаемость межслойного и барьерного диэлектрика исторически снижалась благодаря использованию новых материалов с низким k).

В случае ДД межсоединений, канавки и переходные контактные отверстия под будущие шины разводки и контакты в межслойном диэлектрике формируются последовательно. Это означает, что у нас есть два варианта: сначала формируются ПКО затем канавки или наоборот. Стадии литографического процесса определяют ДД профиль в пленках межслойного диэлектрика, также, как и совмещение краев переходных контактных окон и шин разводки. Также специально подбираются материалы фоторезистивной маски (RM) или неорганической твердой маски (TM - hard mask: HM) . Выбор масок для травления зависит от химического состава пленки межслойного диэлектрика. Если используется чисто органическая пленка , то необходимо использовать твердую или многослойную твердую маску (TM - hard mask: HM).

Процесс с использованием твердой маски является лучшим для исключения повреждений обрабатываемой в кислородной плазме поверхности во время удаления фоторезиста. Однако при этом плотность дефектов TM, осажденной методом CVD больше, чем та же плотность у MR, что вызывает серьезные электрические дефекты, такие, например, как закорачивание шин.



Производственный процесс с органической и неорганической пленками межслойного диэлектрика

Процесс с фоторезистивной маской (PR)

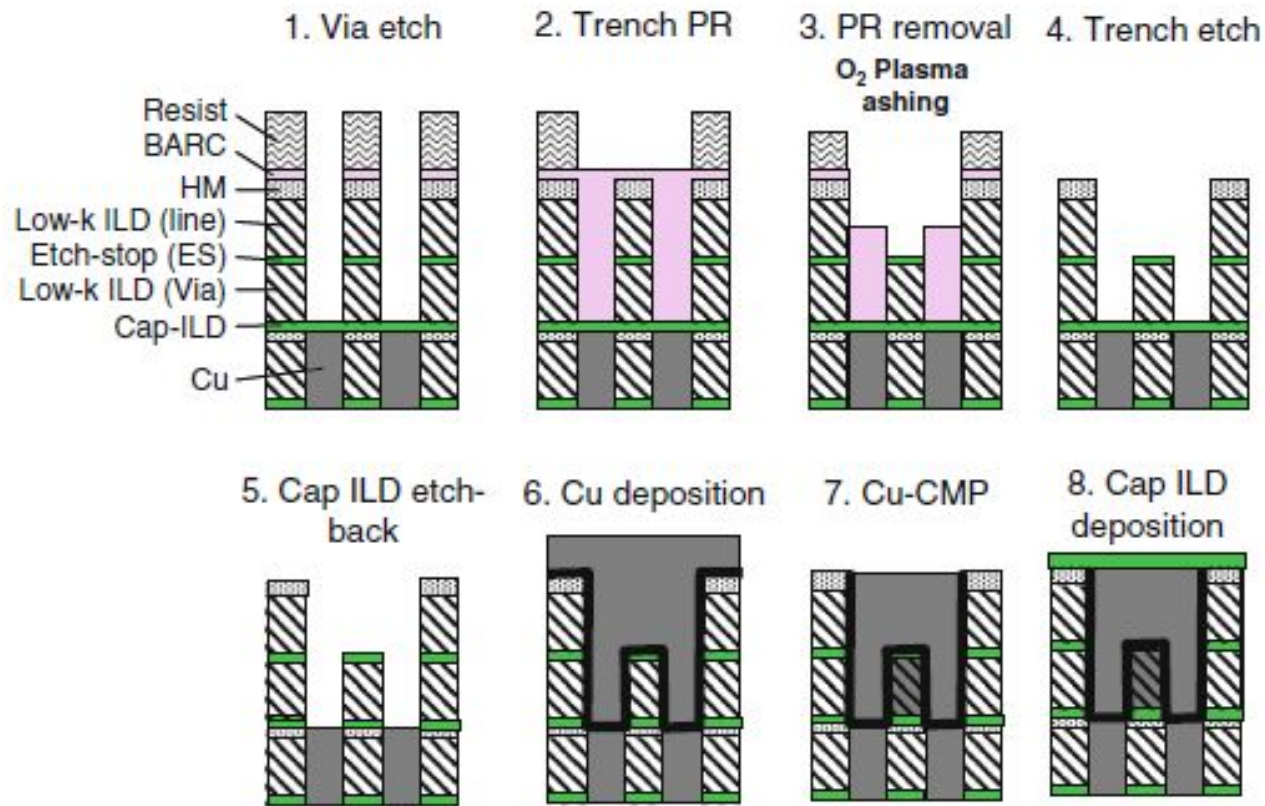


Fig. 20.4 Via-first process with RM for inorganic low- k ILD films such as plasma-CVD SiOCH films

Пояснения к рис 20.4.

Для формирования DD медной разводки используется последовательность операций с первичным формированием переходных контактных окон. На рисунке этот процесс иллюстрируется случаем использования фоторезистивной (PR) маски для травления неорганических $low-k$ пленок межслойного диэлектрика (таких, как осажденный плазменным CVD SiOCH или пористый SiOCH). 1. верхнее антиотражающее покрытие и фоторезист нанесены на стеки изолирующей защитной (барьерной, покрывающей) пленки, ILD пленки переходных контактных окон (via-ILD), стоп слоя для остановки травления (etch-stop (ES)), изолирующей пленки шин разводки (line-ILD) и твердой маски (HM) и затем образ переходных контактных окон вскрываются в фоторезисте. В данном случае твердая маска на пленке $low-k$ line-ILD используется, чтобы защитить поверхность от механических напряжений. Изображение переходных контактных окон переносится через весь ILD стек до покрывающей (барьерной) пленки путем травления с использованием фоторезистивной маски. После этого травления фоторезист удаляется в кислородной плазме, в BARC наносится снова, чтобы спланаризировать поверхность.

