

Воспоминание о будущем

Ни одна инновация за последние годы не вызвала такого оживления в мире микроэлектроники, как переход к медной металлизации. С момента появления первых сообщений о ней в 1997 году перед промышленностью встал гамлетовский вопрос: “принять или не принять?” Движение к принципиально новому поколению межсоединений, активно начавшееся год назад, называлось как угодно – от “важнейшего преобразования” до “ужасающего вызова”. Сегодня по мере появления “медных” схем фирм IBM, Motorola, AMD, NEC, VLSI, Mitsubishi вопрос о возможности применения медной металлизации решен, но единого мнения относительно пути реализации замены пока нет.

С развитием полупроводниковой технологии и уменьшением размеров элементов все большее внимание приходится уделять проблеме задержки сигнала в соединительных линиях. Удельное сопротивление и паразитная емкость межсоединений начинают играть важную роль при определении плотности упаковки элементов схемы, ее надежности и производственных издержек. Это и объясняет интерес полупроводниковой промышленности к меди и новым изолирующим материалам с низкой диэлектрической постоянной (диэлектрикам с низким k). По сравнению с алюминием удельное сопротивление меди ниже – 1,7 мкОм.см даже при осаждении в узкие канавки против 2,8 мкОм.см у

алюминия. А это выливается в 15%-ное увеличение быстродействия, что очень важно для современных ИС, в первую очередь микропроцессоров и СОЗУ с элементами субмикронных размеров. Поскольку при той же величине сопротивления, что у алюминиевой металлизации, ширина и толщина медных линий может быть меньше, уменьшается и паразитная емкость боковых стенок. Замена SiO_2 материалом с низким k способствует дальнейшему уменьшению паразитной емкости и, следовательно, снижению потребляемой мощности схемы.

Второе преимущество меди – высокая устойчивость к электромиграции, одной из самых серьезных проблем алюминии-

вой металлизации. Как показали испытания фирмы IBM, стойкость медных межсоединений к электромиграции и миграции носителей под воздействием механических напряжений на два порядка выше, чем у алюминиевых. Это значит, что медь способна выдерживать высокую плотность мощности и сможет найти применение и в аналоговых схемах. В третьих, применение меди позволит полностью или частично отказаться от многих операций, вызывающих снижение выхода годных изделий, в частности от химико-механической полировки (ХМП) вольфрама. Уменьшение длины токопроводящих дорожек обеспечивает увеличение плотности упаковки ИС и, следовательно, уменьшение числа уровней металлизации (в некоторых случаях в два раза по сравнению со схемами с алюминиевой или вольфрамовой металлизацией, рис. 1). Разработчики смогут разместить на кристалле до 150–200 млн. транзисторов. Сторонники применения меди уверены, что даже изготовители ДОЗУ вскоре начнут использовать этот материал в 1-Гбит схемах. И, наконец, в четвертых, менее осязательное, но

не менее важное достоинство, – рыночная привлекательность схем с медной металлизацией.

Почему промышленность, знакомая с достоинствами меди более 30 лет, обратилась к ней только сейчас? Причин несколько. Во-первых, из-за высокого коэффициента диффузии медь действует на полупроводник как “отравляющее вещество” и, попадая в активную область прибора, может вызвать его отказ. Чтобы избежать этого, пришлось разработать методы формирования диффузионных барьеров, а также изолировать производственные участки нанесения медных покрытий от остальных технологических помещений. Во-вторых, существует естественное противодействие введению в хорошо отработанный производственный процесс новых материалов, поскольку это, как правило, связано с решением многих непредвиденных проблем и, следовательно, достаточно большими затратами.

