

# Оптимизация гальванических процессов в современном полупроводниковом производстве

## Часть 2

Д. Суханов<sup>1</sup>

УДК 621.357 | ВАК 05.27.06

В первой части статьи, опубликованной в девятом номере журнала «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес» за 2021 год, было рассказано об основных принципах и некоторых способах оптимизации гальванических процессов, применяемых в современном полупроводниковом производстве. В данном номере продолжается рассмотрение способов оптимизации таких процессов.

### ДВИЖЕНИЕ И ПОТОК ЭЛЕКТРОЛИТА. НАСКОЛЬКО ВАЖНЫ ЭТИ ДВА ПАРАМЕТРА?

Скорость электролита относительно поверхности пластины должна быть довольно высокой, чтобы образовался тонкий диффузионный слой и время, необходимое для диффузии катионов к поверхности, не было таким большим, чтобы сдерживать реакции осаждения. В противном случае катионы могут стать ограничивающим реагентом в некоторых областях вокруг пластины.

Для некоторых процессов, где подвижность катиона очень высока, создание «достаточно тонкого» диффузионного слоя может быть достигнуто просто обеспечением высокой скорости химического вещества по поверхности пластины. Современные медные полупроводниковые электролиты – хороший тому пример. Ион меди относительно быстро диффундирует через диффузионный слой, в отличие от комплексного иона золота, что очень важно при выборе оборудования, поскольку это фундаментальный аспект архитектуры системы.

Стационарные системы пластин требуют компромисса между скоростью нанесения покрытия и однородностью. При прохождении через систему с высокой скоростью турбулентные потоки взаимодействуют с пластиной. Типичная конфигурация подобных систем такова, что химические вещества поступают из нижней части камеры, перемещаются вертикально по поверхности пластины и каскадом выходят вверх камеры. В результате профиль потока изменяется от точки доставки к другому концу пластины. Достигается хорошее перемешивание,

диффузионный слой истончается, но турбулентный поток по своей природе неоднороден и диффузионный слой будет иметь разную толщину по всей пластине. Турбулентный поток приведет к высокой скорости нанесения покрытия, поскольку номинальная толщина диффузионного слоя будет низкой; однако осаждение не будет равномерным. Таким образом, достигается высокая скорость нанесения покрытия, но за счет плохой однородности. Замедление потока приведет к более равномерной относительной скорости жидкости, но создаст более толстый диффузионный слой. Это дает относительно однородное осаждение, но накладывает ограничения на скорость нанесения покрытия.

В качестве альтернативы статическая пластина может быть ориентирована горизонтально – сторона покрытия пластины обращена вниз в поток электролита. В такой ориентации электролит движется перпендикулярно пластине. Это помогает отменить некоторые ограничения пути потока снизу-вверх в статических вертикальных гальванических ячейках, но все же не устраняет недостатки, связанные с толщиной диффузионного слоя, обусловленные профилем потока, создаваемым конструкцией камеры. Такая камера, вероятно, потребует очень сложной конструкции для улучшения профиля потока и чрезвычайной точности в размерах элементов сборки. Тем не менее, компромисс между высоким расходом и однородной относительной скоростью жидкости все равно останется. Даже при больших затратах на проектирование и производство оптимального единообразия добиться не удастся.

Теперь рассмотрим одну из самых интересных степеней свободы при оптимизации гальванического процесса в современном ECD-реакторе – движение пластины.

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

### ДВИЖЕНИЕ ПЛАСТИНЫ

Для решения проблем с движением электролита можно воспользоваться преимуществами физики и согласовать профиль потока электролита с формой пластины, чтобы получить идеально радиальный профиль потока без чрезмерных затрат на конструирование и изготовление реактора. Этого можно добиться, закрепив пластину специальными пинами, напоминаящими булавки, или использовать прижимное кольцо, форма которого предварительно оптимизирована относительно гидродинамических процессов. Оптимизация держателя требует намного меньше затрат, чем оптимизация гидродинамических свойств всего реактора.

При вращении пластины используются преимущества сложной физики погруженного вращающегося диска. Глубина этой области исследований значительна и составляет основу большей части электрохимической аналитической науки, являясь тем «ноу-хау», которое у каждого производителя свое, ведь именно в этой области исследований затрачиваются основные усилия (знания, время и материальные средства). В таких исследованиях поток электролита принимается равным нулю, так как при вращающейся пластине он практически не оказывает влияния на создание тонкой пленки. По сути, электролит просто должен быть с постоянной концентрацией, то есть обновляться во время процесса. При условии ограничения скорости процесса током для поддержания постоянной концентрации не требуется сильного потока электролита, поэтому данным параметром при аналитических расчетах можно пренебречь.