Пояснения к рис 20.4 (продолжение)

2. На BARC (bottom anti-reflection coating) наносится фоторезист, чтобы сформировать образ канавок под шины разводки в ILD слое. Фоторезист и BARC удаляются в кислородной плазме, покрывающая (барьерная) пленка удаляется с использованием etch-back процесса. После осаждения барьерного металла (Ta/TaN) и распылением наносится затравочный слой меди и проводится уже электрохимическое осаждение меди (ECD). Медная пленка и барьерный металл на поверхности ILD пленки селективно удаляются химико-механической полировкой (CMP). После этого покрывающая пленка барьерного диэлектрика осаждается на медные шины. Данная последовательность операций с использованием фоторезистивной маски имеет большое количество повреждений поверхности пленки low-k ILD, возникающих во время плазменного удаления фоторезиста, как показано на рис 20.5.

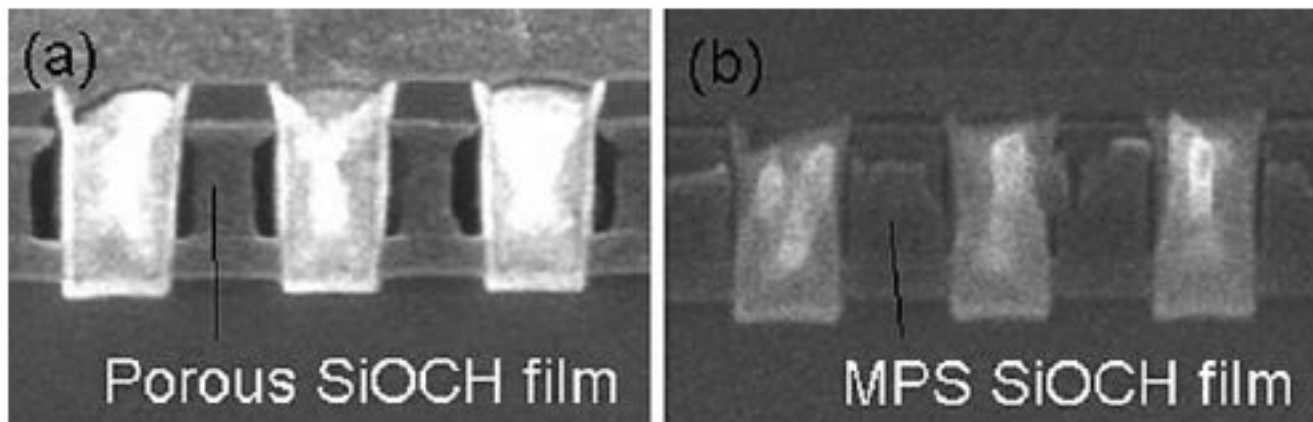


Fig. 20.5 Cross-sectional SEM micrographs of Cu Damascene interconnects in (a) conventional plasma-CVD-derived porous SiOCH film and (b) molecular pore-stacking (MPS) SiOCH film. The samples were dipped in diluted HF solution to dissolve the damaged SiOCH portion

Фотография поперечного сечения медных Damascene межсоединений в (a) обычном осажденном в процессе плазменного CVD пористом SiOCH и (b) полученном методом молекулярного наслаивания (MPS) SiOCH. Образцы были декорированы в разбавленном HF для растворения поврежденных частей SiOCH.

В данном случае образцы были обработаны в растворе разбавленной HF, чтобы стравить слой SiO_2 , который образовался из SiOCH благодаря воздействию кислородной плазмы. Ясно видно, что боковые стенки областей для медных шин были подтравлены в результате воздействия кислородной плазмы. Другими словами, особенно для последовательности операций с фоторезистивной маской, для формирования пленок *low-k ILD (межслойный диэлектрик)* необходимо использовать материалы с высокой устойчивостью к кислородной плазме, например пленки *molecular pore- stacked (MPS) SiOCH*. Другим результатом процесса, использующего фоторезистивную маску являются иногда наблюдаемые «отравленные» контактные окна и «скрытые» контактные окна (**“poisoned vias” and “fenced vias.”**), как это показано на рис. 20.6., когда паразитные КО образуются из-за процессов, протекающих в химически модифицированном резисте для DUV литографии, который содержит определенные химические добавки, выделяющие кислоту под воздействием DUV излучения. Эта кислота частично разрушает полимерную сетку фоторезиста, увеличивая скорость его проявления.

