

Химическая металлизация диэлектрика

Процессы предварительной подготовки поверхности диэлектрика к металлизации были подробно разобраны ранее (см. журналы № 4, 5 за этот год), а в этой статье мы рассмотрим, как состав раствора химического меднения и технологические параметры влияют на скорость и качество получаемого осадка химической меди.

Марина Капица

marina_kapitsa@rambler.ru

Создание надежного электрического соединения между слоями МПП и токопроводящего рисунка на поверхности диэлектрика является наиболее ответственной частью процесса изготовления МПП. Обычно этот процесс состоит из двух стадий: химической металлизации диэлектрика (формирование слоя химической меди) и наращивания слоя меди гальваническим способом до необходимой толщины. Химическая стадия необходима для создания электропроводящего слоя на поверхности диэлектрика, на который становится возможным гальваническое осаждение меди.

Требования к осадку химической меди

Толщина слоя химически осажденной меди существенна для обеспечения надежности внутренних соединений МПП. Химически осажденная медь имеет рыхлую газопроницаемую структуру, способную поглощать влагу, электролиты меднения, продукты отщепления эпоксидной смолы и другие органические вещества, сопутствующие обработке ПП. С течением времени поверхность частиц химической меди окисляется с образованием промежуточных оксидных слоев, а органические выделения, конденсируясь в рыхлом осадке химической меди, образуют изолирующие слои между торцом контактной площадки и металлизацией отверстий. Эти промежуточные слои вызывают повышение сопротивления внутренних соединений на несколько порядков вплоть до отказа соединений.

Если же слой химически осажденной меди имеет небольшую толщину, создаются условия для прорастания гальванической меди сквозь этот слой непосредственно на поверхность медных торцов контактных площадок внутренних слоев МПП. Внутренние соединения в этом случае настолько плотные, что их омическое сопротивление с трудом поддается измерению или, по крайней мере, его величина соизмерима со значением 10^{-4} Ом. Межслойные соединения таких МПП выдерживают без ослабления свойств воздействия таких мощных факторов разрушения, как процессы групповой пайки, циклические изменения температур, повышенная влажность.

С другой стороны, для обеспечения качественно гальванопокрытия отверстий химически осажденный слой должен быть сплошным (без пустот и разрывов), а это достигается определенной толщиной осадка. Важно, чтобы все частички палладия были покрыты медью, иначе они, будучи в обнаженном состоянии, выделяли бы водород, вызывая образование раковин в последующем слое меди [1].

В технологическом процессе изготовления печатных плат предусматривается осаждение химической меди толщиной до 1 мкм с дальнейшим наращиванием гальванической меди (гальванозатяжка) толщиной 5–7 мкм. Таким образом обеспечивается защита и уплотнение химически осажденной меди. Из всего перечисленного выше можно сформулировать следующие требования к осадку химической меди:

- сплошное покрытие;
- высокая адгезия осадка к диэлектрику и фольге.

Существует мнение, что, осадив толстый слой химической меди 3–5 мкм, можно исключить стадию гальванозатяжки. Однако из многолетнего опыта замечено, что тонкий слой химической меди имеет существенные преимущества, такие как сокращение расхода материалов, электроэнергии, а также повышенная надежность МПП в целом. Кроме того, стабильность процесса химического меднения имеет очень много нюансов, что делает необычайно трудным получение качественных толстых слоев.

Основные закономерности процесса химического меднения

Для протекания реакции восстановления необходимо присутствие в растворе достаточно сильного и активного восстановителя. Выбор возможных восстановителей тем шире, чем положительнее стандартный потенциал металла. Необходимым является также автокаталитический характер реакции восстановления, то есть способность образующегося металла катализировать восстановление. Это обеспечивает преимущественное осаждение металла на требуемой поверхности и получение компактного покрытия значительной толщины.

Степень автокатализа зависит и от природы металла, и от природы восстановителя. В отсутствие автокатализа реакция восстановления протекает во всем объеме раствора и приводит к образованию порошкообразного металла.