Выполняя роль вращающегося электрода, вращающаяся пластина действует крайне эффективно, хотя насос по доставке электролита и является неэффективным. Поверхность вращающейся пластины, поскольку она погружена в жидкость, полностью ею покрыта. На рис. 7 [2] изображена модель потоков, показывающая жидкую фракцию на поверхности пластины; видно, что жидкость полностью «прикреплена» к поверхности пластины во всех местах.

Это означает, что вытеснение электролита из любой единицы площади пластины должно быть немедленно заменено в таком же объеме дополнительным количеством электролита – условие осаждения («прилипания») металла. Поскольку пластина вращается, силы вязкости заставляют жидкость двигаться радиально наружу по поверхности пластины, пока она не достигнет края, где будет выходить с поверхности пластины. Конечно, это описание лишь кратко охватывает данный процесс. Для нас достаточно, что при вращении погруженной пластины движение жидкости по ее поверхности, вызванное центробежной силой, вызывает смещение поверхностной жидкости.

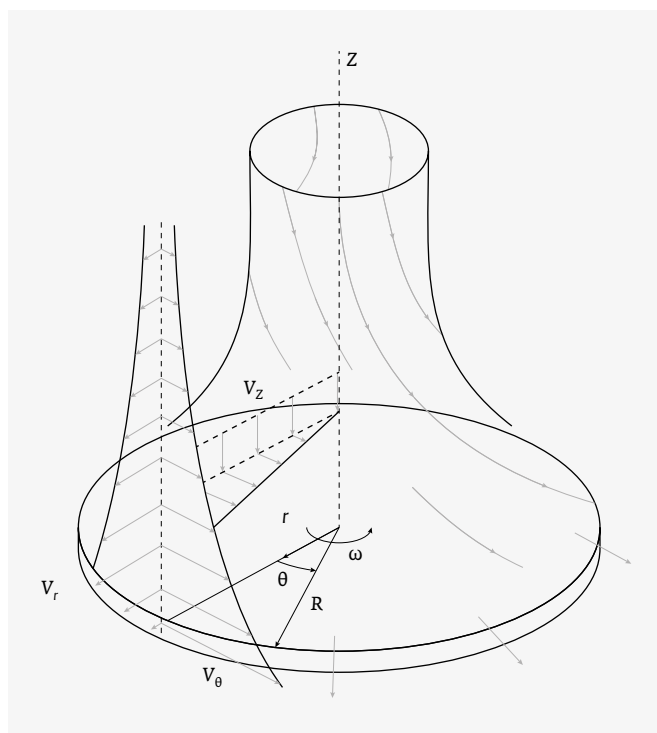
Что касается геометрии вращающейся пластины, можно представить себе область определенной ширины вокруг



**Рис. 7.** Поперечное сечение реактора, показывающее потоки электролита в реакторе

края пластины, которая выходит за этот край. Эта область не может быть полностью заменена после выхода из пластины кольцом той же ширины, примыкающим к ней изнутри. Площадь соседнего кольца меньше. Но условие «прилипания» гарантирует мгновенную замену объема. Таким образом, дополнительный объем жидкости создается из основного объема. Экстраполируя это внутрь, от края к центру, можно увидеть, почему эффект усиливается, когда жидкость движется по всей пластине.

На рис. 8 [5] проиллюстрирована динамика жидкости из основополагающего текста «Теория пограничного слоя» доктора Германа Шлихтинга. Внутри объема образуется шлейф движения электролита. Можно видеть,



**Рис. 8.** Гидродинамика из теории пограничного слоя доктора Германа Шлихтинга

что при образовании факела в номинально симметричной цилиндрической полости камеры образуется идеально радиальный профиль, точно центрированный относительно оси вращения. Другими словами, движение пластины определяет профиль потока, который по своей природе настроен на равномерное распределение по поверхности пластины. Задача современного ECD-оборудования – иметь радиальную симметрию, которая не мешает тому, что в противном случае физика достигла бы с совершенством. Современный гальванический реактор использует все описанные выше эффекты.

