

# Анализ технологий прямой металлизации отверстий печатных плат

## Часть 2

П. Григорьев<sup>1</sup>, Т. Шимчук<sup>2</sup>, Т. Цивинская<sup>3</sup>

УДК 381.4 | ВАК 05.27.06

Усовершенствование палладиевых систем прямой металлизации [1] дало толчок к разработке новых образцов оборудования горизонтального типа, обеспечивающего большую производительность и высокое качество за счет внедрения более интенсивных методов подготовки поверхности: ультразвукового, вакуумного и термического. В свою очередь, эти методы открыли путь к поиску возможности создания электропроводящих покрытий, предшествующих гальваническому меднению, на основе иных материалов – менее химически активных, чем палладий, и при этом более доступных по стоимости и простоте получения. Эти поиски привели к разработке целого ряда технологий, известных как графитовые и полимерные системы прямой металлизации.

### ГРАФИТОВЫЕ СИСТЕМЫ

К моменту начала исследования процессов, которые могли бы заменить палладий [1] в технологии прямой металлизации отверстий в печатных платах, технический углерод в больших объемах применялся, например, в производстве резины, поэтому изучению его свойств и влияния на качество продукции уделялось особое внимание. А с началом активного внедрения в производство пластиковых масс исследователи выяснили, что введение технического углерода в их состав позволяет придавать им специальные свойства: электропроводность, способность снижать статическую электризацию, поглощать ультрафиолетовое и радиоизлучение и т. д. Поэтому неудивительно, что, когда пришло время искать альтернативу палладию, специалисты обратили внимание на технический углерод.

Доктор Карл Минтен (Carl Minten) в 1988 году запатентовал второй по значимости, после палладиевых технологий, метод металлизации отверстий с использованием углеродной суспензии технического углерода, а Олин Хант (Olin Hunt) разработал технологию на базе этого патента. Технологию называли Black Hole и в 1991 году продали ее компании MacDermid, специалисты которой значительно усовершенствовали техпроцесс и присвоили ему наименование Black Hole II.

Как уже сказано, основным материалом в технологиях Black Hole и Black Hole II является углеродная суспензия. Суспензия – это смесь, где твердое вещество распределено в виде мельчайших частиц во взвешенном состоянии в жидкости. В углеродных суспензиях используется технический углерод – разновидность углеродного материала, представляющая собой тонкодисперсный порошок

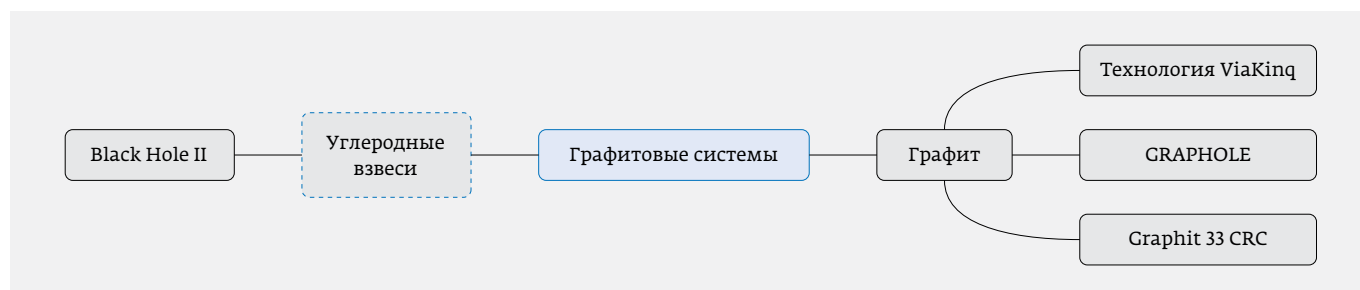


Рис. 1. Графитовые технологии прямой металлизации отверстий

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э.Баумана, аспирант, grigorevpv@gmail.com.

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э.Баумана, студентка, tshimchuk@list.ru.

<sup>3</sup> ООО «Сенсорные системы МГТУ им. Н.Э.Баумана», главный технолог, tsivinskaya\_t@mail.ru.

