

Оптимизация гальванических процессов в современном полупроводниковом производстве

Часть 1

Д. Суханов¹

УДК 621.357 | ВАК 05.27.06

На микроэлектронном производстве каждая характеристика изделия, получаемого на полупроводниковой пластине, должна соответствовать строгим спецификациям. Это необходимо для достижения требуемого качества продукции и высокого уровня выхода годных. Буквально каждый процесс на такой фабрике должен быть доведен до совершенства. Это относится в том числе к процессам электрохимического осаждения (ECD – electrochemical deposition), или гальваническим процессам. Они должны быть четко отработаны, что позволит создавать необходимые топологические элементы идеального размера и формы без брака (пустот). Все это должно быть выполнено с учетом общей стоимости и эксплуатационных затрат. Ведущие производители оборудования для ECD, такие как Lam Research, RENA, ClassOne и др., разработали каждый свою серию оборудования, чтобы передать работающим с гальваническими покрытиями специалистам свой опыт и помочь оптимизировать производственные процессы. В статье рассказывается об основных принципах и способах оптимизации ECD.

ЧТО ТАКОЕ «ПЛАСТИНА В ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКЕ»?

Фундаментальное понимание основной электролитической ячейки обеспечивает основу для более глубокого изучения процессов нанесения покрытий в полупроводниковой промышленности. Самые современные способы нанесения покрытия на производстве полупроводников основаны на тех же принципах, что и стандартная электролитическая ячейка. На рис. 1 [1] изображена электролитическая ячейка со следующими функциональными компонентами: положительный и отрицательный электроды, электролит и источник питания. В конкретном используемом примере медные электроды погружены в один электролит на основе сульфата меди и подключены к источнику питания.

К электродам прикладывается потенциал, замыкая цепь, состоящую из электронов, мигрирующих по проводам, соединяющим электроды и источник питания, результирующих реакций электролитического окисления

и восстановления на электродах и потока ионов через электролит. Источник питания «подает» электроны на катод, где реакции восстановления приводят к образованию металлической пленки (тонкой пленки меди в данном случае). Перенос электронов от анода приводит к реакциям окисления, которые высвобождают ионы меди в раствор, восполняя те, которые «потребляются» при образовании металлической пленки на катоде.

КАК ВЫГЛЯДИТ СОВРЕМЕННЫЙ РЕАКТОР ДЛЯ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ?

Базовая электролитическая ячейка действительно является основой всех реакторов для нанесения металлических покрытий на полупроводниковые пластины, включая реакторы, используемые для изготовления наиболее продвинутых элементов металлизации. Несмотря на использование в полупроводниковой промышленности нескольких типов реакторов, спецификации ведущих «чип-мейкеров» требуют использования реактора фонтанного типа и обработку по одной пластине. Все основные производители полупроводников

¹ ООО «Остек-ЭК», заместитель технического директора по продуктам для полупроводниковых производств, Sukhanov.D@ostec-group.ru.

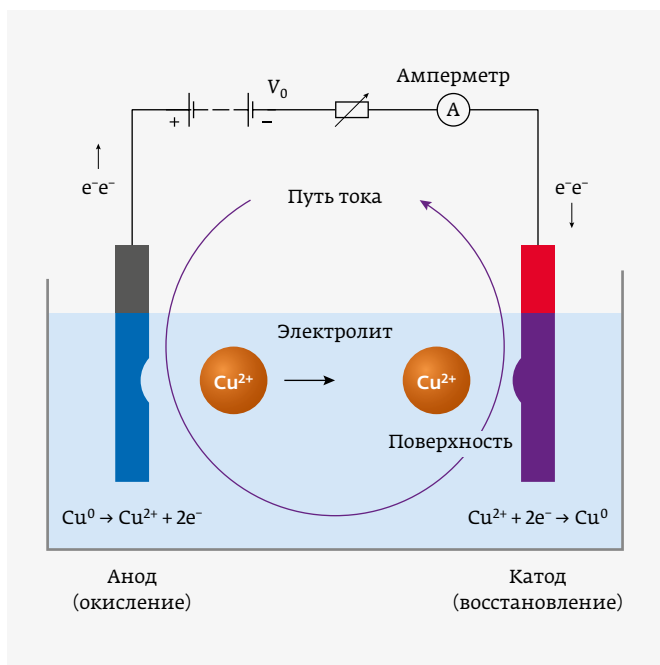


Рис. 1. Электролитическая ячейка

полагаются на ту или иную версию реактора, в котором полупроводниковая пластина располагается лицевой стороной вниз.