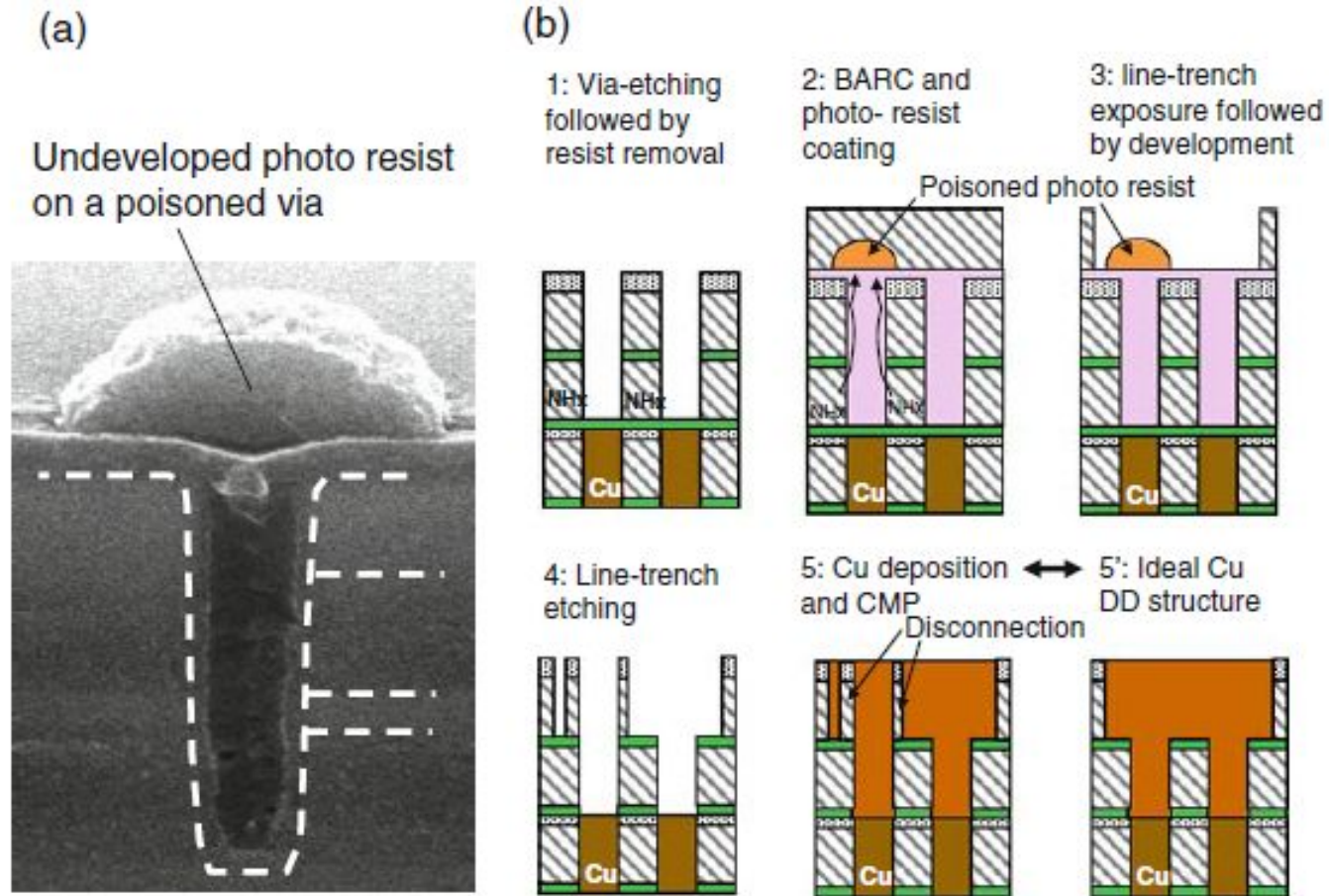


Fig. 20.6 Via poisoning occurred in via-first process with RM: (a) SEM micrograph and (b) mechanism for via poisoning failure in Cu DD interconnects

Когда структура ILD «стека» включает азот содержащие компоненты, такие как SiN или SiCN, то в процессе плазменного травления образуются щелочные элементы, такие как NH_x , и адсорбируются в пленках межслойного диэлектрика с низким К. Эти адсорбированные щелочные элементы вновь освобождаются и диффундируют через нижнее антиотражающее покрытие (BARC) к фоторезисту. Щелочные компоненты нейтрализуют функцию кислотных компонент в фоторезисте (которые предназначены для ускоренного проявления после экспонирования), оставляя непроявленными участки фоторезиста в области переходных контактных окнах во время проработки изображения линий канавок. Непроявленный фоторезист становится нежелательной маской для травления во время проработки линий канавок результатом чего являются ошибочные элементы в медных DD межсоединениях.

«Отравление» фоторезиста исключается за счет тщательного контроля за составом травящего газа и составом межслойного диэлектрика. Другим результатом являются закрытые (запечатанные, заборобразные) переходные контактные отверстия, которые создаются в процессе травления линий канавок, как показано на рис.20.7. Во время травления канавки, переходные контактные отверстия (VIA-holes) уже заполнены материалом BARC (нижнего антиотражающего покрытия) скорость травления которого ниже, чем у материала межслойного $low-k$ диэлектрика. По этой причине некоторая часть травимого материала $low-k$ диэлектрика повторно осаждается на боковые стенки BARC, формируя «заборы». Медные межсоединения с такими «заборенными» (запечатанными) переходными контактными отверстиями являются нестабильными при термических нагрузках вокруг усложненного профиля VIA-holes. Было обнаружено отсутствие вызванных термострессом сконцентрированных напряженных областей при нормальной конусообразной форме VIA-holes, в то время как большой градиент напряжений наблюдается в верхней части «заборенных» VIA-holes (рис.20.8). Здесь предполагается, что образец был охлажден с 350°C до 25°C , где происходит выброс (проявление) напряжения. Фотография поперечного сечения на рис.20.8с показывает небольшую пустоту в медной пленке в верхней части «заборенного» VIA. Рис. 20.8d показывает распределения изменения сопротивления 100 нм VIA после 20 циклов термических нагрузок от 25 до 350°C . Среднее сопротивление «заборенного» VIA увеличивается на 8%, в то время как нормальное конусообразное VIA удерживает возрастание сопротивления в пределах 4%. «Заборенное» VIA ухудшает термическую стабильность контакта. Т.Е. очень важно контролировать профиль VIA за счет изменения параметров травления линий канавок, а также химического состава материала BARC, используя такой, который понижает разницу в скоростях травления между BARC и материалом межслойного $low-k$ диэлектрика.