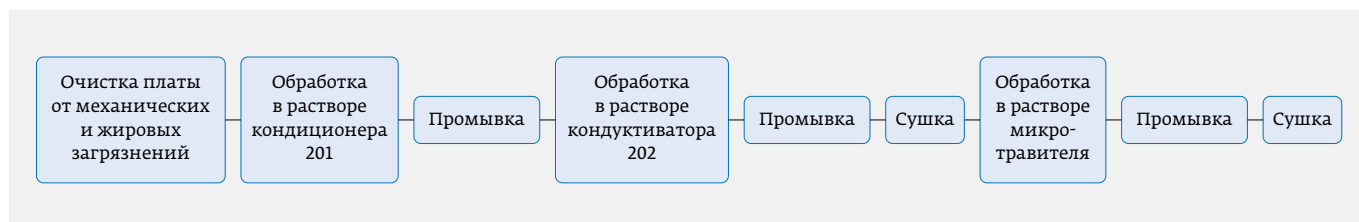


Рис. 2. Последовательность операций технологического процесса ViaKing

черного цвета, получаемый при неполном сгорании или термическом разложении углеродсодержащих веществ в интервале температур от 1200 до 1700 °С. Частицы, в зависимости от способа получения, имеют размеры в диапазоне от 9 до 300 нм и более. Они связаны между собой в цепочки и образуют агрегаты, которые, в свою очередь, способны объединяться в рыхлые цепные образования, называемые агломератами.

Так как углерод является гидрофобным веществом, его частицы способны на своей поверхности сорбировать из водных растворов различные компоненты. При обработке отверстия на активированной поверхности диэлектрика за счет реакции абсорбции углеродом частиц диэлектрика происходит осаждение частиц углерода с образованием электропроводящего слоя, пригодного для последующей операции гальванического покрытия медью.

Следует отметить, что для качественного проведения химической реакции взаимной абсорбции необходимо выполнение обязательного условия: химические связи углерода должны быть свободны. Поэтому для приготовления суспензии может использоваться только деионизированная вода [2]. Это большой минус данной технологии, так как подобная очистка воды – процесс трудоемкий и энергозатратный. Доработка технологии Black Hole компанией MacDermid заключалась в повышении качества подготовки порошка углерода, воды, подбора оптимального состава суспензии и т. п.

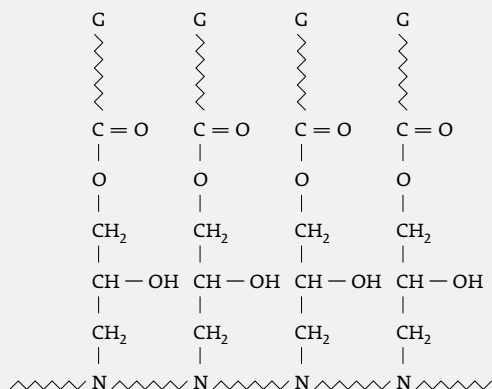
Технология Black Hole II очень критична к качеству подготовки суспензии, от которого зависит степень покрытия диэлектрика; к тому же суспензия имеет склонность к расслоению. Поэтому для гарантии полного покрытия поверхности диэлектрика обработку проводят дважды.

Усовершенствование графитовых технологий пошло по пути разработки процессов, в которых для нанесения проводящей пленки используется коллоидный графит. Основным составом в таких процессах также является водная суспензия высокодисперсного графита, а коррекция ее свойств (стабильности раствора, химической активности, адгезии пленкообразующих компонентов к диэлектрику) осуществляется комбинацией поверхностно активных веществ (ПАВ) и пленкообразующих добавок.

Составы растворов, очередность и длительность обработки являются секретом фирмы-производителя,

и разновидностей этой технологии разработано достаточно много. К числу наиболее эффективных можно отнести технологический процесс ViaKing, разработанный шведской фирмой J-Kem. Этот процесс отличается высокой стабильностью и простотой обслуживания. В качестве электропроводящего материала служит порошок графита, на основе которого изготавливается умеренно щелочная проводящая коллоидная дисперсия под названием «кондуктиватор 202». Графит вместе со специальным органическим связующим образует отрицательно заряженные частицы, которые притягиваются к положительно заряженной поверхности диэлектрика, полученной в результате обработки раствором кондиционера. Последовательность операций технологического процесса показана на рис. 2.