### ДВИЖЕНИЕ И ПОТОК ЭЛЕКТРОЛИТА

Из приведенного выше видно, что движение пластины чрезвычайно важно для определения влияния относительного движения жидкости на однородность плакированной пленки. Это не означает, что движение жидкости через гальваническую систему не важно. Однако вращение пластины снижает критичность профиля потока системы. В системе со статической пластиной многие факторы будут недоступны для настройки из-за архитектуры системы. Аппаратное обеспечение, определяющее профиль потока, либо не имеет возможности регулировки, либо имеет очень ограниченную возможность. Следовательно, единственный эффективный настраиваемый параметр – это общий расход. Для системы статических пластин скорость потока необходимо оптимизировать эмпирически, чтобы достичь баланса между однородностью и скоростью нанесения покрытия, и система будет чувствительна к изменениям фактической скорости потока электролита. Однако в системе, оборудованной для вращения пластины, сценарий протекания электролита через реактор принципиально другой. В таких системах влияние скорости потока жидкости вторично по отношению к движению пластины и гораздо менее чувствительно в качестве регулирующего фактора. Обратите внимание, что для высококачественной системы ECD скорость потока, подаваемого в систему, может быть предоставлена из документации на оборудование и не требует никакой регулировки или точной настройки. В случае современных систем пользователь оборудования получит в качестве технологической поддержки ряд данных процесса, где будет указан стандартный расход электролита для этого процесса. Эти данные можно просто ввести в программное обеспечение оборудования без эмпирической проверки. Также немаловажной частью

технологической поддержки является передача данных для установки оборотов, поскольку эффекты настройки являются точными и воспроизводимыми от системы к системе, учитывая, что любое незначительное изменение общего профиля потока будет преодолено физикой вращающегося диска.

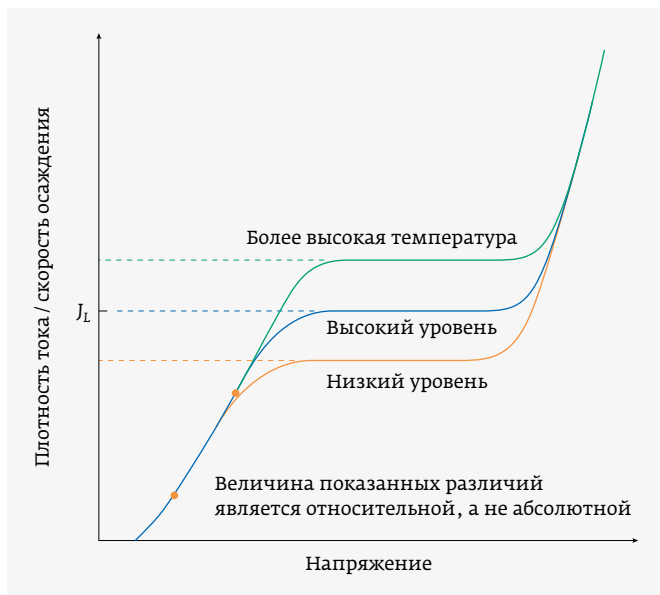
### ОГРАНИЧЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТОКА И К ЧЕМУ ЭТО МОЖЕТ ПРИВЕСТИ

Электролитическая ячейка, содержащая цепь, подчиняется закону Ома, который обычно определяет линейную зависимость между током и напряжением при заданном постоянном сопротивлении. Однако электролитическая ячейка добавляет ряд сложностей, которые изменяют эту линейную зависимость. Самая основная сложность – побочная электрохимическая реакция. По мере увеличения плотности тока скорость расхода катионов увеличивается. В какой-то момент катионов на поверхности становится недостаточно, поскольку скорость расходования приближается к скорости пополнения. Система начинает отходить от своего надлежащего состояния с низким содержанием электронов, и, если катионы недоступны в изобилии, электроны начинают взаимодействовать другими способами, инициируя побочные реакции, которые приводят к образованию слоев низкого качества.