Движущей силой автокаталитического процесса восстановления является окисление восстановителя, эффективность действия которого может оцениваться по его окислительно-восстановительному потенциалу.

Для получения осадка металла в виде сплошного слоя разность между потенциалами восстановителя и восстанавливаемого металла не должна быть слишком велика, так как в противном случае происходит быстрое, иногда почти мгновенное, образование высокодисперсного продукта восстановления. Чтобы предотвратить быстрое протекание реакции, в состав растворов вводят лиганды, образующие достаточно прочные комплексы с ионами восстанавливаемого металла и приводящие к уменьшению разности потенциалов за счет сдвига редокс-потенциала пары ион металла — металл в более отрицательную область (табл. 1). Лиганды выполняют и другую функцию: они предотвращают образование гидроксидов металлов в щелочной среде.

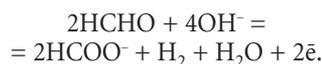
Таблица 1. Нормальные

окислительно-восстановительные потенциалы некоторых металлов в водных растворах при температуре 25 °С [2]

№	Электродные реакции	Нормальный электродный потенциал E°, В
1	$\text{CuCH}_3\text{COO} + e = \text{Cu} + \text{CH}_3\text{COO}^-$	0,276
2	$\text{CuSuc} + 2e = \text{Cu} + \text{Suc}^{2-}$	0,243
3	$[\text{CuT}^{2-}]^{2+} + 2e = \text{Cu} + 3\text{T}^{2-}$	0,154
4	$[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+} + 2e = \text{Cu} + 4\text{NH}_3$	-0,05
5	$[\text{Cu}(\text{NH}_3)_2]^{+} + e = \text{Cu} + 2\text{NH}_3$	-0,11
6	$[\text{CuЭДТА}]^{2+} + 2e = \text{Cu} + \text{ЭДТА}^{4-}$	-0,216

Примечание: Suc — сукцинат; T²⁻ — тартрат; ЭДТА⁴⁻ — трилон Б

Практически единственным восстановителем, используемым в растворах химического меднения, является формальдегид. Он доступен, дешев и позволяет получить медные покрытия при комнатной температуре. Восстановление меди формальдегидом является автокаталитическим процессом. Потенциалообразующая реакция для формальдегида следующая:



Величина потенциала в зависимости от pH при стандартных условиях описывается уравнением

$$E = + 0,32 - 0,12 \text{ pH}$$

Значения потенциала окисления формальдегида при различных значениях pH представлены в таблице 2.

Таблица 2. Зависимость потенциала окисления формальдегида от pH

pH	0	9	10	11	12	13	14
E, В	-0,06	-0,62	-0,71	-0,8	-0,89	-0,98	-1,07

Каталитическая реакция на поверхности меди протекает при комнатной температуре при pH > 10,0–10,5. Для начала этой реакции на активированной поверхности диэлектрика обычно необходимы более высокие значения pH: 11–11,5 при 1–2 моль/л CH₂O и 12,0–12,5 при 0,1–0,5 моль/л CH₂O.

Механизм реакции химического меднения

В данном процессе восстановления меди необходимо учитывать, что первоначальный процесс представляет собой образование мелких частиц меди на частичках палладия. После образования частиц меди каталитическое действие оказывает не только сам катализатор (палладий), но и медь, которая обладает каталитической активностью, то есть процесс из каталитического переходит в автокаталитический.

Химическое восстановление меди протекает на двух разных катализаторах Pd и Cu по двум различным механизмам [3].

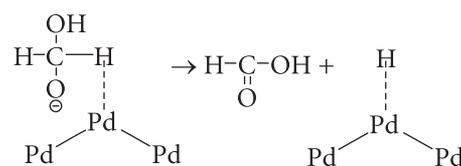
Химическое осаждение меди на поверхности палладия заключается в химическом взаимодействии восстановителя и восстанавливаемых ионов. Это взаимодействие приводит к непосредственному переносу электронов от частиц восстановителя к восстанавливаемым ионам. При этом роль твердого катализатора состоит либо в том, что он снижает стабильность промежуточного продукта взаимодействия, представляющего собой комплекс восстановитель — восстанавливаемый ион, либо вызывает деградацию частицы восстановителя, если она имеет сложный состав. Это ведет к образованию активного продукта, реагирующего с восстанавливаемым ионом на повышенной скорости. Именно второй вариант реализуется при использовании формальдегида в качестве восстановителя.