После обработки платы раствором «кондуктиватора 202» необходимо промыть ее водой. Во время промывки активизируется процесс абсорбции коллоидных частиц раствора в структуру волокон диэлектрика и удаляются остатки раствора кондуктиватора. После просушивания при температуре не менее +60 °С на поверхности диэлектрика образуется пленка со структурой, показанной на рис. 3 [3]. Далее промывкой под сильным напором воды с поверхности платы удаляются излишки графита, и после сушки следует обработка раствором микро-травителя для удаления графитовой пленки с фольгированной поверхности платы.



**Рис. 3. Технология J-Кем: образование связей в электропроводящей пленке после сушки. N – азот, G – графит**

Процесс прямого покрытия ViaKinq универсален, его можно применять для металлизации микроотверстий в МПП, отверстий в гибких печатных платах, платах с керамическим наполнителем и из фторопласта-4 (ПТФЭ, тефлон). Процесу свойственны следующие основные преимущества:

- стабильность коллоидной дисперсии, ее нечувствительность к жесткой воде;
- постоянная толщина графитового покрытия;
- отсутствие необходимости двойной обработки для получения хорошей проводимости;
- легкость удаления графитового слоя на этапе микротравления, после чего остается чистая медь [3].

Разновидностью технологии ViaKinq является процесс GRAPHOLE, разработанный фирмой Alfachimici. Отличие между ними заключается в составах растворов. Применяемый в процессе GRAPHOLE раствор CUPROLITE X96 DP – сильнодействующий кондиционер, обеспечивающий полное покрытие внутренней поверхности отверстия даже при кратковременном контакте; наличие такого кондиционера позволило разработать коллоидную суспензию GRAPHOLE с хорошей коллоидной стабильностью при очень низком содержании графита, достигнутой благодаря специальным стабилизаторам. Грамотно подобранная

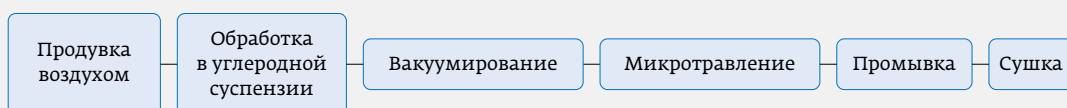
комбинация химических реактивов в составе кондиционера и суспензии обеспечивает формирование плотной пленки с минимальными расстояниями между частицами графита.

Основной недостаток технологии GRAPHOLE заключается в агрессивности применяемых растворов, из-за чего использовать ее эффективно можно только для металлизации двусторонних плат до 3 класса точности.

Токопроводящий лак GRAPHIT 33 от производителя CRC Industries – вещество на основе высокоочищенного коллоидного графита, специального растворителя и органического клеящего вещества. Образует сухое токопроводящее покрытие на диэлектрических поверхностях, обладающее высокими адгезионными свойствами. В настоящее время эту технологию взяли на вооружение любители для проведения металлизации плат в домашних условиях, а также ремонтные мастерские. Но имеется хорошая перспектива использования материала и в промышленности, если в линию металлизации ввести камеру с распылителем и вакуумным столом, обеспечивающим разрезание в пределах  $10^2$  Па.

Поскольку технологии, использующие коллоидные графитовые составы, становятся все более популярными, отдельные фирмы стали разрабатывать и предлагать готовые препараты коллоидного графита. Среди них имеются и российские предприятия. Например, ООО «Коллоидно-графитовые препараты» выпускает материал марки НПК ТУ 2113-125-05015182-98, ООО НПО «ГРАФИТ ГАРАНТ» – марки ГК-1 ТУ6-08-316-75. Это готовые к использованию водные суспензии широкого диапазона применения, способные формировать электропроводящие покрытия. По отзывам потребителей, данные материалы имеют хорошую адгезию к диэлектрикам. Предлагаемая автором схема технологического процесса, показанная на рис. 4, разработана в расчете на применение указанных отечественных материалов.