Каждый из основных компонентов, показанных на рис. 1 [1], присутствует в современном реакторе (рис. 2) [1]. На рис. 1 показаны электроды, ориентированные вертикально, а в современном реакторе анод размещается на дне ячейки с горизонтальной ориентацией.

Это должно поддерживать эффективное взаимодействие с катодом, которым при обработке полупроводников является сама пластина. Пластина также ориентирована горизонтально над анодом лицевой поверхностью вниз. У этой конфигурации есть явные преимущества, которые будут рассмотрены далее.

Все электролиты для ECD на полупроводниковых производствах – узкоспециализированные. Анод и пластина электрически подключены к источнику питания через оборудование и проводку. В современном реакторе для работы с полупроводниковыми пластинами источник питания довольно сложен с точки зрения управления. Он должен включать в себя возможность высокоточного контроля тока (заряда), что имеет решающее значение для повторяемости процесса.

СВЯЗЬ МЕЖДУ СИЛОЙ ТОКА И РАЗМЕРАМИ ЭЛЕМЕНТОВ, НА КОТОРЫЕ НЕОБХОДИМО ОСАДИТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ ПЛЕНКУ

Важно отметить, что для осаждения высококачественных тонких пленок гальваническим способом необходимо, чтобы система работала в состоянии дефицита электронов. Другими словами, напряжение регулируется таким образом, что ток ограничивает скорость реакции. Это гарантирует, что подача электронов служит ограничивающим фактором в реакциях восстановления на поверхности пластины.

Отсутствие электронов обеспечивает два ключевых преимущества процесса нанесения покрытия:

- «отсутствие посягательства» на предельную плотность тока для конкретного процесса, которая при

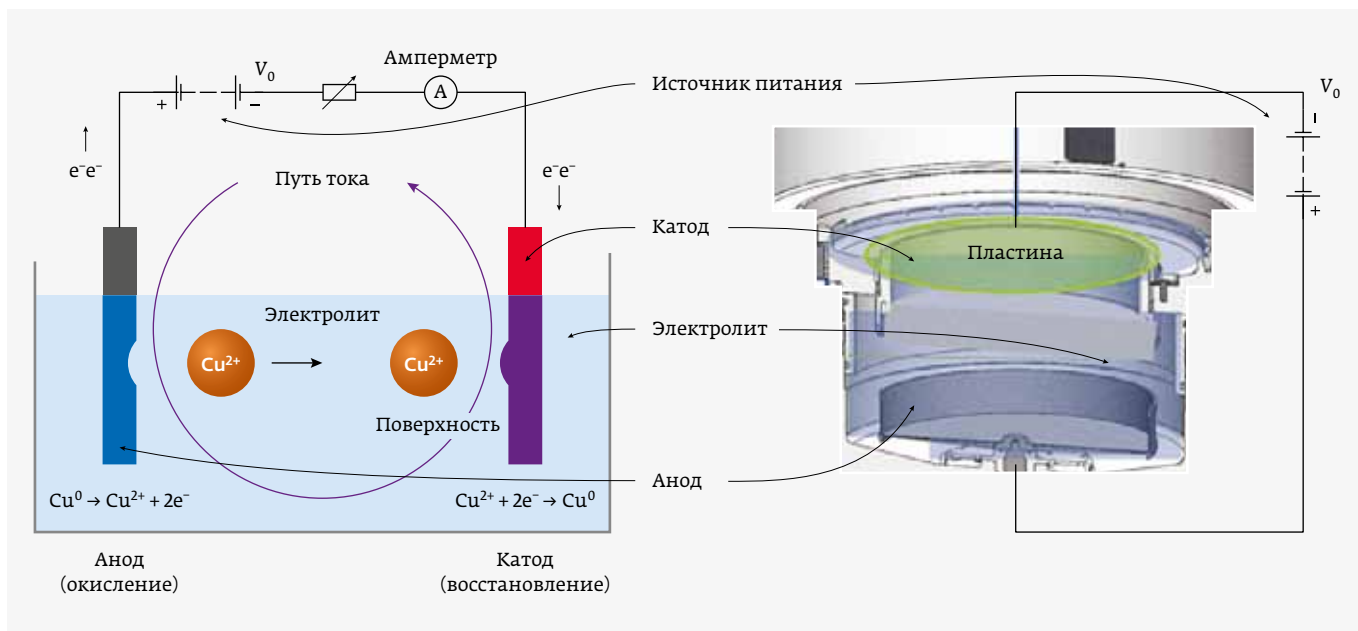


Рис. 2. Электролитическая ячейка (а) и реактор (б)

появлении приводит к образованию «отложений» низкого качества;

- обеспечение очень точного контроля скорости реакции и, следовательно, скорости осаждения, так как ток контролируется очень точно; ток, подаваемый на пластину, создает металлический материал – тонкую металлическую пленку в соответствии со специфическими электрохимическими реакциями для данного процесса.