Рассмотрим механизм восстановления меди на поверхности палладия.

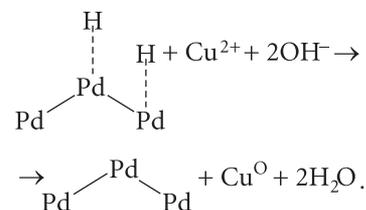
В водных растворах формальдегид существует в основном в виде гидрата метиленгликоля CH₂(OH)₂



Анион метиленгликоля, адсорбируясь на палладии, реагирует с катализатором, давая нестабильное соединение, из которого освобождается ион гидрида [13]. Этот ион гидрида сразу фиксируется на центрах палладия, находящегося рядом:

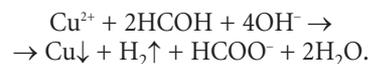


Затем происходит химическое взаимодействие на межфазной границе. Ион гидрида реагирует с присутствующим в растворе Cu²⁺:

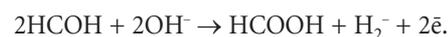


Для автокаталитической стадии процесса химического меднения был предложен и экспериментально доказан [2–3] электрохимический механизм, согласно которому металл-катализатор в растворе служит лишь проводником электронов, облегчающим их переход от восстановителя к окислителю. На достаточно протяженной поверхности микроструктур металла катодный и анодный процессы могут протекать параллельно на различных участках поверхности или попеременно на одних и тех же участках. Роль частиц металла в процессе химического восстановления может быть уподоблена роли электрода, на котором происходит катодное выделение металла. Кроме того, восстанавливаемый металл выполняет функции катализатора анодного процесса окисления восстановителя.

Реальность электрохимического механизма реакции при восстановлении соединений меди до металла формальдегидом доказана, в частности, тем, что можно реализовать гальванический элемент из медных электродов, которые погружены в растворы, содержащие Cu²⁺ и формальдегид соответственно. При соединении электродов на одном из них восстанавливается медь, а на другом — окисляется формальдегид, и выделяется водород. Таким образом, процесс химического меднения можно представить протекающим в локальных гальванических элементах на поверхности катализатора. Основная катодная реакция восстановления меди может быть выражена уравнением:

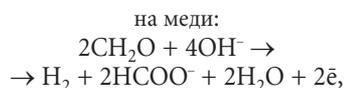


Анодная реакция заключается в окислении формальдегида

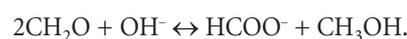


Образующийся газообразный водород, осуществляя перемешивание, поддерживает большую каталитическую активность поверхности металла на печатных платах по сравнению с активностью частиц в объеме раствора. Следовательно, процесс окисления формальдегида интенсивнее протекает на поверхности платы.

Необходимо обратить внимание, что в зависимости от того, на каком катализаторе происходит окисление формальдегида, реакция отображается следующими уравнениями:



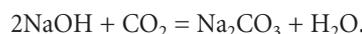
Экспериментально показано, что в растворах меднения с тартратом и с ЭДТА количества выделяющегося водорода и осажденной меди в молях приблизительно равны. На 1 моль восстановленной меди расходуется около 4 моль щелочи и 2 моль формальдегида CH_2O , что тоже соответствует приведенным уравнениям. Однако практический расход CH_2O и щелочи в растворах меднения выше. CH_2O участвует в реакции диспропорционирования (реакция Каниццаро):



С увеличением значения pH расход CH_2O на побочную реакцию увеличивается. Для уменьшения скорости протекания этой обратимой реакции в раствор формалина входит метанол. Формалин — стандартный водный раствор формальдегида состава:

- формальдегид 37,0–37,3 %;
- метиловый спирт 6–15%;
- муравьиная кислота 0,02–0,04%.