Технологический процесс нанесения пленки на диэлектрик в отверстиях платы имеет свои особенности, связанные с наличием труднодоступных мест и малыми площадями покрытия. При работе с тонкими пленками в таких условиях для достижения равномерного распределения частиц графита и получения качественной адгезии требуется интенсифицировать прохождение реакций; с этой целью в состав суспензии необходимо



**Рис. 4. Технология применения отечественных препаратов коллоидного графита**



добавить воду и этиловый спирт в соотношении 1:2:2. Вода уменьшает вязкость раствора и действует как катализатор формирования матрицы пленки, спирт активизирует поверхностный слой диэлектрика, улучшает адгезию пленки к диэлектрику и тем самым увеличивает плотность пленки, захватывая не участвующие в процессе молекулы воды.

Обработку платы суспензией целесообразно проводить в ультразвуковой ванне, это позволит удалить микроскопические пузырьки воздуха из самых мелких отверстий и обеспечить поступление в них раствора. Далее с целью освобождения отверстий от излишков коллоидно-графитовой массы плату надо поместить на вакуумный стол и создать под панелью с платой область разрежения с давлением порядка  $10^2$  Па; процесс вакуумирования проводится при температуре  $+60^\circ\text{C}$  в течение 5 мин.

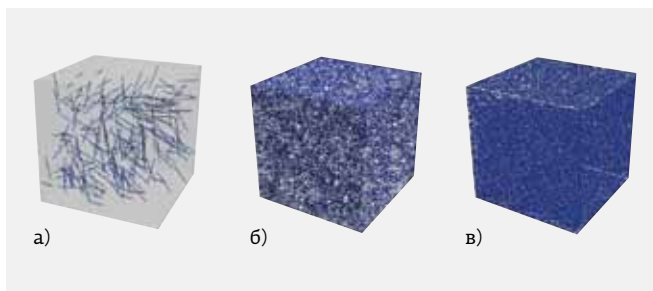
Как следует из сказанного, при внедрении данной технологии линия должна быть дооснащена ультразвуковой ванной и камерой низкого вакуума. Затраты на дооборудование окупятся за счет экономии на расходных материалах, сокращении количества вредных и ядовитых отходов, низкой цены на отечественные графитовые суспензии (в пределах 100–150 руб. за килограмм) и гарантии их поставки в любых количествах.

## ТЕХНОЛОГИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Внедрение нового класса технологий прямой металлизации отверстий – процессов на основе суспензий коллоидного графита – сыграло большую роль в повышении качества печатных плат. Но развитие микроэлектроники уже сейчас требует перехода к новому поколению плат с большим числом слоев, очень высоким значением отношения длины отверстия к его диаметру – при том, что сам диаметр становится все меньше. Сформировать пленку в таких отверстиях не смогут частицы даже самого тонкодисперсного порошка графита. Новым требованиям наилучшим образом соответствует суспензия углеродных нанотрубок (УНТ).

УНТ поставляются в виде порошка, их промышленное производство, начатое в 1990-х годах, продолжает развиваться. Наиболее активно заводы по выпуску порошка УНТ запускаются в Китае, на втором месте находятся США. В России производством данной продукции занимаются отдельные компании при научно-исследовательских центрах; например, ООО «НПП «Центр нанотехнологий» производит порошковый материал Dealtom.

Однако для рассматриваемого в этой статье применения пригодны далеко не всякие УНТ. Самые распространенные сегодня технологии их получения дают на выходе порошки, представляющие собой смесь самых разных форм УНТ: однослойных и многослойных, более или менее длинных, криволинейных, ветвящихся и т. п.



**Рис. 5.** Изображение распределения различных углеродных материалов в матрице: а – технический углерод; б – многослойные УНТ; в – графеновые нанотрубки

И если при изготовлении бетона, различных покрытий и в других такого рода применениях УНТ качество порошка обычно не имеет серьезного значения, то для электроники это принципиальный вопрос. Главным образом это относится к различию свойств многослойных и однослойных УНТ.