Учитывая эффективность реакции, можно быстро понять, что количество молей произведенных электронов приведет к пропорциональному количеству молей осажденного твердого металла (в данном случае меди). Отсюда следует, что при заданном количестве молей электронов образуется определенная масса плакированного металла.

Поскольку плотность осажденной меди постоянна, эта масса меди имеет определенный объем. Таким образом, объем меди, нанесенной на пластину, прямо пропорционален количеству молей электронов, поступающих в систему. Это означает, что современные системы ECD могут сформировать точный объем металла на поверхности пластины, контролируя общий приложенный ток.

Физический объем рассчитывается как произведение ширины, длины и высоты покрытия. Горизонтальные размеры элемента контролируются самой пластиной. В случае элементов, нанесенных на сформированную маску (рисунок структур на пластине), горизонтальные размеры элемента строго определяются рисунком после процесса литографии. Эта область называется открытой площадкой, поскольку она доступна для создания покрытия.

Поскольку приложенный ток встречается с контролируемой по размеру областью, то он распределяется по этой области, а это означает, что распределение тока действительно является распределением по площади.

Таким образом, плотность тока влияет на скорость нанесения покрытия. Что касается формирования электрических элементов, плотность тока определяет скорость вертикального роста плакированного материала, образующего необходимую тонкую пленку. Другими словами, плотность тока, применяемого в данной системе, легко преобразовать в показатель толщины за время.

Контроль окончательной высоты покрытия требует контроля продолжительности процесса. Этого можно достичь, выполнив этап нанесения покрытия до установленного времени. Но есть дополнительная возможность контроля, которая обеспечивает еще большую точность, а именно контроль общего заряда. Завершение этапа гальванического процесса в соответствии со временем предполагает, что ток идеально соответствует заданному, а также в значительной степени

зависит от точности функций синхронизации системы. Однако более точный режим управления высотой покрытия достигается путем прекращения этапа нанесения покрытия при достижении определенного заряда. Становится очевидным, как плотность тока, протекающего в течение определенного времени, приводит к определенной толщине. Завершение процесса на основе контроля заряда позволяет точно управлять током в современных источниках питания.

Для обеспечения требуемого качества процесса и достижения требуемой толщины и равномерности покрытия рекомендуется применять:

- предварительный процесс плазменной обработки;
- предварительный процесс смачивания (увлажнения) пластины.

Этапы предварительной обработки плазмой или удаления органических загрязнений рекомендованы во всех случаях, за исключением тех, когда доказано, что в данном процессе нет необходимости или кислородная плазма может каким-либо образом повредить пластине или подложке. Цель данного процесса – создание легко смачиваемой поверхности. Смачиваемость важна для пластин и подложек с уже сформированным рисунком. Также данный процесс полезен в целом, поскольку органические монослои легко образуются даже на самых чистых производствах.

Что касается стадии предварительного смачивания, то многие виды покрытий не требуют его, а другие не могут быть надежно завершены без него. Данный вопрос требует отдельного обсуждения и выходит за рамки этой статьи.

КАК ДОБИТЬСЯ ТРЕБУЕМОЙ РАВНОМЕРНОСТИ ПОКРЫТИЯ

По сути, на равномерное осаждение металла внутри (в отверстиях) и на поверхности полупроводниковой пластины влияют два основных фактора:

- определение и контроль профиля электрического поля;
- поддержание доступности катионов.

Из-за этих факторов разные гальванические системы могут значительно различаться по своим характеристикам и возможностям создания тех или иных структур на пластине. Конструкция конкретной системы может существенно улучшить или ограничить достижимые характеристики по равномерности. Простой пример – это система типа Wet Bench, добиться равномерности в которой можно в лучшем случае на уровне 10–15%, что недопустимо на современном полупроводниковом производстве. Современные системы ECD специально разработаны для улучшения равномерности (единицы процентов), что позволяет им по праву занять свое место на полупроводниковом производстве.

ПРОФИЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ – ПАРАЛЛЕЛЬНОСТЬ И РАДИАЛЬНАЯ СИММЕТРИЯ

Приложение потенциала к реакторной системе создает электрическое поле в ней. Это поле продвигает катионы – ионы металлов, которые вступают в реакцию с образованием металлического покрытия, – к отрицательно заряженной пластине. Аналогичным образом происходит притягивание электронов к положительно заряженному аноду. Величина силы, которую испытывает ион, напрямую коррелирует с его близостью к электроду и током, подаваемым на электрод. Поскольку на аноде образуются положительные ионы, то они «отталкиваются» от него и притягиваются к пластине.

«Центр» между анодом и катодом (пластиной) имеет решающее значение в архитектуре ректора. Статическая пластина, которая не идеально параллельна своему аноду, будет испытывать внутреннюю линейную неоднородность из-за механической близости. Эту ошибку можно исправить только более жесткой механической конструкцией.

Если статическое положение пластины способно значительно увеличить такую ошибку, то при вращении системы может возникнуть нарушение радиальной симметрии, но его легко исправить с помощью регулировки скорости вращения пластины. Таким образом, параллельность между пластиной и анодом имеет универсальное значение, так как процентная разница в этом расстоянии от одной стороны до другой приведет к аналогичному проценту разницы в величине поля и, следовательно, к другой скорости создания покрытия для данного радиуса. Однако при использовании вращающегося катода (пластины) эта разница в скорости нанесения покрытия становится зависящей от радиальной координаты и это критически важно.

Так как все вращающиеся компоненты современного реактора радиально симметричны, то внесение поправок идеально компенсирует все возникающие ошибки (несовершенства покрытия). Таким образом, совершенство оборудования не является фундаментальным требованием для совершенства процесса. Если ECD-система оборудована механизмом вращения, то недостатки распределения плотности тока могут быть исправлены при помощи того или иного рецепта и не будут зависеть от точности обработки пластиковых деталей реактора.



Рис. 3. Электрическое поле на полупроводниковой пластине

ЧТО ДАЕТ «ПРАВИЛЬНОЕ» РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТОКА ПО ПЛАСТИНЕ?

Пластина с отрицательным зарядом притягивает к себе катионы, как показано на рис. 3 [2]. У катода электрическое поле направлено перпендикулярно поверхности пластины в центре и постепенно изменяется под углом к ее краю. Можно сказать, что электрическое поле создает «кумулятивный эффект» на заряженной поверхности, поскольку является наиболее сильным в центре пластины. Без учета массопереноса, гидродинамики, формы реактора или времени процесса, металлическое покрытие будет быстрее всего формироваться в центре и уменьшаться к краю пластины. Таково фундаментальное поведение электрического поля независимо от других явлений.

Как было установлено ранее, плотность тока определяет скорость осаждения. Таким образом, первое, что нужно сделать для получения равномерно сформированной тонкой пленки по всей пластине, – это обеспечить равномерное распределение электрического поля внутри реактора.