Кроме того, частично гидроксид натрия, взаимодействуя с углекислым газом воздуха, карбонизируется по реакции:



Происходит также частичное восстановление меди до одновалентного состояния и образование оксида меди:



Наличие частиц оксида меди является одной из причин разложения раствора, так как вследствие реакции диспропорционирования



одновалентные катионы меди образуют катионы двухвалентной меди и частицы металлической меди, которые катализируют восстановление меди в объеме раствора.

Частицы оксида меди, кроме того, включаются в осадок меди, обуславливают его хрупкость. С целью стабилизации в растворы химического меднения вводят в очень малых количествах стабилизаторы, тормозящие данный процесс. Хрупкость осадков меди в значительной степени вызывается также включением в них газообразного водорода («эффект наводороживания»).

Составы растворов химического меднения

Разработано много рецептов растворов химического меднения с формальдегидом

в качестве восстановителя. В общем виде состав этих растворов следующий [35]:

- соль меди (II) — 2–600 (чаще 20–150) ммоль/л;
- донор лигандов — в 1–4 раза больше, чем содержание Cu (II);
- CH_2O — 30–400 моль/л;
- щелочь — до pH = 11–14;
- отношение концентраций $\text{CH}_2\text{O}/\text{Cu}$ (II) — 1–50 (чаще 3–12);
- стабилизатор и другие добавки.

Из солей меди наиболее часто используют сульфат меди, но можно применять нитрат, хлорид, карбонат, тартрат, глюконат.

В качестве донора лигандов используют тартраты (тартрат натрия-калия, так называемая сегнетова соль, или соль Рошеля), этилендиаминтетраацетат (ЭДТА, или трилон Б). Лиганды связывают медь (II) в комплексы и таким образом удерживают их в щелочном растворе.

Формальдегид в раствор химического меднения обычно вводят в виде водного раствора — формалина. В растворах меднения можно применять параформ, триоксан, полиоксиметиленгликоли, которые в щелочных растворах распадаются с образованием CH_2O .

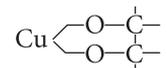
Лиганды

Из большого числа веществ, образующих комплексы с ионами меди (II), лишь немногие лиганды подходят для растворов химического меднения. Эти вещества должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Образовывать достаточно прочный комплекс с медью (II) в щелочной среде, чтобы предотвратить выпадение гидроксида меди и обеспечить смещение потенциала меди в электроотрицательную сторону.
2. Обеспечивать достаточную стабильность раствора по отношению к реакции восстановления меди в объеме раствора.
3. Не реагировать с формальдегидом (нельзя, например, применять первичные и вторичные амины).
4. Не тормозить каталитический процесс восстановления металла, то есть не затруднять анодное окисление CH_2O . Поэтому не пригодны в качестве лигандов цианиды; соединения, содержащие сульфидную серу; гетероциклические соединения с азотом.

Среди простых неорганических лигандов нет ни одного, удовлетворяющего всем указанным условиям.

Установлено, что из органических соединений, содержащих карбоксильные или гидроксильные группы, наиболее приемлемыми лигандами ионов Cu^{2+} являются бидентантные, структура которых позволяет при комплексообразовании сформироваться пятичленному циклу:



В производстве чаще всего используются в качестве лигандов ЭДТА и тартрат Na-K.

Тартратные растворы. Как следует из состава и прочности комплекса меди (II) с тартратом (табл. 1), минимальное общее содержание тартрата в растворе меднения должно соответствовать соотношению $\text{C(T)} : \text{C(Cu(II))} > 2$. Увеличение этого соотношения до 3 несколько снижает скорость меднения, но повышает стабильность раствора. Увеличение концентрации формальдегида сравнительно мало влияет на скорость восстановления меди (рис. 1).

Более сильное влияние на скорость меднения оказывает изменение концентрации меди (II) в растворе (рис. 2) [3].

При постоянстве pH и концентраций других компонентов раствора скорость меднения повышается при увеличении концентрации как CH_2O , так и Cu(II) до самых больших значений, обычно используемых в растворах химического меднения.