Однослойные, или одностенные нанотрубки (SWCNT – single walled carbon nanotubes) называются также графеновыми, поскольку представляют собой тонкие полоски графена, свернутые в цилиндр. Применительно к технологиям получения проводящих покрытий на диэлектриках свойства графеновых нанотрубок делают их единственным универсальным аддитивом, способным улучшать такие свойства, как пространственная изотропность электропроводности, термостойкость, механическая прочность. На компьютерных моделях (рис. 5) видно, что такие наполнители, как технический углерод и многослойные УНТ, неравномерно распределяются в объеме связующего материала, а графеновые нанотрубки за счет образования большого числа связей с молекулами основного вещества образуют в нем однородную трехмерную структуру, играющую роль армирующей и электропроводящей сети [4].

Именно эта способность создавать сплошную армирующую структуру определяет главное преимущество графеновых нанотрубок перед многослойными: для модификации свойств материалов необходимы гораздо меньшие их количества. Растворы на основе графеновых УНТ демонстрируют достаточную эффективность при ультранизких, до 0,01%, концентрациях, что на два или даже три десятичных порядка меньше, чем концентрации технического углерода и многослойных УНТ, необходимые для получения проводящей пленки сравнимого качества.

Эта разница, помимо очевидной экономии аддитива, имеет следствием еще одно важнейшее преимущество SWCNT. Дело в том, что высокие концентрации нанотрубок оказывают значимое влияние на свойства модифицируемого материала, критически меняя его вязкость, температурные характеристики, скорость протекания

Продувка воздухом

Обработка в суспензии с ИПС

Вакуумирование

Микротравление

Промывка

Сушка

**Рис. 6.** Схема технологического процесса с использованием суспензии нанотрубок на основе ИПС

химических реакций. Это может вызвать сложности внедрения в стандартный технологический процесс; использование же графеновых трубок не требует внесения в него кардинальных изменений.

В нашей стране прорыв в разработках технологий синтеза SWCNT совершила компания OCSiAl, созданная в 2010 году российскими учеными и предпринимателями, сделавшими ставку на внедрение изобретения академика Михаила Предтеченского [5]. Уже в 2015 году созданный компанией в Новосибирске промышленно-исследовательский реактор выдал первую партию в 1250 кг графеновых нанотрубок, а к настоящему времени запущена промышленная установка Graphetron 1.0 мощностью до 10 т в год.

По данным публикации в «Строительной газете» от 17 мая 2018 года, сегодня на рынке присутствуют два крупных производителя графеновых нанотрубок – российская фирма OCSiAl и японская Zeon. Японцы продают SWCNT по цене около 10 тыс. долл. за килограмм при ежегодном производстве около тонны, и это сильно ограничивает промышленное применение их продукции. В российской же компании утверждают, что им удалось существенно снизить цену продукта – фирма готова запустить установку мощностью 50 т нанотрубок в год по цене от 100 до 200 долл. за килограмм. Кстати, OCSiAl – первый в мире производитель одностенных углеродных нанотрубок, прошедший сертификацию в соответствии с регламентом Европейского союза REACH.

Порошок нанотрубок, произведенный в реакторе, представляет собой массу переплетенных волокон. Чтобы получить ожидаемую эффективность от внедрения технологии на основе SWCNT, необходимо добиться равномерного их распределения в рабочем материале. Компания OCSiAl разработала два варианта решения данной проблемы.

Для производств с большими мощностями разработана установка TUBBOX, реализующая уникальную технологию производства готовых суспензий с оптимальными для конкретного потребителя свойствами на основе нанотрубок TUBALL. Для малых производств предлагается выпуск готовых суспензий на основе различных растворителей. Потребителю для приготовления рабочего раствора остается разбавить содержимое упаковки указанным растворителем до необходимой концентрации.

В частности, для обработки многослойных печатных плат лучше всего подходит суспензия с нанотрубками на основе изопропилового спирта (ИПС). Последний, благодаря своим свойствам многофункционального растворителя, способен выполнять роль кондиционера, активирующего поверхность диэлектрика. По мере испарения ИПС нанотрубки за счет своей химической активности соединяются между собой и с подложкой, образуя на диэлектрике сплошную прочную электропроводную пленку. Для удаления из отверстий излишков суспензии применяется несложное вакуумное оборудование. В результате технологический процесс упрощается до вида, представленного на рис. 6.