Как показано на рис. 9 [2], это приводит к тому, что линейная зависимость напряжения от тока переходит в плоскую, которая характеризуется постоянной плотностью тока несмотря на возрастающее напряжение. Точка такого перехода известна как предельная плотность тока (limiting current density, LCD). Возвращаясь к закону Ома, мы понимаем, что сопротивление системы теперь увеличивается. Значение LCD зависит от нескольких факторов, и его можно увеличить или уменьшить, регулируя

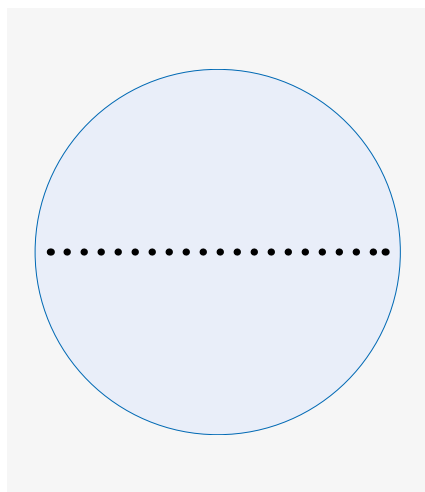


Рис. 9. Зависимость напряжения от плотности тока



**Рис. 10.** Изменение предельной плотности тока

различные параметры. Как показано на рис. 10 [2], повышение температуры электролита и/или перемешивание жидкости на поверхности пластины может повысить плотность тока, при которой достигается LCD. Температура увеличивает кинетику реакции нанесения покрытия. Перемешивание истончает диффузионный слой, тем самым увеличивая эффективную скорость пополнения катионов в диффузионном слое. Точно так же повышение концентрации катионов в объеме раствора может увеличить доступность катионов в диффузионном слое. Во всех случаях настройки возвращают процесс в состояние недостатка электронов, перемещаясь обратно в область контроля заряда.



**Рис. 11.** Пример сканирования диаметра пластины

### КАК ЖЕ ВСЕ-ТАКИ ОБЕСПЕЧИТЬ ОДНОРОДНОСТЬ ПО ПЛАСТИНЕ?

Обратите внимание: данная информация относится к равномерному нанесению покрытия на пластине с затравочным слоем.

Для конкретных рекомендаций по гальваническим реакторам вначале следует изучить более общее руководство для простых горизонтально ориентированных систем гальваники на одной пластине. Если используемая система является новой или пользователь не знаком с ней, то сначала следует установить функциональную отправную точку, при которой система будет эксплуатироваться в соответствии с требуемым процессом. Для этого необходимо провести ряд пробных процессов и измерений.

Лучшей схемой измерения толщины для оптимизации однородности по пластине обычно является сканирование диаметра (рис. 11) [2], который представляет собой линию измерений, начинающуюся с одной стороны пластины и переходящую к другой, часто с более высокой плотностью по направлению к краю пластины, где возможно больше отклонений.

На рис. 12 [2] показаны типичные профили сканирования диаметра пластины и приведены рекомендации по устранению проблем, которые могут быть обнаружены.

Чтобы обеспечить однородность осаждения тонкой металлической пленки по пластине в современных ECD необходимо выполнить следующее:

1. Должен быть доступный для оборудования документ или файл с записью процесса, который содержит четкое определение отправной точки.
2. Ключевыми факторами для установления однородности по пластине являются профиль



**Рис. 12.** Типичные профили сканирования диаметра

электрического поля и профиль потока жидкости. Оба они легко оптимизируются с помощью интуитивно понятных настроек в программном обеспечении.

3. Нужно настроить рецепт в соответствии с поставленной задачей и проверить возможности системы:
  - контроль движения жидкости относительно пластины;
  - контроль вращения (статические системы, где невозможно вращение во время нанесения покрытия, будут иметь существенные ограничения на достижение хороших показателей однородности, в таких системах улучшения неоднородности можно достичь только за счет снижения скорости нанесения покрытия);
  - управление профилем электрического поля (настройка через физический диффузор или с использованием нескольких независимо управляемых анодов).

Далее следует соблюдать следующие рекомендации.

### Погружение

Убедитесь, что пластина полностью погружена в химический состав для нанесения покрытия, когда находится в положении для нанесения покрытия. Обратите внимание, что в некоторых системах пластина погружается точно горизонтально, без возможности наклона во время смачивания. Это может задержать воздух на пластине и привести к неравномерному нанесению покрытия. Такие системы обычно требуют многократного увеличения и уменьшения потока для удаления пузырьков. Если система поддерживает наклон во время смачивания, необходимо провести эмпирическое тестирование, чтобы подтвердить погружение без пузырьков. Если система не поддерживает наклон во время погружения, но поддерживает вращение пластины, увеличение и уменьшение скорости вращения пластины может привести к удалению пузырьков.