Скорость меднения меди возрастает при увеличении pH раствора, максимум скорости наблюдается около pH = 13,0.

С возрастанием температуры скорость меднения увеличивается, хотя большинство растворов меднения используют при комнатной температуре.

Скорость нанесения тонких пленок меди из тартратных растворов достаточно высокая — 3–8 мкм/ч, однако при снижении pH < 12 и повышении температуры выше 35 °C покрываемая поверхность легко пассивируется за счет образования соединений меди (I) на каталитической поверхности, и процесс восстановления меди прекращается.

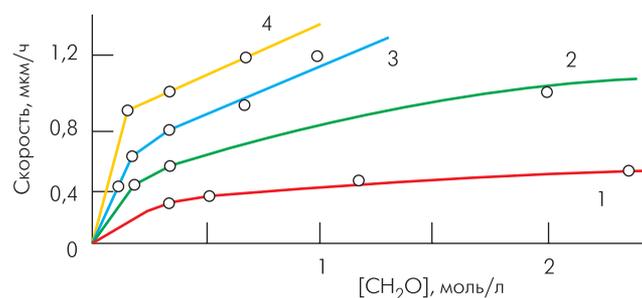


Рис. 1. Зависимость скорости меднения от концентрации формальдегида при 20 °C в перемешиваемых тартратных растворах: 1 — $\text{C}_{\text{Cu(II)}} = 7$ ммоль/л, pH = 12,1; 2 — $\text{C}_{\text{Cu(II)}} = 20$ ммоль/л, pH = 12,1; 3 — $\text{C}_{\text{Cu(II)}} = 28$ ммоль/л, pH = 12,5; 4 — $\text{C}_{\text{Cu(II)}} = 28$ ммоль/л, pH = 13.

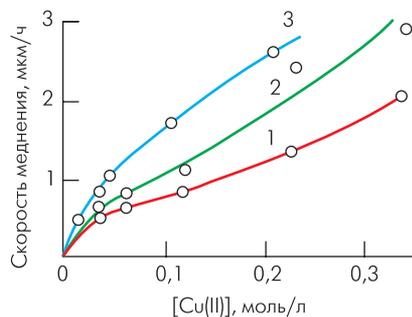


Рис. 2. Зависимость скорости меднения от концентрации меди (II) в тартратном растворе:
1 — $C_{\text{СНОН}} = 0,17$ моль/л, $\text{pH} = 12,5$; 2 — $C_{\text{СНОН}} = 0,33$ моль/л, $\text{pH} = 12,1$; 3 — $C_{\text{СНОН}} = 0,33$ моль/л, $\text{pH} = 13$

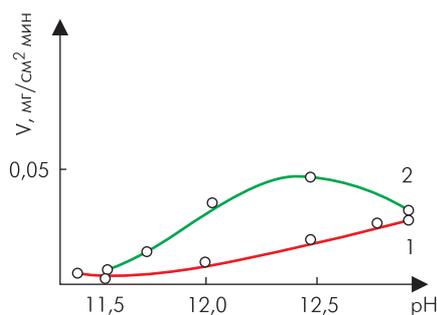


Рис. 3. Зависимость скорости осаждения меди от pH раствора, содержащего:
1 — калия натрия тартрат, 2 — трилон Б

Трилонатные растворы. Комплекс меди (II) с ЭДТА более прочен, чем с тартратом (см. табл. 1), поэтому для удержания меди в растворе достаточно малого избытка ЭДТА по отношению к меди (II). Минимальное соотношение $C(\text{ЭДТА}) : C(\text{Cu(II)})$ равно 1,0001 ($\text{pH} = 12$) и 1,001 ($\text{pH} = 13$).

Концентрация свободного ЭДТА не оказывает значительного влияния на скорость восстановления меди.

Растворы тонкослойного химического меднения на основе солей ЭДТА по сравнению с тартратными обладают некоторыми преимуществами: они стабильны в широком диапазоне температур, имеют высокую скорость осаждения (5–10 мкм/ч), существенно зависящую от температуры раствора, его pH (рис. 3) и концентрации меди (II), и не склонны к пассивации, так как в процессе восстановления не образуется Cu_2O [3].