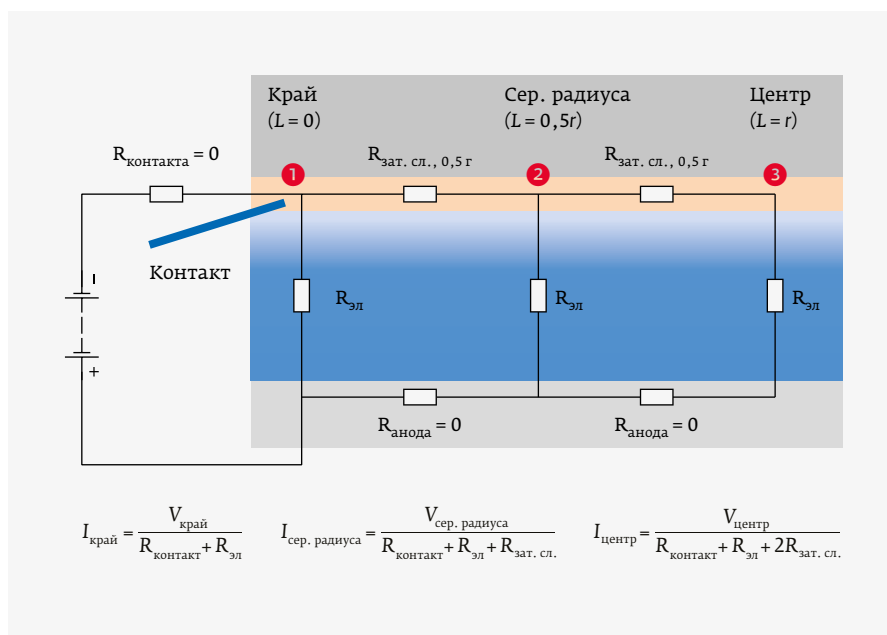


Рис. 4. Распределение тока через пластину

На рис. 4 [2] показана часть пластины, погруженная в электролит. Изображена полная электрохимическая ячейка, включая точки контакта, в которых ячейка электрически соединяется с затравочным слоем пластины. Затравочный слой необходим для проведения электрического тока по всем участкам пластины. На рис. 4 пластина представлена в трех значимых областях: край пластины (где ячейка устанавливает электрический контакт между источником питания и пластиной), средний радиус и центр пластины. Закон Ома применим к электрохимическим элементам, поэтому плотность тока, возникающая в каждой точке пластины, которая должна быть одинаковой для достижения однородного покрытия, зависит от напряжения и сопротивления, характерных для каждого места.

Как видно на рис. 4, край пластины ближе к электрическим контактам, чем середина радиуса, и гораздо ближе, чем центр. Следовательно, у края пластины будет меньшее сопротивление через затравочный слой, чем сопротивление в середине радиуса и, соответственно, чем на радиусе в центре пластины. Это связано с тем, что ток должен будет пройти через затравочный слой на расстоянии от края к центру.

Однако в действительности мы обнаруживаем, что разница в сопротивлении очень мала и, фактически, ничтожна, потому что стандартный затравочный слой достаточно толстый, чтобы его сопротивление

вносило влияние в пределах всей длины. Таким образом, чтобы создать профиль электрического поля, способствующий равномерной плотности тока на пластине, необходимо обеспечить одинаковое напряжение во всех точках пластины. Другими словами, профиль поля, создаваемый реактором, должен иметь однородный потенциал по всему диаметру реактора.

Для очень тонких затравочных слоев или затравочных слоев, состоящих из материалов с высоким сопротивлением, пластина будет создавать градиент потенциала, который уменьшается по мере увеличения толщины металлического покрытия и падения его сопротивления. Этот динамический сдвиг градиента потенциала на таких пластинах может быть важным для некоторых процессов, но это отдельная тема.

Современный ECD-реактор (рис. 5) [3] может быть спроектирован так, чтобы обеспечить идеальную однородность для множества различных вариантов покрытий. Для этого такой реактор должен быть спроектирован с использованием вычислительного гидродинамического моделирования для обеспечения однородного распределения поля в месте расположения пластины внутри реактора (рис. 6) [2].

Равномерное распределение электрического поля по пластине создает однородный потенциал на ней, а в случае замкнутой цепи – равномерно распределенный ток. Это и определяет равномерность создания металлического слоя на пластине.