Несмотря на высокую стоимость продукции компании OCSiAl, освоение предлагаемого ею технологического процесса выгодно: с одной стороны, возможность многократного применения суспензии и изопропилового спирта обеспечивает их малый расход, с другой – гарантируется высокое качество металлизации поверхности диэлектрика в глухих отверстиях и на всем протяжении сквозных отверстий самого малого диаметра в платах с большим числом слоев.

Сравнительные характеристики некоторых из описанных в статье технологий группы графитовых систем приведены в табл. 1.

Сравнительный анализ технологий прямой металлизации, основанных на графитовых системах, показывает следующее:

- технология Black Hole II уступает технологиям, использующим коллоидный графит, по количеству

Таблица 1. Основные операции технологий группы графитовых систем

Black Hole II	ViaKinq, GRAPHOLE	Токопроводящий лак GRAPHIT 33	TUBALL	Суспензия НПК
Продувка платы сжатым воздухом	Подготовка поверхности платы: удаление механических загрязнений	Обезжиривание поверхности платы методом погружения в растворитель	Ультразвуковая ванна с ИПС	Продувка сжатым воздухом
Обработка раствором-активатором для обеспечения надежной абсорбции частиц графита	Обработка раствором для обеспечения надежной абсорбции частиц графита	Продувка сжатым воздухом	Продувка сжатым воздухом	Ультразвуковая ванна с углеродной суспензией
Обработка платы деионизированной водой	Струйная отмывка водой остатков раствора-кондиционера	Обработка лаком GRAPHIT 33	Распыление суспензии нанотрубок в камере с вакуумным столом	Вакуумирование при температуре 60 °С
Погружение платы в ванну с углеродной эмульсией	Обработка раствором коллоидной дисперсии графита	Выдержка 10–15 мин при температуре 60 °С	Нагрев до 60 °С	Удаление графитовой пленки с фольгированной поверхности платы
Термообработка при температуре 60 °С	Струйная отмывка водой остатков дисперсии	Удаление лака с фольгированной поверхности платы	Удаление графитовой пленки с фольгированной поверхности платы	Струйная промывка водой
Погружение платы в ванну с углеродной эмульсией	Удаление излишков влаги при температуре 60 °С	Отмывка пленки с медной поверхности при помощи салфетки, смоченной в ацетоне	Удаление остатков микротравителя струйной промывкой	Сушка при температуре 120 °С
Струйная отмывка платы от остатков суспензии деионизированной водой	Удаление с поверхности медной фольги слоя графитовой пленки и подготовка поверхности к осаждению электролитической меди		Сушка при температуре 120 °С	
Термообработка платы при температуре 120 °С	Струйная отмывка водой поверхности платы			
Удаление с поверхности медной фольги слоя графитовой пленки и подготовка поверхности к осаждению электролитической меди	Термообработка платы при температуре 120 °С			
Струйная отмывка водой поверхности платы				
Термообработка платы при температуре 120 °С				



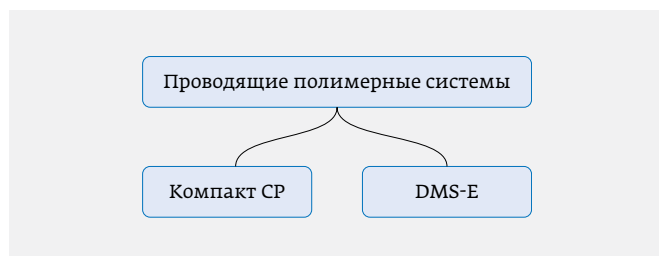


Рис. 7. Проводящие полимерные системы

операций технологического процесса и, главное, по требованиям к качеству воды;

- из графитовых технологий лидирует технология ViaKing, основные рабочие растворы которой – кондиционер и «кондуктиватор 202», – в отличие от растворов технологии GRAPHOLE, позволяют эффективно и безопасно обрабатывать многослойные печатные платы без предъявления требований к жесткости воды;
- недостатком технологии GRAPHIT 33 является то, что в своем первоначальном виде она применима только для изготовления несложных плат при ручном использовании в лабораторных и домашних условиях, а также в небольших мастерских. Однако ее потенциал делает возможной разработку оборудования для использования этой технологии в мелкосерийном производстве;
- по универсальности применения, качеству покрытия, длительности технологического цикла и расходу материалов лидирует технология с применением суспензии углеродных нанотрубок TUBALL в растворе изопропилового спирта, но широкое внедрение этой технологии тормозится высокой ценой графеновых трубок.