Можно использовать растворы, содержащие два лиганда. Уже небольшие добавки ЭДТА в тартратный раствор увеличивают скорость осаждения меди; особенно сильно этот эффект проявляется при $\text{pH} = 12$. Это в основном можно объяснить более высокой устойчивостью комплекса с ЭДТА и осаждением меди в присутствии смеси лигандов из этого комплекса.

Влияние ионов некоторых металлов

Введение в тартратные растворы химического меднения соли никеля позволяет получить покрытия хорошего качества с высоким сцеплением на гладкой поверхности диэлектрика и стекла. Добавки соли никеля несколько уменьшают скорость восстанов-

ления меди. В процессе меднения часть ионов никеля восстанавливается вместе с медью — покрытие представляет собой сплав $\text{Cu} - \text{Ni}$ с 1–4%-ным содержанием никеля (по массе).

Присутствие в растворах меднения цинка, сурьмы и висмута (в виде комплексов с тартратом) уменьшает скорость восстановления меди, а металлы включаются в покрытие. Максимальное содержание сурьмы, висмута и цинка в покрытиях равно соответственно 2, 8 и 11% массы. Оно достигается при относительно малом содержании в растворе меди (II) и большом CH_2O ; скорость осаждения покрытий при этом составляет 0,3–0,5 мкм/ч. Добавки сурьмы и висмута несколько стабилизируют растворы меднения и повышают пластичность покрытий [2].

Стабильность растворов химического меднения

Растворы химической металлизации, содержащие ионы металла и восстановитель, являются термодинамически неустойчивыми системами и подвержены самопроизвольному разложению — восстановлению металла во всем объеме раствора. На уменьшение стабильности растворов влияют следующие факторы.

1. Увеличение концентрации реагирующих веществ, в первую очередь восстановителя, и увеличение температуры.
2. Уменьшение стабильности комплекса металла в присутствии недостаточного количества лиганда или при использовании лиганда, с которым металл образует малопрочный комплекс.

3. Увеличение степени загрузки ванны, то есть соотношения покрываемой поверхности к объему раствора. Обычно рекомендуют применять степень загрузки не выше 100–250 $\text{см}^2/\text{л}$. Влияние этого фактора можно объяснить, видимо, тем, что при протекании каталитической реакции какие-то промежуточные и конечные ее продукты переходят с поверхности металла в глубь раствора и там инициируют реакции восстановления.
4. Присутствие в растворе твердых частиц катализатора. Поэтому периодическое или непрерывное фильтрование раствора является необходимой операцией.
5. Наличие частиц оксида меди (I) является одной из причин разложения раствора, так как вследствие реакции диспропорционирования



одновалентные катионы меди образуют катионы двухвалентной меди и частицы металлической меди, которые катализируют восстановление меди в объеме раствора.

6. Осаждение меди на взвешенных в растворе твердых частицах. Для увеличения стабильности растворов меднения в их состав вводят специальные *стабилизаторы*. По типу действия большинство стабилизирующих добавок можно разделить на две группы: первая — каталитические яды (соединения серы (II), селена (II), цианиды, гетероциклические азот- и серосодержащие соединения, ионы некоторых металлов); вторая — окислители. Первые, адсорбируясь на зародышах металлической фазы, тормозят их последующий рост. Стабилизаторы-окислители оказывают пассивирующее действие на поверхность малых частиц, а также могут способствовать их растворению.

Особенностью действия всех стабилизирующих добавок является то, что они тормозят образование зародышей металлической фазы на самой начальной стадии реакции во время индукционного периода, тем самым уменьшая скорость меднения.

Стабилизирующее действие добавок обычно оценивается при помощи ускоренных методов. Это преднамеренное уменьшение стабильности растворов путем введения катализатора (соли палладия или серебра), повышения температуры, концентраций формальдегида, щелочи, сильного увеличения степени загрузки.