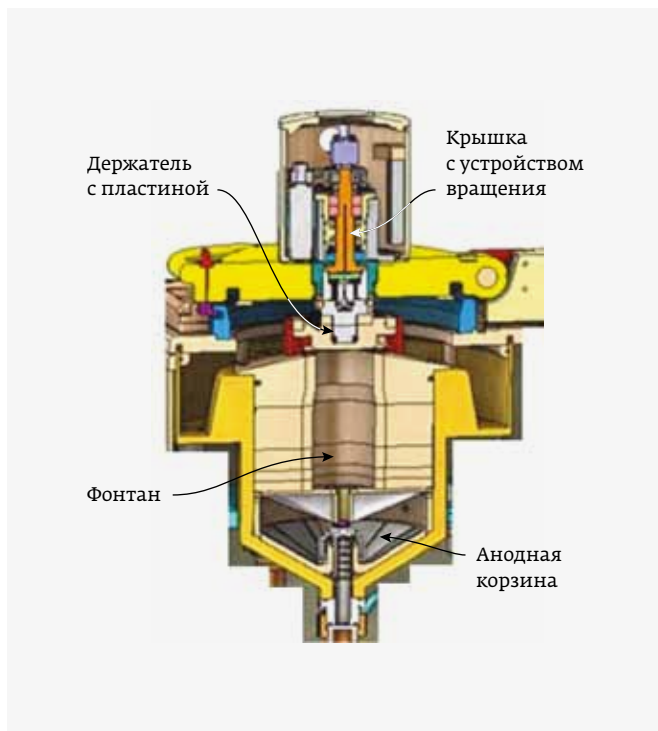


Рис. 5. Современный реактор

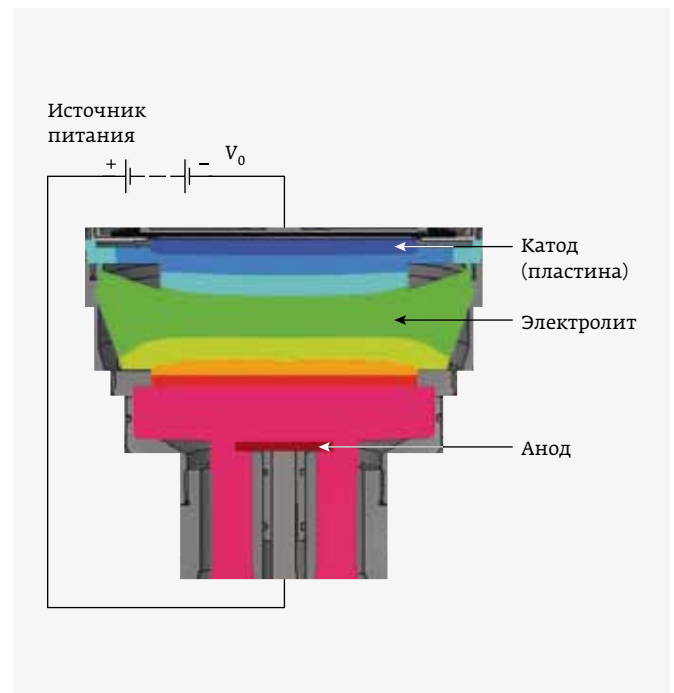
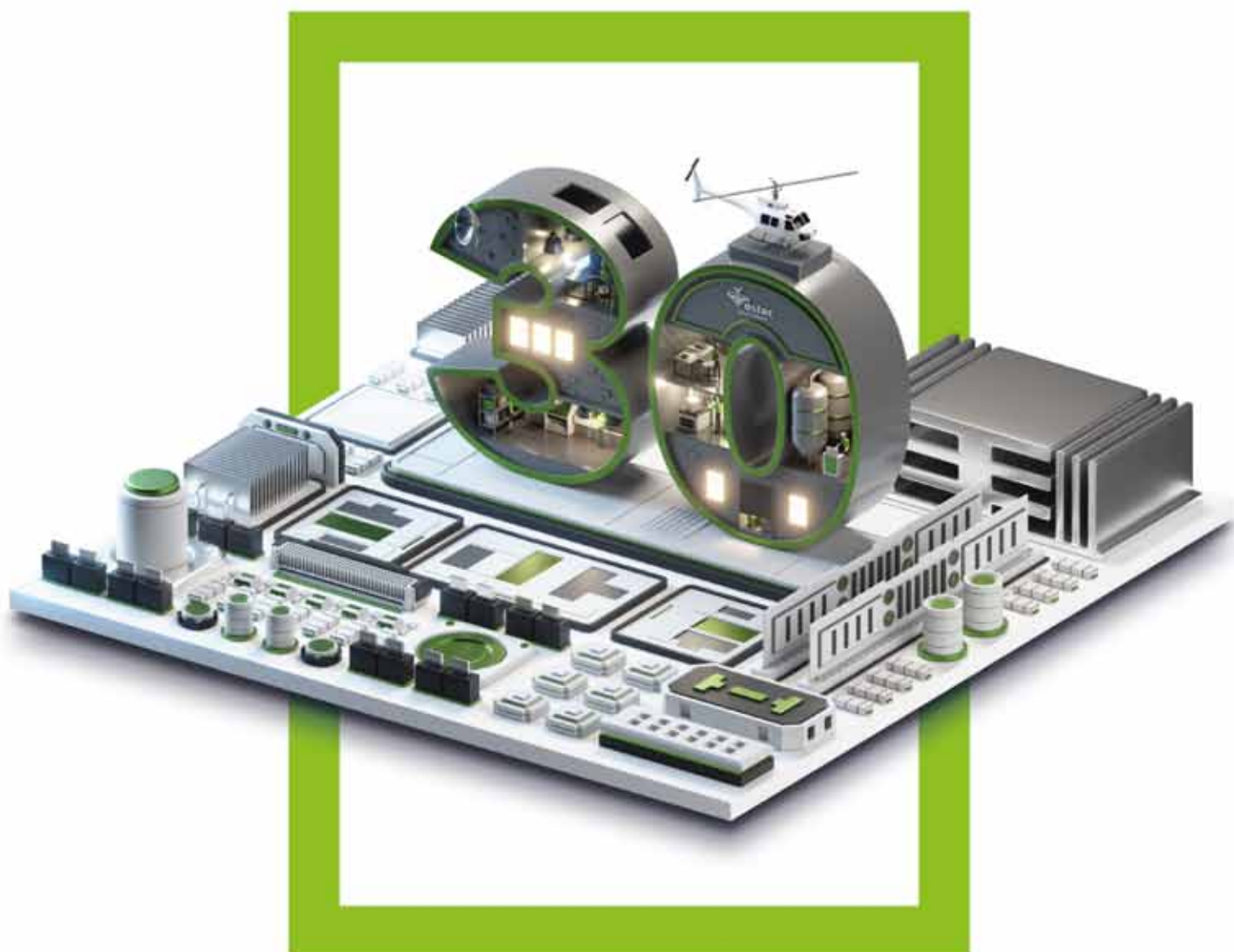