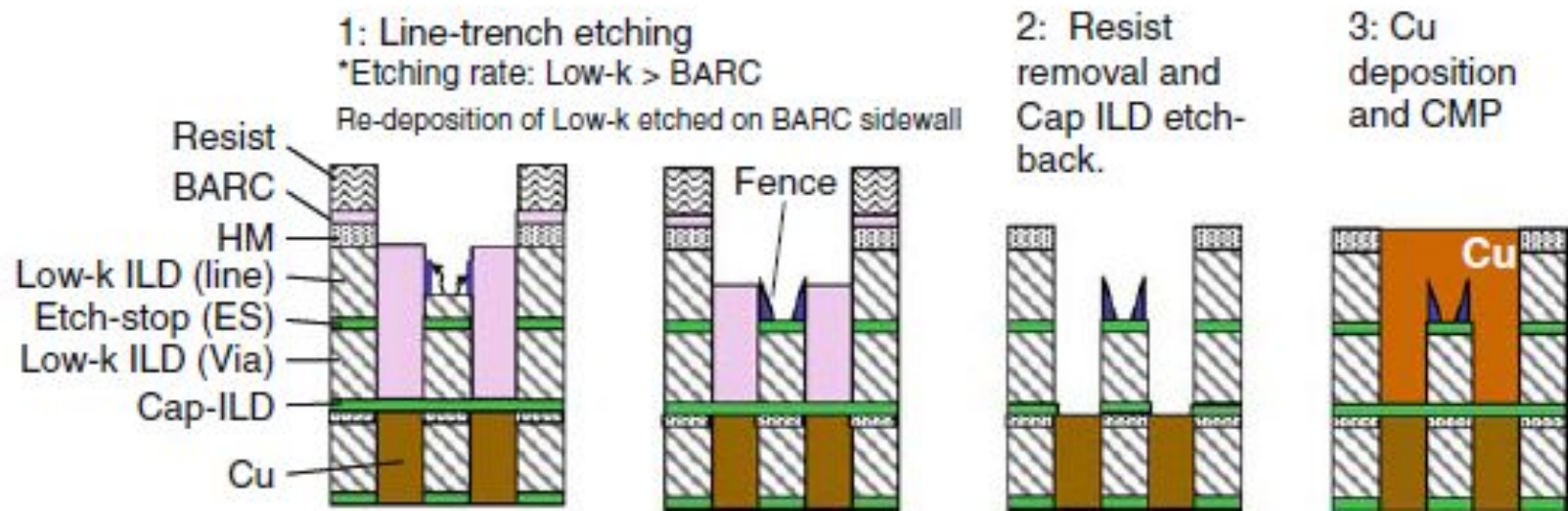


Fig. 20.7 Formation mechanisms of the fenced vias in the via-first process with RM

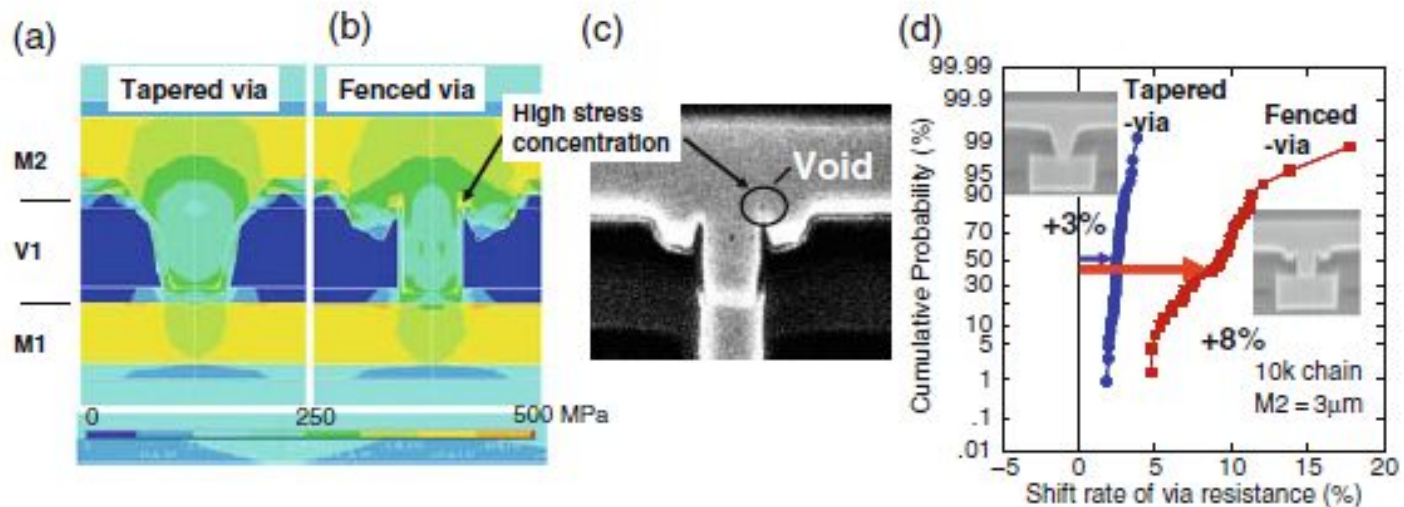


Fig. 20.8 Mises stress distributions and electrical properties of Cu DD interconnects with (a) ideal tapered via, (b) fenced via, (c) cross-sectional SEM micrograph of the fenced via after 20 times thermal cycle test (RT to 350°C), and (d) the distributions of the change in the 100 nm ϕ via resistance after 20 cycles of HTC test from 25°C to 350°C [14]

Процесс с твердой маской (НМ)

Технологический процесс с использованием многослойной жесткой маски был разработан, чтобы избежать повреждений боковых стенок $low-k$ межслойного диэлектрика при травлении в кислородной плазме. В этом технологическом процессе МНМ (multi-layer hard masks - многослойная жесткая маска) с несколькими слоями неорганических пленок наносится на поверхность межслойного $low-k$ диэлектрика для изоляции шин (линий). Далее, в зависимости от того, что формируется в начале =шины или ПКО может быть два варианта.