Основные принципы создания схем с медной металлизацией были представлены фирмами IBM, Motorola и Texas Instruments на декабрьской Международной конференции по электронным приборам (IEDM) 1997 года. Из сообщений этих фирм можно представить технологию изготовления “медных” схем следующим образом. Первый уровень металлизации для формирования контактов к областям истока, стока и затвора – вольфрамовый. Этот металл служит также дополнительным барьером, пре-

ВОЗВРАТ К МЕДИ

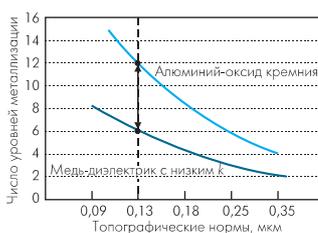


Рис. 1. Уменьшение числа уровней металлизации в результате применения медных межсоединений

дотвращающим отравление активных областей прибора медью. Часть вольфрамовых токопроводящих дорожек может быть очень малой длины. Остальная металлизация, в том числе и покрытия сквозных отверстий, — медная. Для металлизации сквозных отверстий в многоуровневой системе еще несколько лет назад был разработан так называемый дамасский процесс (в честь металлургов древнего города Дамаска, поставлявших в средневековые лучшую сталь для сабель). В традиционной технологии рисунок токопроводящих линий и сквозные отверстия формируют поочередно методами фотолитографии на осажденном на кремниевую пластину слое металла. Зазоры между соединительными линиями и сквозными отверстиями заполняют диэлектриком (оксидом кремния) и с помощью ХМП удаляют избыточный материал. Все эти операции входят и в дамасский процесс, но в обратном порядке: сначала на слое оксида создают рисунок токопроводящих линий или сквозных отверстий, а затем осаждают металлическую пленку и проводят ХМП.

Двойной дамасский процесс одновременного формирования рисунков линий и отверстий, позволивший исключить один этап осаждения металла и один этап ХМП (рис.2), был предложен фирмой IBM в начале 80-х годов. Он начинается с осаждения слоя оксида кремния, поверх которого наносят пленку нитрида кремния, выполняющую функцию износоустойчивой маски/ограничителя травления. На пленке методом реактивного ионного травления создают рисунок сквозных отверстий, после чего осаждают второй слой SiO_2 и затем тем же способом формируют рисунок токопроводящих линий. Травление рисунка на втором слое SiO_2 проводят до пленки нитрида кремния или до слоя ме-

таллизации на участках, где пленка нитрида была удалена под сквозные отверстия. Формирование рисунка медной металлизации таким способом требует на 20-30% меньше операций, чем обычная технология субтрактивного травления. В результате затраты на изготовление токопроводящих линий можно снизить на 20-30%, а затраты на обработку пластины — на 10–15%. Это, по утверждению многих экспертов, — одно из важнейших достоинств новой технологии: изготовители ИС готовы на все, лишь бы сократить издержки производства хотя бы на 3%. Но на освоение даже обычного дамасского процесса требуется немало времени и денег — предупреждает фирма Motorola.

Важную роль в новой технологии играет материал диффузионного барьера, наносимого поверх диэлектрика для предотвращения диффузии меди в активные области прибора. Этот материал должен также выполнять функцию улучшения адгезии меди к пластине. Хотя разработчики не спешат обнародовать, какой конкретно материал ими выбран для создания барьерного слоя, скорее всего, это материал на основе тантала (чистого или с небольшим содержанием азота). На фирме Genus предложен процесс осаждения диффузионного барьера на основе нитрида вольфрама, который может стать альтернативой танталу и его соединениям.

Барьерные пленки толщиной менее 50 нм наносят в процессе ионно-плазменного осаждения из паровой фазы. На этом этапе одна из самых критичных операций — очистка поверхности. После ее проведения методом плазменного осаждения из паровой фазы выращивают тонкий слой-затравку меди (возможно, в будущем для этого будут применять химическое осаждение из паровой фазы). На этом этапе особенно жесткие требования предъявляют к

непрерывности слоя-затравки и плотности пор в нем, с тем чтобы предотвратить проколы в выращиваемом основном медном слое.