Рис. 6. Профиль электрического поля в современном реакторе системы ECD

Тридцать лет содействуем развитию ● ● ●



Отлаживая производство новых технологий, запуская оборудование заказчиков, разрабатывая новые программные продукты - мы содействуем развитию. Развитию своих сотрудников, бизнеса клиентов, электроники и других отраслей. Победы Остека за прошедшие 30 лет - это результат совместных усилий большого числа людей. Мы благодарны всем энтузиастам своего дела, увлеченным профессионалам, кто помогал и поддерживал. Мы вместе создаем будущее, которым можно гордиться!

ДОСТУПНОСТЬ КАТИОНОВ

Наличие катионов – это еще один фактор, который необходимо учесть, чтобы обеспечить равномерное осаждение металла. Двумя наиболее важными элементами являются концентрация катионов в объеме реактора и доступность катионов в диффузионном слое.

На что влияет концентрация катионов в объеме реактора?

Гальванические процессы в полупроводниковом производстве дали толчок к развитию химической промышленности в данной области и созданию многообразия специализированных и высоконадежных химических реактивов. Основным требованием является составление «правильной» химической смеси с учетом эффективных концентраций катионов с различными добавками, обеспечивающими стабильность при любом расходе и длительном сроке службы внутренней части реактора. Начав с необходимой концентрации катионов, которая поддерживает эффективное формирование металлического покрытия, далее требуется поддержание этой объемной концентрации в пределах всего процесса и от процесса к процессу.

Доступность катионов в диффузионном слое

Качественное гальваническое покрытие требует, чтобы система работала в условиях недостатка электронов так, чтобы скорость реакции ограничивалась и, таким образом, определялась скоростью потока электронов, то есть током. Опять же, согласно этому заявлению, электроны служат ограничивающим реагентом в реакциях, связанных с осаждением. Учитывая этот практический взгляд на «поставку» электронов, становится понятно, что катионы служат избыточным реагентом для той же реакции. Однако, учитывая возможность изменения условий на самой пластине, этого нельзя допускать по всей поверхности пластины. Действительно, запас катионов в пределах указанной концентрации данного реактора недостаточен для обеспечения необходимого количества катионов в любое время на поверхности пластины, по всей пластине и внутри пластины.

Причина, по которой данное требование не может быть выполнено, заключается в переносе массы, который относится просто к движению данного материала из одного места в другое. Массоперенос – это строгое движение катионов металлов к заданной точке восстановления на поверхности пластины, поскольку это является необходимым для скорости нанесения покрытия и, следовательно, для однородности. На скорость массообмена в системе влияют несколько факторов. Рассмотрим их далее.

На простейшем уровне качественное перемешивание в объеме электролита необходимо по ряду причин,

не последней из которых является поддержание гомогенности электролита. Поэтому в большинстве ECD-реакторов предусмотрено активное перемешивание электролита с акцентом на турбулентный поток на поверхности пластины. Чаще всего электролит рециркулирует через реактор из резервуара, так что небольшой процент электролита, истощенного в реакторе в результате осаждения, пополняется за счет обильного запаса, поддерживаемого до заданной концентрации, и добавления соответствующих реагентов – аддитивов.

Перемешивание хотя и необходимо для поддержания однородной массы раствора при заданной концентрации, но недостаточно для точного контроля наличия катионов на реальной поверхности пластины из-за возможности диффузионных различий по пластине.