1. Случай процесса с первичным формированием переходных контактных окон представлен на рис. 20.9а. Тройная МНМ из $SiO_2/SiN/SiO_2$ нанесена поверх пирога ILD, а на нее последовательно нанесены нижне антиотражающе покрытие и фоторезист. Изображение переходных контактных отверстий протравливается в МНМ через проэкспонированный фоторезист.

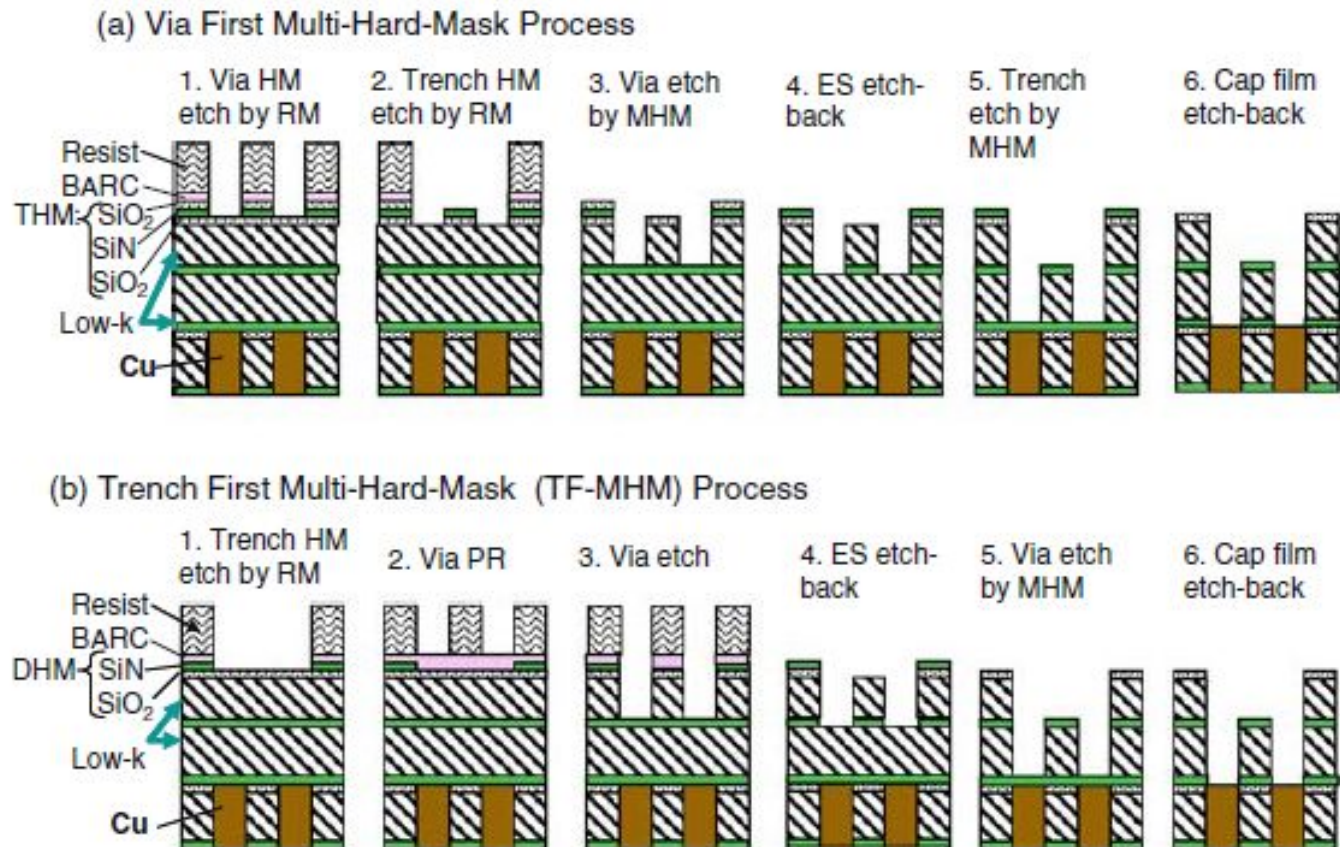


Fig. 20.9 Multi-hard mask (MHM) processes of (a) the via-first sequence with triple-layered HM (THM) and (b) the trench-first sequence with double-layered HM (DHM)

Следует отметить, что на этой стадии нижняя твердая маска не протравливается, чтобы оставить покрытым ILD пленку. Соответственно во время удаления фоторезиста в кислородной плазме в пленку low- k ILD не вносятся никаких повреждений. Затем второй слой BARC и фоторезист наносятся на многослойную твердую маску для формирования изображения линий канавок (областей шин разводки). После чего происходит вытравливание областей канавок в МНМ. Фоторезист на МНМ в конечном счете удаляется, а в слоях МНМ остаются вытравленные в процессе гравировки DD области переходные контактные отверстия и линии канавок (областей шин разводки) в слоях МНМ.