Но, пожалуй, особый интерес вызвал отказ фирмы IBM от нанесения меди методом плазменного или химического осаждения из газовой фазы (первоначально они рассматривались как самый простой способ получения тонких медных пленок). Вместо этого фирма обратилась к так называемому процессу электрохимического осаждения, который обеспечивает большую скорость роста и высокую однородность пленок меди при комнатной температуре. Этот процесс осаждения узких токопроводящих медных линий на полиимид был разработан в Исследовательском центре Ватсона фирмы IBM еще в конце 60-х годов. Но тогда он рассматривался, как лю-

сложной схемы нагрева, как при нанесении алюминиевой металлизации. Но этот процесс и не прост, особенно если принять во внимание высокое аспектное отношение отверстий (глубина до 1 мкм при ширине 0,25 мкм) и необходимость тщательного контроля скоростей миграции, диффузии и конвекции ионов меди для обеспечения высокой скорости переноса массы электроактивного материала. Пластина служит катодом, медь — анодом.

Как и в других операциях осаждения, качество процесса оценивают по скорости осаждения, морфологии выращенной пленки, равномерности покрытия ступенек, полноте заполнения отверстий медью, однородности пленки по площади пластины и от пластины к пластине и т.п. По мнению специалистов фирмы Semitool, пионера в области электрохимического оса-

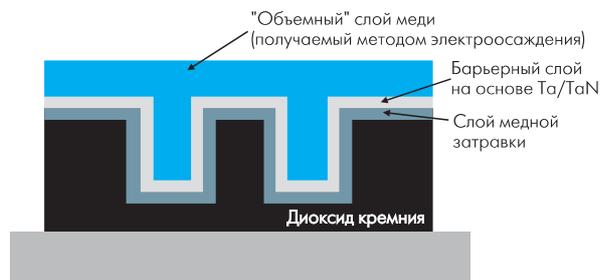


Рис. 2. Архитектура с двойной насечкой и диффузионными барьерами на основе титана

бопытный курьез: “Зачем он? Ведь алюминий будет служить еще долго”. Сейчас же, по убеждению экспертов, метод электрохимического осаждения будет основным при изготовлении по крайней мере следующих пяти поколений ИС (с топологическими нормами 0,18, 0,15, 0,13, 0,10 и 0,08 мкм). Затем он, очевидно, будет заменен химическим осаждением из газовой фазы.

Процесс электрохимического осаждения предусматривает погружение пластины с тонким медным слоем (затравкой) в раствор, содержащий двухвалентную медь. Он не требует сверхвысокого вакуума или

ждения, ключевые характеристики процесса — состав раствора (например, на основе сульфата меди, серной кислоты, воды) и способ подачи тока. Но следует помнить, что плотность тока у верхнего края канавки и боковых стенок иная, чем у дна сквозного отверстия. Применение немодифицированного электролита приводит к неравномерной скорости роста пленки у вершины и у дна структуры. Чтобы устранить неравномерность роста, на электроды системы подают периодически изменяемый потенциал, который создает условия, наблюдаемые при последовательных операциях осаждения/травле-

ния. Путем подбора соответствующей формы волны и амплитуды тока и напряжения можно добиться более быстрой сошлифовки меди в областях с более высокой плотностью тока. Таким образом, электроосаждение можно проводить при постоянном токе, при постоянном напряжении или при изменяемых формах волны тока или напряжения. При постоянном токе упрощается контроль осаждаемой пленки. Для проведения процесса при постоянном напряжении, а также при переменных формах волны тока и напряжения необходимо сложное оборудование и устройства управления, но в этом случае легче получать требуемые свойства и однородность пленки по толщине.

Другой способ устранения неравномерности роста осаждаемых пленок – так называемое выравнивание за счет внесения в раствор органических добавок (поверхностно-активных агентов: осветлителей и эгализаторов). Осветлители маскируют участки/плоскости предпочтительного роста, а эгализаторы обеспечивают рост более толстых пленок в небольших выемках или более тонких пленок на небольших выступах. Процесс успешного электроосаждения меди в значительной степени зависит от подбора соответствующих агентов и соотношения их концентраций. Правда, пока реакция воздействия поверхностно-активных агентов полностью не изучена.