ДИФфуЗИОННЫЙ СЛОЙ

Когда «вязкая» жидкость движется по поверхности с некоторой скоростью, она создает профиль движения, при котором скорость асимптотически уменьшается от индуцированной скорости массы до нулевой скорости относительно реальной поверхности. Слой жидкости, которая замедляется из-за этого эффекта, называется пограничным слоем. Толщина пограничного слоя зависит, среди прочего, от скорости жидкости и ее турбулентности. Более высокая скорость и ламинарный поток создают более тонкий пограничный слой. Хотя ламинарный поток способствует более тонкому пограничному слою, он становится турбулентным, когда дольше течет по поверхности и встречает какие-либо неровности, например рисунок структур. Турбулентный поток хотя и создает более толстый пограничный слой, менее подвержен завихрениям, создаваемым элементами на поверхности.

Для эффективного нанесения покрытия желателен как можно более тонкий пограничный слой, чтобы обеспечить объемную концентрацию катионов ближе к поверхности пластины. Однако физика подсказывает, что в конечном итоге будет «застойный» слой некоторой толщины, через который катионы должны проходить за счет чистой диффузии, которая намного медленнее, чем конвекция и перемешивание. В электрохимии определяющим термином для этого слоя является диффузионный слой Нернста, который представляет собой «область вблизи электрода, где концентрации (ионов) отличаются от их значений в объеме раствора» [4].

Катионы должны перейти из области однородной объемной концентрации через диффузионный слой, который является «застойным», на поверхность обрабатываемой пластины, чтобы там участвовать в катодных реакциях. Это движение называется диффузией, и время, необходимое катионам для прохождения диффузионного слоя, существенно для равномерного осаждения. «Скорость»

движения данного катиона через диффузионный слой постоянна в рамках контролируемого процесса нанесения покрытия. Другими словами, катион определенного состава перемещается через диффузионный слой с заданной скоростью, определяемой его конкретным коэффициентом диффузии. То есть общее время, необходимое для прохождения данного катиона через диффузионный слой, напрямую зависит от толщины этого слоя.

Поскольку толщина диффузионного слоя практически ограничена (не может быть меньше нуля), она будет асимптотически приближаться к некоторому минимальному значению. Обеспечение однородного и тонкого пограничного слоя способствует тому, что катионы проходят через диффузионный слой за одно и то же время во всех местах, таким образом поддерживая одинаковую скорость осаждения во всех местах и равномерно создавая слой тонкой пленки по всей поверхности пластины. Если диффузионный слой не имеет однородной толщины во всех местах, то время, необходимое для достижения поверхности пластины, будет больше, если диффузионный слой толще, и меньше, если он тоньше. Таким образом, неоднородный профиль скорости жидкости на поверхности пластины приведет к неравномерной скорости диффузии и, следовательно, к неоднородному слою покрытия.

Отсюда следует, что реактор для нанесения покрытия на полупроводниковую пластину в целях равномерного осаждения должен обеспечивать равномерный профиль движения жидкости по пластине. Для современного ECD-реактора типично, что химические вещества рециркулируют через камеру, и критически важно решить проблему движения пластины, которая оказывает одно из основных влияний на однородность создаваемой тонкой пленки. Следует отметить, что некоторые конструкции ECD-систем, предлагаемые рынком, не учитывают этот ключевой фактор.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Carter C., Ghekiere J.** Advanced Semiconductor Plating – Key Fundamentals. – Process Application Note PAN100, ClassOne Technology, 2021.
2. **Carter C., Ghekiere J.** Electroplating Fundamentals: Optimizing Cross-wafer Uniformity. – Process Application Note PAN101, ClassOne Technology, 2021.
3. <https://www.rena.com>
4. IUPAC. Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the «Gold Book»). Compiled by A. D. McNaught and A. Wilkinson. Blackwell Scientific Publications, Oxford (1997). Online version (2019-) created by S. J. Chalk. ISBN 0-9678550-9-8. <https://doi.org/10.1351/goldbook>.

АО «НИИ «ГИРИКОНД»
НАДЕЖНЫЙ ПОСТАВЩИК
КАЧЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

В новом габаритном размере
0402
1,0 x 0,5 мм

Номинальная ёмкость
от 1 пФ
до 15 мкФ

**РАСШИРЕНИЕ
ШКАЛЫ
ТИПОНОМИНАЛОВ**

Низковольтные
многослойные
керамические
**КОНДЕНСАТОРЫ
K10-83**

Номинальное напряжение
от 6,3 В
до 500 В

Типы керамики
группы МПО; Н30
H20-аналог зарубежного X7R

АО «НИИ «Гириконд» Россия, Санкт-Петербург,
194223, ул. Курчатова, 10, м. «Политехническая»
(812) 247-14-92 333@giricond.ru

WWW.GIRICOND.RU