Далее для линий шин через МНМ проводится травление области via в слое low- k ILD и стоп слой на нижней части областей via удаляется в etch-back процессе одновременно с травлением твердой маски (НМ) в областях линий шин. За счет использования изображения линий шин в многослойной твердой маске (МНМ) и изображению переходных контактных окон (via) в стоп слое (ES), эти изображения одновременно преобразуются в линии шин разводки в ILD слое и контактные отверстия в ILD слое. И наконец покрывающая пленка удаляется в etch-back процессе.

Другой случай создания МНМ маски предусматривает последовательность операций получения сначала канавки с использованием двойной маски (DHM) SiN/SiO₂ показан на рис. 20.9b. В этом случае изображение канавки вытравливается в верхнем слое твердой маски в МНМ с использованием фоторезиста. После удаления фоторезиста, наносятся BARC и второй фоторезист и проводится экспонирование изображения переходных контактных окон. При помощи фоторезистивной маски вытравливаются изображения переходных контактных окон в областях шин ILD. Затем стоп слой в нижней части переходных контактных отверстий а также твердая маска в области линий шин одновременно удаляются.

В итоге проводится травление канавок шин и переходных контактных отверстий в ILD, покрывающая пленка удаляется в etch-back процессе. МНМ (многослойная твердая маска) процесс применим для органических low- k пленок. Процесс, когда первыми травятся канавки шин (The trench-first (TF) process) реализуется с сильно упрощенной двухслойной твердой маской (double-layered НМ (DНМ)), по сравнению с процессом, когда первыми травятся переходные контактные окна (the via-first (VF) process) и в котором используются трехслойные твердые маски (triple-layered НМ (ТНМ)), но при этом область несовмещения между переходными контактными отверстиями и шинами является более узкой.

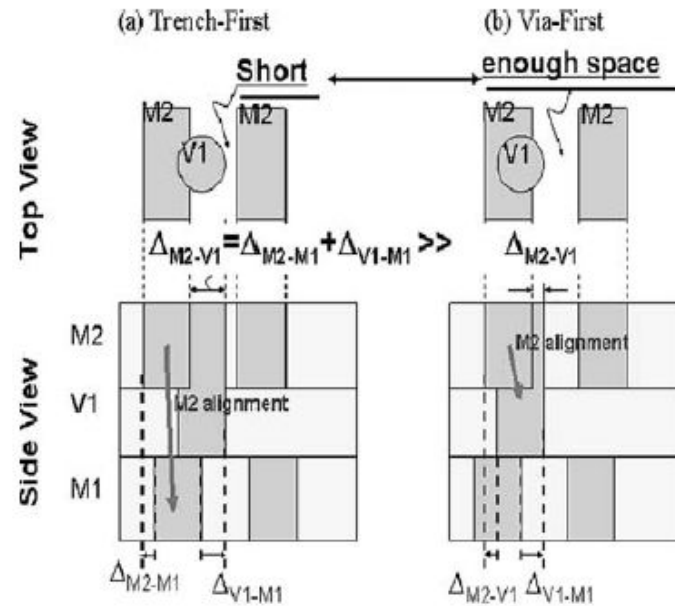


Fig. 20.10 Illustrate the alignment shift between upper lines (M2) and vias (V1), Δ_{M2-V1} (a) in the trench-first and (b) via-first (VF) processes, and (c) the yield of 0.28 μm -pitched line with 0.14 μm vias as a function of the intentional alignment shift to the via and M1. The VF-MHM process is superior in the misalignment margin to the TF-MHM one, even though the MHM structure is more complex than that in TF-MHM [15]

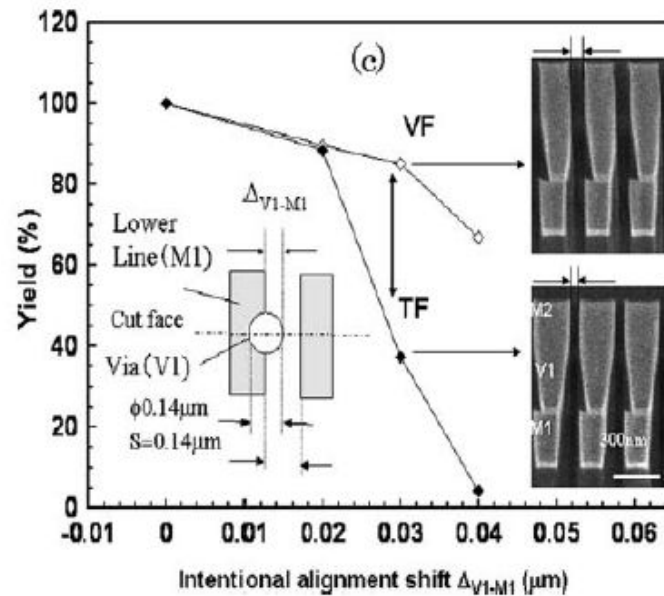


Рис. 20.10 иллюстрирует сдвиг совмещения верхних шин (M2) и переходных контактных окон (V1) (M2- V1) для процесса с первичным формированием областей шин разводки и процесса с первичным формированием областей переходных контактных окон (the trench-first and via-first (VF) processes). В случае TF (the trench-first) процесса рассовмещение (M2 - V1) между верхними шинами (M2) и переходными контактными (V1) отверстиями принципиально большое, поскольку и M2 и V1 независимо выравнивались по отношению к нижним шинам M1. В самом плохом случае, когда направление рассовмещения V1 противоположно направлению рассовмещения M2 величина (M2- V1) существенно возрастает. С другой стороны, для процесса с первичным формированием областей переходных контактных окон это V1 совмещается к M1 за совмещением M2 к V1, что минимизирует (M2- V1).