## ПРОВОДЯЩИЕ ПОЛИМЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

Научной основой развития этой группы технологий прямой металлизации можно считать исследования А. Хиигера, А. МакДиармида и Х. Ширакава в области проводящих полимеров, отмеченные Нобелевской премией по химии 2000 года. Было показано, что специальные методы синтеза позволяют варьировать проводимость полимеров в широком диапазоне ( $\rho = 10^6 - 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ) [6].

Хотя до настоящего времени обобщить закономерности электропроводности полимеров исходя только из их молекулярного строения не удалось, попытки использования электропроводящих полимеров в технологиях прямой металлизации уже были предприняты. Сегодня можно говорить о двух системах этой группы, доказавших свою работоспособность и имеющих шансы найти практическое применение. Это процессы DMS-E и Compact CP (рис. 7).

Технологический процесс DMS-E [7, 8], схема которого показана на рис. 8, разработан в компании Blasberg Oberflächentechnik GmbH (сейчас Enthone GmbH) в середине 1990-х годов. После обработки отверстий кондиционирующим раствором ИПС поверхность диэлектрика за счет активизации абсорбционных свойств приобретает качество катализатора химических реакций. Далее производится обработка платы в водном растворе перманганата калия, и на поверхности диэлектрика образуется рыхлая пленка двуокиси марганца, служащая основанием для образования полимерной проводящей пленки на следующем этапе.

Этот этап состоит в обработке платы раствором мономера 3,4-этилендиокситиофина (английская аббревиатура – EDT) в органической кислоте, под воздействием которой слой двуокиси марганца мгновенно вступает в реакцию с мономером, образуя сплошную полимерную пленку, а марганец восстанавливается до  $\text{Mn}^{+2}$  [8]. Эта пленка обладает электропроводностью, однако фрагменты цепочек полимера ориентированы в ней произвольно, геометрия на уровне десятых и сотых долей миллиметра нерегулярна. Поэтому требуется следующий этап, в ходе которого плата подвергается воздействию раствора серной кислоты, вызывающему окислительную поляризацию молекул полимера и, как результат, упорядочение связей между ними. Электропроводящая полиэтилендиокситиофеновая пленка, сформированная на стенках отверстий, приобретает организованную структуру и плотную, четко ограниченную поверхность.

Кроме того, кислота очищает от электропроводящей пленки медные поверхности печатной платы. Промывка водой удаляет частицы материалов и остатки химических веществ, подготавливая поверхность к электролитическому меднению.