### Расход химии и скорость вращения

В идеале должна быть сформирована запись «наиболее известного» расхода для системы и конкретного процесса, либо надо следовать следующим рекомендациям:

- для формирования покрытия из золота: медленно вращайте пластину (25–35 об / мин) и используйте более высокую скорость потока для системы;
- для большинства других металлов: относительно быстро вращайте пластину (~50–100 об / мин) и используйте умеренную скорость потока;
- для статических систем без вращения: расход – единственный входной параметр, которым можно управлять. Как правило, чем он выше, тем лучше.

### Корректировка процесса при сравнении результата с рис. 12

Посмотрите на профиль плакированной пленки, сравните его с рис. 12 и внесите предлагаемые изменения:

- быстрое увеличение толщины на расстоянии ~10 мм от края вероятнее всего вызвано слишком слабым экранированием для компенсации скопления тока. В таком случае его нужно отрегулировать по положению ближе к пластине. Если экран не регулируется, то поможет изменение положения пластины – она должна быть ближе к экрану;
- быстрое уменьшение толщины внешних 10-мм пластин может иметь одну из двух причин:
  - пузырьки, застрявшие в результате погружения: в этом случае скорректировать угол погружения пластины (если возможно) или кратковременно увеличить скорость вращения;
  - экран располагается слишком близко к пластине. Чтобы исправить это, измените расстояние;
- центр профиля толстый и «куполообразный»:
  - если регулировка поля возможна – уменьшите плотность тока в центре;
  - если настройка на месте невозможна, увеличьте скорость вращения на ~10–20 об / мин;



Рис. 13. Современная ECD-система для R&D RENA EPM

- центр профиля тонкий:
  - если регулировка поля возможна – уменьшите плотность тока по краю пластины;
  - если настройка на месте невозможна, уменьшите скорость вращения на ~10–20 об/мин.

Все вышеописанные рекомендации необходимо выполнять для каждого процесса, которых бесчисленное множество вследствие вариативности размера пластин, типов получаемой металлической пленки и, конечно же, многообразия конечных продуктов.

Создание гальванического покрытия, на первый взгляд, – это крайне простой процесс, а гальваническая ячейка (ECD-реактор), по сути, – просто ванна с электролитом и электродами, подключенными к источнику питания. Причем на одном из электродов располагается пластина, на которой происходит формирование металлической пленки. На протяжении нескольких десятилетий простейшего ECD-реактора в виде электролитической ванны было достаточно для формирования практически любых металлических покрытий. Но технологии развиваются, и возникают новые требования к самому процессу и к качеству покрытия (его плотности и однородности). С появлением процессов производства микроэлектронных изделий, использующих глубокие или сквозные отверстия, технологи на полупроводниковом производстве оказались в тупике, так как ни одна электролитическая ванна даже с функцией покачивания пластин, перемешивания электролита и «умными» источниками питания не могла обеспечить заполнение таких отверстий. Еще одной проблемой для технологов стало требование по равномерности покрытия на больших поверхностях (на 200- и 300-мм пластинах), что тоже оказалось невыполнимо в простой электролитической ванне.

Решением стал современный ECD-реактор, обработка в котором ведется по одной пластине, причем с ее вращением. Именно такая конструкция позволила добиться необходимой однородности покрытия на большой площади и даже в отверстиях с аспектным соотношением 1:10 и диаметром 20 мкм.

Конечно, современные системы упростили ряд процессов гальванического осаждения для простого применения и стали серьезным помощником технологов на производстве микроэлектроники. Но чтобы добиться идеальной равномерности покрытия, необходимо




Рис. 14. Современная ECD-система для серийного производства RENA EPA

потратить время для настройки реактора в современной ECD-системе (рис. 13 [3] и рис. 14 [3]) для подбора правильного рецепта, и с этими задачами технологом придется справляться самим.

## 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, 2<sup>nd</sup> 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>.
5. **Schlichting H.** Boundary-Layer Theory. 1955, Mc Graw-Hill Inc.

ООО  
СМП



ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН  
[www.SMD.ru](http://www.SMD.ru)

электронные компоненты  
**для поверхностного монтажа**

**НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК**

- Разборные металлические EMI SMD экраны
- Кварцевые генераторы 0532 на частоты до 125 МГц

Москва, Ленинградский пр., 80 к. 32. e-mail: [sale@smd.ru](mailto:sale@smd.ru)  
Тел.: (499) 158-7396, (495) 940-6244, (499) 943-8780