Рис. 20.10с показывает выход годных шины с шагом 0,28 мкм, с 0,14 мкм переходными контактными отверстиями как функцию намеренного (не случайного) сдвига совмещения (*the yield of 0.28 μm pitched line with 0.14 μm vias as a function of the intentional alignment shift*). Выход VF-МНМ процесса (процесс с многослойной маской, когда первыми формируются переходные контактные отверстия) много больше чем в процессе TF-МНМ (процесс с многослойной маской, когда первыми формируются канавки для шин разводки). Главным образом, выход годных в TF-МНМ процессе радикально уменьшается, когда неслучайный сдвиг совмещения (рассовмещение) был больше, чем 0,3 мкм. Этот факт доказывает, что область совмещения (запас по совмещению) в VF-МНМ много больше, чем в TF-МНМ процессе.

(a) Line top spread (LTS) by shouldering (b) Line edge roughness (LER)

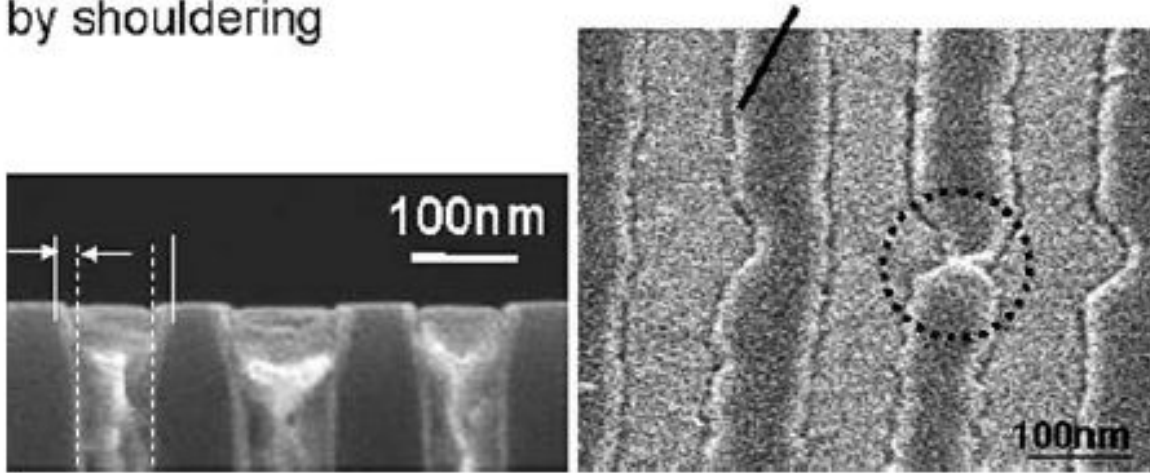


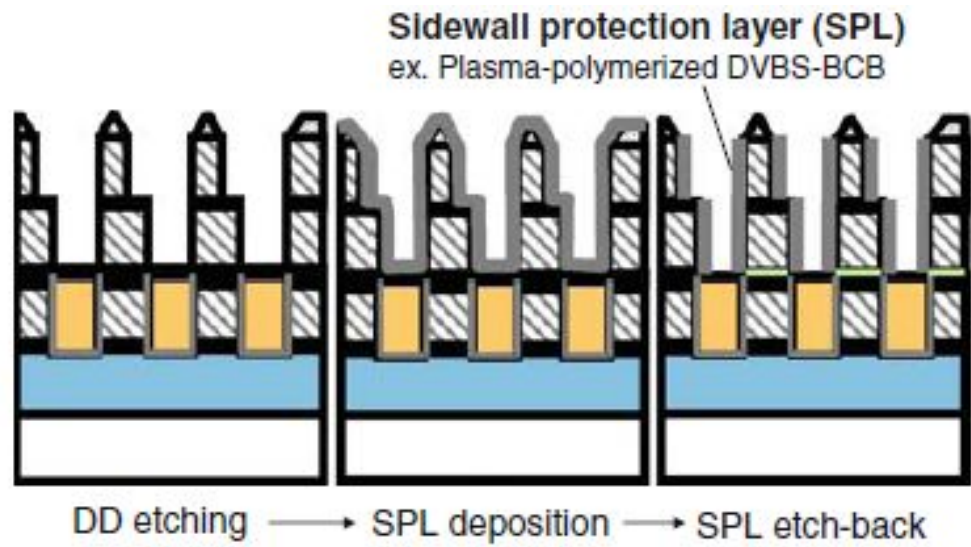
Fig. 20.11 SEM micrographs of Cu DD interconnects with (a) the line top spreading (LTS) and (b) the line edge roughness (LER). These LTS and LER cause the line-to-line shortage or leakage failure in the scaled-down narrow pitched lines

СКАН фотография DD Cu межсоединений с (a) расширением верхней части линии (LTS) и (b) рваность края линии (LER). Эти (LTS) и (LER) вызывают закоротки между линиями или повреждения, связанные с утечками при масштабировании шага шин.

В дополнение к рассовмещению есть большое количество спорных вопросов к процессу с многослойной маской, таких как расширение верхней части шины и рваность края профиля шины. Расширение верхней части шины (LTS) вызывается образованием «плечиков» тонкого края образца многослойной маски из-за более высокой скорости травления этой области относительно центра образца, что сужает область линии шин, как показано на рис.20.11. Рваность края линии области шины вызывается недостаточной плазмостойкостью фоторезиста, вызывающей рваность боковых стенок фоторезиста или, в конечном счете, рваность боковых стенок МНМ. Рваность краем линии МНМ передается в боковые стенки травимой пленки low- k диэлектрика, как показано на рис 20.11b.