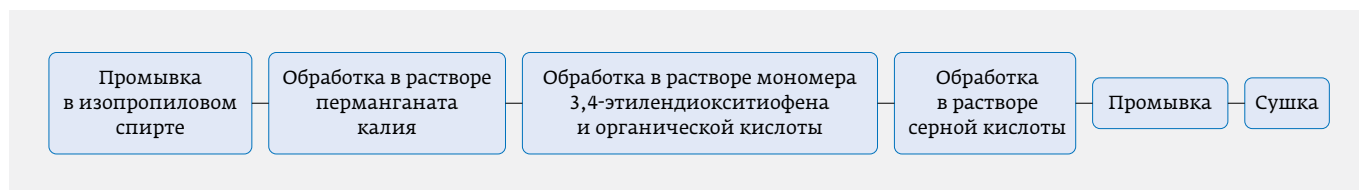


Рис. 8. Схема технологического процесса DMS-E



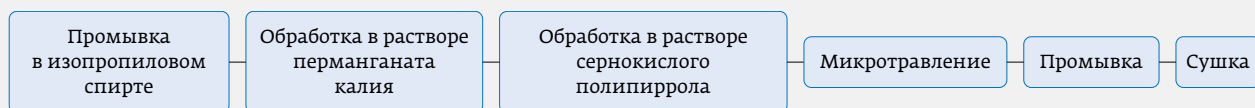


Рис. 9. Схема технологического процесса Compact CP

Технология Compact CP [8] была разработана компанией Atotech в 1987 году. Она, в сущности, идентична DMS-E, за исключением того, что в ней комбинируются катализаторный этап и этап фиксации, то есть после обработки в перманганате калия следует обработка сернистой кислотой полипиррола. В результате восстановительно-окислительной реакции мономер полипиррол переходит в состояние полимера с образованием электропроводящей пленки. Процесс показан на рис. 9.

Технологии, основанные на применении электропроводящих полимеров, капризны, требуют разработки средств контроля за соблюдением параметров технологического процесса и качеством применяемых материалов. При промышленном использовании придется разрабатывать методики, реактивы и технические устройства для утилизации отработанных растворов. Но, учитывая перспективу продолжения процесса миниатюризации электроники и роста плотности упаковки компонентов на печатных платах, весьма вероятно, что данные технологии станут конкурировать не только с «классическими» палладиевыми и углеродными системами, но и с процессами на основе суспензий с нанотрубками, поскольку позволяют работать со столь же тонкими и длинными отверстиями.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя описанные в обеих частях данной статьи технологии, можно сделать вывод, что в настоящее время оптимального технологического процесса прямой металлизации не существует. Каждый техпроцесс обладает определенными достоинствами и недостатками:

- не все технологии одинаково хорошо адаптированы как к вертикальному оборудованию, так и к горизонтальному;
- некоторые процессы лучше, чем прочие, соответствуют жестким требованиям, предъявляемым к многослойным платам высоких классов точности;
- некоторые технологии лучше подходят для работы с платами с мелкими отверстиями;
- имеются процессы, которые критически чувствительны к загрязнению технологических растворов;
- некоторые технологии требуют особых условий промывки;
- во многих случаях имеются сложности с обеспечением межоперационного контроля качества металлизации;

- технологии с проводящими полимерами требуют дополнительных исследований по долговременной стабильности полимерной пленки, так как все полимеры имеют общий недостаток: со временем в них начинается необратимый процесс разрушения – так называемое старение.

Наиболее универсальным выглядит технологический процесс с использованием суспензии углеродных нанотрубок: он проходит в растворе, следовательно, качественно обеспечивается смачиваемость поверхности отверстий в плате с любым количеством слоев, а с учетом наноразмеров SWCNT – отверстий с очень маленьким диаметром. Кроме того, пленка, образованная углеродом, способна обеспечить долговременную стабильность своих свойств.

В любом случае, для каждого конкретного производства должна быть выбрана определенная технология, учитывающая требования к изготавливаемым платам, имеющееся оборудование, возможности системы утилизации отходов, которой располагает предприятие.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев П., Шимчук Т., Цивинская Т. Анализ технологий прямой металлизации отверстий печатных плат // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2018. № 8. С. 138–141.
2. Мухамадеев Э.З., Кудашева Ф.Х. Влияние комплексных показателей качества технологической воды на pH водной суспензии технического углерода // Вестник Башкирского университета. 2005. № 3. С. 35–38.
3. Шкундина С. Процесс прямого покрытия ViaKing // Технологии в электронной промышленности. 2014. № 1. С. 38–41.
4. Ma P. C., Siddiqui N. A., Marom G., Kim J. K. Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: a review // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2010. 41 (10). 1345–1367.
5. Способ получения углеродных нанотрубок и реактор (варианты). 19.04.2011 В82В3/00, В82У40/00, С01В31/02 Патент № 2478572.
6. Саввинова М.Е. Электропроводящие полимерные композиционные материалы электротехнического назначения // Технические науки. 2015. № 4 С. 44–49.
7. Blasberg, Europatent 0489759.
8. Колнаго А., Хьюб Ю. Современные способы металлизации // Мир гальваники. 2009. № 1 (09). С. 26–30.