После осаждения меди необходимо удалить избыточный материал и планаризировать поверхность пластины, что выполняют ХМП-методом. По сложности возникающих проблем этот процесс не уступает операции осаждения пленок меди. Основная трудность – обеспечение одновременной обработки меди, материала диффузионного барьера и диэлектрика. При этом скорости полировки относительно мягкой меди и твердого тугоплавкого тантала

должны быть одинаковыми. Кроме того, необходимо исключить образование выемок в металлизации и эрозии диэлектрика. Это может потребовать проведения двухступенчатого процесса: непосредственной полировки металлизации (путем окисления меди до CuO и Cu_2O) и последующей очистки с целью удаления следов суспензии, оксидов и металла, что тоже непростая задача. Из-за высокой электрохимической активности и отсутствия естественного защитного окисла медь легко корродирует. Для предотвращения коррозии необходимо применять пассивирующее покрытие. Ко всему прочему, сейчас отсутствуют коммерческие суспензии для ХМП меди и в основном используется суспензия на основе оксида алюминия для химико-механической полировки вольфрама, хорошо знакомая специалистам.

Вскочить в медный фургон спешат не только производители ИС, но и поставщики оборудования, материалов и корпусов, а также специалисты в области электронных систем проектирования. Десятки малых и средних компаний по поставке технологического оборудования спешно ищут стратегических партнеров, стараясь удержаться на рынке при крутом повороте к новой технологии. Компания Johnson Matthey Electronics – поставщик высококачественных металлов – расширила производственные площади с целью довести выпуск меди до 40 т в год. По оценкам аналитической фирмы The Information Network, продажи оборудования формирования медных межсоединений к 2003 году могут достичь 1 млрд. долл. Большинство, если не все, поставщики установок плазменного осаждения из паровой фазы разрабатывают системы одновременного нанесения барьерных танталовых слоев и затравочных слоев меди. Первой такую установку модели Endura Electra Cu представила

на выставке Semicon/Japan в 1997 году фирма Applied Materials – крупнейший производитель технологического оборудования. Система предназначена для осаждения пленок по разработанной на фирме ионно-плазменной технологии Electra IMP (Ion Metal Plasma). Она содержит четыре камеры: предварительной очистки, плазменного осаждения барьерного слоя тантала или нитрида тантала и двух камер выращивания затравочного слоя меди. Восемь из десяти изготовителей заказных логических схем, изучающих возможности медной технологии, приобрели у Applied Materials не менее 25 рабочих камер системы Endura Electra Cu.

Интерес представляет установка нанесения пленок медной затравки (в том числе и методом химического осаждения из металлоорганических соединений) модели Connexion, разработанная по контракту с Sematech на фирме CVC. В начале 1998 года фирма Novellus Systems (основной конкурент Applied Materials и поставщик оборудования для IBM) выпустила установку плазменного осаждения меди из газовой фазы магнетронного типа с полым катодом модели Inova HCM. Установка предназначена для нанесения барьерных пленок нитрида тантала и медной затравки. Созданию этой системы способствовало приобретение в 1997 году за 150 млн. долл. технологии плазменного осаждения у фирмы Varian Associates.

Но наибольший интерес представляют системы электроосаждения меди. Лидер в этой области – недавно образованная компания Semitool, которая уже отгружает установки второго поколения моделей LT-210 – промышленный тип, и Equinox – лабораторный. Уже в середине 1998 года фирма еженедельно выпускала одну установку электроосаждения. К 2000 году она намерена дове-

сти еженедельный выпуск до четырех-пяти систем. Систему электроосаждения с производительностью 40–60 пластин/ч в середине 1999 года планировал выпустить и недавно образованная фирма CuTek. В системе оригинальной конструкции использован нерастворимый анод, а для восстановления раствора в него добавляют соль меди. Стоимость системы – 2–3 млн. долларов.