Решение, позволяющее преодолеть эти эффекты – покрыть боковые стенки канавок шин слоем тонкой защищающей боковые поверхности пленкой (*sidewall protection layer (SPL)*), такой например, как плазменно - полимеризованная ВСВ пленка [17]. Это метод стимулированного плазмой осаждения ВСВ полимера с низким K ($k=2.6$) и высокой термостабильностью (*PE-MVP - метод*). (Дивинил силоксан бис-бензоциклобутен (*divinyl siloxane bis-benzocyclobutene (DVS-BCB)*). Этот метод включает испарение органического мономера, доставку его в газовую фазу и полимеризацию в плазме для получения полимерной пленки. Метод исключает окисление полимера DVS-BCB в процессе полимеризации в высоком вакууме, что повышает его термостабильность (свыше 400 град по Цельсию) и обеспечивает высокое сопротивление к диффузии меди при 400 град отжиге. Использование Cu/BCB damascene на 35% снижает емкость межсоединений по сравнению с Cu/SiO₂ damascene. Т.Е. ВСВ также может использоваться, как межслойный диэлектрик.

Fig. 20.12 Process sequence of SPL formation to reduce the LTS and LER



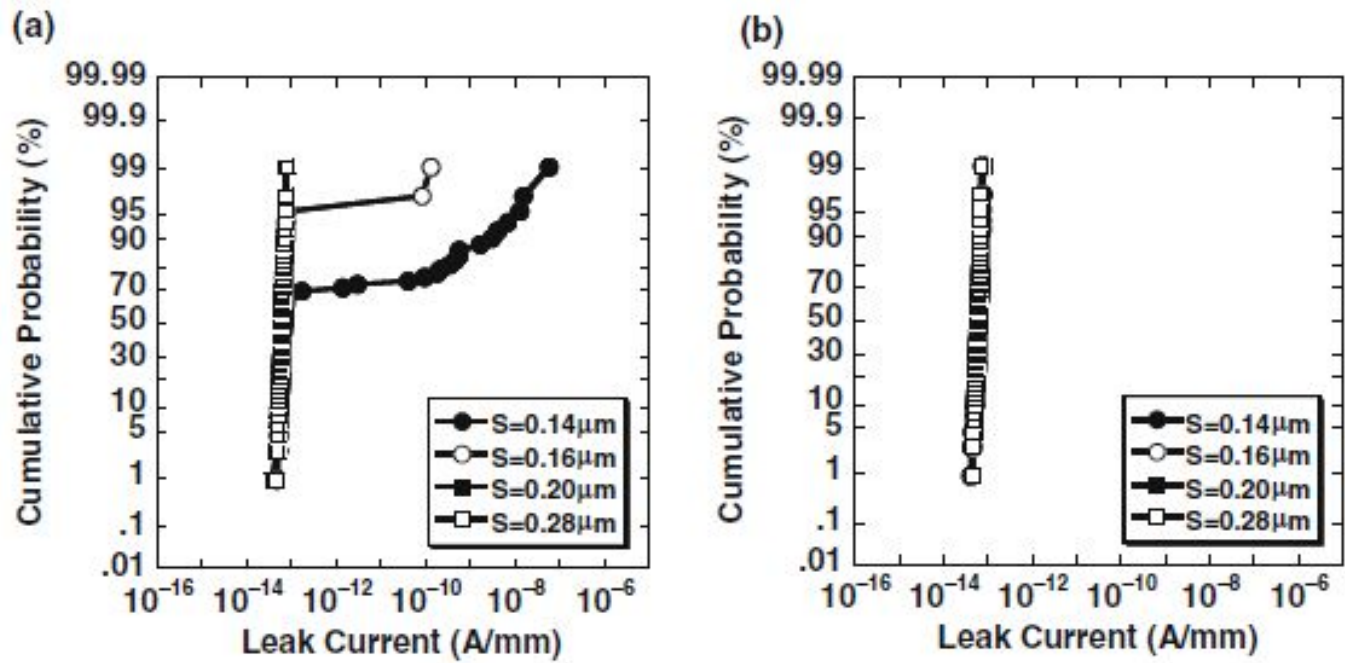


Fig. 20.13 The line-to-line leakage of the spaces from 0.14 to 0.28 μm (a) without and (b) with SPL of plasma-polymerized BCB [17]. The SPL eliminates the line-to-line leakages due to reductions in LTS and LER

Как показано на рис. 20.12, тонкая SPL пленка конформно осаждается на профилированный low- k ILD и травится в etch-backed процессе, так, что остается только на боковых стенках low- k ILD. В случае с 5 нм толщиной VCB, LTS уменьшается с 30 до 20 нм и LER снижается с 40 до 10 нм. Рис. 20.13 показывает токи утечки между расположенными рядом шинами для нескольких межшинных промежутков. Отказ схем, связанный с шина-шина утечкой без использования SPL наблюдается для межшинного промежутка менее 0,16 мкм, при этом при использовании SPL таких отказов нет. SPL станет очень важным технологическим приемом не только для избежания шин-шиной утечки, но также и для повышения TDDB (Time Dependent Dielectric Breakdown – зависящего от времени пробоя диэлектрика) надежности.

Для производства межсоединений по ДД технологии, канавки шин и переходные контактные отверстия последовательно формируются в пленке межслойного диэлектрика. Для исключения повреждений, характерных для технологии, использующей обычную фоторезистивную маску, была разработана технология использования многослойной твердой маски, однако при этом появились такие проблемы, как расширение верхней части линии (top spreading (LTS)) и неровность края линии (line edge roughness (LER)). Последовательность литографических процессов, таких, как VF (via-first) или TF (trench first) процессы определяет величину рассовмещения областей шин и переходных контактных отверстий.

Дополнительные особенности процесса Damascene