Сравнение действия свыше 30 соединений, предлагаемых в качестве стабилизаторов, показало, что в тартратном растворе из неорганических соединений наиболее сильное стабилизирующее действие оказывают тиосульфат и арсенит. Ионы Br^- , I^- , Se^{2-} , SeO_3^{2-} , TeO_3^{2-} , соединения ванадия лишь незначительно стабилизируют раствор. Многие органические тиосоединения, соединения селена, гетероциклические азотсодержащие соединения являются эффек-

тивными стабилизаторами. Наибольший показатель полезности, учитывающий влияние добавок и на стабильность, и на скорость меднения, имеют диэтилдитиокарбамат, фенилтиогидантоиновая кислота, цистин, тиосульфат [2]. Опыты с растворами, содержащими ЭДТА вместо тартрата, показывают, что основные закономерности влияния добавок остаются такими же.

Ускоряющие добавки. Стабилизаторы в концентрациях, оказывающих эффективное стабилизирующее действие, в большей или меньшей степени уменьшают скорость меднения. Ускорить процесс осаждения меди можно увеличением концентраций реагирующих веществ или температуры (при этом, однако, обычно уменьшается стабильность раствора) и введением специальных добавок. В качестве ускоряющих добавок предложено использовать анионы — ацетат, нитрат, хлорид, хлорат, перхлорат, молибдат, вольфрамат, формиат, тартрат, цитрат, лактат, фталат (при концентрации оксалата примерно 1 моль/л скорость процесса увеличивается до 2 раз); органические соединения йода; органические соединения, содержащие делокализованные π -связи — производные мочевины, ароматические амины (пиридин, цитозин, гуанидин, *п*-нитробензиламин и др.); полиоксикаламины, содержащие несколько полиолефингликолевых цепей; сульфид серебра.

Путем подбора концентраций компонентов раствора, содержащего смесь лигандов — тартрат и ЭДТА, добавки феррицианида и цистина, можно в 2–3 раза увеличить скорость меднения в стабильном растворе, хотя получаемые при этом покрытия отличаются значительной шероховатостью.

Очень эффективными ускорителями в трилоновых растворах являются аммиак и некоторые алкиленамины (например, этилендиамин). В их присутствии скорость меднения может увеличиваться до 10 раз [2].

Пассивация меди

Иногда в ходе меднения поверхность меди теряет свои каталитические свойства, реак-

ция восстановления прекращается, то есть поверхность пассивируется. При этом изменяется окраска медного слоя, цвет из характерного для меди переходит в желтый, коричневатый, зеленый.

Пассивации меди в тартратных растворах способствуют следующие факторы: 1) низкое значение pH раствора; 2) контакт поверхности меди с кислородом воздуха; 3) повышение температуры раствора. В трилоновых растворах пассивации меди практически не наблюдается.

Пассивные пленки на меди легко восстанавливаются до меди формальдегидом в сильнощелочном растворе, содержащем, например, 1,4 г/л NaOH и 0,3 моль/л CH_2O .

Восстановление пассивных пленок химическим и электрохимическим способами показало, что они состоят в основном из Cu_2O , толщина их за несколько минут достигает 0,01–0,03 мкм.

Слой Cu_2O толщиной 2–3 нм образуется при промывании свежеприготовленной поверхности меди. Если такую поверхность опять внести в раствор химического меднения с достаточно высоким pH, то этот тонкий слой Cu_2O восстанавливается и процесс меднения протекает нормально. При низких pH пленка Cu_2O может расти, и поверхность будет оставаться пассивной [2].

В следующем номере журнала будут обсуждаться практические вопросы, связанные с эксплуатацией растворов химического меднения.

Продолжение следует

Литература

1. Медведев А. М. Надежность и контроль качества печатного монтажа. М.: Радио и связь, 1986.
2. Шалкаускас М., Вашкялис А. Химическая металлизация диэлектриков. Л.: Химия, 1985.
3. Химическое осаждение металлов из водных растворов // Свиридов В. В., Воробьева Т. Н., Гаевская Т. В., Степанова Л. И. / Под ред. В. В. Свиридова. Минск: Изд-во «Университетское», 1987.