Агрессивную компанию по продвижению первого полного комплекта оборудования формирования медных межсоединений проводит фирма Novellus. В середине 1998 года она выпустила систему электроосаждения меди модели Sabre (по-видимому, эта система была использована IBM при отработке двойного дамасского процесса). В комплект оборудования помимо систем Sabre и Inova HCM (поставки обеих должны были начаться в 3 кв. 1998 года по стартовой цене 3 млн. долл.) войдут установки моделей Speed (осаждение диэлектриков и масок нитрида кремния из газовой фазы в присутствии фторированной высокоплотной плазмы) и Sequel (нанесение антиотражающего покрытия). Кроме того, в мае 1998 года фирма заключила соглашения на разработку экономически эффективных промышленных систем травления диэлектрика (с Lam Research) и ХМП-установок (с Integrated Process Equipment Corp. – IPEC). В результате в комплект оборудования фирмы войдут система травления оксида при проведении двойного дамасского процесса 4520XLE и ХМП меди Teres (обе фирмы Lam Research), установка ХМП меди AvantGaard (IPEC) и очистки медного покрытия после ХМП Synergy Performa (фирмы OnTrack Systems – отделения Lam Research). Последняя создается в рамках программы модификации существующего ХМП-оборудования, проводимой по контракту с Sematech, и



предназначена для ХМП меди в промышленных условиях. Система будет оснащена усовершенствованными средствами подачи новых перспективных химических реагентов полировки и очистки пластины. Уже сейчас остаточная концентрация атомов меди после очистки на установке Synergy в запатентованных растворах не превышает 10^{-10} см⁻².

Фирма Applied Materials не намерена уступать позиции лидера на рынке технологического оборудования и надеется на успех инновационного проекта, проводимого совместно с Intel и направленного на создание приемлемых для промышленного освоения методов травления меди. Это позволит формировать медные межсоединения ИС методом субтрактивного травления требуемого рисунка. Метод хорошо знаком производителям полупроводниковых приборов, но широкого распространения не получил из-за низкой скорости травления меди. Специалистам Applied Materials, по-видимому, удалось справиться с этой проблемой: скорость травления предложенного ими процесса превышает 500 нм/мин. При этом на протяжении более чем 72 ч коррозии меди не наблюдалось.

Наметившийся поспешный (иногда чересчур) переход к медной технологии заставил полупроводниковые фирмы всеми средствами добиваться выгодного положения на старте, но практически ни одна из них, за исключением IBM – общепризнанного лидера в области новой технологии, – не имеет явных преимуществ. По утверждению аналитиков фирмы Cowen & Co., IBM на 6–12 месяцев опережает самых активных разработчиков медных межсоединений. Фирма провела типовые испытания схем в Центре перспективной полупроводниковой технологии отделения микроэлектроники в Ист-Фишбилле. В сентябре 1998 года она начала отгрузки опытных схем микро-

процессора типа 740/750 семейства PowerPC с медными межсоединениями. В начале 1999 года IBM планировала начать поставки заказчикам схем, изготавливаемых по технологии пятого поколения (CMOS 7S) на предприятии вблизи г. Барлингтона, шт. Вермонт. Двойной дамасский процесс формирования медных токопроводящих линий будет использован и при изготовлении логических ИС с шестиуровневой металлизацией и 0,22-мкм топологическими нормами. Ширина медных токопроводящих линий – от 0,27 до 0,81 мкм, эффективная длина канала – 0,12 мкм. Число вентиля в схеме достигает 12 млн., что соответствует 150 млн.–200 млн. транзисторов на кристалле. Рабочее напряжение новых схем – 1,8 В. Фирмой также разработан керамический корпус с матричным расположением шариковых выводов для герметизации монтируемых методом перевернутого кристалла схем с медной металлизацией. Новую схему микропроцессора PowerPC готова использовать Apple Computer в 400-МГц модели компьютера Macintosh.

Старается не отстать от IBM и фирма Motorola, планирующая в ближайшее время на предприятии MOS 13 в Остине приступить к производству быстроедействующих схем PowerPC и СОЗУ с медными межсоединениями по 0,2-мкм КМОП-технологии с шестиуровневой металлизацией. Первые приборы должны были появиться в первой половине 1999 года. В последующие пять лет фирма намерена перевести производство всех изделий на медную технологию. Возможно, процесс меднения будет освоен и на совместном предприятии фирм Siemens и Motorola в Уайт-Оук, шт. Виргиния.

На фирме AMD, изучающей медную технологию с 1995 года, успешно изготовлены две опытные схемы. Одна, рассматриваемая как чисто экспериментальная, содержит все не-

обходимые “гайки и винты” ИС: транзисторы, соединения, контактные площадки. Вторая – более сложная схема СОЗУ емкостью 1 Мбит. Чтобы снизить затраты на НИОКР, AMD заключила межлицензионное соглашение с Motorola, по которому обе фирмы будут проводить совместную разработку медной технологии на предприятии Motorola в Остине и схем флэш-памяти в головном институте AMD в Саннавайле. AMD намерена использовать медные межсоединения и в новом процессоре K7, который она, по-видимому, начнет выпускать на строящемся в Дрездене предприятии. Фирма надеется за счет перехода к медной металлизации создать процессор на частоту 1 ГГц и тем самым сохранить конкурентоспособность своих изделий на рынке больших компьютеров. Освоение медной технологии может оказаться важным фактором в конкурентной борьбе AMD с фирмой Intel за ведущее положение на рынке микропроцессоров. Особенно если учесть тот факт, что Intel пока занимает позицию “поживем, увидим” и не планирует применять в своих изделиях медные межсоединения ранее 2001-2002 года, когда приступит к освоению 0,13-мкм технологии. Пока же фирма применяет так называемую C-4 медную технологию в корпусах микропроцессоров Pentium, Pentium Pro и Celeron.

Еще в 1989 году на симпозиуме по СБИС технологии фирме NEC была присуждена премия за первые исследования в области медных соединений, но сейчас японцы, по оценкам Hitachi, на пять лет отстают от американских фирм. Первые “медные” схемы фирм Hitachi и NEC появятся лишь в конце 1999 года. Фирма Mitsubishi в начале этого года объявила о планах по использованию двойного дамасского процесса для формирования медных соединений в двух верхних уровнях схем с шести-

уровневой металлизацией (остальные – алюминиевые), изготавливаемых по 0,18-мкм технологии. Ряд японских компаний, в том числе Toshiba, пока осваивают двойной дамасский процесс для формирования алюминиевой металлизации, считая что это позволит им снизить издержки производства.

Перейти к медной технологии в начале 1999 года при производстве 64-разрядного микропроцессора типа Alpha планировала корейская фирма Samsung. НИОКР в области медных межсоединений проводят тайваньские фирмы Taiwan Semiconductor Manufacturing Co. (TSMC) и United Microelectronics Corp. (UMC).

Итак, многие фирмы заняты разработкой медной металлизации. Однако скорее всего она начнет внедряться лишь при переходе к 0,18-мкм топологическим нормам и получит широкое распространение в схемах с линиями шириной 0,15–0,13 мкм. Сейчас нет смысла переоснащать производство схем с минимальными размерами элементов 0,25–0,35 мкм. Поэтому алюминий окончательно исчезнет с полупроводниковых заводов лишь через 10 лет. К тому же, сейчас затраты на оснащение только одной линии по производству медных схем достигают 15 млн.–20 млн. долл. Медные межсоединения, по-видимому, в первую очередь найдут применение в схемах, работающих на частотах 1 ГГц и выше. И движущей силой в развитии этой технологии станет не вычислительная техника, а средства связи. Эпоха меди наступит постепенно, а не внезапно, как удар молнии.

Semiconductor International, June, 1998
IBM Research Magazine, 1997, N4
Electronic News, Dec. 15, 1997
Micronews, 1998, V.4, N2
Electronic News, April 12, 1999
Semiconductor International, March, 1999